



Planta química per a la producció de FREÓ-13

**Autors:**

Caterina Bartomeu García
Diego Chipantasi Quispe
Anabel Romero Jimenez
Manel Rovira Blanco
Alberto Sánchez Rodríguez

Tutor:

Carles Solà i Ferrando

Titulació:

Grau en Enginyeria Química

5 de Juny de 2015

10.DISSENY D'EQUIPS DE PROCÉS



ÍNDEX

DISSENY D'EQUIPS D'EMMAGATZEMATGE.....	¡Error! Marcador no definido.
Introducció	3
Tancs d'emmagatzematge	¡Error! Marcador no definido.
Tanc d'emmagatzematge d'àcid fluorhídric anhidre (HF).....	11
Tanc d'emmagatzematge de tetraclorur de carboni (CCl ₄)	18
Tanc d'emmagatzematge d'àcid clorhídric (HCl)	25
Tanc d'emmagatzematge de FREÓ-13	32
Tanc d'emmagatzematge de pentaclorur d'alumini	39
Tancs pulmó	40

11.1. Tancs d'emmagatzematge

11.1.1. Introducció

Es considera tanc o recipient a qualsevol contenidor capaç d'emmagatzemar un fluid a pressió manomètrica, ja sigui a pressió interna o externa i independentment de la seva forma o dimensió.

El disseny dels equips s'ha atènyer a unes normes que permetin la seva aplicació i instal·lació a una planta química. Existeixen un conjunt de normes o estàndards que es poden aplicar i complementar, com són les API (American Petroleum Institute), les normes ASME (American Society of Mechanical Engineers), les DIN (Deutsches Institut für Normung), etc.

En el cas d'aquest projecte, tant el disseny de tancs de procés com els d'emmagatzematge es duen a terme amb la normativa ASME (secció VIII divisió 1). Aquesta cobreix el disseny, la selecció dels diferents equips, el material en funció de les condicions de treball (temperatura pressió, esforç màxim, corrosió), els criteris d'aprovació, inspecció, etc.

- **Selecció del material**

El material es seleccionat en funció del tipus de component químic que es vulgui emmagatzemar i de les seves propietats. S'ha de tenir en compte l'estat del reactiu o producte a emmagatzemar, la capacitat de corrosió que té l'espècie sobre el material de disseny.

Existeixen una gama molt ampla de materials de construcció que van des de l'acer inoxidable convencional fins a materials polimèrics o ceràmics. En el cas d'aquest projecte es vol treballar amb productes molt corrosius, com l'àcid fluorhídric, l'àcid clorhídric, etc. Per tant, s'han d'escollir els materials necessaris per garantir la durabilitat dels equips i la seguretat de la planta.

- **Selecció del tipus de recipient.**

Primer s'ha de realitzar una selecció del recipient en funció de l'ús que hagi de desenvolupar.

Segons la seva utilització es poden classificar en:

- a) Emmagatzematge (mescla, acumuladors, etc.)
- b) Procés (reactors, columnes, bescanviadors de calor, etc.)

En segon lloc s'ha d'escollir la forma la forma el tanc podran ser:

- Esfèrics
- Cilíndrics (Horizontals, Verticals)

El disseny *esfèric* és el més eficient de cara a la pressió que pot suportar el tanc, però la seva construcció és més complicada i fa que el preu augmenti. Per aquest motiu, el disseny més utilitzat sol ser el de tanc cilíndric, que és més versàtil i econòmic.

- **Tipus de Capsal**

Un cop s'ha escollit el tipus de recipient i en el cas que aquest sigui un cilindre, s'ha d'escollir el tipus de capsal:

Capsal Pla.- Aquest tipus de capsal s'utilitza quan es vol treballar a pressió atmosfèrica, també es solen utilitzar per la fabricació dels fons de tancs que treballen a pressió major que l'atmosfèrica.

Capsal Pla amb cella.- Aquest tipus de capsal també s'utilitza per treballar a pressió atmosfèrica, però a diferència del capsal pla, té un límit dimensional de 6 metres de diàmetre. Té com a avantatge el seu baix cost, associat a la facilitat en la construcció i dimensionament.

Capsal cònic o toricònic.- El capsals amb aquest tipus de geometria s'utilitzen en general com a fons de tanc, on hi pot haver acumulació de sòlids, no tenen limitació en dimensionament, però si en quant a l'angle del vèrtex, que no ha de ser major a 60°.

S'utilitzaran el caps cònics per els tancs d'emmagatzematge que treballin a pressió atmosfèrica.

Capsal de geometria esfèrica.- Es poden trobar varis capsals amb aquesta geometria, però els més utilitzats a l'indústria són els **semiesfèrics, semielíptics, toriesfèrics**.

Els capsals toriesfèrics són els que més acceptació tenen dins la indústria química, per tant, seran el tipus de capsal que s'utilitzarà al disseny d'equips d'aquest projecte quan es treballi a pressió.

La principal característica dels *capsals toriesfèrics* és que el seu diàmetre esfèric es pot aproximar al diàmetre del tanc. Es poden dissenyar amb diàmetres entre 0,3 i 6 metres.

Per altra part, els capsals *semielíptics i semiesfèrics* s'utilitzen quan l'espessor del capsal toriesfèric és elevat i per tant també el cost. Si s'utilitzen capsals semiesfèrics es pot dissenyar el tanc a la mateixa pressió i amb menys gruix de paret amb limitacions respecte el diàmetre

- **Gruix de les parets**

Un cop especificat el tipus d'equip, així com el tipus de capsal, s'ha de calcular el gruix, tant de la secció cilíndrica com dels caps. Aquesta variable s'obté mitjançant les dimensions externes o internes del tanc, així com variables pròpies del procés, com poden ser la pressió interna o externa, la corrosió etc.

El gruix de la paret vindrà especificat mitjançant la norma ASME, tenint en compte que se li ha d'afegir el gruix corresponent a la corrosió que patirà el material en mm/any.

També se li ha d'afegir el gruix de recobriment en el cas de treballar amb substàncies molt corrosives, com es el cas de l'àcid fluorhídric o clorhídric. Els dipòsits per aquestes substàncies aniran recoberts de polímers d'alta densitat o tefló.

A continuació es presenten les equacions que s'utilitzaran per el disseny dels tancs d'aquest planta:

Gruix del cilindre.- per el càlcul del gruix dels cilindres que conformaran els equips s'utilitzaran la figura i equació mostrades a continuació:

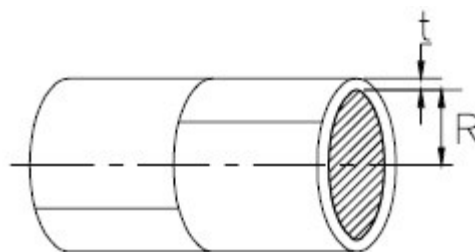


Figura 11.1. Gruix del cilindre.

$$t_{cilindre} = \frac{P \cdot R_{in}}{SE - 0.6P} + C1 \text{ (Eq. 11.1)}$$

On:

- **[P]** és la pressió de disseny en bars

- $[R_{int}]$ és el radi intern del cilindre en unitats de longitud
- $[S]$ és la tensió a l'esforç del material en bars
- $[E]$ és el factor de soldadura
- $[C1]$ es el factor de corrosió en unitats de longitud, normalment mm/any.

Gruix de cap toriesfèric.- Per el càlcul del gruix dels caps toriesfèrics s'utilitzarà

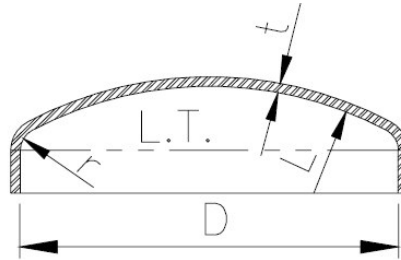


Figura 11.2. Il·lustració del cap toriesfèric.

$$t_{capsal\ tor} = \frac{P \cdot L \cdot M}{2SE - 0.2P} + C1 \text{ (Eq. 2)}$$

On:

- $[L]$ es el radi del capsal, que es pot aproximar al diàmetre del cilindre.

Gruix de capsal Cònic.- El capsal cònic s'utilitzarà per el disseny dels capsals superiors dels tancs d'emmagatzematge que treballen a pressió atmosfèrica, la seva equació de disseny es presenta tot seguit:

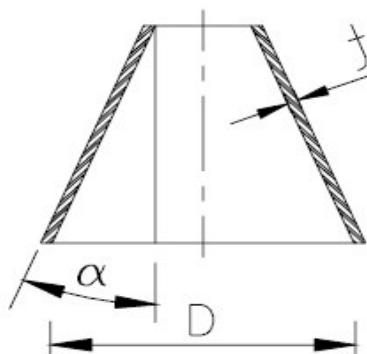


Figura 11.3. Il·lustració del capsal cònic.

$$t_{con} = \frac{P \cdot D \cdot \sin \alpha}{2 \cdot \cos \alpha \cdot (SE - 0.6P)} + C1 \text{ (Eq. 3)}$$

On:

- $[\alpha]$ es l'angle de mitja secció cònica, que pot tenir un màxim de 30° C.

- **Variables de disseny**

A continuació es descriuen les variables a especificar i la seva forma de càlcul:

Pressió d'operació (P_o) i de disseny (P).- La *pressió d'operació* és com es denomina a la pressió de treball i és la pressió manomètrica a la que serà sotmès el recipient operant amb normalitat.

La *pressió de disseny* s'estableix en funció de la pressió d'operació tenint en compte les equacions:

$$\text{Si } P_o > 20.67 \text{ bar aleshores:} \quad P = 1.1 \cdot P_o \text{ (Eq. 4)}$$

$$\text{Si } P_o < 2.067 \text{ bar aleshores:} \quad P = P_o + 2.067 \text{ bar} + P_h \text{ (Eq. 5)}$$

Pressió Hidrostàtica (P_h).- La pressió hidrostàtica és aquella que es produeix al recipient a causa de la columna de fluid i s'ha de tenir en compte sobre tot a recipients verticals. La seva estimació es realitza de la següent manera:

$$P_h = 1.5 \cdot P \cdot \frac{Sta}{Std} \text{ (Eq. 6) [bar]}$$

On Sta i Std són els esforços del material a la temperatura ambient i de disseny respectivament.

També es pot calcular amb la relació:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h \text{ [Pa]} \text{ (Eq. 7)}$$

Esforç a la tensió [S].- És l'esforç màxim al que es pot sotmetre un material en condicions d'operació normals. El valor que se li sol donar és un 25% l'esforç últim a la tensió en unitats de pressió.

Eficiència a la soldadura [E].- Es tracta d'un valor que es dona en funció del grau de confiança que genera la soldadura. Com a valor típic en aquest projecte s'escull 0.85.

Sobre-espessor [$C1$].- És el valor que cal afegir al gruix estimat per operació normal, degut a factors com la corrosió o l'abradió mecànica dels recipients.

La tolerància a la corrosió es un dels factors més importants a l'hora d'escollir un material per la construcció d'un recipient d'emmagatzematge. Per tant, s'ha d'establir un valor (C1) en funció de la corrosió esperada (mm/any) i afegir-la al gruix estimat per l'operació en la normalitat. Sol ser un valor que oscil·la entre 1 i 6 mm en materials com l'acer inoxidable.

Factor M.-Aquest és un factor que s'aplica en el càlcul dels caps toricsfèrics, i que dona una relació entre el radi intern del cap (L) i el radi intern de la cantonada (r). Es pot estimar de la següent manera:

$$M = \frac{3 + \left(\frac{L}{r}\right)^{0,5}}{4} \quad (Eq. 8)$$

També es una dada que es pot trobar tabulada.

Temperatura de disseny.- La temperatura de disseny [T] es determina sumant-li entre 20 i 25 °C a la temperatura d'operació [To] per motius de seguretat.

$$T = T_o + 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (Eq. 9)$$

Pes dels tancs.- Un cop s'ha dissenyat i dimensionat el tanc s'ha de calcular el seu pes buit i ple de líquid per tal de determinar l'esforç al que es veuran sotmesos els suports del tanc. Cada tanc tindrà un pes en funció de la seva geometria i material.

- **Emmagatzematge de matèries primeres.**

A CADMA chemicals, s'emmagatzemaran les següents substàncies com a matèries primeres:

- a) Àcid fluorhídric anhidre (HF 99%)
- b) Tetraclorur de Carboni (CCl₄ 99%)

Totes les substàncies han de ser lo més pures possibles, intentant que no continguin aigua per evitar possible reaccions no desitjades, corrosió dels aparells o la desactivació dels catalitzadors.

- **Emmagatzematge de productes**

A la CADMA chemicals s'emmagatzemaran els següents productes i subproductes:

- c) FREÓ-13 (CClF₃, producte principal)
- d) Àcid clorhídric (HCl 30%, subproducte)

En el cas del FREÓ-13 s'ha optat per treballar a pressió atmosfèrica i a temperatures criogèniques. Fet que obliga a la utilització de nitrogen per mantenir-lo a temperatures baixes. Per altra part l'àcid clorhídric s'emmagatzemarà diluït al 30 % màssic i en condicions normals de pressió i temperatura (1 atm i 25°C).

- **Capacitat d'emmagatzematge**

Per produir 10000 tones l'any de FREÓ-13 s'ha de garantir que la quantitat emmagatzemada de les matèries primeres sigui la correcta. També s'ha de tenir en compte que es poden produir imprevistos i que aquests poden aturar la producció, com son la manca de reactius o lots contaminats d'aquests.

En el cas d'aquesta planta, s'ha decidit tenir tancs d'emmagatzematge amb capacitat per **18 dies**. Sent realment útils 15 dies operant amb normalitat i tres dies més per imprevistos a la producció i el transport, tant en l'arribada de reactius com en la sortida de productes.

- **Venteig**

Tots els contenidors o recipients hauran de disposar d'un sistema de venteig. Aquests permeten mantenir la pressió constant dins el recipient en operacions d'emplenat o buidament dels tancs, així com també quan es produeixen canvis a la temperatura ambient, evitant deformacions a causa de buit o de sobrepressió.

El disseny dels ventejos es pot trobar al corresponent MIE-APQ del Real Decreto 379/2001. En aquests s'especifiquen una sèrie d'equacions per el càlcul d'aquest tipus d'instrument als tancs d'emmagatzematge.

Per equips que treballen a pressió, aquesta no ha d'augmentar en un 10% respecte la pressió del tanc. El cabal de venteig en kg/h pot ser trobat amb:

$$Q_{\text{venteig}} = \frac{Q}{L} \text{ (Eq. 10)}$$

Per el cas de tancs que treballen a pressió atmosfèrica el cabal del Venteig pot ser calculat de la següent manera:

$$Q_{venteig} = \frac{4.414 \cdot Q}{L \cdot \sqrt{M}} \text{ (Eq. 11)}$$

On:

- [L] es la calor latent de vaporització en kJ/kg
- [M] és el pes molecular kg/kmol
- [Q] és la calor rebuda en kJ/h en cas de foc extern i que es pot calcular amb la següent equació:

$$Q = 139.7 \cdot F \cdot A^{0.82} \cdot 10^3 \text{ (Eq. 12)}$$

On:

- [A] és la superfície humida en m² del recipient i es calcula en base al 55% de la superfície d'una esfera o el 75% de la superfície total d'un cilindre
- [F] és el factor de reducció que sol prendre valors de 1 o 0.5 en cas de cubetes a distància.

- **Cubetes de retenció**

Per norma general els recipients de superfície d'emmagatzematge hauran de disposar de cubetes de retenció. En aquestes els tancs no poden estar disposats en més de dos files, sent precís que cada filera tingui un carrer o una via adjacent que permeti la intervenció dels equips antiincendis i emergències.

La distància entre la paret i el recipient ha de ser mínim d'un metre, sent en els tancs d'emmagatzematge a CADMA chemicals de 1.5 metres. A més a més totes les cubetes hauran de tenir una pendent per garantir que no hi hagi acumulació de líquid i aquest pugui ser drenat amb més facilitat.

En quant a la capacitat de les cubetes, si aquestes contenen un recipient, la capacitat de la cubeta ha de ser equivalent a la no existència del tanc, és a dir, haurà de contenir tot el volum de líquid del tanc en cas de vessament. Si en té dos o més tancs, la capacitat s'estableix en funció del tanc amb més capacitat, descomptant el volum de tots els recipients que quedarien submergits excepte el de més capacitat.

Si es tracta de líquids de la classe A2, aquests recipients hauran de tenir cubetes a distància que permetin com a mínim contenir el 20% de la capacitat total dels tancs, el tancs estaran rodejats per murs amb una alçada màxima de 1 metre.

Les parets de los cubetes han de ser d'un material que suporti l'alçada total del líquid, resistents a la combustió i la corrosió, i si cal poden dur un recobriments.

L'alçada màxima de les parets haurà de ser de 1,8 m per tenir una bona ventilació i la pendent serà com a mínim d'un 1% .

11.1.2. Tanc d'emmagatzematge d'àcid fluorhídric anhidre (HF)

Els tancs d'emmagatzematge d'àcid fluorhídric s'han de dissenyar en funció a les normes especificades a la ITC-MIE-APQ-006 i 007, corresponent al emmagatzematge de productes líquids corrosius i tòxics. Seguir aquestes normes permet la implantació d'aquet tipus d'equip maximitzant la seguretat en cas de fallada, i intentant minimitzar els danys de les pròpies instal·lacions i del personal que hi treballa. Per el disseny mecànic s'ha utilitzat el codi ASME com abans s'ha explicat.

Com ja es coneix, l'àcid fluorhídric és una substància molt corrosiva i tòxica, fent que el disseny dels equips que treballen amb aquest àcid hagin de tenir característiques especials, sobre tot de cara a la selecció dels materials.

Tot seguit, es presenta un resum de les especificacions dels tancs de HF a la taula 11.1.

Taula 11.1. Resum de les característiques dels tancs.

Paràmetre	Valor
Nº tancs	3
Volum de cada tanc (m ³)	150
Volum de líquid a cada tanc (m ³)	120
D _{intr} , Diàmetre interior cilindre (m)	4.25
L/H, Alçada/Longitud del equip (m)	11.44
Alçada de líquid (m)	3.4
t _{cil} , Gruix del cilindre (mm)	12
t _{capsal} , Gruix del capsal (mm)	16
D _{ext} , Diàmetre exterior del cilindre (m)	4.278
P, Pressió de disseny (bar)	4.92
T, temperatura de disseny (°C)	45
E, Factor de soldadura	0.85
M, relació de radis toriesfèrics	1.54
Pes de l'equip buit (kg)	13483
Pes de l'equip operant (kg)	129703
Pes de l'equip totalment ple (kg)	158758

CONDICIONS D'EMMAGATZEMATGE

Segons la normativa vigent, ITC-MIE-APQ1, l'àcid fluorhídric és una substància de la classe A2, és a dir, una substància líquida a diferents condicions d'emmagatzematge.

S'ha decidit emmagatzemar l'àcid fluorhídric en les següents condicions per tal de tenir-lo líquid.

Taula 11.2. Condicions d'emmagatzematge de HF anhidre.

Temperatura (°C)	25
Pressió (atm)	2,5
Densitat HF (kg/m³)	968,5

Per altra part, els materials de construcció del tanc seran els mostrats a la taula 11.3.

Taula 11.3. Característiques del material del tanc.

Material	AISI 316L
Densitat AISI 316L (kg/m³)	7861
Tensió AISI 316L (atm)	1272,5
Recobrint	Tefló

- **Capacitat d'emmagatzematge de HF anhidre**

A la planta de FREÓ-13 es necessitarà un corrent fresc de **800.24 kg/h** d'àcid fluorhídric anhidre per garantir la producció del refrigerant i a més a més, per garantir l'activació del SbCl₅.

Això vol dir que el consum diari de HF serà de **19206 kg/dia**, equivalent a **19.83 m³/dia**. Aquest darrer valor s'obté relacionant el corrent màssic amb la densitat del líquid (968,5 kg/m³) en les condicions d'emmagatzematge.

L'stock establert serà de 15 dies treballant a la normalitat i de tres dies més si hi ha alguna incidència. Per tant, el disseny dels tancs d'emmagatzematge hauria de correspondre a 18 dies, és a dir, aproximadament **356.95 m³**.

Un cop determinada aquesta quantitat, s'ha de calcular el nombre de camions que portaran l'àcid. S'ha de tenir en compte que els camions cisterna solen tenir volums de 20, 25, 30 m³. En aquest cas es seleccionaran camions de 30 m³. Per tant el nombre de camions serà:

$$N \text{ de Camions} = \frac{356.95 m^3}{30 m^3} = 11.90 \approx 12 \text{ (Eq. 13)}$$

En les pitjors de les condicions, és a dir, havent consumit també la matèria primera de seguretat arribaran 16 camions de HF anhidre, i per tant, es portaran un total de **360 m³** de HF anhidre, sent aquesta la quantitat final que haurà a la planta un cop s'hagin descarregat tots els camions.

DISSENY MECANIC

- **Tipus de tanc**

A l'hora de treballar amb HF s'ha d'optar per utilitzar tancs a pressió. En aquest cas, els tancs seran cilíndrics amb capsals toriesfèrics. La disposició de cada tanc serà horitzontal, ja que aquesta posició permet una distribució més uniforme de les tensions provocades per la pressió d'operació i per l'alçada del líquid. El material utilitzat serà AISI 316L amb recobriments de polietilè reticulat per garantir la resistència a la corrosió, també es poden utilitzar altres materials de recobriments com el tefló. La temperatura de disseny serà 45 °C.

Es dissenyaran **dos tancs** per emmagatzemar el HF anhidre, cadascun amb una capacitat de **150 m³** amb un contingut de 120 metres cúbics de líquid a cadascun. És a dir, cada tanc estarà omplert fins un 80% de la seva capacitat total.

- **Dimensionament**

En el cas del tanc de HF s'ha optat per escollir un **diàmetre intern de 4.25 metres** i una relació de longitud de **2.275 · D_{int}** que permet obtenir un volum total de tanc de 150 m³.

Per estimar la longitud del cilindre es poden agafar valors entre 1,5 i 3 per el diàmetre interior del cilindre, sent 1.5, 2, 2.5 i 3 els valors típics, a continuació es mostra la resolució:

Cilindre:

$$L_{cilindre} = 1.5 \sim 3 \cdot D_{int} \text{ (Eq. 14)}$$

$$L_{cilindre} = 2.275 \cdot 4.25 m = \mathbf{9.37 m}$$

$$V_{cilindre} = \pi \cdot \frac{D_{int}^2}{4} \cdot H_{cilindre} \text{ (Eq. 15)}$$

$$V_{cilindre} = \pi \cdot \frac{4.25^2 m}{4} \cdot 9.68 m = \mathbf{137.54 m^3}$$

Capsal:

$$V_{capsal} = 0.0809 \cdot D_{int}^3 \text{ (Eq. 16)}$$

$$V_{capsal} = 0.0809 \cdot 4.25^3 = \mathbf{6.23 m^3}$$

$$V_{tanc} = V_{cilindre} + 2 \cdot V_{capsal} \text{ (Eq. 17)}$$

$$V_{tanc} = 137.54 m^3 + 2 \cdot 6.23 m^3 = \mathbf{150 m^3}$$

- **Espessor de les parets**

Primer s'ha de calcular la pressió hidrostàtica degut a l'alçada de columna, tenint en compte que el tanc estarà ple fins un 80 % i l'alçada de la columna correspon al diàmetre del tanc, ja que es tracta d'un tanc horitzontal. La densitat del líquid serà de 968,5 kg/m³.

$$Ph = \rho \cdot g \cdot h \text{ [Pa]} \text{ (Eq. 18)}$$

$$Ph = 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 4.25 m \cdot 968.5 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.8 = 32300 Pa = 0.323 bar$$

Com que la pressió d'operació no és superior a 20.067 atmosferes, la pressió de disseny es determina amb les equacions de la introducció corresponents al càlcul de la pressió de treball:

$$P = Po + 2.067 bar + Ph \text{ (Eq. 19)}$$

$$P = 2.6 bar + 2.06 bar + 0.323 bar = 4.92 bar$$

S'estableixen valors de [S] o tensió en funció del material a utilitzar, en aquest cas es selecciona 18700 psi (18947 bar), corresponent al acer inoxidable AISI 316L. Els factor de soldadura com s'ha dit abans serà 0.85. I finalment el factor de corrosió [C1] serà de 2 mm

Per determinar l'espessor del tanc es faran servir les equacions citades a la introducció, corresponents al gruix del cilindre i la corresponent al gruix del capsal torisfèric que es tornen a citar a continuació:

Cilindre:

$$t_{cilindre} = \frac{P \cdot R_{in}}{SE - 0.6P} + C1 \text{ (Eq. 20)}$$

$$t_{cilindre} = \frac{4.92 \text{ bar} \cdot 2130 \text{ mm}}{1289 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 4.92 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 11,6 \text{ mm} \approx \mathbf{12 \text{ mm}}$$

Capsal:

$$t_{capsal \text{ tor}} = \frac{P \cdot L \cdot M}{2SE - 0.2P} + C1 \text{ (Eq. 21)}$$

$$t_{capsal \text{ tor}} = \frac{4.92 \text{ bar} \cdot 4250 \text{ mm} \cdot 1,54}{2 \cdot 1289 \text{ bar} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 4.92 \text{ atm}} + 2 \text{ mm} = 16.73 \text{ mm} \approx \mathbf{18 \text{ mm}}$$

Un cop obtingut aquest valor es pot estimar l'alçada del capsal i finalment l'alçada de l'equip amb:

$$L_{capsal} = 3.5 \cdot t_{capsal} + 0.1935 \cdot D_{ext} - 0.455 \text{ (Eq. 22)}$$

$$L_{capsal} = 3.5 \cdot 18 \cdot 10^{-3} \text{ m} + 0.1935 \cdot (4.25 + 0.018) \text{ m} - 0.455 = 0.88 \text{ m}$$

Equip:

$$L_{Equip} = L_{cilindre} + 2 \cdot L_{capsal} \text{ (Eq. 23)}$$

$$L_{Equip} = 9.68 \text{ m} + 2 \cdot 0.88 \text{ m} = 11.44 \text{ m}$$

- **Pes dels tancs.**

A continuació s'estimaran els kg que pesarà l'equip. Primer es farà una estimació amb els tancs buits i després plens de líquid. Per obtenir el pes del cilindre s'utilitzarà la següent equació:

$$W_{cilindre} = \pi \cdot L_{cilindre} \left(\left(\frac{D_{ext}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{int}}{2} \right)^2 \right) \cdot \rho_{acer \ 316L} \text{ (Eq. 24)}$$

$$W_{cilindre} = \pi \cdot 9.37 \text{ m} \cdot \left(\left(\frac{4.278 \text{ m}}{2} \right)^2 - \left(\frac{4.25 \text{ m}}{2} \right)^2 \right) \cdot 7861 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 12235 \text{ kg}$$

Per el càlcul del pes dels caps toriesfèrics s'utilitzarà l'equació citada a continuació

$$W_{Capsals} = (0,0809 \cdot D_{ext}^3 - 0,0809 \cdot D_{int}^3) \cdot 2 \cdot \rho_{acer \ 316L} \text{ (Eq. 25)}$$

$$W_{Capsals} = (0,0809 \cdot (4.278m)^3 - 0,0809 \cdot (4.25 m)^3) \cdot 2 \cdot 7861 \frac{kg}{m^3} = 1248 kg$$

El pes total es la suma del pes dels diferents components del tanc:

$$W_{total} = W_{cilindre} + W_{Capsals} \text{ (Eq. 26)}$$

$$W_{total buit} = 12235 kg + 1248 = 13483 kg$$

Al valor buit se li ha d'afegir el pes que tindrà el tanc en operació es a dir, 240 m³ o 300 m³ quan esta totalment ple. En el primer cas

$$W_{amb liquid} = 13483 kg + Volum liquid \cdot \rho_{HF} \text{ (Eq. 27)}$$

$$W_{operant} = 13483 kg + 120 \cdot 968.5 = 129703 kg$$

$$W_{operant} = 13483 kg + 150 \cdot 968.5 = 158758 kg$$

- **Venteig**

Com s'ha dit a la introducció, tot tanc d'emmagatzematge necessita un venteig per motius operacionals i de seguretat, d'aquesta manera s'eviten les deformacions als tancs degut als canvis en la pressió.

En el cas dels tancs de HF anhidre, s'ha de calcular la superfície humida del recipient, és a dir la superfície que es veuria afectada per un bescanvi de calor provocat per un foc exterior.

Aquest superfície es por calcular sobre un 75% de la superfície total d'un tanc horitzontal, descomptant la part que es troba en contacte amb el terra. En aquest cas s'estimarà amb la llargada total de l'equip:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_{ext}}{2} \cdot \left(L_{equip} + \frac{D_{ext}}{2} \right) \cdot 0.75 \text{ (Eq. 28)}$$

$$A = 2 \cdot \pi \cdot \frac{4.278 m}{2} \cdot \left(11.44 m + \frac{4.278m}{2} \right) \cdot 0.75 = 183 m^2$$

La calor rebuda es calcula agafant el valor F com a 0.5 ja que el drenatge o les cubetes es trobaran a distancia del tanc, el resultat es el següent:

$$Q = 139.7 \cdot 0,5 \cdot 183^{0.82} \cdot 10^3 = 4994221 kJ/h$$

Finalment, el cabal de venteig es calcula per un tanc a pressió sabent que la calor latent de vaporització del HF és 374,11 kJ/kg:

$$Q_{\text{venteig}} = \frac{4994221 \text{ kJ/h}}{374.11 \text{ kJ/kg}} = 13174.1 \text{ kg/h}$$

- **Cubetes de retenció**

Segons la normativa trobada als documents ITC-MIE-APQ, la distància mínima que han de tenir els tancs de HF (substància tipus A2) respecte els altres tancs ha de ser:

Distància respecte altres tancs (D_{tanc}).- Serà $\frac{1}{4}$ de la suma dels diàmetres de tots els tancs o 2 metres mínim entre tancs, prenen el valor més restrictiu, és a dir, el valor més gran. Els tancs de HF tindran una distància entre ells de **3.21 m** front els dos metres del mínim, s'escollirà una distància de **3.25 m**.

Distància respecte parets (D_{paret}).- 1-1.5 m de distància respecte les parets de les cubetes, s'escollirà sempre **1.5m**

Volum de les cubetes.- En quant a la seva capacitat, aquesta es calcula com el 10 % del total de tots els tancs o el volum del tanc més gran com si aquest no estigues.

Per el cas dels tancs de HF anhidre, el 10 % del total dels tancs és 45 m³, mentre que el volum d'un tanc és de 150 m³, per tant el volum de les cubetes haurà de ser el corresponent a 150 m³. Com que la disposició dels tancs és horitzontal i es posaran en una filera de tres, la longitud i amplitud de les cubetes es calcula amb les equacions:

$$LCubetes = 2 \cdot D_{\text{paret}} + n^{\circ}\text{tancs} \cdot L_{\text{Tanc}} + (n^{\circ}\text{tancs} - 1) \cdot D_{\text{tanc}} \text{ (Eq. 29)}$$

$$LCubetes = 2 \cdot 1.5 \text{ m} + 3 \cdot 11.44 \text{ m} + (3 - 1) \cdot 3.25 \text{ m} = 43.83 \text{ m}$$

$$LCubetes = 2 \cdot D_{\text{paret}} + D_{\text{ext}} \text{ (Eq. 30)}$$

$$LCubetes = 2 \cdot 1.5 \text{ m} + 4.278 \text{ m} = 7.28 \text{ m}$$

Per tant, l'àrea de la cubeta dels tancs de HF és de **319 m²**, amb la possibilitat d'incloure una segona cubeta a distància amb una capacitat del 20% del líquid per evitar en tot el possible la seva pèrdua cap a l'atmosfera i afectar menys al medi ambient. S'ha de tenir en compte que les cubetes d'àcid hauran de ser d'un material que resisteixi prou la corrosió per contacte. També seria recomanada per evitar que en contacte amb l'atmosfera i el aigua es formin núvols tòxics.

11.1.3. Tanc d'emmagatzematge de tetraclorur de carboni (CCl₄)

A continuació es mostren les característiques del disseny dels tancs de CCl₄

Taula 11.4. Resum de les característiques dels tancs de CCl₄.

Paràmetre	Valor
Nº tancs	2
Volum de cada tanc (m ³)	350
Volum de líquid a cada tanc (m ³)	285
D _{int} , Diàmetre interior cilindre (m)	6.5
L/H, Alçada/Longitud del equip (m)	11.56
Alçada de líquid (m)	8.18
t _{cil} , Gruix del cilindre (mm)	16
t _{capsal} , Gruix del capsal cònic (mm)	18
T _{f.pla} , Gruix del fons pla (mm)	10
D _{ext} , Diàmetre exterior del cilindre (m)	6.532
P, Pressió de disseny (bar)	4.54
T, temperatura de disseny (°C)	45
E, Factor de soldadura	0.85
Pes de l'equip buit (kg)	30651
Pes de l'equip operant (kg)	480666
Pes de l'equip totalment ple (kg)	583301

Els tancs d'emmagatzematge de tetraclorur de carboni s'han de dissenyar en funció a les normes especificades a les diferents ITC-MIE-APQ. Seguir aquestes normes permet la implantació d'aquet tipus d'equip, maximitzant la seguretat en cas de fallada e intentant minimitzar els danys de les pròpies instal·lacions i del personal que hi treballa. Per el disseny mecànic s'ha utilitzat el codi ASME com abans s'ha explicat.

El tetraclorur de carboni és una substància molt volàtil i que té una clara incidència en els processos de destrucció de la capa d'ozó. Per aquest motiu el disseny dels tancs ha de ser acurat, intentant minimitzar qualsevol fuga del CCl₄

- **Condicions d'emmagatzematge**

Segons la normativa vigent, ITC-MIE-APQ, el tetraclorur de carboni es podria considerar una substancia de la classe C o D, ja que no s'han trobat dades sobre el seu punt d'inflamabilitat i es considera que aquest punt es troba per sobre del seu punt de bullició, que és 76.5 °C.

Les substàncies de la classe C són aquelles que tenen un punt d'inflamabilitat entre els 55 i els 100°C, mentre que les de classe D tenen el seu punt d'inflamabilitat per sobre dels 100 °C.

En aquest cas, s'ha decidit emmagatzemat el CCL4 com si fos una substancia de la classe C. L'emmagatzematge del tetraclorur de carboni tindrà les següents condicions:

Taula 11.5. Condicions d'emmagatzematge de tetraclorur de carboni.

Temperatura (°C)	25
Pressió (atm)	1
Densitat CCl₄ (kg/m³)	1579

Taula 11.6. Material de disseny.

Material	AISI 316L
Densitat AISI 316L (kg/m ³)	7861
Tensió AISI 316L (bar)	1289,3

- **Capacitat d'emmagatzematge**

A la planta es necessitarà un corrent fresc de **2050.91 kg/h** de tetraclorur de carboni, aquest haurà de ser el més pur possible i anhidre per garantir la seguretat a la planta i la producció del FREÓ-13.

Amb aquest corrent de CCl₄ es pot establir la quantitat diària en **49222 kg/dia**, equivalent a **31.17 m³/dia**. Aquest darrer valor s'obté relacionant el corrent màssic amb la densitat del líquid en les condicions de emmagatzematge.

L'stock, de la mateixa manera que amb l'HF serà de 15 dies treballant a la normalitat i de tres dies més si hi ha alguna incidència. Per tant, el disseny dels tancs d'emmagatzematge correspondrà a 18 dies, és a dir de **561 m³**. Aquest valor es corregeix en funció del nombre total de camions que arriben a la planta.

Un cop determinada aquesta quantitat, s'ha de calcular el nombre de camions que portaran el CCl₄. S'ha de tenir en compte que els camions cisterna solen tenir volums de 20, 25, 30 m³. En aquest cas es seleccionaran camions de 30 m³. Per tant el nombre de camions serà:

$$N \text{ de Camions} = \frac{561 \text{ m}^3}{30 \text{ m}^3} = 18,7 \approx 19 \text{ (Eq. 31)}$$

En les pitjors de les condicions s'hauran de carregar un total de 570 m^3 de CCl_4 , corresponent als 18 dies i 19 camions. En el cas més favorable només 15 dies amb l'arribada de 16 camions i un volum total de descarrega de 480 m^3 . Per tan, **570 m^3** serà el volum total de CCl_4 que hi haurà a la planta.

DISSENY MECANIC

- **Tipus de tanc**

A l'hora de treballar amb CCl_4 s'ha d'optar per utilitzar tancs a **pressió atmosfèrica**. En aquest cas, els tancs seran cilíndrics amb un capsal superior cònic i fons pla. La disposició de cada tanc serà vertical. El material utilitzat serà AISI 316L. La temperatura de disseny serà 45°C .

Es dissenyaran **dos tancs** per emmagatzemar el CCl_4 , cadascun amb una capacitat de **350 m^3** amb un contingut de 285 metres cúbics cadascun. Es a dir, cada tanc estarà omplert aproximadament un 80 % de la seva capacitat total, per motius de seguretat.

- **Dimensionament**

En el cas dels tanc de CCl_4 s'ha optat per escollir un **diàmetre intern de 6.5 m** i una relació d'alçada de **$1,545 \cdot D_{\text{int}}$** que permet obtenir un volum total de tanc de 350 m^3 . Per estimar l'alçada del cilindre es poden agafar valors entre 1,5 i 3 per el diàmetre interior del cilindre, sent 1.5, 2, 2.5 i 3 els valors típics, a continuació es mostra la resolució on la part cilíndrica s'efectua de la mateixa manera que en cas de l'HF, tenint en compte que ara la posició del tanc serà vertical utilitzant l'equació corresponent al càlcul de cilindres presentada a la introducció

Cilindre:

$$H_{\text{cilindre}} = 1.545 \cdot 6.5 \text{ m} = \mathbf{10.04 \text{ m}}$$

$$V_{\text{cilindre}} = \pi \cdot \frac{6.5^2 \text{ m}}{4} \cdot 10.04 \text{ m} = \mathbf{333.25 \text{ m}^3}$$

Capsal Cònic

El disseny del cap superior per aquests tancs serà cònic amb un angle de 25° a la part cònica. Prèviament s'ha de calcular l'alçada del cap:

$$H_{\text{con}} = \tan(\alpha) \cdot \frac{D_{\text{int}}}{2} \text{ (Eq. 32)}$$

$$H_{con} = \tan(25) \cdot \frac{6.5 \text{ m}}{2} = \mathbf{1.52 \text{ m}}$$

Es calcularà el volum del cap cònic:

$$V_{con} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{D_{int}}{2}\right)^2 \cdot H_{con}}{3} \text{ (Eq. 33)}$$

$$V_{con} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{6.5 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 1.52 \text{ m}}{3} = \mathbf{16.75}$$

Equip complet:

La alçada total serà la suma de l'alçada del cilindre i la del con:

$$H_{equip} = H_{cilindre} + H_{con} \text{ (Eq. 34)}$$

$$H_{equip} = 10.04 \text{ m} + 1.52 \text{ m} = \mathbf{11.56 \text{ m}}$$

Finalment, el volum total de l'equip es calcula amb la següent equació tenint en compte que només hi ha un capsal i no dos, com en el cas de l'àcid fluorhídric:

$$V_{tanc} = V_{cilindre} + V_{con} \text{ (Eq. 35)}$$

$$V_{tanc} = 333.17 \text{ m}^3 + 16.75 \text{ m}^3 = \mathbf{350 \text{ m}^3}$$

- **Espessor de les parets**

Aquest càlcul es farà de forma similar que als tancs d'HF, tenint en compte que ara es treballa amb un tanc vertical amb cap cònic.

Primer s'ha de calcular la pressió hidrostàtica degut a l'alçada de columna, tenint en compte que el tanc estarà ple fins un 81 % . Es tracta d'un tanc vertical, per aquest motiu s'utilitzarà el 81 % de l'alçada total del tanc i la densitat del CCl_4 que és 1579 kg/m^3 .

$$Ph = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10.55 \text{ m} \cdot 1579 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.81 = 145718 \text{ Pa} = \mathbf{1.457 \text{ bar}}$$

Com que la pressió d'operació es menor a 20,067 atmòsferes, la pressió de disseny es determina de la següent manera:

$$P = 1 \text{ atm} + 2,04 \text{ atm} + 1,44 \text{ atm} = \mathbf{4.54 \text{ atm}}$$

S'estableixen valors de [S] o tensió en funció del material a utilitzar, en aquest cas es selecciona 1289.3 bars, corresponent al acer inoxidable AISI 316L.

El factor de soldadura com s'ha dit abans serà **0.85** oferint una bona eficiència a les juntes. El valor [C1] o factor de corrosió també serà de **2** mil·límetres com en els tancs de HF. La diferencia radica que als tancs de CCl₄ aquest sobre espessor serà d'acer mentre que als tancs d'HF correspondrà al recobriment de polímer o tefló.

Per determinar l'espessor del tanc es faran servir les equacions citades a la introducció, corresponents al gruix del cilindre i la corresponent al gruix del capsal cònic donant els següents resultats:

Gruix del cilindre:

$$t_{cilindre} = \frac{4.54 \text{ bar} \cdot 3250 \text{ mm}}{1289.3 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 4.54 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 15.49 \text{ mm} \approx \mathbf{16 \text{ mm}}$$

Gruix del cap Cònic:

$$t_{con} = \frac{P \cdot D_{int}}{2 \cdot \cos \alpha \cdot (SE - 0.6P)} + C1 \text{ (Eq. 36)}$$

$$t_{con} = \frac{4.54 \text{ bar} \cdot 6500 \text{ mm}}{2 \cdot \cos(25) \cdot (1289.3 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 4.54 \text{ bar})} + 2 \text{ mm} = 16.89 \text{ mm} \approx \mathbf{18 \text{ mm}}$$

El gruix s'ha d'ajustar a un gruix nominal, per no encarir el preu del tanc, per això el gruix pren un valor de 18 mm i no de 17 mm.

Gruix del fons pla:

El gruix dels fons dels tancs pren un valor típic de 6 mm, valor mínim per evitar les deformacions a causades per el pes del líquid, per aquest motiu se li sumaran dos mil·límetres com a factor de seguretat i dos mil·límetres com a factor de corrosió donant lloc a una placa de **10 mm de gruix**

- **Pes dels tancs.**

A continuació s'estimaran els kg que pesarà l'equip. Primer es farà una estimació amb els tancs buits i després plens de líquid.

Pes del cilindre:

El pes del cilindre seguirà el mateix mètode de càlcul que en el cas dels tancs de HF, donant els següents resultats:

$$W_{cilindre} = \pi \cdot 10.04 \text{ m} \cdot \left(\left(\frac{6.532 \text{ m}}{2} \right)^2 - \left(\frac{6.5 \text{ m}}{2} \right)^2 \right) \cdot 7861 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{25857 \text{ kg}}$$

Pes del capsal cònic:

Per el càlcul del pes dels caps cònics s'utilitzarà l'equació que es presenta tot seguit:

$$W_{Con} = \frac{\pi \cdot H_{con} \left(\left(\frac{D_{ext \text{ con}}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{int}}{2} \right)^2 \right) \cdot \rho_{Acer \text{ 316L}}}{3} \quad (Eq. 37)$$

$$W_{Con} = \frac{\pi \cdot 1.52 \text{ m} \left(\left(\frac{(6.5 \text{ m} + 0.018 \text{ m} \cdot 2)}{2} \right)^2 - \left(\frac{6.5}{2} \right)^2 \right) \cdot 7861 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{3} = \mathbf{2118 \text{ kg}}$$

Pes del fons pla:

Per calcular el pes del fons pla, s'ha de tenir en compte aquesta base ha de ser 51 mil·límetres més gran que el diàmetre exterior del tanc.

El pes es calcula amb l'equació següent:

$$W_{f.pla} = \pi \cdot t_{f.pla} \cdot \left(\frac{D_{ext} + 0.051 \text{ m}}{2} \right)^2 \cdot \rho_{Acer \text{ 316L}} \quad (Eq. 38)$$

$$W_{f.pla} = \pi \cdot 0.01 \text{ m} \cdot \left(\frac{6.532 + 0.051 \text{ m}}{2} \right)^2 \cdot 7861 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{2676 \text{ kg}}$$

El pes total es la suma del pes dels diferents components del tanc:

$$W_{total} = W_{cilindre} + W_{Con} + W_{f.pla} \quad (Eq. 39)$$

$$W_{total \text{ buit}} = 25857 \text{ kg} + 2118 \text{ kg} + 2676 = \mathbf{30651 \text{ kg}}$$

Al valor buit se li ha d'afegir el pes que tindrà el tanc en operació es a dir, 285 m³ o 350 m³ quan esta totalment ple:

$$W_{amb \text{ líquid}} = 30651 \text{ kg} + Volum \text{ líquid} \cdot \rho_{CCL4} \quad (Eq. 40)$$

$$W_{operant} = 30651 \text{ kg} + 285 \text{ m}^3 \cdot 1579 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 480666 \text{ kg}$$

$$W_{ple} = 25593 \text{ kg} + 360 \cdot 1579 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 583301 \text{ kg}$$

- **Venteig**

En els tancs que treballen a pressió atmosfèrica al igual als que treballen a pressions superiors són indispensables els ventejos, sobretot a l'hora de les operacions de càrrega i descàrrega per evitar deformacions.

En el cas dels tancs de CCl_4 s'ha de calcular la superfície humida del recipient, és a dir, la superfície que es veuria afectada per un bescanvi de calor provocat per un foc exterior.

Aquesta superfície es pot calcular sobre un 55% de la superfície total d'un tanc vertical, descomptant la part que es troba en contacte amb el terra. En aquest cas s'estimarà amb la llargada del cilindre:

$$A = \pi \cdot D_{ext} \cdot 0.55 \text{ (Eq. 41)}$$

$$A = \pi \cdot 6.532 \cdot 0.55 = 113.3 \text{ m}^2$$

La calor rebuda es calcula agafant el valor F com a 0.5 ja que el drenatge o les cubetes es trobaran a distància del tanc, el resultat es el següent:

$$Q = 139.7 \cdot 0.5 \cdot 113.3^{0.82} \cdot 10^3 = 3378934 \text{ kJ/h}$$

Finalment, el cabal de venteig es calcula sabent que la calor latent de vaporització del CCl_4 és 194 kJ/kg:

$$Q_{venteig} = \frac{4.414 \cdot 3378934 \text{ kJ/h}}{194 \text{ kJ/kg} \cdot \sqrt{153.8}} = 6199.1 \text{ m}^3/\text{h}$$

- **Cubetes de retenció**

Segons la normativa trobada als documents ITC-MIE-APQ, la distància mínima que han de tenir els tancs de CCl_4 (substància tipus C) respecte els altres tancs ha de ser:

Distància respecte altres tancs de CCl_4 (D_{tanc}).- Serà el 0.3 de la suma dels diàmetres de tots els tancs o 2 metres mínim entre tancs, prenen el valor més restrictiu, és a dir, el valor més gran.

Els tancs de CCl_4 tindran una distància entre ells de **1,96 m** front els dos metres del mínim, s'escollirà una distància de **2 m**.

Distància respecte parets (D_{paret}).- 1-1.5 m de distància respecte les parets de les cubetes, s'escollirà sempre **1.5m**.

Volum de les cubetes.- En quant a la seva capacitat, aquesta es calcula com el 10 % del total de tots els tancs o el volum del tanc més gran com si aquest no estigues.

Per el cas dels tancs de CCl_4 anhidre, el 10 % del total dels tancs són 70 m^3 , mentre que el volum d'un tanc és de 350 m^3 , per tant, el volum de les cubetes haurà de ser el corresponent a 350 m^3 .

Com que la disposició dels tancs és vertical i es posaran en un filera de dos, la longitud i amplitud de les cubetes es calcula amb les següents equacions:

$$LCubetes = 2 \cdot D_{\text{paret}} + n^{\circ}\text{tancs} \cdot D_{\text{ext}} + (n^{\circ}\text{tancs} - 1) \cdot D_{\text{tancs}} \text{ (Eq. 42)}$$

$$LCubetes = 2 \cdot 1.5 \text{ m} + 3 \cdot 6.532 \text{ m} + (2 - 1) \cdot 2 \text{ m} = \mathbf{18.06 \text{ m}}$$

$$Acubetes = 2 \cdot D_{\text{paret}} + D_{\text{ext}} \text{ (Eq. 43)}$$

$$Acubetes = 2 \cdot 1.5 \text{ m} + 6.532 \text{ m} = \mathbf{9.53 \text{ m}}$$

En el cas dels tancs de CCl_4 el disseny de les cubetes dóna una superfície de 172 m^2 . També recomana una altra cubeta a distància per evitar en tot el possible el seu vessament i transferència a l'atmosfera. Aquesta cubeta complementària tindrà com a mínim un volum de 20% el mínim dels tancs.

11.1.4. Tanc d'emmagatzematge d'àcid clorhídric (HCl)

Tot seguit es mostren les especificacions simplificades per els tancs de àcid fluorhídric al 30% màssic:

Taula 11.7. Resum de les característiques dels tancs.

Paràmetre	Valor
Nº tancs	4
Volum de cada tanc (m^3)	575
Volum de líquid a cada tanc (m^3)	461
D_{int} , Diàmetre interior cilindre (m)	7.63
L/H, Alçada/Longitud del equip (m)	13.77
Alçada de líquid (m)	10.07
t_{cil} , Gruix del cilindre (mm)	18

t_{capsal} , Gruix del capsal cònic (mm)	20
$T_{\text{f.pla}}$, Gruix del fons pla (mm)	10
D_{ext} , Diàmetre exterior del cilindre (m)	7.666
P, Pressió de disseny (atm)	4.31
T, temperatura de disseny (°C)	45
E, Factor de soldadura	0.85
Pes de l'equip buit (kg)	43671
Pes de l'equip operant (kg)	568767
Pes de l'equip totalment ple (kg)	699171
Recobrint	HDPE

L'àcid clorhídric és una substància molt corrosiva si es troba en dissolució aquosa, per tant el tanc d'emmagatzematge tindrà un recobrint de polímer d'alta densitat per evitar l'atac per hidrogen. La seva forma fumant pot deteriorar ràpidament els equips en contacte i ocasionar greuges al personal si aquests no tenen les mesures de seguretat necessàries.

L'àcid clorhídric que hi ha CADMA chemicals és un subproducte i s'obté a la reacció entre l'àcid fluorhídric i el tetraclorur de carboni en presència de SbCl_5 . Aquest subproducte és separat a la zona de purificació i posteriorment tractat a un absorbidor. D'aquesta manera es prepara de cara a la seva venda. Tindrà en emmagatzematge una concentració del 30 % màssic.

Els tancs d'emmagatzematge d'àcid clorhídric s'han de dissenyar en funció a les normes especificades a la ITC-MIE-APQ-006, corresponent a l'emmagatzematge de líquids corrosius. Per el disseny mecànic s'ha utilitzat el codi ASME com abans s'ha explicat.

- **Condicions d'emmagatzematge**

Segons la normativa vigent, ITC-MIE-APQ, l'àcid clorhídric es podria considerar una substància de la classe C o D. En aquest cas es considerarà una substància de classe C, ja que és la situació més restrictiva perquè que les substàncies de la classe C tenen un punt d'inflamabilitat entre els 55 i els 100°C, mentre que les de classe D tenen el seu punt d'inflamabilitat per sobre dels 100 °C. L'emmagatzematge de l'àcid clorhídric tindrà les següents condicions:

Taula 11.8. Condicions d'emmagatzematge de l'àcid clorhídric.

Temperatura (°C)	25
Pressió (atm)	1
Densitat HCl (kg/m³)	1579

Taula 11.9. Característiques del material del tanc.

Material	AISI 316L
Densitat AISI 316L (kg/m ³)	7861
Tensió AISI 316L (atm)	1272,5
Recobrint	HDPE

- **Capacitat d'emmagatzematge**

El corrent final, després de l'absorció és de 4752 kg/h, per tant, el corrent a emmagatzemar diàriament serà de **114041 kg/dia**. Aquest darrer valor equival a **100,04 m³/dia**.

L'emmagatzematge tal i com s'ha descrit per els tancs de reactius (HF i CCl₄) tindrà una capacitat per 15 dies treballant amb normalitat i un sobredimensionament per 3 dies més si es produeixen problemes en la sortida de producte. Per tant, el disseny d'emmagatzematge correspondrà a **18 dies**.

El volum corresponent a 15 dies de producció és 1500 m³ necessitant 50 camions de 30 m³ per emportar-se tot el volum. Per altra part, si cal emmagatzemar el volum de 18 dies de treball el volum serà de 1800 m³ amb la necessitat de 60 camions per descarregar tot el volum.

$$N \text{ de Camions} = \frac{1501 \text{ m}^3}{30 \text{ m}^3} \approx 50 \quad N \text{ de Camions} = \frac{1801 \text{ m}^3}{30 \text{ m}^3} \approx 60 \text{ (Eq. 44)}$$

DISSENY MECÀNIC

- **Tipus de tanc**

A l'hora de treballar amb HCl s'ha optat per utilitzar tancs a **pressió atmosfèrica**. El disseny seguirà el mateix model que el confeccionant per emmagatzemar CCl₄. Els tancs seran **cilíndrics amb un capsal superior cònic i fons pla**. La disposició de cada tanc serà vertical. El material utilitzat serà AISI 316L amb un recobrint de HDPE. La temperatura de disseny serà 45 °C.

Es dissenyaran **quatre tancs** per emmagatzemar el CCl₄, cadascun amb una capacitat de **575 m³** amb un contingut de 461m³ cadascun. Cada tanc estarà omplert fins un 80% de la seva capacitat total per motius de seguretat.

- **Dimensionament**

Per cada tanc d'àcid clorhídric s'ha optat per un **diàmetre intern de 7.63 m** i una relació d'alçada de **1,57·D_{int}** que permet obtenir un volum total de tanc de 575 m³.

El disseny de la part cilíndrica s'efectua de la mateixa manera que en els casos anteriors, tenint en compte que ara la posició del tanc serà vertical.

Cilindre:

$$H_{cilindre} = 1.57 \cdot 7.63 \text{ m} = \mathbf{11.98 \text{ m}}$$

El volum del cilindre es calcula amb les equacions presentades a la introducció:

$$V_{cilindre} = \pi \cdot \frac{7.63^2 \text{ m}}{4} \cdot 11.98 \text{ m} = \mathbf{547,77 \text{ m}^3}$$

Capsal Cònic

El disseny del cap superior per aquests tancs serà cònic amb un angle de 25º a la part cònica. Prèviament s'ha de calcular l'alçada del cap amb l'equació següent :

$$H_{con} = \tan(25) \cdot \frac{7.63 \text{ m}}{2} = \mathbf{1.79 \text{ m}} \text{ (Eq. 45)}$$

$$V_{con} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{7.6 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 1.79 \text{ m}}{3} = \mathbf{27.23}$$

Equip complet:

La alçada total serà la suma de l'alçada del cilindre i la del con:

$$H_{equip} = 11.98 \text{ m} + 1.79 \text{ m} = \mathbf{13.77 \text{ m}}$$

Finalment, el volum total de l'equip es calcula de la mateixa forma que al cas del CCl₄.

$$V_{tanc} = 547.77 \text{ m}^3 + 27.23 \text{ m}^3 = \mathbf{575 \text{ m}^3}$$

- **Espessor de les parets**

Es calcula la pressió hidrostàtica degut a l'alçada de líquid a columna. Es tracta d'un tanc vertical, per aquest motiu s'utilitzarà el 80 % de l'alçada total del tanc i la densitat del HCl al 30 % que és 1140 kg/m³.

$$Ph = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 11.98 \text{ m} \cdot 1140 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.80 = 123195 \text{ Pa} = \mathbf{1.23 \text{ bar}}$$

$$P = 1.031 \text{ bar} + 2.06 \text{ bar} + 1.23 \text{ bar} = \mathbf{4.31 \text{ atm}}$$

S'estableixen valors de [S] o tensió en funció del material a utilitzar, en aquest cas es selecciona 18700 psi (1289,32 bar), corresponent al acer inoxidable AISI 316L. El factor de soldadura com s'ha dit abans serà **0.85** oferint una bona eficiència a les juntes.

El valor [C1] o factor de corrosió també serà de **2 mil·límetres** es calcularan com si tot fos d'acer 316L, però en realitat aquest sobre espessor serà de HDPE. Per determinar l'espessor del tanc es faran servir les equacions citades a la introducció, corresponents al gruix del cilindre i la corresponent al gruix del capsal cònic donant els següents resultats:

Gruix del cilindre:

$$t_{cilindre} = \frac{4.31 \text{ bar} \cdot 3820 \text{ mm}}{1289 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 4.31 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 17.05 \text{ mm} \approx \mathbf{18 \text{ mm}}$$

Gruix del cap Cònic:

$$t_{con} = \frac{P \cdot D_{int}}{2 \cdot \cos \alpha \cdot (SE - 0.6P)} + C1$$

$$t_{con} = \frac{4.31 \text{ atm} \cdot 7630 \text{ mm}}{2 \cdot \cos(25) \cdot (1289 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 4.31 \text{ bar})} + 2 \text{ mm} = 18.61 \text{ mm} \approx \mathbf{20 \text{ mm}}$$

El gruix s'ha d'ajustar en tots els casos a un gruix nominal per tal de no encariar el preu del tanc, per això el gruixos prenen un valor de 18 mm pel cilindre i 20 mm per el cap cònic.

Gruix del fons pla:

El gruix del fons de cada tanc pren un valor típic de 6 mm, valor mínim per evitar les deformacions causades per el pes del líquid, per aquest motiu se li sumaran dos mil·límetres com a factor de seguretat i dos mil·límetres com a factor de corrosió donant lloc a una placa de **10 mm de gruix**

- **Pes dels tancs.**

A continuació s'estimaran els kg que pesarà l'equip. Primer es farà una estimació amb els tancs buits i després plens de líquid.

Pes del cilindre:

Per obtenir el pes del cilindre s'utilitzaran les mateixes equacions que encesos anteriors:

$$W_{cilindre} = \pi \cdot 11.98 \text{ m} \cdot \left(\left(\frac{7.666 \text{ m}}{2} \right)^2 - \left(\frac{7.63 \text{ m}}{2} \right)^2 \right) \cdot 7861 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{43671 \text{ kg}}$$

Pes del capsal cònic:

El càlcul de caps cònics es realitzarà com en el cas del tanc de CCl_4 :

$$W_{\text{con}} = \frac{\pi \cdot 1.79 \text{ m} \left(\left(\frac{(7.63 \text{ m} + 0.02 \text{ m} \cdot 2)}{2} \right)^2 - \left(\frac{7.63}{2} \right)^2 \right) \cdot 7861 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{3} = \mathbf{3255 \text{ kg}}$$

Pes del fons pla:

Per calcular el pes del fons pla s'ha de tenir en compte aquesta base ha ser 51 mil·límetres més gran que el diàmetre exterior del tanc.

El pes es calcula amb l'equació presentada en el disseny dels tancs de CCl_4 :

$$W_{f.pla} = \pi \cdot 0.01 \text{ m} \cdot \left(\frac{7.666 + 0.051 \text{ m}}{2} \right)^2 \cdot 7861 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{2942 \text{ kg}}$$

El pes total es la suma del pes dels diferents components del tanc:

$$W_{\text{total}} = W_{\text{cilindre}} + W_{\text{con}} + W_{f.pla} \text{ (Eq. 46)}$$
$$W_{\text{total buit}} = 43671 \text{ kg} + 3255 \text{ kg} + 2942 = \mathbf{43671 \text{ kg}}$$

Al valor buit se li ha d'afegir el pes que tindrà el tanc en operació es a dir, 285 m^3 o 350 m^3 quan esta totalment ple:

$$W_{\text{amb líquid}} = \mathbf{43671 \text{ kg}} + \text{Volum líquid} \cdot \rho_{\text{HCl}} \text{ (Eq. 47)}$$
$$W_{\text{operant}} = \mathbf{43671 \text{ kg}} + 461 \text{ m}^3 \cdot 1140 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{5568767 \text{ kg}}$$
$$W_{\text{ple}} = \mathbf{43671 \text{ kg}} + 575 \cdot 1140 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{699171 \text{ kg}}$$

- **Venteig**

En els tancs que treballen a pressió atmosfèrica al igual als que treballen a pressions superiors són indispensables els ventejos, sobretot a l'hora de les operacions de càrrega i descàrrega per evitar deformacions.

En el cas dels tancs de HCl s'ha de calcular la superfície humida del recipient, és a dir, la superfície que es veuria afectada per un bescanvi de calor provocat per un foc exterior.

Aquest superfície es pot calcular sobre un 55% de la superfície total d'un tanc vertical, descomptant la part que es troba en contacte amb el terra. En aquest cas s'estimarà amb la llargada del cilindre:

$$A = \pi \cdot D_{ext} \cdot 0.55 \text{ (Eq. 48)}$$

$$A = \pi \cdot 7.666 \cdot 0.55 = 241 \text{ m}^2$$

La calor rebuda es calcula agafant el valor F com a 0.5 ja que el drenatge o les cubetes es trobaran a distància del tanc, el resultat es el següent:

$$Q = 139.7 \cdot 0.5 \cdot 241^{0.82} \cdot 10^3 = 6268826 \text{ kJ/h}$$

Finalment, el cabal de venteig es calcula per un tanc a pressió atmosfèrica sabent que la calor latent de vaporització del HCl aquos és 1716 kJ/kg:

$$Q_{venteig} = \frac{4.414 \cdot 6268826 \text{ kJ/h}}{1716 \text{ kJ/kg} \cdot \sqrt{23.53}} = 3322.4 \text{ m}^3/\text{h}$$

- **Cubetes de retenció**

Segons la normativa trobada als documents ITC-MIE-APQ, la distància mínima que han de tenir els tancs de HCl (substància tipus C) respecte els altres tancs ha de ser:

Distància respecte altres tancs de CCl_4 (D_{tanc}).- Serà el 0.3 dels diàmetres de tots els tancs o 2 metres mínim entre tancs, prenent el valor més restrictiu, és a dir, el valor més gran. Els tancs de HCl tindran una distància entre ells de **2.30 m** front els dos metres del mínim, s'escollirà una distància de **2.30 m**.

Distància respecte parets (D_{paret}).- 1-1.5 m de distància respecte les parets de les cubetes, s'escollirà sempre **1.5m**.

Volum de les cubetes.- En quant a la seva capacitat, aquesta es calcula com el 10 % del total de tots els tancs o el volum del tanc més gran com si aquest no estigues.

Per el cas dels tancs de HCl, el 10 % del total dels tancs és 230 m^3 , mentre que el volum d'un tanc és de 575 m^3 , per tant, el volum de les cubetes haurà de ser el corresponent a 350 m^3 .

Com que la disposició dels tancs és vertical i es posaran en dues fileres, la longitud i amplitud de les cubetes es calcula amb les equacions següents:

$$LCubetes = 2 \cdot D_{paret} + (n^{\circ}tancs - 2) \cdot D_{ext} + (n^{\circ}tancs - 3) \cdot D_{tancs} \text{ (Eq. 49)}$$

$$LCubetes = 2 \cdot 1.5 \text{ m} + (4 - 3) \cdot 7.666 \text{ m} + (4 - 3) \cdot 2.30 \text{ m} = \mathbf{20.63 \text{ m}}$$

$$Ampladacubetes = 2 \cdot D_{paret} + 2 \cdot D_{ext} + D_{tancs} \text{ (Eq. 50)}$$

$$AmpladaCubetes = 2 \cdot 1.5 \text{ m} + 2 \cdot 7.666 \text{ m} + 2.30 = \mathbf{20.63 \text{ m}}$$

En el cas dels tancs de HCl el disseny de les cubetes dóna una superfície de 172 m². També recomana una altra cubeta a distància per evitar en tot el possible el seu vessament i formació de gas fumant. Aquesta cubeta complementària tindrà com a mínim un volum de 20% el mínim dels tancs.

11.1.5. Tanc d'emmagatzematge de FREÓ-13

L'emmagatzematge de FREÓ-13 es pot realitzar de dues formes segons les condicions a les que es vulgui tenir el producte. La primera forma d'emmagatzemar-lo és treballant a pressió, fet que permet tenir el FREÓ-13 líquid al voltant de 35 atmosferes. La segona condició és emmagatzemar-lo a pressió atmosfèrica, però en aquest cas es requereix una temperatura per sota de -82 °C, és a dir, es treballaria a temperatures criogèniques.

En el cas de CADMA chemicals s'ha decidit dissenyar dos tancs criogènics per emmagatzemar FREÓ-13 a -90 °C. El disseny d'aquest tipus de tanc és diferent a la resta, ja que es tracta de dos tancs, un exterior i un interior, separats per un aïllant tèrmic. S'ha optat per la perlita criogènica que és un bon aïllant per treballar en aquestes condicions.

La perlita criogènica té una conductivitat molt baixa, i és molt utilitzada per aplicar-la a sistemes criogènics com gas natural, aire, fins i tot gasos nobles.

Les dades corresponents al disseny d'aquests tancs es presenta a la taula:

Taula 11.10. Dades de disseny del tanc de FREÓ-13.

Paràmetre	Valor
Nº tancs	2
Volum del tanc interior (m ³)	305
Volum de líquid a cada tanc (m ³)	194
D _{int} , Diàmetre interior cilindre (m)	6.68
H, Alçada tanc interior (m)	9.32
Alçada de líquid (m)	5.52

t_{cil} , Gruix del cilindre (mm)	4
t_{capsal} , Gruix del capsal (mm)	5
$T_{f.pla}$, Gruix del fons pla (mm)	10
D_{extr} , Diàmetre exterior del cilindre (m)	6.88
P, Pressió de disseny (atm)	3.98
T, temperatura de disseny (°C)	-70
E, Factor de soldadura	0.85
Pes de l'equip buit (kg)	9043
Pes de l'equip operant (kg)	309931
Pes de l'equip totalment ple (kg)	483013
Aïllant	Perlita criogènica
Gruix aïllant (m)	0.3
Conductivitat tèrmica	0.039-0.027 W/m K
Diàmetre, Tanc protector (m)	7.228

Condicions d'emmagatzematge

La normativa ITC-MIE-APQ-010 és la que regula l'emmagatzematge de productes a tancs criogènics. Seguin aquesta normativa i amb les propietats del procés, s'estableixen les condicions d'emmagatzematge a la taula.

Taula 11.11. Condicions d'emmagatzematge del FREÓ-13.

Temperatura (°C)	-90
Pressió (atm)	1
Densitat FREÓ-13 (kg/m³)	1554

El material que s'utilitza per el disseny dels tancs criogènics és l'AISI 304L. Les seves propietats es citen a la taula següent:

Taula 11.12. Material del tanc.

Material	AISI 304L
Densitat AISI 304L (kg/m³)	7861
Tensió AISI 304L (bar)	8721

- **Capacitat d'emmagatzematge**

La capacitat d'emmagatzematge dels tancs criogènics es veu limitada a un 64 % del total del tanc, per aquest motiu els tancs es veuen més sobre dimensionats que els tancs de CCL₄ o HCl, on els tancs poden estar omplerts fins un 80% per motius de seguretat.

De la mateixa forma que a la resta de tancs, en el cas del FREÓ-13, també es dissenyaran tancs amb una capacitat d'emmagatzematge de 18 dies, és a dir, 15 en operació normal i 3 més com a factor de seguretat front incidents a planta o logístics referits al transport.

A CADMA Chemicals es produeix un corrent de **33432 kg/dia** de FREÓ-13, una quantitat equivalent a 21.51 m³/dia. Per tant, per 18 dies de producció, s'han de construir tancs per emmagatzemar **una totalitat de 387 m³**.

En aquest cas, es dissenyaran dos tancs, cadascú amb una capacitat de 305 m³, omplerts fins un 64% de la seva capacitat (194 m³).

DISSENY MECÀNIC

Aquest tipus de tanc han de tenir una sèrie de components relativament diferents als tancs convencionals. Tot seguit es presenta una llista:

- a) Aïllament.- en aquest cas perlita criogènica amb una conductivitat
- b) Gas inert.- en aquest cas N₂ per tal de mantenir una pressió constant a feines de càrrega i descàrrega de FREÓ-13
- c) Elements primaris.- tots els elements sotmesos a temperatures inferiors a -40 °C
- d) Cobertura.- És el tanc o la protecció complementaria que recobreix l'aïllant per protegir-lo.
- e) Equips de refrigeració.- Sistemes mecànics que produeixen la refrigeració necessària per compensar els guanys de calor.
- f) Ha de situar-se preferentment a l'aire lliure i sobre el nivell de terra, o en edificis de construcció no combustible adequadament ventilats.
- g) No s'ha de col·locar a edificis amb mes de tres parets al voltant per tal de garantir la ventilació

- **Tipus de tanc**

El tanc escollit per emmagatzemar el FREÓ-13 funcionarà a pressió atmosfèrica i -90°C. Constarà d'un tanc complementari, que tindrà la funció de protegir l'aïllant. Els tancs seran

cilíndrics amb un capsal superior toriesfèric i fons pla. La disposició de cada tanc serà vertical. El material utilitzat serà AISI 314L per el tanc interior i d'alumini pintat per el tanc exterior. La temperatura de disseny serà -70 °C.

- **Dimensionament**

Per cada tanc (interior) de FREÓ-13 s'ha optat per un **diàmetre intern de 6.68 m** i una relació d'alçada de **1.2·D_{int}** que permet obtenir un volum total de tanc de 305 m³.

El disseny de la part cilíndrica s'efectua de la mateixa manera que en els casos anteriors, tenint en compte que la disposició del tanc es vertical.

Cilindre:

$$H_{cilindre} = 1.2 \cdot 6.68 \text{ m} = \mathbf{8.02 \text{ m}}$$

El volum del cilindre es calcula amb les equacions presentades a la introducció i les utilitzades en el cas del tanc de HF per caps toriesfèrics.

$$V_{cilindre} = \pi \cdot \frac{6.68^2 \text{ m}}{4} \cdot 8.02 \text{ m} = \mathbf{280.9 \text{ m}^3}$$

Capsal:

$$V_{capsal} = 0.0809 \cdot 6.68^3 = \mathbf{24.11 \text{ m}^3}$$

Equip:

$$V_{tanc} = 280.9 \text{ m}^3 + 24.11 \text{ m}^3 = \mathbf{305 \text{ m}^3}$$

- **Espessor de les parets**

Primer s'ha de calcular la pressió hidrostàtica degut a l'alçada de columna, tenint en compte que el tanc estarà ple fins un 80 % i l'alçada del la columna correspon al diàmetre del tanc, ja que es tracta d'un tanc horitzontal. La densitat del líquid serà de 1554 kg/m³.

$$Ph = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot m \cdot 1554 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.64 = 90152 \text{ Pa} = 0.92 \text{ bar}$$

Com que la pressió d'operació no és superior a 20.067 atmosferes, la pressió de disseny es determina amb les equacions de la introducció corresponents al càlcul de la pressió de treball:

$$P = 1.013 \text{ bar} + 2.067 \text{ bar} + 0.92 \text{ bar} = 3.98 \text{ bar}$$

S'estableixen valors de [S] o tensió en funció del material a utilitzar, en aquest cas es selecciona 126502 psi (8721 bar), corresponent al acer inoxidable AISI 304L a -90°C. Els factor de soldadura com s'ha dit abans serà 0.85. I finalment el factor de corrosió [C1] serà de 2 mm.

Per determinar l'espessor del tanc es faran servir les equacions citades a la introducció, corresponents al gruix del cilindre i la corresponent al gruix del capsal

Cilindre:

$$t_{cilindre} = \frac{3.98 \text{ bar} \cdot 3340 \text{ mm}}{8721 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 3.98 \text{ bar}} + 2 \text{ mm} = 3.79 \text{ mm} \approx 4 \text{ mm}$$

Capsal:

$$t_{capsal \text{ tor}} = \frac{3.98 \text{ bar} \cdot 3340 \text{ mm} \cdot 1.54}{2 \cdot 8721 \text{ bar} \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 3.98 \text{ atm}} + 2 \text{ mm} = 4.76 \text{ mm} \approx 5 \text{ mm}$$

Un cop obtingut aquest valor es pot estimar l'alçada del capsal i finalment l'alçada de l'equip:

$$L_{capsal} = 3.5 \cdot t_{capsal} + 0.1935 \cdot D_{ext} - 0.455 \text{ (Eq. 51)}$$

$$L_{capsal} = 3.5 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ m} + 0.1935 \cdot 6.68 \text{ m} - 0.455 \cdot 0.005 = 1.30 \text{ m}$$

Equip:

$$L_{Equip} = L_{cilindre} + L_{capsal} \text{ (Eq. 52)}$$

$$L_{Equip} = 8.01 \text{ m} + 1.30 \text{ m} = 9.32 \text{ m}$$

- **Pes dels tancs**

S'utilitzaran les mateixes equacions que en el cas dels tancs de HF per caps toriesfèrics i HCl o CCl4 per el càlcul de fons plans:

Pes del Cilindre:

$$W_{cilindre} = \pi \cdot 8.02 \text{ m} \cdot \left(\left(\frac{6.688 \text{ m}}{2} \right)^2 - \left(\frac{6.68 \text{ m}}{2} \right)^2 \right) \cdot 7861 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{5292 \text{ kg}}$$

Pes del Capsal:

$$W_{capsals} = (0.0809 \cdot (6.688 \text{ m})^3 - 0.0809 \cdot (6.68 \text{ m})^3) \cdot 7861 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{426 \text{ kg}}$$

Pes del fons pla:

Per calcular el pes del fons pla s'ha de tenir en compte aquesta base ha ser 51 mil·límetres més gran que el diàmetre exterior del tanc.

El pes es calcula amb l'equació presentada en el disseny dels tancs de CCI4:

$$W_{f.pla} = \pi \cdot 0.01 \text{ m} \cdot \left(\frac{6.688 + 0.051 \text{ m}}{2} \right)^2 \cdot 7861 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{2804 \text{ kg}}$$

El pes total és la suma del pes dels diferents components del tanc:

$$W_{total} = W_{cilindre} + W_{capsal} + W_{f.pla} \text{ (Eq. 53)}$$

$$W_{total \text{ buit}} = 5292 \text{ kg} + 426 \text{ kg} + 2804 = \mathbf{8522 \text{ kg}}$$

Al valor buit se li ha d'afegir el pes que tindrà el tanc en operació, és a dir, 194 m³ o 305 m³ quan està totalment ple. En el primer cas:

$$W_{amb \text{ liquid}} = 8522 \text{ kg} + Volum \text{ liquid} \cdot \rho_{FREÓ13} \text{ (Eq. 54)}$$

$$W_{operant} = 8522 \text{ kg} + 194 \cdot 1554 = 309410 \text{ kg}$$

$$W_{ple} = 8522 \text{ kg} + 305 \cdot 1554 = 482491 \text{ kg}$$

AILLAMENT I RECOBRIMENT

L'aïllament del tanc de FREO-13 es realitza amb perlita criogènica, amb una conductivitat tèrmica que es mou entre valors de 0.027-0.039 W/m·K per densitats de 30-40 kg/m³.

Amb aquests valors es pot estimar el gruix de l'aïllant per els tancs criogènics. S'ha aproximat amb el programari CALORCOL, obtenint uns valors entre 0.20 i 0.3 m d'espessor d'aïllant mantenint el les diferències de temperatures i eficiències al voltant de 99%.

El recobriment dels tancs de criogènics es realitzarà amb un tanc de la mateixa geometria però amb un radi de 30 cms superior al del tanc criogènic i que només tindrà la utilitat de recobrir, protegir l'aïllant.

Per aquest tanc criogènic s'ha optat per un tanc d'alumini pintat i reforçat en el cas que es decideixi fer el buit entre tancs .

- **Venteig**

Com s'ha dit a la introducció, tot tanc d'emmagatzematge necessita un Venteig per motius operacionals i de seguretat, d'aquesta manera s'eviten les deformacions als tancs degut als canvis en la pressió.

En el cas dels tancs de FREÓ-13, s'ha de calcular la superfície humida del recipient, és a dir la superfície que es veuria afectada per un bescanvi de calor provocat per un foc exterior.

Aquesta superfície es pot calcular sobre un 55% de la superfície total d'un tanc vertical, descomptant la part que es troba en contacte amb el terra. En aquest cas s'estimarà amb la l'alçat total de l'equip:

$$A = \pi \cdot D_{ext} \cdot 0.55 \text{ (Eq. 55)}$$
$$A = \pi \cdot 6.688 \cdot 0.55 = 115.21 \text{ m}^2$$

La calor rebuda es calcula agafant el valor F com a 1, el resultat és el següent:

$$Q = 139.7 \cdot 1 \cdot 115.21^{0.82} \cdot 10^3 = \mathbf{11209449 \text{ kJ/h}}$$

Finalment, el cabal de Venteig es calcula per un tanc a pressió amb l'equació donada a la introducció:

$$Q_{venteig} = \frac{4.414 \cdot 11209449}{149.85 \cdot \sqrt{104.46}} = \mathbf{32306 \text{ m}^3/\text{h}}$$

- **Cubetes de retenció**

Segons la normativa trobada als documents ITC-MIE-APQ-10, la distància mínima que han de tenir els tancs de FREÓ-13 (substància tipus A1) respecte els altres tancs ha de ser:

Distància respecte altres tancs (D_{tanc}).- Serà $\frac{1}{2}$ de la suma dels diàmetres de tots els tancs o 2 metres mínim entre tancs, prenen el valor més restrictiu, és a dir, el valor més gran. Els tancs de FREÓ-13 tindran una distancia entre ells de **7.3 m tenint en compte que es fa en relació al tanc exterior i no el tanc.**

Distància respecte parets (D_{paret}).- 1-1.5 m de distancia respecte les parets de les cubetes, s'escollirà sempre **1.5 m.**

Volum de les cubetes.- En quant a la seva capacitat, aquesta es calcula com el 10 % del total de tots els tancs o el volum del tanc més gran com si aquest no estigues.

Per el cas dels tancs de FREÓ-13, el 10 % del total dels tancs és 30.5 m^3 , mentre que el volum d'un tanc és de 194 m^3 , per tant el volum de les cubetes haurà de ser el corresponent a 194 m^3 . Com que la disposició dels tancs és vertical i es posaran en una filera de dos, la longitud i amplitud de les cubetes es calcula amb les equacions:

$$LCubetes = 2 \cdot D_{\text{paret}} + n^{\circ}\text{tancs} \cdot D_{\text{ext}} + (n^{\circ}\text{tancs} - 1) \cdot D_{\text{tancs}} \text{ (Eq. 56)}$$

$$LCubetes = 2 \cdot 1.5 \text{ m} + 2 \cdot 7.288 \text{ m} + (2 - 1) \cdot 7.3 \text{ m} = \mathbf{24.88 \text{ m}}$$

$$Ampladacubetes = 2 \cdot D_{\text{paret}} + D_{\text{ext}} + D_{\text{tancs}} \text{ (Eq. 57)}$$

$$AmpladaCubetes = 2 \cdot 1.5 \text{ m} + 7.288 \text{ m} = \mathbf{10.28 \text{ m}}$$

Per tant, l'àrea del la cubeta del tancs de FREÓ-13 és de **256 m^2** , amb la possibilitat d'incloure una segona cubeta a distància amb una capacitat del 20% del líquid per evitar en tot el possible la seva pèrdua cap a l'atmosfera i afectar menys al medi ambient. S'ha de tenir en compte que les cubetes hauran de ser d'un material que resisteixi prou la temperatura criogènica per contacte. També seria recomanada per evitar que en contacte amb l'atmosfera i el aigua es formin núvols tòxics.

11.1.6. Tanc d'emmagatzematge de pentaclorur d'alumini

EL SbCl_5 és una substància altament corrosiva i perillosa per el medi ambient. A CADMA chemicals és utilitzat com a catalitzador.

El seu emmagatzematge serà acurat, ja que la seva forma hidrolitzada pot corroir l'acer inoxidable si aquest no té un recobriment de polímer fluorat com podria ser el tefló.

Es tracta també d'una substància cancerígena, inestable quan es troba en contacte amb humitat. Té un cost elevat, per tant, s'hauran d'evitar els vessaments o les possibles contaminacions que puguin fer mal bé el catalitzador o posar en risc les instal·lacions i les persones.

A CADMA chemicals, aquest catalitzador només es compra per la posada en marxa. El volum necessari de SbCl_5 serà aproximadament de 0.8 m³, fet que permet emmagatzemar-lo a un **tanc mòbil** de 1 o de 1.5 m³.

L'emmagatzematge es realitzarà a un tanc mòbil de 1 m³, aquest fet permet minimitzar al màxim les pèrdues de catalitzador per canonades ja que a la posada en marxa no hi haurà una canonada directa des de la zona d'emmagatzematge, sinó que la càrrega es realitzarà a un emplaçament proper al reactor i després es tornaria el tanc a la zona d'emmagatzematge.

11.2. Tancs pulmó

La posada en marxa i el procés requereixen de la instal·lació de tancs pulmó que proporcionin un emmagatzematge temporal a diferents línies de procés.

Són requerits sobre tot a línies de procés d'entrada i sortida de torres de destil·lació, ja que permet mantenir un volum de líquid durant un temps determinat amb la finalitat de posar en regim estacionari els equips.

A CADMA chemicals, es requereixen 7 tancs pulmó, 4 d'ells a les sortides dels condensadors de cada torre de destil·lació (CD-301,CD-302,CD-203,CD-304), també s'anomenen tancs de reflux. Permeten regular de manera més eficient el reflux cap a torres en cas de requerir més o menys. I durant la posada en marxa permeten l'emmagatzematge temporal del líquid que no hagi estat posat en regim estacionari. Els altres tres tancs estan col·locats a les línies de procés que surten dels calderins de les columnes de destil·lació (CD-301,CD-302,CD-303).

Els tancs es dissenyen amb un temps de residència de 10 minuts mig omplerts, tot i que el disseny recomanat sol ser de 5 minuts de temps de residència mig ple, s'ha decidit sobre especificar aquest volum. La geometria serà cilíndrica amb caps toriesfèrics, fet que permet utilitzar el conjunt d'equacions citades per emmagatzematge de tancs de matèries primeres i productes.

Tot seguit s'especifiquen els les dimensions d'aquests equips:

Taula 11.13. Dimensionament dels tancs pulmó.

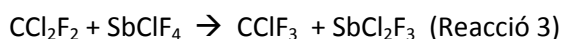
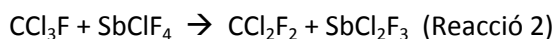
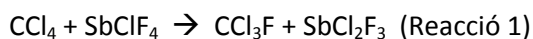
Equip	Volum m ³	Alçada (m)	Diàmetre (m)	Pressió operació (bar)	Temperatura (°C)	Aïllament
TP-201	1.28	2.51	0.86	10.13	74.46	Llana de roca
TP-301	0.74	1.7	0.8	10.13	-31.61	Llana de roca
TP-302	1.28	2.51	0.86	10.13	56.95	Llana de roca
TP-303	1.14	1.7	1	3.039	-0.46	Llana de roca
TP-304	1.73	2.5	1	10.13	-23.73	Llana de roca
TP-305	1.28	2.51	0.86	10.13	-23.73	Llana de roca
TP-306	1.14	1.7	1	3.039	-0.47	Llana de roca

11.3. Reactors

11.3.1. Reactor continu de tanc agitat. Producció de FREÓ-12

11.3.1.1. Introducció

El pas previ a la producció del Freó 13, el producte desitjat, és dur a terme el conjunt de reaccions que donen com a producte el FREÓ-12. Aquesta reacció té lloc en un reactor continu de tanc agitat, i en el seu interior succeeixen les següents reaccions:



L'objectiu principal és que es produeixi la reacció de fluoració del tetraclorur de carboni, de manera que aquest doni com a producte el clorotrifluorometà. En una reacció en sèrie, aquest també reacciona formant-se diclorodifluorometà, considerat el producte de major interès, ja que serà utilitzat per poder obtenir Freó 13. Tot i així, en el reactor també es produeix una quantitat de Freó 13, encara que només ho fa en quantitats de ppm, degut a que la reacció 3 té una constant cinètica molt més petita que les reaccions 1 i 2.

Per trobar les constants cinètiques de les reaccions principals es fa servir l'equació d'Arrhenius.

$$k_i = k_{0,i} \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right) \text{ (Eq. 58)}$$

On:

- k: Constant cinètica a les condicions desitjades de cada reacció
- $-E_a$: Energia d'activació de la reacció. Es dona el cas que en ambdues reaccions el valor és de 46 KJ/mol
- R: Constant universal de gasos ideals (J/mol·K)
- T: Temperatura d'operació del reactor (K)
- K_0 : Factor pre-exponencial que permet trobar la constant cinètica.

Bibliogràficament, s'ha trobat que els factors pre-exponencials de cada reacció són:

$$k_1 = 2.08 \times 10^4 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$k_2 = 8 \times 10^2 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Tenint en compte que les condicions d'operació són 95°C i 10 atm,

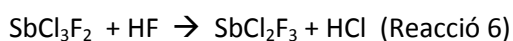
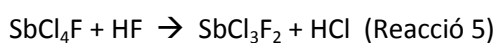
$$k_1 = 2.08 \cdot 10^4 \cdot \frac{\text{dm}^3}{\text{mol} \cdot \text{s}} \cdot \frac{3600\text{s}}{1\text{h}} \cdot \exp\left(\frac{-46000 \frac{\text{J}}{\text{mol}}}{8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 368.15\text{K}}\right)$$

$$K_1 = 22.0963 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ h}^{-1}$$

$$K_2 = 0.8499 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ h}^{-1}$$

El valor de les constants cinètiques mostren com la reacció limitant és la que dona com a producte el diclorodifluorometà, per la qual cosa el disseny del reactor es farà en funció de la conversió assolida en la reacció 2.

Per a que el tetraclorur reaccioni i es formi FREÓ-12, s'empra el pentaclorur d'antimoni com a catalitzador. Aquest component és el donador d'àtoms de fluor, ja que aquesta reacció no es pot fer directament fent servir únicament CCl_4 i HF. El fluorur d'hidrogen és el que activa el catalitzador, fent que passi de SbCl_5 a SbCl_4F , seguint el següent esquema de reaccions.





Com es pot observar a la reacció 7, el fluorur d'hidrogen extreu els àtoms de clor rebuts del CCl_4 i del CCl_3F formant-se com a producte secundari clorur d'hidrogen. La cinètica d'aquestes reaccions es pot considerar instantània amb respecte les reaccions 1 i 2, de manera que tot el catalitzador SbCl_5 introduït al reactor pot considerar-se que està en la seva forma activa SbClF_4 .

La naturalesa d'aquesta reacció requereix que no hi hagi presència d'aigua, ja que es podrien donar reaccions indesitjables, com és la desactivació del catalitzador, així com també la conversió del fluorur i clorur d'hidrogen a àcid fluorhídric i a àcid clorhídric. Això comportaria greus problemes tant de seguretat, corrosió i qualitat del producte final, per la qual cosa cal fer controls de qualitat exhaustius i detectar la presència d'aigua en les matèries primeres així com minimitzar al màxim la possibilitat de fuites o d'infiltracions.

L'objectiu d'aquesta part del procés és obtenir la màxima quantitat de FREÓ-12 possible, ja que és necessari per a la generació de freó 13. Les condicions d'operació han sigut escollides amb l'objectiu de que els reactius entrin en fase líquida al reactor per tal de poder interaccionar amb el catalitzador evitant els problemes de transferència de matèria entre fases present en els reactors bifàsics, a la vegada que entren a una temperatura elevada per afavorir una bona cinètica de reacció, per la qual cosa es necessita operar a pressions altes. El cabal de sortida del reactor, però, es dona en fase gas. Els productes, el CCl_2F_2 i el HCl , passen a fase gas a mesura que es van formant degut a que les seves temperatures d'ebullició en aquestes condicions són inferiors a la temperatura d'operació. Pel que fa als reactius, el CCl_4 introduït s'exhaureix, ja que la reacció de generació de CCl_3F presenta una cinètica de reacció més alta en comparació amb la reacció consecutiva i la conversió es pot considerar d'aproximadament el 100%. El fluorur d'hidrogen, al igual que el triclorofluorometà, entren en fase líquida i reaccionen juntament amb el CCl_4 , i la conversió d'aquesta reacció es porta fins al 50%, ja que per conversions més altes la concentració de reactiu baixaria, provocant una disminució de la velocitat de reacció i un augment del volum del reactor. La part dels reactius que no reacciona surt del reactor en fase gas, degut a que les condicions d'entrada presenten gairebé el seu punt d'ebullició i a que les seves respectives pressions de vapor promouen la seva difusió a la fase gas.

Pel que fa al catalitzador, en la seva forma original, SbCl_5 , la seva temperatura d'ebullició a 10 atm és de 533.6°C . Degut a que no s'han trobat dades bibliogràficament de la seva forma activada, i a que la temperatura d'ebullició del pentaclorur d'antimoni és molt més elevada

que la temperatura d'operació del reactor, es considera que no canvia de fase, de manera que es farà una càrrega en la posada en marxa i no caldrà un cabal constant a l'entrada. A més, ja que la reacció d'activació és gairebé instantània i s'introdueix fluorur d'hidrogen en excés per assegurar que tot el catalitzador es trobi en la forma de SbClF_4 , es suposa que durant el temps en el qual el reactor estigui operant fins a la parada de la planta, aquest no perdrà una activitat considerable a l'hora de realitzar els càlculs del disseny.

11.3.1.2. Balanç de matèria

Abans d'aprofundir en el càlcul dels paràmetres que defineixen al reactor s'ha de fer una comprovació del balanç de matèria, podent observar si els cabals màssics d'entrada coincideixen amb els cabals de sortida.

$$E + G = S + A \text{ (Eq. 59)}$$

L'equació del balanç de matèria ve definit pels següents termes.

- **Entrada (E):** La entrada inclou tots els cabals màssics de fluorur d'hidrogen, de tetraclorur de carboni i de triclorofluorometà.

$$E = M_{HF} + M_{CCl_4} + M_{CCl_3F} \text{ (Eq. 60)}$$

No obstant, no tota la quantitat de reactiu que entra al reactor prové dels tancs d'emmagatzematge, ja que pel cas del fluorur d'hidrogen s'entra en excés al reactor, per tal d'assegurar que tot el catalitzador estigui activat. Conseqüentment, el fluorur d'hidrogen que no reacciona és recirculat, podent calcular el cabal total d'entrada de la següent manera:

$$M_{HF} = M_{HF_0} + M_{HF_r} \text{ (Eq. 61)}$$

On:

- M_{HF_0} : Cabal màssic de fluorur d'hidrogen provinent dels tancs d'emmagatzematge (Kg/h)
- M_{HF_r} : Cabal màssic de fluorur d'hidrogen provinent de la recirculació.

$$M_{HF} = 800.4 + 200.1 = 1000.5 \text{ Kg/h}$$

Pel cas del tetraclorur de carboni, tot i que reacciona en la seva totalitat i no està present a la sortida del reactor, es genera al segon reactor de la planta, com es veurà a continuació a l'apartat 11.3.2.

$$M_{CCl_4} = M_{CCl_{4,0}} + M_{CCl_{4,r}} \text{ (Eq. 62)}$$

$$M_{CCl_4} = 2050.55 + 1025.45 = 3076 \text{ Kg/h}$$

Com el triclorofluorometà no es introduït com a corrent fresc, tot el que entra al reactor prové de la recirculació, és a dir, de la quantitat que no ha reaccionat.

$$M_{CCl_3F} = M_{CCl_3F_r} = 2748 \text{ Kg/h} \text{ (Eq. 63)}$$

Comptabilitzant tots els corrents d'entrada al reactor trobem la quantitat total de cabal d'entrada.

$$E = 1000.5 + 3076 + 2748 = 6824.5 \text{ Kg/h}$$

- **Generació (G):** El terme generació inclou totes les formacions o descomposicions de productes. Aquests valors vindran donats per les conversions assolides a cada reacció, de manera que la generació serà la diferència de cabal màssic entre l'entrada i la sortida d'un component.

$$G_i = M_{i,E} - M_{i,S} = (F_{i,E} - F_{i,S}) \cdot PM_i \text{ (Eq. 64)}$$

On:

- E: Entrada al reactor
 - S: Sortida del reactor
 - M_i : Cabal màssic de l'espècie i (kg/h)
- **Sortida (S):** La sortida recull el cabal de productes formats, així com de reactius que no han reaccionat, i ve donat per les conversions de les reaccions

$$F_{CCl_4,S} = F_{CCl_4,E} \cdot (1 - X_1) \text{ (Eq. 65)}$$

$$F_{HF,S} = F_{HF,E} - F_{CCl_4,E} \cdot X_1 - (F_{CCl_4,E} \cdot X_1 + F_{CCl_3F,E}) \cdot X_2 \text{ (Eq. 66)}$$

$$F_{CCl_3F,S} = (F_{CCl_4,E} \cdot X_1 + F_{CCl_3F,E}) \cdot (1 - X_2) \text{ (Eq. 67)}$$

$$F_{CCl_2F_2} = (F_{CCl_4,E} \cdot X_1 + F_{CCl_3F,E}) \cdot X_2 \text{ (Eq. 68)}$$

$$F_{HCl_S} = F_{CCl_4,E} \cdot X_1 + (F_{CCl_4,E} \cdot X_1 + F_{CCl_3F,E}) \cdot X_2 \text{ (Eq. 69)}$$

On:

- E: Entrada al reactor
- S: Sortida del reactor
- M_i : Cabal màssic de l'espècie i (kg/h)
- F_i : Cabal molar de l'espècie i (Kmol/h)
- PM_i : Pes molecular de l'espècie i
- X_1 : Conversió de la reacció 1
- X_2 : Conversió de la reacció 2

Taula 11.14. Balanç de la matèria del reactor.

COMPONENT	ENTRADA		SORTIDA		Generació
	F(kmol/h)	M (kg/h)	F (Kmol/h)	M (kg/h)	
HF	50	1000.5	10	200.1	-800.4
CCl ₄	20	3076	0	0	-3076
CCl ₃ F	20	2748	20	2748	0
CCl ₂ F ₂	0	0	20	2418	2418
HCl	0	0	40	1458.4	1458.4
TOTAL	90	6824.5	90	6824.5	0

- **Acumulació:** Degut a que la operació es en continu aquest terme és igual a 0

Tenint en compte que el concepte d'acumulació és nul en aquest tipus d'operació, es pot veure a la taula 11.14. que els cabals molars i màssics totals coincideixen. De la mateixa manera, el sumatori de les generacions de cada espècie es 0, ja que la massa no es genera ni es destrueix, de manera que el la massa total que es genera per una determinada espècie ve donada per la descomposició d'una altra espècie. Es per això, que es pot dir que el balanç de matèria es compleix

11.3.1.3. Balanç d'energia

En aquest apartat es procedeix a calcular si la reacció és exotèrmica o endotèrmica, per tal de determinar si requerirà l'aportació d'energia o, pel contrari, es requerirà d'un sistema de refrigeració. Cal tenir en compte que les condicions d'operació han de ser de 95°C, ja que si la reacció generés energia i no es disposés d'un sistema de refrigeració, podrien tenir lloc reaccions sense control, amb el conseqüent increment de la pressió, comportant un perill de

seguretat per al personal de la planta. D'altra banda, si el reactor requerís energia externa i no disposés d'ella, la temperatura del reactor disminuiria, amb la conseqüent davallada de la conversió global.

L'energia que caldrà aportar o retirar del reactor es pot trobar seguint els següents passos:

$$\Delta H_r = \sum_{i=1}^n (F_i \cdot \Delta H_{f,i})_{productes} - \sum_{i=1}^n (F_i \cdot \Delta H_{f,i})_{reactius} \quad (Eq. 70)$$

On:

- ΔH_r : Variació de l'entalpia de la reacció. Degut a que el procés és en continu, es considerarà la variació de l'entalpia en funció del cabal molar, és a dir, l'energia que consumirà o generarà la reacció en un temps determinat en funció dels cabals que reaccionen (KJ/h)
- $\Delta H_{f,i}$: Entalpia de formació de l'espècie i a la temperatura d'operació (KJ/Kmol)

$$\Delta H_f = \Delta H_f^0 + c_p \cdot (T_{op} - T_{ref}) \quad (Eq. 71)$$

On:

- ΔH_f^0 : Entalpia de formació de l'espècie i, a la temperatura de referència, T_{ref} (KJ/Kmol)
- C_p : Calor específic de l'espècie i (KJ/kmol·K)
- T_{op} : Temperatura d'operació (K)

De la mateixa manera, degut a que el triclorofluorometà i el fluorur d'hidrogen passen a fase gas, s'ha de comptabilitzar el calor latent d'aquests reactius en funció del cabal total que canvia de fase.

$$\lambda_{tot} = \sum_{i=1}^n (F_i \cdot \lambda_i) \quad (Eq. 72)$$

On:

- λ_{tot} : sumatori del calor latent consumit pels reactius per unitat de temps (KJ/h)

El calor requerit a aportar o a retirar del reactor serà la suma d'ambdós termes.

$$Q_{req} = \Delta H_r + \lambda_{tot} \quad (Eq. 73)$$

Taula 11.15. Entalpies de formació que hi ha en el primer reactor.

Dades a 95°C	HF	CCl ₄	CCl ₃ F	CCl ₂ F ₂	HCl
$\Delta H_{formació}$ (KJ/Kg)	-14270	-803.7	-2417	-4070	-2484

Taula 11.16. Calor latent dels reactius.

	HF	CCl ₃ F
λ (KJ/kg)	749.3	140

$$\Delta H_r = 429963.6 \text{ KJ/h}$$

$$\lambda_{tot} = 534700 \text{ KJ/h}$$

$$Q_{req} = 429963.6 + 534700 = 964663.6 \text{ KJ/h}$$

Els valors obtinguts mostren que la reacció és endotèrmica ja que $\Delta H_r > 0$, per la qual cosa requereix aportació d'energia externa. Juntament amb aquest fet, caldrà aportar més energia degut al canvi de fase dels reactius, de manera que es decideix dissenyar un sistema d'aportació de calor.

11.3.1.4. Disseny funcional

L'equació de disseny del reactor escollit és la següent.

$$V = \frac{F_{A,E} \cdot X}{-r_A} \quad (Eq. 74)$$

On:

- V: volum del reactor (m³)
- $F_{A,E}$: Cabal molar de l'espècie que determina la velocitat de reacció (kmol/h)
- X: conversió de la reacció limitant.
- $-r_A$: velocitat de consum del reactiu que determina la cinètica del reactor.

La cinètica d'aquesta reacció s'ha trobat bibliogràficament, i es caracteritza tant per la concentració d'entrada del reactiu com per la concentració del catalitzador present al reactor.

$$r_A = -k_2 \cdot c_{A_E} \cdot c_{SbClF_4} (1 - X) \quad (Eq. 75)$$

On:

- $-r_A$: velocitat de consum del triclorofluorometà ($\text{mol/dm}^3 \cdot \text{h}$)
- k_2 : constant cinètica de la reacció 2 ($\text{dm}^3 \text{mol}^{-1} \text{h}^{-1}$)
- $c_{A,E}$: concentració del triclorofluorometà a l'entrada del reactor (mol/dm^3)
- c_{SbClF_4} : concentració del catalitzador present al reactor (mol/dm^3)

Com s'ha esmentat prèviament en l'apartat de la introducció, tot el catalitzador $SbCl_5$ es trobarà en la seva forma activa $SbClF_4$. Les dades cinètiques trobades bibliogràficament varen ser obtingudes per a una concentració de catalitzador de 0.6 mol/l, per la qual cosa s'ha decidit treballar amb les mateixes concentracions.

Desenvolupant l'equació de disseny del reactor trobem que:

$$V = \frac{Q_E \cdot c_{CCl_3F,E}}{k_2 \cdot c_{CCl_3F,E} \cdot c_{SbClF_4} (1 - X_2)} = \frac{Q_E}{k_2 \cdot c_{SbClF_4} (1 - X_2)} \quad (Eq. 76)$$

On:

- Q_E : Cabal d'entrada al reactor (m^3/h)

El cabal d'entrada de cada reactiu es mostra en la taula 11.17. a continuació.

Taula 11.17. Cabals d'entrada.

	HF	CCl_4	CCl_3F
Q (m^3/h)	1.0164	1.9212	1.8337

El sumatori d'aquests cabals, serà doncs:

$$Q_{reactius} = 1.0164 + 1.9212 + 1.8337 = 4.7714 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (Eq. 77)$$

De manera que el volum teòric del reactor, considerant la conversió abans esmentada per a la segona reacció del 50%, és:

$$V_t = \frac{4.7714}{0.8449 \cdot 0.6 \cdot (1 - 0.5)} = 9.3573 \text{ m}^3 \quad (Eq. 78)$$

Aquest no és el volum final del reactor, ja que en aquest càlcul no s'ha tingut en compte la quantitat de catalitzador que hi ha a l'interior del reactor. Per trobar la quantitat de catalitzador que s'haurà d'utilitzar es segueix el següent esquema de càlculs.

$$\frac{V_{SbClF_4}}{V_{reactor}} = c_{SbCl_5} \cdot PM \cdot \rho = 0.6 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} \cdot \frac{299.02 \text{ kg}}{1 \text{ kmol}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{2360 \text{ kg}} = 0.076 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \text{ reactor}} \quad (Eq. 79)$$

On:

- PM: pes molecular del catalitzador (kg/Kmol)
- ρ : densitat del catalitzador (kg/m³)

A causa de que el volum requerit de catalitzador no només depèn del cabal d'entrada dels reactius, sinó del seu temps de residència, es decideix suposar un cabal fictici de catalitzador que compleixi la relació de concentracions i es mantingui a 0.6 mol/dm³.

$$"Q_E" = Q_{reactius} + "Q_{SbClF_4}" \quad (Eq. 80)$$

On:

- "Q_E": Cabal suposat d'entrada al reactor (m³/h)
- "Q_{SbClF₄}": Cabal fictici d'entrada al reactor (m³/h)

$$\frac{"Q_{SbCl_5}" \cdot \frac{\rho}{PM}}{"Q_E"} = \frac{"Q_{SbCl_5}" \cdot \frac{2360}{299.02}}{"Q_E"} = 0.6 \quad (Eq. 81)$$

$$"Q_E" = 4.7714 + 0.3926 = 5.164 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Resolent aquestes equacions amb operacions s'obté el resultat. Un cop s'ha definit el cabal hipotètic d'entrada considerant que el catalitzador entrés com un cabal es procedeix a calcular de nou el volum del reactor.

$$V = \frac{5.164}{0.8449 \cdot 0.6 \cdot (1 - 0.5)} = 10.1272 \text{ m}^3$$

D'aquesta manera es troba el volum final que requerirà el reactor tenint en compte el volum total que contindrà de catalitzador al seu interior. Així mateix, es pot trobar la quantitat de catalitzador requerit calculant la diferència entre el volum calculat considerant la presència de catalitzador amb el volum que s'ha calculat sense tenir-ho en compte.

$$V_{cat} = V - V_n = 10.1272 - 9.3573 = 0.7699 \text{ m}^3 \quad (Eq. 82)$$

El temps mig que es passarà el reactiu dintre del reactor es pot trobar de la següent manera.

$$\tau = \frac{V_n}{Q_{reactius}} = \frac{9.3573}{4.7714} = 1.9611 \text{ h} \quad (Eq. 83)$$

On:

- τ : temps de residència (h)

Encara que el volum del reactor útil està definit, el fet de que tot el producte surti en forma gasosa comporta la necessitat de disposar d'un volum extra, ja que sinó es produirien increments de pressió perillosos. Bibliogràficament, s'ha observat que aquest tipus de reactor disposen d'un 20% de volum per a que hi càpiga el producte en forma gasosa, llavors el volum del líquid serà d'únicament un 80%. A més, per tal de poder tenir més versatilitat en la quantitat de producció, en cas de voler incrementar-la, es sobredimensiona un altre 20%. D'aquesta manera, el volum definitiu del reactor es calcula a continuació.

$$V_{definitiu} = V \cdot \frac{f_s}{f_g} \quad (Eq. 84)$$

On:

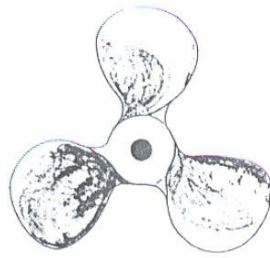
- f_s : factor de sobre-dimensionament
- f_g : fracció ocupada pel gas

$$V_{definitiu} = 10.1272 \cdot \frac{1.2}{0.8} = 15.1908 \text{ m}^3$$

11.3.1.5. Agitació

El reactor continu de tanc agitat requereix d'un sistema d'agitació que disminueixi els gradients de concentració, així com de temperatura, amb la qual cosa es faciliti la transferència de matèria i la reacció tingui la velocitat desitjada.

Tenint en compte la naturalesa d'aquesta reacció i els diferents tipus d'agitació, en funció dels objectius que es necessitin, es selecciona un agitació del tipus hèlix marina.

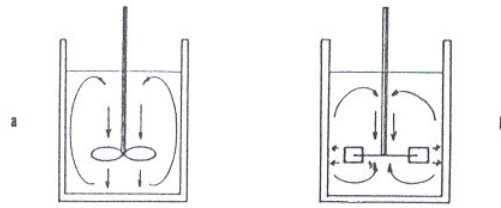


(a) Three-blade marine propeller.

Figura 11.4. Agitador d'hèlix.

L'agitador d'hèlix és ideal per a fluids poc viscosos, que com a molt arribin a tenir una viscositat de 10^4 Pa·s. Tenint en compte que la viscositat del fluid a agitar és de 0.36 cP, es comprova que no hi ha cap problema en aquest sentit.

L'elecció d'aquest tipus d'agitador ve determinada, especialment, pel tipus d'agitació que proporciona a la mescla. I és que degut a que el producte format es troba en forma gasosa, es vol facilitar una agitació axial que permeti que hi hagi una bona mescla a l'hora que afavoreixi la sortida del producte. Un agitació que proporcionés massa agitació radial, com per exemple una turbina de pales, provocaria una mescla fortament radial, i en el cas de voler difondre el gas en el líquid resultaria ideal, però com la presència de producte en la fase líquida contribueix a una disminució de la velocitat de reacció global, interessa que aquest passi a la fase gas. A la següent il·lustració es comparen els dos tipus d'agitadors més emprats a la indústria química.



(a) Marine propeller (axial flow).
(b) Turbine (radial flow).

Figura 11.5. Comparació dels agitadors més utilitzats en la indústria química.

Un cop s'ha escollit el tipus d'agitador que s'emprarà, es fa un disseny tant del reactor com dels elements que contribueixen a l'agitació, per tal d'afavorir al màxim la mescla.

Abbreviation of impeller types	Photo	Preferred geometrical dimensions and configuration	Conditions of installation	Primary flow direction
Marine propeller PR		$\begin{aligned} d_2/d_1 &= 0.33 \\ h_3/d_1 &= 0.3 \\ \alpha &= 25^\circ \\ h_1/d_1 &= 1 \\ \delta/d_1 &= 0.1 \end{aligned}$	propeller central with 3 baffles, off centre, pitched and side entry without baffles, also used in draft tubes	axial

Figura 11.6. Característiques òptimes del reactor per aquest tipus d'agitador.

La geometria que millor s'adapta per a aquest tipus d'agitació és aquella en la qual l'alçada del líquid sigui la mateixa que el diàmetre del reactor. Per trobar aquesta configuració es necessita un esquema de càlcul que es facilitarà al següent apartat "Disseny mecànic".

Taula 11.18. Dimensions del reactor.

REACTOR	
h_1 (m)	d_1 (m)
2.3172	2.3164

Taula 11.19. Dimensions de l'agitador.

AGITADOR		
h_3 (m)	d_2 (m)	α
0.6949	0.7721	25

Taula 11.20. Especificacions del Baffle.

Baffle		
δ (m)	Offset _{SUP} (m)	Offset _{INF} (m)

0.2316	0.0386	0.3860
--------	--------	--------

On:

- h_1 : alçada del nivell del líquid
- d_1 : diàmetre del reactor
- h_3 : alçada del agitador des de el fons del reactor
- d_2 : diàmetre de l'agitador
- α : angle d'inclinació de l'hèlix
- δ : gruix de la pantalla deflectora, o baffle
- $\text{Offset}_{\text{SUP}}$: diferència d'alçada entre el baffle i la part del líquid. La part superior del baffle es troba en una posició lleugerament inferior al nivell del líquid.
- $\text{Offset}_{\text{INF}}$: diferència d'alçada entre el baffle i la part inferior del cilindre del reactor.

Per tal d'evitar la formació de remolins, els quals indueixen a una disminució de la qualitat de la mescla, s'ha de disposar de 3 baffles, amb l'objectiu de que el contingut del reactor estigui ben homogeneïtzat.

L'agitador del reactor consumirà energia, de manera que s'ha de calcular la potència que requereix per conèixer el consum d'electricitat. Prèviament a quantificar aquest requeriment, s'ha de conèixer les revolucions de l'agitador, el qual ha de proporcionar una bona agitació. Per garantir una bona agitació, el nombre de Reynolds a l'interior del reactor ha de indicar un règim turbulent.

$$N_{Re} = \frac{N \cdot \rho \cdot D^2}{\mu} \quad (Eq. 85)$$

On:

- N_{Re} : Nombre de Reynolds
- N : Nombre de revolucions per segon de l'agitador (rps)
- ρ : densitat de la mescla (kg/m^3)
- D^2 : Diàmetre intern del reactor (m)
- μ : viscositat de la mescla ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

$$N_{Re} = \frac{3.5 \cdot 1111.84 \cdot 2.316^2}{3.59 \cdot 10^{-4}} = 6.46 \cdot 10^7$$

El nombre de Reynolds per a 3.5 revolucions per segon, mostra que el règim serà turbulent, i es disposarà d'una molt bona agitació.

Per conèixer la potència requerida per determinar el consum de l'agitador s'emptra la següent equació:

$$P = N_p \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D_a^5 \text{ (Eq. 86)}$$

On:

- P: potència de l'agitador (W)
- N_p : número de potència de l'agitador
- D_a : Diàmetre de l'agitador (m)
- ρ : densitat de la mescla (kg/m^3)
- N: número de revolucions per segon (rps)

Tots els valors per trobar la potència són coneguts, excepte el número de potència. La il·lustració que apareix a continuació permet trobar aquest paràmetre en funció del nombre de Reynolds.

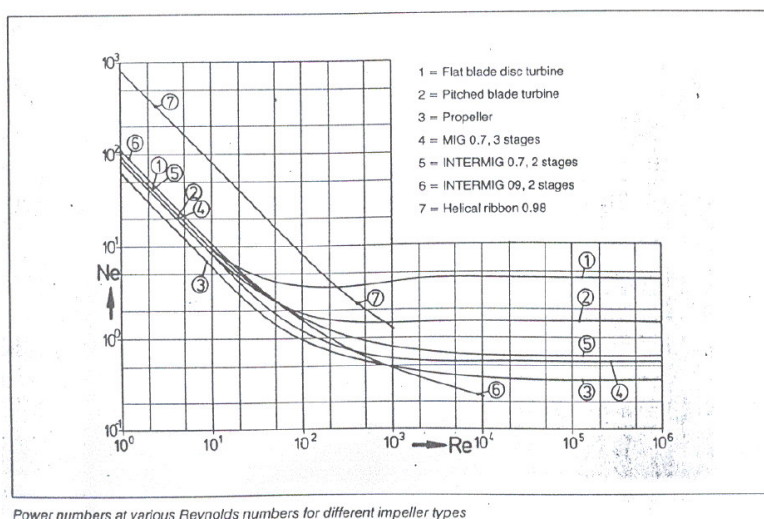


Figura 11.7. Número de potència en funció del nombre de Reynolds.

Com el nombre de Reynolds és de l'ordre de 10^7 , $N_p = 0.4$

$$P = 0.4 \cdot 1111.84 \cdot 3.5^2 \cdot 0.772^5 = 5234.11 \text{ W}$$

11.3.1.6. Disseny mecànic

- **Condicions de disseny**

La determinació de les característiques mecàniques del reactor depèn de diversos factors, entre els quals es troben la temperatura i la pressió a la qual operarà el reactor. Tanmateix, a l'hora de dissenyar el reactor s'haurà de disposar d'un factor de seguretat, de manera que es realitzaran els càlculs amb les temperatures i pressions de disseny, i no d'operació. Per calcular aquests valors es disposa del següent mètode de càlcul:

$$T_{disseny} = T_{operació} + 20^{\circ}\text{C} = 95 + 20 = 115^{\circ}\text{C}$$

Pel que fa a la pressió de disseny, s'utilitzen dos equacions, de les quals s'ha d'extreure el valor del mètode que doni un valor més gran.

$$P_{disseny,a} = 1.1 \cdot (P_{operació} + P_{estàtica}) \quad (Eq. 87)$$

$$P_{disseny,b} = P_{operació} + P_{estàtica} + 2.04 \text{ atm} \quad (Eq. 88)$$

- $P_{estàtica}$: és la pressió que confereix l'alçada del líquid a la part inferior del reactor. Com s'ha esmentat a l'apartat d'agitació, l'alçada del líquid és de 2.317 m.

$$P_{estàtica} = g \cdot \rho \cdot h = 9.81 \cdot 1111.84 \cdot 2.317 = 21004.77 \text{ Pa} = 0.2073 \text{ atm} \quad (Eq. 89)$$

$$P_{disseny,a} = 1.1 \cdot (10 + 0.2073) = 11.23 \text{ atm}$$

$$P_{disseny,b} = 10 + 0.2073 + 2 = 12.2473 \text{ atm}$$

Observant els valors calculats, s'escull la pressió de disseny donada per l'equació 87.

- **Espessor de les parets**

Tot seguit es procedeix a determinar els gruixos que requeriran les parets del reactor, les quals hauran de poder assolir les condicions de treball a l'interior del reactor. Un factor imprescindible per conèixer els espessors de les parets, es establir la geometria del reactor. Degut a que el reactor treballa a pressions altes s'escull la configuració que aporta més resistència. Aquesta disposició consisteix en un cos cilíndric, amb dos capçals de geometria torisfèrica, com es mostra a la següent il·lustració.

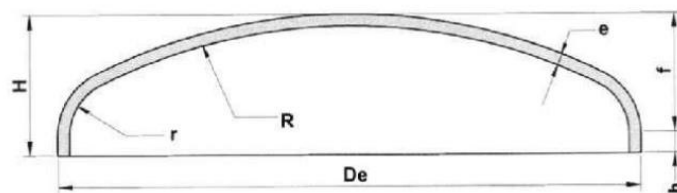


Figura 11.8. Cos cilíndric amb dos capçals de geometria torisfèrica.

L'espessor del cos cilíndric ve definit per l'equació 90.

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} + C_1 \text{ (Eq. 90)}$$

On:

- t: espessor de la paret cilíndrica del reactor (mm)
- P: pressió de disseny (atm)
- R: radi intern del reactor (mm)
- S: màxima tensió admissible del material (atm)
- E: factor de soldadura = 0.85 (radiografiat doble parcial)
- C₁: marge per corrosió (mm)

El valor de l'espessor dependrà, doncs del material escollit. Fent un anàlisi de les substàncies presents al reactor, s'observa que no hi haurien d'haver-hi problemes per corrosió, ja que per a que un àcid es pugui dissociar requereix de la presència d'aigua, i totes les espècies que entren al reactor són anhídres. Malgrat això, per qüestions de seguretat, es determina treballar amb acer inoxidable 316L, recobrint el seu interior amb una capa de tefló. Aquesta mesura s'adopta degut a que substàncies com el fluorur d'hidrogen, si entressin en contacte amb aigua a causa d'una possible infiltració, generarien greus problemes de seguretat, ja que en presència d'aigua s'origina àcid fluorhídric, un àcid molt fort i perillós que requereix de materials molt resistents a la corrosió. És per això, que es decideix aplicar un sobre-espessor per a la corrosió de 2mm de tefló.

La màxima tensió admissible del material s'obté de la següent taula:

MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW)														
Specification		Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,8	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	—	—	—
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	—	—

Figura 11.9. Màxima tensió que admet el material.

A la temperatura de 115°C (239°F), la màxima tensió admissible és de 15.7 ksi (1068 atm)

$$t = \frac{12.2473 \cdot 1158.2}{1068 \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 12.2473} + 2 = 17.753 \text{ mm}$$

Amb l'objectiu d'abaratir costos, s'estableix un espessor total de 18 mm, dels quals 16 mm seran d'acer inoxidable, i 2 mm seran de tefló.

L'equació que permet calcular el gruix de les parets dels capçals toriesfèrics és la següent.

$$t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} + C_1 + C_2 \quad (Eq. 91)$$

On:

- t: espessor del capçal toriesfèric (mm)
- P: pressió de disseny (atm)
- L: Diàmetre del reactor (mm)
- S: màxima tensió admissible del material (atm)
- E: factor de soldadura = 0.85 (radiografiat doble parcial)
- C₁: marge per corrosió (mm)
- C₂: tolerància de fabricació (mm) = 10% de l'espessor
- M: factor que depèn de la relació R/r

La tolerància a la fabricació s'ha de tenir en compte, ja que a diferència del cos cilíndric del reactor, un capçal toriesfèric pot comptar amb petites imperfeccions degudes a la complexitat de la seva geometria. Per aquest motiu, es sobredimensiona el gruix un 10% del gruix obtingut.

El factor M, ve determinat per la relació R/r, esmentada anteriorment. Un valor típic en els capçals toriesfèrics és R=10·r, i observant la següent taula es pot determinar el valor M.

VALUES OF FACTOR "M"																
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77

Figura 11.10. Valor de M en funció de R/r.

Analitzant la taula es recull el valor M=1.54

$$t = \left[\frac{12.2473 \cdot 2316.5 \cdot 1.54}{2 \cdot 1068 \cdot 0.85 - 0.2 \cdot 12.2473} + 2 \right] \cdot 1.1 = 28.706 \text{ mm}$$

Igualment que en l'espessor del cos cilíndric, s'estableix un valor estàndard de gruixos per abaratir el cost, de manera que l'espessor serà de 30 mm, dels quals 28 mm seran d'acer inoxidable 316L, i 2 mm seran de tefló.

- **Característiques geomètriques**

A l'apartat del manual de càlcul de determinació dels paràmetres òptims per a una bona agitació, s'establia que el nivell d'alçada del líquid havia de ser el mateix que el diàmetre del reactor. És per això, que la resolució de les característiques geomètriques del reactor ha de tenir en compte diversos aspectes.

Les equacions que apareixen a continuació són necessàries per poder determinar paràmetres bàsics com l'alçada del reactor, el seu diàmetre, i el nivell d'alçada del líquid.

$$V_{\text{reactor}} = V_{\text{cilindre}} + 2 \cdot V_{\text{capçal}} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H_{\text{cil}} + 2 \cdot (0.08089 \cdot D^3) \quad (\text{Eq. 92})$$

$$V_{\text{liq}} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H'_{\text{liq}} + 0.08089 \cdot D^3 \quad (\text{Eq. 93})$$

$$H_{\text{liq}} = H'_{\text{liq}} + 0.169 \cdot D \quad (\text{Eq. 94})$$

On:

- V_{reactor} : volum total del reactor = 15.1908 m³
- V_{cilindre} : volum que pot albergar el cilindre del reactor (m³)
- $V_{\text{capçal}}$: volum que pot albergar un capçal del reactor (m³)
- D: diàmetre del reactor (m)
- H_{cil} : alçada del cilindre (m)

- V_{liq} : volum del reactor ocupat pel líquid = 10.1272 m³
- H_{liq} : alçada del nivell del líquid (m)

La resolució d'aquestes equacions es fa seguint un mètode d'iteracions, donant relacions de H/D, variant els valors del diàmetre i de l'alçada de manera que el volum obtingut sigui el desitjat, iterant fins que el diàmetre i l'alçada del líquid siguin iguals. Els valors finals d'aquests paràmetres es recullen a continuació.

Taula 11.21. Dimensions del cilindre.

Volum cilindre (m³)	13.179
Volum capçal (m³)	2.011
Altura cilindre (m)	3.127
Diàmetre intern (m)	2.316
H liq'	1.925
Alçada líquid (m)	2.317

Una de les característiques essencials del reactor és la seva alçada. Per calcular-la es segueix el següent mètode de càlcul.

$$h = 3.5 \cdot t_{esp, cap\grave{c}} \text{ (Eq. 95)}$$

$$f = 0.1955 \cdot D_E - 0.455 \cdot t_{esp, cap\grave{c}} \text{ (Eq. 96)}$$

$$D_E = D_I + 2 \cdot t_{esp, cil}$$

$$H_{cap\grave{c}al} = h + f \text{ (Eq. 97)}$$

$$H_{reactor} = H_{cil} + 2 \cdot H_{cap\grave{c}al} \text{ (Eq. 98)}$$

On:

- $t_{esp, cap\grave{c}}$: espessor del capçal (m)
- D_E : diàmetre extern del reactor (m)
- D_I : diàmetre intern del reactor (m)
- $t_{esp, cil}$: espessor del cilindre (m)
- $H_{cap\grave{c}al}$: alçada del capçal torisfèric (m)

- H_{cil} : alçada del cilindre (m)
- $H_{reactor}$: alçada del reactor (m)

Taula 11.22. Dades de l'alçada del reactor.

h	0.105
f	0.443
Diàmetre extern (m)	2.334
Alçada capçal (m)	0.548
Alçada reactor (m)	4.223

- **Massa del reactor**

Estant especificades les dimensions del reactor, amb la seva geometria i els espessors de les parets es procedeix a trobar el pes de l'equip. Les següents expressions s'utilitzen per extreure aquests valors.

$$M_{reactor} = M_{cil} + 2 \cdot M_{capçal} \quad (Eq. 99)$$

$$M_{cil} = M_{cil,acer} + M_{cil,tefló} \quad (Eq. 100)$$

$$M_{cil} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_E^2 - D_M^2) \cdot \rho_{acer} + \frac{\pi}{4} \cdot (D_M^2 - D_I^2) \cdot \rho_{tefló}$$

$$M_{capçal} = M_{capçal,acer} + M_{capçal,tefló} \quad (Eq. 101)$$

$$M_{capçal} = (0.08089 \cdot D_E^2 - 0.08089 \cdot D_M^2) \cdot \rho_{acer} + (0.08089 \cdot D_M^2 - 0.08089 \cdot D_I^2) \cdot \rho_{tefló}$$

$$D_M = D_I + C_1$$

On:

- $M_{reactor}$: massa de l'equip (Kg)
- M_{cil} : massa del cilindre (Kg)
- $M_{capçal}$: massa del capçal (kg)
- ρ_{acer} : densitat de l'acer = 7990 kg/m³
- $\rho_{tefló}$: densitat del tefló = 2200 kg/m³
- D_E : diàmetre extern (m)
- D_M : diàmetre mig (m)
- D_I : diàmetre intern (m)
- C_1 : marge per corrosió (m)

S'ha tingut en compte que la part exterior de la paret del reactor és d'acer inoxidable, mentre que la zona interna és de tefló. Per això, es calcula un diàmetre mig, que equival al límit entre la capa de tefló i la capa d'acer. Multiplicant els volums ocupats per aquests materials per la seva densitat es pot obtenir el pes total de l'equip.

Cal tenir en compte, que el reactor ha de realitzar proves hidràuliques amb l'objectiu de detectar possibles fuites. Sabent el pes únicament de l'equip, no podem saber el pes que aquest tindrà quan se li realitzin aquestes proves, de la mateixa manera que tampoc es sap el pes que tindrà un cop estigui en operació. Calcular aquests valors, és imprescindible, ja que aquest reactor està recolzat sobre un suport, que s'encarrega de subjectar el reactor i d'elevarlo del terra. El suport escollit és l'anomenat faldó, el qual s'uneix al reactor per la seva part inferior mitjançant una soldadura. L'altura del faldó és d'un metre, el seu material és acer al carboni, i el pes del reactor determinarà els gruixos i les capacitats que té aquest per aguantar pes. A continuació es procedeix a realitzar els càlculs pertinents.

$$M_{R,aigua} = V \cdot \rho_{aigua} \quad (Eq. 102)$$

$$M_{R,operatiu} = V_{liq} \cdot \rho_{liq} + V_{gas} \cdot \rho_{gas} \quad (Eq. 103)$$

$$V_{gas} = V - V_{liq} = 15.1908 - 10.1272 = 5.063 \text{ m}^3 \quad (Eq. 104)$$

On:

- $M_{R,aigua}$: massa del reactor omplert amb aigua (kg)
- $M_{R,operatiu}$: massa del reactor en operació (kg)
- V : volum del reactor = 15.1908 m^3
- V_{liq} : volum ocupat pel líquid = 10.1272 m^3
- V_{gas} : volum ocupat pel gas (m^3)
- ρ_{aigua} : densitat de l'aigua = 1000 kg/m^3
- ρ_{liq} : densitat del líquid del procés = 1111.84 kg/m^3
- ρ_{gas} : densitat del gas generat = 3.7 kg/m^3

Els valors obtinguts en aquest apartat es mostren en la taula que hi ha a continuació:

Taula 11.23. Massa del reactor.

Massa cilindre (kg)	1288.18
Massa capçal (kg)	269.55

Massa reactor (kg)	1827.28
Massa reactor omplert amb aigua (kg)	15190.80
Massa reactor en operació (kg)	13087.11

11.3.1.7. Intercanvi de calor

La reacció que es produeix al reactor és de naturalesa endotèrmica, i part dels reactius passen a la fase gas, de manera que el reactor requereix d'energia tèrmica per poder operar a la temperatura desitjada. Per escalfar reactors existeixen diversos mètodes com els serpentins interns, la camisa o la mitja canya. El serpentí és la tècnica que aporta més energia amb més facilitat, ja que al estar disposat a l'interior del reactor no presenta els problemes de transferència de calor a través del gruix de la paret, típic de les tècniques de transferència de calor externa. Tot i així, degut a la presència de substàncies que en presència d'aigua poden adquirir un caràcter fortament àcid, es decideix utilitzar un mecanisme d'aportació d'energia externa. De les dos tècniques disponibles, s'ha escollit la mitja canya per mantenir el reactor a 95°C. El fluid que s'encarrega d'aportar calor al reactor és l'oli tèrmic DOWTHERM J, ja que és el que s'utilitza a la resta de la planta per als bescanviadors de calor.

Primer de tot, és necessari determinar l'àrea de la qual es disposa per dur a terme operacions d'intercanvi de temperatura. Per fer-ho s'empra la següent expressió:

$$A_{besc} = H_{liq} \cdot \pi \cdot D_E = 2.317 \cdot \pi \cdot 2.334 = 16.99 \text{ m} \quad (Eq. 105)$$

Tot seguit s'ha de conèixer la capacitat de transmissió de l'energia, de manera que s'ha de calcular el coeficient global de transmissió de calor.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_E} + \frac{1}{F_E} + \frac{D_E \cdot \ln\left(\frac{D_E}{D_I}\right)}{2 \cdot K} + \frac{D_E}{D_I} \cdot \frac{1}{h_I} + \frac{D_E}{D_I} \cdot \frac{1}{F_I}} \quad (Eq. 106)$$

On:

- U: coeficient global de transmissió de calor (W/m²·K)
- h: coeficient de pel·lícula (W/m²·K)
- F: factor d'embrutiment (W/m²·K)

- K: coeficient de conductivitat tèrmica del material entre els fluids (W/m·K)
- E: part externa del reactor
- I: part interna del reactor

Per trobar els factors d'embrutiment cal observar la següent figura.

Table 12.2. Fouling factors (coefficients), typical values

Fluid	Coefficient (W/m ² °C)	Factor (resistance) (m ² °C/W)
River water	3000–12,000	0.0003–0.0001
Sea water	1000–3000	0.001–0.0003
Cooling water (towers)	3000–6000	0.0003–0.00017
Towns water (soft)	3000–5000	0.0003–0.0002
Towns water (hard)	1000–2000	0.001–0.0005
Steam condensate	1500–5000	0.00067–0.0002
Steam (oil free)	4000–10,000	0.0025–0.0001
Steam (oil traces)	2000–5000	0.0005–0.0002
Refrigerated brine	3000–5000	0.0003–0.0002
Air and industrial gases	5000–10,000	0.0002–0.0001
Flue gases	2000–5000	0.0005–0.0002
Organic vapours	5000	0.0002
Organic liquids	5000	0.0002
Light hydrocarbons	5000	0.0002
Heavy hydrocarbons	2000	0.0005
Boiling organics	2500	0.0004
Condensing organics	5000	0.0002
Heat transfer fluids	5000	0.0002
Aqueous salt solutions	3000–5000	0.0003–0.0002

Figura 11.11. Factors d'embrutiment.

Com s'observa en la figura que apareix a continuació el valor del coeficient de pel·lícula de l'oli tèrmic ve definit per la velocitat que té el fluid dintre de la mitja canya.

Figure 12—Liquid Film Coefficient for DOWTHERM J Fluid Inside Pipes and Tubes (Turbulent Flow Only) (SI Units)

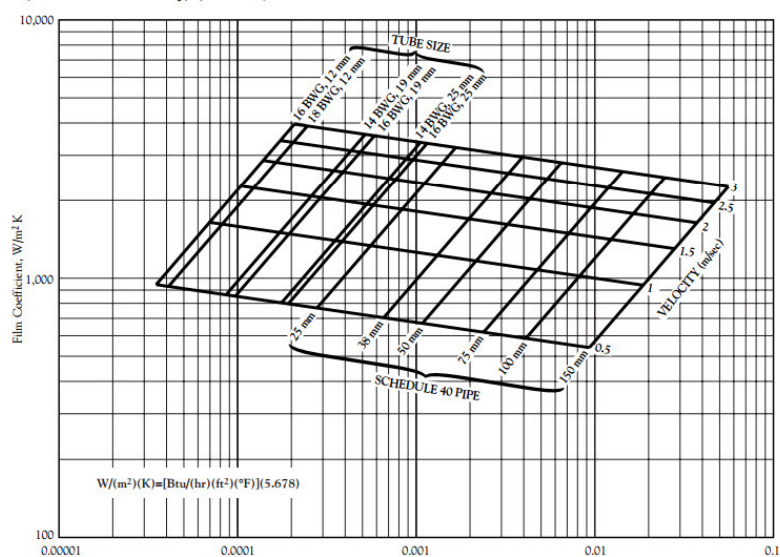


Figura 11.12. Valor del coeficient de la pel·lícula de l'oli.

Bibliogràficament, s'ha observat que les velocitats típiques de fluids en canonades sol estar entre 1.5 i 2.5 m/s. Escollint una velocitat de 2 m/s, tenim que el coeficient de pel·lícula és de $1500 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

El coeficient de pel·lícula del líquid del reactor es calcula seguint la següent figura. Degut a la presència de varies substàncies en aquest, s'escull el valor dels solvents orgànics, ja que són les substàncies presents al reactor que pitjor coeficient de pel·lícula presenten.

Table 10-16
Approximate Film Coefficients, h_i or h_o *

	Film Coeff., BTU/Hr. (Sq. Ft.) (°F.)
No Change of Phase	
Water.....	300—2000
Gases.....	3—50
Organic Solvents.....	60—500
Oils.....	10—120
Condensing	
Steam.....	1000—3000
Organic solvents.....	150—500
Light Oils.....	200—400
Heavy oils (vacuum).....	20—50
Ammonia.....	500—1000
Evaporation	
Water.....	800—2000
Organic solvents.....	100—300
Ammonia.....	200—400
Light oils.....	150—300
Heavy oils.....	10—50

* By permission, The Pfaunder Co., Rochester, N. Y., Bulletin 949.

Figura 11.13. Coeficient de pel·lícula aproximats per a diferents productes.

Conseqüentment, el coeficient global de transmissió de calor és de **253.286 W/m²·K**

Com es coneix la quantitat de calor que cal aportar, les següents equacions determinen els paràmetres que defineixen l'intercanvi.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 107})$$

$$Q = U \cdot A \cdot DTML \quad (\text{Eq. 108})$$

$$DTML = \frac{(T_1 - T_R) - (T_2 - T_R)}{\ln \left(\frac{T_1 - T_R}{T_2 - T_R} \right)} \quad (\text{Eq. 109})$$

On:

- Q: calor a aportar al reactor per part de l'oli tèrmic = 267962W
- c_p : calor específic de l'oli tèrmic (J/kg·K)
- m: cabal màssic d'oli tèrmic que circula per la mitja canya (Kg/h)
- ΔT : diferència de temperatures entre l'entrada i la sortida de l'oli (°C)
- A: àrea de bescanvi requerida per a l'intercanvi d'energia (m²)
- DTML: mitjana logarítmica de temperatures, considerant temperatures d'entrada i sortida del fluid tèrmic, T_1 i T_2 respectivament, i la temperatura del reactor T_R .

Com es pot observar a l'equació **ASDRADSF**, una diferència de temperatures grans comporta la necessitat d'un cabal màssic menor, encara que per motius de seguretat, no convé fer un salt de temperatures major a 30°C. És per això, que s'escull aquest diferencial de temperatures per a determinar les necessitats de cabal màssic d'oli. Però, no disposem del valor de la capacitat calorífica, ja que les temperatures no estan encara definides.

Un cop el coeficient global de transmissió de calor és conegut, és pot obtenir l'àrea requerida per a dur a terme un bescanvi de calor suposant la temperatura del cabal d'entrada de l'oli tèrmic mitjançant l'equació **qwefaewf**. El valor d'aquesta temperatura haurà de ser tal que requereixi una àrea inferior a l'àrea disponible de bescanvi.

Per a un valor de la temperatura d'entrada de 180°C tenim que

$$DTML = \frac{(180 - 95) - (150 - 95)}{\ln\left(\frac{180 - 95}{150 - 95}\right)} = 68.915$$

$$A = \frac{267962}{253.28 \cdot 68.915} = 15.35 \text{ m}^2$$

$$m = \frac{267962}{2.315 \cdot 30} = 13890 \text{ kg/h}$$

Les equacions que defineixen les característiques de la mitja canya són les següents

$$A_{t,tub} = \frac{\pi \cdot D_{tub}^2 / 4}{2} \quad (Eq. 110)$$

$$v_{oli} = \frac{m / \rho_{oli}}{A_{t,tub}} \quad (Eq. 111)$$

$$L = \frac{A}{\pi \cdot D_{tub}} \quad (Eq. 112)$$

$$n_{voltes} = \frac{L}{\pi \cdot D_E} \quad (Eq. 113)$$

$$h_{tubs} = \frac{H_{liq}}{n_{voltes} + 1} \quad (Eq. 114)$$

On:

- D_{tub} : diàmetre del tub de la mitja canya (m)
- $A_{\text{t,tub}}$: àrea transversal de la mitja canya (m^2)
- V_{oli} : velocitat de l'oli en la mitja canya (m s^{-1})
- m : cabal màssic de l'oli tèrmic (kg/s)
- L : longitud de la mitja canya (m)
- n_{voltes} : número de voltes de la mitja canya
- h_{tubs} : alçada entre els tubs (m)

Per tal d'abaratir costos de fabricació, en comptes de disposar d'una velocitat del fluid de 2m/s , és mirat d'utilitzar un diàmetre que proporcioni aquesta velocitat aproximadament, però que tingui unes dimensions estandarditzades. Per a un diàmetre de 8 cm , tenim que:

$$A_{\text{t,tub}} = \frac{\pi \cdot 0.08^2 / 4}{2} = 0.0025 \text{ m}^2$$

$$v_{\text{oli}} = \frac{13890 / 730.6}{0.0025} = 2.1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Com la velocitat és molt semblant, no canvia cap propietat, si bé, en tot cas milloraria la transferència de calor.

Per últim,

$$L = \frac{15.35}{\pi \cdot 0.08} = 61.08 \text{ m}$$

$$n_{\text{voltes}} = \frac{61.08}{\pi \cdot 2.334} = 8.33 = 9 \text{ voltes}$$

$$h_{\text{tubs}} = \frac{2.317}{9 + 1} = 0.2317 \text{ m}$$

- **Aïllament**

Pel que fa a l'aïllament de l'equip, s'ha utilitzat el programa Calorcol d'Insulan, per determinar l'espessor de l'aïllant recomanat amb l'objectiu de que la superfície del reactor estigui a 25°C ,

utilitzant llana mineral de roca amb una densitat de 80 kg/m³. El gruix de l'espessor recomanat és de 0.83 polzades.

11.3.2. Reactor catalític multitubular. Producció de FREÓ-13

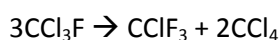
11.3.2.1. Introducció

El segon pas del procés, un cop s'ha aconseguit separar el FREÓ-12 generat al primer reactor, és convertir aquest en freó 13. La reacció present en aquest cas és la següent



El diclorodifluorometà generat al primer reactor es descompon, en presència d'un catalitzador, en clorotrifluorometà i tetraclorur d'antimoni. El catalitzador que promou aquesta reacció és el clorur d'alumini, un sòlid groguenc i porós.

Cal esmentar, que la formació de freó 13 a partir de freó 11, també és possible en presència d'aquest catalitzador, seguint la següent reacció:



Però, produeix menys mols de clorotrifluorometà i més de tetraclorur de carboni, amb la qual cosa es decideix recircular al primer reactor de nou, per a que produeixi més FREÓ-12.

Degut a que es desconeixen les dades cinètiques d'aquesta reacció, s'ha seguit la patent US2426637, en la qual la reacció es produeix pressió atmosfèrica i a 128°C. Per conèixer l'estat físic de les espècies presents en el reactor només cal veure a continuació les seves temperatures d'ebullició a 1 atmosfera.

Tala 11.24. Temperatura d'ebullició del CFC al segon reactor.

Temperatura d'ebullició (°C)	
CCL₂F₂	-29.79
CCLF₃	-81.44
CCL₄	76.75

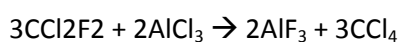
Tenint en compte que a pressió atmosfèrica, el clorur d'alumini no passa a fase líquida fins a 187.7°C, es donarà una reacció bifàsica, tenint una fase gas que contindrà reactius i productes, i una fase sòlida formada pel catalitzador.

Els reactors que poden albergar aquest tipus d'operacions, solen ser els de llit fix, llit mòbil i llit fluïditzat. Com es veurà més endavant, aquest reactor requereix d'un refrigerant, ja que es tracta d'una reacció exotèrmica. Tenint en compte aquest fet, i la desactivació del catalitzador, una solució prou bona seria la de fer servir un llit fluïditzat, ja que al adquireix una homogeneïtzació del llit, evitant gradients de temperatura. Cal esmentar, que el clorur d'alumini sofreix desactivació amb temperatures massa altes, així com per temperatures massa baixes disminueix la seva conversió. A més, igual que en el cas del primer reactor, la presència d'aigua pot fer que aquest perdi la seva activitat disminuint la seva vida útil. Apart del llit fluïditzat, un llit mòbil podria regenerar el catalitzador a mesura que anés sortint del reactor, pel que a primera vista tots dos serien una bona opció.

Malgrat tot, les úniques dades de les quals es disposa provenen d'experiments en plantes pilots, i no de plantes industrials. El canvi d'escala d'un llit fluïditzat o mòbil a escala de laboratori, a un a escala industrial sol resultar bastant imprecís degut a les complexitats que regeixen aquests tipus d'operacions, i, apart d'això, es requereix de costos d'operació més alts i equips addicionals com ciclons i regeneradors de catalitzador, que podrien resultar útils en casos de catalitzadors que disminuïssin la seva activitat molt ràpidament, però aquest no és el cas com es mostrarà més endavant.

És per això, que es decideix treballar amb un reactor de llit fix multitubular, degut a que a l'hora de realitzar la refrigeració s'aconsegueix major àrea de bescanvi, així com una disminució dels gradients de temperatura. Així mateix, el fet d'escollir un reactor de llit fix, fa que el canvi d'escala entre el reactor descrit a la patent, i el que es dissenyarà a escala industrial, tinguin més similituds, podent preveure amb més exactitud el comportament d'aquest reactor.

La patent proporcionada, disposa de varis exemples d'operació, en els quals opera a diferents temperatures i relacions de cabals. L'exemple escollit ha sigut el primer, degut a que presenta una bona conversió i una disminució de l'activitat petita en comparació amb altres exemples. La conversió d'aquest reactor arriba inicialment fins al 90%, però va disminuint a mesura que passa el temps degut a la pèrdua de catalitzador en pes, formant-se AlF_3 de la següent manera:



L'AlF₃ no catalitza la reacció, per la qual cosa s'ha d'evitar la seva formació el màxim possible donant valors de temperatura i relacions de cabal respecte catalitzador que minimitzin aquest valor al màxim.

En aquesta patent s'observa que al termini de l'experiment, de 439 hores, hi ha present un 0.34% en pes d'AlF₃ en el catalitzador, de manera que la seva desactivació es bastant lenta. Quantificant la pèrdua d'activitat del catalitzador en el període d'operació, que son 150 dies fins la parada de la planta, la presència d'AlF₃, serà de gairebé un 3% en pes, comportant una pèrdua de la conversió en la mateixa mesura. Fent la mitjana entre la conversió a l'inici i al final del període d'operació s'obté un valor d'una conversió del 88.5%. Un cop s'efectuï la parada de la planta es procedirà a la renovació del catalitzador per dur a terme el següent procés.

11.3.2.2. *Balanç de matèria*

Abans d'aprofundir en el càlcul dels paràmetres que defineixen al reactor s'ha de fer una comprovació del balanç de matèria, podent observar si els cabals màssics d'entrada coincideixen amb els cabals de sortida.

$$E + G = S + A \text{ (Eq. 115)}$$

L'equació del balanç de matèria ve definit pels següents termes.

- **Entrada (E):** La entrada inclou el cabal màssic de FREÓ-12, tant el que prové del procés com el que no ha reaccionat un cop es recircula.

$$E = M_{CCl_2F_{2,0}} + M_{CCl_2F_{2,R}} \text{ (Eq. 116)}$$

On:

- $M_{CCl_2F_{2,0}}$: Cabal màssic de diclorodifluorometà provinent de la primera part del procés (Kg/h)
- $M_{CCl_2F_{2,R}}$: Cabal màssic de diclorodifluorometà provinent de la recirculació

$$M_{CCl_2F_{2,0}} = 2418.19 + 314.19 = 2732.34 \text{ Kg/h}$$

- **Generació (G):** El terme generació inclou totes les formacions o descomposicions de productes. Aquests valors vindran donats per les conversions assolides en la reacció,

de manera que la generació serà la diferència de cabal màssic entre l'entrada i la sortida d'un component.

$$G_i = M_{i,E} - M_{i,S} = (F_{i,E} - F_{i,S}) \cdot PM_i \quad (Eq. 117)$$

On:

- E: Entrada al reactor
- S: Sortida del reactor
- M_i : Cabal màssic de l'espècie i (kg/h)
- **Sortida (S):** La sortida recull el cabal de productes formats, així com de reactius que no han reaccionat, i ve donat per les conversions de les reaccions

$$F_{CCl_2F_2,S} = F_{CCl_2F_2,E} \cdot (1 - X) \quad (Eq. 118)$$

$$F_{CClF_3,S} = F_{CClF_3,E} + \frac{2}{3} \cdot F_{CCl_2F_2} \cdot X \quad (Eq. 119)$$

$$F_{CCl_4,S} = F_{CCl_4} + \frac{1}{3} \cdot F_{CCl_2F_2} \cdot X \quad (Eq. 120)$$

On:

- E: Entrada al reactor
- S: Sortida del reactor
- M_i : Cabal màssic de l'espècie i (kg/h)
- F_i : Cabal molar de l'espècie i (Kmol/h)
- PM_i : Pes molecular de l'espècie i (Kg/Kmol)
- X: Conversió de la reacció

Els valors obtinguts es recullen a la taula següent:

Taula 11.25. Balanç de matèria.

	ENTRADA		SORTIDA		Generació (Kg/h)
	F (Kmol/h)	M (kg/h)	F (Kmol/h)	M (kg/h)	
CCl₂F₂	22.6	2732.620	2.599	314.251	-2418.369
CCl₄	0	0	6.667	1025.530	1025.530
CClF₃	0	0	13.334	1392.839	1392.839
TOTAL	22.6	2732.620	22.6	2732.620	0

- **Acumulació:** Degut a que la operació es en continu aquest terme és igual a 0.

Tenint en compte que el concepte d'acumulació és nul en aquest tipus d'operació, es pot veure a la taula 232343 que els cabals molars i màssics totals coincideixen. De la mateixa manera, el sumatori de les generacions de cada espècie es 0, ja que la massa no es genera ni es destrueix, de manera que el la massa total que es genera per una determinada espècie ve donada per la descomposició d'una altra espècie. Es per això, que es pot dir que el balanç de matèria es compleix.

11.3.2.3. Balanç d'energia

En aquest apartat es procedeix a calcular si la reacció és exotèrmica o endotèrmica, per tal de determinar si requerirà l'aportació d'energia o, pel contrari, es requerirà d'un sistema de refrigeració. Cal tenir en compte que les condicions d'operació han de ser de 128°C, ja que si la reacció generés energia i no es disposés d'un sistema de refrigeració, podrien tenir lloc reaccions sense control, amb el consegüent increment de la pressió, comportant un perill de seguretat per al personal de la planta. D'altra banda, si el reactor requereix energia externa i no disposés d'ella, la temperatura del reactor disminuiria, amb la consegüent davallada de la conversió global.

L'energia que caldrà aportar o retirar del reactor es pot trobar seguint els següents passos:

$$\Delta H_r = \sum_{i=1}^n (F_i \cdot \Delta H_{f,i})_{productes} - \sum_{i=1}^n (F_i \cdot \Delta H_{f,i})_{reactius} \quad (Eq. 121)$$

On:

- ΔH_r : Variació de l'entalpia de la reacció. Degut a que el procés és en continu, es considerarà la variació de l'entalpia en funció del cabal molar, és a dir, l'energia que consumirà o generarà la reacció en un temps determinat en funció dels cabals que reaccionen (KJ/h)
- $\Delta H_{f,i}$: Entalpia de formació de l'espècie i a la temperatura d'operació (KJ/Kmol)

$$\Delta H_f = \Delta H_f^0 + c_p \cdot (T_{op} - T_{ref}) \quad (Eq. 122)$$

On:

- ΔH_f^0 : Entalpia de formació de l'espècie i, a la temperatura de referència, T_{ref} (KJ/Kmol)
- C_p : Calor específic de l'espècie i (KJ/kmol·K)
- T_{op} : Temperatura d'operació (K)

Taula 11.26. Entalpies de formació.

	CCl_2F_2	CCl_4	CClF_3
Entalpia de formació (KJ/Kg)	-4018.9	-595.4	-6779.3

$$\Delta H_R = -332866.4 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} = Q_{requerit}$$

D'aquesta manera s'observa, doncs, que la reacció és exotèrmica, per la qual cosa caldrà retirar el calor amb un sistema de refrigeració. Com s'ha esmentat, prèviament en la introducció, s'opta per utilitzar un reactor de llit fix multitubular, amb l'objectiu de reduir els gradients de temperatura, especialment els produïts de forma radial.

11.3.2.4. Disseny funcional

Segons la patent que es segueix, per tal de poder assolir els objectius de conversions esmentat avans, l'aliment entra en una proporció de 0.35kg/h per cada kg de catalitzador. Realitzant un càlcul senzill es pot trobar la quantitat de catalitzador requerit.

$$M_{catalitzador} = \frac{M_{aliment}}{0.35} = \frac{2732.62 \text{ kg/h}}{0.35} = 7807.49 \text{ kg} \quad (Eq. 123)$$

On:

- $M_{catalitzador}$: massa requerida de catalitzador al reactor (kg)
- $M_{aliment}$: cabal màssic d'entrada al reactor (kg/h)

Coneixent la densitat del catalitzador, podem conèixer el volum que ocuparà aquest en el reactor. Cal tenir en compte, però, que no serà la densitat de la partícula, sinó la densitat aparent del catalitzador la que determinarà el volum total d'ocupació. La densitat aparent, té en compte la porositat, i per tant la fracció d'espais buits.

Bibliogràficament es troba que la densitat del catalitzador és de 2480 kg/m^3 . Per trobar la densitat aparent cal resoldre la següent equació:

$$\rho_{ap} = \rho_{part} \cdot (1 - \varepsilon) \quad (Eq. 124)$$

On:

- ρ_{ap} : densitat aparent del llit (kg/m^3)
- ρ_{part} : densitat de la partícula (kg/m^3)
- ε : porositat del llit

Bibliogràficament, es troba que els valors típics de porositat per a catalitzadors d'aquest tipus sol ser d'entre 0.4 i 0.5. Per a un valor de 0.4 tindrem:

$$\rho_{ap} = 2480 \cdot (1 - 0.4) = 1488 \text{ kg/m}^3$$

El volum que ocuparà aquest catalitzador es calcula com:

$$V_{CAT} = \frac{7807.49 \text{ kg}}{1488 \text{ kg/m}^3} = 5.247 \text{ m}^3 \quad (Eq. 125)$$

Tot i així, es decideix sobredimensionar el volum del catalitzador, per tal de poder tenir més versatilitat en cas de voler augmentar la producció

$$V_{CAT,DEF} = 5.247 \cdot 1.2 = 6.296 \text{ m}^3 \quad (Eq. 126)$$

Per a aquesta operació, el nombre de tubs ha de ser aquell que permeti una bona transmissió de calor, a la vegada que disposi d'un règim turbulent.

Per un nombre de tubs de 358 s'obtenen els següents valors:

$$V_{tub} = \frac{V_{cat,def}}{N_t} = \frac{6.296 \text{ m}^3}{358 \text{ tubs}} = 0.01758 \text{ m}^3/\text{tub} \quad (Eq. 127)$$

Establint un diàmetre intern de 0,05 metres cada tub es pot calcular l'alçada de cadascun, com:

$$H_{tub} = \frac{V_{tub}}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2} = \frac{0.01758 \text{ m}^3}{\frac{\pi}{4} \cdot 0.05^2} = 8.96 \text{ m} \quad (Eq. 128)$$

Conegudes les dimensions geomètriques dels tubs s'ha de procedir a comprovar si el règim que s'origina és turbulent, i si així ho és, quina serà la caiguda de la pressió del gas al passar a través del llit.

$$A_{transv} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 0.05^2 = 1.96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (Eq. 129)$$

$$v_{sup} = \frac{Q}{N_t \cdot A_{transv}} = \frac{738.5 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1\text{h}/3600 \text{ s}}{358 \cdot 1.96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} = 0.292 \text{ m/s} \quad (Eq. 130)$$

$$N_{Re} = \frac{v_{sup} \cdot \rho \cdot D}{\mu} = \frac{0.292 \cdot 3.701 \cdot 0.05}{1.7 \cdot 10^{-6}} = 3133.64 \quad (Eq. 130)$$

On:

- A_{transv} : àrea transversal tub (m^2)
- D : diàmetre tub (m)
- v_{sup} : velocitat superficial del gas (m/s)
- ρ : densitat del gas (kg/m^3)
- N_t : número de tubs
- μ : viscositat del gas ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)
- N_{Re} : nombre de Reynolds. $Re > 3000$ indica règim turbulent.

Per poder trobar el valor de la pèrdua de carrega que sofreix el gas al passar a través del llit s'han d'emprar els següents mètodes de càlcul:

$$G = v_{sup} \cdot \rho \quad (Eq. 131)$$

$$\frac{\delta P}{\delta z} = \frac{-G}{\rho \cdot D_p} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot (150 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{\rho}{D_p} + 1.75 \cdot G) \quad (Eq. 132)$$

On:

- G : flux màssic de gas ($\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
- ρ : densitat del gas (Kg/m^3)
- δP : pèrdua de pressió del gas a través del llit (Pa)
- δz : diferència de l'alçada a través del llit (m)
- D_p : diàmetre de la partícula del catalitzador = 5-20 mesh = 0.002 m
- ε : porositat del llit

$$G = 0.292 \cdot 3.701 = 1.08 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$$

$$\frac{\delta P}{\delta z} = \frac{-1.08}{3.701 \cdot 0.002} \cdot \frac{1 - 0.4}{0.4^3} \cdot (150 \cdot (1 - 0.4) \cdot \frac{3.701}{0.002} + 1.75 \cdot 1.08) = -3645 \text{ Pa}/\text{m}$$

$$\delta P = -\frac{\delta P}{\delta z} \cdot \delta z = -3645 \cdot 8.96 = -32649 \text{ Pa} = -0.32 \text{ atm} \quad (Eq. 133)$$

D'aquesta manera, la pressió requerida d'entrada al reactor per tal de vèncer aquesta pèrdua i no generar-se buit serà:

$$P_{E,REQ} = P_{operació} - \delta P = 1 + 0.32 = 1.32 \text{ atm} \quad (Eq. 134)$$

11.3.2.5. Disseny mecànic

Un cop sabent el nombre de tubs que tindrà el reactor, s'empra el codi ASME per al disseny mecànic dels tubs.

La determinació de les característiques mecàniques dels tubs depèn de diversos factors, entre els quals es troben la temperatura i la pressió a la qual operarà el reactor. Tanmateix, a l'hora de dissenyar el reactor s'haurà de disposar d'un factor de seguretat, de manera que es realitzaran els càlculs amb les temperatures i pressions de disseny, i no d'operació. Per calcular aquests valors es disposa del següent mètode de càlcul:

$$T_{disseny} = T_{operació} + 20^\circ\text{C} = 128 + 20 = 148^\circ\text{C}$$

Pel que fa a la pressió de disseny, s'utilitzen dos equacions, de les quals s'ha d'extreure el valor del mètode que doni un valor més gran.

$$P_{disseny,a} = 1.1 \cdot P_{operació} = 1.1 \cdot 1.32 = (Eq. 135)$$

$$P_{disseny,b} = P_{operació} + 2.04 \text{ atm} \quad (Eq. 136)$$

$$P_{disseny,a} = 1.1 \cdot 1.32 = 1.45 \text{ atm}$$

$$P_{disseny,b} = 1.32 + 2.04 = 3.36 \text{ atm}$$

Observant els valors calculats, s'escull la pressió de disseny donada per l'equació 136.

- **Espessor dels tubs**

En aquesta reacció, els components que hi ha presents no tenen característiques corrosives, per la qual cosa es considera que el material a escollir no ha de ser extremadament resistent a la corrosió, com era el cas de l'anterior reactor.

En aquest cas s'opta per emprar acer inoxidable 316L, ja que presenta bones característiques mecàniques i resisteix bé les característiques de les substàncies amb les quals entrarà en contacte. Cal dir, a més, que l'acer té un coeficient de transmissió de temperatura força elevat, per la qual cosa serà una bona opció a l'hora de refrigerar l'interior dels tubs.

L'espessor del cos cilíndric ve definit per l'equació 137.

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} + C_1 \quad (Eq. 137)$$

On:

- t: espessor del tub(mm)
- P: pressió de disseny (atm)
- R: radi intern del tub (mm)
- S: màxima tensió admissible del material (atm)
- E: factor de soldadura = 0.85 (radiografiat doble parcial)
- C₁: marge per corrosió (mm)

La màxima tensió admissible del material s'obté de la següent taula:

		MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW)												
Specification		Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F. Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18,8	17,8	16,6	16,2	15,9	15,9	15,9	15,9	15,5	15,2	14,9	14,7	14,4
SA-240	304L	15,7	15,7	15,3	14,7	14,4	14	13,7	13,5	13,3	13	—	—	—
SA-240	316	18,8	18,8	18,4	18,1	18,0	17,0	16,7	16,3	16,1	15,9	15,7	15,5	15,4
SA-240	316L	15,7	15,7	15,7	15,5	14,4	13,5	13,2	12,9	12,6	12,4	12,1	—	—

Figura 11.14. Màxima tensió que admet el material.

A la temperatura de 148°C (298.4°F), la màxima tensió admissible és de 15.7 ksi (1068 atm)

$$t = \frac{3.36 \cdot 50/2}{1068 \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 3,36} + 2 = 2.093 \text{ mm}$$

Amb l'objectiu d'abaratir costos, i tenint en compte, que el reactor requereix de poca resistència mecànica i corrosiva, es decideix deixar el diàmetre definitiu en 2 mm.

El diàmetre extern dels tubs serà, doncs:

$$D_E = D_I + 2 \cdot t = 0.05 + 2 \cdot 0.002 = 0.054 \text{ m (Eq. 138)}$$

El volum ocupat pels tubs al reactor es calcula de la següent manera:

$$V = N_t \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{t,E}^2 \cdot L_t = 358 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0.054^2 \cdot 8.96 = 7.35 \text{ m}^3 \text{ (Eq. 139)}$$

- **Disposició dels tubs**

Els tubs del reactor per tal de poder-se dur a terme l'intercanvi d'energia, estaran col·locats dintre d'una carcassa, funcionant d'una manera molt similar a com ho faria un bescanviador de carcassa i tubs. D'aquesta manera, s'ha de seleccionar la disposició que adoptaran els tubs dintre del reactor, per tal d'afavorir al màxim aquesta transferència de calor. Industrialment, les maneres de col·locar els tubs més emprades són les triangulars, quadrades, o les romboïdals, les quals es mostren en les figures que apareixen a continuació.

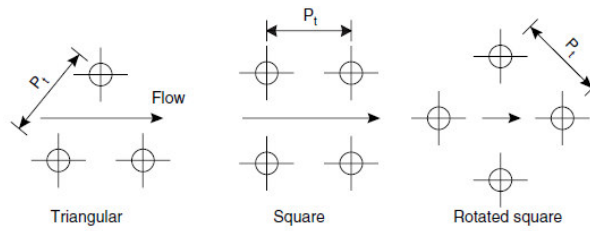


Figure 12.9. Tube patterns

Figura 11.15. Maneres de col·locar els tubs més utilitzades.

La romboïdal i la triangular són les que confereixen millor transferència d'energia, i la quadrada és la que presenta més facilitats a l'hora de la neteja. Considerant, que per la part externa dels tubs circularà l'oli tèrmic que s'empra també al primer reactor, no existiran greus problemes de neteja, amb la qual cosa es selecciona el la disposició triangular com la definitiva. Per tal de garantir una bona transferència i oferir alhora la possibilitat de realitzar tasques de neteja, la distància òptima entre els tubs es calcula de la manera següent:

$$p_t = 1.25 \cdot D_{ext} = 1.25 \cdot 0.054 = 0.0675 \text{ m (Eq. 140)}$$

On:

- p_t : pitch triangular = distància entre tubs (m)
- D_{ext} : diàmetre extern dels tubs (m)

- **Característiques de la carcassa**

Coneguda la disposició dels tubs es pot procedir a calcular el diàmetre de la carcassa amb la següent equació, calculant prèviament D_b

$$D_b = D_{ext} \cdot \left(\frac{N_t}{k_1} \right)^{1/n_1} \text{ (Eq. 141)}$$

On:

- D_b : bundle diameter, o diàmetre del feix (m)
- D_{ext} : diàmetre extern dels tubs (m)
- N_t : número de tubs

Per conèixer K_1 i n_1 , es consulta la següent taula

Triangular pitch, $p_t = 1.25d_o$					
No. passes	1	2	4	6	8
K_1	0.319	0.249	0.175	0.0743	0.0365
n_1	2.142	2.207	2.285	2.499	2.675
Square pitch, $p_t = 1.25d_o$					
No. passes	1	2	4	6	8
K_1	0.215	0.156	0.158	0.0402	0.0331
n_1	2.207	2.291	2.263	2.617	2.643

Figura 11.16. Valors de les constants per a una disposició triangular.

Per un pas per carcassa i una distribució triangular tindrem que:

$$D_b = 0.054 \cdot \left(\frac{358}{0.319} \right)^{1/2.142} = 1.433 \text{ m}$$

Per conèixer el diàmetre final de la carcassa caldrà primer saber quin tipus de carcassa s'emprarà. Dels diferents tipus de carcassa existents, es decideix fer servir una carcassa del tipus pull-through floating head. Aquesta decisió s'ha pres tenint en compte que a cada parada de la planta s'hauran de fer tasques de manteniment, reparacions i recanvis de catalitzador, i aquest tipus de carcassa no ve fixada, per la qual cosa es pot desmuntar i extreure'n els tubs. Apart d'això, és la que proporciona més distància entre el feix de tubs i la paret, essent la més versàtil i adequada per aquest cas.

Com s'ha esmentat abans, un cop conegut el diàmetre del feix i el tipus de carcassa que s'utilitzarà, es pot conèixer el diàmetre total de la carcassa observant la següent figura:

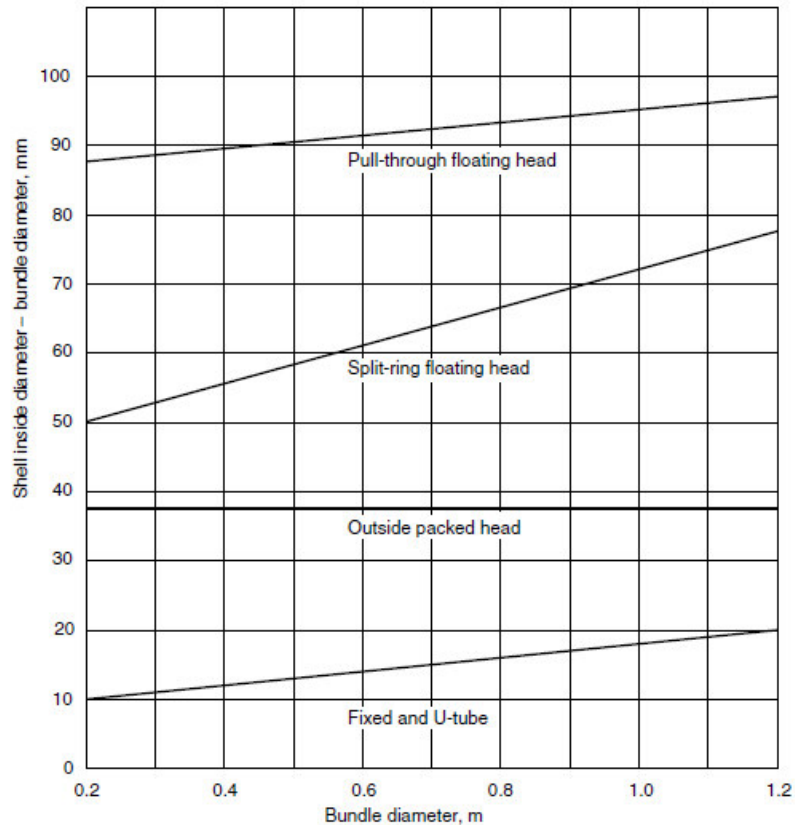


Figura 11.17. Diferència entre $D_{carcassa}$ i D_{feix} dels tubs en funció de D_b per a diferents tipus de carcassa.

Aquesta taula ens dona la distància que hi haurà entre el feix de tubs i el diàmetre de la carcassa. Degut a que es tracta d'un reactor multitubular, i no d'un bescanviador, el valor que busquem no apareix a la gràfica, però tenint en compte que es tracta d'una funció lineal, s'interpol·la, obtenint un valor aproximat de 120 mm de distància entre la paret de la carcassa i el feix de tubs. Conseqüentment, el diàmetre de la carcassa serà de:

$$D_{carcassa} = D_b + 0.12 = 1.433 + 0.12 = 1.553 \text{ m} \quad (Eq. 142)$$

Per determinar si les dimensions trobades compleixen el mètode de Kern, cal que el valor de la relació entre la longitud dels tubs i el diàmetre de la carcassa estigui situat entre 4 i 6

$$L_t/D_c = \frac{8.96}{1.553} = 5.77 \quad (Eq. 143)$$

La geometria del reactor entra dins del rang, per la qual cosa es decideix continuar amb el disseny del reactor

Un cop conegut el diàmetre de la carcassa es poden calcular els següents paràmetres que definiran l'interior del reactor.

$$Baffle\ cut = 0.225 \cdot D_C \text{ (Eq. 144)}$$

$$I_B = 0.4 \cdot D_C \text{ (Eq. 145)}$$

$$N_{pd} = \frac{L_t}{I_B} \text{ (Eq. 146)}$$

$$A_{t,C} = \frac{I_B \cdot D_C \cdot (pitch - D_{t,E})}{pitch \cdot n_{ps}} \text{ (Eq. 147)}$$

On:

- Baffle cut : altura lliure de la pantalla, és a dir, l'espai que queda entre la pantalla i la carcassa, per on passarà el fluid del costat de la carcassa. S'expressa com un percentatge, i els seus valors òptims oscil·len entre un 20 i un 25%
- I_B : espaiat entre pantalles, presentant valors òptims per al rang entre 0.3 i 0.5 vegades el diàmetre de la carcassa.
- N_{pD} : número de pantalles deflectores
- $A_{t,C}$: àrea transversal de la carcassa
- $D_{t,E}$: diàmetre extern dels tubs (m)
- n_{ps} : numero de passos per carcassa = 1

$$Baffle\ cut = 0.225 \cdot 1.553 = 0.35$$

$$I_B = 0.4 \cdot 1.553 = 0.621\ m$$

$$N_{pd} = \frac{8.96}{0.621} = 14.416 = 15\ pantalles$$

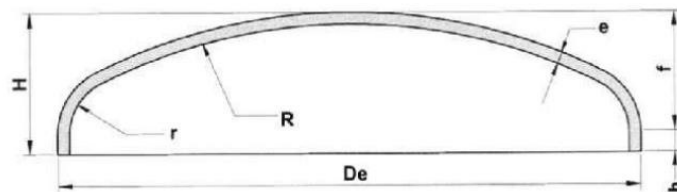
$$I_{B,DEF} = \frac{L}{N_{pd}} = \frac{8.96}{15} = 0.591\ m \text{ (Eq. 148)}$$

$$A_{s,t} = \frac{0.621 \cdot 1.553 \cdot (0.0675 - 0.054)}{0.0675} = 0.1855\ m^2$$

- **Espessor de les parets del reactor**

Tot seguit es procedeix a determinar els gruixos que requeriran les parets del reactor, les quals hauran de poder assolir les condicions de treball a l'interior del reactor. Un factor imprescindible per conèixer els espessors de les parets, es establir la geometria del reactor.

Degut a que el reactor treballa a pressions altes s'escull la configuració que aporta més resistència. Aquesta disposició consisteix en un cos cilíndric, amb dos capçals de geometria toriesfèrica, com es mostra a la següent il·lustració.



11.18. Cos cilíndric amb dos capçals de geometria toriesfèrica.

L'espessor del cos cilíndric ve definit per l'equació 149.

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} + C_1 \text{ (Eq. 149)}$$

On:

- t: espessor de la paret cilíndrica del reactor (mm)
- P: pressió de disseny (atm)
- R: radi intern del reactor (mm)
- S: màxima tensió admissible del material (atm)
- E: factor de soldadura = 0.85 (radiografiat doble parcial)
- C₁: marge per corrosió (mm)

El valor de l'espessor dependrà, doncs del material escollit. Fent un anàlisi de les substàncies presents a l'interior de la carcassa, s'observa que no hi haurien d'haver-hi problemes per corrosió, ja que el fluid que hi circula és oli tèrmic. Malgrat això, per qüestions de seguretat, es determina treballar amb acer inoxidable 316L, amb l'objectiu de maximitzar la vida útil de l'equip. La màxima tensió admissible del material s'obté de la següent taula:

MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW)														
Specification		Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F. Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950
SA-240	304	18.8	17.8	16.6	16.2	15.9	15.9	15.9	15.9	15.5	15.2	14.9	14.7	14.4
SA-240	304L	15.7	15.7	15.3	14.7	14.4	14	13.7	13.5	13.3	13	—	—	—
SA-240	316	18.8	18.8	18.4	18.1	18.0	17.0	16.7	16.3	16.1	15.9	15.7	15.5	15.4
SA-240	316L	15.7	15.7	15.7	15.5	14.4	13.5	13.2	12.9	12.6	12.4	12.1	—	—

Figura 11.19. Màxima tensió que admet el material.

A la temperatura de 148°C (298.4°F), la màxima tensió admissible és de 15.7 ksi (1068 atm). S'ha escollit aquesta temperatura degut a que, com es pot veure a la taula, els valors de la

màxima tensió admissible no varien fins els 300°F, i la temperatura del fluid que circularà per la carcassa, serà sempre inferior a la temperatura d'operació del reactor. És per això, que el valor obtingut de la taula es considera correcte.

$$t = \frac{3.04 \cdot 1553/2}{1068 \cdot 0.85 - 0.6 \cdot 3.04} + 2 = 4.57 \text{ mm}$$

Amb l'objectiu d'abaratir costos, i tenint en compte, que el reactor requereix de poca resistència mecànica i corrosiva, es decideix deixar el diàmetre definitiu en 5 mm

El diàmetre extern de la carcassa serà, doncs:

$$D_E = D_I + 2 \cdot t = 1.553 + 2 \cdot 5/1000 = 1.563 \text{ m (Eq. 150)}$$

L'equació que permet calcular el gruix de les parets dels capçals toriesfèrics és la següent.

$$t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} + C_1 + C_2 \text{ (Eq. 151)}$$

On:

- t: espessor del capçal toriesfèric (mm)
- P: pressió de disseny (atm)
- L: Diàmetre del reactor (mm)
- S: màxima tensió admissible del material (atm)
- E: factor de soldadura = 0.85 (radiografiat doble parcial)
- C₁: marge per corrosió (mm)
- C₂: tolerància de fabricació (mm) = 10% de l'espessor
- M: factor que depèn de la relació R/r

La tolerància a la fabricació s'ha de tenir en compte, ja que a diferència del cos cilíndric del reactor, un capçal toriesfèric pot comptar amb petites imperfeccions degudes a la complexitat de la seva geometria. Per aquest motiu, es sobredimensiona el gruix un 10% del gruix obtingut.

El factor M, ve determinar per la relació R/r, esmentada anteriorment. Un valor típic en els capçals toriesfèrics és R=10·r, i observant la següent taula es pot determinar el valor M.

VALUES OF FACTOR "M"																
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77

Figura 11.20. Valor de M en funció de R/r.

Analitzant la taula es recull el valor M=1.54

$$t = \left(\frac{3.04 \cdot 1553 \cdot 1.54}{2 \cdot 0.85 \cdot 1068 - 0.2 \cdot 3.04} + 2 \right) \cdot 1.1 = 6.55 \text{ mm}$$

Igualment que en l'espessor del cos cilíndric, s'estableix un valor estàndard de gruixos per abaratir el cost, de manera que l'espessor serà de 8 mm d'acer inoxidable 316 L.

- **Característiques geomètriques**

Una de les característiques essencials del reactor és la seva alçada. Per calcular-la es segueix el següent mètode de càlcul.

$$h = 3.5 \cdot t_{\text{esp, capç}} \text{ (Eq. 152)}$$

$$f = 0.1955 \cdot D_E - 0.455 \cdot t_{\text{esp, capç}} \text{ (Eq. 153)}$$

$$D_E = D_I + 2 \cdot t_{\text{esp, cil}}$$

$$H_{\text{capçal}} = h + f \text{ (Eq. 154)}$$

$$H_{\text{reactor}} = H_{\text{cil}} + 2 \cdot H_{\text{capçal}} \text{ (Eq. 155)}$$

On:

- $t_{\text{esp, capç}}$: espessor del capçal (m)
- D_E : diàmetre extern del reactor (m)
- D_I : diàmetre intern del reactor (m)
- $t_{\text{esp, cil}}$: espessor del cilindre (m)
- $H_{\text{capçal}}$: alçada del capçal torisfèric (m)
- H_{cil} : alçada del cilindre de la carcassa = alçada dels tubs (m)
- H_{reactor} : alçada del reactor/carcassa (m)

Taula 11.28. Alçada reactor.

H	0.028
---	-------

F	0.302
Alçada capçal (m)	0.323
Alçada reactor (m)	9.617

El volum del reactor, es podrà calcular llavors amb la següent expressió:

$$V_{reactor} = V_{cilindre} + 2 \cdot V_{capçal} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H_{cil} + 2 \cdot (0.08089 \cdot D^3) \quad (Eq. 156)$$

On:

- $V_{reactor}$: volum total del reactor (m^3)
- $V_{cilindre}$: volum que pot albergar el cilindre del reactor (m^3)
- $V_{capçal}$: volum que pot albergar un capçal del reactor (m^3)
- D : diàmetre del reactor (m)
- H_{cil} : alçada del cilindre (m)

Els resultats obtinguts es mostren a continuació

Taula 11.29. Volum del reactor.

Volum del cil·lindre (m^3)	16.681
Volum del capçal (m^3)	0.2979
Volum del reactor (m^3)	17.277

- **Massa del reactor**

Estant especificades les dimensions del reactor, amb la seva geometria i els espessors de les parets es procedeix a trobar el pes de l'equip. Les següents expressions s'utilitzen per extreure aquests valors.

$$M_{reactor} = M_{cil} + 2 \cdot M_{capçal} + M_{tubs} \quad (Eq. 157)$$

$$M_{cil} = \pi \cdot H_{cil} \cdot \left(\left(\frac{D_E}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \right)^2 \right) \cdot \rho_{acer} \quad (Eq. 158)$$

$$M_{capçal} = S_{capçal} \cdot \rho_{acer} \cdot t_{capçal} \quad (Eq. 159)$$

$$S_{capçal} = 0.931 \cdot D_I^2 \quad (Eq. 160)$$

$$M_{tubs} = N_{tubs} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{E,t}^2 - D_{I,t}^2) \cdot L_t \cdot \rho_{acer} \quad (Eq. 161)$$

$$M_{tot} = 1.1 \cdot M_{reactor} \quad (Eq. 162)$$

$$M_{aigua} = M_{tot} + \rho_{aigua} \cdot (V_{reactor} - V_{tubs}) \quad (Eq. 163)$$

$$M_{op} = M_{tot} + \rho_{oli} \cdot (V_{reactor} - V_{tubs}) + M_{catalitzador} \quad (Eq. 164)$$

On:

- $M_{reactor}$: massa de l'equip (kg)
- M_{cil} : massa del cilindre del reactor (kg)
- $M_{capçal}$: massa del capçal del reactor (kg)
- M_{tubs} : massa dels tubs (kg)
- M_{tot} : massa del reactor tenint en compte
- $S_{capçal}$: superfície del capçal (m^2)

Degut a la quantitat de resultats obtinguts, es procedeix a mostrar-los en la taula que hi ha a continuació.

Taula 11.30. Massa del reactor.

Massa del cilindre (kg)	1727.687
Massa del capçal (kg)	141.602
Massa dels tubs (kg)	8255.778
Massa del reactor (kg)	11293.336
Massa reactor omplet amb aigua (kg)	28570.413
Massa del reactor operatiu (kg)	27787.407

11.3.2.6. Intercanvi de calor

La reacció produïda en aquest reactor genera energia en forma de calor, degut a que la reacció és exotèrmica. Aquest fet implica el requeriment d'un fluid refrigerant per tal de neutralitzar l'augment de la temperatura, el qual provocaria la pèrdua d'activitat del catalitzador.

Per tal de conèixer els cabals i les temperatures d'entrada i de sortida del cabal, s'ha de realitzar un càlcul iteratiu, en el qual s'arriba a la millor opció de disseny. Primer de tot, cal conèixer l'àrea de bescanvi que disposaran els tubs.

$$A_{besc} = N_t \cdot \pi \cdot H_t \cdot D_t = 503.78 \, m^2 \quad (Eq. 165)$$

Per trobar la pèrdua de pressió que sofreix el fluid tèrmic que circula per la carcassa es pot resoldre amb la següent expressió.

$$\Delta P = 8 \cdot j_F \cdot \frac{\rho_{oli} \cdot v_{oli}^2}{2} \cdot \left(\frac{D_c}{D_{eq}} \right) \cdot \left(\frac{L}{I_B} \right) \quad (Eq. 166)$$

On:

- ΔP : pèrdua de pressió del fluid tèrmic que circula per la carcassa (bar)
- D_c : diàmetre de la carcassa (m)
- D_{eq} : diàmetre equivalent de a través dels tubs (m)
- L : longitud dels tubs (m)
- I_B : espai entre pantalles (m)
- j_F : factor de fricció. Es determina mitjançant la taula que apareix a continuació.

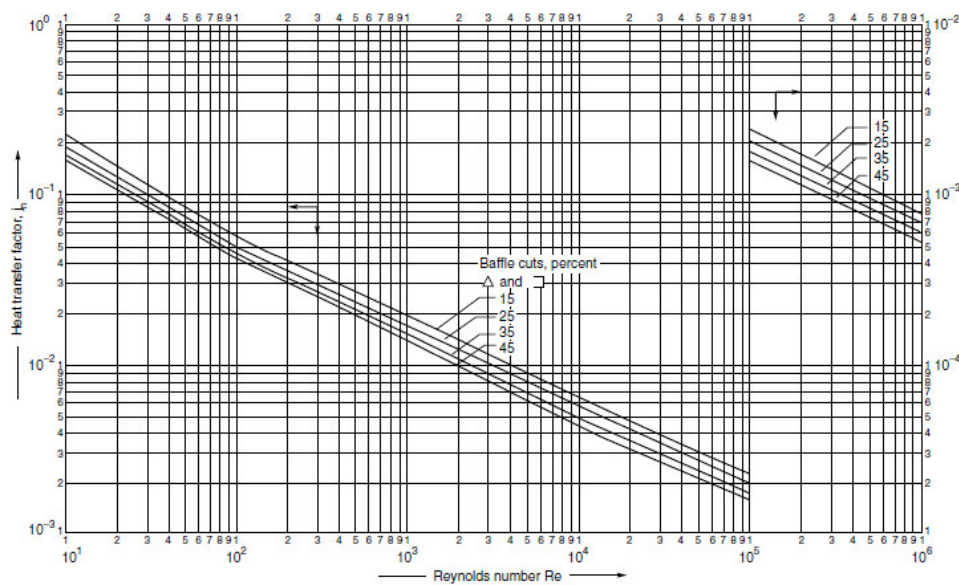


Figure 12.29. Shell-side heat-transfer factors, segmental baffles

Figura 11.21. Factor de fricció en funció del nombre de Reynolds.

$$D_{eq} = \frac{1.1}{D_e} \cdot (pitch^2 - 0.917 \cdot D_e^2) = 0.183m \quad (Eq. 167)$$

El nombre de Reynolds es pot calcular com:

$$N_{Re} = \frac{D_{eq} \cdot G_{oli}}{\mu_{oli}} \quad (Eq. 168)$$

On:

- G_{oli} : flux màssic de l'oli tèrmic a través de la carcassa ($\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
- μ_{oli} : viscositat de l'oli tèrmic ($\text{Kg}/\text{m} \cdot \text{s}$)

$$G_{oli} = \frac{m_{oli}}{A_{t,C}} \quad (Eq. 169)$$

On:

- m_{oli} : cabal màssic d'oli (kg/s)
- $A_{t,C}$: àrea transversal de la carcassa (m^2)

$$m = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta T} \quad (Eq. 170)$$

$$A = \frac{Q}{U \cdot DTML} \quad (Eq. 171)$$

$$DTML = \frac{(T_R - T_1) - (T_R - T_2)}{\ln\left(\frac{T_R - T_1}{T_R - T_2}\right)} \quad (Eq. 172)$$

$$v_{oli} = \frac{m_{oli}}{A \cdot \rho_{oli}} \quad (Eq. 173)$$

On:

- Q : calor que cal retirar (W)
- C_p : capacitat calorífica de l'oli tèrmic (J/kg)
- A : àrea requerida per al bescanvi de temperatura (m^2)
- $DTML$: mitjana logarítmica de temperatures. Té en compte les temperatures d'entrada i sortida del fluid tèrmic, T_1 i T_2 respectivament, així com la temperatura del reactor, T_R .
- U : coeficient global de transmissió de calor ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
- v_{oli} : velocitat superficial de l'oli tèrmic (m/s)

Per al càlcul del coeficient global de transmissió de calor, s'empra el mateix esquema de càlcul que el utilitzat en el primer reactor. Recordant-ho, es té que:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_E} + \frac{1}{F_E} + \frac{D_E \cdot \ln\left(\frac{D_E}{D_I}\right)}{2 \cdot K} + \frac{D_E}{D_I} \cdot \frac{1}{h_I} + \frac{D_E}{D_I} \cdot \frac{1}{F_I}} \quad (Eq. 174)$$

On:

- h: coeficient de pel·lícula ($W/m^2 \cdot K$)
- F: factor d'embrutiment ($W/m^2 \cdot K$)
- K: coeficient de conductivitat tèrmica del material entre els fluids ($W/m \cdot K$)
- E: part externa del reactor
- I: part interna del reactor

Per trobar els factors d'embrutiment cal observar la següent figura.

Table 12.2. Fouling factors (coefficients), typical values

Fluid	Coefficient ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Factor (resistance) ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
River water	3000–12,000	0.0003–0.0001
Sea water	1000–3000	0.001–0.0003
Cooling water (towers)	3000–6000	0.0003–0.00017
Towns water (soft)	3000–5000	0.0003–0.0002
Towns water (hard)	1000–2000	0.001–0.0005
Steam condensate	1500–5000	0.00067–0.0002
Steam (oil free)	4000–10,000	0.0025–0.0001
Steam (oil traces)	2000–5000	0.0005–0.0002
Refrigerated brine	3000–5000	0.0003–0.0002
Air and industrial gases	5000–10,000	0.0002–0.0001
Flue gases	2000–5000	0.0005–0.0002
Organic vapours	5000	0.0002
Organic liquids	5000	0.0002
Light hydrocarbons	5000	0.0002
Heavy hydrocarbons	2000	0.0005
Boiling organics	2500	0.0004
Condensing organics	5000	0.0002
Heat transfer fluids	5000	0.0002
Aqueous salt solutions	3000–5000	0.0003–0.0002

Figura 11.22. Factors d'embrutiment.

El coeficient de pel·lícula de l'oli ve donat per la següent figura:

Figure 12—Liquid Film Coefficient for DOWTHERM J Fluid Inside Pipes and Tubes (Turbulent Flow Only) (SI Units)

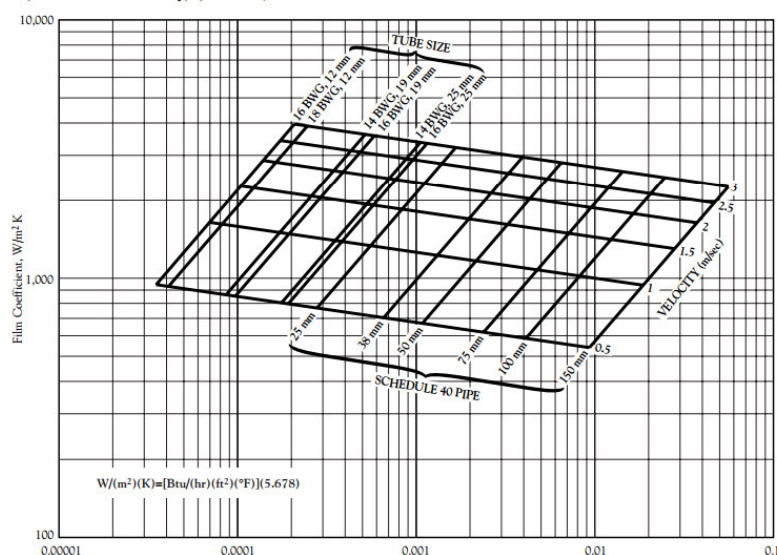


Figura 11.23. Coeficient de pel·lícula de l'oli.

Finalment, degut al elevat nombre de valors que s'han de presentar, s'utilitza la següent taula on es recullen els paràmetres que defineixen el sistema de refrigeració del reactor.

Taula 11.31. Especificacions del reactor catalític multitubular.

Q (W)	-92462,886
N_{Re}	3130,040
m (Kg/s)	2,886
V_{oli} (m/s)	0,0079
J_F	0,004
ΔP (kPa)	0,0997
U (W/m²·K)	70,5803
A_{disp} (m²)	503.78
A_{req} (m²)	92,2313
T₁ (°C)	105
T₂ (°C)	120
T_r (°C)	128
DTML	14,204

Com es pot veure a la taula, l'àrea disponible per al bescanvi de calor és més gran que la mínima necessària, per la qual cosa es podrà dur a terme el bescanvi de temperatura de manera correcta. Cal esmentar, que per intentar minimitzar els efectes dels gradients de

temperatura axials, s'entra el fluid refrigerant en paral·lel. Apart d'això, la zona d'entrada al reactor, és la que més energia genera, requerint de la major capacitat del fluid per retirar aquest excés d'energia.

- **Aïllament**

Pel que fa a l'aïllament de l'equip, s'ha utilitzat el programa Calorcol d'Insulan, per determinar l'espessor de l'aïllant recomanat amb l'objectiu de que la superfície del reactor estigui a 25°C, utilitzant llana mineral de roca amb una densitat de 80 kg/m³. El gruix de l'espessor recomanat és de 1.69 polzades.

11.4. Bescanviadors de calor

Els bescanviadors són equips molt utilitzats a la indústria. A la planta CADMA chemicals es disposa d'un total de 26 bescanviadors, entre els quals es poden diferenciar 3 tipus de bescanviadors. Bescanviadors de carcassa i tubs, condensadors i kettle-reboilers de les columnes de destil·lació. En els condensadors i els kettle es produeix un canvi de fase, en canvi, en els bescanviadors de carcassa i tubs podem trobar cassos que si que hi ha un canvi de fase i en altres que no n'hi ha.

Ara es presentaran les principals característiques de cada un dels diferents tipus de bescanviadors:

- Bescanviadors de carcassa i tubs

Aquest tipus de bescanviador és el més utilitzat a la indústria, ja que presenta una gran diversitat de configuracions i permet treballar amb un ampli rang de temperatures i pressions.

També presenten la possibilitat de treballar amb grans àrees de contacte, que poden arribar fins als 6000 m², i per tant es poden utilitzar en els cassos que es requereixi tenir un gran bescanvi de calor entre el fluid de procés i el fluid tèrmic. També cal esmentar que el cost d'aquests bescanviadors és baix i que la seva operació és fàcil.

Formats per una carcassa cilíndrica que en el seu interior conte un feix de tubs cilíndrics, amb el seu eix paral·lel a l'eix de la carcassa. Els tubs poden ser llisos, aletejats, longitudinals i també poden ser rectes o corbats en forma de U.

- Condensadors

Són bescanviadors de carcassa i tubs en els quals es produeix un canvi de fase total o parcial. El fluid entra en fase gas i passa a la fase líquida. El fluid de procés passa per carcassa i el refrigerant R-1270 passa per tubs. A la planta CADMA hi ha 4 condensadors, dels quals 3 són condensadors parcials i un total. Els condensadors parcials és fan servir per re introduir un cabal de líquid fred a la columna per a que hi pugui haver-hi la destil·lació.

- Kettle-reboilers

Els kettle-reboilers són un tipus de bescanviadors especials, que s'utilitzen en els fons de les columnes de destil·lació per evaporar part del corrent d'entrada al bescanviador, crear el reflux i proporcionar la calor d'ebullició que es necessita per la destil·lació. El fluid de procés circula per la carcassa i el fluid tèrmic Dowtherm J circula pels tubs.

A la taula 11.32. es mostra un resum de tots els bescanviadors i el fluid tèrmic utilitzat per a que es produeixi la transmissió de calor. S'ha intentat aprofitar tots els corrents calents i freds. Tot i això, en una planta de les característiques que s'està dissenyant requerirà un extens treball computacional per obtenir una solució òptima als problemes d'aprofitament d'energia.

Taula 11.32. Resum de tots els bescanviadors de la planta CADMA chemicals.

Ítem	Tipus	Fluid tèrmic (entrada)	Fluid tèrmic (sortida)
B-201	Carcassa i tubs DEM	Dowtherm J a 150°C de caldera	Dowtherm J a 100°C cap a caldera
B-202	Carcassa i tubs DEU	Dowtherm J a 150°C de caldera	Dowtherm J a 140°C cap a B-205
B-203	Carcassa i tubs DEM	Dowtherm J a 16°C de chiller	Dowtherm J a 30°C cap a B-307
B-204a	Carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a 120°C de B-204b	Dowtherm J a 115°C cap a caldera
B-204b	Carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a 125°C de B-204c	Dowtherm J a 120°C cap a B-204a
B-204c	Carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a 130°C de caldera	Dowtherm J a 125°C cap a B-204b
B-205	Carcassa i tubs DEL	Dowtherm J a 140°C de B-202	Dowtherm J a 120°C cap a caldera
B-206a	Carcassa i tubs DEM	Dowtherm J a 75 °C de a B-206b	Dowtherm J a 100°C cap a torre
B-206b	Carcassa i tubs DEM	Dowtherm J a 50 °C de a B-206c	Dowtherm J a 75 °C cap a B-206a

B-206c	Carcassa i tubs DEM	Dowtherm J a 15°C de chiller	Dowtherm J a 50 °C cap a B-206b
B-207a	Carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a 120°C de B-207b	Dowtherm J a 115°C cap a caldera
B-207b	Carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a 125°C de B-207c	Dowtherm J a 120°C cap a B-207a
B-207c	Carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a 130°C de caldera	Dowtherm J a 125°C cap a B-207b
B-208	Carcassa i tubs DEM	Dowtherm J a 90°C de torre	Dowtherm J a 115°C cap a torre
B-301	Carcassa i tubs DEN	R-1270 a -50°C de chiller	R-1270 a -40°C cap a chiller
B-302	Kettle-reboiler DKU	Dowtherm J a 150°C de caldera	Dowtherm J a 130°C cap a B-306
B-303	Carcassa i tubs BEN	R-1270 a -50°C de chiller	R-1270 a -40°C cap a chiller
B-304	Kettle-reboiler BKU	Dowtherm J a 150°C de caldera	Dowtherm J a 130°C cap a B-304
B-305	Carcassa i tubs DEM	R-1270 a -50°C de chiller	R-1270 a -40°C cap a chiller
B-306	Kettle-reboiler DKU	Dowtherm J a 130°C de B-302	Dowtherm J a 120°C caldera
B-307	Carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a 30°C de B-203	Dowtherm J a 36°C cap a chiller
B-308	Carcassa i tubs BEM	R-1270 a -50°C de chiller	R-1270 a -40°C cap a chiller
B-309	Kettle-reboiler BKU	Dowtherm J a 130°C de B-304	Dowtherm J a 120°C cap a caldera
B-310	Carcassa i tubs BEU	R-1270 a -100°C de chiller	R-1270 a -90°C cap a chiller
B-401	Carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a 24°C de torre	Dowtherm J a 40°C cap a torre
B-402	Carcassa i tubs DEM	R-1270 a -50°C de chiller	R-1270 a -40°C cap a chiller

Tots els bescanviadors han sigut dissenyats amb el programa *Exchanger Design and Rating User Interface* que permet el disseny de tots els tipus de bescanviadors i presenta una gran base de dades de propietats físiques i models termodinàmics. Tot i que s'ha utilitzat un software que permet facilitar i optimitzar el disseny és necessari conèixer els diferents paràmetres que afecten el disseny, presentats a continuació:

1. Paràmetres del procés:

- Decidir quin fluid circula per carcassa i quin per tubs
- Seleccionar el salt de temperatura del fluid de procés
- Establir els límits de pèrdues de pressió tant a la carcassa com als tubs.
- Seleccionar els models de transferència d'energia i els coeficients d'embrutiment.

2. Paràmetres mecànics:

- Seleccionar el nombre de passos per tubs i per carcassa.
- Especificacions de paràmetres de tubs (dimensió, pitch, material...)
- Especificacions dels paràmetres de la carcassa (bafles, espai entre bafles, material...)

Una de les eleccions més importants és per on circularan els fluids en el bescanviador, ja que aquesta elecció decidirà la dimensió del bescanviador, ja que aquest podrà variar considerablement al tenir una millor o pitjor transmissió de la calor. Seguidament es mostren les regles bàsiques per decidir per on circularan els fluids:

- El fluid a major temperatura circula pels tubs.
- El fluid a major pressió circula pels tubs.

- El fluid més corrosiu circula pels tubs.
- El fluid més brut circula pels tubs.
- El fluid més tòxic circula pels tubs.
- El fluid amb menys pèrdua de pressió circula per carcassa.
- El fluid més viscos circula per carcassa.
- El fluid amb menys caudal circula per carcassa.
- El fluid a condensar circula per carcassa.

Moltes vegades s'ha d'arribar a una solució d'equilibri al decidir la distribució dels fluids i decidir quin serà el paràmetre més important en el resultat final.

L'equació 1 és utilitzada per estudiar la transferència d'energia a través de qualsevol superfície.

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} = w_t \cdot c_{p(t)} \cdot (t_2 - t_1) = w_s \cdot c_{p(s)} \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{Eq. 175})$$

On:

- Q: calor bescanviada per unitat de temps (kJ/h)
- U: coeficient global de transferència de calor (kJ/h·m²)
- A: àrea de transferència de calor (m²)
- ΔT_{ml} : increment de temperatura mitjana logarítmica
- $c_{p(t)}$: capacitat calorífica del fluid que circula pels tubs (kJ/kg·K)
- w_t : cabal màssic del fluid que circula pels tubs (kg/h)
- $c_{p(s)}$: Capacitat calorífica del fluid que circula per carcassa (kJ/kg·K)
- w_s : cabal màssic del fluid que circula per carcassa

L'increment de temperatura mitjana logarítmica depèn dels valors de les temperatures d'entrada i sortida dels tubs i la carcassa i es poden calcular amb l'equació 176.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad (\text{Eq. 176})$$

On:

- T_1 : temperatura d'entrada a la carcassa
- T_2 : temperatura de sortida de la carcassa
- t_1 : temperatura d'entrada als tubs
- t_2 : temperatura de sortida dels tubs

Normalment al realitzar d'un equip de bescanvi de calor es té en conta un factor de correcció de la temperatura mitjana logarítmica, que consisteix en multiplicar l'esmentat valor per un factor F.

$$\Delta T_{ml} = F \cdot \Delta T_{ml} \quad (\text{Eq. 177})$$

Aquest factor es determina en funció del nombre de passos per tubs i per carcassa i dels paràmetres adimensionals R i S . Aquests paràmetres depenen de la distribució de temperatures en el bescanviador i es mostren en les *equacions 4 i 5*.

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)} \quad (\text{Eq. 178})$$

$$S = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)} \quad (\text{Eq. 179})$$

La figura 11.24. es mostra la gràfica del *Kern* per la determinació del factor F de qualsevol bescanviador que presenti un pas per carcassa i un o més passos per tubs.

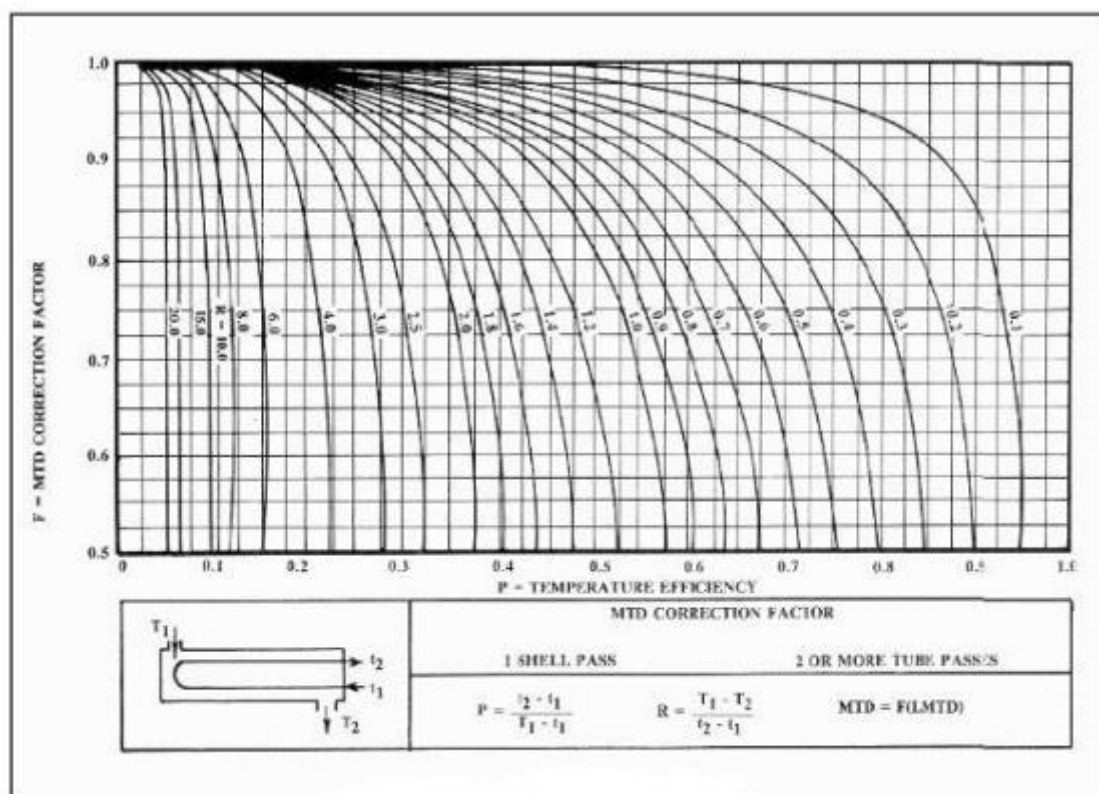


Figura 11.24. Correcció de l'increment de temperatura (factor F).

Segons les dades de temperatura i amb el valor conegut del calor que s'ha de bescanviar i un valor típic del coeficient global de transmissió de calor es pot determinar l'àrea de transferència necessària. Aquest paràmetre es considera un dels més importants per el disseny d'un bescanviador.

També s'han de tenir en compte altres paràmetres a l'hora de dissenyar qualsevol tipus de bescanviador. Com que s'ha treballat amb el software de disseny de *Aspen* l'enginyer ha de vigilar que les dimensions i la distribució de bescanviador estiguin dins dels rangs establerts segons el codi TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association) i ha de aconseguir un disseny òptim canviant els valors de les variables permeses.

A continuació es mostraran diferents directives de disseny que s'han considerat importants:

1. Diàmetre de tub

Els diàmetres de tub més comuns són de $\frac{3}{4}$ polsades de diàmetre exterior o 1 polsada. Normalment el diàmetre de tub es redueix amb motiu d'augmentar l'àrea de transferència disponible, però es considera $\frac{3}{4}$ el valor mínim per motius de neteja i vibració. En alguna especie es pot utilitzar un diàmetre de $\frac{1}{2}$ polzades per tubs curts de menys de 1 metres de llarg.

2. Nombre de tubs i longitud

El nombre de tubs varia amb la finalitat d'establir una velocitat optima del fluid que circula pels tubs. Es possible que amb un únic pas per tubs la velocitat sigui molt lenta, llavors s'ha d'augmentar el nombre de passos per tubs.

3. Disposició, espai entre tubs i Pitch

A la figura 11.25. es mostra un esquema d'un pitch triangular i un de quadrat, on el paràmetre P_T correspon al pitch i el paràmetre C és la distància entre tubs.

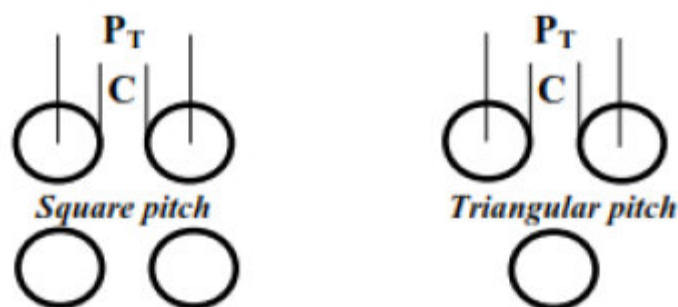


Figura 11.25. Distribució del pitch.

El valor de P_T es defineix amb l'equació 6 i normalment s'utilitza un pitch triangular ($1.25 \cdot D_{ext}$) per bescanviadors de carcassa i tubs estàndard i un pitch quadrat ($1.5 \cdot D_{ext}$) per kettle-reboilers.

$$P_T = D_{ext} + C \quad (\text{Eq. 180})$$

On:

- D_{ext} : diàmetre extern dels tubs

4. Diàmetre de carcassa

El diàmetre de carcassa es determina segons el nombre de tubs que es té i la velocitat a la que es vol treballar en el costat de la carcassa. Normalment es millora l'eficiència al tenir el nombre màxim de tubs, ja que d'aquesta manera es maximitza la transferència de calor global.

Existeix una relació òptima entre la longitud dels tubs i el diàmetre de carcassa, que correspon a un rang entre 5 i 10. Segons el codi TEMA el diàmetre de carcassa ha d'estar entre 0.15 i 1.5 metres.

5. Material dels tubs

El material dels tubs s'ha d'elegir tenint en compte les propietats dels fluids de procés i tèrmics i el cost econòmic. Normalment, al treballar amb materials barats resulta més econòmic utilitzar dimensions estàndard, encara que això comporti un augment de l'espai necessari.

En el cas de CADMA la primera part del procés estarà feta de material inoxidable recoberta de tefló, ja que el fluid de procés contindrà substàncies corrosives.

6. Disseny dels bafles

L'àrea de flux transversal per carcassa es determina mitjançant el seu diàmetre, l'espai entre bafles, la distància entre tubs i la distribució de tubs tal i com es mostra a l'equació 181.

$$\dot{A}_{\text{rea}} = \frac{D_{\text{carc}} \cdot C \cdot B}{P_T} \quad (\text{Eq. 181})$$

On:

- D_{CARC} : diàmetre de carcassa
- B: distància entre bafles

Podem dir que a major distància entre bafles tindrem menor nombre de bafles en el bescanviador i més àrea de flux transversal disponible. La distància mínima entre bafles normalment correspon a una cinquena part del diàmetre de la carcassa.

S'ha de vigilar amb la pèrdua de pressió entre la carcassa i els tubs, i per tant s'hauria de fixar una caiguda de pressió per tenir un disseny mecànic que assegurí que la part superior de cada deflector suporti cada tub.

Un rang de valors de valors típics de *baffle cut* o espai entre la pantalla i la carcassa seria de 15 a 45% respecte el diàmetre intern de la carcassa. El mètode de *Kern* utilitza un valor entremig del 25%.

7. Espai entre bafles

S'ha de tenir una distància mínima entre el límit exterior dels tubs i el diàmetre del deflector per prevenir l'avanç del tub degut a vibracions generades en el equip. La distància entre bafles normalment pren valors entre 0.2 i 1 vegades de la carcassa.

A la figura 11.26. es mostren els diferents bescanviadors de calor existents a la indústria segons les característiques del seu capçal i la seva carcassa.

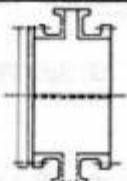
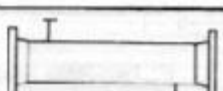
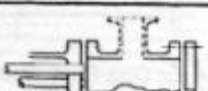
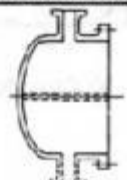
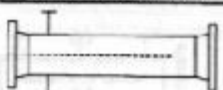
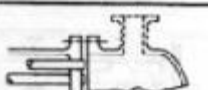
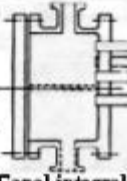
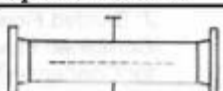
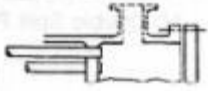
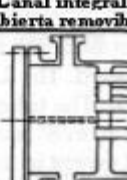
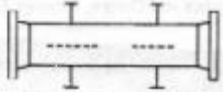
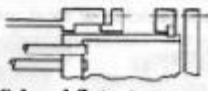
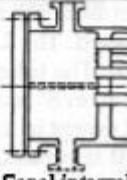
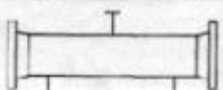
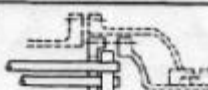
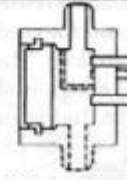
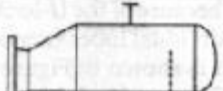
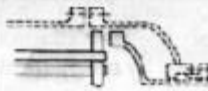
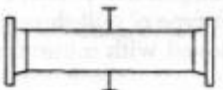
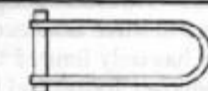
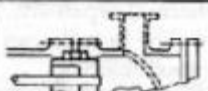
Frente Cabezales estacionarios		Tipo de carcasa	Terminal Tipos de cabezal
A		E  Un pase de carcasa	L  Similar a cabezal A
	B  Bonete (cubierta integral)	F  Dos pases de carcasa con separador horizontal	M  Similar a cabezal B
C	 Haz de tubo removible	G  Flujo dividido	N  Similar a cabezal N
	 Canal integral Cubierta removible	H  Doble flujo dividido	P  Cabezal flotante empacado por el exterior
N	 Canal integral Cubierta removible	J  Flujo dividido	S  Cabezal flotante
	 Altas presiones	K  Rehervidor	T  Cabezal flotante deslizante
D		X  Flujo cruzado	U  Haz de tubo en U
			W  Sello externo

Figura 11.26. Resum general dels tipus de bescanviadors.

En cada un dels bescanviadors dissenyats s'ha comprovat que la velocitat dels tubs com de la carcassa estiguin dintre d'un rang típics o molt pròxims als valors estàndard que es mostren a continuació:

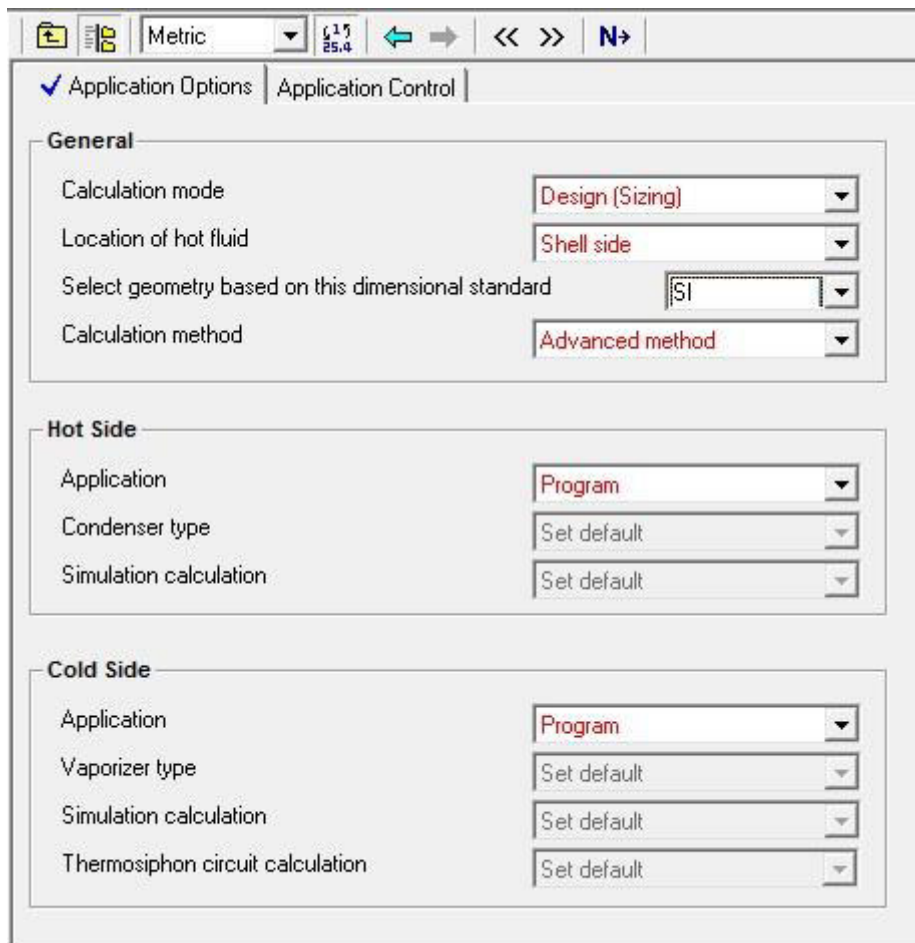
- Líquid per tubs: 0.9-2 m/s
- Líquid por carcassa: 0.3-1 m/s
- Vapor a buit: 50-70 m/s
- Vapor a pressió atmosfèrica: 10-30 m/s
- Vapor a alta pressió: 5-10 m/s

A continuació s'explicarà com s'ha utilitzat el software i quin ha sigut el procediment per fer cada bescanviador tenint en compte tot el que s'ha mencionat anteriorment

11.4.1. Utilització del software

A continuació s'explicaran els passos seguits per els càlculs dels bescanviadors.

Primerament s'ha de decidir per on passarà el fluid calent, ja sigui per carcassa o per tubs. En els cassos on hi hagi canvi de fase s'escollirà que passi per carcassa perquè aquesta es pugui portar de forma optima. Com s'observa a la figura 11.27. on posa localització del fluid calent és on s'ha de canviar a partir de la decisió presa.



The screenshot displays the 'Application Options' dialog box in a software application. The interface is organized into three main sections: 'General', 'Hot Side', and 'Cold Side'. Each section contains several configuration options, most of which are dropdown menus. The 'General' section is expanded, showing settings for calculation mode, hot fluid location, dimensional standard, and calculation method. The 'Hot Side' and 'Cold Side' sections show application-specific settings, with many options set to 'Set default'.

Section	Option	Value
General	Calculation mode	Design (Sizing)
	Location of hot fluid	Shell side
	Select geometry based on this dimensional standard	SI
	Calculation method	Advanced method
Hot Side	Application	Program
	Condenser type	Set default
	Simulation calculation	Set default
Cold Side	Application	Program
	Vaporizer type	Set default
	Simulation calculation	Set default
	Thermosiphon circuit calculation	Set default

Figura 11.27. Definició del sistema.

Un cop definit per on passarà el fluid, es defineix el sistema. Sabent les temperatures d'entrada i sortida del nostre fluid de procés, el cabal i la pressió, definim un salt de temperatura del fluid tèrmic i a quina pressió passarà. També s'haurà d'introduir el factor d'embrutiment. Tot això ho podem veure a la figura 11.28.

☒ Process Data

		Hot Stream (1) Shell Side		Cold Stream (2) Tube Side	
Fluid name					
		In	Out	In	Out
Mass flow rate (total)	kg/h				
Temperature	C				
Vapor mass fraction					
Operating pressure (absolute)	atm				
Pressure at liquid surface in column					
Heat exchanged	kcal/h				
Exchanger effectiveness					
Adjust if over-specified		Heat load		Heat load	
Estimated pressure drop	atm				
Allowable pressure drop	atm		0.004		0.004
Fouling resistance	m ² ·K/W		0		0

Figura 11.28. Taula de dades del sistema.

Després d'haver definit les característiques del sistema, ens faltirà introduir els components dels dos corrents i la seva composició, tant en el corrent calent com pel corrent fred. Això es pot observar en la figura 11.29. També haurem de decidir quina base de dades farem servir ja que el programa en té unes quantes, entre elles la base de dades de Aspen, i també s'haurà d'escollir el model termodinàmic.

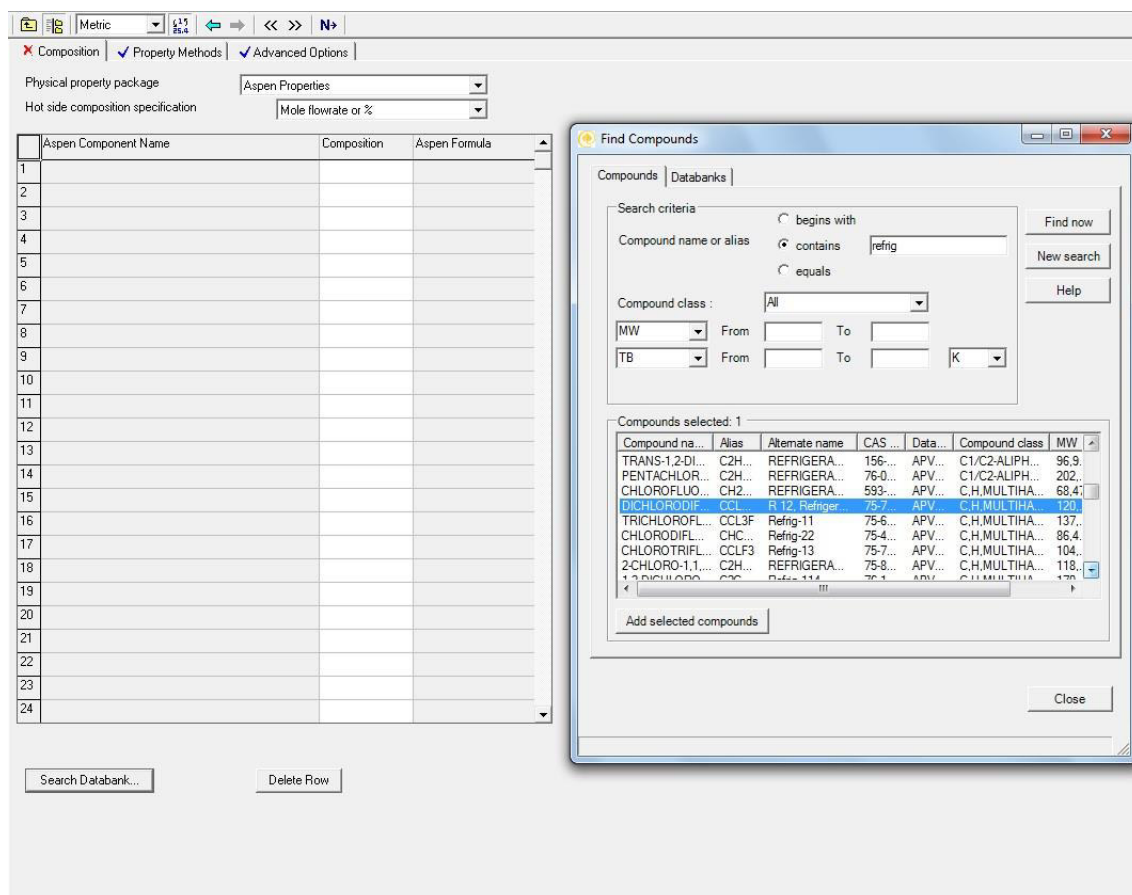


Figura 11.29. Menú per escollir els fluids.

[illegible]

105

Fins aquí les imatges presentades són del disseny del sistema. Les següents figures ja són del disseny geomètric del bescanviador.

A la figura 11.31. hi ha el geometry summary, on es poden observar les diferents opcions que es poden seleccionar o que ja s'han seleccionat durant el disseny per aconseguir el bescanviador més òptim pel procés.

The screenshot shows the 'Geometry' tab of a software interface. The top bar includes a 'Metric' unit selector and navigation buttons. The main area is divided into several sections:

- Front head type:** B - bonnet bolted or integral with tubesheet
- Shell type:** E - one pass shell
- Rear head type:** M - bonnet
- Exchanger position:** Horizontal
- Shell(s):**
 - ID: [] mm
 - OD: [] mm
 - series: []
 - parallel: []
- Tubes:**
 - Number: []
 - Length: [] mm
 - OD: 19,05 mm
 - Thickness: 2,11 mm
- Tube Layout:**
 - New (optimum) layout: [] Tubes: []
 - Tube Passes: []
 - Pitch: 23,81 mm
 - Pattern: 30-Triangular
- Baffles:**
 - Spacing (center-center): [] mm
 - Spacing at inlet: [] mm
 - Number: []
 - Spacing at outlet: [] mm
 - Type: Single segmental
 - Tubes in window: Yes
 - Orientation: Horizontal
 - Cut(%d): []

Figura 11.31. Sumari de la geometria.

A la figura 11.32. es pot observar la configuració de la carcassa, els capçals, les brides i les plaques tubulars, on es decideix els capçals i el tipus de carcassa. També on s'escollirà si estarà en posició horitzontal o vertical.

Metric

615
25.4

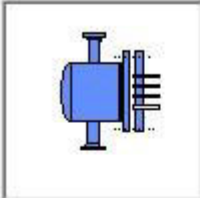
N

✓ Shell/Heads

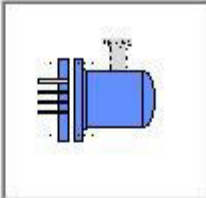
✓ Covers

✓ Tubesheets

✓ Flanges







Front head type

B - bonnet bolted or integral with tubesheet

Shell type

E - one pass shell

Rear head type

M - bonnet

Exchanger position

Horizontal

Location of front head for vertical units

Set default

"E" shell flow direction (inlet nozzle location)

Near rear head

Double pipe or hairpin unit shell pitch

mm

Tubeside inlet at front head

Set default

Flow within multi-tube hairpin (M-shell)

Set default

Overall flow for multiple shells

Countercurrent

Shell(s)

mm

ID

OD

Thickness

series

parallel

Front head

mm

Rear head

mm

Kettle

mm

Figura 11.32. Disseny de la carcassa.

107

Després de decidir la configuració de la carcassa, els capçals, les brides i les plaques tubulars es dissenyaran els tubs. Decidint la dimensió del diàmetre exterior del tub, la dimensió del pitch i la disposició. Això és el que ens mostra la figura 11.33.

US 1.7 25.4

✓ Tube | ✓ Lowfins | ✓ Fins | ✓ Inserts | ✓ KHT Twisted Tubes | ✓ Internal Enhancements

Number of tubes (total)

Number of tubes plugged

Tube length ft

Tube type

Tube outside diameter in

Tube wall thickness in

Wall specification

Tube pitch in

Tube pattern

Tube material 1

Tube surface

Tube wall roughness in

Tube cut angle (degrees)

Diagram: Three circles arranged in a triangular pattern, with an upward-pointing arrow below them.

Figura 11.33. Disseny dels tubs.

Ara s'ha de seleccionar el tipus de bafle i totes les seves característiques. A la figura 11.34. es pot observar aquest apartat del programa per fer els bafles, seleccionar quin tipus de bafles tindrà el bescanviador, quina orientació, etc.

The screenshot shows the 'Baffles' tab in a software interface. The top toolbar includes a file icon, a list icon, a unit dropdown set to 'US', a scale dropdown set to '1/8 25.4', and navigation buttons (back, forward, first, last, and a search icon). The main panel has several tabs: 'Baffles' (selected), 'Tube Supports', 'Longitudinal Baffles', 'Variable Baffle Pitches', and 'Deresonating Baffles'. The 'Baffles' tab contains the following settings:

- Baffle type:** Single segmental (dropdown)
- Tubes are in baffle window:** Yes (dropdown)
- Baffle cut % - inner/outer/intermediate:** Three input fields separated by slashes
- Align baffle cut with tubes:** Yes (dropdown)
- Multi-segmental baffle starting baffle:** Set default (dropdown)
- Baffle cut orientation:** Horizontal (dropdown)
- Baffle thickness:** Input field followed by 'in' (dropdown)
- Baffle spacing center-center:** Input field followed by 'in' (dropdown)
- Baffle spacing at inlet:** Input field followed by 'in' (dropdown)
- at outlet:** Input field followed by 'in' (dropdown)
- Number of baffles:** Input field
- End length at front head (tube end to closest baffle):** Input field followed by 'in' (dropdown)
- End length at rear head (tube end to closest baffle):** Input field followed by 'in' (dropdown)
- Distance between baffles at central in/out for G,H,I,J shells:** Input field followed by 'in' (dropdown)
- Distance between baffles at center of H shell:** Input field followed by 'in' (dropdown)
- Baffle OD to shell ID diametric clearance:** Input field followed by 'in' (dropdown)
- Baffle tube hole to tube OD diametric clearance:** Input field followed by 'in' (dropdown)

Figura 11.34. Disseny dels Baffles.

Per últim seleccionarem el paquet de disseny. On haurem de decidir el tipus de feix i el tipus de pas per dins del bescanviador. Això ho podem veure a la figura 11.35.

The screenshot shows a software window with a toolbar at the top containing icons for file operations and navigation, along with a unit selector set to 'US'. Below the toolbar is a tabbed interface with the following tabs: 'Layout Parameters' (selected), 'Layout Limits/Pass Lanes', 'Tie Rods/Spacers', 'Tube Layout', and 'Pass Details'.

The 'Layout Parameters' tab contains the following settings:

- Tube layout option:** New (optimum) lay
- Number of tubes (total):** (empty text box)
- Tubes in layout:** 0
- Main input / Tube layout inconsistencies:** Set default (use lay)
- Full or normal bundle:** Normal bundle
- Tube pattern:** 30-Triangular
- Tube pitch:** 0,9375 in
- Tube passes:** (empty text box)
- Pass layout:** Mixed (H)
- Pass layout orientation:** Program
- Tube layout symmetry:** Standard symmetry
- Bundle limit symmetry:** Limits may be unequal
- Number of sealing strip pairs:** (empty text box)
- Sealing strip orientation:** Transvers
- Orientation of U-bends:** Undefined

Visual diagrams on the right side of the interface include:

- A diagram showing three circles arranged in a triangular pattern with an upward-pointing arrow below them.
- Two circular diagrams showing internal tube layouts. The left one is divided into four quadrants labeled 1, 2, 3, and 4. The right one is divided into four quadrants labeled 4, 3, 2, and 1.

Figura 11.35. Disseny de la configuració de dins del bescanviador.

Per acabar, haurem de seleccionar el tipus de material per cada part del bescanviador, com es pot observar a la figura 11.36. Es pot seleccionar que tot el bescanviador d'un mateix material o que alguna part sigui d'un material diferent.

Component	Material	Designator
Default exchanger material	Carbon Steel	1
Cylinder - hot side	Carbon Steel	1
Cylinder - cold side	Carbon Steel	1
Tubesheet	Carbon Steel	1
Double tubesheet (inner)	Set Default	0
Baffles	Carbon Steel	1
Tube material	Carbon Steel	1
Fin material	Set Default	0

Databank Search

Figura 11.36. Panel de control del material del bescanviador.

Per acabar i trobar el disseny òptim, després d’haver seleccionat totes les opcions perquè el programa pugui completar el disseny amb tots els càlculs. Podrem anar canviant les configuracions de tot el que em dit anteriorment des de la consola del programa fins a trobar el millor disseny possible dins de totes directives esmentades anteriorment. A la figura 11.37. es pot observar la consola.

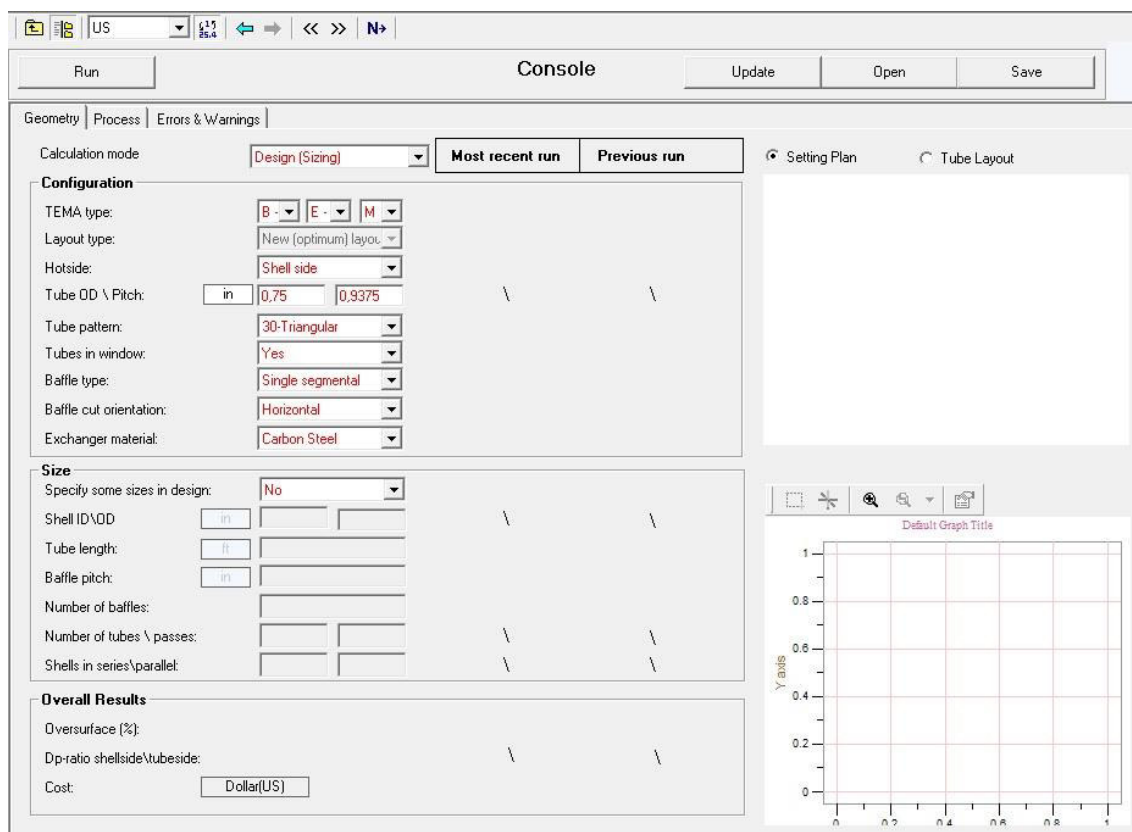


Figura 11.37. Consola principal del software.

A continuació es mostrarà una breu explicació de la funció de cada un dels bescanviadors i les seves característiques. Per una informació més completa, mirar les fitxes i el disseny gràfic de cada un Al capítol 2.

11.4.2. Bescanviador B-201

Aquest bescanviador s’usa per escalfar el corrent de fluorur d’hidrogen el qual entrarà al reactor R-201 de 25 a 95°C. S’utilitza un fluid tèrmic que entra a 150°C i surt a 100°C amb un cabal de 12088 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.4 metres d’ample i 3 metres de llarg i té 162 tubs.

11.4.3. Bescanviador B-202

Aquest bescanviador s'usa per escalfar el corrent d'entrada de tetraclorur de carboni al reactor R-201 de 25 a 95°C. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a 150°C i surt a 140°C amb un cabal de 5537 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.27 metres d'ample i 1.7 metres de llarg i té 20 tubs.

11.4.4. Bescanviador B-203

Aquest bescanviador s'usa per refredar la mescla de àcid fluorhídric anhidrid, àcid clorhídric, freón-11, freón-12 i tetraclorur de carboni del reactor R-201 de 95 a 25°C. Aquest corrent va cap a la columna CD-301 on es produeix la primera separació. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a 16°C i surt a 36°C amb un cabal de 14253 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.41 metres d'ample i 4.3 metres de llarg i té 158 tubs.

11.4.5. Bescanviador B-204a

Aquest bescanviador s'usa per escalfar la mescla de freón-11, freón-12 i tetraclorur de carboni de -30 a 23°C. Aquest corrent prové la columna CD-302 on es produeix la segona separació i va cap al segon bescanviador de calor B-204b. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a 120°C i surt a 115°C amb un cabal de 6876 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.27 metres d'ample i 1.9 metres de llarg i té 18 tubs.

11.4.6. Bescanviador B-204b

Aquest bescanviador s'usa per escalfar la mescla de freón-11, freón-12 i tetraclorur de carboni de 23 a 75°C. Aquest corrent prové del primer bescanviador B-204a i va cap al tercer bescanviador de calor B-204c. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a 125°C i surt a 120°C amb un cabal de 6876 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.17 metres d'ample i 3.3 metres de llarg i té 24 tubs.

11.4.7. Bescanviador B-204c

Aquest bescanviador s'usa per escalfar la mescla de freón-11, freón-12 i tetraclorur de carboni de 75 a 128°C. Aquest corrent prové del segon bescanviador B-204a i va cap al segon reactor R-202. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a 130°C i surt a 125°C amb un cabal de 6876 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.41 metres d'ample i 3.7 metres de llarg i té 44 tubs.

11.4.8. Bescanviador B-205

Aquest bescanviador s'usa per escalfar el fluorur d'hidrogen que surt de la columna CD-302 de 58 a 95°C. Aquest corrent surt de la columna CD-302 i va cap al reactor R-201. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a 140°C i surt a 120°C amb un cabal de 5537 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.27 metres d'ample i 1.9 metres de llarg i té 64 tubs.

11.4.9. Bescanviador B-206a

Aquest bescanviador s'usa per refredar la mescla de freóns i tetraclorur de carboni des de 254 a 174°C. Aquest corrent prové del reactor R-202 i va cap al bescanviador R-206b. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a 75°C i surt a 100°C amb un cabal de 4657 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.21 metres d'ample i 1.7 metres de llarg i té 32 tubs.

11.4.10. Bescanviador B-206b

Aquest bescanviador s'usa per refredar la mescla de freóns i tetraclorur de carboni des de 174 a 94°C. Aquest corrent prové del B-206a i va cap al bescanviador R-206c. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a 50°C i surt a 75°C amb un cabal de 4657 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.22 metres d'ample i 1.7 metres de llarg i té 37 tubs.

11.4.11. Bescanviador B-206c

Aquest bescanviador s'usa per refredar la mescla de freóns i tetraclorur de carboni des de 94 a 20°C. Aquest corrent prové del B-206b i va cap a la CD-303. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a 15°C i surt a 50°C amb un cabal de 4657 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.46 metres d'ample i 4.6 metres de llarg i té 273 tubs.

11.4.12. Bescanviador B-207a

Aquest bescanviador s'usa per escalfar el FREÓN-12 de la columna CD-304 cap a B-270b de -30 a 30°C. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a 120°C i surt a 115°C amb un cabal de 2548 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.17 metres d'ample i 1.8 metres de llarg i té 26 tubs.

11.4.13. Bescanviador B-207b

Aquest bescanviador s'usa per escalfar el FREÓN-12 del bescanviador B-207a cap a B-270c de 30 a 90°C. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a 125°C i surt a 120°C amb un cabal de 2548 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.27 metres d'ample i 1.4 metres de llarg i té 58 tubs.

11.4.14. Bescanviador B-207c

Aquest bescanviador s'usa per escalfar el FREÓN-12 del bescanviador B-207b cap a R-202 de 90 a 128°C. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a 130°C i surt a 125°C amb un cabal de 2548 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.22 metres d'ample i 1.8 metres de llarg i té 41 tubs.

11.4.15. Bescanviador B-208

Aquest bescanviador s'usa per refredar el tetraclorur de carboni del corrent de 119 a 95°C. Aquest corrent prové la columna CD-304 i va cap al reactor R-201. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a 90°C i surt a 115°C amb un cabal de 400 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.27 metres d'ample i 2.5 metres de llarg i té 90 tubs.

11.4.16. Bescanviador B-301

Aquest bescanviador s'usa per refrigerar HCl de -31 a -32°C fent de condensador parcial de la columna CD-301. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a -50°C i surt a -40°C amb un cabal de 34189 kg/h provinent de la zona de serveis.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.46 metres d'ample i 3.3 metres de llarg i té 115 tubs.

11.4.17. Bescanviador B-302

Aquest bescanviador s'usa com a kettle reboiler de la columna CD-301 per escalfar la mescla de 65 a 75°C amb un fluid tèrmic que entra a 150 i surt a 130°C amb un cabal de 19678 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.22 metres d'ample i 2.7 metres de llarg i té 20 tubs.

11.4.18. Bescanviador B-303

Aquest bescanviador s'usa per refrigerar FREÓN-12 de -0.34 a -0.87°C fent de condensador parcial de la columna CD-302. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a -50°C i surt a -40°C amb un cabal de 31506 kg/h provinent de la zona de serveis.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.27 metres d'ample i 1.9 metres de llarg i té 66 tubs.

11.4.19. Bescanviador B-304

Aquest bescanviador s'usa com a kettle reboiler de la columna CD-302 per escalfar la mescla de 56 a 57°C amb un fluid tèrmic que entra a 150 i surt a 130°C amb un cabal de 10454 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.22 metres d'ample i 2.2 metres de llarg i té 16 tubs.

11.4.20. Bescanviador B-305

Aquest bescanviador s'usa per refrigerar FREÓ-13 DE -24 a -25°C fent de condensador total de la columna CD-303. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a -50°C i surt a -40°C amb un cabal de 25266 kg/h provinent de la zona de serveis.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.32 metres d'ample i 2.8 metres de llarg i té 97 tubs.

11.4.21. Bescanviador B-306

Aquest bescanviador s'usa com a kettle reboiler de la columna CD-303 per escalfar la mescla de 71 a 120°C amb un fluid tèrmic que entra a 130 i surt a 120°C amb un cabal de 19678 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.51 metres d'ample i 6.1 metres de llarg i té 141 tubs.

11.4.22. Bescanviador B-307

Aquest bescanviador s'usa per refrigerar el corrent que surt de la columna CD-303 de 78 a 35°C. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a 30°C i surt a 36°C amb un cabal de 14253 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.32 metres d'ample i 2.8 metres de llarg i té 97 tubs.

11.4.23. Bescanviador B-308

Aquest bescanviador s'usa per refrigerar FREÓN-12 de -0.47 a -0.82°C fent de condensador parcial de la columna CD-304. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a -50°C i surt a -40°C amb un cabal de 4954 kg/h provinent de la zona de serveis.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.27 metres d'ample i 2.1 metres de llarg i té 26 tubs.

11.4.24. Bescanviador B-309

Aquest bescanviador s'usa com a kettle reboiler de la columna CD-304 per escalfar la mescla de 116 a 117°C amb un fluid tèrmic que entra a 130 i surt a 120°C amb un cabal de 10454 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.41 metres d'ample i 4.1 metres de llarg i té 79 tubs.

11.4.25. Bescanviador B-310

Aquest bescanviador s'usa per refredar el FREÓ-13 de -82 a -90°C per el seu emmagatzematge criogènic. S'usa un fluid tèrmic que entra a -100 i surt a -90°C amb un cabal de 4449 kg/h.

Les dimensions que presenta són de 2.1 metres de llarg, 0.27 metres d'ample i consta de 26 tubs.

11.4.26. Bescanviador B-401

Aquest bescanviador s'usa per refredar la mescla de aigua amb aire 97 a 30°C. Aquest corrent prové la columna d'absorció CA-301 i va cap a la mateixa columna per reaprofitar l'aigua on es produeix la concentració al 30% de l'àcid clorhídric. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a 24°C i surt a 40°C amb un cabal de 10852 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.5 metres d'ample i 3.3 metres de llarg i té 339 tubs.

11.4.27. Bescanviador B-402

Aquest bescanviador s'usa per refredar l'àcid clorhídric que surt de la columna d'absorció CA-301 de 88 a 25°C. S'utilitza un fluid tèrmic que entra a -50°C i surt a -40°C amb un cabal de 221291 kg/h.

El bescanviador presenta unes dimensions de 0.32 metres d'ample i 3.3 metres de llarg i té 118 tubs.

11.5. Disseny d'equips de servei

11.5.1. Torre de refrigeració

La planta CADMA chemicals consta de cinc torres de refrigeració diferents perquè s'han obtingut diferents temperatures d'entrada de Dowtherm J en els diferents bescanviadors de calor i un dels reactors. Un altre motiu és la relació salt tèrmic/eficiència de la torre, ja que no s'han realitzat salts massa elevats però fer una sola torre comportava fer-lo, per això es requereixen cinc torres. Un dels cassos el salt tèrmic si que era una mica elevat per realitzar-lo en una sola torre i que fos a la vegada eficient, en aquest cas es va adoptar per fer dues torres en sèrie (TR-701 i TR-702).

Les següents torres de refrigeració tractaran l'oli tèrmic dels següents equips:

- TR-701 i TR-702: B-206 a i b
- TR-703: R-202
- TR-704: B-208
- TR-705: B-401

11.5.2. Disseny de la torre de refrigeració

Per explicar el mètode càlcul per escollir la torre de refrigeració correcta, es posarà l'exemple de la torre TR-704.

Taula 11.33. Requeriments del bescanviador B-208.

Equip	Temp entrada Dowtherm J (°C)	T sortida Dowtherm J (°C)	Cabal (Kg/s)
B-208	90	115	0.11

La potència frigorífica requerida vindrà donada pel calor necessari que cal bescanviar per refredar l'oli tèrmic des de la temperatura d'entrada de la torre fins a la temperatura d'interès que és 90°C, la calor es calcula amb les següents equacions:

$$Q = m_{\text{oli total}} \cdot \overline{C_p} \cdot (T_{\text{entrada}} - T_{\text{sortida}}) \quad (\text{Eq. 182})$$

On:

- Q: calor necessari que cal bescanviar per refredar l'oli tèrmic (KJ/s).
- $m_{\text{oli total}}$: cabal màssic total d'oli tèrmic (Kg/s).
- $\overline{C_p}$: calor específic mitja de l'oli tèrmic (KJ/ Kg °C).
- T_{entrada} : temperatura d'entrada de l'oli tèrmic a la torre de refrigeració (°C).
- T_{sortida} : temperatura de sortida de l'oli tèrmic a la torre de refrigeració (°C).

Amb la temperatura d'entrada de l'oli i la temperatura de sortida que està fixada per requisits del procés (90°C), podem determinar el calor específic mitja a partir de les dades de la fulla de propietats de l'oli tèrmic Dowtherm J.

Taula 11.34. Determinació del calor específic mitja de l'oli tèrmic Dowtherm J.

Temperatura d'entrada (°C)	115
Temperatura de sortida (°C)	90
Cp a 90°C KJ/(kg°C)	2.06
Cp a 115°C (KJ/(kg°C)	2.15
Cp mitja (KJ/(kg°C)	2.11

Un cop obtinguts tots els paràmetres s'aplica de l'equació 182 per obtenir el calor que cal bescanviar per refredar l'oli tèrmic i poder determinar la potència frigorífica. Aplicant l'equació 13.1.1.1 s'obté que és igual a : $Q = 5.8 \text{ KJ/s}$.

Per poder calcular la potència frigorífica de la torre de refrigeració es sobredimensiona el calor a bescanviar un 15 %, tal com es mostra en l'equació 183.

$$P = 1,15 \cdot Q \quad (Eq. 183)$$

On:

- P : potència frigorífica (KJ/s).
- Q : calor necessari que cal bescanviar per refredar l'oli tèrmic (KJ/s).

Aplicant l'equació 13.1.1.2 s'obté que la potència frigorífica és de : $P = 6.67 \text{ KJ/s}$.

La torre escollida per a realitzar el bescanvi de calor és de la casa EKW amb una potència frigorífica de 26 kW

La potència de treball de la torre respecte a la màxima potència que pot oferir l'equip es calcula utilitzant l'equació 184.

$$W_{\text{torre}}(\%) = \left(\frac{\text{Potència frigorífica d'operació}}{\text{Potència frigorífica màxima}} \right) \cdot 100 \quad (Eq. 184)$$

Aplicant l'equació 13.1.1.3 s'ha obtingut que la potència de treball de la torre respecte a la màxima serà de: $W_{\text{torre}} = 26 \%$.

Els rendiments de les altres torres es mostren a continuació a la taula 11.35.

Taula 11.35. Rendiments de les altres quatre torres.

Ítem	Rendiment (%)
TR-701	29.5
TR-702	29.5
TR-703	26.6
TR-704	25.7

11.5.3. Grups de fred (chillers)

Per als bescanviador B-206, B-203, B-307, B-402, B-310 i els condensadors B-301, B-303, B-305 i B-308 es requereixen grups de fred per baixar a temperatures més baixes dels 20°C. Pels bescanviadors B-206c, B-203 i B-307 s'ha de refredar l'oli tèrmic. En tots els altres es requereix R-1270. Es requereix el R-1270 a -50 i -100°C.

Els següents *chillers* tractaran el R-1270 dels següents equips :

- CH-705: B-301, B-303, B-305, B-308 i B-402
- CH-704: B-310

Els següents *chillers* tractaran l'oli tèrmic dels següents equips :

- CH-701: B-206c
- CH-702 i CH-703: B-203 i B-307

11.5.4. Disseny del grup de fred CH-704

Aquest circuit de fred consta de un chiller on la temperatura que entra és de -90°C i s'ha de refredar fins a -100°C. Només hi ha un bescanviador en aquest circuit, el B-310 el qual té els següents requeriments:

Taula 11.36. Requeriments del bescanviador B-310.

Equip	T entrada R-1270 (°C)	T sortida R-1270	Cabal (Kg/s)
B-310	-100	-90	1.24

La potència frigorífica requerida vindrà donada pel calor necessari que cal bescanviar per refredar el R-1270 de tots els equips des de la temperatura d'entrada al chiller fins a la temperatura d'interès que és -100°C, la calor es calcula amb les següents equacions:

$$Q = m_{\text{total}} \cdot \bar{C}_p \cdot (T_{\text{entrada}} - T_{\text{sortida}}) \quad (Eq. 185)$$

On:

- Q: calor necessari que cal bescanviar per refredar(KJ/s).
- m_{total} : cabal màssic total (Kg/s).
- $\bar{C}_p$: calor específic mitja (KJ/ Kg · °C).

- T_{entrada} : temperatura d'entrada en el chiller ($^{\circ}\text{C}$).
- T_{sortida} : temperatura de sortida en el chiller ($^{\circ}\text{C}$).

$$m_{\text{total}} = \sum m_{\text{equips}} \quad (\text{Eq. 186})$$

On:

- m_{total} : cabal màssic total (Kg/s).
- m_{Equips} : cabal màssic (Kg/s) de tots els equips en el circuit.

En aquest cas el cabal és de 1.24 kg/s que necessita el B-310. Un cop tenim les temperatures d'entrada i sortida del chillers i amb totes les dades que necessitem per fer servir l'equació 13.2.1.1, ja es pot calcular el calor necessari que cal bescanviar per refredar cada corrent. En el cas de B-310, té una Q de 25 KJ/s.

Per poder calcular la potència frigorífica de l'equip de fred es sobre dimensiona el calor a bescanviar un 25 %, tal com es mostra en l'equació 187.

$$P_i = 1,25 \cdot Q_i \quad (\text{Eq. 187})$$

On:

- P : potència frigorífica de cada un dels chillers utilitzats (KJ/s).
- Q : calor bescanviat per refredar en cada un dels chillers (KJ/s).

Aplicant l'equació 187 s'obté que la potència frigorífica del CH-704, que és de 32 kW.

El chiller escollit per realitzar el bescanvi de calor és de la casa LAUDA amb una potència frigorífica de 60 kW.

La potència de treball de cada un dels chillers utilitzats respecte a la màxima potència que pot oferir l'equip es calcula utilitzant l'equació 188.

$$W_{\text{chiller}}(\%) = \left(\frac{\text{Potència frigorífica d'operació}}{\text{Potència frigorífica màxima}} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 188})$$

Aplicant l'equació 13.1.1.5 s'han obtingut que la potència de treball del chiller és de 52.96%.

Els rendiments dels altres chillers es mostren a continuació a la taula 11.38.

Taula 11.38. Rendiments dels altres chillers.

Ítem	Rendiment (%)
CH-701	48.6
CH-702	37.94
CH-703	37.94
CH-705	88

11.5.5. Caldera

Els requeriments de calor de la planta es satisfan amb calderes d'oli tèrmic calderes PIROBLOC. Al tenir tres temperatures d'entrada d'oli als diferents equips caldrà com a mínim tindre tres calderes, una amb la que s'obtindrà l'oli tèrmic a 130, 150 i 180°C.

11.5.6. Disseny de la caldera CO-701

A continuació es presenten els equips amb requeriments d'oli tèrmic a 130°C, tos els B-204 i B-207, ja que són bescanviadors en sèrie.

Taula 11.39. Equips amb requeriment de Dowtherm J escalfat amb gas natural.

Equip	Temperatura entrada	Temperatura sortida	Cabal (Kg/s)
B-204c	130	125	1.91
B-204b	125	120	1.91
B-204a	120	115	1.91
B-207c	130	125	0.71
B-207b	125	120	0.71
B-207a	120	115	0.71

La potència tèrmica necessària de la caldera per obtindre oli tèrmic a 130°C vindrà donada per el calor necessari que cal bescanviar per escalfar l'oli de tots els equips des de la temperatura d'entrada a la caldera fins a 130°C. Per poder trobar el calor necessari que cal bescanviar per escalfar l'oli tèrmic es fa servir l'equació 189.

$$Q = m_{\text{oli total}} \cdot \bar{C}_p \cdot (T_{\text{entrada}} - T_{\text{sortida}}) \quad (\text{Eq. 189})$$

On:

- Q : calor necessari que cal bescanviar per escalfar l'oli tèrmic (KJ/s).
- $m_{\text{oli total}}$: cabal màssic total d'oli tèrmic (Kg/s).
- $\bar{C}_p$: calor específic mitja de l'oli tèrmic (KJ/ Kg · °C).
- T_{entrada} : temperatura d'entrada de l'oli tèrmic a la caldera (°C).
- T_{sortida} : temperatura de sortida de l'oli tèrmic a la caldera (°C).

$$m_{\text{oli total}} = \sum m_{\text{equips}} \quad (\text{Eq. 190})$$

On:

- m_{oli} : cabal màssic total d'oli tèrmic (Kg/s).
- M_{equips} : cabal màssic de tots els equips del circuit (Kg/s)

Aplicant l'equació 13.3.1.2 s'obté un cabal màssic total d'entrada en la caldera de: $m_{\text{oli total}} = 2.62 \text{ Kg/s}$.

$$T_{\text{entrada}} = \frac{\sum(m_{\text{oli}} \cdot T'_{\text{entrada}})}{m_{\text{oli total}}} \quad (\text{Eq. 191})$$

On:

- $m_{\text{oli total}}$: cabal màssic total d'oli tèrmic (Kg/s).
- m_{oli} : cabal màssic d'oli tèrmic (Kg/s) de cada un dels equips.
- T'_{entrada} : temperatura d'entrada de l'oli tèrmic de cada un dels equips ($^{\circ}\text{C}$).
- T_{entrada} : temperatura d'entrada de l'oli tèrmic a la caldera ($^{\circ}\text{C}$).

Amb tots els valors de cabal i temperatura d'entrada i sortida de la caldera, aplicant la formula 13.3.1.1 ens dona un calor bescanviat de: $Q=84.66 \text{ kJ/s}$.

Per poder calcular la potència tèrmica de la caldera se sobredimensiona el calor a bescanviar un 25 %, tal com es mostra en l'equació 192.

$$P = 1,25 \cdot Q \quad (\text{Eq. 192})$$

On:

- P : potència tèrmica (KJ/s).
- Q : calor necessari que cal bescanviar per refredar l'oli tèrmic (KJ/s).

La potència resultant és de 105.82 kW. La caldera escollida per a realitzar el bescanvi de calor és de la casa PIROBLOC amb una potència tèrmica és de 1395 kW.

La potència de treball de cada caldera utilitzada respecte a la màxima potència que pot oferir l'equip es calcula utilitzant l'equació 193.

$$W_{\text{caldera}}(\%) = \left(\frac{\text{Potència tèrmica d'operació}}{\text{Potència tèrmica màxima}} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 193})$$

Aplicant l'equació 193 s'han obtingut que la potència de treball de la caldera és de un 12%.

Els rendiments dels altres chillers es mostren a continuació a la taula 11.40.

Taula 11.40. Rendiments de les altres calderes.

Ítem	Rendiment (%)
CO-702	68.1
CO-703	38.8

11.6. Columnnes de separació

11.6.1. Columnnes de destil·lació

La destil·lació és un operació bàsica de separació que s'utilitza per separar mescles de líquids miscibles o per separar el dissolvent de soluts no volàtils, és a dir, s'empren per purificar i separar substàncies.

Aquesta tècnica es basa en escalfar la mescla fins la seva ebullició recollint així de forma líquida els vapors, refrigerants i condensats generats. Segons les condicions d'operació de la columna la destil·lació es pot classificar en diferents tipus: destil·lació simple, destil·lació al buit, destil·lació fraccionada, destil·lació per arrossegament de vapor, etc.

La destil·lació simple és una operació d'una sola etapa de vaporització-condensació. S'empren un matràs de destil·lació en el qual s'escalfa la mescla binària fins el punt d'ebullició i un refrigerant en el que es condensen els vapors. Aquest tipus d'operació es caracteritza donat que el vapor generat i el líquid en ebullició estan en equilibri. Els vapors que es desprenen s'eliminen contínuament, es condensen i es recol·lecten, així doncs la primera porció del destil·lat seria la més rica en el component més volàtil i la primera porció del residu la més rica en el component menys volàtil. Si es repeteix aquesta operació diferents cops s'obtindrien un destil·lat i un residu que pràcticament correspondrien als components purs.

Aquesta sèrie de destil·lacions simples parcials es poden realitzar utilitzant una columna de rectificació la qual permet un major contacte entre els vapors que ascendeixen amb el líquid que descendeix degut a la utilització de diferents plats. Aquest fet facilita l'intercanvi de calor entre els vapor, el quals cedeixen calor, i els líquids que en reben. Així doncs, al llarg de la columna tenen lloc una sèrie de vaporitzacions i condensacions (equilibri líquid-vapor) donant lloc a que conforme es descendeix en la columna, el residu cada cop és més ric en un dels components, al mateix temps que el residu s'enriqueix de l'altre component. Si es disposa d'una columna suficientment llarga el productes obtinguts per cap i per cues (destil·lat i residu) poden ser pràcticament purs.

Les columnnes de destil·lació poden ser de dos tipus, de rebliment o de plats. Per poder decidir el tipus de columna es tindran en compte diferents aspectes els quals es mostren a la següent taula:

Taula 11.41. Comparació entre columna de rebliment i columna de plats.

COLUMNA DE REBLIMENT	COLUMNA DE PLATS
Difícil neteja	Fàcil neteja
Columnes amb poca altura i diàmetre inferior a 1 metre	Columnes amb major altura i volum
Mayor superfície de contacte G-L, per tant major eficiència	Menor àrea superficial, per tant menor eficiència
Caiguda de pressió del gas menor per unitat d'altura	Major caiguda de pressió
El líquid es queda retingut menys temps	Opera sobre amples zones de càrrega de vapor i líquid per unitat de secció de la torre
Es treballa amb valors alts de la relació G-L	La relació G-L és menor
S'utilitza en operacions fortament corrosives	No recomanable per operacions corrosives ni per operacions amb tendència a la formació d'escumes
Operen amb menor bombolleig de gas en el líquid	Operen amb major bombolleig de gas en el líquid
Els costos inicials són majors	Els costos inicials són menors

En la planta de producció del refrigerant FREÓN-13 s'han requerit quatre columnes de destil·lació. Donades les condicions d'operació de les columnes dissenyades i tenint en compte que alguns dels components amb els quals es treballa són altament corrosius, s'ha decidit que totes les columnes seran de rebliment:

- **Columna de destil·lació HCl**

Aquesta columna s'ha dissenyat amb l'objectiu de separar l'HCl de la resta de productes formats al primer reactor de la planta tals com FREÓN-12, FREÓN-11 i del HF no reaccionat donat que és el reactiu en excés. Per caps s'obté el HCl, el qual després d'un post-tractament es ficarà en venda al mercat, i per cues la resta de components.

- **Columna de destil·lació del FREÓN-12**

L'objectiu d'aquesta columna és separar el FREÓN-12 de l'àcid fluorhídric i del FREÓN-11 per tal d'introduir-lo al segon reactor purificat on es barrejarà amb el triclorur d'alumini donant lloc al FREÓN-13, el qual és el producte final d'interès.

- **Columna de destil·lació del FREÓN-13**

Es tracta d'una columna de rebliment en la que el producte destil·lat és un corrent de FREÓN-13 amb un baix contingut d'impureses i el corrent residual conté FREÓN 12 i tetraclorur de carboni.

- **Columna de destil·lació binària de CCl_4 i FREÓN-12**

L'objectiu d'aquesta columna es separar el tetraclorur de carboni del FREÓN-12 per tal de recircular ambdós components al primer i al segon reactor respectivament. Aquesta recirculació permet obtenir una major viabilitat tan econòmica com mediambiental.

- **Selecció del tipus de rebliment**

Les columnes de rebliment són dispositius que s'utilitzen en operacions de transferència de massa en la que es posen en contacte continu dues fases. El seu disseny depèn de diversos factors com les operacions hidràuliques de la torre, les característiques del rebliment, la relació de reflux, les condicions d'operació, les característiques fisicoquímiques dels components a separar, etc.

La funció principal del rebliment és exposar una gran àrea superficial per afavorir el contacte entre les fases i així aconseguir dinamitzar els fluxos de transferència entre les mateixes. A més s'ha de procurar que la caiguda de pressió de la columna sigui la més baixa possible. Els requisits que un rebliment ha de complir perquè sigui eficient han de ser els següents:

- Proporcionar una gran àrea superficial perquè existeixi un bon contacte entre fases i tingui lloc la transferència de massa.
- La geometria ha de ser tal que promogui la distribució uniforme de les fases.
- Ha de ser químicament inert als fluids de la torre que s'està utilitzant.
- Permetre el pas de grans coloms de fluid a través de petites seccions transversals de la torre, sense inundació.
- Ser mecànica i estructuralment fort, però sense tenir un pes excessiu que pugui dificultar la seva manipulació i instal·lació.
- Ha de ser resistent al trencament i també a les temperatures i pressions d'operació.
- Permetre la distribució uniforme del líquid sobre la seva superfície.
- Ser econòmic.

Per escollir la mida del rebliment s'utilitzarà la taula següent que relaciona el diàmetre de la columna amb les dimensions del rebliment.

Taula 11.42. Relació del diàmetre de la columna amb les dimensions del rebliment.

DIÀMETRE DE LA COLUMNA	MIDA DEL REBLIMENT
<0.3	<1
0.3-0.9	1-1.5
>0.9	>3

A l'hora de fer una bona elecció del rebliment també s'ha de tenir en compte el material del qual està fet segons quina sigui la seva aplicació. En la taula següent es mostren els diferents tipus de rebliments existents en funció del material.

Taula 11.43. Tipus de rebliments existents en funció del material.

MATERIAL	APLICACIONS
Metall	pH alcalins i T elevades per l'acer
Ceràmiques	Condicions àcides i neutres, excepte quan es treballa amb solvents
Plàstic	pH alcalins, sals, aquosos i àcids depenent de les resines

A més a més, existeixen dos tipus de rebliments diferents el quals es comparen a la taula que es mostra a continuació:

Taula 11.44. Comparació entre els rebliments aleatoris i els empaquets.

REBLIMENTS ALEATORIS	REBLIMENTS EMPACATS
El rebliment s'introdueix a la torre deixant-lo caure de forma aleatòria	El rebliment està disposat de forma ordenada (es fabriquen de forma modular)
Són econòmics donat que són de materials metàl·lics, ceràmics o plàstics	La instal·lació és més cara, per unitat de volum
Ofereixen superfícies específiques majors i per tant major caiguda de pressió	Proporcionen una gran àrea superficial entre L i G en contacte
Fàcils de transportar i emmagatzemar	Major àrea superficial que els rebliments aleatoris
	Menor caiguda de pressió per al gas i major flux
	Major capacitat i eficiència
	Dificultat a l'hora de transportar-los per tal de no fer malbé la seva forma

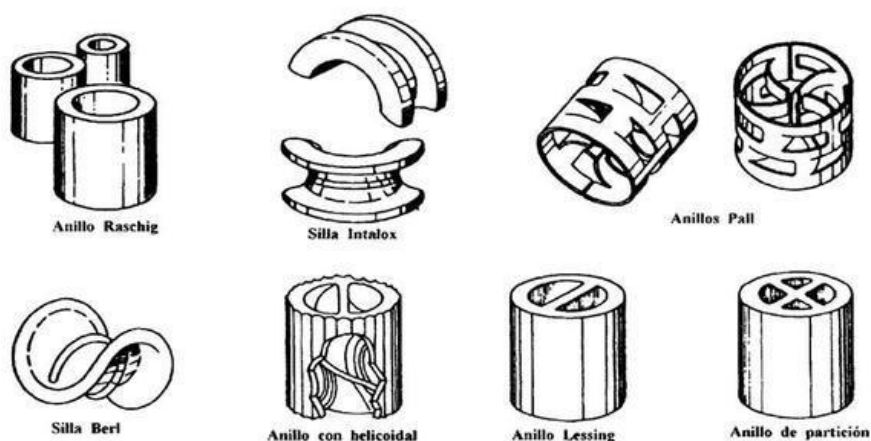


Figura 11.38. Tipus de rebliments aleatoris.



Figura 11.39. Rebliments regulars de diferents materials.

Així doncs per tal de dissenyar les diferents columnes de destil·lació amb el rebliment més adequat per a cada cas s'hauran de tenir en compte tots els aspectes esmentats prèviament per tal de que l'eficiència d'aquest sigui màxima. Per altre banda s'haurà de fer una correcta elecció d'altres elements que formen part de la columna de destil·lació tals com el distribuïdor i redistribuidor de líquid, el suport del rebliment, l'injector del corrent d'aliment, etc.

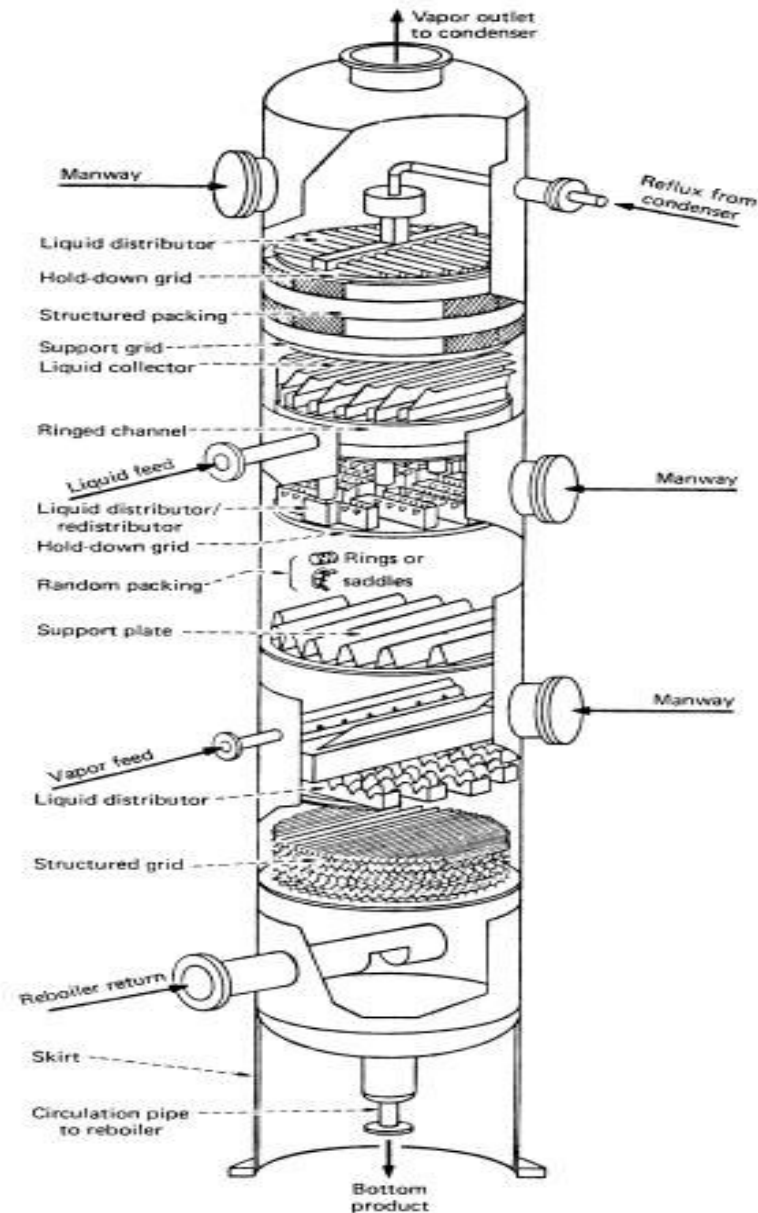


Figura 11.40. Exemple d'una columna de rebliment amb diferents elements interns, el suport del rebliment i el muntatge redistribuidor.

11.6.1.1. Disseny de la columna CD-301

Per tal de dissenyar les columnes de destil·lació s'ha utilitzat el simulador Aspen HYSYS 8.3 donat que ens proporciona els paràmetres de disseny bàsics per tal de poder dissenyar mecànicament la columna i ens aporta informació de les composicions dels corrents de sortida de l'equip simulat.

Per poder obtenir una aproximació dels paràmetres de disseny s'utilitza el mètode Shortcut. Per fer servir aquest mètode al simulador s'introdueixen la temperatura i les composicions del

corrent d'entrada, el cabal, la pressió d'operació i la relació de reflux. Els valors obtinguts per a la columna CD-301 es mostren a la taula següent:

Taula 11.45. Valors obtinguts de la columna CD-301

PARÀMETRE	VALOR
Nombre mínim d'etapes d'equilibri	11.20
Nombre actual d'etapes d'equilibri	22.83
Plat òptim d'alimentació	6.98
Relació de reflux mínima	0.44

Mitjançant els valors aproximats dels paràmetres de disseny obtinguts s'ha utilitzat el mètode Rigorós per obtenir el disseny definitiu de la columna. A les taules següents es mostren el resultats obtinguts:

Taula 11.46. Disseny definitiu de la columna.

	ALIMENT	DESTIL·LAT	RESIDU
Cabal molar (Kmol/h)	90.00	40.00	50.00
Temperatura (°C)	25.00	-31.61	74.46
Pressió (atm)	10.00	10.00	10.00
Densitat (Kg/m³)	77.08	20.63	1264
Entalpia (KJ/Kg)	-3468.00	-2596.00	-3675.00
Cabal de calor (KJ/h)	-2.36·10 ⁷	-3.79·10 ⁶	-1.97·10 ⁷

Taula 11.47. Composicions d'entrada i sortida de la columna.

	HF	HCl	FREÓN-11	FREÓN-12
Aliment	0.11	0.44	0.22	0.22
Destil·lat	0.00	1.00	0.00	0.00
Residu	0.20	0.00	0.40	0.40

Un cop s'ha simulat la columna amb les composicions dels corrents de sortida desitjades s'ha utilitzat la opció Tray Sizing del simulador la qual ens proporciona els paràmetres físics de disseny tals com el diàmetre de la columna o l'altura un cop seleccionat el tipus de rebliment . Per fer els càlculs el programa utilitza la correlació SLEv73. Els resultats obtinguts es mostren a continuació:

Taula 11.48. Paràmetres físics de disseny de la columna.

PARÀMETRE	VALOR
Diàmetre intern (m)	0.46
Altura cilindre (m)	10.52
% Màxim d'inundació	73.20
Nº etapes eq. teòriques	23.00
HETP (m)	0.46

El resultat proporcionat pel simulador Hysys de l'HETP s'ha comprovat mitjançant la següent equació:

$$HETP = \frac{\text{Alçada de la columna}}{N \text{ etapes d'equilibri teòriques}}$$

11.6.1.1.1 Disseny intern

El disseny intern d'una columna de destil·lació és molt important donat que s'ha de garantir un bon funcionament d'aquesta. La columna CD-301 s'ha dissenyat com una columna de rebliment donat que es treballa sota operacions d'operació fortament corrosives i és més eficient que la columna de plats ja que proporciona una major superfície de contacte G-L.

La columna CD-301 funcionarà amb un rebliment aleatori anomenat Anells Pall de plàstic donat que tot i que l'àcid fluorhídric i l'àcid clorhídric són anhídrids per raons de seguretat s'ha decidit emprar el rebliment de plàstic per evitar que aquest es corroeixi. S'ha utilitzat com a plàstic el Teflon donat que l'àcid fluorhídric és un corrosiu molt potent i aquest material és resistent a la corrosió d'aquest àcid.

A partir de la informació que proporciona la Taula 2 i un cop conegut el diàmetre de la columna s'ha determinat utilitzar Anells Pall de Teflon 1" donat que sota les condicions de treball de la columna aquest proporciona una caiguda de pressió menor i s'assoleix un bon percentatge d'inundació màxima de la columna, per tant, es pot garantir el bon funcionament de la columna CD-301.



Figura 11.41. Pall Ring de plàstic.

- **Distribuïdor de líquid**

Com el rebliment de la columna no proporciona una bona distribució del líquid al llarg de la columna s'ha emprat un distribuïdor per tal de garantir que no es formin camins preferents en el flux del líquid entre el rebliment i per tant aconseguir una distribució òptima d'aquest. Així doncs s'ha determinat que en aquest cas s'utilitzarà el distribuïdor VKR de l'empresa Sulzer de plàstic (PVDF) donada la gran corrosió que provoca l'HF quan es troba dissolt.

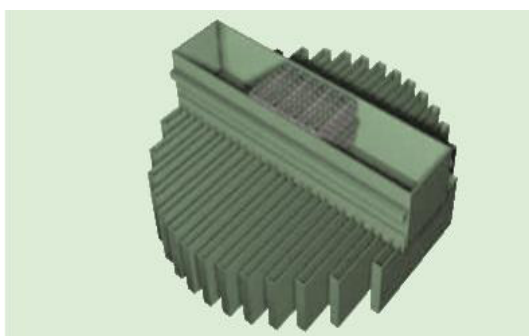
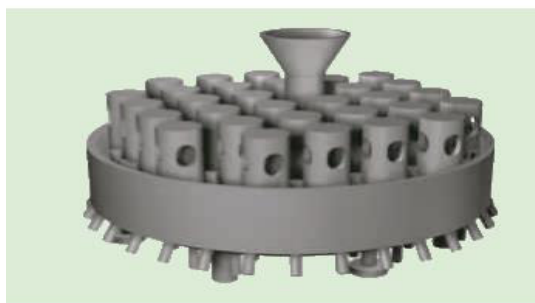


Figura 11.42. Distribuïdor de líquid VKR en l'empresa Sulzer

Figura 5. Distribuïdor de líquid VKR de l'empresa Sulzer

- **Redistribuïdor de líquid**

La columna CD-301 té una altura superior a 6 metres, per tant, s'ha decidit utilitzar un redistribuïdor de líquid per tal de garantir una distribució uniforme del flux de líquid així com suportar el pes de la columna empacada que té per sobre. En aquest cas s'ha determinat utilitzar el VSTG de grafit de l'empresa Sulzer el qual s'utilitza per ambients altament corrosius. Aquest equip utilitza tubs amb sortides laterals per distribuir el líquid sobre el rebliment i s'utilitza com a col·lector i redistribuïdor de líquid entre les seccions empacades.



Gigura 11.43. Redistribuidor i col·lector de líquid VDST

- **Suport del rebliment**

El suport del rebliment a més de suportar el pes d'aquest han de tenir el disseny adequat per tal de permetre un flux relativament no restringit del líquid i el gas. La reixa de suport per rebliments aleatoris EMS de l'empresa Sulzer el líquid descendeix a través de les obertures cap al fons, i el vapor ascendeix a través de la secció superior. S'ha decidit utilitzar aquest tipus de suport donat que és el més adequat quan es treballa amb rebliments aleatoris i degut a que el diàmetre de la columna CD-301 és molt petit. Per motius de seguretat s'ha recobert el suport amb 1 mm de Teflón donat que es necessita la rigidesa que aporta l'acer per tal de suportar tot el pes del rebliment i la resistència a la corrosió que presenta aquest plàstic.



Figura 11.44. Suport del rebliment EMS de l'empresa Sulzer

- **Entrada del corrent d'aliment**

L'entrada del corrent d'aliment com conté líquid i gas s'ha decidit utilitzar un injector de tipus LRP de l'empresa Sulzer. L'injector estarà recobert d'una capa de Teflon de 1 mm de gruix per motius de seguretat.



Figura 11.45. Injector de líquid LRP de l'empresa Sulzer

11.6.1.1.2. Disseny mecànic

Per la construcció de la columna CD-301 s'ha emprat l'acer AISI 316 L donat que proporciona una gran resistència a la corrosió que provoquen diferents compostos a separar. A més l'equip s'ha recobert amb una capa de 2 mm de Teflon (C_1) per motius de seguretat donat que l'HF és un corrosiu molt potent i aquest presenta una elevada residència a la corrosió.

Per tal de determinar el gruix de la paret de la columna s'ha emprat el codi ASME. L'equació utilitzada per al cos cilíndric és la següent:

$$t = \frac{P \cdot R}{SE - 0.6P} + C_1 \text{ (Eq. 194)}$$

Per calcular la pressió i temperatura de disseny també s'ha emprat el codi ASME i s'han emprat les equacions següents:

$$P_{\text{hidràulica}} = g \cdot h_{\text{cilindre}} \cdot \% \text{Max d'inundació} \cdot \rho_{\text{líquid}} \cdot \frac{1 \text{ bar}}{1 \cdot 10^5 \text{ Pa}} \text{ (Eq. 195)}$$

$$P_{\text{disseny}} = P_{\text{treball}} + P_{\text{hidràulica}} + 2.04 \text{ (Eq. 196)}$$

$$T_{\text{disseny}} = T_{\text{treball}} + 20^\circ\text{C} \text{ (Eq. 197)}$$

On:

- t : Gruix mínim requerit del cos cilíndric (mm)
- P : Pressió de disseny (bar)
- $P_{\text{hidràulica}}$: Pressió hidràulica del fluid (bar)
- P_{treball} : Pressió de treball (bar)
- T_{disseny} : Temperatura de disseny (bar)
- T_{treball} : Temperatura de treball (bar)
- R : Radi interior de la columna (mm)
- S : Valor del esforç màxim permisible del material a la temp. de disseny (bar)
- E : Coeficient de soldadura
- C_1 : Tolerància a la corrosió (mm)
- g : Gravetat (m/s^2)
- ρ_{fluid} : Densitat del fluid (Kg/m^3)
- h_{cilindre} : Altura del cilindre (m)

El gruix del fons i del capçal toriesfèric és calcula a partir de les equacions del codi ASME en funció de la pressió interna quan $L/r \geq 16^{2/3}$

$$t = \frac{0.885 \cdot P \cdot L}{SE - 0.1P} + C_1 \text{ (Eq. 198)}$$

També s'ha calculat el gruix del fons i del capçal torièsferic en funció de la pressió externa a partir de la següent equació:

$$t = \frac{0.885 \cdot 1.67 \cdot P \cdot L}{SE - 0.1P \cdot 1.67} \text{ (Eq. 199)}$$

On:

- t: Gruix mínim requerit del fons i del capçal (mm)
- P: Pressió de disseny (bar)
- R: Radi interior de la columna (mm)
- S: Valor del esforç màxim permisible del material a la temp. de disseny (bar)
- E: Coeficient de soldadura
- C₁: Tolerància a la corrosió (mm)
- L: Diàmetre intern de la columna (mm)

Taula 11.49. Dades emprades

PARÀMETRE	VALOR
$\rho_{\text{líquid}} (\text{Kg/m}^3)$	1224.96
$P_{\text{hidràulica}} (\text{bar})$	0.93
P_{disseny}	13.09
T_{disseny}	94.43
$S (\text{bar})$	1082.48
E	0.85
L (mm)	457.20
R (mm)	228.60
L/r	10.00
$P_{\text{ext}} (\text{bar})$	1.01
E (Quan P_{ext})	1.00
C1 (mm)	2.00

Taula 1. Resultats obtinguts

PARÀMETRE	VALOR CALCULAT	VALOR ESTÀNDARD
$t_{\text{cos cilíndric}} (\text{mm})$	5.28	6
$t_{\text{capçal i fons, amb } P_{\text{int}}} (\text{mm})$	7.77	8
$t_{\text{capçal i fons, amb } P_{\text{ext}}} (\text{mm})$	0.63	1

Un cop calculats els valors dels gruixos necessaris per tal de dissenyar la columna mecànicament, s'han arrodonit als valors estàndards donat que és molt més econòmic comprar aquest tipus de xapes i no pas que el fabricant les dissenyi a mida.

A la taula anterior també es pot observar que el gruix del capçal i fons s'ha calculat a partir de la pressió externa i interna. Com el valor més gran correspon a la pressió interna ja que es treballa a una pressió elevada s'ha decidit que el gruix del capçal i del fons serà el corresponent al calculat mitjançant aquesta.

11.6.1.1.3. Alçada

Per realitzar el càlcul de l'alçada de la columna tenint en compte l'alçada del capçal, s'han utilitzat les equacions que es mostren a continuació les quals segueixen la figura 11.46.

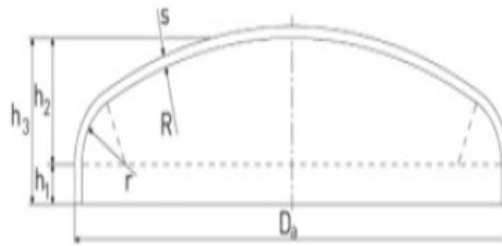


Figura 11.46. Capçal torièsferic.

$$Da = Di \text{ (Eq. 200)}$$

$$r = 0.1 \cdot Da \text{ (Eq. 201)}$$

$$h_1 \geq 3.5 \cdot t \text{ (Eq. 202)}$$

$$h_2 = 0.1935 \cdot Da - 0.455 \cdot t \text{ (Eq. 203)}$$

$$h_3 = h_1 + h_2 \text{ (Eq. 204)}$$

Un cop calculada l'alçada del capçal inferior i del capçal superior, i donat que es coneix l'alçada del cilindre, s'ha calculat l'alçada total de la columna CD-301. Com es pot comprovar a l'equació següent, s'ha sobredimensionat 2.5 metres donat que s'ha de tenir en compte que s'ha de deixar espai per als equips interns, per als conductes per on s'introdueixen els corrents i per poder realitzar un correcte manteniment i neteja de l'equip.

$$Altura_{CD-301} = h_3 \cdot 2 + h_{cilindre} + 2.5 \text{ (Eq. 205)}$$

A la taula següent es mostren els resultats obtinguts en aquest apartat:

Taula 2.51. Resultats obtinguts

PARÀMETRE	VALOR
Da (mm)	457.20
r (mm)	45.72
h1 (mm)	28.00
h2 (mm)	84.83
h3 (mm)	112.83
Altura total CD-301 (m)	13.25

11.6.1.1.4. Pes

Per calcular el pes de la columna s'ha de tenir en compte el pes de la columna buida que correspon al pes de cadascun dels elements que componen la columna (capçal inferior i superior, rebliment, cilindre) i el pes del líquid en operació.

Per calcular el pes de la columna buida s'han emprat les equacions que es mostren a continuació:

$$Pes = Àrea \cdot Gruix \cdot Densitat \text{ (Eq. 206)}$$

$$A_{cilindre}: \pi \cdot D_c \cdot h_{cilindre} \text{ (Eq. 207)}$$

$$A_{toriesfèric}: 0.842 \cdot D_c^2 \text{ (Eq. 208)}$$

$$Pes \text{ columna buida: } P_{cilindre} + P_{capçal} + P_{rebliment} \text{ (Eq. 209)}$$

$$Pes \text{ columna buida: } \pi \cdot D_c \cdot h_{cilindre} \cdot t_{cilindre} \cdot \rho_{material} + 2 \cdot (0.842 \cdot t_{fons} \cdot \rho_{material}) + V_{rebliment} \cdot (1 - \%buit) \cdot \rho_{rebliment} \text{ (Eq. 210)}$$

$$V_{rebliment} = \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \cdot h_{cilindre} \text{ (Eq. 211)}$$

Per calcular el pes del líquid en operació s'han emprat les equacions següents:

$$V_{columna} = 2 \cdot (0.513 \cdot h_3 \cdot D_i^2) + \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \cdot h_{cilindre} \text{ (Eq. 212)}$$

$$Pes \text{ líquid} = \frac{V_{columna}}{2} \cdot \rho_{líquid} \text{ (Eq. 213)}$$

On:

- $D_c = D_i$: Diàmetre interior de la columna (m)
- ρ_{fluid} : Densitat del fluid (Kg/m³)
- $h_{cilindre}$: Altura del cilindre (m)
- $\rho_{material}$: Densitat del material amb el que s'ha construït la columna (Kg/m³)
- $\rho_{rebliment}$: Densitat del material del rebliment (Kg/m³)
- $t_{cilindre}$: Gruix mínim requerit del cos toriesfèric (m)

- t_{fons} : Gruix mínim requerit del fons i del capçal (m)
- %buit: Percentatge de buit del rebliment emprat
- $V_{\text{rebliment}}$: Volum que ocupa el rebliment (m^3)
- V_{columna} : Volum total que ocupa la columna (m^3)

Per tant, el pes total de la columna CD-301 seguirà l'equació següent:

$$\text{Pes total} = \text{Pes líquid} + \text{Pes columna buida}$$

A les taules següents es mostren les dades bibliogràfiques emprades així com els resultats obtinguts:

Taula 11.52. Diferents densitats dins de la columna.

PARÀMETRE	VALOR
$\rho_{\text{fluid}} (\text{kg}/\text{m}^3)$	1224.96
$\rho_{\text{material}} (\text{kg}/\text{m}^3)$	7960.00
$\rho_{\text{rebliment}} (\text{kg}/\text{m}^3)$	2200.00
%buit	94.00

Taula 11.53. Característiques de la columna.

PARÀMETRE	VALOR
$V_{\text{rebliment}} (\text{m}^3)$	0.10
$V_{\text{columna}} (\text{m}^3)$	1.75
Pes columna buida (Kg)	1056.88
Pes líquid (Kg)	1072.64
Pes total (Kg)	2129.51

11.6.1.1.5. Disseny del faldó

Per tal de suportar el pes d'un recipient vertical tal com una columna de destil·lació, el suport més utilitzat en la indústria és l'anomenat faldó. Aquest s'uneix a la columna per la part inferior mitjançant una soldadura, i generalment, la mida d'aquesta soldadura determinat el gruix requerit de la faldó.

S'ha determinat que l'altura de la faldó serà d'un metre i d'acer al carboni. La columna constarà d'una escala la qual tindrà una altura igual que l'altura de la columna i la seva amplada serà de 0.5 m.

11.6.1.1.6. Aïllament tèrmic

L'aïllament tèrmic de la columna és molt important ja que redueix el cost energètic, manté l'equip sota condicions òptimes de treball i pot evitar danys físics als treballadors de la planta.

Per tal de calcular el gruix de l'aïllament de la columna s'ha utilitzat el programa Insulan de l'empresa Calorcol tenint en compte que el material emprat és la llana de roca mineral de 80 kg/m³. A més, s'ha decidit utilitzar acer inoxidable tant per la superfície exterior com per la superfície nua de l'equip.

A la taula següent es mostren les dades d'operació introduïdes al programa així com el valor proporcionats per aquest corresponents a les característiques de l'aïllament.

Taula 11.54. Paràmetres d'operació.

PARÀMETRE	VALOR
Temperatura ambient	20
Temperatura desitjada d'aïllament	35
Velocitat superficial de l'aire (m/s)	0
Temperatura de la superfície aïllada	74,43
Gruix de l'aïllament (polz.)	0,5
Eficàcia de l'aïllament	71,45%

11.6.2. Disseny de la columna CD-302

Per tal de dissenyar les columnes de destil·lació s'ha utilitzat el simulador Aspen HYSYS 8.3 donat que ens proporciona els paràmetres de disseny bàsics per tal de poder dissenyar mecànicament la columna i ens aporta informació de les composicions dels corrents de sortida de l'equip simulat.

Per poder obtenir una aproximació dels paràmetres de disseny s'utilitza el mètode Shortcut. Per fer servir aquest mètode al simulador s'introdueixen la temperatura i les composicions del corrent d'entrada, el cabal, la pressió d'operació i la relació de reflux. Els valors obtinguts per a la columna CD-302 es mostren a la taula següent:

Taula 11.55. Aproximació dels paràmetres de disseny.

PARÀMETRE	VALOR
Nombre mínim d'etapes d'equilibri	10.52
Nombre actual d'etapes d'equilibri	21.44
Plat òptim d'alimentació	7.36
Relació de reflux mínima	0.32

Mitjançant els valors aproximats dels paràmetres de disseny obtinguts s'ha utilitzat el mètode Rigorós per obtenir el disseny definitiu de la columna. A les taules següents es mostren el resultats obtinguts:

Taula 11.56. Balanços d'entrada i sortida de la columna.

	ALIMENT	DESTIL·LAT	RESIDU
Cabal molar (Kmol/h)	50.00	20.00	30.00
Temperatura (°C)	30.47	-0.47	56.95
Pressió (atm)	3.00	3.00	3.00
Densitat (Kg/m ³)	50.71	17.51	1409.00
Entalpia (KJ/Kg)	-3675	-4124	-3262
Cabal de calor (KJ/h)	-1.87·10 ⁷	-9.97·10 ⁶	-9.61·10 ⁶

Taula 11.57. Balanç de matèria de la columna.

	HF	FREÓN-11	FREÓN-12
Aliment	0.20	0.40	0.40
Destil·lat	0.00	0.00	1.00
Residu	0.33	0.66	0.00

Un cop s'ha simulat la columna amb les composicions dels corrents de sortida desitjades s'ha utilitzat la opció Tray Sizing del simulador la qual ens proporciona els paràmetres físics de disseny tals com el diàmetre de la columna o l'altura un cop seleccionat el tipus de reblliment. Per fer els càlculs el programa utilitza la correlació SLEv73. Els resultats obtinguts es mostren a continuació:

Taula 11.58. Paràmetres físics de disseny.

PARÀMETRE	VALOR
Diàmetre intern (m)	0.46
Altura cilindre (m)	10.06
% Màxim d'inundació	71.03
Nº etapes eq. Teòriques	22.00
HETP (m)	0.46

El resultat proporcionat pel simulador Hysys de l'HETP s'ha comprovat mitjançant la següent equació:

$$HETP = \frac{\text{Alçada de la columna}}{N \text{ etapes d'equilibri teòriques}}$$

11.6.2.1. Disseny intern

El disseny intern d'una columna de destil·lació és molt important donat que s'ha de garantir un bon funcionament d'aquesta. La columna CD-302 s'ha dissenyat com una columna de rebliment donat que es treballa sota operacions d'operació fortament corrosives i és més eficient que la columna de plats ja que proporciona una major superfície de contacte G-L.

La columna CD-302 funcionarà amb un rebliment aleatori anomenat Anells Pall de plàstic donat que tot i que l'àcid fluorhídric i l'àcid clorhídric són anhídrids per raons de seguretat s'ha decidit emprar el rebliment de plàstic per evitar que aquest es corroeixi. S'ha utilitzat com a plàstic el Teflon donat que l'àcid fluorhídric és un corrosiu molt potent i aquest material és resistent a la corrosió d'aquest àcid.

A partir de la informació que proporciona la Taula 2 i un cop conegut el diàmetre de la columna s'ha determinat utilitzar Anells Pall de Teflon 1,5'' donat que sota les condicions de treball de la columna aquest proporciona una caiguda de pressió menor i s'assoleix un bon percentatge d'inundació màxima de la columna, per tant, es pot garantir el bon funcionament de la columna CD-302.



Figura 11.47. Pall Ring de plàstic.

- **Distribuïdor de líquid**

Com el rebliment de la columna no proporciona una bona distribució del líquid al llarg de la columna s'ha emprat un distribuïdor per tal de garantir que no es formen camins preferents en el flux del líquid entre el rebliment i per tant aconseguir una distribució òptima d'aquest. Així doncs s'ha determinat que en aquest cas s'utilitzarà el distribuïdor VKR de l'empresa Sulzer de plàstic (PVDF) donada la gran corrosió que provoca l'HF quan es troba dissolt.

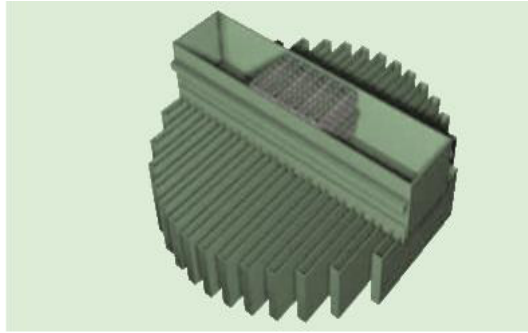


Figura 11.47. Distribuïdor de líquid VKR de l'empresa Sulzer

- **Redistribuïdor de líquid**

La columna CD-302 té una altura superior a 6 metres, per tant, s'ha decidit utilitzar un redistribuïdor de líquid per tal de garantir una distribució uniforme del flux de líquid així com suportar el pes de la columna empacada que té per sobre. En aquest cas s'ha determinat utilitzar el VSTG de grafit de l'empresa Sulzer el qual s'utilitza per ambients altament corrosius. Aquest equip utilitza tubs amb sortides laterals per distribuir el líquid sobre el rebliment i s'utilitza com a col·lector i redistribuïdor de líquid entre les seccions empacades.

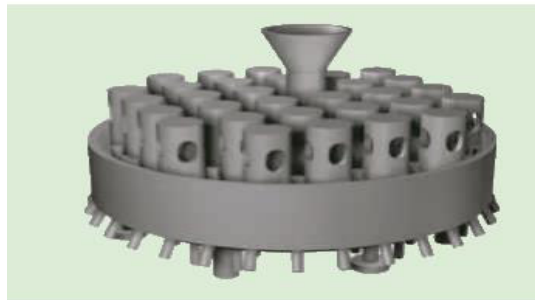


Figura 11.48. Re distribuïdor i col·lector de líquid VSTG de grafit de l'empresa Sulzer

- **Suport del rebliment**

El suport del rebliment a més de suportar el pes d'aquest han de tenir el disseny adequat per tal de permetre un flux relativament no restringit del líquid i el gas. La reixa de suport per rebliments aleatoris EMS de l'empresa Sulzer el líquid descendeix a través de les obertures cap al fons, i el vapor ascendeix a través de la secció superior. S'ha decidit utilitzar aquest tipus de suport donat que és el més adequat quan es treballa amb rebliments aleatoris i degut a que el diàmetre de la columna CD-302 és molt petit. Per motius de seguretat s'ha recobert el suport amb 1 mm de Teflon donat que es necessita la rigidesa que aporta l'acer per tal de suportar tot el pes del rebliment i la resistència a la corrosió que presenta aquest plàstic.



Figura 11.49. Suport de rebliment EMS de l'empresa Sulzer.

- **Entrada del corrent d'aliment**

L'entrada del corrent d'aliment com conté líquid i gas s'ha decidit utilitzar un injector de tipus LRP de l'empresa Sulzer. L'injector estarà recobert d'una capa de Teflon de 1 mm de gruix per motius de seguretat.

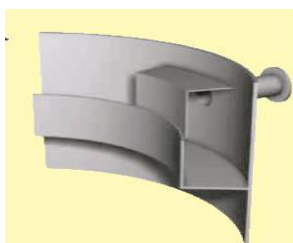


Figura 11.50. Injector de líquid LRP de l'empresa Sulzer.

11.6.2.2. Disseny mecànic

La columna CD-302 s'ha dissenyat mecànicament emprant les equacions que es mostren a l'apartat 11.6.1.1.2. Les dades utilitzades i els resultats obtinguts es mostren a les taules següents:

Taula 11.59. Dades emprades.

PARÀMETRE	VALOR
$\rho_{\text{líquid}} (\text{Kg/m}^3)$	1409.90
$P_{\text{hidràulica}} (\text{bar})$	0.99
P_{disseny}	6.07
T_{disseny}	76.95
$S (\text{bar})$	1082.48
E	0.85
$L (\text{mm})$	457.20
$R (\text{mm})$	228.60
L/r	10.00
$P_{\text{ext}} (\text{bar})$	1.01
$E (\text{Quan } P_{\text{ext}})$	1.00
$C1 (\text{mm})$	2.00

Taula.11.60. Resultats obtinguts

PARÀMETRE	VALOR CALCULAT	VALOR ESTÀNDARD
$t_{\text{cos cilíndric}}$ (mm)	3.51	4
$t_{\text{capçal i fons, amb Pint}}$ (mm)	4.67	5
$t_{\text{capçal i fons, amb Pext}}$ (mm)	0.63	1

11.6.2.3. Alçada

L'alçada de la columna CD-302 s'ha calculat mitjançant les equacions que es mostren a l'apartat 11.6.1.1.3. Els resultats obtinguts es mostren a continuació:

Taula 3.61 Resultats obtinguts.

PARÀMETRE	VALOR
Da (mm)	457.2
r (mm)	45.72
h1 (mm)	17.5
h2 (mm)	86.19
h3 (mm)	103.70
Altura total CD-301 (m)	12.77

11.6.2.4. Pes

El pes de la columna CD-302 s'ha calculat mitjançant les equacions que es mostren a l'apartat 11.6.1.1.4. Les dades bibliogràfiques emprades i els resultats obtinguts es mostren a continuació:

Taula 11.62. Diferents densitats dins la columna.

PARÀMETRE	VALOR
ρ_{fluid} (kg/m ³)	1409.90
ρ_{material} (kg/m ³)	7960.00
$\rho_{\text{rebliment}}$ (kg/m ³)	2200.00
%buit	95.00

Taula 11.63. Característiques de la columna.

PARÀMETRE	VALOR
$V_{\text{rebliment}}$ (m ³)	0.08
V_{columna} (m ³)	1.67
Pes columna buida (Kg)	708.77
Pes líquid (Kg)	1409.90
Pes total (Kg)	1888.73

11.6.2.5. Disseny del faldó

Per tal de suportar el pes d'un recipient vertical tal com una columna de destil·lació, el suport més utilitzat en la indústria és l'anomenat faldó. Aquest s'uneix a la columna per la part inferior mitjançant una soldadura, i generalment, la mida d'aquesta soldadura determinat el gruix requerit de la faldó.

S'ha determinat que l'altura de la faldó serà d'un metre i d'acer al carboni. La columna constarà d'una escala la qual tindrà una altura igual que l'altura de la columna i la seva amplada serà de 0.5 m.

11.6.2.6. Aïllament tèrmic

L'aïllament tèrmic de la columna és molt important ja que redueix el cost energètic, manté l'equip sota condicions òptimes de treball i pot evitar danys físics als treballadors de la planta.

Per tal de calcular el gruix de l'aïllament de la columna s'ha utilitzat el programa Insulan de l'empresa Calorcol tenint en compte que el material emprat és la llana de roca mineral de 80 kg/m³. A més, s'ha decidit utilitzar acer inoxidable tant per la superfície exterior com per la superfície nua de l'equip.

A la taula següent es mostren les dades d'operació introduïdes al programa així com el valors proporcionats per aquest corresponents a les característiques de l'aïllament.

Figura 11.64. Paràmetres d'operació.

PARÀMETRE	VALOR
Temperatura ambient	20
Temperatura desitjada d'aïllament	35
Velocitat superficial de l'aire (m/s)	0
Temperatura de la superfície aïllada	56,95
Gruix de l'aïllament (polz.)	0,5
Eficàcia de l'aïllament	72,57%

11.6.3. Disseny de la columna CD-303

Per tal de dissenyar les columnes de destil·lació s'ha utilitzat el simulador Aspen HYSYS 8.3 donat que ens proporciona els paràmetres de disseny bàsics per tal de poder dissenyar

mecànicament la columna i ens aporta informació de les composicions dels corrents de sortida de l'equip simulat.

Per poder obtenir una aproximació dels paràmetres de disseny s'utilitza el mètode Shortcut. Per fer servir aquest mètode al simulador s'introdueixen la temperatura i les composicions del corrent d'entrada, el cabal, la pressió d'operació i la relació de reflux. Els valors obtinguts per a la columna CD-303 es mostren a la taula següent:

Taula 11.65. Aproximació dels paràmetres de disseny.

PARÀMETRE	VALOR
Nombre mínim d'etapes d'equilibri	9.65
Nombre actual d'etapes d'equilibri	19.35
Plat òptim d'alimentació	10.00
Relació de reflux mínima	0.31

Mitjançant els valors aproximats dels paràmetres de disseny obtinguts s'ha utilitzat el mètode Rigorós per obtenir el disseny definitiu de la columna. A les taules següents es mostren els resultats obtinguts:

Taula 11.66. Balanços d'entrada i sortida de la columna.

	ALIMENT	DESTIL·LAT	RESIDU
Cabal molar (Kmol/h)	22.60	13.33	9.265
Temperatura (°C)	20.00	-23.73	120.30
Pressió (atm)	10.00	10.00	10.00
Densitat (Kg/m³)	150.30	1267.00	1309.00
Entalpia (KJ/Kg)	-4227.00	-6807.00	-1574.00
Cabal de calor (KJ/h)	-1.16·10 ⁷	-9.48·10 ⁶	-2.108·10 ⁶

Taula 11.67. Balanç de matèria de la columna.

	FREÓN-13	FREÓN-12	CCl ₄
Aliment	0.59	0.11	0.30
Destil·lat	1.00	0.00	0.00
Residu	0.00	0.28	0.72

Un cop s'ha simulat la columna amb les composicions dels corrents de sortida desitjades s'ha utilitzat la opció Tray Sizing del simulador la qual ens proporciona els paràmetres físics de disseny tals com el diàmetre de la columna o l'altura un cop seleccionat el tipus de rebliment. Per fer els càlculs el programa utilitza la correlació SLEv73. Els resultats obtinguts es mostren a continuació:

Taula 11.68. Paràmetres físics de disseny.

PARÀMETRE	VALOR
Diàmetre intern (m)	0.30
Altura cilindre (m)	6.10
% Màxim d'inundació	72.00
Nº etapes eq. teòriques	20.00
HETP (m)	0.31

El resultat proporcionat pel simulador Hysys de l'HETP s'ha comprovat mitjançant la següent equació:

$$HETP = \frac{\text{Alçada de la columna}}{N \text{ etapes d'equilibri teòriques}}$$

11.6.3.1. Disseny intern

El disseny intern d'una columna de destil·lació és molt important donat que s'ha de garantir un bon funcionament d'aquesta. La columna CD-303 s'ha dissenyat com una columna de rebliment donat que es treballa sota operacions d'operació fortament corrosives i és més eficient que la columna de plats ja que proporciona una major superfície de contacte G-L.

La columna CD-301 funcionarà amb un rebliment regular d'acer inoxidable AISI 304 ja que en aquesta columna no hi ha problemes de corrosió. S'ha seleccionat el rebliment Mellapak 500 X de l'empresa Sulzer donat que mitjançant el simulador Hysys s'ha observat que era el més adequat per a les condicions de treball donat que proporciona una caiguda una caiguda de pressió baixa i s'assoleix un bon percentatge d'inundació màxima de la columna.

A més, el rebliment emprat és el més utilitzat arreu del món en diferents tipus d'indústries del sector químic donat que té un rendiment excel·lent en columnes de diàmetres fins a 15 m.



Figura 11.51. Mellapak 500 X

- **Distribuïdor de líquid**

Com el rebliment de la columna no proporciona una bona distribució del líquid al llarg de la columna s'ha emprat un distribuïdor per tal de garantir que no es formin camins preferents en el flux del líquid entre el rebliment i per tant aconseguir una distribució òptima d'aquest. Així doncs s'ha determinat que en aquest cas s'utilitzarà el distribuïdor VK de l'empresa Sulzer donat que és el més adequat per a les característiques físiques de la columna CD-303.

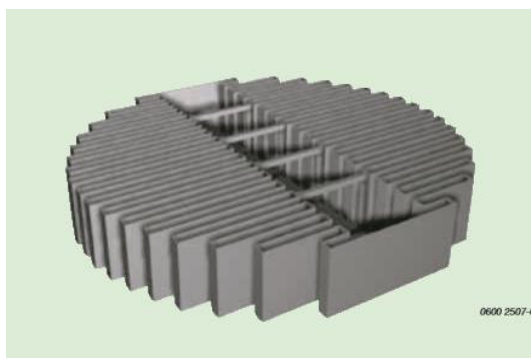


Figura 11.52. Distribuïdor de líquid VK de l'empresa Sulzer.

- **Redistribuïdor de líquid**

La columna CD-303 té una altura superior a 6 metres, per tant, s'ha decidit utilitzar un redistribuïdor de líquid per tal de garantir una distribució uniforme del flux de líquid així com suportar el pes de la columna empacada que té per sobre. Aquesta redistribució del líquid entre llits de rebliment millora l'eficiència de la columna. En aquest cas s'ha escollit el col·lector SLT de l'empresa Sulzer inclou un suport de rebliment amb un col·lector de líquid.



Figura 11.53. Redistribuidor de líquid amb suport SLT de Sulzer.

- **Suport del rebliment**

El suport del rebliment a més de suportar el pes d'aquest han de tenir el disseny adequat per tal de permetre un flux relativament no restringit del líquid i el gas. En aquest cas s'ha utilitzat el suport TS de l'empresa Sulzer donat que el redistribuïdor consta d'un suport adicional. Aquest tipus de suport impedeix que el rebliment de la columna s'inundi prematurament donat que consta de plaques de degoteig.



Figura 11.54. Suport del rebliment TS de l'empresa Sulzer.

- **Entrada del corrent d'aliment**

L'entrada del corrent d'aliment com conté líquid i gas s'ha decidit utilitzar un injector de tipus LRP de l'empresa Sulzer.

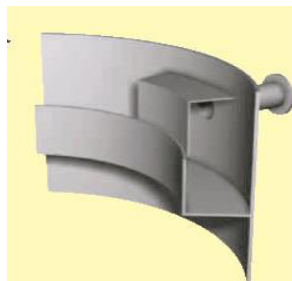


Figura 11.55. Injector de líquid LRP de l'empresa Sulzer.

11.6.3.2. Disseny mecànic

La columna CD-303 s'ha dissenyat mecànicament emprant les equacions que es mostren a l'apartat 11.6.1.1.2. Les dades utilitzades i els resultats obtinguts es mostren a les taules següents:

Taula 4. Dades emprades

PARÀMETRE	VALOR
$\rho_{\text{líquid}} (\text{Kg/m}^3)$	1299.95
$P_{\text{hidràulica}} (\text{bar})$	0.56
P_{disseny}	12.73
T_{disseny}	140.20
$S (\text{bar})$	1068.69
E	0.85
$L (\text{mm})$	304.80
$R (\text{mm})$	152.40
L/r	10.00
$P_{\text{ext}} (\text{bar})$	1.01
$E (\text{Quan } P_{\text{ext}})$	1.00
$C1 (\text{mm})$	2.00

Taula 11.69. Resultats obtinguts

PARÀMETRE	VALOR CALCULAT	VALOR ESTÀNDAR
$t_{\text{cos cilíndric}} (\text{mm})$	4.15	5
$t_{\text{capçal i fons, amb } P_{\text{int}}} (\text{mm})$	5.79	6
$t_{\text{capçal i fons, amb } P_{\text{ext}}} (\text{mm})$	0.43	1

11.6.3.3. Alçada

L'alçada de la columna CD-303 s'ha calculat mitjançant les equacions que es mostren a l'apartat 11.6.1.1.3. Els resultats obtinguts es mostren a continuació:

Taula 11.70. Resultats obtinguts

PARÀMETRE	VALOR
$D_a (\text{mm})$	304.80
$r (\text{mm})$	30.48
$h1 (\text{mm})$	21.00
$h2 (\text{mm})$	56.25
$h3 (\text{mm})$	77.25
Altura total CD-301 (m)	8.75

11.6.3.4. Pes

El pes de la columna CD-303 s'ha calculat mitjançant les equacions que es mostren a l'apartat 11.6.1.1.4. Les dades bibliogràfiques emprades i els resultats obtinguts es mostren a continuació:

Taula 11.71. Dades bibliogràfiques.

PARÀMETRE	VALOR
$\rho_{\text{fluid}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1299.95
$\rho_{\text{material}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	7930.00
$\rho_{\text{rebliment}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	7930.00
%buit	91.00

Taula 11.72. Resultats obtinguts..

PARÀMETRE	VALOR
$V_{\text{rebliment}} \text{ (m}^3\text{)}$	0.04
$V_{\text{columna}} \text{ (m}^3\text{)}$	0.47
Pes columna buida (Kg)	632.82
Pes líquid (Kg)	303.61
Pes total (Kg)	936.44

11.6.3.5. Disseny del faldó

Per tal de suportar el pes d'un recipient vertical tal com una columna de destil·lació, el suport més utilitzat en la indústria és l'anomenat faldó. Aquest s'uneix a la columna per la part inferior mitjançant una soldadura, i generalment, la mida d'aquesta soldadura determinat el gruix requerit de la faldó.

S'ha determinat que l'altura de la faldó serà d'un metre i d'acer al carboni. La columna constarà d'una escala la qual tindrà una altura igual que l'altura de la columna i la seva amplada serà de 0.5 m.

11.6.3.6. Aïllament tèrmic

L'aïllament tèrmic de la columna és molt important ja que redueix el cost energètic, manté l'equip sota condicions òptimes de treball i pot evitar danys físics als treballadors de la planta.

Per tal de calcular el gruix de l'aïllament de la columna s'ha utilitzat el programa Insulan de l'empresa Calorcol tenint en compte que el material emprat és la llana de roca mineral de 80 kg/m³. A més, s'ha decidit utilitzar acer inoxidable tant per la superfície exterior com per la superfície nua de l'equip.

A la taula següent es mostren les dades d'operació introduïdes al programa així com el valors proporcionats per aquest corresponents a les característiques de l'aïllament.

Taula 11.73. Dades d'operació introduïdes.

PARÀMETRE	VALOR
Temperatura ambient	20
Temperatura desitjada d'aïllament	35
Velocitat superficial de l'aire (m/s)	0
Temperatura de la superfície aïllada	120,2
Gruix de l'aïllament (polz.)	2
Eficàcia de l'aïllament	92%

11.6.4. Disseny de la columna CD-304

Per tal de dissenyar les columnes de destil·lació s'ha utilitzat el simulador Aspen HYSYS 8.3 donat que ens proporciona els paràmetres de disseny bàsics per tal de poder dissenyar mecànicament la columna i ens aporta informació de les composicions dels corrents de sortida de l'equip simulat.

Per poder obtenir una aproximació dels paràmetres de disseny s'utilitza el mètode Shortcut. Per fer servir aquest mètode al simulador s'introdueixen la temperatura i les composicions del corrent d'entrada, el cabal, la pressió d'operació i la relació de reflux. Els valors obtinguts per a la columna CD-304 es mostren a la taula següent:

Taula 11.74. Aproximació dels paràmetres de disseny.

PARÀMETRE	VALOR
Nombre mínim d'etapes d'equilibri	8.69
Nombre actual d'etapes d'equilibri	18.78
Plat òptim d'alimentació	10.54
Relació de reflux mínima	0.13

Mitjançant els valors aproximats dels paràmetres de disseny obtinguts s'ha utilitzat el mètode Rigorós per obtenir el disseny definitiu de la columna. A les taules següents es mostren el resultats obtinguts:

Taula 11.75. Balanços d'entrada i sortida de la columna.

	ALIMENT	DESTIL·LAT	RESIDU
Cabal molar (Kmol/h)	9.27	2.60	6.67
Temperatura (°C)	35.00	-0.47	117.80
Pressió (atm)	3.00	3.00	3.00
Densitat (Kg/m³)	1512.00	17.51	1395.00
Entalpia (KJ/Kg)	-1650.00	-4125.00	-783.70
Cabal de calor (KJ/h)	-2.21·10 ⁶	-1.30·10 ⁶	-8.04·10 ⁵

Taula 11.76. Balanç de matèria de la columna.

	CCl ₄	FREÓN-12
Aliment	0.77	0.23
Destil·lat	0.00	1.00
Residu	1.00	0.00

Un cop s'ha simulat la columna amb les composicions dels corrents de sortida desitjades s'ha utilitzat la opció Tray Sizing del simulador la qual ens proporciona els paràmetres físics de disseny tals com el diàmetre de la columna o l'altura un cop seleccionat el tipus de rebliment . Per fer els càlculs el programa utilitza la correlació SLEv73. Els resultats obtinguts es mostren a continuació:

Taula 11.77. Paràmetres físics de disseny.

PARÀMETRE	VALOR
Diàmetre intern (m)	0.15
Altura cilindre (m)	3.05
% Màxim d'inundació	70.98
Nº etapes eq. teòriques	20
HETP (m)	0.15

El resultat proporcionat pel simulador Hysys de l'HETP s'ha comprovat mitjançant la següent equació:

$$HETP = \frac{\text{Alçada de la columna}}{N \text{ etapes d'equilibri teòriques}}$$

11.6.4.1. Disseny intern

El disseny intern d'una columna de destil·lació és molt important donat que s'ha de garantir un bon funcionament d'aquesta. La columna CD-304 s'ha dissenyat com una columna de rebliment donat que es treballa sota operacions d'operació fortament corrosives i és més eficient que la columna de plats ja que proporciona una major superfície de contacte G-L.

La columna CD-304 funcionarà amb un rebliment regular d'acer inoxidable AISI 304 ja que en aquesta columna no hi ha problemes de corrosió. S'ha seleccionat el rebliment Mellapak 125 X de l'empresa Sulzer donat que mitjançant el simulador Hysys s'ha observat que era el més adequat per a les condicions de treball donat que proporciona una caiguda de pressió baixa i s'assoleix un bon percentatge d'inundació màxima de la columna.

A més, el rebliment emprat és el més utilitzat arreu del món en diferents tipus d'indústries del sector químic donat que té un rendiment excel·lent en columnes de diàmetres fins a 15 m.



Figura 11.55. Mellapak 125 X

- **Distribuïdor de líquid**

Com el rebliment de la columna no proporciona una bona distribució del líquid al llarg de la columna s'ha emprat un distribuïdor per tal de garantir que no es formin camins preferents en el flux del líquid entre el rebliment i per tant aconseguir una distribució òptima d'aquest. Així doncs s'ha determinat que en aquest cas s'utilitzarà el distribuïdor VK de l'empresa Sulzer donat que és el més adequat per a les característiques físiques de la columna CD-304.

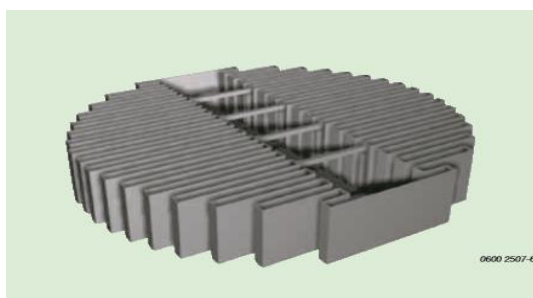


Figura 11.56. distribuïdor de líquid VK de l'empresa Sulzer.

- **Redistribuïdor de líquid**

La columna CD-304 té una altura superior a 6 metres, per tant, s'ha decidit utilitzar un redistribuïdor de líquid per tal de garantir una distribució uniforme del flux de líquid així com

suportar el pes de la columna empacada que té per sobre. Aquesta redistribució del líquid entre llits de rebliment millora l'eficiència de la columna. En aquest cas s'ha escollit el col·lector SLT de l'empresa Sulzer inclou un suport de rebliment amb un col·lector de líquid.



Figura 11.57. Redistribuidor de líquid amb suport SLT de Sulzer.

- **Suport del rebliment**

El suport del rebliment a més de suportar el pes d'aquest han de tenir el disseny adequat per tal de permetre un flux relativament no restringit del líquid i el gas. En aquest cas s'ha utilitzat el suport TS de l'empresa Sulzer donat que el redistribuïdor consta d'un suport addicional. Aquest tipus de suport impedeix que el rebliment de la columna s'inundi prematurament donat que consta de plaques de degoteig.



Figura 11.58. Suport del rebliment TS de l'empresa Sulzer.

- **Entrada del corrent d'aliment**

L'entrada del corrent d'aliment com conté líquid i gas s'ha decidit utilitzar un injector de tipus LRP de l'empresa Sulzer.

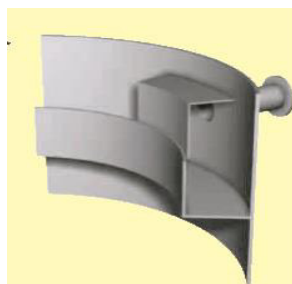


Figura 11.59. Injector de líquid LRP de l'empresa Sulzer.

11.6.4.2. Disseny mecànic

La columna CD-304 s'ha dissenyat mecànicament emprant les equacions que es mostren a l'apartat 11.6.1.1.2. Les dades utilitzades i els resultats obtinguts es mostren a les taules següents:

Taula 115.78. Dades emprades.

PARÀMETRE	VALOR
$\rho_{\text{líquid}} (\text{Kg/m}^3)$	1421.30
$P_{\text{hidràulica}} (\text{bar})$	0.30
P_{disseny}	5.38
T_{disseny}	137.80
$S (\text{bar})$	1068.69
E	0.85
$L (\text{mm})$	152.40
$R (\text{mm})$	76.20
L/r	10.00
$P_{\text{ext}} (\text{bar})$	1.01
$E (\text{Quan } P_{\text{ext}})$	1.00
$C1 (\text{mm})$	2.00

Taula 11.79.6 Resultats obtinguts

PARÀMETRE	VALOR CALCULAT	VALOR ESTÀNDARD
$t_{\text{cos cilíndric}} (\text{mm})$	2.45	3
$t_{\text{capçal i fons, amb Pint}} (\text{mm})$	2.8	3
$t_{\text{capçal i fons, amb Pext}} (\text{mm})$	0.21	1

11.6.4.3. Alçada

L'alçada de la columna CD-304 s'ha calculat mitjançant les equacions que es mostren a l'apartat 11.6.1.1.3. Els resultats obtinguts es mostren a continuació:

Taula 11.80. Resultats obtinguts.

PARÀMETRE	VALOR
Da (mm)	152.40
r (mm)	15.24
h1 (mm)	10.50
h2 (mm)	28.12
h3 (mm)	38.62
Altura total CD-301 (m)	5.63

11.6.4.4. Pes

El pes de la columna CD-304 s'ha calculat mitjançant les equacions que es mostren a l'apartat 11.6.1.1.4. Les dades bibliogràfiques emprades i els resultats obtinguts es mostren a continuació:

Taula 11.81. Dades bibliogràfiques.

PARÀMETRE	VALOR
$\rho_{\text{fluid}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1421.30
$\rho_{\text{material}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	7930.00
$\rho_{\text{rebliment}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	7930.00
%buit	97.00

Taula 11.82. Resultats obtinguts.

PARÀMETRE	VALOR
$V_{\text{rebliment}} \text{ (m}^3\text{)}$	0.0017
$V_{\text{columna}} \text{ (m}^3\text{)}$	0.056
Pes columna buida (Kg)	88.00
Pes líquid (Kg)	39.60
Pes total (Kg)	127.61

11.6.4.5. Disseny del faldó

Per tal de suportar el pes d'un recipient vertical tal com una columna de destil·lació, el suport més utilitzat en la indústria és l'anomenat faldó. Aquest s'uneix a la columna per la part inferior mitjançant una soldadura, i generalment, la mida d'aquesta soldadura determinat el gruix requerit de la faldó.

S'ha determinat que l'altura de la faldó serà d'un metre i d'acer al carboni. La columna constarà d'una escala la qual tindrà una altura igual que l'altura de la columna i la seva amplada serà de 0.5 m.

11.6.4.6. Aïllament tèrmic

L'aïllament tèrmic de la columna és molt important ja que redueix el cost energètic, manté l'equip sota condicions òptimes de treball i pot evitar danys físics als treballadors de la planta.

Per tal de calcular el gruix de l'aïllament de la columna s'ha utilitzat el programa Insulan de l'empresa Calorcol tenint en compte que el material emprat és la llana de roca mineral de 80 kg/m³. A més, s'ha decidit utilitzar acer inoxidable tant per la superfície exterior com per la superfície nua de l'equip.

A la taula següent es mostren les dades d'operació introduïdes al programa així com el valors proporcionats per aquest corresponents a les característiques de l'aïllament.

Taula 11.83. Dades d'operació introduïdes.

PARÀMETRE	VALOR
Temperatura ambient	20
Temperatura desitjada d'aïllament	35
Velocitat superficial de l'aire (m/s)	0
Temperatura de la superfície aïllada	117,8
Gruix de l'aïllament (polz.)	1,5
Eficàcia de l'aïllament	89,93%

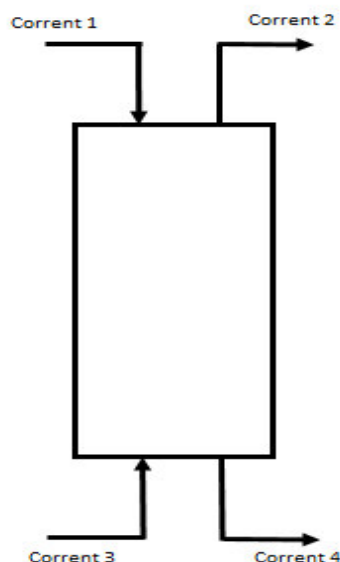
1. Columna d'absorció

La absorció és una operació en la que es transfereix matèria des la fase gas a la fase líquida. En una torre d'absorció el corrent gas circula en contracorrent amb el líquid. El gas ascendeix com conseqüència de la diferència de pressió entre l'entrada i la sortida de la columna. El contacte entre les dues fases produeix la transferència del solut de la fase gas a la fase líquida, donat que el solut presenta major afinitat pel dissolvent. L'objectiu és que el contacte entre ambdues fases sigui el màxim possible, així com que el temps de residència sigui suficient perquè la major part del solut pugui transferir-se d'una fase a un altre.

11.6.5. Disseny de la columna CA-401

Per tal d'acondicionar l'HCl produït a la planta CADMA chemicals s'ha emprat una columna d'absorció. El corrent de sortida de la columna CD-302, el qual conté HCl pur, es barreja amb

un corrent d'aire pur en un mesclador i el corrent de sortida s'introdueix per la part inferior de la columna CA-401. En canvi, per la part superior de la columna s'introdueix un corrent d'aigua pura en condicions atmosfèriques. El corrent de sortida de la part inferior de la columna CD-401 conté l'àcid clorhídric acondicionat per poder comercialitzar-lo. La columna segueix l'esquema següent:



A les taules següents es mostren els cabals dels diferents components dels corrents d'entrada i de sortida i els paràmetres físics obtinguts per a cadascun:

Taula 11.84. Cabals dels diferents components dels corrents d'entrada i sortida.

	Corrent 1	Corrent 2	Corrent 3	Corrent 4
HCl	0.00	0.00	0.91	0.17
H ₂ O	1.00	37.01	0.00	0.83
Aire	0.00	4.14	0.09	0.00

Taula 11.85. Propietats físiques del corrents.

	Corrent 1	Corrent 2	Corrent 3	Corrent 4
Cabal molar (Kmol/h)	226.10	41.15	44.00	228.9
Temperatura (°C)	25.00	97.03	-75.33	88.01
Pressió (atm)	1.00	1.00	1.00	1.00
Densitat (Kg/m³)	995.10	0.63	2.24	1111
Entalpia (KJ/Kg)	-1.59·10 ⁴	-1.13·10 ⁴	-2429	-1,23·10 ⁴
Cabal de calor (KJ/h)	-6.46·10 ⁷	-8.85·10 ⁶	-3.82·10 ⁶	-5.95·10 ⁷

11.6.5.1. Disseny intern

El disseny intern d'una columna de destil·lació és molt important donat que s'ha de garantir un bon funcionament d'aquesta. La columna CA-401 s'ha dissenyat com una columna de rebliment donat que es treballa sota operacions d'operació fortament corrosives i és més eficient que la columna de plats ja que proporciona una major superfície de contacte G-L.

La columna CA-401 funcionarà amb un rebliment aleatori anomenat Anells Raschig de vidre donat que l'àcid clorhídric en presència d'aigua és altament corrosiu i aquest material presenta una gran resistència a la corrosió.

A partir de la informació que proporciona la Taula 11.85 i un cop conegut el diàmetre de la columna s'ha determinat utilitzar Anells Raschig 1" donat que sota les condicions de treball de la columna aquest proporciona una caiguda de pressió menor i s'assoleix un bon percentatge d'inundació màxima de la columna, per tant, es pot garantir el bon funcionament de la columna CA-401.

- **Distribuïdor de líquid**

Com el rebliment de la columna no proporciona una bona distribució del líquid al llarg de la columna s'ha emprat un distribuïdor per tal de garantir que no es formin camins preferents en el flux del líquid entre el rebliment i per tant aconseguir una distribució òptima d'aquest. Així doncs s'ha determinat que en aquest cas s'utilitzarà el distribuïdor VKR de l'empresa Sulzer de plàstic (PVDF) donada la gran corrosió que provoca l'àcid clorhídric quan es troba dissolt en aigua.

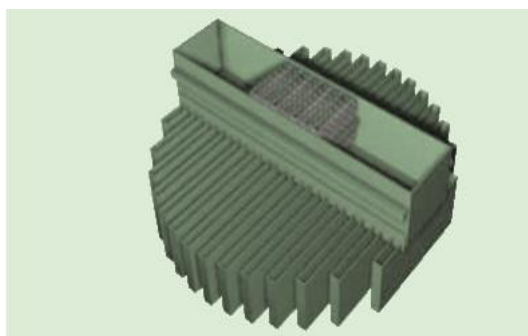


Figura 11.60. Distribuïdor de líquid VKR de l'empresa Sulzer.

- **Redistribuïdor de líquid**

La columna CA-401 té una altura superior a 6 metres, per tant, s'ha decidit utilitzar un redistribuïdor de líquid per tal de garantir una distribució uniforme del flux de líquid així com

suportar el pes de la columna empacada que té per sobre. En aquest cas s'ha determinat utilitzar el VSTG de grafit de l'empresa Sulzer el qual s'utilitza per ambients altament corrosius. Aquest equip utilitza tubs amb sortides laterals per distribuir el líquid sobre el rebliment i s'utilitza com a col·lector i redistribuïdor de líquid entre les seccions empacades.

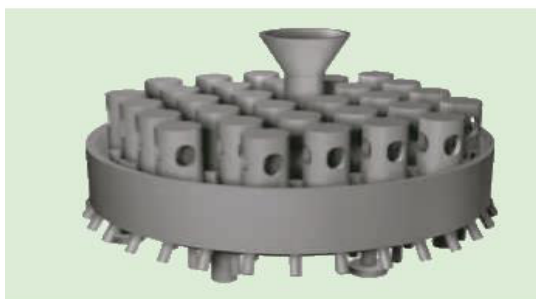


Figura 11.61. Redistribuidor i col·lector de líquid VSTG de grafit de l'empresa Sulzer.

- **Suport del rebliment**

El suport del rebliment a més de suportar el pes d'aquest han de tenir el disseny adequat per tal de permetre un flux relativament no restringit del líquid i el gas. La reixa de suport per rebliments aleatoris EMS de l'empresa Sulzer el líquid descendeix a través de les obertures cap al fons, i el vapor ascendeix a través de la secció superior. S'ha decidit utilitzar aquest tipus de suport donat que és el més adequat quan es treballa amb rebliments aleatoris i degut a que el diàmetre de la columna CA-401 és molt petit. Per motius de seguretat s'ha recobert el suport amb 1 mm de Teflon donat que es necessita la rigidesa que aporta l'acer per tal de suportar tot el pes del rebliment i la resistència a la corrosió que presenta aquest plàstic.



Figura 11.62. Suport del rebliment EMS de l'empresa Sulzer.

- **Entrada del corrent d'aliment**

L'entrada del corrent 2 d'aliment com només conté gas s'ha decidit utilitzar un injector de tipus GD de l'empresa Sulzer. L'injector estarà recobert d'una capa de Teflon de 1 mm de gruix per motius de seguretat. Per altre banda, l'entrada d'aliment del corrent 1 només conté líquid, per tant, s'utilitzarà l'injector LV de l'empresa Sulzer.



Figura 11.63. Corrent d'aliment del gas.



Figura 11.64. Corrent d'aliment del líquid.

11.6.5.2. Disseny mecànic

La columna CA-401 s'ha dissenyat mecànicament emprant les equacions que es mostren a l'apartat 11.6.1.1.2. Les dades utilitzades i els resultats obtinguts es mostren a les taules següents:

Taula 11.86. Dades emprades.

PARÀMETRE	VALOR
$\rho_{\text{líquid}} (\text{Kg/m}^3)$	991.29
$P_{\text{hidràulica}} (\text{bar})$	0.33
P_{disseny}	3.38
T_{disseny}	117.03
$S (\text{bar})$	1068.69
E	0.85
$L (\text{mm})$	762.00
$R (\text{mm})$	381.00
L/r	10.00
$P_{\text{ext}} (\text{bar})$	1.01
$E (\text{Quan } P_{\text{ext}})$	1.00
$C1 (\text{mm})$	2.00

Taula 11.877. Resultats obtinguts.

PARÀMETRE	VALOR CALCULAT	VALOR ESTÀNDARD
$t_{\text{cos cilíndric}}$ (mm)	3.42	4
$t_{\text{capçal i fons, amb Pint}}$ (mm)	4.51	5
$t_{\text{capçal i fons, amb Pext}}$ (mm)	1.10	2

11.6.5.3. Alçada

L'alçada de la columna CA-401 s'ha calculat mitjançant les equacions que es mostren a l'apartat 11.6.1.1.3. Els resultats obtinguts es mostren a continuació:

Taula 11.88. Resultats obtinguts.

PARÀMETRE	VALOR
Da (mm)	762.00
r (mm)	76.20
h1 (mm)	17.50
h2 (mm)	145.17
h3 (mm)	162.67
Altura total CD-301 (m)	7.43

11.6.5.4. Pes

El pes de la columna CA-401 s'ha calculat mitjançant les equacions que es mostren a l'apartat 11.6.1.1.4. Les dades bibliogràfiques emprades i els resultats obtinguts es mostren a continuació:

Taula 11.89. Dades bibliogràfiques emprades.

Paràmetre	Valor
ρ_{fluid} (kg/m ³)	991.29
ρ_{material} (kg/m ³)	7960.00
$\rho_{\text{rebliment}}$ (kg/m ³)	2500.00
%buit	90.00

Taula 11.90. Resultats obtinguts.

PARÀMETRE	VALOR
$V_{\text{rebliment}}$ (m ³)	0.21
V_{columna} (m ³)	2.20
Pes columna buida (Kg)	943.61
Pes líquid (Kg)	1089.59
Pes total (Kg)	2033.20

11.6.5.5. Disseny del faldó

Per tal de suportar el pes d'un recipient vertical tal com una columna d'absorció, el suport més utilitzat en la indústria és l'anomenat faldó. Aquest s'uneix a la columna per la part inferior mitjançant una soldadura, i generalment, la mida d'aquesta soldadura determina el gruix requerit de la faldó.

S'ha determinat que l'altura de la faldó serà d'un metre i d'acer al carboni. La columna constarà d'una escala la qual tindrà una altura igual que l'altura de la columna i la seva amplada serà de 0.5 m.

11.6.5.6. Aïllament tèrmic

L'aïllament tèrmic de la columna és molt important ja que redueix el cost energètic, manté l'equip sota condicions òptimes de treball i pot evitar danys físics als treballadors de la planta.

Per tal de calcular el gruix de l'aïllament de la columna s'ha utilitzat el programa Insulan de l'empresa Calorcol tenint en compte que el material emprat és la llana de roca mineral de 80 kg/m³. A més, s'ha decidit utilitzar acer inoxidable tant per la superfície exterior com per la superfície nua de l'equip.

A la taula següent es mostren les dades d'operació introduïdes al programa així com el valor proporcionats per aquest corresponents a les característiques de l'aïllament.

Taula 11.91. Dades d'operació introduïdes.

PARÀMETRE	VALOR
Temperatura ambient	20
Temperatura desitjada d'aïllament	35
Velocitat superficial de l'aire (m/s)	0
Temperatura de la superfície aïllada	97,03
Gruix de l'aïllament (polz.)	0,86
Eficàcia de l'aïllament	84,97%

11.7 Disseny de canonades, bombes i compressors

11.7.1. Disseny de canonades

Les dimensions de les canonades per on circularan els fluids venen determinades pels cabals d'aquests. La llargada de la canonada vindrà donada per la distància entre els equips, però per conèixer el diàmetre s'utilitza la següent equació:

$$D = \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot 0.25 \cdot v}} \quad (Eq. 214)$$

On:

- D: diàmetre interior de la canonada (m)
- Q: cabal que hi circula per la canonada (m³/s)
- v: velocitat del fluid per la canonada (m/s)

D'aquests paràmetres desconeixem tant el diàmetre com la velocitat del fluid, per aquest motiu s'estableixen velocitats típiques del fluid a l'hora de trobar el diàmetre requerit.

En el cas de líquids, les velocitats típiques solen situar-se entre 1.5 i 2.5 m/s. Pel que fa als gasos, la velocitat típica sol variar entre 9 i 36 m/s, mentre que per corrents de vapors el rang de velocitats s'estableix entre 9 i 20 m/s.

Un cop es coneix el diàmetre requerit d'una canonada, aquest cal normalitzar-lo, per tal d'evitar costos innecessaris de fabricació, així com també s'ha de calcular el gruix que hauria de tenir la canonada. Els gruixos de les canonades venen determinats, a més de pel propi diàmetre de la canonada, per la pressió dels fluids que hi circularan per l'interior. D'aquesta manera, existeixen dos tipus de cèdules, les de 40 per a pressions atmosfèriques o relativament baixes; i les cèdules de 80, que s'hauran de fer servir quan es vulgui transportar un fluid que estigui a altes pressions.

A continuació es mostrarà una figura, mitjançant la qual s'han establert els diàmetres i els gruixos de les canonades.

Taula 11.92. Dimensions de canonades estàndard.

A.5-1 Dimensiones de tubería estándar de acero									
<i>Tamaño nominal de la tubería</i> (pulg.)	<i>Diámetro externo</i>		<i>Cédula</i>	<i>Espesor de la pared</i>		<i>Diámetro interno</i>		<i>Área de corte transversal</i>	
	<i>pulg.</i>	<i>mm</i>		<i>pulg.</i>	<i>mm</i>	<i>pulg.</i>	<i>mm</i>	<i>pie²</i>	<i>m² × 10⁴</i>
$\frac{1}{8}$	0.405	10.29	40	0.068	1.73	0.269	6.83	0.00040	0.3664
			80	0.095	2.41	0.215	5.46	0.00025	0.2341
$\frac{1}{4}$	0.540	13.72	40	0.088	2.24	0.364	9.25	0.00072	0.6720
			80	0.119	3.02	0.302	7.67	0.00050	0.4620
$\frac{3}{8}$	0.675	17.15	40	0.091	2.31	0.493	12.52	0.00133	1.231
			80	0.126	3.20	0.423	10.74	0.00098	0.9059
$\frac{1}{2}$	0.840	21.34	40	0.109	2.77	0.622	15.80	0.00211	1.961
			80	0.147	3.73	0.546	13.87	0.00163	1.511
$\frac{3}{4}$	1.050	26.67	40	0.113	2.87	0.824	20.93	0.00371	3.441
			80	0.154	3.91	0.742	18.85	0.00300	2.791
1	1.315	33.40	40	0.133	3.38	1.049	26.64	0.00600	5.574
			80	0.179	4.45	0.957	24.31	0.00499	4.641
$1\frac{1}{4}$	1.660	42.16	40	0.140	3.56	1.380	35.05	0.01040	9.648
			80	0.191	4.85	1.278	32.46	0.00891	8.275
$1\frac{1}{2}$	1.900	48.26	40	0.145	3.68	1.610	40.89	0.01414	13.13
			80	0.200	5.08	1.500	38.10	0.01225	11.40
2	2.375	60.33	40	0.154	3.91	2.067	52.50	0.02330	21.65
			80	0.218	5.54	1.939	49.25	0.02050	19.05
$2\frac{1}{2}$	2.875	73.03	40	0.203	5.16	2.469	62.71	0.03322	30.89
			80	0.276	7.01	2.323	59.00	0.02942	27.30
3	3.500	88.90	40	0.216	5.49	3.068	77.92	0.05130	47.69
				0.300	7.62	2.900	73.66	0.04587	42.61
$3\frac{1}{2}$	4.000	101.6	40	0.226	5.74	3.548	90.12	0.06870	63.79
			80	0.318	8.08	3.364	85.45	0.06170	57.35
4	4.500	114.3	40	0.237	6.02	4.026	102.3	0.08840	82.19
			80	0.337	8.56	3.826	97.18	0.07986	74.17
5	5.563	141.3	40	0.258	6.55	5.047	128.2	0.1390	129.1
			80	0.375	9.53	4.813	122.3	0.1263	117.5
6	6.625	168.3	40	0.280	7.11	6.065	154.1	0.2006	186.5
			80	0.432	10.97	5.761	146.3	0.1810	168.1
8	8.625	219.1	40	0.322	8.18	7.981	202.7	0.3474	322.7
			80	0.500	12.70	7.625	193.7	0.3171	294.7

11.7.2. Disseny de bombes

Determinar les pèrdues d'energia que experimenta un fluid anant d'un punt a un altre, resulta imprescindible a l'hora de dissenyar les bombes que es requeriran al llarg de tota la planta. El balanç d'energia del fluid es pot calcular amb l'equació de Bernoulli:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \Delta e_k + \Delta e_p = w' - e_v \quad (Eq. 215)$$

On:

- ΔP : pèrdua de pressió (Pa)
- ρ : densitat del fluid (kg/m^3)
- Δe_k : pèrdua d'energia cinètica (m^2/s^2)
- Δe_p : pèrdua d'energia potencial (m^2/s^2)
- w' : potència de la bomba (J/Kg)
- e_v : pèrdues d'energia degudes a la fricció (J/kg)

Tenint en compte que els líquids son considerats pràcticament incompressibles, si la pressió no varia, la velocitat tampoc ho farà al llarg de la canonada, de manera que aquest terme serà considerat negligible en els càlculs que es realitzen a continuació.

$$\Delta e_k = \frac{1}{2 \cdot \alpha} \cdot \Delta v^2 \approx 0 \quad (Eq. 216)$$

Els paràmetres que defineixen l'equació de Bernoulli per al cas de líquids són:

$$\Delta e_p = g \cdot (z_2 - z_1) \quad (Eq. 217)$$

$$e_v = e_{v,recte} + e_{v,accessoris} \quad (Eq. 218)$$

$$e_{v,recte} = 2 \cdot f \cdot \frac{L}{D} \cdot v^2 \quad (Eq. 219)$$

$$e_{v,accessoris} = \sum \frac{1}{2} \cdot k \cdot v^3 \approx 0.3 \cdot e_{v,recte} \quad (Eq. 220)$$

On:

- g : gravetat = 9.81 m/s^2
- z : alçada (m)

- $e_{v,recte}$: pèrdua d'energia per fricció en trams rectes (J/Kg)
- $e_{v,accessoris}$: pèrdua d'energia per fricció deguda als accessoris de les canonades (vàlvules, colzes..)
- f : factor de fanning
- L : longitud de la canonada (m)
- D : diàmetre de la canonada (m)

Com es pot observar, per quantificar la pèrdua d'energia per fricció s'ha de conèixer el factor de Fanning. Per trobar-lo, es segueix el següent esquema de càlcul:

$$N_{Re} = \frac{D \cdot \rho \cdot v}{\mu} \quad (Eq. 220)$$

$$f = 2 \cdot \left[\left(\frac{8}{N_{Re}} \right)^{12} + \frac{1}{(A + B)^{3/2}} \right]^{1/12} \quad (Eq. 221)$$

$$A = \left(-2.457 \cdot \ln \left[\left(\frac{7}{N_{Re}} \right)^{0.9} + \frac{0.27 \cdot \epsilon}{D} \right] \right)^{16} \quad (Eq. 222)$$

$$B = \left(\frac{37350}{N_{Re}} \right)^{16} \quad (Eq. 223)$$

On:

- N_{Re} : nombre de Reynolds
- μ : viscositat del fluid (kg/m·s)
- ϵ : rugositat del material

La rugositat del material dependrà del fluid que estigui circulant per la canonada, havent-se determinat fer ús d'acer inoxidable 316L quan la substància no tingui poder corrosiu, mentre que per substàncies fortament àcides com el àcid fluorhídric, o el clorhídric, s'ha escollit fer ús de canonades de material plàstic PVDF. Les rugositats en cada cas són:

$$\epsilon_{acer} = 1.5 \cdot 10^{-5}$$

$$\epsilon_{PVDF} = 1.5 \cdot 10^{-6}$$

Per trobar-ne la potència de la bomba s'empraran les següents expressions:

$$w_t = m \cdot w' \quad (Eq. 224)$$

$$w_{real} = \frac{w_t}{\eta} \quad (Eq. 225)$$

On:

- w_t : potència teòrica de la bomba (W)
- m : cabal màssic del fluid (kg/s)
- η : rendiment de la bomba
- w_{real} : potència real de la bomba (W)

Per últim, el valor de l'alçada que ha de subministrar la bomba es calcula com:

$$h_{bomba} = \Delta z + \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} + \frac{e_v}{g} \quad (Eq. 226)$$

11.7.3. Disseny de compressors

Els compressors s'empren quan el cabal que hi circula dintre d'una canonada ho fa en forma de gas. Per aquest tipus de fluids, les bombes no serveixen, havent-se de subministrar una pressió al fluid comprimint-lo, de manera que pugui vèncer les pèrdues de pressió que sofrirà al llarg de la canonada. Per determinar el tipus de compressor que es requerirà és segueix el següent esquema de càlcul:

$$\eta = \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/7} - 1 \right] \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \quad (Eq. 227)$$

$$w = \frac{\gamma}{(\gamma - 1) \cdot \eta} \cdot \frac{z \cdot R \cdot T}{P_M} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1-1/\gamma} - 1 \right] \quad (Eq. 228)$$

$$P = w \cdot m \quad (Eq. 229)$$

On:

- η : rendiment del compressor
- P_2 : pressió de sortida del compressor (Pa)
- P_1 : pressió d'entrada al compressor (Pa)
- T_1 : temperatura d'entrada al compressor ($^{\circ}\text{C}$)
- T_2 : temperatura de sortida del compressor ($^{\circ}\text{C}$)
- γ : relació de les capacitats calorífiques c_p/c_v
- z : factor de compressibilitat del gas
- R : constant universal dels gasos ideals = $8.314 \text{ KJ/Kmol}\cdot\text{K}$
- P_M : pes molecular del gas (kg/Kmol)
- m : cabal màssic del fluid (Kg/s)
- P : potència del compressor (KW)

11.8 Bibliografia

- Carl R. Branan, Rules of thumb for chemical engineers, 4^a Edició, Oxford Linacre House, Jordan Hill
- Don W. Green. Robert H. Perry, Perry's chemical engineers handbook, 8^a Edició (pag 11-1 a 11-13)
- Coulson & Richardson's, Chemical Engineering Desing, Vol6, 4th Edition, ED. Elsevier
- H. Scott Fogler, Elementos de ingenieria de las reacciones químicas, Cuarta Edición, ED. Pearson Educación
- Octave Levenspiel, Ingeniera de las reacciones químicas, Segunda Edición, ED. Reverté
- Don W. Green, Robert H. Perry, Perry's Chemical Engineer's Handbook, Eight Edition, ED. McGraw Hill
- Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriot, Operaciones unitarias en ingeniería química, Cuarta Ediciónn, ED. McGraw Hill
- Don W. Green, Robert H. Perry, Perry's Chemical Engineer's Handbook, Eight Edition, ED. McGraw Hill