

# PROJECTE FINAL DE CARRERA

**UAB**

Universitat Autònoma de Barcelona

# PLANTA DE PRODUCCIÓ DE CARBARIL



Catalina Neus Abraham Pons

Gloria Cifre Marqués

Viena Hidalgo Roca

Maria del Carmen Martínez Fernandez

Albert Pujol Aragonés

# Manual de càlcul

---

<b>11</b>	<b>MANUAL DE CÀLCUL</b>	<b>4</b>
11.1	TANCS D'EMMAGATZEMATGE	4
11.1.1	Tanc de Toluè	8
11.1.2	Tanc de Fosgè	13
11.1.3	Tanc de MMA	16
11.1.4	Emmagatzematge de Carbaril	19
11.1.5	Emmagatzematge de $\alpha$ -naftol	22
11.1.6	Emmagatzematge de NaOH	24
11.1.7	Emmagatzematge de la reina Amberlyst	26
11.2	TANCS PULMONS	28
11.2.1	Tanc pulmó de MIC	28
11.2.2	Tanc pulmó TP-401	33
11.2.3	Tanc pulmó TP-301	37
11.2.4	Tanc pulmó TP-303	37
11.2.5	Tanc pulmó TP-501	38
11.2.6	Tanc pulmó TP-503	39
11.2.7	Tanc pulmó TP-505	39
11.2.8	Tanc pulmó TP-701	40
11.3	TANCS DE CONDENSATS	41
11.3.1	Tanc de condensats TP-302	41
11.3.2	Tanc de condensats TP-304	42
11.3.3	Tanc de condensats TP-502	42
11.3.4	Tanc de condensats TP-504	43
11.3.5	Tanc de condensats TP-506	43
11.3.6	Tanc de condensats TP-702 A/B	44
11.3.7	Tanc de condensats TP-703 A/B	44
11.4	TANCS DE MESCLA	45
11.4.1	Tanc de mescla TM-601	53
11.4.2	TM- 702/A i TM-702/B	69
11.4.3	Càlcul del espessor d'aïllament	79
11.5	REACTOR FLUX PISTÓ, R-201	80
11.5.1	Balanç de matèria	80
11.5.2	Balanç d'energia	81
11.5.3	Disseny mecànic	85
11.5.4	Aïllant	95
11.6	REACTOR DE PIRÒLISI, R-401	95
11.6.1	Balanç de Matèria	97
11.6.2	Dimensionament del Reactor	97
11.6.3	Balanç d'energia	99
11.6.4	Disseny mecànic	103
11.6.5	Dispositius de subjecció o recolzament	114
11.7	REACTOR CATALÍTIC, R-601	116
11.7.1	Modelat del reactor	117

11.7.2	<i>Característiques corrents d'entrada i sortida del reactor</i> .....	119
11.7.3	<i>Balanç d'energia</i> .....	120
11.7.4	<i>Càlcul de la pèrdua de carrega al reactor</i> .....	124
11.7.5	<i>Disseny mecànic</i> .....	125
11.7.6	<i>Càlcul del espessor d'aïllament</i> .....	133
11.7.7	<i>Elements interns del reactor</i> .....	133
11.8	COLUMNA D'ABSORCIÓ, CA-301/302.....	134
11.8.1	<i>Selecció del tipus de columna</i> .....	136
11.8.2	<i>Selecció del tipus de flux en la columna</i> .....	137
11.8.3	<i>Selecció del tipus de rebliment</i> .....	137
11.8.4	<i>Parts internes de les columnes de rebliments</i> .....	140
11.8.5	<i>Altura del rebliment. Mètode de la HEPT</i> .....	144
11.8.6	<i>Disseny de la columna mètode rigorós amb Aspen Hysys</i> .....	144
11.8.7	<i>Disseny mecànic de la columna</i> .....	146
11.9	COLUMNA DE DESTIL·LACIÓ, C-301 .....	153
11.9.1	<i>Selecció del tipus de columna</i> .....	155
11.9.2	<i>Selecció del tipus de rebliment</i> .....	156
11.9.3	<i>Parts internes de les columnes de rebliments</i> .....	159
11.9.4	<i>Altura del rebliment. Mètode de la HEPT</i> .....	162
11.9.5	<i>Disseny de la columna mètode rigorós amb Aspen Hysys</i> .....	163
11.9.6	<i>Disseny mecànic de la columna CD-301</i> .....	165
11.10	COLUMNA DE DESTIL·LACIÓ , CD-302.....	172
11.10.1	<i>Avaluació del shortcut</i> .....	172
11.10.2	<i>Avaluació de la simulació rigorosa</i> .....	173
11.10.3	<i>Altura del rebliment. Mètode de la HEPT</i> .....	175
11.10.4	<i>Dispositius interns de la columna CD-302</i> .....	176
11.10.5	<i>Disseny mecànic de la columna CD-302</i> .....	177
11.11	COLUMNES DE DESTIL·LACIÓ DE L'ÀREA 500.....	181
11.12	COLUMNA DE DESTIL·LACIÓ PER SEPARAR L'ÀCID CLORHÍDRIC, CD-501.....	187
11.12.1	<i>Avaluació del shortcut</i> .....	187
11.12.2	<i>Avaluació de la simulació rigorosa</i> .....	189
11.12.3	<i>Altura del rebliment. Mètode de la HEPT</i> .....	191
11.12.4	<i>Dispositius interns de la columna CD-501</i> .....	192
11.12.5	<i>Disseny mecànic de la columna CD-501</i> .....	196
11.13	COLUMNA PER SEPARAR EL ISOCIANAT DE METIL , CD-502.....	202
11.13.1	<i>Avaluació del shortcut</i> .....	203
11.13.2	<i>Avaluació de la simulació rigorosa</i> .....	204
11.13.3	<i>Altura del rebliment. Mètode de la HEPT</i> .....	206
11.13.4	<i>Dispositius interns de la columna CD-502</i> .....	207
11.13.5	<i>Disseny mecànic de la columna CD-502</i> .....	208
11.14	COLUMNA PER SEPARAR EL CLORUR DE METILCARBAMOIL, CD-503 .....	211
11.14.1	<i>Avaluació del shortcut</i> .....	211
11.14.2	<i>Avaluació de la simulació rigorosa</i> .....	213
11.14.3	<i>Distribució i consideracions hidràuliques</i> .....	215

11.14.4	<i>Dispositius interns de la columna CD-503</i> .....	216
11.14.5	<i>Disseny mecànic de la columna CD-503</i> .....	216
11.15	COLUMNA PER SEPARAR EL ISOCIANAT DE METIL, CD-701.....	220
11.15.1	<i>Avaluació del shortcut</i> .....	220
11.15.2	<i>Avaluació de la simulació rigorosa</i> .....	222
11.15.3	<i>Altura del rebliment. Mètode de la HEPT</i> .....	224
11.15.4	<i>Dispositius interns de la columna CD-701</i> .....	224
11.15.5	<i>Disseny mecànic de la columna CD-701</i> .....	225
11.16	DISSENY DE CRISTAL·LITZADORS.....	230
11.16.1	<i>Procés dissenyat</i> .....	232
11.16.2	<i>Balanç de matèria</i> .....	234
11.16.3	<i>Balanç d'energia</i> .....	236
11.16.4	<i>Disseny mecànic</i> .....	238
11.17	DISSENY DE LA CENTRÍFUGA.....	244
11.17.1	<i>Balanç de matèria</i> .....	244
11.17.2	<i>Disseny mecànic</i> .....	245
11.18	DISSENY DEL SISTEMA D'ASSECATGE .....	248
11.18.1	<i>Balanç de matèria</i> .....	251
11.18.2	<i>Dimensionament del assecador</i> .....	251
11.19	BESCANVIADORS DE CALOR.....	253
11.19.1	<i>Introducció</i> .....	253
11.19.2	<i>Fluid tèrmic</i> .....	254
11.19.3	<i>Resum dels bescanviadors de la planta</i> .....	254
11.19.4	<i>Disseny de bescanviadors</i> .....	258
11.20	DISSENY DE BOMBES .....	273
11.21	DISSENY DE COMPRESSORS.....	278
11.22	SERVEIS.....	281
11.22.1	<i>Caldera d'oli tèrmic</i> .....	281
11.22.2	<i>Chiller</i> .....	288
11.22.3	<i>Nitrogen per al blanketing</i> .....	292
11.22.4	<i>Aire comprimit</i> .....	294
11.22.5	<i>Electricitat</i> .....	296
11.23	DISSENY DE CANONADES .....	300
11.24	TRANSPORT DE SÒLIDS.....	302
11.24.1	<i>Divisió de materials de granel segons Geldat</i> .....	302
11.24.2	<i>Procediment de transport neumàtic</i> .....	302

## 11 MANUAL DE CÀLCUL

### 11.1 Tancs d'emmagatzematge

Els tancs d'emmagatzematge es dissenyaran en funció del que s'especifica a les ITC - MIE - APQ i el que disposa l'apartat de Seguretat i Higiene. També es tindrà en compte la Secció VIII Divisió 1 "Pressure Vessels" del Codi ASME (American Society of Mechanical Engineers) i el codi API 650.

\*Pressió d'operació ( $P_o$ ) i Pressió de Disseny ( $P$ )

La pressió d'operació és la pressió de treball i és la pressió manomètrica a la qual està sotmès un equip en condicions d'operació normal.

La pressió de disseny és el valor que s'ha d'utilitzar en les equacions per al càlcul de les parts constitutives dels recipients sotmesos a pressió. La pressió de disseny té en compte la pressió hidrostàtica que exerceix el líquid, al qual se li afegeix un 10% del total per motius de seguretat.

\*Temperatura d'operació ( $T_o$ ) i temperatura de disseny ( $T$ )

Seguint els mateixos criteris que per a la pressió, a la temperatura de disseny se li sumen 20°C a la temperatura d'operació per motius de seguretat.

\*Esforç de Disseny de la Tensió ( $S$ )

És el valor màxim a què podem sotmetre un material, que forma part d'un recipient a pressió, en condicions normals d'operació. El seu valor és aproximadament el 25% de l'esforç últim a la tensió del material en qüestió, que variarà en funció del material i la temperatura.

\*Sobreespessor de corrosió ( $C_1$ )

S'ha de preveure un sobre espessor suficient per a tota la vida útil planificada per a recipients sotmesos a pèrdua de gruix per corrosió, erosió o abrasió mecànica.

L'espessor, per a la corrosió, no requereix ser igual en totes les parts del recipient depenent de zones més propenses. Normalment aquest valor oscil·la entre 1 i 6 mm.

#### \*Factor M

El factor M és un factor adimensional que s'aplica a les tapes toriesfèriques dels recipients i és la relació entre el radi esfèric interior, L, i el radi intern, r.

#### \*Estoc

Per a tots els reactius que es necessiten per a la producció de la carbaril cal especificar la quantitat que haurà emmagatzemada, és a dir, l'estoc. Cal preveure retards en el rebut de matèries primeres, augments en la producció, fallades de seguretat, etc; per això s'ha decidit tenir un estoc de 3 dies dels reactius que ens arriben de la planta del costat i 7 dies per els reactius que han de ser transportats i també un emmagatzematge de 7 dies per el producte obtingut. El tanc de MIC s'ha calculat per un dia.

#### \*Venteig

Tot recipient d'emmagatzematge ha de disposar de sistemes de ventilació per prevenir la deformació del mateix com a conseqüència de omplerts, buidats o canvis de temperatura ambient. La informació sobre la ventilació es recull en les diferents ITC - MIE - APQ.

#### \*Cubetes

S'han de dissenyar les cubetes en els que aniran dipositats els tancs d'emmagatzematge, que serviran per contenir possibles vessaments, aigua contra incendis en cas d'algun... El seu disseny es realitzarà seguint les pautes de les diferents ITC - MIE - APQ. En totes les cubetes els recipients no han d'estar dipositats en més de dues files. Cal que cada fila de recipients tingui adjacent un carrer o via d'accés que permeti la intervenció de la brigada contra incendis.

El fons de la cubeta tindrà un pendent de manera que tot el producte vessat s'escorri ràpidament cap a una zona de la cubeta el més allunyada possible de la projecció dels recipients.

A més del venteig i de la cubeta de retenció s'han dissenyat sistemes de control de nivell i de pressió. Aquests s'adjunten a l'apartat de control.

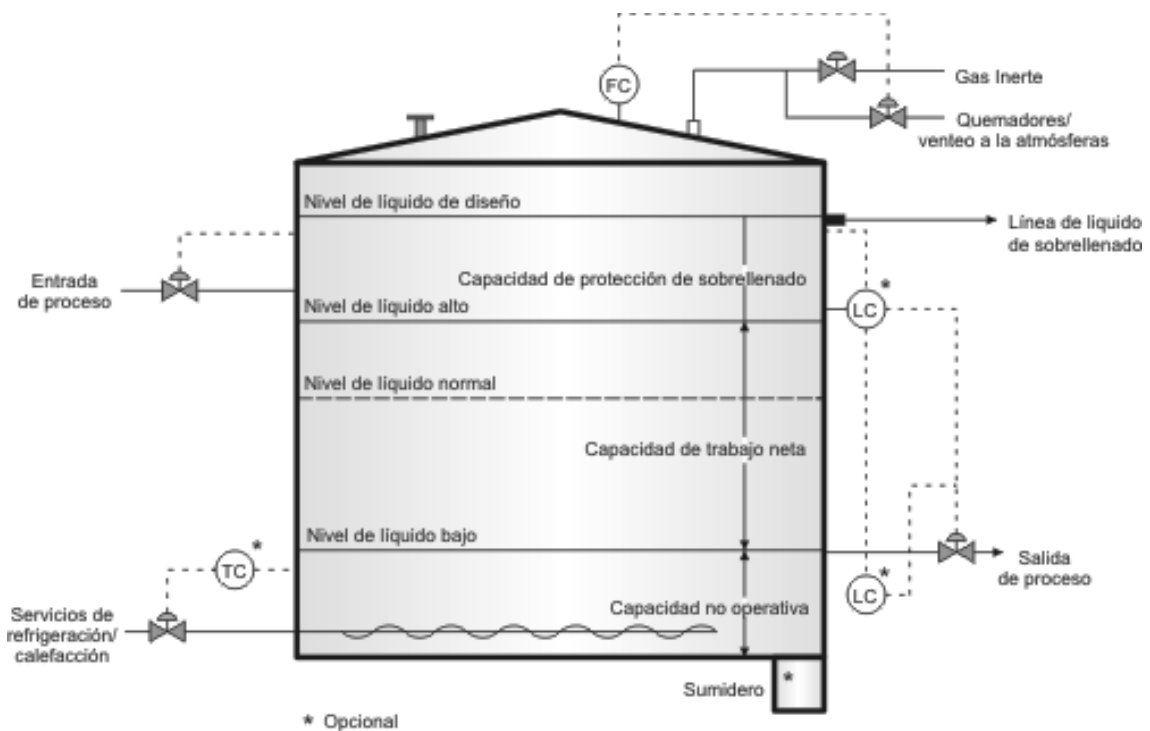
## \*Tancs

Els tancs d'emmagatzematge es poden classificar segons el tipus de coberta. Es diferencien tres tipus: sostres fixes, flotants i sense sostre.

Existeixen tres tipus de tancs de sostre fixa: sostre toriesfèric, sostre esfèric i sostre cònic. El sostre toriesfèric no suporta pressions elevades, el sostre esfèric es capaç de suportar pressions elevades però es la opció més costosa i el sostre cònic s'utilitza per tancs de gran diàmetre.

Per mantenir estabilitat en els tancs d'emmagatzematge s'ha considerat una relació  $D/H=1,5$ .

A continuació, a la figura 11.0.1 es pot observar un esquema complet d'un tanc d'emmagatzematge:



**Figura 11.1.1.** Esquema d'un tanc d'emmagatzematge.

## \*Sitges



Pel disseny s'ha calculat el volum necessari i el pes del sòlid. S'ha fet el seu disseny i s'ha escollit una sitja d'un catàleg que complís les característiques amb les que ha estat dissenyada.

Es tracta de sitges cilíndriques amb els dos capsals cònics, en la figura 11.0.2 es presenta una sitja de les característiques escollides.



**Figura 11.0.2.** Sitja de capsals cònics

\*Elecció del material

Els materials utilitzats s'han de triar tenint en compte l'ús al qual es destinen i seguint criteris econòmics.

Els criteris més importants en l'elecció d'un material són:

o Les propietats mecàniques

- o Les propietats físiques
- o L'estabilitat a la corrosió
- o El preu

En base a aquests criteris, s'ha seleccionat el AISI 316L i Hastelloy-B2 per al disseny dels equips de la planta de carbaril.

L'acer inoxidable del tipus AISI 306L té una composició de 17% Cr, 12% Ni i 2% Mo. El crom és el principal element aleant, aquests els aleatges es passiven, augmentant així la resistència a molts ambients. Es disposa d'un gran nombre d'aliatges resistents a la corrosió, amb propietats mecàniques definides, variant el cost en forma considerable.

El Hastelloy-B2 té una composició de 61% Ni i 28% Mo. És més difícil de treballar que l'acer inoxidable i això fa que el seu cost sigui major. Aquest material té una gran resistència a elevades concentracions d'àcid clorhídric.

\* Normativa

El disseny dels tancs es realitza seguint les instruccions tècniques de la normativa ITC-MIE-APQ, d'emmagatzematge de productes químics. el disseny mecànic dels tancs es realitza segons la normativa ASME per equips a pressió.

### **11.1.1 Tanc de Toluè**

El toluè és un solvent orgànic que s'emmagatzema a temperatura ambient. Es tracta d'un producte molt inflamable, el punt d'inflamació és de 6 ° C, de manera que, segons la normativa ITC-MIE-APQ1, es tracta d'un producte de classe B i subclasse B1. També es tracta d'un producte tòxic, de manera que el emmagatzematge d'aquest també està regit per la normativa ITC-MIE-APQ7 per productes tòxics.

El material escollit pel tanc és l'AISI 316L; té una tensió màxima admissible (S) de 15700 psi.

#### ***11.1.1.1 Càlcul del volum del tanc***

El volum del tanc es va calcular per la posta en marxa i de tal manera que es tingues un aprovisionament de tres dies, amb un volum d'ocupació d'un 80% del volum total.

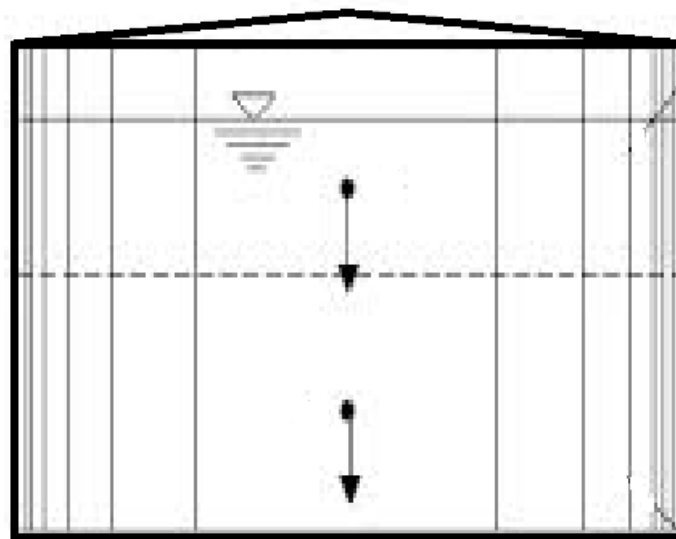
$$V = Q \cdot \text{temps} \cdot 1,20 \quad \text{equació 11.1.1}$$

Donant un volum de tanc de  $651 \text{ m}^3$ . Es va decidir dividir aquest volum en quatre tancs, perquè és un volum gran i així es pot tenir un millor control i seguretat; de tal manera que el volum d'un tanc és  $162,8 \text{ m}^3$ .

Després de la posada en marxa, s'anirà recirculant molt de toluè i en els tancs d'emmagatzematge es tindrà un estoc per més de tres dies.

Pel disseny mecànic del tanc d'emmagatzematge de toluè es va tenir en compte les propietats de la substància química segons la corresponent fitxa de seguretat adjuntada a l'apartat 5 de seguretat i higiene. S'ha decidit emmagatzemar a temperatura ambient i a 1 atm de pressió.

Es va calcular el volum del tanc, contant que aquest és un cilindre amb el capçal superior cònic i l'inferior un capçal pla, ja que està recolzat a terra.



**Figura 11.1.1.** Esquema d'un tanc d'emmagatzematge.

$$V_{\text{cos cilíndric}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \cdot h \quad \text{Equació 11.1.2}$$

$$V_{\text{capçal cònic}} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \quad \text{Equació 11.1.3}$$

Es va fixar la relació alçada/diàmetre de 1,5 m, obtenint les mides que s'adjunten en la taula 11.1.1.

**Taula 11.1.1.** Resultats obtinguts per un tanc de toluè.

	<b>Cilindre</b>	<b>Capçal</b>
<b>Diàmetre (m)</b>	5,2	5,2
<b>Alçada (m)</b>	7,7	1,5
<b>Volum (m<sup>3</sup>)</b>	163,5	6,2

### 11.1.1.2 Càlcul del gruix de les parets del tanc

Les condicions de disseny utilitzades són:

Pressió de disseny = (P operació + P columna de líquid) · 1,1

La pressió de la columna de líquid es calcula per aigua i per líquid de procés, escollint com a valor el major dels dos: P columna de líquid =  $\rho_{\text{líquid}} \cdot g \cdot h_{\text{líquid}}$ .

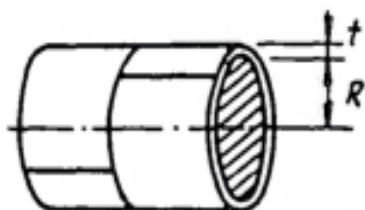
P operació = 1 atm

P disseny = 1,37 atm.

Temperatura de disseny = temperatura ambient + 20°C; s'ha agafat una temperatura ambient de 27 °C. Per tant la temperatura de disseny és de 47°C.

#### ▪ Càlcul de l'espessor de paret del cilindre:

Per al càlcul d'aquest apartat, farem servir les formules donades al codi ASME per a CYLINDRICAL SHELL.



$$t = \left( \frac{P \cdot r_i}{SE - 0,6P} + C \cdot A \right) \cdot 1,1 \quad \text{Equació 11.1.4}$$

**Figura 11.1.2.** Part cilíndrica del tanc.

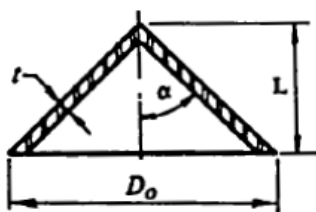
on:  $t$  és espessor mínim de paret en polzades.  
 $P$  és la pressió interna de disseny en psi  
 $r_i$  és el radi en polzades  
 $S$  és la tensió màxima admissible  
 $E$  és el factor de soldadura, s'ha escollit  $E = 0,85$   
 $C.A.$  és sobre espessor de corrosió en polzades, s'ha escollit  $C.A. = 2\text{mm}$   
 $S$  és la tensió màxima admissible

$$t \text{ calculat} = 6,5 \text{ mm}$$

$$t \text{ escollit} = 7 \text{ mm}$$

▪ **Càlcul de l'espessor de paret del con:**

Per al càlcul d'aquest apartat, farem servir les formules donades al codi ASME per a capsals cònics.



$$t = \left( \frac{P \cdot D}{2 \cdot \cos \alpha \cdot (S \cdot E - 0,6 \cdot P)} + C.A. \right) \cdot 1,1 \quad \text{Equació 11.1.5}$$

**Figura 111.1.3.** Part cònica del tanc

on:  $t$  és espessor mínim de paret en polzades.  
 $P$  és la pressió de disseny en psi  
 $S$  és la tensió màxima admissible  
 $E$  és el factor de soldadura  
 $\alpha$  és l'angle que forma el con amb la vertical, s'ha fixat altura del con de 1 metre i s'ha calculat  $\alpha$ .

$$t \text{ calculat} = 6,35 \text{ mm}$$

$$t \text{ escollit} = 7 \text{ mm}$$

L'espessor del tanc serà de 7 mm.

### 11.1.1.3 Càlcul del pes del tanc

#### ▪ Càlcul del pes del tanc buit:

Per calcular el pes de l'equip buit, s'ha fet servir l'equació 11.1.6. S'ha calculat el pes del cilindre i dels dos capçals.

$$Pes = V \cdot \rho \quad \text{Equació 11.1.6}$$

On:

V és el volum del cilindre, con o el fons pla

P és la densitat de l'acer AISI 316L; 7960 kg/m<sup>3</sup>

$$Pes \text{ cilindre} = 7026,69 \text{ kg}$$

$$Pes \text{ con} = 8662,12 \text{ kg}$$

$$Pes \text{ fons pla} = 1169,53 \text{ kg}$$

El pes total del tanc buit és la suma dels tres pesos anteriors:

$$Pes = Pes \text{ cilindre} + Pes \text{ capçals} \quad \text{Equació 11.1.7}$$

$$Pes \text{ tanc buit} = 16858,34 \text{ kg}$$

#### ▪ Càlcul del pes del tanc amb aigua:

Per calcular el pes de l'equip amb aigua es calcula el pes de l'aigua en el volum del recipient i el resultat és la suma de pes del tanc buit i el pes de l'aigua.

$$Pes \text{ de l'aigua} = V \cdot \rho \quad \text{Equació 11.1.8}$$

$$Pes \text{ de l'aigua} = 162759,95 \text{ kg}$$

$$Pes \text{ total} = Pes \text{ tanc buit} + Pes \text{ de l'aigua} = 179618,29 \text{ kg}$$

### 11.1.1.4 Venteig

En el cas d'emmagatzematge a pressió atmosfèrica i a baixa pressió la capacitat total del venteig es calcula amb l'equació 11.1.9:

$$C_{\text{venteig}} = \frac{4,414 \cdot Q}{L \cdot \sqrt{M}} \quad \text{Equació 11.1.9}$$

On:

- $C_{\text{venteig}}$  = la capacitat de venteig en  $\text{m}^3/\text{h}$
- $L$  = el calor latent de vaporització  $\text{kJ/Kg}$
- $M$  = el pes molecular
- $Q$  = el calor rebut en  $\text{kJ/h}$ . Aquest es determina amb l'equació 11.1.10:

$$Q = 139,7 \cdot F \cdot A^{0,82} \cdot 10^3 \quad \text{Equació 11.1.10}$$

On

$F$  és el factor de reducció de reducció de dimensions, s'ha agafat  $F=1$   
 $A$  és la superfície humida en  $\text{m}^2$  (àrea del cilindre)

Utilitzant les equacions anteriors, s'obtenen els resultats següents:

- $Q = 7360451,21 \text{ kJ/h}$
- $C_{\text{venteig}} = 9272,99 \text{ m}^3/\text{h}$

#### **11.1.1.5 Cubetes de retenció**

Els tres tancs de toluè estaran continguts dins una mateixa cubeta i com s'ha introduït anteriorment, els tancs no poden estar disposats en més de dues files i per seguretat entre els tancs hi haurà una distància de 2,6 metres.

Pel tipus de substància i d'emmagatzematge, per normativa les parets de la cubeta estaran a una distància de dos metres de les parets dels tancs, essent el seu volum com a mínim igual que el tanc de dimensions majors i d'un metre d'alçada.

Resultats:

$$\text{Costas cubeta} = 24,8 \times 16,65 \text{ m}$$

$$H \text{ cubeta} = 1 \text{ m}$$

#### **11.1.2 Tanc de Fosgè**

El fosgè és un producte que arriba a la planta per canonada (de la planta del costat). La seva pressió de vapor és de 161,6 KPa a 16 °C, per tant és gas a pressió atmosfèrica. S'emmagatzema líquid i a pressió. Es tracta d'un producte de classe A i subclasse A2; l'emmagatzematge d'aquest estarà regit pel RD 379/2001 del 6 d'abril. Es tracta d'un producte molt tòxic, de manera que l'emmagatzematge d'aquest també està regit per la normativa ITC-MIE-APQ7 per productes tòxics.

El material escollit pel tanc és l'Hastelloy-B2. S'ha escollit aquest material perquè el fosgè és un compost que conté clor i pot haver perill de corrosió. Pel disseny del tanc s'ha seguit el mateix procediment que a l'apartat 11.1.1. tanc de toluè.

#### **11.1.2.1 Càlcul del volum del tanc**

El volum del tanc es va calcular de tal manera que es tingues un aprovisionament de tres dies, amb un volum d'ocupació d'un 80% del volum total.

Donant un volum de tanc de 63,5 m<sup>3</sup>.

Es va calcular el volum del tanc, contant que aquest és un cilindre amb el capçal superior cònic i l'inferior un capçal pla, ja que està recolzat a terra.

Es va fixar la relació alçada/diàmetre de 1,5 m, obtenint les mides que s'adjunten en la taula 11.1.2.

**Taula 11.1.2.** Resultats obtinguts per el tanc de Fosgè.

	<b>Cilindre</b>	<b>Capçal</b>
<b>Diàmetre (m)</b>	4	4
<b>Alçada (m)</b>	5,1	1,5
<b>Volum (m<sup>3</sup>)</b>	64	12,23

#### **11.1.2.2 Càlcul del gruix de les parets del tanc**

Les condicions de disseny utilitzades són:

Pressió de disseny = (P operació + P columna de líquid) · 1,1

P operació = 3atm



P disseny = 3,8 atm.

Temperatura de disseny = temperatura ambient + 20°C, la temperatura ambient en aquest cas s'ha agafat de 20°C, ja que suposarem que arriba a aquesta temperatura. Temperatura de disseny és de 40°C.

Els resultats de l'espessor obtinguts es troben a continuació, a la taula 11.1.3.

**Taula 11.1.3.** Resultats obtinguts pel tanc de fosc.

	<b>Cilindre</b>	<b>Con</b>
<b>t calculat (mm)</b>	16,6	20,01
<b>t escollit (mm)</b>	17	21

L'espessor de paret escollit és 21 mm.

### *11.1.2.3 Càlcul del pes del tanc*

▪ **Càlcul del pes del tanc buit:**

Utilitzant les equacions 11.1.6 corresponents per el càlcul de la part cilíndrica i dels capçals del tanc, densitat H-B2 9220 kg/m<sup>3</sup>. A més, el tanc esta aïllat per no perdre la temperatura a la que ens arriba, l'aïllant és poliuretà i l'espessor d'aquest és de 50 mm. Els resultats obtinguts són els següents:

$$Pes\ cilindre = 11309,27\ kg$$

$$Pes\ con = 3802,53\ kg$$

$$Pes\ fons\ pla = 2171,17\ kg$$

$$Pes\ aïllant = 64,16\ kg$$

El pes total del tanc buit és la suma dels tres pesos anteriors (Equació 11.1.13):

$$Pes = Pes\ cilindre + Pes\ capçals + Pes\ aïllant$$

$$Pes\ tanc\ buit = 19137,3\ kg$$

▪ **Càlcul del pes del tanc amb aigua:**

Per calcular el pes de l'equip amb aigua es calcula el pes de l'aigua en el volum del recipient i el resultat és la suma de pes del tanc buit i el pes de l'aigua, com s'ha introduït també anteriorment.

$$Pes\ de\ l'aigua = 63556,84\ kg$$

$$Pes\ total = Pes\ tanc\ buit + Pes\ de\ l'aigua = 82694,14\ kg$$

**11.1.2.4 Venteig**

Per calcular el cabal de venteig s'utilitza l'equació 11.1.10 introduïda anteriorment. Utilitzant les equacions anteriors, s'obtenen els resultats següents:

$$Q = 4234050,6\ kJ/h$$

$$C_{venteig} = 7618,42\ m^3/h$$

**11.1.2.5 Cubetes de retenció**

Per el tipus de substància i d'emmagatzematge, per normativa les parets de la cubeta estaran a la menor distància possible de les parets del tanc, i tindran el volum suficient per contenir el 20% del volum del tanc.

Resultats:

$$\text{Costats cubeta} = 8 \times 14\ m$$

$$H\ cubeta = 1\ m$$

**11.1.3 Tanc de MMA**

L'MMA és un reactiu que arriba a la planta amb camions cisterna. La seva pressió de vapor és de 290 kPa a 16 °C, per tant és gas a pressió atmosfèrica. S'emmagatzema

liquat i a pressió. Es tracta d'un producte de classe A i subclasse A2; l'emmagatzematge d'aquest estarà regit pel RD 379/2001 del 6 d'abril.

Es tracta d'un producte inflamable, de manera que l'emmagatzematge d'aquest també està regit per la normativa ITC-MIE-APQ1 per productes inflamables i combustibles.

El material escollit pel tanc és Hastelloy-B2, ja que és un producte corrosiu.

Pel disseny del tanc s'ha seguit el mateix procediment que a l'apartat 11.1.1. tanc de Toluè.

### **11.1.3.1 Càlcul del volum del tanc**

El volum del tanc es va calcular de tal manera que es tingues un aprovisionament de set dies, amb un volum d'ocupació d'un 80% del volum total.

Donant un volum de tanc de 35 m<sup>3</sup>.

Es va calcular el volum del tanc, contant que aquest és un cilindre amb el capçal superior cònic i l'inferior un capçal pla, ja que està recolzat a terra.

Es va fixar la relació alçada/diàmetre de 1,5 m, obtenint les mides que s'adjunten en la taula 11.1.4.

**Taula 111.1.** Resultats obtinguts per el tanc de MMA.

	<b>Cilindre</b>	<b>Capçal</b>
<b>Diàmetre (m)</b>	3	3
<b>Alçada (m)</b>	5	1
<b>Volum (m<sup>3</sup>)</b>	77,9	90,5

### **11.1.3.2 Càlcul del gruix de les parets del tanc**

Les condicions de disseny utilitzades són:

Pressió de disseny = (P operació + P columna de líquid) · 1,1

P operació = 5

P disseny = 5,7 atm.

Temperatura de disseny = temperatura ambient + 20°C, la temperatura ambient en aquest cas s'ha agafat de 20°C, ja que suposarem que arriba a aquesta temperatura.

Temperatura de disseny és de 40°C.

Els resultats de l'espessor obtinguts es troben a continuació, a la taula 11.1.5.

**Taula 11.1.5.** Resultats obtinguts per el tanc de MMA.

	<b>Cilindre</b>	<b>Con</b>
<b>t calculat (mm)</b>	15,8	18,01
<b>t escollit (mm)</b>	16	19

L'espessor de paret escollit és 19 mm.

### *11.1.3.3 Càlcul del pes del tanc*

#### ▪ **Càlcul del pes del tanc buit:**

Utilitzant les equacions 11.1.6 corresponents per el càlcul de la part cilíndrica i dels capçals del tanc. A més, el tanc esta aïllat per no perdre la temperatura a la que ens arriba, l'aïllant és poliuretà i l'espessor d'aquest és de 50 mm. Els resultats obtinguts són els següents:

$$Pes\ cilindre = 9694,72\ kg$$

$$Pes\ con = 3282,88\ kg$$

$$Pes\ fons\ pla = 1609,37\ kg$$

$$Pes\ aïllant = 57,06\ kg$$

El pes total del tanc buit és la suma dels tres pesos anteriors:

$$Pes = Pes\ cilindre + Pes\ capçals + Pes\ aïllant$$

$$Pes\ tanc\ buit = 14644,03\ kg$$

#### ▪ **Càlcul del pes del tanc amb aigua:**

Per calcular el pes de l'equip amb aigua es calcula el pes de l'aigua en el volum del recipient i el resultat és la suma de pes del tanc buit i el pes de l'aigua.

$$Pes\ de\ l'aigua = 76029\ kg$$

$$Pes\ total = Pes\ tanc\ buit + Pes\ de\ l'aigua = 90673,03\ kg$$

#### **11.1.3.4 Venteig**

Per calcular el cabal de venteig s'utilitza l'equació 11.1.10 introduïda anteriorment.

Utilitzant les equacions anteriors, s'obtenen els resultats següents:

$$Q = 4969465,5\ kJ/h$$

$$C_{venteig} = 4741,16\ m^3/h$$

#### **11.1.3.5 Cubetes de retenció**

Es tracte d'un emmagatzematge igual que el de fosc; per el tipus de substància i d'emmagatzematge, per normativa les parets de la cubeta estaran a la menor distància possible de les parets del tanc, ja que aquest és un gas líquat a pressió.

Resultats:

$$Costats\ cubeta = 8\ x\ 14\ m$$

$$H\ cubeta = 1\ m$$

### **11.1.4 Emmagatzematge de Carbaril**

El carbaril és el producte d'interès econòmic. Es comercialitzarà sòlid amb big bags. Es va decidir emmagatzemar-lo en sitges a temperatura i pressió atmosfèriques.

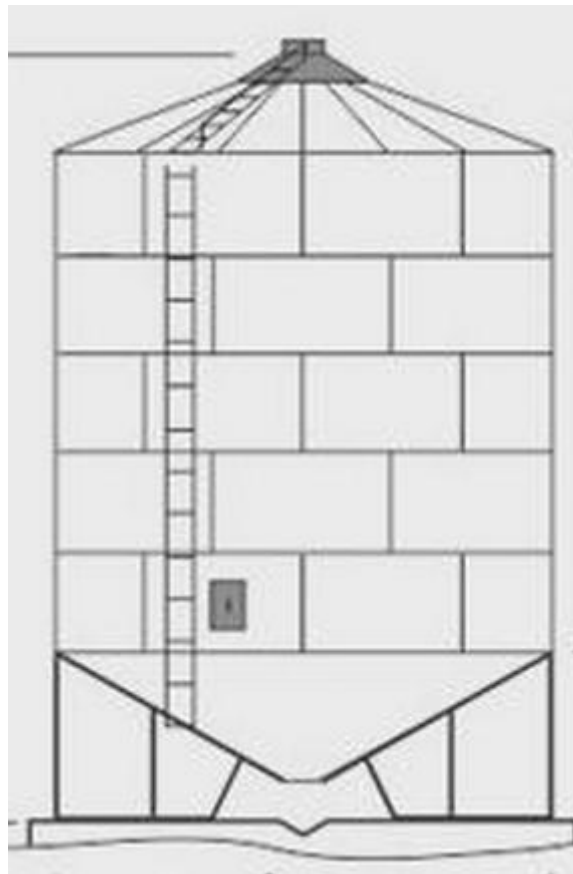
El material escollit per la sitja és l'AISI 316L.

#### **11.1.4.1 Càlcul del volum de la sitja**

S'ha seguit el mateix procediment que en els tancs d'emmagatzematge de fluids; el volum del tanc es va calcular de tal manera que es tingues un aprovisionament de tres dies, amb un volum d'ocupació d'un 80% del volum total.

$$V = Q \cdot \text{temps} \cdot 1,2 \quad \text{Equació 11.1.11.}$$

En set dies es té una producció de 276,6 tones de carbaril sobredimensionant un 10%. Amb la densitat es pot conèixer quin serà el volum que ocuparà i així dissenyar la sitja. El volum és de 738,4 m<sup>3</sup>. Es va decidir una sitja cilíndrica amb els dos capçals cònics com es representa a la figura 11.1.4.



**Figura 11.1.4.** Esquema sitja dissenyada.

Les mides de la sitja venen fixades pel fabricant. S'han extret d'un catàleg segons el volum i el pes que es vol emmagatzemar.

El catàleg s'ha extret de la pàgina següent:

**Taula 111.1.6** Resultats obtinguts per la sitja de carbaril.

	<b>Cilindre</b>	<b>Capçal superior</b>	<b>Capçal inferior</b>
<b>Diàmetre (m)</b>	4	4	4
<b>Alçada (m)</b>	5,5	2	2

#### *11.1.4.2 Càlcul del gruix de les parets del tanc*

Les condicions de disseny que s'han utilitzat són:

Pressió de disseny = (P operació + P columna de sòlid) · 1,1

P operació = 1 atm

disseny = 20,68 atm.

Temperatura de disseny = temperatura ambient + 20°C; s'ha agafat una temperatura ambient de 27 °C. Per tant la temperatura de disseny és de 47°C.

Els resultats de l'espessor obtinguts es troben a continuació, a la taula 11.1.7

**Taula 111.1.7.** Resultats obtinguts per la sitja de carbaril.

	<b>Cilindre</b>	<b>Con inferior</b>
<b>t calculat (mm)</b>	5,64	5,61
<b>t escollit (mm)</b>	6	6

L'espessor de paret escollit és 6 mm.

#### *11.1.4.3 Càlcul del pes de la sitja*

▪ **Càlcul del pes de la sitja buida:**

Utilitzant les equacions 11.2.6 corresponents per el càlcul de la part cilíndrica i dels capçals de la sitja. Els resultats obtinguts són els següents:

$$Pes\ cilindre = 4466,44\ kg$$

$$Pes\ con = 2012,32\ kg$$

El pes total de la sitja buida és la suma dels tres pesos anteriors:

$$Pes = Pes\ cilindre + Pes\ capçals$$

$$Pes\ tanc\ buit = 8491,09\ kg$$

▪ **Càlcul del pes de la sitja amb el carbaril:**

S'ha utilitzat la densitat del carbaril ja que és un sòlid més dens que l'aigua. Per calcular el pes de l'equip amb el producte es realitza amb l'equació introduïda anteriorment; el volum del recipient per la densitat i el resultat del pes total és la suma de pes de la sitja buida i el pes de la sitja amb el producte.

$$Pes\ amb\ el\ sòlid = 1141035\ kg$$

$$Pes\ total = Pes\ tanc\ buit + Pes\ amb\ el\ carbaril = 81149526,1\ kg$$

### **11.1.5 Emmagatzematge de $\alpha$ -naftol**

Aquest reactiu arriba a la planta en estat sòlid, en big bags provinents de la planta del costat.

El disseny esta fet seguint els passos del punt 1.5 emmagatzematge de carbaril, a les mateixes condicions.

#### **11.1.5.1 Càlcul del volum de la sitja**

Per un estoc de tres dies en necessita una quantitat de 94062 kg de  $\alpha$ -naftol, que equival a un volum de 91,8 m<sup>3</sup>.

Com en el cas anterior, les mides de la sitja venen fixades pel fabricant. S'han extret d'un catàleg segons el volum i el pes que es vol emmagatzemar, obtenint les mides que s'adjunten en la taula 11.1.8.



**Taula 111.1.8.** Resultats obtinguts per la sitja de alfa-naftol.

	<b>Cilindre</b>	<b>Capçal superior</b>	<b>Capçal inferior</b>
<b>Diàmetre (m)</b>	5,6	5,6	5,6
<b>Alçada (m)</b>	9,05	1,87	1,87

### **11.1.5.2 Càlcul del gruix de les parets de la sitja**

Les condicions de disseny utilitzades són:

Pressió de disseny = (P operació + P columna de sòlid)·1,1

P operació = 1 atm

P disseny = 21 atm.

Temperatura de disseny = temperatura ambient + 20°C; s'ha agafat una temperatura ambient de 27 °C. Per tant la temperatura de disseny és de 47°C.

Els resultats de l'espessor obtinguts es troben a continuació, a la taula 11.1.9.

**Taula 111.1.9.** Resultats obtinguts per la sitja de alfa-naftol.

	<b>Cilindre</b>	<b>Con</b>
<b>t calculat (mm)</b>	6,18	6,2
<b>t escollit (mm)</b>	7	7

L'espessor de paret escollit és 7 mm.

### **11.1.5.3 Càlcul del pes de la sitja**

#### ▪ **Càlcul del pes de la sitja buida:**

Utilitzant les equacions 11.2.6 corresponents per el càlcul de la part cilíndrica i dels capçals de la sitja. Els resultats obtinguts són els següents:

$$Pes\ cilindre = 5211,78\ kg$$

$$Pes\ con = 1650,31\ kg$$

El pes total de la sitja és la suma dels tres pesos anteriors:

$$Pes = Pes\ cilindre + Pes\ capçals$$

$$Pes\ tanc\ buit = 8512,4\ kg$$

▪ **Càlcul del pes de la sitja amb el naftol:**

S'ha utilitzat la densitat del naftol ja que és un sòlid més dens que l'aigua. Per calcular el pes de l'equip amb el producte es realitza amb l'equació introduïda anteriorment; el volum del recipient per la densitat i el resultat del pes total és la suma de pes de la sitja buida i el pes de la sitja amb el sòlid.

$$Pes\ de\ naftol = 117578,7\ kg$$

$$Pes\ total = Pes\ tanc\ buit + Pes\ de\ naftol = 126091,1kg$$

### **11.1.6 Emmagatzematge de NaOH**

El NaOH s'emmagatzema sòlid. Per rentar la reïna s'utilitza una solució del 4% en pes de NaOH. La quantitat emmagatzemada s'ha calculat per tal de tenir suficient substància per fer dues rentades de reïna.

El disseny esta fet seguint els passos del punt 1.5 emmagatzematge de carbaril, a les mateixes condicions.

#### **11.1.6.1 Càlcul del volum de la sitja**

Per una rentada de reïna es necessiten  $15,65\ m^3$  de NaOH, s'han fet els càlculs per tenir suficient per dues rentades més un 10% extra, els resultats són kg de NaOH a emmagatzemar. Amb la densitat s'ha calculat el volum:  $m^3$ .

Com en el cas anterior es va fixar la relació alçada/diàmetre de 1,5 m, el con superior forma un angle de  $90^\circ$  amb la vertical i l'inferior de  $45^\circ$ ; obtenint les mides que s'adjunten en la taula 11.1.10.

**Taula 111.1.20.** Resultats obtinguts per la sitja de NaOH.

	<b>Cilindre</b>	<b>Capçal superior</b>	<b>Capçal inferior</b>
<b>Diàmetre (m)</b>	3	3	3
<b>Alçada (m)</b>	4,5	0,75	1

### **11.1.6.2 Càlcul del gruix de les parets de la sitja**

Les condicions de disseny utilitzades són:

Pressió de disseny = (P operació + P columna de sòlid) · 1,1

P operació = 1 atm

P disseny = 23 atm.

Temperatura de disseny = temperatura ambient + 20°C; s'ha agafat una temperatura ambient de 27 °C. Per tant la temperatura de disseny és de 47°C.

Els resultats de l'espessor obtinguts es troben a continuació, a la taula 11.1.11.

**Taula 111.1.11.** Resultats obtinguts per la sitja de NaOH.

	<b>Cilindre</b>	<b>Con</b>
<b>t calculat (mm)</b>	5,04	4,9
<b>t escollit (mm)</b>	6	5

L'espessor de paret escollit és 6 mm.

### **11.1.6.3 Càlcul del pes de la sitja**

#### ▪ **Càlcul del pes de la sitja buida:**

Utilitzant les equacions 11.2.6 corresponents per el càlcul de la part cilíndrica i dels capçals de la sitja. Els resultats obtinguts són els següents:

$$Pes\ cilindre = 2029,62\ kg$$

$$Pes\ con = 405,74\ kg$$

El pes total de la sitja buida és la suma dels tres pesos anteriors:

$$\begin{aligned} Pes &= Pes \text{ cilindre} + Pes \text{ capçals} \\ Pes \text{ tanc buit} &= 2841,1 \text{ kg} \end{aligned}$$

▪ **Càlcul del pes de la sitja amb NaOH:**

Per calcular el pes de l'equip amb aigua es calcula el pes de NaOH en el volum del recipient i el resultat és la suma de pes de la sitja buida i el pes del sòlid.

$$\begin{aligned} Pes \text{ del NaOH} &= 67752,37 \text{ kg} \\ Pes \text{ total} &= Pes \text{ tanc buit} + Pes \text{ del NaOH} = 70593,48 \text{ kg} \end{aligned}$$

### 11.1.7 Emmagatzematge de la reïna Amberlyst

El catalitzador utilitzat en el tercer reactor és la reïna Amberlyst. S'ha decidit emmagatzemar la quantitat necessària per omplir els dos reactors R-601 i R-602 en cas que s'hagi de canviar aquesta.

#### 11.1.7.1 Càlcul del volum de la sitja

Es necessiten 511 kg de reïna en cada reactor; si es vol tenir quantitat suficient per abastir els dos reactors s'emmagatzemen 1022 kg de la reïna Amberlyst. Amb la densitat s'ha calculat el volum: 2,5 m<sup>3</sup>.

Com en el cas anterior es va fixar la relació alçada/diàmetre de 1,5 m, el con superior forma un angle de 90° amb la vertical i l'inferior de 45°; obtenint les mides que s'adjunten en la taula 11.1.12.

**Taula 11.1.32.** Resultats obtinguts per la sitja de NaOH.

	<b>Cilindre</b>	<b>Capçal superior</b>	<b>Capçal inferior</b>
<b>Diàmetre (m)</b>	1,2	1,2	1,2
<b>Alçada (m)</b>	2	0,3	0,5

### 11.1.7.2 Càlcul del gruix de les parets de la sitja

Les condicions de disseny utilitzades són:

Pressió de disseny = (P operació + P columna de sòlid)·1,1

P operació = 1 atm

P disseny = 10 atm.

Temperatura de disseny = temperatura ambient + 20°C; s'ha agafat una temperatura ambient de 27 °C. Per tant la temperatura de disseny és de 47°C.

Els resultats de l'espessor obtinguts es troben a continuació, a la taula 11.1.13.

**Taula 11.1.13.** Resultats obtinguts per la sitja de NaOH.

	<b>Cilindre</b>	<b>Con</b>
<b>t calculat (mm)</b>	2,7	2,5
<b>t escollit (mm)</b>	5	5

L'espessor de paret escollit és 5 mm.

### 11.1.7.3 Càlcul del pes de la sitja

#### ▪ Càlcul del pes de la sitja buida:

Utilitzant les equacions 11.1.6 corresponents per el càlcul de la part cilíndrica i dels capçals de la sitja. Els resultats obtinguts són els següents:

$$Pes\ cilindre = 301,34\ kg$$

$$Pes\ con = 338,12\ kg$$

El pes total de la sitja buida és la suma dels tres pesos anteriors:

$$Pes = Pes\ cilindre + Pes\ capçals$$

$$Pes\ tanc\ buit = 977,57\ kg$$

#### ▪ Càlcul del pes de la sitja amb la reïna:

Per calcular el pes de l'equip amb aigua es calcula el pes de la reina en el volum del recipient i el resultat és la suma de pes de la sitja buida i el pes de l'aigua.

$$Pes\ de\ la\ resina = 1320\ kg$$

$$Pes\ total = Pes\ tanc\ buit + Pes\ de\ la\ resina = 2297,57\ kg$$

## **11.2 Tancs Pulmons**

### **11.2.1 Tanc pulmó de MIC**

Es va decidir no emmagatzemar MIC, ja que és una substància química molt perillosa i requereix un sistema de control excel·lent. Per aquest motiu es va decidir dissenyar un tanc pulmó com si es tractés d'un tanc d'emmagatzematge però que no entres en funcionament durant el procés; de manera que tot el que s'obté en el reactor R-401 i posterior purificació es consumeix en el tercer reactor per la formació de carbaril.

S'han dissenyat dos tancs amb el doble de la capacitat necessària d'emmagatzematge per un dia, cadascun amb els controls pertinents que es requereixen.

Els tancs de MIC s'han de mantenir refrigerats a una temperatura de 0°C i és important que en cap cas el MIC superi una temperatura de 15°C. També treballen a pressió; s'han dissenyat per tal que treballin a 3,5 atm (pressió d'operació) i per mesures de seguretat, degut al tipus de substància que es tracte, es manté inertitzat amb nitrogen.

El disseny s'ha pensat com dos tancs horitzontals amb els dos capçals toriesfèrics els quals es troben mig soterrats i coberts de formigó, amb un metre i mig de separació entre ells i amb un sistema de refrigeració exterior.

El material escollit pel tanc és l'AISI 316L i el fluid refrigerant utilitzat és l'oli tèrmic Dowtherm Q.

#### **11.2.1.1 Càlcul del volum del tanc**

El disseny s'ha fet seguint els mateixos passos que en els tancs anteriors, amb la particularitat que no es d'emmagatzematge, sinó que és tanc pulmó.

El volum de MIC format es de m<sup>3</sup>, per tant cada tanc tindrà un volum de m<sup>3</sup> (50% més que el volum format).

Pel disseny mecànic del tanc de MIC es va tenir en compte les propietats de la substància química segons la corresponent fitxa de seguretat adjuntada a l'apartat 5 de seguretat i higiene. Com ja s'ha comentat, s'ha decidit emmagatzemar a temperatura de 0°C i a 3,5 atm de pressió.

Es va calcular el volum del tanc, contant que aquest és un cilindre amb els capçals toriesfèrics, com es pot observar en la figura 11.2.1.



**Figura 11.2.1.** Esquema del disseny del tanc de MIC

$$V_{\text{cos cilíndric}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \cdot h \quad \text{Equació 11.2.1}$$

$$V_{\text{capçal toriesfèric}} = 0,08089 \cdot D^3 \quad \text{Equació 11.2.2}$$

Es va fixar la relació alçada/diàmetre de 1,5 m, obtenint les mides que s'adjunten en la taula 11.2.1.

**Taula 11.2.1.** Resultats obtinguts per el disseny del tanc de MIC.

	<b>Cilindre</b>	<b>Capçal toriesfèric</b>
<b>Diàmetre (m)</b>	2,5	2,5
<b>Longitud (m)</b>	5	0,87
<b>Volum (m<sup>3</sup>)</b>	24,5	1,6

### 11.2.1.2 Càlcul del gruix de les parets del tanc

Les condicions de disseny utilitzades són:

Pressió de disseny = (P operació + P columna de líquid) · 1,1

P operació = 3,5

P disseny = 4,5 atm.

Temperatura de disseny = temperatura recipient + 20°C; la temperatura del recipient en cap cas ha de ser superior a 15°C. El recipient es trobarà a 0°C. La temperatura de disseny és de 20°C.

▪ **Càlcul de l'espessor de paret del cilindre:**

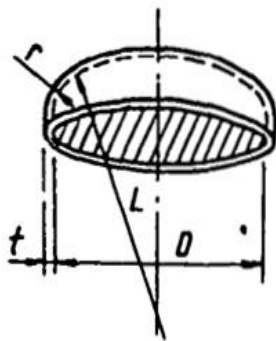
S'han utilitzat les equacions del codi ASME introduïdes anteriorment pel càlcul de l'espessor del cilindre: equació 11.1.4.

*t calculat* = 8,4 mm

*t escollit* = 9 mm

▪ **Càlcul de l'espessor de paret del toriesfèric:**

Per al càlcul d'aquest apartat, farem servir les formules donades al codi ASME per a capsals toriesfèrics.



$$t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2SE - 0,2Pi}$$

Equació 11.2.3

**Figura 11.2.2.** Capsal toriesfèric del tanc.

on: *t* és espessor mínim de paret en polzades.

*P* és la pressió interna de disseny en psi

*S* és la tensió màxima admissible



E és el factor de soldadura

L és el radi intern de plat en polzades

M és un factor que depèn de L/r, es troba mitjançant la taula de valors del factor "M". La relació L/r es fixa de manera que  $r=10\%L$ . Per aquest valor, segons la taula del codi ASME correspon una  $M=1,54$ .

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	6.00	6.50	
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	1.39
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 $\frac{2}{3}$	*
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	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : L = D + 2t (see note 2 on facing page)																	

Figura 11.2.3. Valors de M en funció de L/r

$$t \text{ calculat} = 9,2 \text{ mm}$$

$$t \text{ escollit} = 10 \text{ mm}$$

S'escollirà el valor d'espessor més gran; l'espessor del tanc serà de 10 mm.

### 11.2.1.3 Càlcul del pes del tanc

#### ▪ Càlcul del pes del tanc buit:

Per calcular el pes de l'equip buit, s'ha fet servir l'equació 11.1.6. S'ha calculat el pes del cilindre i dels dos capçals.

$$Pes \text{ cilindre} = 2756,57 \text{ kg}$$

$$Pes \text{ toriesfèric} = 569,92 \text{ kg}$$

El pes total del tanc buit és la suma dels tres pesos anteriors:

$$Pes = Pes \text{ cilindre} + Pes \text{ capçals}$$

$$Pes \text{ tanc buit} = 3896,41 \text{ kg}$$

#### ▪ Càlcul del pes del tanc amb aigua:

Per calcular el pes de l'equip amb aigua es calcula el pes de l'aigua en el volum del recipient i el resultat és la suma de pes del tanc buit i el pes de l'aigua.

$$Pes\ de\ l'aigua = 23340\ kg$$

$$Pes\ total = Pes\ tanc\ buit + Pes\ de\ l'aigua = 23340\ kg$$

#### **11.2.1.4 Inertització amb nitrogen**

El tanc de MIC s'inertitza amb nitrogen per tres raons:

- Per evitar que s'acumuli humitat a dins
- Per evitar contacte amb l'oxigen
- Per controlar pressió

La quantitat de nitrogen que es necessita per inertitzar el tanc es calcula a partir de la diferència de volum total del tanc menys el volum ocupat pel MIC.

S'anirà introduint nitrogen al tanc a mesura que es vagi extraient MIC.

#### **11.2.1.5 Control del tanc de MIC**

##### a) Temperatura

Per mantenir la temperatura del tanc a 0°C s'ha decidit fer externament, ja que en seria millor per mesures de seguretat i control. S'ha decidit extreure un 10% del volum de MIC del tanc i ajuntar-lo amb el cabal provinent del corrent 801 de la torre CD-503 i introduir-lo de nou en el tanc.

##### b) Pressió

Hi ha un instal·lat un control de pressió al tanc, de manera que si la pressió disminueix es fa entrar més cabal de nitrogen i si la pressió augmenta hi ha una vàlvula que permetria alliberar el nitrogen del tanc.

#### **11.2.1.6 Venteig**

En el cas d'emmagatzematge a pressió atmosfèrica i a baixa pressió la capacitat total del venteig es calcula amb l'equació 11.9.2:

$$C_{\text{venteig}} = \frac{4,414 \cdot Q}{L \cdot \sqrt{M}} \quad \text{Equació 11.2.4}$$

On:

Cventeig és la capacitat de venteig en m<sup>3</sup>/h

M és el pes molecular

Q és el calor rebut en kJ/h. Aquest es determina amb l'equació 11.2.5:

$$Q = 139,7 \cdot F \cdot A^{0,82} \cdot 10^3 \quad \text{Equació 11.2.5}$$

On

F és el factor de reducció de reducció de dimensions, s'ha agafat F=1

A és la superfície humida en m<sup>2</sup> (àrea del cilindre)

Utilitzant les equacions anteriors, s'obtenen els resultats següents:

$$Q = 2833514,98 \text{ kJ/h}$$

$$C_{\text{venteig}} = 3710 \text{ m}^3/\text{h}$$

### 11.2.2 Tanc pulmó TP-401

Tal i com ja s'ha comentat al llarg de la memòria la presència de dipòsits pulmó entre alguns equips, i més en aquells en els que actua alguna recirculació, és imprescindible per poder mantindre de manera constant un cabal d'entrada, un bon control i una eficient posta en marxa.

A continuació es detalla el disseny pel tanc pulmó localitzat anterior a l'entrada del reactor de piròlisi. Aquest a diferència dels altres serà dissenyat amb una capacitat de 2 hores d'autonomia (per si fos necessària la seva actuació en cas de parada d'emergència) i per poder suportar a més a més, la càrrega equivalent a la variació d'un metre l'alçada del líquid en el reactor, tenint així un control de nivell. Els altres dipòsits pulmons seran dissenyats simplement per aguantar 4 hores d'autonomia.

L'equació 11.2.6 ha estat l'emprada pel càlcul del volum requerit per 2 hores de procés, seguint amb el balanç volumètric mostrat a continuació, taula 11.2.2.

**Taula 11.2.2.** Balanç volumètric del dipòsit pulmó.

Compost	Corrent Volumètric (m <sup>3</sup> /h)
MCC	0,85

Toluè	4,72
Suma	5,57

$$V = \tau \cdot Q_L \quad \text{Equació 11.2.6}$$

On:

- $\tau = 2$  hores
- $Q_L = 5,57 \text{ m}^3/\text{h}$

Fent un total de  $11,13 \text{ m}^3$  d'emmagatzematge per 2 hores de procés.

Coneixent les dimensions del reactor de piròlisi, s'ha calculat el volum equivalent a un metre de variació del nivell amb l'equació 11.2.7

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D_R}{2}\right)^2 \cdot h \quad \text{Equació 11.2.7}$$

On:

- $D_R =$  Diàmetre del reactor de piròlisi, 5,57 metres
- $h =$  Alçada a controlar, 1 metre

El volum obtingut ha estat de  $24,3 \text{ m}^3$  i per tant, la capacitat total del dipòsit és de  $35,5 \text{ m}^3$ . Aquest però es sobredimensiona un 15% degut a que per qüestions de seguretat no s'omplirà fins a la part superior, deixant sempre un marge de 0,5 metres d'alçada buits. S'obté finalment un dipòsit de  $40,8 \text{ m}^3$  de capacitat.

Fixant una relació Alçada/Diàmetre de 1,5, es pot calcular el diàmetre de l'equip com:

$$D_P = \left(\frac{V \cdot 4}{\pi \cdot 1,5}\right)^{1/3} \quad 11.2.8$$

On:

- $D_P =$  Diàmetre del dipòsit pulmó
- $V =$  Volum del dipòsit,  $40,8 \text{ m}^3$

Es determina d'aquesta manera un dipòsit de 3,26 metres de diàmetre, i per tant 4,89 metres d'alçada. Mantenint l'espai de seguretat en tot moment, el dipòsit amb aquestes dimensions tindrà una capacitat de 36,6 m<sup>3</sup>, complint amb marge les necessitats establertes inicialment.

### **11.2.2.1 Dimensionament mecànic**

#### **11.2.2.2 Espessor de parets**

Pel dimensionament mecànic de l'equip s'empren les equacions ja especificades en l'apartat 11.1.1.2 així doncs seguint la mateixa metodologia de càlcul s'obtenen els resultats mostrats en la taula 11.2.3. Degut al risc de corrosió del MCC o del HCl s'empra com a material de disseny el Hastelloy B-2.

**Taula 11.2.3.** Espessors en mil·límetres de les diferents peses de l'equip.

Peça	Espessors (mm)
Cilindre	3
Capçals	5

#### **11.2.2.3 Dimensionament de l'aïllament**

Per tal de realitzar un aïllament adequat per aquest equip s'empra el programa Insulan proporcionat per l'empresa CALORCOL S.A.

Les característiques introduïdes al programa per tal de treballar amb llana mineral de roca com a manta aïllant de 80Kg/m<sup>3</sup>, han estat:

- Temperatura Interior = 110 °C
- Temperatura Superficial del Aïllant = 35°C
- Temperatura Ambient = 16,9 °C (és la mitjana del territori)
- Velocitat de l'aire = 2,7 m/s (velocitat mitjana en direcció nord- oest)
- Superfície exterior de l'aïllament = Acer inoxidable brut (Emissivitat de 0,3)
- Superfície sense aïllant = Acer Inoxidable (Emissivitat de 0,3)

El resultat obtingut és d'un aïllament de 3,1 cm amb una eficiència del 92,27%.

#### ***11.2.2.4 Pes de l'equip***

El procediment adaptat pel pes de l'equip és també l'explicat en un apartat anterior, exactament en el 11.1.1.3, així doncs, seguint aquesta metodologia s'obté un pes buit de 2615,85 Kg, un pes de líquid de 42150,85 Kg, i un pes total de 44766,70 Kg.

#### ***11.2.2.5 Resultats Finals***

Finalment es mostra la taula resum, 11.2.4, en la qual s'especifica de manera resumida els resultats obtinguts en el disseny del tanc pulmó TP-401:

<b>Nom de l'equip</b>	<b>TP-401</b>
Temperatura d'operació (°C)	110
Pressió d'operació (atm)	1,2
Volum del dipòsit (m <sup>3</sup> )	40,8
Diàmetre (m)	3,26
Alçada cilindre (m)	4,89
Alçada toriesfèric (m)	0,624
Gruix cilindre (mm)	3,0
Gruix Capçals (mm)	5,0
Pes de l'equip buit (Kg)	2615,85
Pes de l'equip ple d'aigua (Kg)	45233,10
Eficiència de l'aïllament (%)	93,27

### 11.2.3 Tanc pulmó TP-301

A continuació es mostra la taula resum, 11.2.4, en la qual s'especifica de manera resumida els resultats obtinguts en el disseny del tanc pulmó TP-301. La metodologia de disseny ha estat idèntica que en el cas anterior, però tal i com ja s'ha especificat, s'ha dissenyat aquest amb una autonomia de 4 hores.

**Taula 11.2.4.** Taula resum del disseny del TP-301

<b>Nom de l'equip</b>	<b>TP-301</b>
Temperatura d'operació (°C)	73,19
Pressió d'operació (atm)	0,5
Volum del dipòsit (m <sup>3</sup> )	23,7
Diàmetre (m)	2,72
Alçada cilindre (m)	4,08
Alçada toriesfèric (m)	0,52
Gruix cilindre (mm)	3,0
Gruix Capçals (mm)	5,0
Pes de l'equip buit (Kg)	1761,52
Pes de l'equip ple d'aigua (Kg)	26069,87
Eficiència de l'aïllament (%)	87,3

### 11.2.4 Tanc pulmó TP-303

A continuació es mostra la taula resum, 11.2.5, en la qual s'especifica de manera resumida els resultats obtinguts en el disseny del tanc pulmó TP-303.

**Taula 11.2.5.** Taula resum del disseny del TP-303

<b>Nom de l'equip</b>	<b>TP-303</b>
Temperatura d'operació (°C)	5,0
Pressió d'operació (atm)	20
Volum del dipòsit (m <sup>3</sup> )	2,7

Diàmetre (m)	1,33
Alçada cilindre (m)	2,0
Alçada toriesfèric (m)	0,28
Gruix cilindre (mm)	5,0
Gruix Capçals (mm)	8,0
Pes de l'equip buit (Kg)	676,85
Pes de l'equip ple d'aigua (Kg)	3133,10
Eficiència de l'aïllament (%)	--

### 11.2.5 Tanc pulmó TP-501

A continuació es mostra la taula resum, 11.2.6, en la qual s'especifica de manera resumida els resultats obtinguts en el disseny del tanc pulmó TP-501.

**Taula 11.2.6.** Taula resum del disseny del TP-501

<b>Nom de l'equip</b>	<b>TP-501</b>
Temperatura d'operació (°C)	55
Pressió d'operació (atm)	28
Volum del dipòsit (m <sup>3</sup> )	5,2
Diàmetre (m)	1,64
Alçada cilindre (m)	2,45
Alçada toriesfèric (m)	0,344
Gruix cilindre (mm)	6,0
Gruix Capçals (mm)	10,0
Pes de l'equip buit (Kg)	1242,66
Pes de l'equip ple d'aigua (Kg)	6090,25
Eficiència de l'aïllament (%)	84,68



### 11.2.6 Tanc pulmó TP-503

A continuació es mostra la taula resum, 11.2.8, en la qual s'especifica de manera resumida els resultats obtinguts en el disseny del tanc pulmó TP-503.

**Taula 11.2.8.** Taula resum del disseny del TP-503

<b>Nom de l'equip</b>	<b>TP-503</b>
Temperatura d'operació (°C)	108,1
Pressió d'operació (atm)	0,5
Volum del dipòsit (m3)	3,8
Diàmetre (m)	1,48
Alçada cilindre (m)	2,22
Alçada toriesfèric (m)	0,30
Gruix cilindre (mm)	3,0
Gruix Capçals (mm)	5,0
Pes de l'equip buit (Kg)	470,86
Pes de l'equip ple d'aigua (Kg)	3973,0
Eficiència de l'aïllament (%)	93,09

### 11.2.7 Tanc pulmó TP-505

A continuació es mostra la taula resum, 11.2.7, en la qual s'especifica de manera resumida els resultats obtinguts en el disseny del tanc pulmó TP-505.

**Taula 11.2.7.** Taula resum del disseny del TP-505

<b>Nom de l'equip</b>	<b>TP-505</b>
Temperatura d'operació (°C)	77,43
Pressió d'operació (atm)	0,5
Volum del dipòsit (m3)	25,2
Diàmetre (m)	2,65
Alçada cilindre (m)	4,0
Alçada toriesfèric (m)	0,54
Gruix cilindre (mm)	3,0
Gruix Capçals (mm)	5,0
Pes de l'equip buit (Kg)	1465,36
Pes de l'equip ple d'aigua (Kg)	24358,92
Eficiència de l'aïllament (%)	88,41

### 11.2.8 Tanc pulmó TP-701

A continuació es mostra la taula resum, 11.2.9, en la qual s'especifica de manera resumida els resultats obtinguts en el disseny del tanc pulmó TP-701.

**Taula 11.2.9.** Taula resum del disseny del TP-701

<b>Nom de l'equip</b>	<b>TP-701</b>
Temperatura d'operació (°C)	55
Pressió d'operació (atm)	0,5
Volum del dipòsit (m3)	36,1
Diàmetre (m)	3,13
Alçada cilindre (m)	4,69
Alçada toriesfèric (m)	0,6
Gruix cilindre (mm)	3,0
Gruix Capçals (mm)	5,0

Pes de l'equip buit (Kg)	2012,87
Pes de l'equip ple d'aigua (Kg)	39543,02
Eficiència de l'aïllament (%)	86,89

### 11.3 Tancs de condensats

En quant als dipòsits de condensats de les columnes, el procediment de disseny ha estat el mateix que en els tanc pulmons, amb la única diferència del temps de residència. En aquest cas s'ha definit un temps de residència de 15 minuts ja que segons fonts bibliogràfiques (*Soluciones prácticas para Ingenieros Químicos*, Carl R. Branan), és suficient per realitzar la seva funció.

Els resultats es mostren al llarg dels següents apartats:

#### 11.3.1 Tanc de condensats TP-302

Nom de l'equip	TP-302
Temperatura d'operació (°C)	47,03
Pressió d'operació (atm)	1,0
Diàmetre (m)	0,36
Alçada cilindre (m)	1,09
Volum (m <sup>3</sup> )	0,1
Alçada toriesfèric (m)	0,092
Gruix cilindre (mm)	3,0
Gruix Capçals (mm)	5,0
Pes de l'equip buit (Kg)	50,64
Pes de l'equip ple d'aigua (Kg)	120,72
Eficiència de l'aïllament (%)	87,18

### 11.3.2 Tanc de condensats TP-304

<b>Nom de l'equip</b>	<b>TP-304</b>
Temperatura d'operació (°C)	1,616
Pressió d'operació (atm)	1,0
Diàmetre (m)	0,38
Alçada cilindre (m)	1,14
Volum (m3)	0,1
Alçada toriesfèric (m)	0,099
Gruix cilindre (mm)	4,0
Gruix Capçals (mm)	6,0
Pes de l'equip buit (Kg)	77,40
Pes de l'equip ple d'aigua (Kg)	161,16
Eficiència de l'aïllament (%)	87,18

### 11.3.3 Tanc de condensats TP-502

<b>Nom de l'equip</b>	<b>TP-502</b>
Temperatura d'operació (°C)	3,977
Pressió d'operació (atm)	1,0
Diàmetre (m)	0,47
Alçada cilindre (m)	1,42
Volum (m3)	0,2
Alçada toriesfèric (m)	0,122
Gruix cilindre (mm)	6,0
Gruix Capçals (mm)	6,0
Pes de l'equip buit (Kg)	161,69
Pes de l'equip ple d'aigua (Kg)	342,51
Eficiència de l'aïllament (%)	87,18

#### 11.3.4 Tanc de condensats TP-504

<b>Nom de l'equip</b>	<b>TP-504</b>
Temperatura d'operació (°C)	95,75
Pressió d'operació (atm)	1,0
Diàmetre (m)	0,73
Alçada cilindre (m)	2,18
Volum (m3)	0,9
Alçada toriesfèric (m)	0,163
Gruix cilindre (mm)	3,0
Gruix Capçals (mm)	5,0
Pes de l'equip buit (Kg)	210,61
Pes de l'equip ple d'aigua (Kg)	987,62
Eficiència de l'aïllament (%)	93,27

#### 11.3.5 Tanc de condensats TP-506

<b>Nom de l'equip</b>	<b>TP-506</b>
Temperatura d'operació (°C)	38,77
Pressió d'operació (atm)	1,0
Diàmetre (m)	0,46
Alçada cilindre (m)	1,39
Volum (m3)	0,2
Alçada toriesfèric (m)	0,11
Gruix cilindre (mm)	3,0
Gruix Capçals (mm)	5,0
Pes de l'equip buit (Kg)	88,35
Pes de l'equip ple d'aigua (Kg)	257,86
Eficiència de l'aïllament (%)	87,18

### 11.3.6 Tanc de condensats TP-702 A/B

<b>Nom de l'equip</b>	<b>TP-702A/B</b>
Temperatura d'operació (°C)	51,1
Pressió d'operació (atm)	0,394
Diàmetre (m)	1,4
Alçada cilindre (m)	1,7
Volum (m3)	2,62
Alçada toriesfèric (m)	0,269
Gruix cilindre (mm)	8,8
Gruix Capçals (mm)	5,5
Pes de l'equip buit (Kg)	608,12
Pes de l'equip ple d'aigua (Kg)	3447,03
Eficiència de l'aïllament (%)	87,0

### 11.3.7 Tanc de condensats TP-703 A/B

<b>Nom de l'equip</b>	<b>TP-703A/B</b>
Temperatura d'operació (°C)	70
Pressió d'operació (atm)	0,197
Diàmetre (m)	2,3
Alçada cilindre (m)	2,7
Volum (m3)	11,21784197
Alçada toriesfèric (m)	0,443
Gruix cilindre (mm)	8,8
Gruix Capçals (mm)	4,4
Pes de l'equip buit (Kg)	1403,299986
Pes de l'equip ple d'aigua (Kg)	13605,33058
Eficiència de l'aïllament (%)	86,2

## 11.4 Tancs de mescla

Quan una o més substàncies es combinen i no reaccionen químicament s'obté una mescla. En una mescla no hi ha canvis químics, però en algunes de les seves propietats físiques poden diferir en respecte de les de seus components. Les mescles poden ser homogènies o heterogènies.

La mescla homogènia ho és en la mida de les partícules que la formen i te que se tant petit com els dels àtom, molècules o ions, amb diàmetres en àngstroms. Les mescles heterogènies són les que les seves partícules són més grans que les de una solució.

El procés d'agitació es un dels més importants dintre de la indústria química perquè l'èxit de moltes operacions industrials depèn de una agitació i mescla eficaç. Encara que, degut a la complexitat del fenòmens de transport involucrats, es un dels processos més difícils d'analitzar i caracteritzar. Així, fins al moment, no existeixen correlacions generals per configuracions arbitràries d'agitació que descriuïn quantitats útils com la velocitat de mescla o el grau d'homogeneïtat a la qual arriba el sistema. Una altra dificultat a l'hora de caracteritzar la mescla i l'agitació es la gran quantitat de substàncies (líquids i sòlids) que es poden robar en l'indústria química. Per la qual cosa, el disseny i l'optimització d'agitadors estan confinats en gran mesura, a la mesura de l'experimentació.

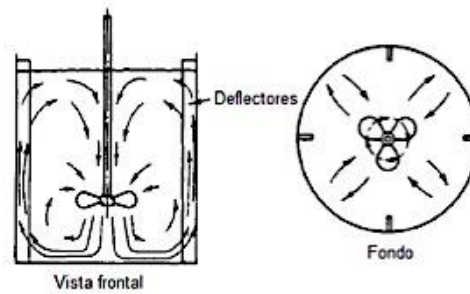
S'ha de fer una distinció entre l'agitació i mescla. L'agitació es pot definir com el moviment circulatori introduït a un fluid dins d'un contenidor, fonamentalment de forma circular i provocant vèrtex. L'objectiu de l'agitació es incrementar la transferència de calor en el fluid o incrementar el transport de matèria, es a dir, mesclar.

En contrast, amb l'agitació, mesclar es obtindrà una distribució homogènia de dues o més fases inicialment separades. Aquí, una de les fases ha de ser un fluid, mentre que l'altra potser una cosa tan variada com un altre fluid, partícules sòlides o bombolles.

El disseny de l'agitació ha d'atendre a dos factors, el grau d'homogeneïtat y el temps de mescla. Donat que el resultat de la mescla mai no es perfecte, el grau d'homogeneïtat es fa dependre de la qualitat desitjada en el producte final. Finalment, la potencia requerida en l'agitació depèn d'aquests dos factors, així com el rendiment.

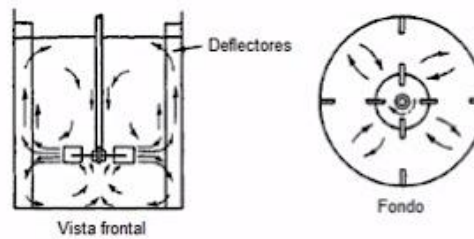
Generalment, el tanc d'agitació es un recipient circular, que pot estar tancat o obert per la seva part superior. Per evitar zones amb baixes velocitats, en els racons s'eliminen utilitzant un fons circular. Per augmentar la eficiència de la mescla, es pot instal·lar uns deflectors en la paret del tanc; així s'evita que el fluid giri com a un sòlid i s'augmenta la turbulència.

Els patrons de flux que hi ha dintre dels mescladors amb deflectors són els següents:



**Figura 11.4.1.** Patró de flux axial en un recipient amb deflectors

PERRY R.; Manual del Ingeniero Químico; Mc Graw Hill; Séptima Edición; España; 2001; p. 18-13

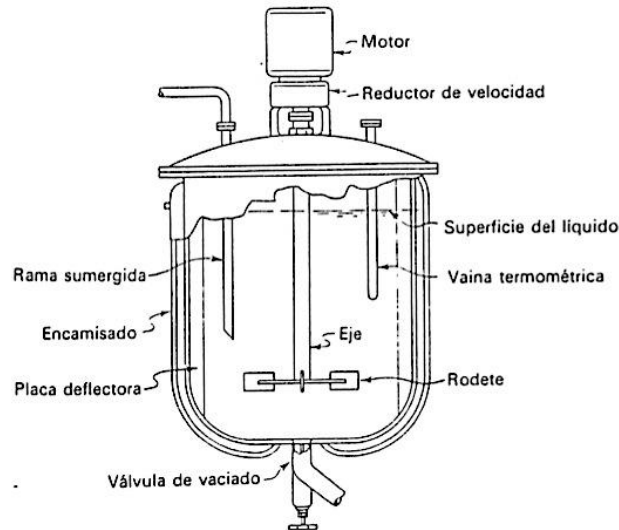


**Figura 11.4.2.** Patró de flux radial en un recipient amb deflectors

PERRY R.; Manual del Ingeniero Químico; Mc Graw Hill; Séptima Edición; España; 2001; p. 18-13

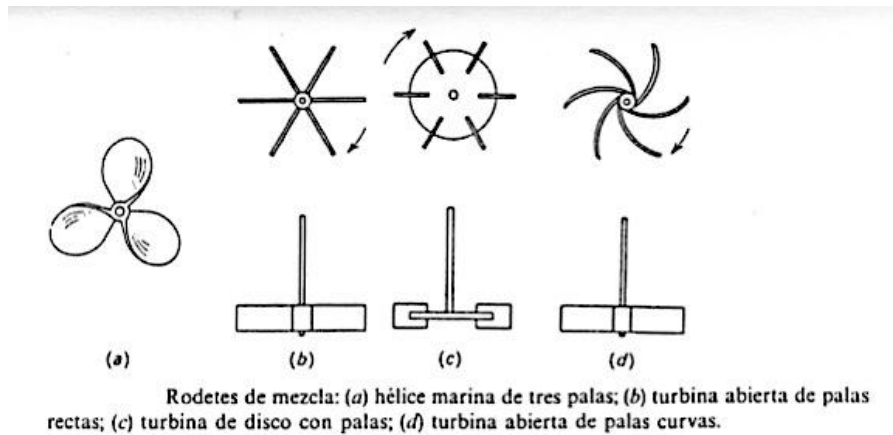
A continuació es mostra un tanc de mescla amb els seus components:





**Figura 11.4.3.** Exemple de tanc de mescla

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



**Figura 11.4.4.** Exemple de diferents rodets i hèlix

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

Aparells utilitzats per la agitació

- 1- Impulsors rotatòries
- 2- Sistemes de circulació per bombeig
- 3- Paletes recíprocs
- 4- Tancs rotatoris
- 5- Agitadors d'aire
- 6- Molí col·loidal

### **Agitadors rotatoris**

Són els aparells més utilitzats, consisteixen generalment, en un òrgan giratori, que s'anomena impulsor, que entra en moviment impulsat per un eix. Els diferents tipus es classifiquen segons l'angle que formen les aspes amb el pla de rotació de l'impulsor.

### **Agitadors de flux axial**

Inclouen tots els agitadors que tenen aspes que formen un angle menor de  $90^\circ$  amb el pla de rotació i produeixen un flux de desplaçament del líquid en el sentit del eix del impulsor.

### **Agitadors de flux radial**

Inclouen a els agitadors les aspes formen un angle de  $90^\circ$  amb el pla de rotació, es a dir, son paral·leles al eix del motor. El flux que produeixen desplacen el líquid perpendicular al eix del rodet.

Per la forma i la velocitat del impulsor, es poden classificar així:

- Molt revolucionats: D'hèlix, de turbina, de con o de disc
- Poc revolucionats: De paletes i de pas tancat.

### **Agitadors d'hèlix**

Són essencialment agitadors d'alta velocitat i de tipus de flux axial. L'impulsor està constituït per una hèlix de dos, tres o fins a quatre aspes. Les hèlix es poden utilitzar en fluids de baixa viscositat quasi sense cap restricció en quan a mida i forma del recipient.

Els agitadors d'hèlix treballen a velocitats entre 300 i 1000 rpm, per lo que creen una gran turbulència en la zona pròxima al rodet.



**Figura 11.4.5.** Impulsor d'hèlix

**Fuente:** <http://www.mikehoodprops.com/images/prop12lg.jpg>

### **Agitadors de turbina**

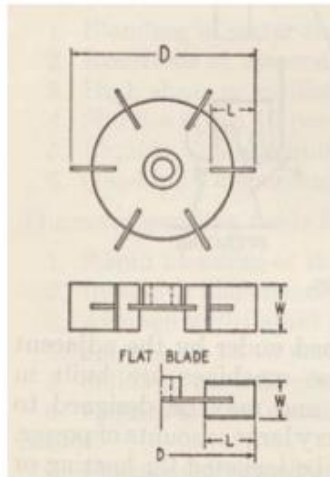
El terme turbina es aplicat a una ampla varietat d'impulsors sense considerar el seu disseny, direcció de descarrega o tipus de flux. La turbina es pot definir com un impulsor amb angle de aspes essencialment constant respecte al pla vertical, sobre tota la seva longitud; les seves aspes poden ser verticals o configurades en un angle menor que 90° amb la vertical.

Existeixen dos formes bàsiques de turbina, la descàrrega radial amb aspes planes i la de aspes inclinades d'empenta axial. Totes les demés son modificacions d'aquestes, i la majoria dels casos, el rendiment es veu afectat mínimament.

Els agitadors de turbina treballen a velocitats elevades o moderades i les aspes poden ser rectes, corbades o angulars.

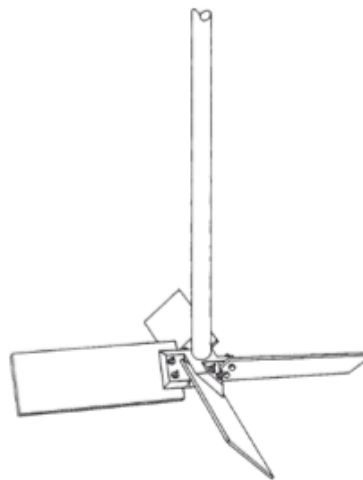
La turbina de disc de 6 aspes planes es potser la més comuna. La construcció referida aquest tipus de turbina es mostra en la Figura 11.4.6.

El patró de flux de la turbina de disc de 6 aspes planes es radial. Una proporció comú per les dimensions d'aquest tipus de turbina és  $D:L:W = 20:5:4$ , tal com es mostra en la Figura 11.4.6.



**Figura 11.4.6.** Dimensions d'una turbina de disc de aspes planes.

Fuente: BADGER W., BANCHERO J.; Introduction to Chemical Engineering; McGraw Hill; Estados Unidos; 1955; p. 607



**Figura 11.4.7.** Agitador de turbina amb aspes inclinades

Fuente: PERRY R.; Manual del Ingeniero Químico; Mc Graw Hill; Séptima Edición; España; 2001; p. 18-8

### **Agitadors de con**

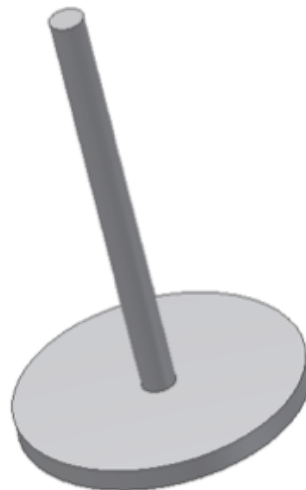
Consisteixen en un impulsor de forma de tronc de con, que gira subjectat al seu eix disposat amb la seva base menor en la part superior. La circulació del líquid es produeix per la diferència de la força centrífuga originàriament entre les dues bases del tronc del con, com a conseqüència de la diferència dels seus diàmetres.



**Figura 11.4.8.** Agitador de con

### **Agitadors de disc**

Consten de un o més disc muntats sobre un mateix arbre que gira a elevada velocitat. Els discos has de ser rugosos o disposar de dents angulars en la seva perifèria.



**Figura 11.4.9.** Agitador de disc

### **Agitadors de paletes**

Consisteixen en una o més series de braços muntats sobre un eix vertical; cada sèrie pot dur dos, tres o més paletes, que ataquen al líquid frontalment. Els agitadors de paletes

produeixen un flux radial, i s'empren molt freqüentment perquè són adaptables a casos molt extrems i per facilitat que tenen per modificar la seva longitud i el número de paletes.



**Figura 11.4.10.** Agitador de paletes

### **Agitadors de pas tancat**

Son agitadors rígids que treballen molt a prop de la paret del recipient i son particularment eficaços per fluids viscosos, en els que es necessari tindre concentrada la capacitat de la mescla a prop de la part del tanc on el flux es més efectiu. Existeixen dos tipus de agitadors de pas tancat: el de tipus àncora i els de tipus helicoïdal.

### **Agitadors de àncora**

Consisteixen en un paleta contornejada de manera que s'adapti perfectament a la forma del recipient, lo qual li dona l'aparença de àncora. La seva característica principal es que treballen a molt poca velocitat quan es requereix un nivell baix de turbulència en un fluid viscos.

El flux es principalment circular o helicoïdal en la direcció de rotació del àncora.



**Figura 11.4.11** Agitador d'ancora

Fuente: PERRY R.; Manual del Ingeniero Químico; Mc Graw Hill; Séptima Edición; España; 2001; p. 18-10

### Agitadors de helicoidal

Consisteixen principalment en una cinta helicoidal que treballa amb un diàmetre quasi igual al diàmetre del recipient. Aquest tipus d'unitat s'utilitza normalment per a mescles sòlid-líquid o per agitar masses, pastes o fangs.



**Figura 11.4.12.** Agitador de helicoidal

Fuente: [http://img.directindustry.es/images\\_di/photo-g/helice-para-agitador-cinta-helicoidal-flujo-axial-453350.jpg](http://img.directindustry.es/images_di/photo-g/helice-para-agitador-cinta-helicoidal-flujo-axial-453350.jpg)

#### **11.4.1 Tanc de mescla TM-601**

En aquest tanc de mescla TM-601 és on realitza una mescla entre els reactius, Naftol i MIC, i el dissolvent, toluè, que és l'aliment que entra directament al reactor de formació del carbaril R-601. Per tant, es necessari que la corrent de sortida d'aquest tanc

sigui homogeni i per tant s'ha d'assegurar que hi hagi una mescla perfecte. Per tal, d'assegurar aquesta mescla perfecte, es posaran deflectors dintre del mesclador per tal d'augmentar la turbulència i millorar la dissolució dels reactius en el dissolvent.

Aquest mesclador treballa a pressió atmosfèrica i a una temperatura de 74 °C. Per dissenyar-lo s'han tingut en compte les recirculació que es fa del toluè provinent del assecador S-701, corrent 32a, la recirculació de MIC i toluè de la CD-701, corrent 31a, l'entrada del MIC provinent de la CD-502, corrent 28, i l'entrada de naftol i toluè que ve del mesclador TM-703/A i TM-703/B, corrent 34.

A continuació es mostren les corrents d'entrada i sortida del tanc amb les seves corresponents propietats, cabals i composicions

**Taula 11.4.1.** Corrents d'entrada i sortida del TM-601

<b>Nom</b>	<b>Corrent 31</b>	<b>Corrent 32</b>	<b>Corrent 28</b>	<b>Corrent 34</b>	<b>Corrent 33</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	51	120	38,7	86,3	74
<b>Pressió (kPa)</b>	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325
<b>Fracció de vapor</b>	0	0	0	0	0
<b>Cabal màssic (Kg/h)</b>	433,57	970,98	466,810	5238,63	7109,915
<b>Cabal Volumètric (m<sup>3</sup>/h)</b>	0,491	1,123	0,610	5,869	8,167
<b>Densitat (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	882,6	864,6	764,585	892,486	870,468
<b>Entalpia (KJ/Kg)</b>	2,743	13,584	-1567,327	-338,153	-346,918
<b>FRACCIÓ MASSICA</b>					
<b>Naftol</b>	0	0	0	0,2493	0,1837
<b>MIC</b>	0,10388	0	1		0,0719
<b>Toluè</b>	0,89611	1	0	0,7506	0,7443
<b>CABAL MASSIC (Kg/h)</b>					
<b>Naftol</b>	0	0	0	1306,43	1306,43
<b>MIC</b>	45,043	0	466,810	0	511,87
<b>Toluè</b>	388,53	970,89	0	3932,21	5291,63



### 11.4.1.1 Dimensionament del tanc de mescla

Per realitzar el dimensionament del tanc es fa fent l'aproximació que les propietats de la mescla que hi ha dintre del mesclador són les condicions de sortida del fluid de mescla per això s'ha de disposar de unes dades prèvies com ara el cabal volumètric de sortida, i característiques pròpies del fluid com ara la seva densitat i viscositat i es suposa un temps de residència del fluid, en aquest cas 1 hora.

Les propietats de la mescla són:

**Taula 11.4.2.** Propietats de la mescla

<b>Densitat (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	870,468
<b>Viscositat (Kg/m s)</b>	0,0003729

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

El càlcul del volum ve determinat per la l'Equació 11.4.1:

$$V = \left( \frac{Q_{sortida}}{\rho} \cdot \tau + 15\%_{buit} \right) \cdot 1,15_{sobredimensionament} = 8,16m^3 \quad \text{Equació 11.4.1}$$

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

$$D = \left( \frac{4 \cdot V}{1,2 \cdot \pi} \right)^{1/3} = 3,820 \text{ m} \quad \text{Equació 11.4.2}$$

$$H = 1,2 \cdot D = 4,584 \text{ m} \quad \text{Equació 11.4.3}$$

### 11.4.1.2 Sistema d'agitació

Per tal de dissenyar el sistema d'agitació es parteix de la premissa que la mescla resultant ha de ser homogènia, es a dir, una mescla perfecte. I com es té un recipient més gran que 4 m<sup>3</sup> es necessari un sistema d'agitació resistent.

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

- Càlcul del diàmetre del agitador (D<sub>a</sub>)

$$D_a = \frac{D}{3} = 1,27 \text{ m} \quad \text{Equació 11.4.4}$$

· Càlcul de la distància del terra (E)

$$E = \frac{D}{3} = 1,27 \text{ m} \quad \text{Equació 11.4.5}$$

· Càlcul de plaques deflectores (J)

$$J = \frac{D}{12} = 0,31 \text{ m} \quad \text{Equació 11.4.6}$$

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

$$W = \frac{D_a}{5} = 0,254 \text{ m} \quad \text{Equació 11.4.7}$$

$$L = \frac{D_a}{4} = 0,318 \text{ m} \quad \text{Equació 11.4.8}$$

Per d'aconseguir una bona homogeneïtat de la mescla s'utilitza una velocitat de gir elevada (n), de 1,67 rps.

Aquesta velocitat de gir té un temps de mescla que ve determinar per l'equació següent:

$$t = 5 \cdot \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H}{4 \cdot 0,92 \cdot n \cdot D_a \cdot D} = 18,43 \text{ min} \quad \text{Equació 11.4.9}$$

Per calcular la potència del agitador cal fer un càlcul previ, s'ha de calcular el Reynolds d'agitació, Re.

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot D_a}{\mu} = 6,31E^6 \quad \text{Equació 11.4.10}$$

A partir d'aquí es troba el valor de  $N_p = 6$ .

$$P = \frac{N_p \cdot D_a^5 \cdot n^3 \cdot \rho}{g \cdot 1000} = 8,26 \text{ Kw} \quad \text{Equació 11.4.11}$$

Per últim es calcula el Power del agitador:

$$\text{Power} = \frac{P}{V_{\text{liquid}}} = \frac{P}{\frac{c_{\text{total}} \cdot \tau}{\rho}} = 1,01 \frac{\text{Kw}}{\text{m}^3} \quad \text{Equació 11.4.12}$$

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

**Figura 11.4.13.** Relació Reynolds-Potència del agitador

Si comparem el valor de Power obtingut amb els de la *Figura 11.4.13*; es comprova que estem dintre del rang de agitació mitja en l'aplicació de la mescla líquid- líquid. Per tant, el disseny del agitador es dona per bo.

### 11.4.1.3 Disseny de la mitja canya

Per aquest mesclador es necessari fer el disseny d'una mitja canya ja que al analitzar les temperatures de les corrents d'entrada al mesclador y com que la corrent de sortida es vol a 74 °C hi ha una diferencia de 6°C, per la qual cosa s'incorpora una camisa de mitja canya que ens permetrà assolir la temperatura de sortida desitjada. El fluid tèrmic que s'utilitza per que ens cedeixi aquest 6°C és el oli tèrmic de DOWTHERM Q.

Per fer al disseny de la mitja canya necessària per a poder duu a terme el bescanvi de calor sol·licitat primer es calcula el calor generat *mitjançant l'Equació 11.4.13*:

$$q = M Cp (T_2 - T_1) \quad \text{Equació 11.4.13}$$

On:

$M_s$  = Cabal màssic de fluid mescla de sortida, Kg/s

$q$  = Flux de calor generat de la mescla, W

$C_p$  = Capacitat calorífica del fluid mescla, (W/s)/(Kg·K)

$\Delta T$  = Variació de temperatura del fluid mescla

**Taula 11.4.3.**Dades i resultats del càlcul de  $q$

<b><math>C_p</math> (KJ/Kg C)</b>	1,598
<b><math>M</math> (Kg/h)</b>	7109,915
<b><math>(T_2-T_1)</math> (°C)</b>	6
<b><math>q</math> (KJ/h)</b>	68151,905

Utilitzant l'Equació 11.4.13 però per la banda del fluid tèrmic amb seves corresponents característiques s'obté el cabal necessari d'oli tèrmic per a poder complir el salt tèrmic requerit al mesclador.

**Taula 11.4.4.**Dades i resultats del càlcul de cabal d'oli tèrmic

<b><math>q</math> (KJ/h)</b>	18931,085
<b><math>C_p</math> (KJ/Kg C)</b>	1935
<b><math>(T_2-T_1)</math> (°C)</b>	6
<b><math>W</math> (kg/s)</b>	1,630
<b>densitat oli (kg/m<sup>3</sup>)</b>	897,35
<b>cabal volumètric (m<sup>3</sup>/h)</b>	6,541

A partir del valor de  $q$  es calcula l'àrea de bescanvi necessària per poder bescanviar la calor necessària per poder pujar la mescla fins a 74°C.

$$A = \frac{U \cdot \Delta T m l}{q} \quad \text{Equació 11.4.14}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2}\right)}$$

Equació 11.4.15

On:

q = Calor de la mescla, (W)

U = Coeficient global de transferència de calor, (W/m<sup>2</sup>·°C)

A = Àrea de bescanvi necessària, (m<sup>2</sup>)

ΔT<sub>ml</sub> = Temperatura mitja logarítmica

T<sub>1</sub> = Temperatura d'entrada al mesclador, (°C)

T<sub>2</sub> = Temperatura de sortida del mesclador, (°C)

t<sub>1</sub> = Temperatura d'entrada de fluid tèrmic, (°C)

t<sub>2</sub> = Temperatura de sortida del fluid tèrmic, (°C)

**Taula 11.4.5.** Resultats i dades del càlcul de A

q(W)	18931,085
Δt <sub>ml</sub> (°C)	25,532
U (W/m <sup>2</sup> ·°C)	50
A (m <sup>2</sup> )	14,829

#### **11.4.1.4 Disseny mecànic del mesclador**

Per al disseny mecànic del mesclador es parteix del volum sobredimensionar calculat anteriorment. Com el mesclador opera a pressió atmosfèrica, per tant, a l'hora de fer el disseny mecànic es dissenya fent ús de la pressió relativa.

### A. Càlcul de l'espessor a la paret del mesclador

Per al càlcul del espessor de la paret del mesclador cal conèixer prèviament les característiques de treball de la columna, la temperatura ( $T_d$ ) i pressió disseny ( $P_d$ ), diàmetre intern ( $D_i$ ), factor de soldadura ( $E$ ) i el factor d'estres del material ( $S$ ).

$$P_d = (P_{op} + \Delta P) \cdot 1,1 \quad \text{Equació 11.4.16}$$

$$\Delta P = (\rho \cdot g \cdot h) \quad \text{Equació 11.4.17}$$

$$T_d = T_{op} + 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Equació 11.4.18}$$

On:

$P_d$  és la pressió de disseny (bar)

$P_{op}$  és la pressió d'operació relativa (bar)

$\Delta P$  és la pressió hidràulica (bar)

$T_d$  és la temperatura de disseny ( $^\circ\text{C}$ )

$T_{op}$  és la pressió d'operació ( $^\circ\text{C}$ )

**Taula 11.4.6.** Temperatura i pressió de disseny

<b>T<sub>disseny</sub> (<math>^\circ\text{C}</math>)</b>	94
<b>P<sub>disseny</sub> (bar)</b>	1,206

La pressió hidràulica que es calcula és la pressió que exerceix el líquid a una alçada. Per considerar la situació més desfavorable, es considera com si tot el mesclador estigues inundada d'aigua.

El material escollit per al disseny per la mesclador és el AISI 316L, ja que té una bona resistència a l'oxidació

El càlcul de l'espessor es realitza a partir de la fórmula del codi ASME:

$$t = \frac{P_d \cdot D_i}{2SE - 1,2 \cdot P_d} \quad \text{Equació 11.4.19}$$

On:

$D_i$  es el diàmetre intern (mm)

Al espessor se li suma un valor de tolerància a la corrosió de (2 mm) i es sobredimensiona un 10% i s'arrodoneix a l'alça.

$$t = 1,1 (t + 2 \text{ mm}) \quad \text{Equació 11.4.20}$$

La màxima pressió que suporta la secció cilíndrica ve determinada per la següent equació:

$$P_{max} = \frac{2SEt}{D_i + 1,2t} \quad \text{Equació 11.4.21}$$

Les dades utilitzades per al càlcul i l'espessor són:

**Taula 11.4.7.** Resultats obtinguts del càlcul espessor a la paret del cilindre

<b>Material</b>	AISI 316L
<b>Factor estrès, S (bar)</b>	1082,475
<b>D int (mm)</b>	3820,453
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	2,509
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	4,960

<b>t (gruix total) (mm)</b>	7
<b>P màxima (bar)</b>	3,364

### **B. Càlcul de l'espessor al capçal**

Per al disseny del capçal del mesclador s'ha escollit el toriesfèric ja que la pressió de treball del absorbidor es baixa.

El material que s'utilitza per aquesta secció del mesclador també es AISI 316L, i es mantenen els valors utilitzats del factor de soldadura i del factor d'estrès.

Per al càlcul del espessor del capçal del toriesfèric es segueix la fórmula del codi ASME.

$$t = \frac{PLM}{2SE - 0,2P} \quad \text{Equació 11.4.22}$$

Aquest espessor se li suma un valor de tolerància a la corrosió de (2 mm) i es sobredimensiona un 10% i s'arrodoneix a l'alça.

La màxima pressió que suporta el capçal ve determinada per la següent equació:

$$P_{max} = \frac{2SEt}{LM + 0,2t} \quad \text{Equació 11.4.23}$$

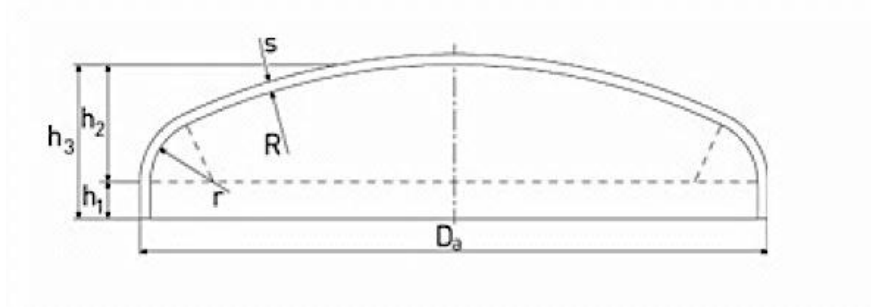
**Taula 11.4.8.** Resultats obtinguts del càlcul del espessor al capçal

<b>Tipus</b>	Toriesfèric
<b>Material</b>	AISI 316L
<b>Factor estrès, S (bar)</b>	1082,474
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>L (mm)</b>	3820,453
<b>r (mm)</b>	382,045
<b>L/r</b>	10
<b>M</b>	1,54
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	3,861
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	6,447



<b>t (gruix total) (mm)</b>	7
<b>P màxima (bar)</b>	2,189

Per al càlcul de l'alçada total del capçal s'utilitza les equacions de l'empresa alemanya (*WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH*)



**Figura 11.4.14.** Capçal toriesfèric de l'empresa *WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH*

A continuació s'explica i es mostren les fórmules per a poder calcular l'alçada del capçal:

$$R = Da$$

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

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

$$h_2 = 0,1935 \cdot Da - 0,455 \cdot t$$

$$h_3 = h_1 + h_2$$

Equació 11.4.24

On

$h_3$  es l'alçada del capçal (mm)

**Taula 11.4.9.** Resultats obtinguts de l'alçada del capçal

<b>R (mm)</b>	3820,453
<b>r (mm)</b>	382,045
<b>h<sub>1</sub> (mm)</b>	24,5
<b>h<sub>2</sub> (mm)</b>	736,073
<b>h<sub>3</sub> (mm)</b>	760,573

Ara es calcula el volum del capçal, per aquest càlcul s'utilitza la fórmula (L. Brownell, E. Young).

$$V_i = 0,084672 \cdot D_i^2$$

$$V_e = 0,08472 \cdot D_e^2$$

$$V_{\text{paret}} = V_e - V_i \quad \text{Equació 11.4.25}$$

**Taula 11.4.10.** Resultats obtinguts del volum al capçal

<b>V<sub>e</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	4,560
<b>V<sub>i</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	4,510
<b>V paret (m<sup>3</sup>)</b>	0,04977

### C. Càlcul de l'espessor al fons del mesclador

Per al disseny del capçal del mesclador s'ha escollit el toriesfèric ja que la pressió de treball del absorbidor es baixa.

El material que s'utilitza per aquesta secció del mesclador també es AISI 316L, i es mantenen els valors utilitzats del factor de soldadura i del factor d'estrès.

Per al càlcul del espessor del fons del toriesfèric es segueix la fórmula del codi ASME.

$$t = \frac{PLM}{2SE-0,2P} \quad \text{Equació 11.4.26}$$

Aquest espessor se li suma un valor de tolerància a la corrosió de (2 mm) i es sobredimensiona un 10% i s'arrodoneix a l'alça.

La màxima pressió que suporta el capçal del fons ve determinada per la següent equació:

$$P_{max} = \frac{2 S E t}{L M + 0,2 t}$$

Equació 11.4.27

**Taula 11.4.11.** Resultats del càlcul del espessor del fons

<b>Tipus</b>	Toriesfèric
<b>Material</b>	AISI 316L
<b>Factor estrès, S (bar)</b>	1082,475
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>L (mm)</b>	3820,453
<b>r (mm)</b>	382,045
<b>L/r</b>	10
<b>M</b>	1,54
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	3,861
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	6,447
<b>t (gruix total) (mm)</b>	7
<b>P màxima (bar)</b>	2,189

Per al càlcul de l'alçada del fons del mesclador es segueix el mateix procediment que en el càlcul de l'alçada del capçal i els resultats obtinguts s'exposen a continuació:

**Taula 11.4.12.** Resultats obtinguts de l'alçada del fons

<b>R (mm)</b>	3820,453
<b>r (mm)</b>	382,045
<b>h<sub>1</sub> (mm)</b>	24,5
<b>h<sub>2</sub> (mm)</b>	736,073
<b>h<sub>3</sub> (mm)</b>	760,573

Ara es calcula el volum del capçal, per aquest càlcul s'utilitza la fórmula (*L. Brownell, E. Young*).

$$V_i = 0,084672 \cdot D_i^2$$

$$V_e = 0,08472 \cdot D_e^2$$

$$V_{\text{paret}} = V_e - V_i$$

Equació 11.4.28

**Taula 11.4.13.** Resultats obtinguts del volum del fons

<b><math>V_e</math> (m<sup>3</sup>)</b>	4,560
<b><math>V_i</math> (m<sup>3</sup>)</b>	4,510
<b><math>V_{\text{paret}}</math> (m<sup>3</sup>)</b>	0,04977

**D. Càlcul de l'alçada total i superfície lateral de la columna**

Per al càlcul de l'alçada total es fa ús de la fórmula següent:

$$Alçada_{\text{total}} = H_{\text{cos cilíndric}} + h_{\text{capçal}} + h_{\text{fons}}$$

Equació 11.4.29

A l'alçada total se li suma aquests quatre metres que representen l'espai que ocupen els equips interns de la columna, com ara, els tubs per on s'introdueixen els fluids i l'espai per poder fer la neteja pertinent del equip.

**Taula 11.4.14.** Alçada total

<b>Alçada total (m)</b>	6,09
-------------------------	------

Per al càlcul de l'àrea lateral d'un cilindre s'utilitza la fórmula:

$$A_{\text{lateral}} = L \cdot \pi \cdot D_e$$

Equació 11.4.30

**Taula 11.4.15.** Dades de la superfície lateral

<b>Àrea lateral total (m<sup>2</sup>)</b>	55,197
---	--------

### E. Càlcul del mesclador

El càlcul del mesclador es fa a partir dels volums calculats, volum de la secció cilíndrica. Aquests al ser una secció cilíndrica es multipliquen per la seva àrea lateral i per l'espessor mentre que per al capçal superior e inferior del mesclador es calcula el volum de la paret i es multiplica per l'espessor. Aquests volums es multipliquen per la densitat del material de qual està fet la columna, en aquest cas, AISI 316L.

$$Pes_{mesclador\ buit} = Pes_{secció\ cilíndrica} + Pes_{fons} + P_{capçal} \quad \text{Equació 11.4.31}$$

Una altra forma d'expressar l'equació anterior es:

$$Pes_{mescl.buit} = \rho_{material}(V_{paret\ capçal} + V_{paret\ fons} + \acute{a}rea_{lateral\ total} \cdot espessor)$$

Equació 11.4.32

Aquest pes del mesclador buit, que dóna com a resultat de l'Equació 11.4.31 és sobredimensiona un 10%, per tenir en compte el pes de tots els elements interns, com el deflector, com els externs, com l'agitador.

**Taula 11.4.16.** Resultats del càlcul del pes del mesclador buit

<b>Àrea lateral total (m<sup>2</sup>)</b>	55,197
<b>Volum capçal paret (m<sup>3</sup>)</b>	0,0497
<b>Volum fons paret (m<sup>3</sup>)</b>	0,0497
<b>Densitat AISI 316L (kg/m<sup>3</sup>)</b>	7960
<b>Pes mesclador buit (Kg)</b>	3428,585
<b>Pes sobredimensionat (Kg)</b>	3771,444

#### **F. Càlcul del mesclador ple**

En aquest punt es fa el càlcul per al mesclador ple d'aigua i ple del fluid mescla, en aquest cas, es pren com a una simplificació que el fluid que hi ha dintre del tanc de mescla és el mateix que el que surt.

$$Pes_{mesclador\ ple} = Pes_{mesclador\ buit} + Pes_{liquid} \quad \text{Equació 11.4.33}$$

**Taula 11.4.17.** Resultats del càlcul del pes del mesclador ple

<b>Pes del mesclador amb aigua (Kg)</b>	14651,255
<b>Pes del mesclador en operació (Kg)</b>	13260,952

#### **11.4.1.5 Càlcul del espessor d'aïllament**

Per tal de realitzar un aïllament adequat per aquest equip s'empra el programa Insulan proporcionat per l'empresa CALORCOL S.A.

Les característiques introduïdes al programa per tal de treballar amb llana mineral de roca com a manta aïllant de 80Kg/m<sup>3</sup>, han estat:

- Temperatura Interior = 74 °C
- Temperatura Superficial del Aïllant = 35°C
- Temperatura Ambient = 16,9 °C (és la mitjana del territori)
- Velocitat de l'aire = 2,7 m/s (velocitat mitjana en direcció nord- oest)
- Superfície exterior de l'aïllament = Acer inoxidable brut (Emissivitat de 0,3)
- Superfície sense aïllant = AISI 316L (Suposant emissivitat de 0,3)

El resultat obtingut és d'un aïllament de 1,65 cm amb una eficiència del 87,53%.

#### 11.4.2 TM- 702/A i TM-702/B

En aquest tanc de mescla TM-702/A i TM-702/B es duu a terme la dissolució del naftol sòlid amb Toluè, que posteriorment serà utilitzat en el tanc de mescla TM-601.

En aquest tanc de mescla arriba el naftol en estat sòlid, un corrent de toluè provinent de la recirculació dels cristal·litzadors i una altra corrent de toluè que arriba des de els tancs d'emmagatzematge.

Aquest tanc de mescla treballa a pressió atmosfèrica i a una temperatura de 74 °C.

A continuació es mostren les corrents d'entrada i sortida del tanc amb les seves corresponents propietats, cabals i composicions

**Taula 11.4.18.** Corrents d'entrada i sortida del tanc TM-702/A

Nom	Corrent 51a	Corrent 29	Corrent 34
<b>Temperatura (°C)</b>	86,3	25	86,3
<b>Pressió (KPa)</b>	101,325	101,325	101,325
<b>Estat físic</b>	L	S	L
<b>Cabal màssic (Kg/h)</b>	3932,21	1306,42	5238,93
<b>Cabal Volumètric (m<sup>3</sup>/h)</b>	2,366	-	5,732
<b>Densitat (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	817,733	-	892,486
<b>Entalpia (KJ/kg)</b>	223,400	-	-338,153
<b>FRACCIÓ MASSICA</b>			
<b>Naftol</b>	0	1	0,2489
<b>Toluè</b>	1	0	0,7505
<b>CABAL MASSIC (Kg/h)</b>			
<b>Naftol</b>	0	1304,42	1304,42
<b>Toluè</b>	3932,21	0	3932,21

### 11.4.2.1 Dimensionament del tanc de mescla

Per realitzar el dimensionament del tanc es fa fent l'aproximació que les propietats de la mescla que hi ha dintre del mesclador són les condicions de sortida del fluid de mescla per això s'ha de disposar de unes dades prèvies com ara el cabal volumètric de sortida, i característiques pròpies del fluid com ara la seva densitat i viscositat i es suposa un temps de residència del fluid, en aquest cas 1 hora.

Com a la mescla hi ha una proporció més gran de líquid que de sòlid es procedeix a tractar la mescla com si fos de líquid-líquid.

Les propietats de la mescla són:

**Taula 11.4.19.** Propietats de la mescla

<b>Densitat (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	892,50
<b>Viscositat (Kg/m s)</b>	0,000438

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

El càlcul del volum ve determinat per la l'equació 11.4.1, amb un resultat de 7,76 m<sup>3</sup>

Per tant, seguint el procediment ja descrit pel tanc de mescla TM-601, es determina un diàmetre de 2,745 m i una alçada de 3,294 m

### 11.4.2.2 Sistema d'agitació

Per tal de dissenyar el sistema d'agitació es parteix de la premissa que la mescla resultant ha de ser homogènia, es a dir, una mescla perfecte. I com es té un recipient més gran que 4 m<sup>3</sup> es necessari un sistema d'agitació resistent. Per tant, es decideix, utilitzar una turbina com a sistema d'agitació encara que per mescles entre sòlid i líquid els agitadors més utilitzats són els agitadors helicoïdals.

A continuació es mostren els resultats del disseny del agitador de turbina, ja descrits pel mesclador TM-601:



· Càlcul del diàmetre del agitador ( $D_a$ ) = 0,91 m

· Càlcul de la distància del terra (E) = 0,91 m

· Càlcul de plaques deflectores (J) = 0,22 m

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

$$W = \frac{D_a}{5} = 0,183 \text{ m} \quad \text{Equació 11.4.34.}$$

$$L = \frac{D_a}{4} = 0,228 \text{ m} \quad \text{Equació 11.4.35}$$

Per d'aconseguir una bona homogeneïtat de la mescla s'utilitza una velocitat de gir elevada (n), de 2,5 rps.

Aquesta velocitat de gir té un temps de mescla que ve determinar per l'equació següent:

$$t = 5 \cdot \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H}{4 \cdot 0,92 \cdot n \cdot D_a \cdot D} = 18,43 \text{ m} \quad \text{Equació 11.4.36}$$

Per calcular la potència del agitador cal fer un càlcul previ, s'ha de calcular el Reynolds d'agitació, Re.

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot D_a}{\mu} = 4,26E^6 \quad \text{Equació 11.4.37}$$

A partir d'aquí es troba el valor de  $N_p = 6$ .

$$P = \frac{N_p \cdot D_a^5 \cdot n^3 \cdot \rho}{g \cdot 1000} = 5,48 \text{ Kw} \quad \text{Equació 11.4.38}$$

Per últim es calcula el Power del agitador:

$$Power = \frac{P}{V_{liquid}} = \frac{P}{\frac{C_{total}}{\rho} \cdot \tau} = 0,93 \frac{KW}{m^3} \quad \text{Equació 11.4.39}$$

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

Figura 11.4.16. Relació Reynolds-Potència del agitador.

Si comparem el valor de Power obtingut amb els de la figura anterior, es comprova que estem dintre del rang de agitació mitja.

### 11.4.2.3 Disseny mecànic del mesclador

Per al disseny mecànic del mesclador es parteix del volum sobredimensionar calculant anteriorment. Com el mesclador opera a pressió atmosfèrica, per tant, a l'hora de fer el disseny mecànic es dissenya fent ús de la pressió relativa.

#### G. Càlcul de l'espessor a la paret del mesclador

Per al càlcul del espessor de la paret del mesclador cal conèixer prèviament les característiques de treball de la columna, la temperatura (Td) i pressió disseny (Pd), diàmetre intern (Di), factor de soldadura (E) i el factor d'estres del material (S).

$$P_d = (P_{op} + \Delta P) \cdot 1,1 \quad \text{Equació 11.4.40}$$

$$\Delta P = (\rho \cdot g \cdot h) \quad \text{Equació 11.4.41}$$

$$T_d = T_{op} + 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Equació 11.4.42}$$

On:

$P_d$  és la pressió de disseny (bar)

$P_{op}$  és la pressió d'operació relativa (bar)

$\Delta P$  és la pressió hidràulica (bar)

$T_d$  és la temperatura de disseny ( $^\circ\text{C}$ )

$T_{op}$  és la pressió d'operació ( $^\circ\text{C}$ )

**Taula 11.4.20.** Temperatura i pressió de disseny

<b>T<sub>disseny</sub> (<math>^\circ\text{C}</math>)</b>	106,3
<b>P<sub>disseny</sub> (bar)</b>	1,01

La pressió hidràulica que es calcula és la pressió que exerceix el líquid a una alçada. Per considerar la situació més desfavorable, es considera com si tot el mesclador estigues inundat d'aigua.

El material escollit per al disseny per la mesclador és el AISI 316L, ja que té una bona resistència a l'oxidació.

El càlcul de l'espessor es realitza a partir de la fórmula del codi ASME, ja descrits en l'apartat del mesclador TM-601. Els resultats es mostren en la taula 11.4.21.

**Taula 11.4.21.** Resultats obtinguts del càlcul espessor a la paret del cilindre

<b>Material</b>	AISI 316L
<b>Factor estrès, S (bar)</b>	1082,475
<b>D<sub>int</sub> (mm)</b>	2745,493

<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	1,527
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	3,879
<b>t (gruix total) (mm)</b>	5
<b>P màxima (bar)</b>	3,344

### **H. Càlcul de l'espessor al capçal**

Per al disseny del capçal del mesclador s'ha escollit el toriesfèric ja que la pressió de treball del absorbidor es baixa.

El material que s'utilitza per aquesta secció del mesclador també es AISI 316L, i es mantenen els valors utilitzats del factor de soldadura i del factor d'estrès.

Per al càlcul del espessor del capçal del toriesfèric es segueixen les fórmules del codi ASME, ja descrites anteriorment.

Aquest espessor se li suma un valor de tolerància a la corrosió de (2 mm) i es sobredimensiona un 10% i s'arrodoneix a l'alça.

La màxima pressió que suporta el capçal ve determinada per la següent equació:

$$P_{max} = \frac{2 S E t}{L M + 0,2 t} \quad \text{Equació 11.4.43}$$

Els resultats obtinguts es mostren en la taula 11.4.22:

**Taula 11.4.22.** Resultats obtinguts del càlcul del espessor al capçal

<b>Tipus</b>	Toriesfèric
<b>Material</b>	AISI 316L
<b>Factor estrès, S (bar)</b>	1082,475
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>L (mm)</b>	2745,493
<b>r (mm)</b>	274,549

<b>L/r</b>	10
<b>M</b>	1,54
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	2,350
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	4,785
<b>t (gruix total) (mm)</b>	5
<b>P màxima (bar)</b>	2,176

Per al càlcul de l'alçada total del capçal s'utilitza les equacions de l'empresa alemanya (*WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH*)

A continuació s'explica i es mostren les fórmules per a poder calcular l'alçada del capçal:

$$R = Da$$

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

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

$$h_2 = 0,1935 \cdot Da - 0,455 \cdot t$$

$$h_3 = h_1 + h_2$$

Equació 11.4.44.

On

$h_3$  es l'alçada del capçal (mm)

**Taula 11.4.23.** Resultats obtinguts de l'alçada del capçal

<b>R (mm)</b>	2745,493
<b>r (mm)</b>	274,549
<b>h<sub>1</sub> (mm)</b>	17,5
<b>h<sub>2</sub> (mm)</b>	528,978
<b>h<sub>3</sub> (mm)</b>	546,478

Ara es calcula el volum del capçal, per aquest càlcul s'utilitza la fórmula (L. Brownell, E. Young), ja d'escrita en l'apartat del mesclador TM-601, equació 11.4.25.

**Taula 11.4.24.** Resultats obtinguts del volum al capçal

<b>V<sub>e</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	1,6924
<b>V<sub>i</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	1,6740
<b>V paret (m<sup>3</sup>)</b>	0,0184

### **I. Càlcul de l'espessor al fons del mesclador**

Per al disseny del capçal del mesclador s'ha escollit el torisfèric ja que la pressió de treball del absorbidor es baixa.

El material que s'utilitza per aquesta secció del mesclador també es AISI 316L, i es mantenen els valors utilitzats del factor de soldadura i del factor d'estrès.

Per al càlcul del espessor del fons del torisfèric es segueix la fórmula del codi ASME,

$$t = \frac{PLM}{2SE - 0,2P} \quad \text{Equació 11.4.45}$$

Aquest espessor se li suma un valor de tolerància a la corrosió de (2 mm) i es sobredimensiona un 10% i es s'arrodoneix a l'alça.

La màxima pressió que suporta el capçal del fons ve determinada per l'equació 11.4.43.

La taula 11.4.25. en mostra els resultats obtinguts:

**Taula 11.4.25.** Resultats del càlcul del espessor del fons

<b>Tipus</b>	Toriesfèric
<b>Material</b>	AISI 316L
<b>Factor estrès, S (bar)</b>	1082,475
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>L (mm)</b>	2745,493
<b>r (mm)</b>	274,549
<b>L/r</b>	10
<b>M</b>	1,54
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	2,350
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	4,785
<b>t (gruix total) (mm)</b>	5
<b>P màxima (bar)</b>	2,176

Per al càlcul de l'alçada del fons del mesclador es segueix el mateix procediment que en el càlcul de l'alçada del capçal i els resultats obtinguts s'exposen a continuació:

**Taula 11.4.26.** Resultats obtinguts de l'alçada del fons

<b>R (mm)</b>	2745,493
<b>r (mm)</b>	274,549
<b>h<sub>1</sub> (mm)</b>	17,5
<b>h<sub>2</sub> (mm)</b>	528,978
<b>h<sub>3</sub> (mm)</b>	546,478

Ara es calcula el volum del capçal, per aquest càlcul s'utilitza la fórmula (*L. Brownell, E. Young*), ja descrita anteriorment.

**Taula 11.4.27.** Resultats obtinguts del volum del fons

<b>V<sub>e</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	1,6924
<b>V<sub>i</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	1,6740
<b>V paret (m<sup>3</sup>)</b>	0,0184

**J. Càlcul de l'alçada total i superfície lateral del mesclador**

Per al càlcul de l'alçada total es fa ús de les formules 11.4.29 i 11.4.30. Obtenint els resultats següents:

**Taula 11.4.28.** Alçada total

<b>Alçada total (m)</b>	4,387
-------------------------	-------

**Taula 11.4.29.** Dades de la superfície lateral

<b>Àrea lateral total (m<sup>2</sup>)</b>	28,52
---	-------

**K. Càlcul del mesclador buit**

El càlcul del mesclador buit es fa a partir dels volums calculats, volum de la secció cilíndrica. Aquests al ser una secció cilíndrica es multipliquen per la seva àrea lateral i per l'espessor mentre que per al capçal superior e inferior del mesclador es calcula el volum de la paret i es multiplica per l'espessor. Aquests volums es multipliquen per la densitat del material de qual està fet la columna, en aquest cas, AISI 316L.

Aquest pes del mesclador buit, que dóna com a resultat de l'Equació 11.4.32 és sobredimensiona un 10%, per tenir en compte el pes de tots els elements interns, com els deflectors, com els externs, el sistema d'agitació.

**Taula 11.4.30.** Resultats del càlcul del pes de la columna buida

<b>Àrea lateral total (m<sup>2</sup>)</b>	28,52
<b>Volum capçal paret (m<sup>3</sup>)</b>	0,0184
<b>Volum fons paret (m<sup>3</sup>)</b>	0,0184



<b>Densitat AISI 316L (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	7960
<b>Pes columna buida (Kg)</b>	1427,36
<b>Pes sobredimensionat (Kg)</b>	1570,10

### **L. Càlcul del mesclador ple**

En aquest punt es fa el càlcul per al mesclador ple d'aigua i ple del fluid mescla, en aquest cas, es pren com a una simplificació que el fluid que hi ha dintre del tanc de mescla és el mateix que el que surt. S'empra l'equació 11.4.33 per calcular els resultats descrits en la taula 11.4.31.

**Taula 11.4.31.** Resultats del càlcul del pes del mesclador ple

<b>Pes del mesclador amb aigua (Kg)</b>	9353,91
<b>Pes del mesclador en operació (Kg)</b>	8530,97

### **11.4.3 Càlcul del espessor d'aïllament**

Per tal de realitzar un aïllament adequat per aquest equip s'empra el programa Insulan proporcionat per l'empresa CALORCOL S.A.

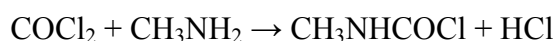
Les característiques introduïdes al programa per tal de treballar amb llana mineral de roca com a manta aïllant de 80Kg/m<sup>3</sup>, han estat:

- Temperatura Interior = 86,3 °C
- Temperatura Superficial del Aïllant = 35°C
- Temperatura Ambient = 16,9 °C (és la mitjana del territori)
- Velocitat de l'aire = 2,7 m/s (velocitat mitjana en direcció nord- oest)
- Superfície exterior de l'aïllament = Acer inoxidable brut (Emissivitat de 0,3)
- Superfície sense aïllant = AISI 316L (Suposant emissivitat de 0,3)

El resultat obtingut és d'un aïllament de 2,54 cm amb una eficiència del 91,84 %.

### 11.5 Reactor flux pistó, R-201

En el reactor R-201 es porta a terme la reacció de formació d'MCC. Aquest compost serà emprat en l'etapa posterior com a reactiu per la producció de MIC. Els reactius són el Fosgè, que entra en estat gas a una temperatura de 205°C i amb un 25% d'excés, i la Monometilamina (MMA), que entra en estat gas i a 240°C. La reacció que es porta a terme és la següent:



La reacció de formació de l'MCC és exotèrmica, no catalítica i té un grau de conversió del 100%. El temps de residència és de 1,5 segons. La taula 11.5.1 en mostra les condicions d'operació

**Taula 11.5.1.** Condicions d'operació del reactor R-201.

<b>Temperatura (°C)</b>	260
<b>Pressió (atm)</b>	1
<b>Temps de residència (s)</b>	1,5

#### 11.5.1 Balanç de matèria

A continuació es mostra el balanç de matèria del reactor de formació de MMA, amb les condicions pròpies de cada corrent. Tal i com s'ha comentat, el fosgè entra amb un 25% d'excés per tal d'assegurar la completa conversió de l'MMA.

**Taula. 11.5.2.** Corrents d'entrada i sortida del R-201

<b>Nom</b>	<b>Corrent 2c</b>	<b>Corrent 1c</b>	<b>Corrent 3</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	240	205	260
<b>Pressió (KPa)</b>	101,325	101,325	101,325
<b>Fracció de vapor</b>	1	1	1
<b>Cabal màssic (Kg/h)</b>	254,07	1011,76	1265,82
<b>Cabal Volumètric (m<sup>3</sup>/h)</b>	747,058	399,90	821,96

<b>Densitat (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	0,34	2,53	1,54
<b>Entalpia (KJ/Kg)</b>	-322,161	-2121,362	-1853,609
<b>FRACCIÓ MASSICA</b>			
<b>MMA</b>	1,0	0,0	0,0
<b>Fosgè</b>	0,0	1,0	0,1598
<b>MCC</b>	0,0	0,0	0,6044
<b>HCl</b>	0,0	0,0	0,2356
<b>CABAL MASSIC</b>			
<b>MMA</b>	254,07	0	0
<b>Fosgè</b>	0	1011,76	202,35
<b>MCC</b>	0	0	765,14
<b>HCl</b>	0	0	298,33

### 11.5.2 Balanç d'energia

Tal i com s'ha esmentat, la reacció és exotèrmica. Per tal de calcular la calor total a bescanviar, s'ha emprat la següent equació:

$$q = \sum_{j=1}^s n_{jo} \overline{Cp}_j (T - T_o) - \frac{n_{ko}}{\nu_k} X_k \Delta H^{\circ} - \frac{n_{ko}}{\nu_k} \overline{\Delta Cp}_j \cdot (T - T^*) \quad \text{Equació 11.5.1}$$

On:

- q = flux de calor, KW.
- n<sub>ko</sub> = cabal molar del component clau, Kmols/s.
- C<sub>pj</sub> = capacitat calorífica del component j, KJ/m<sup>2</sup> °C.
- H<sup>o</sup><sub>j</sub> = entalpia estàndard a 25 °C, KJ/Kg.
- x<sub>k</sub> = grau de conversió.
- ν<sub>k</sub> = coeficient estequiomètric.
- T = temperatura d'operació, °C.
- T<sub>o</sub> = temperatura entrada reactius, °C.
- T\* = temperatura de referència, °C.

Les dades emprades són les següents:

**Taula 11.5.3.** Taula de dades emprades pel balanç d'energia

<b>Component</b>	<b>Hj 25°C (KJ/Kmol)</b>	<b>Cp 25°C (KJ/Kmol)</b>	<b>Cp 260°C (KJ/Kmol)</b>	<b>ΔCp mitja (KJ/Kmol)</b>
MCC	-170800,00	109,1	123,00	115,91
COCl <sub>2</sub>	-221100,00	57,8	69,47	63,46
HCl	-92360,00	29,54	29,85	29,69
MMA	-23030,00	49,44	73,30	60,59

D'aquesta manera, s'obté un calor a bescanviar (Q) en Kw de -35,07.

A partir de la calor total a bescanviar es pot calcular l'àrea de transferència de calor necessària per tal de que el reactor sigui isoterm.

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad \text{Equació 11.5.2.}$$

On:

- q = flux de calor , W.
- U = coeficient global de transferència d'energia, W/m<sup>2</sup> · °C.
- A = àrea de bescanvi necessària, m<sup>2</sup>.
- ΔT<sub>ml</sub> = increment de temperatura mitjà logarítmic, °C.

**Taula 11.5.4.** Taula dels resultats obtinguts del balanç d'energia

<b>Q (W)</b>	35070,11
<b>U (W/m<sup>2</sup>°C)</b>	50,00
<b>ΔT<sub>ml</sub> (°C)</b>	191,12
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	3,67

Per calcular el cabal del fluid tèrmic refrigerant necessari per poder extreure la calor generada es calcula a partir de l'equació 11.5.3 :

$$M_s = \frac{q}{C_p \cdot \Delta T} \quad \text{Equació 11.5.3}$$

On:

$M_s$  = Cabal màssic de fluid tèrmic, Kg/s

$q$  = Flux de calor generat de la reacció, W

$C_p$  = Capacitat calorífica del fluid tèrmic, (W/s)/(Kg·K)

$\Delta T$  = Variació de temperatura del fluid tèrmic

**Taula Equació 11.5.5.** Resum dels resultats i dades del càlcul del cabal de refrigerant

<b>q (W)</b>	-35070,11
<b>Cps (J/Kg*K)</b>	1763,5
<b>T<sub>2</sub></b>	70
<b>T<sub>1</sub></b>	30
<b>Ms (Kg/s)</b>	0,498

A partir del càlcul del cabal necessari de refrigerant es passa al càlcul de la velocitat amb la qual circula el oli tèrmic per la carcassa.

**Taula 11.5.6.** Resum dels resultats i dades del càlcul de la velocitat del fluid tèrmic

<b>Densitat oli (kg/m<sup>3</sup>)</b>	938,9
<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	5,31E-04
<b>Àrea de pas (m<sup>2</sup>) per carcassa</b>	7,07E-04
<b>Velocitat (m/s)</b>	0,75
<b>μ (Kg/m·s)</b>	0,00587
<b>Re carcassa</b>	52393,49

Aquest Reynolds indica que hi ha turbulència dintre de la carcassa per on circula el fluid refrigerant. Aquest disseny es dona per bo ja que la velocitat de circulació per carcassa ha d'estar entre 0,1 a 3 m/s, aquests valors són típics per bescanviadors però tal com

s'ha explicat anteriorment aquest reactor es dissenya seguint les bases dels bescanviadors de calor.

Aquest Reynolds indica que hi ha turbulència dintre de la carcassa per on circula el fluid refrigerant, encara que la velocitat del oli tèrmic sigui de 0,75 m/s. És una velocitat baixa, per adequada per aquest tipus de situacions ja que una velocitat de pas del oli elevada podria provocar problemes de corrosió.

### **Pèrdues de càrrega:**

Per al càlcul de la pèrdua de càrrega al reactor, en la part del tub interior on es dona la reacció de formació del MCC, es calcula aproximant al càlcul de la pèrdua de càrrega per canonades, ja que per dintre del tub hi circulen gasos.

Per realitzar aquest càlcul, es segueix el procediment de correlació de Weymouth:

$$P_1^2 - P_2^2 = \frac{4 \cdot f \cdot z \cdot R \cdot T \cdot G^2 \cdot L}{M \cdot D} \quad \text{Equació 11.5.4}$$

On:

f és el factor de fricció que es calcula fent ús de la correlació de Blasius:

$$f = 0,046 \cdot Re^{-0,2} \quad \text{Equació 11.5.5.}$$

amb la condició:  $5 \cdot 10^2 < Re < 2 \cdot 10^5$   $\epsilon/D = 0$

z és el factor de compressibilitat (0,98)

R és la constant dels gasos (KPa m<sup>3</sup>/ Kmol K)

T és la temperatura (K)

G és velocitat massica (kg/m<sup>2</sup>s)

L és la longitud del tub (m)

M és pes molecular del fluid de procés (Kg/Kmol)

D és diàmetre del tub (m)

**Taula 11.5.7.** Resum dels resultats i dades del càlcul de la pèrdua de càrrega per el tub interior

<b>D<sub>tub</sub> (m)</b>	0,406
<b>Velocitat (m/s)</b>	2,19
<b>factor de fricció</b>	5,40E-03
<b>G (kg/m<sup>2</sup>s)</b>	3,39
<b>Densitat (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1,55
<b>Viscosidad (kg/ms)</b>	2,07E-05
<b>R (KPa m<sup>3</sup>/ Kmol K)</b>	0,082
<b>z</b>	0,98
<b>M (Kg/Kmol)</b>	68,75

<b>P<sub>1</sub><sup>2</sup>-P<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	1,25E+00
<b>ΔP (KPa)</b>	1,11

### 11.5.3 Disseny mecànic

Per tal d'assegurar una bona operació del reactor i aconseguir que l'àrea de transferència d'energia sigui suficient per bescanviar el calor necessari, s'ha dissenyat el reactor encamisat.

Es vol assegurar que el reactor operi en règim turbulent. Per tal d'aconseguir-ho, s'ha dimensionat el reactor suposant un Reynolds i calculant el diàmetre i la longitud que complissin aquest requisit. Seguidament, s'ha reajustat el diàmetre amb un valor estàndard i s'han recalculat els altres paràmetres.

Per tal de calcular els diversos paràmetres que influeixen en l'operació i dimensionament del reactor, s'han utilitzat les diferents equacions:

$$v = \frac{Ql}{A} \quad \text{Equació 11.5.6.}$$

$$Re = \frac{D \cdot \rho \cdot v^2}{\mu} \quad \text{Equació 11.5.7.}$$

$$A_{pas} = \pi \cdot r^2 \quad \text{Equació 11.5.8.}$$

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot L \quad \text{Equació 11.5.9.}$$

On,

- $v$  = velocitat del fluid, m/s.
- $Ql$  = cabal volumètric,  $m^3/s$ .
- $A_{pas}$  = àrea de pas,  $m^2$ .
- $D$  = diàmetre, m.
- $L$  = longitud, m.
- $V$  = volum,  $m^3$ .
- $\rho$  = densitat del fluid,  $Kg/m^3$ .
- $\mu$  = viscositat del fluid,  $Kg/m^3$ .

El disseny del reactor s'ha sobredimensionat un 25%. D'aquesta manera, s'obtenen els següents resultats:

**Taula 11.5.8.** Resultats del reactor encamisat

<b>Q (<math>m^3/s</math>)</b>	0,28
<b>Àrea pas (<math>m^2</math>)</b>	0,11
<b>v (m/s)</b>	2,4
<b>Re</b>	45000
<b>D (m)</b>	0,38
<b>V (<math>m^3</math>)</b>	0,42
<b><math>\tau</math> (s)</b>	1,5
<b>L (m)</b>	3,61
<b>Àrea de bescanvi (<math>m^2</math>)</b>	4,39

Per tal de tenir un disseny correcte del reactor R-201, s'ha escollit diàmetres estàndard. D'aquesta manera, es recalculen les dimensions del reactor tot comprovant que entrin dins dels rangs establerts.



**Taula 11.5.9.** Resultats re calculats del reactor encamisat

<b>D (m)</b>	0,40
<b>L (m)</b>	3,28
<b>Àrea de pas (m<sup>2</sup>)</b>	0,12
<b>v (m/s)</b>	2,18
<b>Re</b>	42879
<b>Àrea bescanvi (m<sup>2</sup>)</b>	4,61

### **Gruix:**

#### **· Disseny mecànic del tubs**

El reactor consta de dues part la part interna, que fa referència al tub intern on tindrà lloc la reacció de producció del MCC i la part externa del reactor, la carcassa, per on circularà el fluid refrigerant, en aquest cas, un oli tèrmic.

En aquest apartar es calcula el espessor que han de tindre el tubs interns. Aquest espessor es calcula utilitzant el codi ASME.

Per al càlcul del espessor de la paret del cal conèixer prèviament les característiques de treball de la columna, la temperatura ( $T_d$ ) i pressió disseny ( $P_d$ ), diàmetre intern ( $D_i$ ), factor de soldadura ( $E$ ) i el factor d'estres del material ( $S$ ).

La pressió de disseny es calcular mitjançant l'equació 11.5.10. i 11.5.11. Cal tenir en compte però, que com es treballa a pressió atmosfèrica al reactor a l'hora de fer el disseny s'agafa el valor de la pressió relativa, que es de 0,5 bar.

$$P_d = (P_{op} + \Delta P) \cdot 1,1 \quad \text{Equació 11.5.10}$$

$$\Delta P = (\rho \cdot g \cdot h) \quad \text{Equació 11.5.11}$$

$$T_d = T_{op} + 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Equació 11.5.12}$$

On:

$P_d$  és la pressió de disseny (bar)

$P_{op}$  és la pressió d'operació relativa (bar)

$\Delta P$  és la pressió hidràulica (bar)

$T_d$  és la temperatura de disseny ( $^\circ\text{C}$ )

$T_{op}$  és la pressió d'operació ( $^\circ\text{C}$ )

El material escollit per al disseny del absorbidor és Hastelloy B-2, és un material a base de níquel-molibdè amb una excel·lent resistència al àcid clorhídric a tota temperatura i concentració. També resisteix al clorur d'hidrogen, àcid sulfúric, al àcid fluorhídric, àcid acètic i al àcid fosfòric pur. Té una excel·lent resistència al cracking (corrosió sota tensió i corrosió intergranular en les zones afectades per soldadura per absència de precipitació de carburs al ser escalfada. També pot ser utilitzat-se després de una soldadura sense tractament tèrmic.

El càlcul de l'espessor per la paret cilíndrica es realitza a partir de la fórmula del codi ASME:

$$t = \frac{P_d \cdot D_i}{2SE - 1,2 \cdot P_d} \quad \text{Equació 11.5.13}$$

On:

$D_i$  es el diàmetre intern (mm)

Al espessor se li suma un valor de tolerància a la corrosió de (2 mm) i es sobredimensiona un 10% i s'arrodoneix a l'alça.

$$t = 1,1 (t + 2 \text{ mm}) \quad \text{Equació 11.5.14}$$

La màxima pressió que suporta la secció cilíndrica ve determinada per la següent equació:

$$P_{max} = \frac{2SEt}{D_i + 1,2t} \quad \text{Equació 11.5.15}$$

Les dades utilitzades per al càlcul i l'espessor són:

**Taula 11.5.10.** Resum dels resultats i dades del càlcul del espessor del tub

<b>Material</b>	HASTEROLLY B2
<b>T<sub>disseny</sub> (°C)</b>	280
<b>P<sub>disseny</sub> (bar)</b>	0,912
<b>Factor estrés, S (bar)</b>	1296,21
<b>D<sub>int</sub> (mm)</b>	406,4
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	0,103
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	2,313
<b>t (gruix total) (mm)</b>	3
<b>P màxima (bar)</b>	16,123

Seguidament es calcula el pes dels tubs buits (equació 11.5.16), per aquest càlcul fa falta conèixer la densitat del material del qual estan fet els tubs com el àrea lateral del tubs, calculada seguint l'equació 11.4.30.

$$Pes_{tub} = \rho_{material} \cdot \text{àrea}_{lateral\ total} \cdot \text{espessor} \quad \text{Equació 11.5.6}$$

**Taula 11.5.11.** Resum dels resultats i dades del pes del tubs buits

<b>Densitat HASTEROLLY B2 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	9220
<b>Pes tub (Kg)</b>	120,44

A continuació de calcula el pes del tubs plens d'aigua i plens del fluid d'operació, per tal d'obtenir el pes total del tub, seguint l'equació ja descrita, 11.4.33

**Taula 11.5.12.** Resum dels resultats i dades pes dels tubs plens

<b>Pes tub amb Aigua (Kg)</b>	526,02
<b>Pes tub en Operació (Kg)</b>	121,07

### · Disseny mecànic de la carcassa

Tot seguit es mostra com es dissenya la part externa del reactor, la part de la carcassa. Abans de passar a l'explicació, en aquest disseny mecànic consta de dues parts, la

primera on s'explicarà com es dimensiona la carcassa seguint el mètode de Kern i la segona on es calcula l'espessor de la carcassa seguint el codi ASME.

Per conèixer la distància entre el tub interior i la carcassa ( $D_s'$ ) s'ha d'escollir un tipus de carcassa, en aquest cas s'ha escollit del tipus U/L/M/N (Fixed and U-tube).

**Taula 11.5.13.** Resum dels resultats i dades del càlcul diàmetre de carcassa

<b>Di tub (m)</b>	0,4064
<b>Espessor (mm)</b>	3
<b>De tub (m)</b>	0,41
<b>Ds' (m)</b>	0,012
<b>Ds (m)</b>	0,44
<b>Diàmetre carcassa estàndard (in)</b>	18

Aquest diàmetre de carcassa ( $D_s$ ) es diàmetre intern on estarà situat el feix de tub i l'espai restant entre  $D_s$  i  $D_e$  es per on circularà el fluid refrigerant sense tenir en compte el seu espessor.

Per tal de poder unir el tub intern amb els capçals del reactor es suma 4 cm per cada banda del tub.

### Càlcul de l'espessor a la paret de la carcassa

El càlcul de l'espessor per la paret cilíndrica es realitza a partir de la fórmula del codi ASME ja descrita com a 11.5.13

Al espessor se li suma un valor de tolerància a la corrosió de (2 mm), es sobredimensiona un 10% i es s'arrodoneix a l'alça, tal i com descriu l'equació 11.5.14

La màxima pressió que suporta la secció cilíndrica ve determinada per l'equació 11.5.15.

Les dades utilitzades per al càlcul i l'espessor són:

**Taula 11.5.14.** Resum dels resultats i dades del càlcul del espessor paret cilíndrica carcassa

<b>Material</b>	HASTEROLLY B2
<b>T<sub>disseny</sub> (°C)</b>	280
<b>P<sub>disseny</sub> (bar)</b>	0,937
<b>Factor estrés, S (bar)</b>	609,0
<b>D int (mm)</b>	650

<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	0,39
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	2,63
<b>t (gruix total) (mm)</b>	3
<b>P màxima (bar)</b>	7,06

### Càlcul de l'espessor al capçal

Per al disseny del capçal de la columna s'ha escollit el toriesfèric ja que la pressió de treball es baixa.

El material que s'utilitza per aquesta secció de la columna es també Hastelloy B-2, i es mantenen els valors utilitzats del factor de soldadura i del factor d'estrès.

Per al càlcul del espessor del capçal del toriesfèric es segueix el procediment descrit en apartats anteriors, sumant-li en aquest espessor un valor de tolerància a la corrosió de 2 mm i es sobredimensiona un 10%.

Els resultats obtinguts es mostren en la taula 11.5.15.

**Taula 11.5.15.** Resum dels resultats i dades del espessor al capçal

<b>Tipus</b>	Toriesfèric
<b>Material</b>	HASTEROLLY B2
<b>Factor estrès, S (bar)</b>	609,0
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>L (mm)</b>	650
<b>r (mm)</b>	65
<b>L/r</b>	10
<b>M</b>	1,54
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	0,605
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	2,87
<b>t (gruix total) (mm)</b>	3
<b>P màxima (bar)</b>	4,62

Per al càlcul de l'alçada total del capçal s'utilitza les equacions de l'empresa alemanya *WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH*, ja d'escrita en l'apartat de disseny mecànic del mesclador, apartat B.

**Taula. 11.5.16.** Resum dels resultats i dades del alçada al capçal

<b>R (mm)</b>	436,4
<b>r (mm)</b>	43,64
<b>h<sub>1</sub> (mm)</b>	10,5
<b>h<sub>2</sub> (mm)</b>	83,08
<b>h<sub>3</sub> (mm)</b>	93,58

Ara es calcula el volum del capçal, per aquest càlcul s'utilitza la fórmula (*L. Brownell, E. Young*), ja descrita en l'apartat del disseny mecànic del mesclador, apartat B. la taula 11.5.17 en mostra els resultats:

**Taula 11.5.17.** Resum dels resultats i dades del volum al capçal

<b>V<sub>e</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,0070
<b>V<sub>i</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,0067
<b>V paret (m<sup>3</sup>)</b>	2,81E-04

### **M. Càlcul de l'espessor al fons del reactor**

El procediment del càlcul es el mateix que s'utilitza al càlcul del espessor del capçal superior del reactor. Els resultats es mostren a continuació:

**Taula. 11.5.18.** Resum dels resultats i dades del espessor del fons

<b>Tipus</b>	Toriesfèric
<b>Material</b>	HASTEROLLY B2
<b>Factor estrés, S (bar)</b>	608,998
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>L (mm)</b>	650
<b>r (mm)</b>	65
<b>L/r</b>	10
<b>M</b>	1,54
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	0,61
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	2,87
<b>t (gruix total) (mm)</b>	3
<b>P màxima (bar)</b>	4,617

Per al càlcul de l'alçada del fons del reactor es segueix el mateix procediment que en el càlcul de l'alçada del capçal i els resultats obtinguts s'exposen a continuació:

**Taula 11.5.19.** Resum dels resultats i dades del alçada del fons

<b>R (mm)</b>	436,4
<b>r (mm)</b>	43,64
<b>h<sub>1</sub> (mm)</b>	10,5
<b>h<sub>2</sub> (mm)</b>	83,09
<b>h<sub>3</sub> (mm)</b>	93,58

Ara es calcula el volum del capçal, per aquest càlcul s'utilitza la fórmula (*L. Brownell, E. Young*) descrita en l'apartat del disseny mecànic en el mesclador, apartat B. els resultats es mostren a la taula 11.5.20.

**Taula. 11.5.20.** Resum dels resultats i dades del volum del fons

<b>V<sub>e</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,0070
<b>V<sub>i</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,0067
<b>V paret (m<sup>3</sup>)</b>	2,81E-04

### **Càlcul de l'alçada total i superfície lateral del reactor**

Per al càlcul de l'alçada total del reactor es fa mitjançant la fórmula següent:

$$H_{total} = h_{capçal} + h_{fons} + h_{total} \quad \text{Equació 11.5.7}$$

Per al càlcul de l'àrea lateral d'un cilindre s'utilitza la fórmula:

$$A_{lateral} = L \cdot \pi \cdot D_e \quad \text{Equació 11.5.8}$$

**Taula 11.5.21.** Resum dels resultats i dades alçada total i àrea lateral

<b>H total (m)</b>	3,55
<b>L (m)</b>	3,36
<b>Àrea lateral (m<sup>2</sup>)</b>	4,67

### Càlcul del reactor buit

Per càlcul del pes de carcassa s'ha de tenir en compte la densitat del material utilitzat i l'àrea lateral de la carcassa.

$$Pes_{carcassa} = \rho_{material} \cdot \text{àrea}_{lateral\ total} \cdot \text{espessor} \quad \text{Equació 11.5.9}$$

Aquest pes la carcassa, que dóna com a resultat de l'Equació 11.5.9 és sobredimensiona un 10%, per tenir en compte el pes de tots els elements interns, com ara distribuïdors i recol·lectors de líquids, com els externs, com ara la subjecció del reactor mitjançant faldons.

El càlcul del reactor buit es realitza a partir de l'equació següent:

$$Pes_{total\ buit} = Pes_{tub\ intern} + Pes_{carcassa} \quad \text{Equació 11.5.10}$$

**Taula 11.5.22.** Resum dels resultats i dades del càlcul del pes del reactor buit

<b>Densitat HASTEROLLY B2 (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	9220
<b>Pes carcassa (Kg)</b>	134,44
<b>Pes carcassa sobredimensionat (Kg)</b>	147,89
<b>Pes total buit (Kg)</b>	268,33

### Càlcul del reactor ple

Per al càlcul del reactor ple es calcula tenint en compte el pes de la carcassa i dels tubs plens ja sigui d'aigua com del fluid d'operació més el pes del catalitzador.

$$Pes_{reactor\ ple} = Pes_{tub\ ple} + Pes_{carcassa\ plena} \quad \text{Equació 11.5.11}$$

**Taula. 11.5.23.** Resum dels resultats del càlcul del pes del reactor ple

<b>Pes carcassa Aigua (Kg)</b>	664,88
<b>Pes carcassa operació (Kg)</b>	635,49
<b>Pes tub aigua (Kg)</b>	526,03
<b>Pes tub operació(Kg)</b>	121,07
<b>Pes del reactor aigua (Kg)</b>	1190,91



<b>Pes del reactor operació (Kg)</b>	756,56
--------------------------------------	--------

#### 11.5.4 Aïllant

Per tal de realitzar un aïllament adequat per aquest equip s'empra el programa Insulan proporcionat per l'empresa CALORCOL S.A.

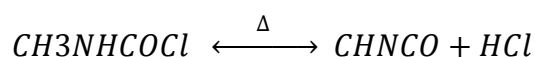
Les característiques introduïdes al programa per tal de treballar amb llana mineral de roca com a manta aïllant de 80Kg/m<sup>3</sup>, han estat:

- Temperatura Interior = 260 °C
- Temperatura Superficial del Aïllant = 35°C
- Temperatura Ambient = 16,9 °C (és la mitjana del territori)
- Velocitat de l'aire = 2,7 m/s (velocitat mitjana en direcció nord- oest)
- Superfície exterior de l'aïllament = Acer inoxidable brut (Emissivitat de 0,3)
- Superfície sense aïllant = Hastelloy B-2 (Suposant emissivitat de 0,3)

El resultat obtingut és d'un aïllament de 11.43 cm amb una eficiència del 98,44%.

#### 11.6 Reactor de piròlisi, R-401

A continuació s'especifica el disseny del reactor de piròlisi per la producció de MIC (Isocianat de Metil) a partir de Metil carbamil (MCC). La reacció que té a lloc és la següent:



La reacció és endotèrmica no catalítica i com a conseqüència, s'ha d'aportar calor per tal de desplaçar l'equilibri cap a la formació del MIC. A baixa temperatura, la presència de HCl catalitza la reacció secundària de polimerització del MIC. Una de les possibles

solucions per evitar aquesta reacció no desitjada seria l'addició de inhibidors de polimerització (n patent).

L'alternativa escollida, per tal d'evitar la utilització de inhibidors cars, és dur a terme la reacció en presència d'un dissolvent. Tal i com apunta la patent 4082787, es prefereixen dissolvents aromàtics tals com el monoclorobenzè o el toluè. El seu alt punt d'ebullició afavoreixen la dissociació tèrmica de l'MCC. A més a més, les propietats intrínseques d'aquests dissolvents minimitzen les reaccions secundàries de condensació. En una etapa de recuperació posterior es podrà separar el MIC del dissolvent.

Coneixent el temps de residència, es fixen les condicions d'operació segons la patent 4082787 per tal d'obtenir el màxim rendiment.

Dades inicials:

Temps de residència,  $\tau$  (h) = 21h

Pressió d'operació, P (atm) = 1,2 atm

Temperatura de treball, Tr (°C) = 110°C

Cabal d'entrada,  $Q_L$  (m<sup>3</sup>/h) = 5,57 m<sup>3</sup>/h

Conversió, X = 80%

Segons fonts bibliogràfiques, aquesta piròlisi es podia dur a terme en diferents condicions, tant al buit com a pressió i fins a 270°C. Ajudant-nos del simulador HYSYS s'han escollit aquestes condicions ja que es consideren les òptimes per a la reacció evitant excessos de temperatura i de pressió. És imprescindible per aquest muntatge però, una torre de fraccionament que separi immediatament el MIC format del HCl per no tornar a produir MCC, el disseny d'aquesta s'explicarà més endavant.

### 11.6.1 Balanç de Matèria

La composició del corrent involucrats en el reactor de piròlisi es descriu en la taula 11.6.1, aquesta mostra les composicions en els corrents tant d'entrada com de sortida (gas).

**Taula 11.6.1.** Taula del balanç de matèria del reactor de piròlisi

	<b>Entrada (Kg/h)</b>	<b>Sortida gas (Kg/h)</b>
<b>HCl</b>	0,0	298,33
<b>MIC</b>	0,0	466,81
<b>MCC</b>	956,43	191,28
<b>Toluè</b>	3789,52	3789,52

Tal i com es pot observar i seguint la patent 4082787, la quantitat de MCC afegit és un 25% del pes del dissolvent minimitzant la possibilitat de reaccions secundàries i de polimerització.

Segons les condicions d'operació el corrent gas és l'única sortida del reactor i per tant serà precís d'una vàlvula d'extracció per millorar-ne la sortida continua d'aquests.

### 11.6.2 Dimensionament del Reactor

A partir de les dades ja esmentades, s'ha pogut estimar el volum del reactor amb l'equació 11.6.1.

$$V = Q_L \cdot \tau$$

*Equació 11.6.1*

S'ha obtingut un volum requerit de 116,91 m<sup>3</sup>. Aquest s'ha decidit ampliant un 37% (rang entre 35 i 40%) ja que tot el corrent de producte serà en forma de gas i és necessari garantir-li espai per no tenir problemes operacionals. Finalment, es sobre dimensiona el reactor un 10% per seguretat, arribant així a un valor de 176,2 m<sup>3</sup>. Al ser un volum molt elevat caldria plantejar-ne la divisió d'aquest en sub-reactor, aquest aspecte es valorarà un cop es conegui l'àrea de bescanvi requerida.

Així doncs, utilitzant l'equació 11.6.2 i fixant una relació alçada – diàmetre de 1,3 (recomanada entre 1,3 i 1,5 per tancs amb agitació mecànica), s'ha ajustat el dimensionament del reactor.

$$V = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot h \quad \text{Equació 11.6.2.}$$

On:

- V = Volum del reactor, m<sup>3</sup>
- D = Diàmetre del reactor, m
- h = Alçada del reactor, m (h = 1,3·D)

Les dimensions obtingudes són de 5,56 metres de diàmetre i 7,89 metres d'alçada. Tal i com s'ha especificat anteriorment, no tot el volum del reactor serà ocupat per líquid; la taula 11.6.2 en mostra un dimensionament més precís.

**Taula 11.6.2.** Dimensions del reactor en funció del fluid

	<b>Líquid</b>	<b>Gas</b>
<b>Diàmetre (m)</b>	5,56	5,56
<b>Alçada (m)</b>	5,76	2,13

La zona que ocupa el líquid és l'única en la qual hi ha bescanvi de calor. Com a conseqüència, aquesta és la que determinarà l'àrea de bescanvi de calor del reactor. Més endavant, es compararà l'àrea de bescanvi obtinguda amb l'àrea requerida de bescanvi per poder comprovar si és suficient o caldria doblar l'equip. S'ha utilitzat l'equació 11.6.3 i les dimensions de la taula 11.6.2. pel càlcul de l'àrea de bescanvi del reactor.

$$A = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot h \quad \text{Equació 11.6.3}$$

On:

- A = Àrea superficial del reactor ocupada per líquid, m<sup>2</sup>
- D = Diàmetre, m<sup>2</sup>
- h = Alçada de líquid al reactor, m<sup>2</sup>

Suposant una àrea de bescanvi del 95% de l'àrea superficial s'obtenen 95,76 m<sup>2</sup> de bescanvi.

### 11.6.3 Balanç d'energia

Pel càlcul del Balanç d'energia s'ha emprat l'equació 11.5.1, mostrada en l'apartat 11.5.2. Balanç d'energia del reactor R-201.

En aquesta, la temperatura de reacció és de 110°C, la temperatura d'entrada és de 100 i 95,84°C (depenent del corrent d'entrada) i amb una conversió del 80%.

A continuació es mostra la taula 11.6.3, en la qual es pot apreciar el valor de les variables utilitzades per calcular la calor alliberada de la reacció, aquestes fores extretes del balanç de matèria i del programa HYSYS.

**Taula 11.6.3.** Variables utilitzades en la resolució del Balanç d'Energia

<b>C<sub>p</sub>mitjana (MCC)</b>	94,76
-----------------------------------	-------

<b>C<sub>p</sub>mitjana (Toluè)</b>	175,12
<b>C<sub>p</sub>mitjana (MIC)</b>	82,59
<b>C<sub>p</sub>mitjana (HCl)</b>	30,26
<b>n<sub>ko</sub> (MCC)</b>	10,23
<b>n<sub>ko</sub> (MCC)<sub>Recirculació</sub></b>	2,04
<b>n<sub>jo</sub> (Toluè)</b>	39,63
<b>n<sub>jo</sub> (Toluè)<sub>Recirculació</sub></b>	1,48
<b>n<sub>jo</sub> (HCl)</b>	8,1825
<b>n<sub>jo</sub> (MIC)</b>	8,1825
<b>ΔH<sub>o</sub> (MIC)</b>	-62400
<b>ΔH<sub>o</sub> (HCl)</b>	-92360
<b>ΔH<sub>o</sub> (MCC)</b>	-170800
<b>ΔH reacció</b>	16040
<b>ΔC<sub>p</sub>mitjana</b>	18,09

El valor resultant de la calor ha estat de 227605,08 KJ/h, és a dir, de 63,22 KW.

### ***11.6.3.1 Càlcul de l'àrea de bescanvi necessària***

Tal i com s'ha comentat, aquest apartat és clau pel dimensionament del reactor ja que serà el que determinarà el número total d'equips necessaris per dur a terme la reacció sota les condicions establertes.

Tal i com s'ha pogut apreciar en l'apartat anterior, la reacció és endotèrmica, i com a conseqüència caldrà aplicar calor al llarg de la reacció per mantenir-la a la temperatura

desitjada. El fluid tèrmic escollit és l'oli tèrmic Dowtherm-Q (les seves característiques es poden consultar en l'apartat de serveis).

Utilitzant les equacions 11.6.4 i 11.6.5 i amb el valor de la calor obtingut a l'apartat anterior, es pot calcular l'àrea requerida per mantenir el fluid a les condicions de treball.

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad \text{Equació 11.6.4}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_2 - T_4) - (T_1 - T_3)}{\ln\left(\frac{T_2 - T_4}{T_1 - T_3}\right)} \quad \text{Equació 11.6.5}$$

On:

- $q$  = Calor alliberat de la reacció, W
- $U$  = Coeficient de transmissió tèrmic,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- $A$  = Àrea de bescanvi necessària,  $m^2$
- $\Delta T_{ml}$  = Temperatura mitja logarítmica
- $T_1$  = Temperatura d'entrada al reactor,  $100^\circ C$
- $T_2$  = Temperatura de sortida del reactor,  $110^\circ C$
- $T_3$  = Temperatura d'entrada de fluid tèrmic,  $280^\circ C$
- $T_4$  = Temperatura de sortida del fluid tèrmic,  $265^\circ C$

L'àrea necessària per poder mantenir el reactor a  $110^\circ C$  és de  $7,56 m^2$ . Com que l'àrea de bescanvi requerida és menor a l'àrea superficial del reactor, es considera que no caldrà doblar l'equip. Així doncs, s'operarà amb un sol reactor de  $176,2 m^3$ .

En addició, cal calcular el cabal de fluid tèrmic per assegurar que les dimensions de la mitja canya que envolta el reactor estiguin dintre de rang.

### 11.6.3.2 Dimensionament de la mitja canya

Primer de tot s'ha de conèixer el cabal de fluid tèrmic requerit, calculat aquest amb l'equació 11.6.6

$$W = \frac{q}{C_p \cdot \Delta T_f} \quad \text{Equació 11.6.6}$$

On:

- W = Cabal màssic de fluid tèrmic, Kg/s
- q = Calor transmès per la reacció, W
- Cp = Capacitat calorífica del fluid tèrmic, (W/s)/(Kg·K)
- ΔT = Variació de temperatura del fluid tèrmic, K

El valor obtingut ha estat de 2,18 Kg/s, o el que és el mateix, 8,74 m<sup>3</sup>/h.

Fixant un valor típic de velocitat de líquids de 3 m/s i utilitzant l'equació 11.6.7, es pot calcular l'àrea de pas del fluid tèrmic.

$$A = \frac{Q_L}{v} \quad \text{Equació 11.6.7}$$

On:

A = Àrea de pas del fluid tèrmic, m<sup>2</sup>

Q<sub>L</sub> = Cabal volumètric de fluid tèrmic, m<sup>3</sup>/s

v = velocitat típica del fluid, 3 m/s

S'ha obtingut un valor de 0,00081 m<sup>2</sup>, a partir d'aquest i de les equacions 11.6.8 i 11.6.9. s'obté el diàmetre i la llargada de la mitja canya.



$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot A} \quad \text{Equació 11.6.8}$$

$$L = \frac{A}{\pi \cdot D} \quad \text{Equació 11.6.9}$$

Així doncs s'obté una mitja canya de 3,21 cm de diàmetre i de 75,0 metres de llargada.

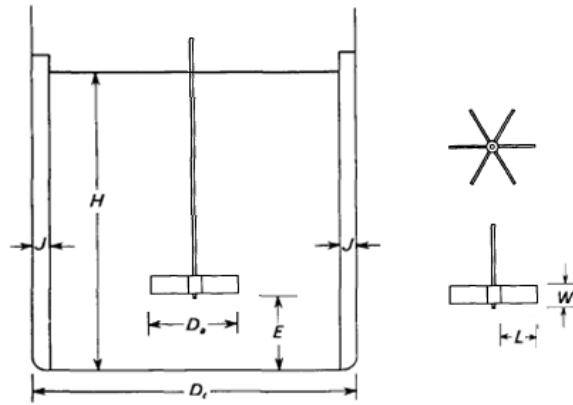
Per conèixer el número de voltes que aquesta mitja canya dona al reactor es calcula el quocient entre la llargada de la mitja canya i el perímetre del reactor obtenint 5 voltes. Finalment es calcula l'alçada que ocupa en la superfície del reactor deixant una separació entre volta i volta de 0,1 m, el resultat obtingut és de 0,57 metres d'alçada.

#### **11.6.4 Disseny mecànic**

Aquesta part del manual es dedicarà a explicar el disseny de l'àmbit mecànic de l'equip, des de l'agitació i incorporació de deflectors, fins als gruixos i pes de l'equip.

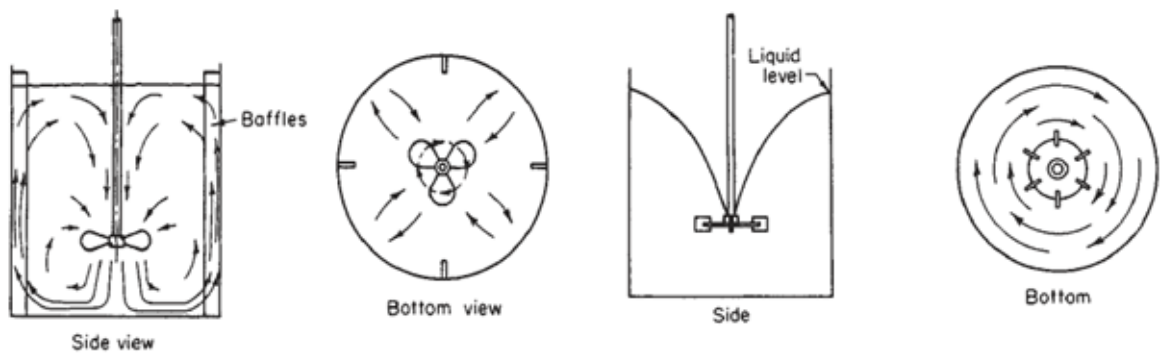
##### ***11.6.4.1 Agitació Mecànica***

Segons les condicions establertes anteriorment i les característiques del fluid, s'ha optat pel disseny d'una agitació de turbina amb sis pales lliures, i amb l'eix col·locat al centre del reactor, tal i com mostra la figura 11.6.1



**Figura 11.6.1.** Representació de l'agitació pel reactor de piròlisi

L'elecció de turbines en aquest reactor és degut a les característiques del fluid i del procés, ja que el producte és gas i cal contemplar un flux tant radial com tangencial. Aquest tipus d'agitació també és ideal per corrents amb viscositats baixes, en aquest cas 0,26 cP. Al produir grans corrents que persisteixen en tot el tanc s'evitaran estancacions de fluid en zones mortes. Per assegurar la inexistència de tals zones mortes s'han inclòs, a més a més, quatre deflectors. Aquest són col·locats tal i com mostra la figura 11.6.2.



**Figura 11.6.2.** Diferència principal en l'operació amb o sense deflectors

Per tal de dur a terme el disseny de manera més detallada s'empraren valors típics per aquest tipus d'agitació, aquests es troben a la figura 3 en funció de les constants descrites a continuació:

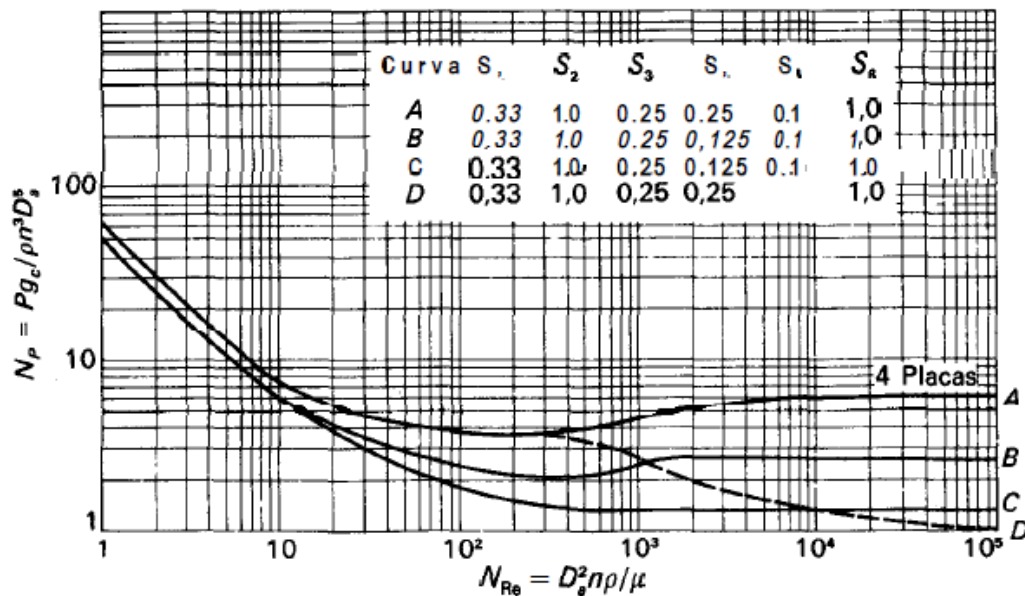
$$S_1 = \frac{D_a}{D_t} \quad S_2 = \frac{E}{D_a}$$

$$S_3 = \frac{L}{D_a} \quad S_4 = \frac{W}{D_a} \quad S_5 = \frac{J}{D_t}$$

On:

- $D_a$  = Diàmetre de la turbina, m
- $D_t$  = Diàmetre del reactor, m
- $E$  = Alçada des del fons a la turbina, m
- $L$  = Llargada de la pala, m
- $W$  = Gruix de la pala, m
- $J$  = Gruix del deflector, m
- $H$  = Alçada del líquid

La corba *C* de la figura 11.6.3 mostra el valor de cada una d'elles pel tipus d'agitació escollida, juntament amb la relació del numero de Reynolds d'agitació ( $N_{Re}$ ) i del número de potència ( $N_p$ ) que es faran servir més endavant pel càlcul de la potència de l'agitació.



**Figura 11.6.3.** Representació del  $N_{Re}$  en funció del  $N_p$  per diferents tipus d'agitacions

La taula 11.6.4 mostra les dimensions obtingudes.

**Taula 11.6.4.** Resultats del dimensionament de la turbina de sis pales rectes i quatre deflectors

<b>Dt</b>	5,57
<b>H</b>	5,76
<b>Da</b>	1,84
<b>E</b>	1,84
<b>L</b>	0,46
<b>W</b>	0,23
<b>J</b>	0,56

Pel càlcul de la potència de l'agitador, s'ha fixat un valor de velocitat de rotació de 90 rpm, comprès entre el rang típic de 20 a 190 rpm. Amb aquest i l'equació 11.6.10 s'ha calculat el número d'agitació de Reynolds.

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \quad \text{Equació 11.6.10}$$

El valor d'aquest és de  $1,68 \cdot 10^7$ , al ser superior a  $1 \cdot 10^5$  es considera flux turbulent, afavorint així la transmissió de calor i la sortida de producte del reactor.

Buscant la intersecció d'aquest valor amb la corba C i desplaçant-se horitzontalment cap a l'eix de les ordenades es pot llegir un valor de  $N_p$  de 1,3. S'utilitza doncs l'equació 11.6.11 per aïllar-ne la potència de l'agitació.

$$N_p = \frac{P \cdot g_c}{\rho \cdot N^3 \cdot D_a^5} \quad \text{Equació 11.6.11}$$

On:

- P = Potència de l'agitador, W
- $g_c$  = Factor de conversió, 1 (utilitzant el S.I)
- $\rho$  = Densitat, 845,9 kg/m<sup>3</sup>
- N = Velocitat d'agitació, 90 rpm
- $D_a$  = Diàmetre de la turbina, m

Així doncs, s'obté una potència de 81,69 KW. Per tal de realitzar una avaluació qualitativa de l'agitació en el tanc, s'ha calculat la relació Potència/Volum del reactor. Comparant amb la figura 11.6.4, es pot concretar en quin rang es troba l'agitació en el reactor.

$$Relació = \frac{Potència (KW)}{Volum líquid(m^3)} = \frac{101,1 KW}{116,91 m^3} = 0,7 KW/m^3$$

Table 10.14. Power requirements — baffled agitated tanks

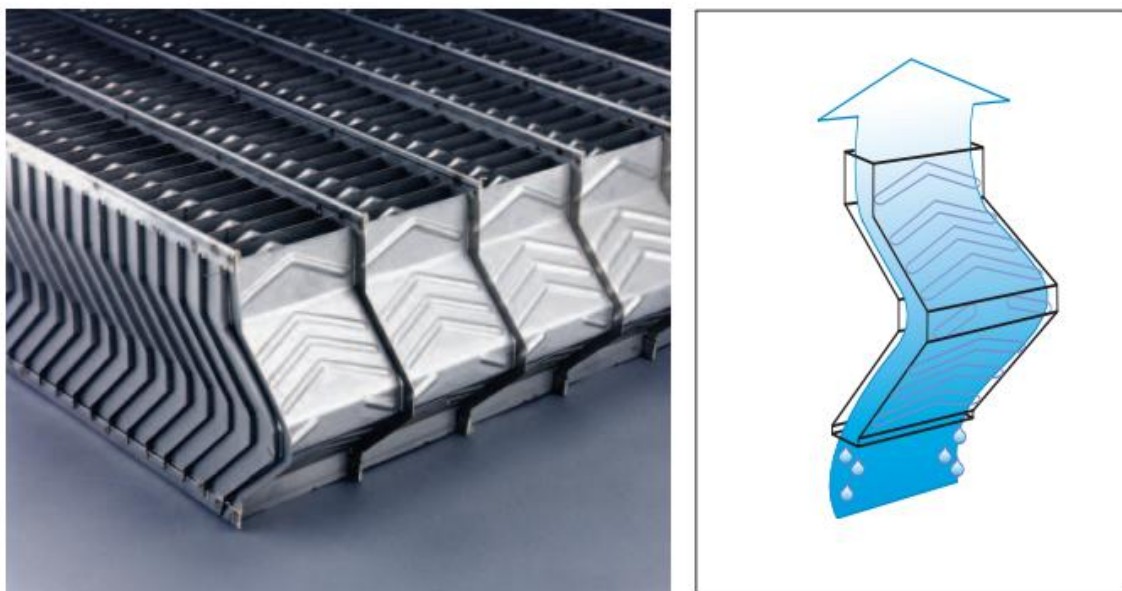
Agitation	Applications	Power, kW/m <sup>3</sup>
Mild	Blending, mixing	0.04–0.10
	Homogeneous reactions	0.01–0.03
Medium	Heat transfer	0.03–1.0
	Liquid-liquid mixing	1.0–1.5
Severe	Slurry suspension	1.5–2.0
	Gas absorption,	1.5–2.0
	Emulsions	1.5–2.0
Violent	Fine slurry suspension	>2.0

Figura 11.6.4. Avaluació qualitativa del tipus d'agitació i la seva aplicació principal

Tal i com es pot apreciar, l'agitació del reactor es troba dintre del rang d'agitació mitjana, sent aquesta idònia per facilitar la transferència de calor.

#### ***11.6.4.2 Dispositius interns***

Com a dispositius interns per aquest reactor s'ha considerat quatre deflectors, que ja han estat comentats, i un separador de gotes. Aquest últim permet que els corrents de gas que es generen en el reactor no arrosseguin líquid a la sortida. Per aquest equip s'ha escollit el separador de gotes DV 270 de l'empresa Munters com a separador de flux vertical. La figura 11.6.5 en mostra el procés i un exemple real.



**Figura 11.6.5.** Separador de gotes DV 270.

Aquest té una mínima pèrdua de càrrega i pot ser dissenyat de qualsevol tipus de material, amb especificació prèvia, d'aquesta manera s'evita la corrosió del Clorur d'hidrogen i la necessitat de canviar-lo contínuament.

#### ***11.6.4.3 Espessor de paret***

Pel càlcul de l'espessor de paret del reactor s'ha utilitzat el Codi ASME. Aquest permet calcular el gruix de les diferents parts del reactor per tal de que puguin resistir les condicions d'operació sense cap tipus de problema.

La taula 11.6.5 mostra les variables necessàries per iniciar-ne el disseny.

**Taula 11.6.5.** Variables necessàries per iniciar el disseny de l'espessor del reactor de piròlisi

<b>Alçada (m)</b>	7,89
<b>Diàmetre (m)</b>	5,56
<b>Radi capçal toriesfèric (m)</b>	0,50
<b>Pressió d'operació (atm)</b>	1,2
<b>Pressió de disseny (atm)</b>	1,93
<b>Temperatura d'operació (°C)</b>	110
<b>Temperatura de disseny (°C)</b>	130

El càlcul de la pressió i la temperatura de disseny s'han realitzat amb les equacions 11.4.16, 11.4.17 i 11.4.18. Seguint el càlcul que es mostra a continuació, s'obté una pressió hidràulica de 0,76 atm

$$\cdot P_{Hidr\grave{a}ulica} \text{ (atm)} = \rho \cdot g \cdot h / 101325 = (1000 \text{ m}^3 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 7,89 \text{ m}^2) / 101325 = 0.76 \text{ atm}$$

S'utilitza la densitat de l'aigua ja que serà el fluid per realitzar la prova de resistència hidràulica, a més a més, aquesta té densitat superior a la del fluid de procés.

El material escollit pel disseny del reactor és el Hastelloy B-2, és un material a base de níquel-molibdè amb una excel·lent resistència al àcid clorhídric a qualsevol temperatura i concentració. També resisteix l'àcid sulfúric, l'àcid fluorhídric, l'àcid acètic i l'àcid fosfòric pur. Té una excel·lent resistència al cracking (corrosió sota tensió) i a la corrosió intergranular en les zones afectades per soldadura degut a l'absència de precipitació de carburs al ser escalfada. També pot ser utilitzat després de una soldadura sense tractament tèrmic.

#### **11.6.4.4 Espessor del cos cilíndric**

El càlcul de l'espessor del cos cilíndric es realitza amb seguint el disseny proposat pel mètode d'ASME, en el qual s'utilitzen les equacions ja descrites anteriorment, equació 11.1.4.

El resultat obtingut és de 0,029 polzades, no obstant s'afegeix un factor de seguretat, en el que intervé, un valor de tolerància a la corrosió de 2 mm i un sobredimensionament del 10%.

Així doncs, el gruix del cos cilíndric és de 2,99 mm. No obstant, en la seva fabricació existeixen uns valors fixes d'espessor, la taula 2.3.2.2 en mostra els 8 primers.

**Taula 11.6.6.** Valors fixes d'essors a la industria

<b>Valors de fabricació d'essors (mm)</b>
3
4
5
6
8
10
12
15

Finalment es determina un espessor de 3 mm en el cos cilíndric del reactor de piròlisis.

#### **11.6.4.5 Espessor del capçal**

Per al disseny del capçal de la columna s'ha escollit el toriesfèric ja que la pressió de treball del reactor és baixa.



El material que s'utilitza per aquesta secció és també Hastelloy B2, i es mantenen els valors utilitzats del factor de soldadura i del factor d'estrès.

Per al càlcul de l'espessor del capçal del torisfèric es segueix l'equació 11.6.12., ja que la relació entre el radi del reactor i el radi del capçal és menor a  $16^{2/3}$ .

$$t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} \quad \text{Equació 11.6.12.}$$

On:

- L = Radi del reactor, m
- M = Factor de relació = 1,54

El valor de l'espessor un cop sobredimensionat com en el cas anterior és de 2,28mm, i llegint a la taula dels espessors de fàbrica resulta un espessor de 3 mm.

#### **11.6.4.6 Aïllament de l'equip**

Per tal de realitzar un aïllament adequat per aquest equip s'empra el programa Insulan proporcionat per l'empresa CALORCOL S.A.

Les característiques introduïdes al programa per tal de treballar amb llana mineral de roca com a manta aïllant de  $80\text{Kg/m}^3$ , han estat:

- Temperatura Interior =  $110\text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura Superficial del Aïllant =  $35\text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura Ambient =  $16,9\text{ }^\circ\text{C}$  (és la mitjana del territori)
- Velocitat de l'aire =  $2,7\text{ m/s}$  (velocitat mitjana en direcció nord- oest)
- Superfície exterior de l'aïllament = Acer inoxidable brut (Emissivitat de 0,3)
- Superfície sense aïllant = Hastelloy B-2 (Suposant emissivitat de 0,3)

El resultat obtingut és d'un aïllament de 3,15 cm amb una eficiència del 94,54%.

#### 11.6.4.7 Pes del reactor

Pel càlcul del pes del reactor en operació ha estat necessari el càlcul de l'equip buit i el càlcul del reactor ple d'aigua (degut a que la primera prova del reactor es realitzarà amb aigua).

Primer de tot doncs s'ha calculat el pes de les parts principals de l'equip, com són:

- Capçals toriesfèrics
- Cos cilíndric
- Agitador
- Deflectors
- Mitja canya

L'equació 11.6.13 mostra el procediment per obtenir el pes de cada part de l'equip.

$$Pes = Àrea \cdot Gruix \cdot Densitat \quad \text{Equació 11.6.13}$$

On l'àrea de cada part es calcula de la següent manera (equacions 11.6.14 i 11.6.15)

$$\text{Àrea cilindre} = \pi \cdot 2 \cdot r \cdot h \quad \text{Equació (11.6.14)}$$

$$\text{Àrea toriesfèric} = 0,842 \cdot D_c^2 \quad \text{Equació (11.6.15)}$$

On:

- r = Radi de la secció superior, m
- R = Radi de la secció inferior, m
- h = Alçada del cos, m
- D<sub>c</sub> = Diàmetre del cos, m

D'aquesta manera s'obté la taula 11.6.7, en la qual es pot observar els resultats obtinguts dels pesos de cada part de l'equip (Kg).

**Taula 11.6.7.** Valors obtinguts del pes del reactor de piròlisi buit en Kg

<b>Pcilindre (Kg)</b>	3819,71
<b>P agitador, buffles... (Kg)</b>	65880,15
<b>Pcap (Kg)</b>	721,87
<b>Pfons (Kg)</b>	721,87
<b>Pes aïllament</b>	479,53
<b>Pes mitja canya (Kg)</b>	0,002
<b>Preactor buida (Kg)</b>	5742,98
<b>Pes sobredimensionat per seguretat</b>	6317,28

El pes del reactor buit s'ha decidit sobredimensionar-lo un 10% degut a la desconexió del pes del motor de l'agitació, les boques d'home, els deflectors i l'eix de l'agitació, entre d'altres possibles peces que hi vagin incorporades.

En quant al pes del líquid s'utilitza l'equació (11.6.16), per calcular-lo.

$$Pes líquid = Volum reactor \cdot \rho_{Aigua} \quad \text{Equació (11.6.16)}$$

On:

· Volum reactor = Volum cilindre+ Volum capçals

·  $\rho_{aigua} = 1000\text{Kg/m}^3$

Aquest càlcul també es realitza amb la densitat de l'aigua ja que és major que la del líquid de procés i és amb aigua amb el fluid que es faran les proves de resistència

hidràulica. El pes del líquid és de 157521,06 Kg, sumant el líquid que passa per la mitja canya aquest valor ascendeix a 158029,50 i per tant el pes del reactor en operació és de 164346,8 Kg, o el que és el mateix, 164,35 tones.

### **11.6.5 Dispositius de subjecció o recolzament**

Tots els recipients han de ser subjectats o recolzats, és a dir, la seva càrrega a de ser transmesa al terra o a alguna estructura que la transmeti a terra; aquesta missió la compleixen els dispositius de subjecció o suport. Les càrregues a les quals està sotmès el recipient i que transmetrà a terra través del suport són:

- Pes propi.
- Pes del líquid en operació normal, o aigua en la prova hidràulica.
- Pes de tots els accessoris interns i externs.
- Càrregues degudes al vent.
- Càrregues degudes al terratrèmol.

Els dispositius de suport, així com els pernys d'ancoratge que els fixen a terra o estructura portant, hauran d'estar dimensionats per tal que resisteixin cadascuna de les condicions de càrrega possible del recipient.

Els recipients a pressió es subdivideixen en dues classes, depenent de la posició en la qual es troben instal·lats:

- Recipients Verticals.
- Recipients Horitzontals.

En aquest cas, es tracta d'un recipient en vertical. Els dispositius de suport per a recipients verticals són els següents::

- Potes.
- Faldó cilíndric o cònic.
- Mènsules. Cadascun d'aquests dispositius té les següents característiques:

**Potes :** Amb aquest tipus de dispositiu de subjecció el recipient es recolza en 3 o 4 potes soldades a la coberta. Aquestes potes són perfils en L – U – I soldats per sobre de la línia de soldadura, bé sigui directament a la coberta o bé a una placa de reforç soldada sobre el recipient. La primera solució s'utilitza per a cobertes en acer al carboni i de poc pes , mentre que la segona s'utilitza per a cobertes en acer aliat o recipients de gran pes. En aquesta segona opció, el material de la placa és igual al de la coberta i les potes són d'acer al carboni . Cada pota està fixada a terra per un pern d'ancoratge que resisteix les càrregues de tracció.

La subjecció per mitjà de potes s'utilitza en recipients d'alçada no superior a 5m i diàmetres no superiors a 2.4 m, sempre que els esforços a transmetre no siguin excessius , o dit d'una altra manera , sempre que el pes no sigui molt gran. En aquest cas s'utilitzarà com a suport el faldó cilíndric .

**Faldó cilíndric o cònic:** En els recipients que no poden ser suportats per potes , bé sigui per la seva grandària o per haver de transmetre esforços grans, s'utilitzen els faldons cilíndrics. Consisteixen en un cilindre soldat al fons. Amb aquest tipus de suport, la càrrega es reparteix uniformement al llarg del perímetre de la circumferència de soldadura, evitant concentracions d'esforços en l'envolupant i disminuint la pressió transmesa a terra.

Els perns d'ancoratge es situen al llarg del perímetre de la circumferència de suport i a una distància entre 400 i 600 mm , segons la mida i el nombre requerit . En tot cas , el nombre de perns s'ha de múltiple de 4. Si la pressió transmesa sobre el terra és molt gran o el nombre requerit de perns no hi cap en la circumferència, es realitza un faldó cònic que augmenta la grandària d'aquesta . El semiangle del con no ha de ser major a 6°.

Per evitar moments deguts al pes del recipient s'ha de realitzar el faldó de manera que el seu diàmetre mitjà coincideixi amb el diàmetre mitjà de la coberta. Aquest tipus de suport és el més utilitzat per torres, reactors i recipients de mida mitjana i gran. Alhora de dissenyar els faldons s'ha de tenir en compte que s'ha d' incloure un accés al seu interior (dimensions mínimes de 600 mm de diàmetre ) i ventilacions per evitar l'acumulació de gasos a la seva part interna.

**Mènsoles:** És el tipus de suport utilitzat en recipients verticals que han de suportar-se en estructures portants, quan les dimensions i càrregues no siguin molt grans . El nombre de mènsoles utilitzades són 2, 4, 8 i rarament més de 8. Si fos necessari, el seu nombre ha de ser múltiple de 4 . Igual que les potes, poden ser soldades directament a la coberta o a una placa de reforç soldada al recipient. Les raons que condueixen a l'adopció d'una o altra opció són les mateixes que les exposades anteriorment.

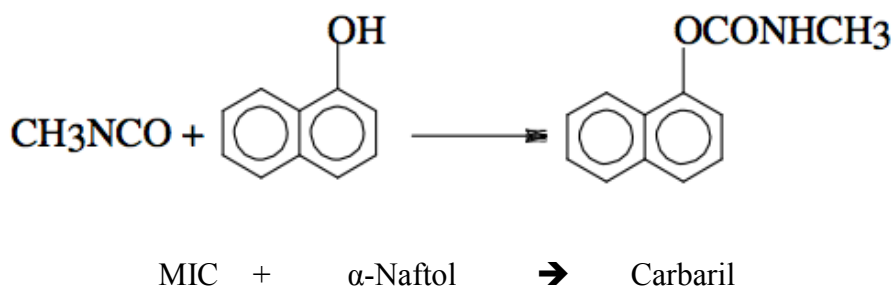
Per a la columna de destil·lació, el dispositiu que millor s'ajusta és el faldó cilíndric, ja que el nostre recipient és de grans dimensions , i aquest tipus de subjecció o suport aguanta millor el pes de la columna evitant així que es puguin produir concentracions d'esforços .

D'aquesta manera, degut a les condicions d'elevada alçada, i pes de l'equip es decideix utilitzar un faldó cilíndric per suportar el pes de l'equip sense problema algun.

En aquest reactor es produeix la reacció que dona lloc al carbaril. Es tracta d'un reactor multitubular bifàsic on se porta a terme una reacció exotèrmica que té lloc en 11, 84 minuts.

### 11.7 Reactor catalític, R-601

La reacció que hi té lloc és la següent:



Per dissenyar el sistema s'ha seguit la patent 4,278,807 on apareixen dades del mateix reactor a escala laboratori i s'ha escalat mantenint el temps de residència i la producció.

### 11.7.1 Modelat del reactor

El reactor s'ha simulat com un bescanviador de calor pel fet de que sigui un reactor multitubular. En aquest cas és bifàsic ja que per l'interior dels tubs hi circula una mescla dels tres reactius en estat líquid i la resina Amberlist 21 en estat sòlid.

En primer lloc s'agafen el valors de les mides i el cabal d'entrada trobat a la patent i es calcula la velocitat superficial i amb aquesta, el temps de residència.

En la taula 11.7.1. apareixen els valors trobats a la patent.

**Taula 11.7.1.** Dades exposades a la patent

TABLE I				
CONTINUOUS REACTIONS				
REACTION OF MIC WITH 1-NAPHTHOL OVER				
AMBERLYST A-21 ION EXCHANGE RESIN				
Example Number	I	II	III	IV
Feed Composition, wt. %:				
1-Naphthol	18.0	18.1	18.0	17.9
MIC (methyl isocyanate)	7.2	6.3	7.2	7.5
Toluene	74.8	75.6	74.8	74.6
MIC: 1-Naphthol mole ratio:	1.01	0.87	1.01	1.05
Feed Rate, cc/min.:	40	25	25	32
Temperature, °C.: Jacket:	85	84	83	83
Reactor Bottom	76	84	74	74
Reactor Middle	94	91	93	92
Reactor Top	87	87	88	88
Product (1-Naphthyl methylcarbamate) Yield, %	85.3	86.5	91.2*	88.2
Productivity:				
lb. Product/lb Resin/hr	5.4	2.4	3.2	4.2
Product Purity:	99.8	99.8	99.8	—

$$V_s = \frac{Q_v}{A} = 0,049 \text{ m/min} \quad \text{Equació 11.7.1}$$

$$\tau = \frac{h}{V_s} = 11,841 \text{ min} \quad \text{Equació 11.7.2}$$

$$A = \pi \cdot r^2 \quad \text{Equació 11.7.3}$$

On:

A = Àrea de pas del fluid, (m<sup>2</sup>)

$Q_L$  = Cabal volumètric de fluid, (m<sup>3</sup>/s)

$V_s$  = Velocitat superficial del fluid, (m/s)

$\tau$  = Temps de residència (min)

**Taula 11.7.1.** Resum dels resultats i dades del reactor en la patent

<b>Diàmetre (in)</b>	1
<b>Alçada (m)</b>	0,5842
<b>Secció del tub (cm<sup>2</sup>)</b>	5,067074791
<b>Qv (cm/min)</b>	25
<b>Vs (m/s)</b>	0,000822302
<b><math>\tau</math> (min)</b>	11,84
<b>Productivitat (Kg<sub>prod</sub>/h)</b>	0,32

A partir d'aquestes dades es fa el disseny del reactor industrial. Per fer-lo es fa un escalat aproximat del reactor del laboratori, el de la patent, al reactor industrial.

Per fer aquest escalar es parteix de la suposició que  $\tau_{laboratori} = \tau_{industrial} = 11,84$  min. Per tant s'utilitza un factor que multipliqui l'alçada i la velocitat superficial del laboratori per obtenir la industrial, en el nostre cas aquest factor es de 3,45.

El diàmetre intern dels tubs on tindrà lloc la reacció pot variar de 1,5 in a 2,5 in que són els valors típics per aquest tipus de reactors. Per aquest modelat es va escollir com a diàmetre intern dels tubs 1,5 in.

A partir del diàmetre intern i l'alçada del reactor es poden anar calculant les altres variables del reactor a escala industrial com la secció del tubs, el cabal volumètric i cabal màssic per a cada tub i el número de tubs, que es calculen a partir del cabal de carbaril i de la productivitat ja que la productivitat esta referida als Kg de producte que es formen cada hora. La productivitat també es recalcula a partir del factor d'escalat i dels Kg<sub>resina</sub> utilitzats a escala industrial.

$$h_{industrial} = h_{laboratori} \cdot 3,45 \quad \text{Equació 11.7.4}$$

$$V_{s_{industrial}} = V_{s_{laboratori}} \cdot 3,45 \quad \text{Equació 11.7.5}$$

$$S_{industrial} = \pi \cdot r_{industrial}^2 \quad \text{Equació 11.7.6}$$

$$Qv = V_{s_{industrial}} \cdot S_{industrial} \quad \text{Equació 11.7.7}$$

$$Q_{m \ 1 \ tub} = \rho_{carbaryl} \cdot Qv \quad \text{Equació 11.7.8}$$

$$Kg_{resina} = D_i^2 \cdot 3,45 \cdot 0,1 \quad \text{Equació 11.7.9}$$



$$Productivitat_{industrial\ 1\ tub} = Productivitat_{laboratori} \cdot (Kg_{resina})$$

Equació 11.7.10

Per últim es calcula el número de tubs necessaris per poder produir la quantitat de carbaril demandada. Aquest càlcul es realitza en base a la sortida del reactor, es a dir, les dades de la patent estan referides a la sortida del reactor i la productivitat també, per tant, es necessari conèixer el cabal de carbaril de surt del tercer reactor per a poder dimensionar-lo.

$$N_{tubs} = Q_{m\ total} \cdot Productivitat_{industrial\ 1\ tub}$$

Equació 11.7.10

**Taula 11.7.2.** Resum dels resultats i dades del reactor a escala industrial

<b>Diàmetre (in)</b>	1,5
<b>Alçada (m)</b>	2,015
<b>V<sub>s</sub> (m/s)</b>	0,00284
<b>Secció del tub (m<sup>2</sup>)</b>	0,001140
<b>Q<sub>v 1 tub</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	3,23E-06
<b>Densitat<sub>carbaril</sub> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,2
<b>Cabal màssic<sub>1 tub</sub> (Kg/h)</b>	13,973
<b>Productivitat<sub>1 tub</sub> (Kg/h)</b>	2,484
<b>Cabal total (Kg/h)</b>	1609,4247
<b>Nº tubs</b>	648
<b>Kg<sub>resina</sub> 1 tub</b>	0,7763
<b>Kg<sub>resina</sub> totals en el reactor</b>	503,01

### 11.7.2 Característiques corrents d'entrada i sortida del reactor

Del cabal d'entrada de la patent s'obté al balanç de matèria tant d'entrada com de sortida, ja especificat anteriorment en la memòria.

A les taules següents es poden observar dades referides als corrents d'entrada i sortida del reactor.

El corrent d'entrada dels reactants es troba a una pressió de 1 atm i una temperatura de 74 °C. A la sortida aquest corrent es troba a 1 atm de pressió i 88 °C.

**Taula 11.7.3.** Corrent d'entrada i sortida del reactor

Nom	Corrent 33a	Corrent 35
Temperatura (°C)	74	88
Pressió (KPa)	101,325	101,325
Fracció de vapor	1	1
Cabal màssic (Kg/h)	7109,915	7109,915
Cabal Volumètric (m <sup>3</sup> /h)	8,168	8,149
Densitat (Kg/m <sup>3</sup> )	870,468	872,504
Entalpia (KJ/Kg)	-346,918	-334,402
<b>FRACCIÓ MASSICA</b>		
Naftol	0,1837	0,0178
Mic	0,0720	0,0063
Carbaril	0	0,2316
Toluè	0,7443	0,7443
<b>CABAL MASSIC (kg/h)</b>		
Naftol	1306,43	126,76
Mic	511,87	45,04
Carbaril	0	1646,48
Toluè	5291,63	5291,63

### 11.7.3 Balanç d'energia

El balanç d'energia al reactor es determina a partir de l'equació 11.5.1. amb una conversió del 91,2%.

$$q = 9710,21 - 94962,04 - 20418,66 = -105,65 \text{ KW}$$

Es calcula l'àrea de transferència de calor necessària per poder bescanviar tot el calor generat.

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad \text{Equació 11.7.11}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2}\right)} \quad \text{Equació 11.7.12}$$

On:

$q$  = Calor alliberat de la reacció, (W)

$U$  = Coeficient global de transferència de calor, ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )

$A$  = Àrea de bescanvi necessària, ( $\text{m}^2$ )

$\Delta T_{\text{ml}}$  = Temperatura mitja logarítmica

$T_1$  = Temperatura d'entrada al reactor, ( $^\circ\text{C}$ )

$T_2$  = Temperatura de sortida del reactor, ( $^\circ\text{C}$ )

$t_1$  = Temperatura d'entrada de fluid tèrmic, ( $^\circ\text{C}$ )

$t_2$  = Temperatura de sortida del fluid tèrmic, ( $^\circ\text{C}$ )

Per al càlcul del coeficient de transferència global de calor s'ha utilitzat una correlació trobada en un llibre de la bibliografia. (*Trambouze, Chemical Reactors, 2002, Chapter 7 Reactors Employing a Fluid Phase and a Catalytic Solid Phase, pàg 427.*)

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_L} + \frac{e A_L}{\lambda A_m} + \frac{1 A_L}{h_e A_e} \quad \text{Equació 11.7.13}$$

Es fa la suposició que el material és suficientment conductiu per tant l'equació anterior queda de la forma següent:

Simplificació:

· El terme  $e/\lambda$  es pot eliminar i  $A_L \approx A_e \approx A_m$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_L} + \frac{1}{h_e} \quad \text{Equació 11.7.14}$$

Per a calcular  $h_L$  s'utilitza la fórmula següent també extreta del llibre de (*Trambouze, Chemical Reactors, 2002, Chapter 7 Reactors Employing a Fluid Phase and a Catalytic Solid Phase, pàg 427.*)

$$\frac{h_L d_t}{\lambda_F} = 1,22 \left( \frac{\bar{d}_t G}{\mu_F} \right)^{0,83} \left( \frac{C_{PF} \mu_F}{\lambda_F} \right) d_t^{0,17} \quad \text{Equació 11.7.15}$$

On:

$h_L$  és el coeficient de transferència de la pel·lícula en el costat del llit, (W/m<sup>2</sup>K)

$h_e$  és el coeficient de transferència de la pel·lícula en el costat del fluid intercanvi, (W/m<sup>2</sup>K)

$e$  és el gruix de la paret de la canonada (m)

$\lambda$  és conductivitat tèrmica del material de la canonada (W/m K)

$A_L$  és superfície d'intercanvi mesurat al costat del llit (m<sup>2</sup>)

$A_e$  és àrea de superfície d'intercanvi de mesura al costat del fluid de refredament (m<sup>2</sup>)

$A_m$  és mitjana logarítmica entre  $A_L$  i  $A_e$  (m<sup>2</sup>)

$\lambda_F$  és la conductivitat tèrmica del fluid per a les condicions de pel·lícula

$d_t$  és el diàmetre del tub del reactor

$\bar{d}_t$  és el diàmetre equivalent de la partícula

**Taula 11.7.4.** Resum dels resultats i dades necessàries per al càlcul de U

<b><math>d_t</math> (m)</b>	0,038
<b><math>d_p</math> (m)</b>	0,001
<b>densitat (kg/m<sup>3</sup>)</b>	872,504
<b>G (kg/m<sup>2</sup> s)</b>	2,475
<b><math>\mu_F</math> (N s/m<sup>2</sup>)</b>	3,28E-04
<b><math>C_p</math> (J/Kg K)</b>	1832,963
<b><math>\lambda</math> (W/m<sup>2</sup> K)</b>	0,118

**Taula 11.7.5.** Resum dels resultats i dades del càlcul de U

<b><math>h_e</math> (W/m<sup>2</sup>*K)</b>	150
<b><math>h_L</math> (W/m<sup>2</sup>*K)</b>	39,462
<b>U (W/m<sup>2</sup>*K)</b>	31,243

**Taula 11.7.6.** Resum dels resultats i dades del càlcul del flux de calor i del àrea de bescanvi

<b>T<sub>1</sub></b>	74
<b>T<sub>2</sub></b>	88
<b>t<sub>1</sub></b>	40
<b>t<sub>2</sub></b>	60
<b>q (W)</b>	-105670,493
<b>Àrea besc tubs (m2)</b>	109,445

Cal fer l'incís que per càlcul del salt tèrmic que té lloc a la banda del refrigerant a de ser més gran que el salt tèrmic del fluid d'operació ja que es parteix que la màxima temperatura que pot haver al reactor es la de 90°C en la part intermèdia.

Per calcular el cabal del fluid tèrmic refrigerant necessari per poder extreure la calor generada es calcula a partir de l'equació 11.7.16.:

$$M_s = \frac{q}{C_p \cdot \Delta T} \quad \text{Equació 11.7.16}$$

On:

$M_s$  = Cabal màssic de fluid tèrmic, Kg/s

$q$  = Flux de calor generat de la reacció, W

$C_p$  = Capacitat calorífica del fluid tèrmic, (W/s)/(Kg·K)

$\Delta T$  = Variació de temperatura del fluid tèrmic

**Taula 11.7.7.** Resum dels resultats i dades del càlcul del cabal de refrigerant

<b>q (W)</b>	-105.670,493
<b>C<sub>ps</sub> (J/Kg*K)</b>	1935
<b>T<sub>2</sub></b>	60
<b>T<sub>1</sub></b>	40
<b>M<sub>s</sub> (kg/s)</b>	2,731

A partir del càlcul del cabal necessari de refrigerant es passa al càlcul de la velocitat amb la qual circula el oli tèrmic per la carcassa.

**Taula 11.7.8.** Resum dels resultats i dades del càlcul de la velocitat del fluid tèrmic

<b>Densitat oli (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	942,65
<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,00287
<b>Àrea de pas (m<sup>2</sup>) per carcassa</b>	0,01004
<b>velocitat (m/s)</b>	0,286
<b>viscositat (Cp)</b>	5,535
<b>μ (Kg/ms)</b>	0,00553
<b>Re carcassa</b>	4730,576

Aquest Reynolds indica que hi ha turbulència dintre de la carcassa per on circula el fluid refrigerant, encara que la velocitat del oli tèrmic sigui de 0,238 m/s. És una velocitat baixa, per adequada per aquest tipus de situacions ja que una velocitat de pas del oli elevada podria provocar problemes de corrosió.

#### 11.7.4 Càlcul de la pèrdua de carrega al reactor.

La pèrdua de carrega al reactor també es calcula mitjançant una correlació trobada al llibre de (*Trambouze, Chemical Reactors, 2002, Chapter 7 Reactors Employing a Fluid Phase and a Catalytic Solid Phase, pàg 418.*)

##### Equació de Ergun

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = A \frac{\varepsilon_p^2}{(1 - \varepsilon_p)^3} \frac{\mu_F V_{SF}}{d_p^2} + B \frac{\varepsilon_p}{(1 - \varepsilon_p)^3} \frac{\rho_F V_{SF}}{d_p} \quad \text{Equació 11.7.17}$$

On:

$$A = 150$$

$$B = 1,75$$

$\varepsilon_p$  fracció de volum ocupat pel sòlid

$(1 - \varepsilon_p)$  Fracció buida del llit

$\mu_F$  és la viscositat del fluid (N s/m<sup>2</sup>)

$V_{SF}$  és la velocitat superficial del fluid (m/s)

**Taula 11.7.9.** Resum dels resultats i dades del càlcul pèrdua de carrega

<b>A</b>	150
<b>B</b>	1,75

<b>Ep</b>	0,58
<b>1-Ep</b>	0,42
<b>AP/AL (Pa/m)</b>	38613,489
<b>AP (Pa)</b>	77825,101

### 11.7.5 Disseny mecànic

Per fer el disseny del reactor s'utilitza com a base el mètode de Kern. Aquest mètode és el que s'utilitza per al disseny dels bescanviadors de calor i com que el reactor R-601 és multitubular i té una estructura física semblant a un bescanviador, els càlculs del diàmetre de carcassa, diàmetre del feix de tubs, entre altres variables, es basen en el mètode de Kern.

#### · Disseny mecànic del tubs

El reactor consta de dues parts: la part interna, que fa referència al feix de tubs, on es troba el catalitzador i on tindrà lloc la reacció de producció del carbaril i la part externa del reactor, la carcassa, per on circularà el fluid refrigerant, en aquest cas, un oli tèrmic.

En aquest apartat es calcula l'espessor que han de tindre els tubs interns. Aquest espessor es calcula utilitzant el codi ASME.

El material utilitzat per als tubs i carcassa és el AISI 316L, ja que té una bona resistència a l'oxidació fins a temperatures de 900° i però no es garanteix les propietats a la deformació per sobre de 500°C. En qualsevol cas, la màxima temperatura a la qual pot arribar el reactor durant la reacció de producció és de 90°C, dada donada en la patent 4,278,807, i té lloc en la zona central del reactor.

La pressió de disseny es calcula mitjançant les equacions 11.5.10 i 11.5.11. Cal tenir en compte però, que com es treballa a pressió atmosfèrica al reactor a l'hora de fer el disseny s'agafa el valor de la pressió relativa, que és de 0,5 bar.

El càlcul de l'espessor per la paret cilíndrica es realitza a partir del procediment del codi ASME, ja descrit en apartats anteriors, 11.4.1.4. Disseny mecànic del tanc de mescla. La taula 11.7.10 en mostra els resultats.

**Taula 11.7.10.** Resum dels resultats i dades del càlcul del espessor dels tubs

<b>Material</b>	AISI 316L
<b>T<sub>disseny</sub> (°C)</b>	110

<b>P<sub>disseny</sub> (bar)</b>	1,424
<b>Factor estrés, S (bar)</b>	1082,474
<b>D<sub>int</sub> (mm)</b>	38,1
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	0,0295
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	2,232
<b>t (gruix total) (mm)</b>	3
<b>P màxima (bar)</b>	132,389

Seguidament es calcula el pes dels tubs buits, per aquest càlcul fa falta conèixer la densitat del material del qual estan fet els tubs com el àrea lateral del tubs.

$$A_{lateral} = L \cdot \pi \cdot D_e \quad \text{Equació 11.7.18}$$

$$Pes_{1\ tub} = \rho_{material} \cdot \text{àrea}_{lateral\ total} \cdot \text{espessor} \quad \text{Equació 11.7.19}$$

Per saber el pes total de tubs es multiplica el pes<sub>1 tub</sub> per el número de tubs.

**Taula 11.7.11.** Resum dels resultats i dades del pes del tubs buits

<b>Densitat AISI 316L (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	7960
<b>Pes 1 tub (Kg)</b>	6,668
<b>Pes dels tubs (Kg)</b>	4420,963

A continuació de calcula el pes del tubs plens d'aigua i plens del fluid d'operació, aquests pesos se li suma el pes del catalitzador per obtenir el pes total dels tubs.

$$Pes_{total} = Pes_{tubs} + Pes_{catalitzador} + Pes_{liquid} \quad \text{Equació 11.7.20}$$

**Taula 11.7.12.** Resum dels resultats i dades pes dels tubs plens

<b>Aigua (Kg)</b>	8435,270
<b>Mescla (Kg)</b>	7930,481
<b>Pes catalitzador (Kg)</b>	514,653
<b>Pes total aigua (Kg)</b>	8949,923
<b>Pes en operació (Kg)</b>	8445,135

### · Disseny mecànic de la carcassa

Tot seguit es mostra com es dissenya la part externa del reactor, la part de la carcassa. Abans de passar a l'explicació, en aquest disseny mecànic consta de dues parts, la primera on s'explicarà com es dimensiona la carcassa seguint el mètode de Kern i la segona on es calcula l'espessor de la carcassa seguint el codi ASME.



Per a la primera part, es calcula, primerament el diàmetre del feix de tubs ( $D_b$ ) decidint que els tubs estaran col·locats amb un pitch triangular i amb un sol pas del fluid refrigerant per la carcassa. Per sàpigner la distància entre el feix de tubs i la carcassa ( $D_s'$ ) s'ha d'escollir un tipus de carcassa, per aquest disseny es va decidir que el tipus de carcassa seria de tipus T ( Pull- through floating head).

$$D_b = D_e \left( \frac{N_t}{K_1} \right)^{1/n_1} \quad \text{Equació 11.7.21}$$

$$D_s = D_b + D_s' \quad \text{Equació 11.7.22}$$

On:

$D_b$  és el diàmetre del feix de tubs en (m)

$D_s'$  és l'espai entre el feix de tubs i la carcassa en (m)

$D_s$  és el diàmetre de carcassa en (m)

$D_s'$  depèn de tipus de carcassa, i es troba gràficament.

**Taula 11.7.13.** Resum dels resultats i dades del càlcul diàmetre de carcassa

<b><math>D_i</math> (m)</b>	0,0381
<b>Espessor tubs (m)</b>	0,0030
<b><math>D_e</math> (m)</b>	0,0441
<b>pitch triangular</b>	0,0551
<b><math>k_1</math></b>	0,3190
<b><math>n_1</math></b>	2,1410
<b><math>d_b</math> (m)</b>	1,5467
<b><math>D_s'</math> (m)</b>	0,1000
<b><math>D_s</math> (m)</b>	1,6467

El diàmetre de carcassa s'ajusta a un diàmetre nominal, per tant, el diàmetre de carcassa queda amb el valor de:

**Taula 11.7.14.** Ajust del diàmetre de carcassa

<b><math>D_s</math> calculat (m)</b>	1,663
<b><math>D_s</math> calculat (in)</b>	65,485
<b><math>D_s</math> ajustat (in)</b>	66
<b><math>D_s</math> final (m)</b>	1,676

Aquest diàmetre de carcassa ( $D_s$ ) es diàmetre intern on estarà situat el feix de tub i l'espai restant entre  $D_s$  i  $D_b$  es per on circularà el fluid refrigerant sense tenir en compte el seu espessor.

Per tal de poder unir els tubs on es troba el catalitzador amb els capçals del reactor es suma 4 cm per cada banda del feix de tubs.

Llavors ja es pot calcular l'alçada total del reactor, sense tenir en compte l'alçada dels capçals superior e inferior, i també es pot calcular àrea de carcassa, el volum del reactor i el volum que ocupa el feix de tubs.

En canvi per al càlcul de l'àrea de bescanvi que tenim al reactor, on es durà a terme l'intercanvi de calor entre el fluid refrigerant i la superfície del tub no es pot considerar l'alçada total sinó la longitud dels tubs, es a dir, la longitud que es ocupada per la resina i on es produeix la reacció.

**Taula 11.7.15.** Resum dels resultats i dades del càlcul diàmetre de carcassa

<b>Capçal (cm per banda)</b>	4
<b>h total (m)</b>	2,095
<b>h tubs (m)</b>	2,015
<b>Àrea besc tubs (m<sup>2</sup>)</b>	185,132
<b>Àrea carcassa (m<sup>2</sup>)</b>	11,036
<b>Volum (m<sup>3</sup>)</b>	4,625
<b>Volum sobrediemencionat (m<sup>3</sup>)</b>	5,781
<b>Volum<sub>tubs</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	4,022

#### **N. Càlcul de l'espessor a la paret del reactor**

Per al càlcul del espessor de la paret del reactor cal conèixer les característiques de treball, la temperatura disseny (Td) i pressió disseny (Pd), diàmetre intern (Di), factor de soldadura (E) i el factor d'estres del material (S).

Tal com s'ha explicat anteriorment el material utilitzat per fer el disseny del conjunt del reactor és AISI 316L.

La pressió de disseny es calcular mitjançant les equacions 11.5.10 i 11.5.11, cal tenir en compte però, que com es treballa a pressió atmosfèrica al reactor a l'hora de fer el disseny s'agafa el valor de la pressió relativa, que es de 0,5 bar.

La temperatura de disseny ve determinada per l'equació 11.5.12.

El càlcul de l'espessor per la paret cilíndrica es realitza a partir del procediment del codi ASME, ja descrit en apartats anteriors, 11.4.1.4. Disseny mecànic del tanc de mescla. La taula 11.7.10 en mostra els resultats.

Les dades utilitzades per al càlcul i l'espessor són:

**Taula.11.7.16.** Resum dels resultats i dades del espessor a la paret del cilindre

<b>Material</b>	AISI 316L
<b>T<sub>disseny</sub> (°C)</b>	110
<b>P<sub>disseny</sub> (bar)</b>	0,7951
<b>Factor estrès, S (bar)</b>	1082,474
<b>D<sub>int</sub> (mm)</b>	1676,4
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	0,7069
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	2,977
<b>t (gruix total) (mm)</b>	4
<b>P màxima (bar)</b>	4,378

#### **O. Càlcul de l'espessor al capçal**

Per al disseny del capçal de la columna s'ha escollit el toriesfèric ja que la pressió de treball es baixa.

El material que s'utilitza per aquesta secció de la columna es també AISI 316, i es mantenen els valors utilitzats del factor de soldadura i del factor d'estrès.

Per al càlcul del espessor del capçal del toriesfèric es segueix la equació del codi ASME, ja descrita 11.4.22 i pel càlcul de la pressió màxima a suportar, l'equació 11.4.23.

**Taula. 11.7.17.** Resum dels resultats i dades del espessor al capçal

<b>Tipus</b>	Toriesfèric
<b>Material</b>	AISI 316L
<b>Factor estrès, S (bar)</b>	1082,474
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>R (mm)</b>	1676,4
<b>r (mm)</b>	167,64
<b>L/r</b>	10
<b>M</b>	1,54
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	1,088
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	3,397
<b>t (gruix total) (mm)</b>	4
<b>P màxima (bar)</b>	2,850

Per al càlcul de l'alçada total del capçal s'utilitza les equacions de l'empresa alemanya *WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH*, ja comentada anteriorment, equació 11.4.24.

Els resultats es mostren en la taula 11.7.18:

**Taula. 11.7.18.** Resum dels resultats i dades del alçada al capçal

<b>R (mm)</b>	1676,4
<b>r (mm)</b>	167,64
<b>h<sub>1</sub> (mm)</b>	14
<b>h<sub>2</sub> (mm)</b>	322,563
<b>h<sub>3</sub> (mm)</b>	336,563

Ara es calcula el volum del capçal, per aquest càlcul s'utilitza l'equació 11.4.25. (*L. Brownell, E. Young*).

**Taula. 11.7.19.** Resum dels resultats i dades del volum al capçal

<b>V<sub>e</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,387
<b>V<sub>i</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,381
<b>V paret (m<sup>3</sup>)</b>	0,0055

### **P. Càlcul de l'espessor al fons del reactor**

El procediment del càlcul es el mateix que s'utilitza al càlcul del espessor del capçal superior del reactor.

Per al càlcul del espessor del fons del toriesfèric es segueix la fórmula del codi ASME, equació 11.4.26.

Aquest espessor se li suma un valor de tolerància a la corrosió de (2 mm) i es sobredimensiona un 10% arrodonint a l'alça.

La màxima pressió que suporta el capçal del fons ve determinada per l'equació 11.4.27.

**Taula. 11.7.20.** Resum dels resultats i dades del espessor del fons

<b>Tipus</b>	Toriesfèric
<b>Material</b>	AISI 316L
<b>Factor estrés, S (bar)</b>	1082,474

<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>L (mm)</b>	1676,4
<b>r (mm)</b>	167,64
<b>L/r</b>	10
<b>M</b>	1,54
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	1,088
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	3,397
<b>t (gruix total) (mm)</b>	4
<b>P màxima (bar)</b>	2,850

Per al càlcul de l'alçada del fons del reactor es segueix el mateix procediment que en el càlcul de l'alçada del capçal i els resultats obtinguts s'exposen a continuació:

**Taula. 11.7.21.** Resum dels resultats i dades del alçada del fons

<b>R (mm)</b>	1676,4
<b>r (mm)</b>	167,64
<b>h<sub>1</sub> (mm)</b>	14
<b>h<sub>2</sub> (mm)</b>	322,563
<b>h<sub>3</sub> (mm)</b>	336,563

Ara es calcula el volum del capçal, per aquest càlcul s'utilitza l'equació 11.4.25. (*L. Brownell, E. Young*).

**Taula. 11.7.22.** Resum dels resultats i dades del volum del fons

<b>V<sub>e</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,386
<b>V<sub>i</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,381
<b>V paret (m<sup>3</sup>)</b>	0,00548

### **Q. Càlcul de l'alçada total i superfície lateral del reactor**

Per al càlcul de l'alçada total del reactor es fa mitjançant la fórmula següent:

$$H_{total} = h_{capçal} + h_{fons} + h_{total} \quad \text{Equació 11.7.23}$$

Per al càlcul de l'àrea lateral d'un cilindre s'utilitza la fórmula:

$$A_{lateral} = L \cdot \pi \cdot D_e \quad \text{Equació 1.7.24}$$

**Taula 11.7.23.** Resum dels resultats i dades alçada total i àrea lateral

<b>H total (m)</b>	2,768
<b>L (m)</b>	2,095
<b>Àrea lateral (m<sup>2</sup>)</b>	11,088

### **R. Càlcul del reactor buit**

Per càlcul del pes de carcassa s'ha de tenir en compte la densitat del material utilitzat i l'àrea lateral de la carcassa.

$$Pes_{carcassa} = \rho_{material} \cdot \text{àrea}_{lateral\ total} \cdot \text{espessor} \quad \text{Equació 11.7.25}$$

Aquest pes la carcassa, que dona com a resultat de l'Equació 11.7.25. és sobredimensiona un 10%, per tenir en compte el pes de tots els elements interns, com ara distribuïdors i recol·lectors de líquids, com els externs, com ara la subjecció del reactor mitjançant faldons.

El càlcul del reactor buit es realitza a partir de l'equació següent:

$$Pes_{carcassa} = Pes_{tubs\ interns} + Pes_{carcassa} \quad \text{Equació 11.7.26.}$$

**Taula. 11.7.24.** Resum dels resultats i dades del càlcul del pes del reactor buit

<b>Densitat AISI 316L (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	7960
<b>Pes carcassa (Kg)</b>	440,336
<b>Pes carcassa sobredimensionat (Kg)</b>	484,369
<b>Pes reactor buit (Kg)</b>	4905,333

### **S. Càlcul del reactor ple**

Per al càlcul del reactor ple es calcula tenint en compte el pes de la carcassa i dels tubs plens ja sigui d'aigua com del fluid d'operació més el pes del catalitzador.

$$Pes_{reactor\ ple} = Pes_{tubs\ plens} + Pes_{carcassa\ plena} + Pes_{catalitzador} \quad \text{Equació 11.7.27}$$

**Taula. 11.7.25.** Resum dels resultats del càlcul del pes del reactor ple

<b>Pes carcassa Aigua (Kg)</b>	6265,252
<b>Pes carcassa operació (Kg)</b>	5944,349
<b>Pes catalitzador (Kg)</b>	514,653
<b>Pes tubs aigua (Kg)</b>	8949,923
<b>Pes tubs operació(Kg)</b>	8445,135

<b>Pes del reactor aigua (Kg)</b>	15215,176
<b>Pes del reactor operació (Kg)</b>	14389,484

### **11.7.6 Càlcul del espessor d'aïllament**

Per tal de realitzar un aïllament adequat per aquest equip s'empra el programa Insulan proporcionat per l'empresa CALORCOL S.A.

Les característiques introduïdes al programa per tal de treballar amb llana mineral de roca com a manta aïllant de  $80\text{Kg/m}^3$ , han estat:

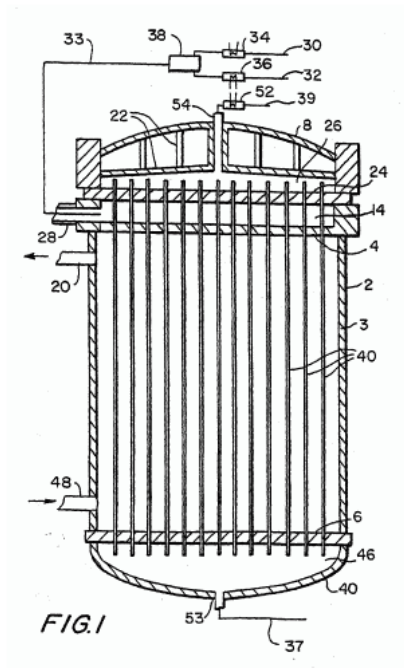
- Temperatura Interior =  $88\text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura Superficial del Aïllant =  $35\text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura Ambient =  $16,9\text{ }^\circ\text{C}$  (és la mitjana del territori)
- Velocitat de l'aire =  $2,7\text{ m/s}$  (velocitat mitjana en direcció nord- oest)
- Superfície exterior de l'aïllament = Acer inoxidable brut (Emissivitat de 0,3)
- Superfície sense aïllant = Hastelloy B-2 (Suposant emissivitat de 0,3)

El resultat obtingut és d'un aïllament de  $2,54\text{ cm}$  amb una eficiència del  $91,83\%$ .

### **11.7.7 Elements interns del reactor**

Els reactors empacats necessiten tant suports superiors com inferiors per mantenir les partícules catalítiques fixades en el seu lloc.

A part, aquest tipus de reactor necessita també un distribuïdor de líquid en la part inferior que es per on entra l'aliment i que el distribueixi uniformement per tots els tubs on es troba el catalitzador. A més en la part superior del reactor és necessària la presència d'un col·lector del líquid, per tal d'ajuntar tot el líquid i així poder extreure'l del reactor.



**Figura 11.7.1.** Exemple de reactor multitubular catalític.

## 11.8 Columna d'absorció, CA-301/302

L'objectiu de la columna d'absorció es eliminar HCl generat com a producte de la reacció de formació del MCC. En aquesta columna, s'absorbeix el HCl en estat gas mitjançant una corrent líquida de Toluè.



Aquestes dos columnes d'absorció CA-301 i CA-302, treballen a les mateixes condicions, tan de cabals a tractar com de les condicions d'operació, per tant, el disseny que s'explicarà a continuació es vàlid per les dues, encara, que el realitat quan es posin a funcionar es probable que no treballin de forma idèntica però aquesta última premissa no es té en compte a l'hora de fer el disseny.

**Taula 11.8.1.** Especificacions dels corrents de la columna CA-301/A

<b>Nom</b>	<b>Corrent 6</b>	<b>Corrent 8</b>	<b>Corrent 13</b>	<b>Corrent 9</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	10	100	20,99	73,19
<b>Pressió (kPa)</b>	101,325	101,325	101,325	101,325
<b>Fracció de vapor</b>	0	1	1	0
<b>Cabal màssic (kg/h)</b>	1825,98	632,91	180,85	2278,20
<b>Cabal Volumètric (m3/h)</b>	2,080	285,09	100,47	2,59
<b>Densitat (kg/m3)</b>	877,87	2,22	1,80	878,16
<b>Entalpia (kJ/kg)</b>	113,476	-2006,589	-2294,865	-316,178
<b>FRACCIÓ MASSICA</b>				
<b>MMA</b>	0	0	0	0
<b>Fosgè</b>	0	0,1598	0,1379	0,0334
<b>MCC</b>	0	0,6044	0	0,1680
<b>HCl</b>	0	0,2356	0,7906	0,0027
<b>Toluè</b>	0,9999	0	0,07138	0,7958
<b>CABAL MASSIC (Kg/h)</b>				
<b>MMA</b>	0	0	0	0
<b>Fosgè</b>	0	101,18	24,95	76,22
<b>MCC</b>	0	382,57	0,000	382,76
<b>HCl</b>	0	149,17	142,99	6,16
<b>Toluè</b>	1825,98	0	12,91	1813,06

Per a dimensionar la columna d'Absorció s'ha utilitzat el programa de Aspen Hysys.

El simulador ens dona informació sobre:

- Pressió de treball
- El número d'etapes teòriques
- Les característiques dels cabals que entren i surten del absorbidor
- Un disseny més detallat on dóna informació del diàmetre, alçada i tipus de rebliment de la columna.

### **11.8.1 Selecció del tipus de columna**

El primer pas per fer el disseny es decidir si es vol fer una columna de rebliment o de plats. Per decidir entre una i l'altra es van seguir els passos que marca el llibre de la bibliografia ( *Wankat, Ingeniería de procesos de separación 2007, capítulo 10, Diseño de columnas de platos y empacadas, pág 301*)

Condicions favorables per a una columna de plats

- Diàmetres de columna grans ( $> 0.7$  m)
- Cabals elevats
- Temps de residència del líquids elevats
- Més versatilitat i facilitat de modificació
- Menor cost, en especial per a cabals grans

Condicions favorables per a una columna de rebliment

- Diàmetres de columna petits ( $< 0.7$  m)
- Destil·lacions a baixa pressió
- Òptima para substàncies corrosives o que generen molta espuma
- Pèrdues de carrega petites

- Són més econòmiques que la de plats sempre que tenen menys de 2,5 ft de diàmetre.

### **11.8.2 Selecció del tipus de flux en la columna**

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

### **11.8.3 Selecció del tipus de rebliment**

En una columna de rebliment que utilitza el contacte vapor-líquid, el líquid flueix per sobre la superfície del rebliment y el vapor flueix per els forats de dintre del rebliment i entre els diferents elements del rebliment.

L'objectiu principal del rebliment es proporcionar un contacte íntim entre el vapor i el líquid i proporcionar una superfície de contacte gran per a obtenir una bona transferència de massa. El rebliment ha de permetre un buidatge del líquid i produir una baixa pèrdua de càrrega del flux de gas.

Hi ha dos tipus de rebliments: els uniformes i els aleatoris.

Per exemple, uns dels rebliments més senzills son el anells de Rasching, solen ser els menys costosos per unitat de volum, però amb freqüència són més costosos per a determinades eficiències, ja que alguns rebliments patents son més eficients. Els anells i selles individuals es descarreguen en la columna i queden distribuïts al atzar. Els aleatoris, ofereixen uns coeficients de transferència de matèria més grans però tenen pèrdues de càrrega més elevats i són els més utilitzats en l'indústria.

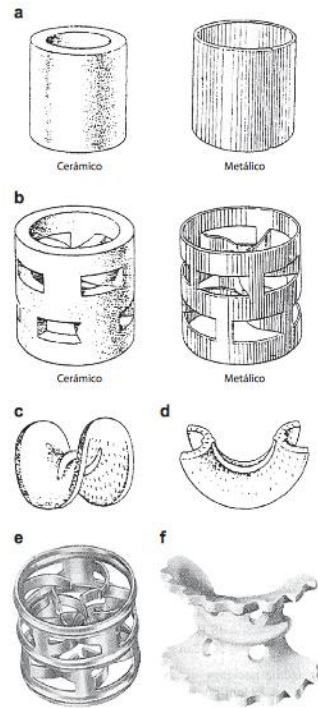


Figura 11.46. Tipos de relleno (Koch-Giltsch, L.P.). (a) Anillos Raschig. (b) Anillos Pall. (c) Silla cerámica Berl. (d) Silla cerámica INTALOX<sup>®</sup>. (e) HY-PAK<sup>®</sup> metálico. (f) SUPER INTALOX<sup>®</sup> metálico.

### Figura 11.8.1. Rebliments aleatoris

En la següent figura es mostra com es poden col·locar els rebliments aleatoris dins de la columna.

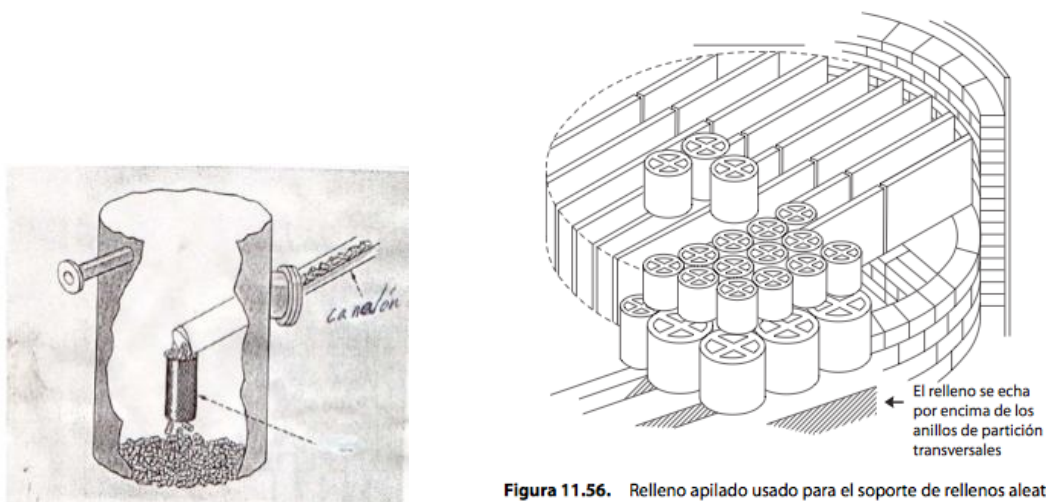
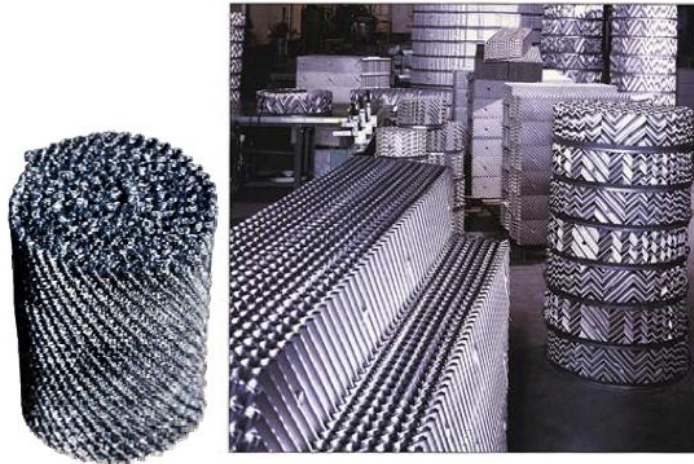


Figura 11.56. Relleno apilado usado para el soporte de rellenos aleatorios.

### Figura 11.8.2. Forma de distribució dels rebliments aleatoris

Els rebliments estructurats o ordenats com ( Glitsch, Goodloe i Koch Sulzer) es dipositen amb cura en l'interior de la columna. De forma general els rebliments estructurats tenen pèrdues de pressió menors i són més eficients que els rebliments aleatoris però solen ser també més costosos. Els uniformes son útils per a velocitats de gas elevades i per a diàmetres més grans de 0.7 m.



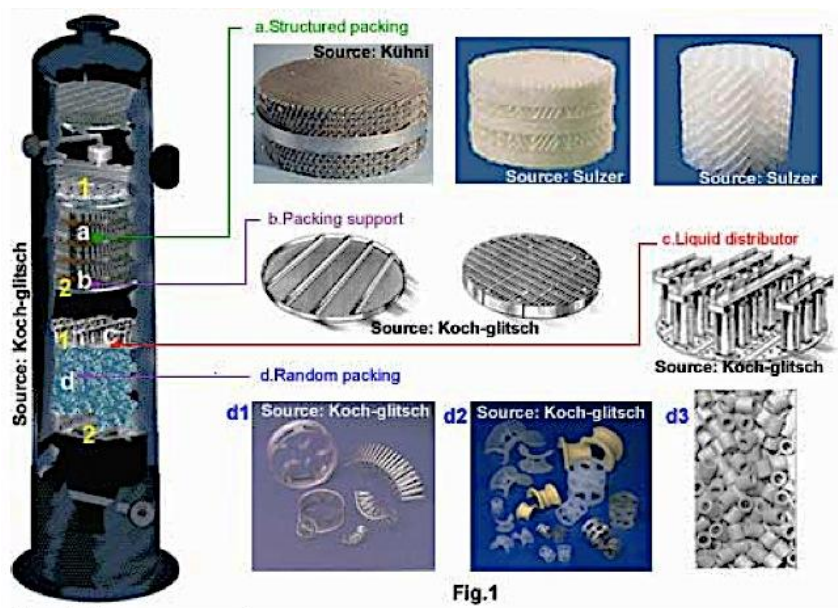
**Figura 11.8.3.** Rebliments estructurats

Els materials amb els quals es fan els rebliments poden ser variats com ara, plàstics, ceràmiques, metalls i vidres. Un dels avantatges de fer una columna de rebliments es que es poden utilitzar per a medis corrosius.

Las alçades del rebliments dintre de la columna són variades i depenen del tipus de material utilitzat en el rebliment com de la pèrdua de carrega que hi pot haver a la secció. Per a rebliments de material plàstics que poden sofrir deformació el limiten de 3 a 4 m d'alçada mentres que els metàl·lics poden suportar fins a 7,5 m.

Un altre exemple de columna d'absorció que alterna el rebliment aleatori amb el rebliment estructurat. També es mostra el tipus de suport per al rebliment com els distribuïdors del líquid.

En la Figura 11.8.4.es un mostra exemple de columna d'absorció que alterna el rebliment aleatori amb el rebliment estructurat. També es mostra el tipus de suport per al rebliment com els distribuïdors del líquid.



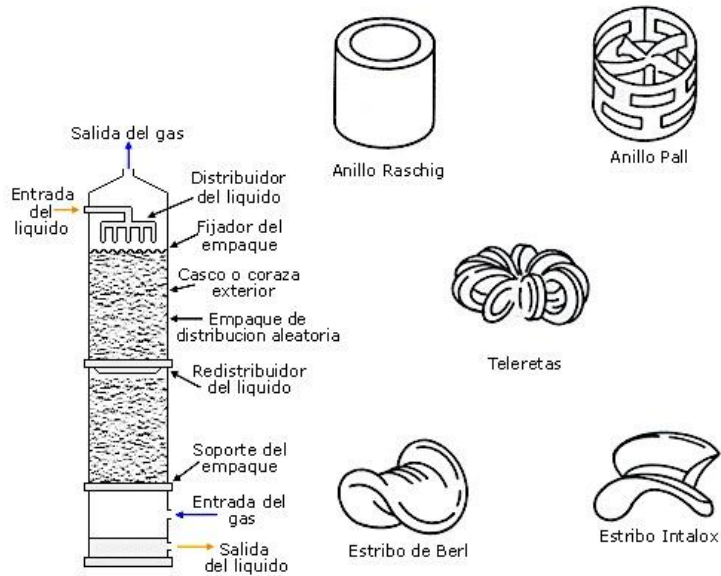
**Figura 11.8.4.** Exemple d'una torre empacada

En aquest cas de disseny (CA-301/302), s'ha escollit com a material del rebliment el tipus ceràmic, ja que és un material fort, de llarga durada i són molt útils en una gran varietat d'aplicacions de desgast i corrosió.

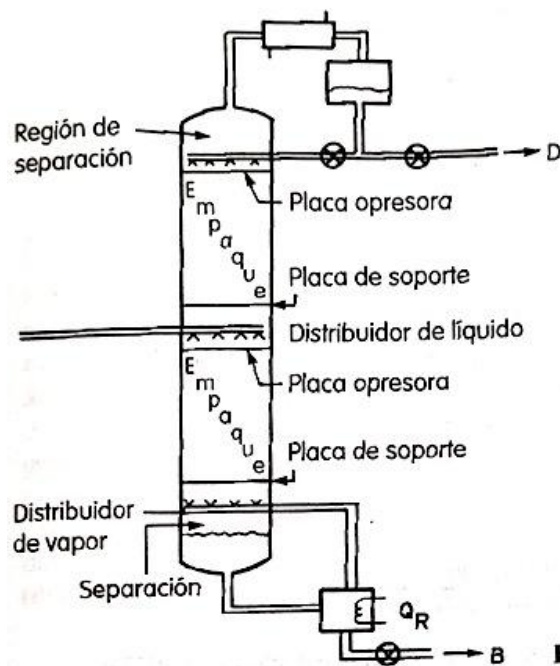
#### 11.8.4 Parts internes de les columnes de rebliments

A més de les seccions del rebliments, on es fa la separació, es necessiten seccions per distribuir el reflux, l'alimentació i el vapor del fons, així com per separar el líquid i el vapor. Els distribuïdors del líquid són molt importants per al correcte funcionament de la columna. Els rebliments aleatoris i estructurats petits necessiten que la distribució de líquid i vapor sigui millor .

En casos típics els distribuïdors tenen varies puntes de goteig. Segons, el llibre utilitzat en la bibliografia, Wankat exposa que Bonilla (1995) recomana sis (deu per a fraccionaments d'alta puresa) puntes de goteig per peu quadrat per a rebliments grans (rebliments aleatoris,  $\geq 2,5$  pulg, o rebliments estructurats amb plecs  $> 1/2$  pulg). Per a rebliments petits (aleatoris de  $\leq 1$  pulg o estructurats amb plecs  $\leq 1/4$  pulg), recomana vuit (12 per a alta puresa) puntes de goteig per peu quadrat, a altes carregues de líquid i 10 (14 per a alta puresa) puntes de goteig per peu quadrat, a baixes carregues de líquid.



**Figura 11.8.5.** Exemple d'una torre empacada amb elements interns



**Figura 11.8.6.** Exemple d'una torre empacada estreta del llibre de la bibliografia (*Wankat, Ingeniería de procesos de separación*)

EL líquid que entra a la columna es s'aboca sobre el distribuïdor i allí es reparteix per la part superior del empaquetat al que deu humidificar de forma uniforme.

Exemples de distribuïdors de líquids:

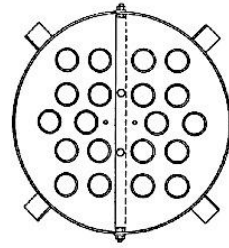


Figura 11.60. Distribuidor tipo rebosadero (Koch-Glitsch, LP).

**Figura 11.8.7.** Distribuïdor tipus sobreeixidor (koch-Glitsch)



**Figura 11.8.8.** Exemple distribuïdor de líquid de l'empresa Sulzer

La distribució del vapor es menys crítica que la del líquid, tan mateix, es molt més complicada que dissenyar que els distribuïdors del líquids.

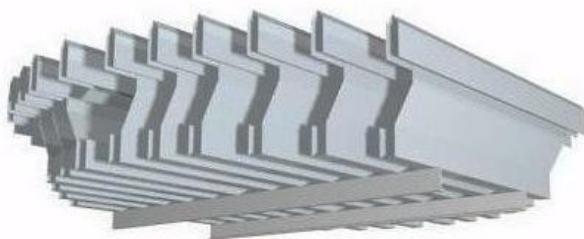
Un exemple de distribuïdor de vapor:





**Figura 11.8.9.** Exemple distribuïdor de vapor de l'empresa Sulzer

Els recol·lectors de líquid amb sistema de suport del rebliment integrat ajuden a reduir a l'alçada de la columna. Un disseny òptim dels canals recol·lectors redueix el capçal hidràulic en la selecció de la recol·lecció. Es poden subministrar plats de xemeneies per acumular el líquid i redistribuir-lo o per millorar la distribució del vapor en la part inferior del llits empacats.



**Figura 11.8.10.** Exemple Col·lector de l'empresa Sulzer

Per tant, si el coeficient (diàmetre de columna) / (diàmetre del rebliment)  $\geq 40$ , es probable que hi hagi una mala distribució.

En el simulador del Aspen Hysys s'han dut a terme diferents anàlisis segons la mida i tipus de rebliment amb el qual es pot utilitzar el la columna. Els rebliments analitzats són:

- Berl Saddles (Ceramic, random) 1\_2\_inch
- Intalox Saddles (Ceramic) 1\_2\_inch
- Berl Saddles (Ceramic) 1\_4\_inch
- Intalox Saddles (Ceramic) 1\_4\_inch
- Raschig Rings (Ceramic) 1\_4\_inch

### 11.8.5 Altura del rebliment. Mètode de la HEPT

Encara que la torre sigui de rebliment el contacte entre el líquid i vapor es continu, es pot analitzar com a una torre d'etapes. Es suposa que la part del rebliment es pot dividir en segments d'igual altura. Cada segment consta com si fos una etapa d'equilibri on el líquid i el vapor que surten del segment es troben en equilibri. És important tenir en compte que el model d'etapes no és exactament lo que succeeix físicament en la columna, però es pot utilitzar per a fer els dissenys.

La HEPT, és l'altura del rebliment necessària per obtenir el canvi de composició al qual s'arriba amb un contacte teòric d'equilibri. Les HEPT poden variar des de 1/2 polzades (fluxos molt petits de gas en rebliments auto-humectants) fins a uns quants peus (anells Rasching grans).

En un equip industrial normal, la HETP varia entre 1 i 4 peus. Com menor sigui la HEPT més curta es la columna i el rebliment és més eficient. Per a mesurar l'HETP es determinen les composicions superiors e inferiors a reflux total i després es calcula el número d'etapes d'equilibri.

$$HEPT = \frac{\text{Alçada del rebliment}}{\text{número d'etapes teòriques}} \quad \text{Equació 11.8.1}$$

La HEPT varia segons el tipus i la mida del rebliment, de les substàncies que es van a separar i amb el flux del gas.

### 11.8.6 Disseny de la columna mètode rigorós amb Aspen Hysys

En el disseny rigorós de la columna s'ha dut a terme mitjançant el paquet de simulació *Distillation Column* que ofereix el programa de Aspen Hysys.

Després de realitzar aquest disseny més acurat per a cada tipus de rebliment anomenats anteriorment i comparant les seves HETP i si es compleix o no, la fórmula de la distribució ja esmentada, el que dona millors resultats és el rebliment d'Intalox Saddles (Ceramic) 1/2 inch. Per tant, aquest és el rebliment escollit per a fer la columna d'absorció. Tot i això, de cara a l'indústria el tipus del material del rebliment s'escull a partir de consideracions econòmiques i no pas per consideracions teòriques a l'hora de fer al disseny de la columna.

En el llibre de la bibliografia *Wankat, Ingenieria de procesos de separación 2007, capítulo 10, Diseño de columnas de platos y empacadas, (pág 345)*, ens marca una sèrie de directrius:

Els rebliments estructurats són més econòmics a baixa pressió i els plats de vàlvules són més econòmics a altes pressions.

A pressions atmosfèriques i una mica elevades, els rebliments estructurats tenen la avantatge de l'eficiència, però no de capacitat, encara que, que els rebliments estructurats solen ser més costosos que els plats de vàlvules (Humphery y Keller, 1997).

Els rebliments aleatoris (columnes de diàmetre petit) y els plats de vàlvules es prefereixen per a pressions atmosfèriques i lleugerament elevades.

A més s'exposa també que les columnes empacades són dinàmicament més estables que les columnes de plats i que es menys probable que fallin durant la posada en marxa, en la seva aturada o que tinguin alguna alteració en l'operació.

Fent ús de les consideracions anteriors es dona per bo el disseny de la columna d'absorció, a continuació es mostren els resultats finals del disseny.

**Taula 11.8.2.** Resum de les etapes d'equilibri teòric, distribució del líquid i HETP

<b>N</b>	10
<b>(diàmetre de columna) / (diàmetre del rebliment)</b>	36
<b>HETP</b>	0,46

**Taula 11.8.3.** Resultats obtinguts del simulador Aspen Hysys

	<b>Section 1</b>
<b>Internals</b>	Packed
<b>Packing Type</b>	Intalox Saddles (Ceramic) 1_2_inch
<b>Flooding Correlation</b>	SLEv73

<b>HETP Correlation</b>	Frank
<b>Est. # Pieces of Packing</b>	547937,98
<b>Est. Mass of Packing [kg]</b>	540,431
<b>Column Geometry</b>	
<b>Section Diameter [m]</b>	0,4572
<b>X-Sectional Area [m<sup>2</sup>]</b>	0,164
<b>Section Height [m]</b>	4,572

**Taula 11.8.4.** Consideracions hidràuliques donades pel Hysys

<b>Hydraulic Results</b>	
<b>Max Flooding [%]</b>	68,770
<b>Section DeltaP [kPa]</b>	1,664
<b>DP per Length [kPa/m]</b>	0,364
<b>Flood Gas Vel. [m<sup>3</sup>/h-m<sup>2</sup>]</b>	2277,10
<b>Flood Gas Vel. [m/s]</b>	0,632

En el disseny del absorbidor es decideix fer dues seccions cadascuna de 2,7 m d'alçada amb una pèrdua de càrrega de 0,880 KPa.

### **11.8.7 Disseny mecànic de la columna**

Per al disseny mecànic de la columna s'ha sobredimensionat un 15% l'alçada del rebliment obtingut amb el mètode rigorós del programa Aspen Hysys. La columna d'absorció opera a pressió atmosfèrica, per tant, a l'hora de fer el disseny mecànic es parteix de la pressió relativa.

#### **A. Càlcul de l'espessor a la paret de la columna d'absorció**

Per al càlcul del espessor de la paret de la columna cal conèixer prèviament les característiques de treball de la columna, la temperatura ( $T_d$ ) i pressió disseny ( $P_d$ ), diàmetre intern ( $D_i$ ), factor de soldadura ( $E$ ) i el factor d'estres del material ( $S$ ).

Els càlculs es realitzen seguint el mateix procediment descrit en apartats anteriors, 11.6.4. Disseny mecànic., per exemple

**Taula. 11.8.5.** Temperatura i pressió de disseny

<b><math>T_{\text{disseny}}</math> (°C)</b>	120
<b><math>P_{\text{disseny}}</math> (bar)</b>	1,568

La pressió hidràulica que es calcula és la pressió que exerceix el líquid a una alçada. Per considerar la situació més desfavorable, es considera com si tota la columna d'absorció estigues inundada d'aigua.

El material escollit per al disseny del absorbidor es Hastelloy B-2, és un material a base de níquel-molibdè amb una excel·lent resistència al àcid clorhídric a tota temperatura i concentració. També resisteix al clorur d'hidrogen, àcid sulfúric, al àcid fluorhídric, àcid acètic i al àcid fosfòric pur. Té una excel·lent resistència al cracking (corrosió sota tensió i corrosió intergranular en les zones afectades per soldadura per absència de precipitació de carburs al ser escalfada. També pot ser utilitzat-se després de una soldadura sense tractament tèrmic. Aquesta informació ha sigut donada per *l'Empresa Fast Pack*.

El càlcul de l'espessor es realitza a partir del procediment del codi ASME, descrit ja anteriorment.

Les dades utilitzades per al càlcul i l'espessor són:

**Taula. 11.8.6.** Resultats obtinguts del càlcul espessor a la paret del cilindre

<b>Material</b>	HASTEROLLY B2
<b>Factor estrès, S (bar)</b>	609,0
<b>D int (mm)</b>	457,2

<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	0,694
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	2,963
<b>t (gruix total) (mm)</b>	4
<b>P màxima (bar)</b>	8,963

### **B. Càlcul de l'espessor al capçal superior**

Per al disseny del capçal superior de la columna s'ha escollit del tipus toriesfèric, ja que la pressió de treball del absorbidor es baixa.

El material que s'utilitza per aquesta secció de la columna es també Hasterolly B2, i es mantenen els valors utilitzats del factor de soldadura i del factor d'estrès.

Per al càlcul del espessor del capçal del toriesfèric es segueix el procediment del codi ASME, ja d'escrit en apartats anteriors.

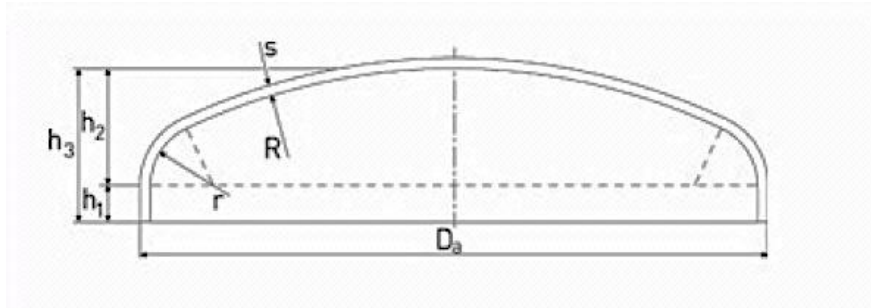
Aquest espessor se li suma un valor de tolerància a la corrosió de (2 mm) i es sobredimensiona un 10% (arrodonint a l'alça)

**Taula. 11.8.7.** Resultats obtinguts del càlcul del espessor al capçal

<b>Tipus</b>	Toriesfèric
<b>Material</b>	HASTEROLLY B2
<b>Factor estrès, S (bar)</b>	609,0
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>L (mm)</b>	457,2
<b>r (mm)</b>	45,72
<b>L/r</b>	10
<b>M</b>	1,54
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	1,067
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	3,37
<b>t (gruix total) (mm)</b>	4

<b>P màxima (bar)</b>	5,87
-----------------------	------

Per al càlcul de l'alçada total del capçal s'utilitza les equacions de l'empresa alemanya (*WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH*)



**Figura 11.8.11.** Capçal toriesfèric de l'empresa *WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH*

La taula 11.8.8 mostra els resultats obtinguts després d'utilitzar les respectives equacions ja esmentades amb anterioritat.

**Taula. 11.8.8.** Resultats obtinguts de l'alçada del capçal

<b>R (mm)</b>	457,2
<b>r (mm)</b>	45,72
<b>h<sub>1</sub> (mm)</b>	14
<b>h<sub>2</sub> (mm)</b>	86,65
<b>h<sub>3</sub> (mm)</b>	100,65

Els volums dels capçals es mostren en la taula 11.8.9.

**Taula. 11.8.9.** Resultats obtinguts del volum al capçal

<b>V<sub>e</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,0081
<b>V<sub>i</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,0077

<b>V paret (m<sup>3</sup>)</b>	0,00041
--------------------------------	---------

### C. Càlcul de l'espessor al fons de la columna

Per al disseny del fons de la columna s'ha escollit el toriesfèric ja que la pressió de treball del absorbidor es baixa.

El material que s'utilitza per aquesta secció de la columna es també Hasterolly B2, i es mantenen els valors utilitzats del factor de soldadura i del factor d'estrès.

El procediment utilitzat és el mateix que pel capçal superior, els resultats es mostren de la taula 11.8.10 a la 11.8.12.

**Taula.11.8.10.** Resultats del càlcul del espessor del fons

<b>Tipus</b>	Toriesfèric
<b>Material</b>	HASTEROLLY B2
<b>Factor estrès, S (bar)</b>	608,999
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>L (mm)</b>	457,2
<b>r (mm)</b>	45,72
<b>L/r</b>	10
<b>M</b>	1,54
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	1,067
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	3,373
<b>t (gruix total) (mm)</b>	4
<b>P màxima (bar)</b>	5,874

**Taula.11.8.11.** Resultats obtinguts de l'alçada del fons

<b>R (m)</b>	457,2
<b>r (mm)</b>	45,72



<b>h<sub>1</sub> (mm)</b>	14
<b>h<sub>2</sub> (mm)</b>	86,648
<b>h<sub>3</sub> (mm)</b>	100,648

**Taula.11.8.12.** Resultats obtinguts del volum del fons

<b>V<sub>e</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,00814355
<b>V<sub>i</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,00773061
<b>V paret (m<sup>3</sup>)</b>	0,00041295

#### **D. Càlcul de l'alçada total i superfície lateral de la columna**

Per al càlcul de l'alçada total es fa ús de la fórmula següent:

$$Alçada_{total} = H_{secció1} + h_{capçal} + h_{fons} + 4 \quad \text{Equació 11.8.2}$$

A l'alçada total se li suma aquests quatre metres que representen l'espai que ocupen els equips interns de la columna, com ara, els tubs per on s'introdueixen els fluids i l'espai per poder fer la neteja pertinent del equip.

**Taula.11.8.13.** Alçada total

<b>Alçada total (m)</b>	9,459
-------------------------	-------

Per al càlcul de l'àrea lateral d'un cilindre s'utilitza la fórmula:

$$A_{lateral} = L \cdot \pi \cdot D_e \quad \text{Equació 11.8.3}$$

**Taula.11.8.14.** Dades de la superfície lateral

<b>Àrea lateral total (m<sup>2</sup>)</b>	7,684
---	-------

### **E. Càlcul de la columna buida**

El càlcul de la columna buida es fa a partir dels volums calculats, volum de la secció 1, volum de la secció 2. Aquests al ser una secció cilíndrica es multipliquen per la seva àrea lateral i per l'espessor mentre que per al capçal superior e inferior de la columna es calcula el volum de la paret i es multiplica per l'espessor. Aquests volums es multipliquen per la densitat del material de qual està fet la columna, en aquest cas, Hasterolly.

$$Pes_{columna\ buida} = Pes_{secció1} + P_{capçal\ superior} + P_{capçal\ inferior}$$

Equació 11.8.4

Una altra forma d'expressar l'equació anterior es:

$$Pes_{columna\ buida} = \rho_{material}(V_{paret\ capçal} + V_{paret\ fons} + \text{àrea}_{lateral\ total} \cdot \text{espessor})$$

Equació 11.8.5

Aquest pes de la columna buida que dóna com a resultat de l'Equació 11.8.5, es sobredimensiona un 10% per tenir en compte el pes de tots els elements interns, com ara distribuïdors, col·lectors de líquids, boques d'home, etc.

**Taula.11.8.15...** Resultats del càlcul del pes de la columna buida

<b>Àrea lateral total (m<sup>2</sup>)</b>	7,684
<b>Volum capçal paret (m<sup>3</sup>)</b>	0,00041295
<b>Volum fons paret (m<sup>3</sup>)</b>	0,00041295
<b>Densitat HASTEROLLY B2 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	9220
<b>Pes columna buida (kg)</b>	291,004
<b>Pes sobredimensionat (kg)</b>	320,105

### **F. Càlcul de la columna plena**

En aquest punt es fa el càlcul per a la columna d'absorció plena d'aigua i plena del fluid que hi circula per dintre de la columna, en aquest cas, es pren com a una simplificació que el fluid que hi circula per la columna és aquell que surt de la columna per cues.

$$Pes_{columna plena} = Pes_{columna buida} + Pes_{rebliment} + Pes_{liquid}$$

Equació 11.8.6

**Taula.11.8.16.** Resultats del càlcul del pes de la columna plena

<b>Pes del rebliment (Kg)</b>	540,431
<b>Pes Aigua (Kg)</b>	1722,825
<b>Pes operació (Kg)</b>	1619,280

### **G. Càlcul del espessor d'aïllament**

Per tal de realitzar un aïllament adequat per aquest equip s'empra el programa Insulan proporcionat per l'empresa CALORCOL S.A.

Les característiques introduïdes al programa per tal de treballar amb llana mineral de roca com a manta aïllant de 80Kg/m<sup>3</sup>, han estat:

- Temperatura Interior = 100 °C
- Temperatura Superficial del Aïllant = 35°C
- Temperatura Ambient = 16,9 °C (és la mitjana del territori)
- Velocitat de l'aire = 2,7 m/s (velocitat mitjana en direcció nord- oest)
- Superfície exterior de l'aïllament = Acer inoxidable brut (Emissivitat de 0,3)
- Superfície sense aïllant = Hastelloy B-2 (Suposant emissivitat de 0,3)

El resultat obtingut és d'un aïllament de 2,69 cm amb una eficiència del 92,23%.

### **11.9 Columna de destil·lació, C-301**

L'objectiu de la columna es eliminar Fosgè generat com a producte de la reacció de formació del MCC i terminar d'eliminar el HCl que porta la corrent 10.

A continuació, en la Taula 11.9.1 es mostren les característiques d les corrents d'entrada i sortida de la columna.

**Taula 11.9.1.** Especificacions dels corrents de la columna CD-301

<b>Nom</b>	<b>Corrent 10</b>	<b>Corrent 17</b>	<b>Corrent 20</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	73,19	54,62	103,39
<b>Pressió (KPa)</b>	101,325	101,325	101,325
<b>Fracció de vapor</b>	0	1	0
<b>Cabal màssic (Kg/h)</b>	4556,40	195,73	4360,69
<b>Cabal Volumètric (m<sup>3</sup>/h)</b>	5,188	58,601	5,22
<b>Densitat (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	878,159	3,34	834,41
<b>Entalpia (KJ/kg)</b>	-322,165	-2122,329	-170,911
<b>FRACCIÓ MASSICA</b>			
<b>Fosgè</b>	0,0334	0,7788	0
<b>MCC</b>	0,1680	0,1525	0,1128
<b>HCl</b>	0,0027	0,0629	0
<b>Toluè</b>	0,7958	0,0055	0,8312
<b>CABAL MASSIC (Kg/h)</b>			
<b>Fosgè</b>	152,44	152,45	0
<b>MCC</b>	765,52	29,86	735,66
<b>HCl</b>	12,32	12,32	0
<b>Toluè</b>	3626,12	1,09	3625,03

Per a dimensionar la columna s'ha utilitzat el programa de Aspen Hysys, utilitzant els paquets de simulació que porta incorporats, com el *ShortCut* i el *Distillation Column*.

El simulador ens dona informació sobre:

- Pressió de treball
- El número d'etapes teòriques

- Les característiques dels cabals que entren i surten de la columna
- Un disseny més detallat on dóna informació del diàmetre, alçada i tipus de rebliment de la columna.

### 11.9.1 Selecció del tipus de columna

El primer pas per fer el disseny es decidir si es vol fer una columna de rebliment o de plats. Per decidir entre una i l'altra es van seguir els passos que marca el llibre de la bibliografia ( *Wankat, Ingeniería de procesos de separación, 2007, capítulo 10, Diseño de columnas de platos y empacadas, pág 301*)

Condicions favorables per a una columna de plats

- Diàmetres de columna grans ( $> 0.7$  m)
- Cabals elevats
- Temps de residència del líquids elevats
- Més versatilitat i facilitat de modificació
- Menor cost, en especial per a cabals grans

Condicions favorables per a una columna de rebliment

- Diàmetres de columna petits ( $< 0.7$  m)
- Destil·lacions a baixa pressió
- Òptima para substàncies corrosives o que generen molta espuma
- Pèrdues de carrega petites
- Són més econòmiques que la de plats sempre que tenen menys de 2,5 ft de diàmetre.

A partir de les condicions anteriors, es pren la decisió de fer una columna de rebliment degut a que es treballa amb cabals petits, amb substàncies corrosives i tal com es veurà

posteriorment el diàmetre de la columna que surt amb el simulador Aspen Hysys surt una mica més gran que 0,7 m.

Per obtenir una primera estimació de la columna es fa un disseny preliminar de la mateixa utilitzant el simulador de Aspen Hysys.

El disseny preliminar consta de fer una primera aproximació fent Short Cut.

Per realitzar el Short Cut s'han d'introduir una sèrie de dades prèvies. Primer s'ha de definir el corrent d'entrada, es a dir, les seves característiques de temperatura, pressió, composició.

A continuació hem d'especificar quin es el component clau lleuger i quina fracció volem que surti per cues d'aquest, i quin es el component pesat i quina fracció volem que surti per caps d'aquest. L'últim pas és definir la pressió a la qual volem que treballi la columna i la relació de reflux.

Una vegada s'han introduït les dades que ens demana el programa, ens calcula de forma automàtica les característiques principals de la torre, com el número de plats, la temperatura del condensador i del calderí i les característiques dels cabals de sortida de la columna.

Les dades obtingudes del Hysys en fer la simulació de la columna són:

**Taula 11.9.2.** Resultats de l'estimació de Aspen Hysys

<b>N etapes</b>	19
<b>Pressió de treball (atm)</b>	1
<b>Relació de reflux</b>	2

### **11.9.2 Selecció del tipus de rebliment**

En una columna de rebliment que utilitza el contacte vapor-líquid, el líquid flueix per sobre la superfície del rebliment y el vapor flueix per els forats de dintre del rebliment.

L'objectiu principal del rebliment es proporcionar un contacte íntim entre el vapor i el líquid i proporcionar una superfície de contacte gran per a obtenir una bona transferència de massa.

Hi ha dos tipus de rebliments: els uniformes i els aleatoris.

· ***Aleatoris:***

Aquest tipus de rebliment es bastant econòmic i solen ser de materials resistents a la corrosió (metàl·lics, ceràmics o de plàstic). Els rebliments més empleats són els anells Rashig i les selles Berl, aquest han sigut reemplaçats per un altre tipus de rebliments més eficients com ara els anells Pall o les selles Intalox o els anells Bialecki.

Els rebliments estructurats o ordenats com ( Glitsch, Goodloe i Koch Sulzer)



**Figura 11.9.1.** Rebliments aleatoris, anells de Rasching amb diàmetre 25 mm.

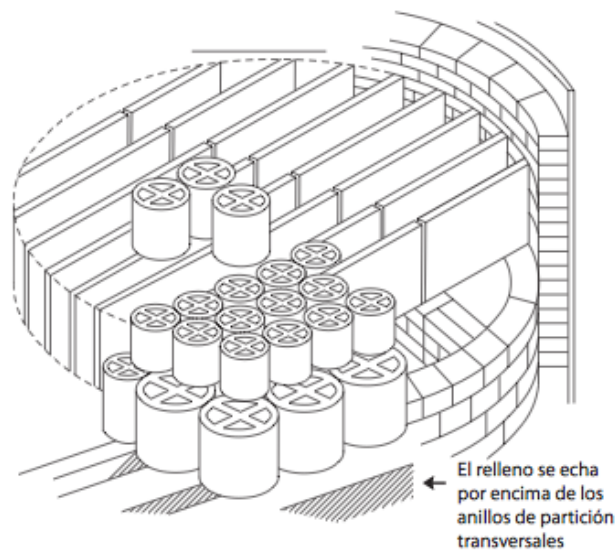
· ***Estructurat:***

Són bastant més car per unitat de volum que el rebliment aleatori té molta menys pèrdua de carga per etapa i té una major eficiència i capacitat. Alguns exemples de rebliments estructurats són: Glitsch, Goodloe i Koch Sulzer



**Figura 11.9.2.** Rebliments estructurats

A continuació es mostra un imatge de com es distribueixen els rebliments aleatoris dins la columna.



**Figura 11.56.** Relleno apilado usado para el soporte de rellenos aleatorios.

**Figura 11.9.3.** Forma de distribució dels rebliments aleatoris

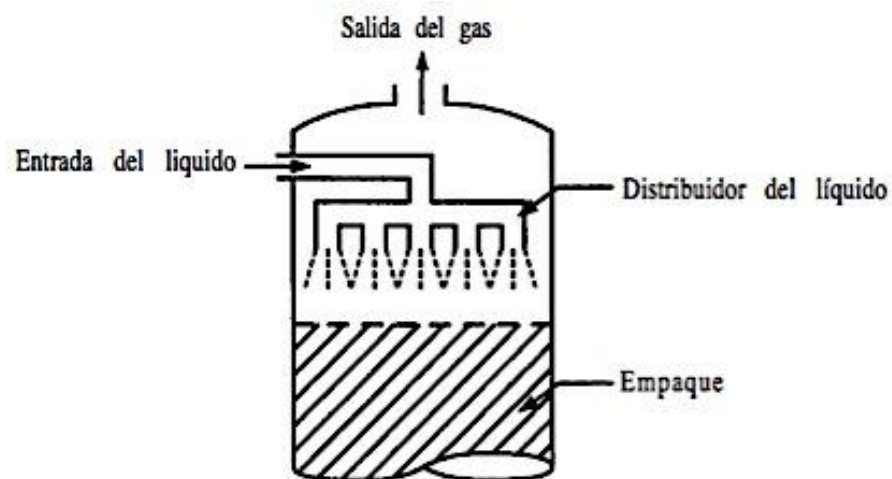


En aquest cas de disseny del Columna CD-301, s'ha escollit un rebliment aleatori i com a material per al rebliment s'escull del tipus ceràmic ja que es un material fort, de llarga durada i són útils en una gran varietat d'aplicacions de desgast i corrosió.

### 11.9.3 Parts internes de les columnes de rebliments

A més de les seccions del rebliments, on es fa la separació, es necessiten seccions per distribuir el reflux, l'alimentació i el vapor del fons, així com per separar el líquid i el vapor.

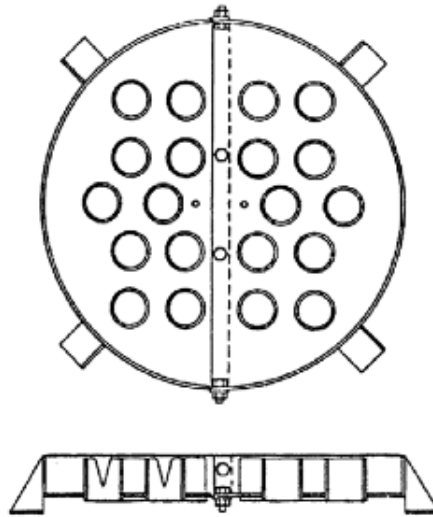
Un dels components més importants són els distribuïdors del líquid són molt important per al correcte funcionament de la columna. Els rebliments aleatoris i estructurats petits necessiten que la distribució de líquid i vapor sigui millor .



**Figura 11.9.4.** Distribuïdor del líquid en una columna de rebliment

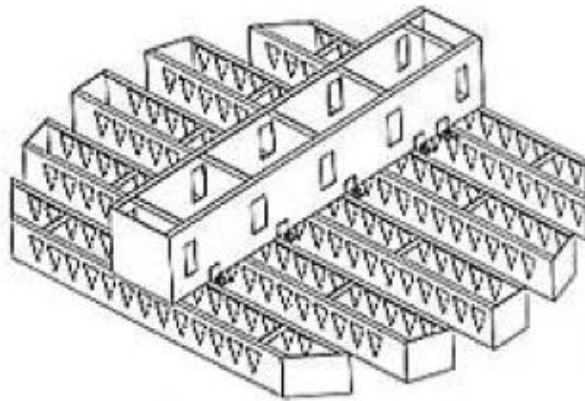
El líquid que entra a la columna s'aboca sobre el distribuïdor i allí es reparteix per la part superior del empaquetat al que deu humidificar de forma uniforme.

Exemples de distribuïdors de líquids:



**Figura 11.60.** Distribuidor tipo rebosadero (Koch-Glitsch, LP).

**Figura 11.9.5.** Distribuidor tipus sobreeixidor (koch-Glitsch)



**Figura 11.9.6.** Exemple distribuïdor de líquid i gas

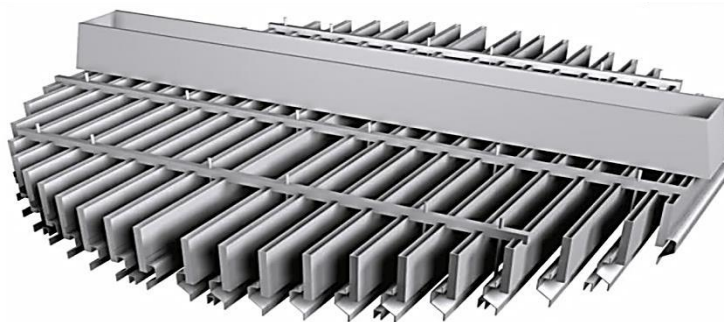
El gas entra per sota de la torre i a través de un distribuïdor arriba fins al rebliment on flueix cap a dalt entre els intersticis i en contracorrent amb el líquid. El rebliment provoca una gran area de contacte i fomenta el contacte íntim entre les fases.

Per evitat que el rebliment es mogui per la columna s'utilitzen suports com ara:



**Figura 11.9.7.** Suports e injectors de gas

Els recol·lectors de líquid amb sistema de suport del rebliment integrat ajuden a reduir a l'alçada de la columna. Un disseny òptim dels canals recol·lectors redueix el capçal hidràulic en la selecció de la recol·lecció. Es poden subministrar plats de xemeneies per acumular el líquid i redistribuir-lo o per millorar la distribució del vapor en la part inferior del llits empacats.



**Figura 11.9.8.** Exemple Recolector de l'empresa Sulzer

Per tant, si el coeficient (diàmetre de columna) / (diàmetre del rebliment)  $\geq 40$ , es probable que hi hagi una mala distribució.

En el simulador del Aspen Hysys s'han dut a terme diferents anàlisis segons el tamany i tipus de rebliment amb el qual es pot utilitzar el la columna. Els rebliments analitzats són:

- Berl Saddles (Ceramic, random) 1\_nch
- Intalox Saddles (Ceramic) 1\_2\_inch
- Berl Saddles (Ceramic) 1\_2\_inch
- Raschig Rings (Ceramic) 1\_inch
- Raschig Rings (Ceramic) 1\_2\_inch

#### **11.9.4 Altura del rebliment. Mètode de la HEPT**

Encara que la torre sigui de rebliment el contacte entre el líquid i vapor es continu, es pot analitzar com a una torre d'etapes. Es suposa que la part del rebliment es pot dividir en segments d'igual altura. Cada segment consta com si fos una etapa d'equilibri on el líquid i el vapor que surten del segment es troben en equilibri. És important tenir en compte que el model d'etapes no és exactament lo que succeeix físicament en la columna, però es pot utilitzar per a fer els dissenys.

La HEPT, és l'altura del rebliment necessària per obtenir el canvi de composició al qual s'arriba amb un contacte teòric d'equilibri. Les HEPT poden variar desde 1/2 polsades (fluxos molt petits de gas en rebliments auto-humectants) fins a uns quants peus (anells Rasching grans).

En un equip industrial normal, la HETP varia entre 1 i 4 peus. Com menor sigui la HEPT més curta es la columna i el rebliment és més eficient. Per a mesurar l'HETP es determinen les composicions superiors e inferiors a reflux total i després es calcula el numero d'etapes d'equilibri.

$$HEPT = \frac{\text{Alçada del rebliment}}{\text{número d'etapes teòriques}} \quad \text{Equació 11.9.1}$$

La HEPT varia segons el tipus i tamany del rebliment, de les substàncies que es van a separar i amb el flux del gas.

### 11.9.5 Disseny de la columna mètode rigorós amb Aspen Hysys

En el disseny rigorós de la columna s'ha dut a terme mitjançant el programa de Aspen Hysys.

Un cop dissenyada la columna es passa a fer un disseny més específic del aparell, aquesta es fa també amb el simulador Aspen Hysys.

Un cop seleccionat el rebliment que es vol, es dona al següent pas que es "Complete AutoSection". I ens calcula tot el disseny de la columna que ens fixarà les seccions necessàries, també estimarà el número de peces i la massa del rebliment, com la geometria de la columna i les característiques hidràuliques.

Després de realitzar aquest disseny més acurat per a cada tipus de rebliment anomenats anteriorment i comparant les seves HETP i si es compleix la fórmula de la distribució ja esmentada. El que dona una millor distribució i HEPT és l'empacat de Rasching Rings (Ceramic) 1/2 inch. Per tant, aquest es el rebliment escollit per a fer la columna destil·lació.

Normalment, en el dissenys que realitza industrialment no s'escull el rebliment per consideracions teòriques sinó per raons econòmiques. Però en aquest cas es dona per bo el disseny escollit del rebliment aleatori ja que es treballa a pressió atmosfèrica i el diàmetre de la columna es petit, i per tant, es compleixen les recomanacions descrites al segons la bibliografia, (*Wankat, Ingenieria de procesos de separación, 2007, capítulo 10, Diseño de columnas de platos y empacadas, pág 345*).

**Taula 11.9.3.** Resum de les etapes d'equilibri teòriques, distribució del líquid, HETP, entrada del aliment, relació de reflux.

<b>N</b>	25
<b>Relació de reflux</b>	5
<b>Entrada del aliment</b>	15
<b>(diàmetre de columna) / (diàmetre del rebliment)</b>	30
<b>HETP</b>	0,1701

**Taula 11.9.4.** Resultats obtinguts del simulador Aspen Hysys

<b>Section 1</b>	
<b>Internals</b>	Packed
<b>Packing Type</b>	Raschig Rings (Ceramic, random) 1_inch
<b>Flooding Correlation</b>	SLEv73
<b>HETP Correlation</b>	Hands
<b>Est. # Pieces of Packing</b>	92508,398
<b>Est. Mass of Packing [kg]</b>	1299,384
<b>Est. Packing Cost (US\$)</b>	989,083
<b>Column Geometry</b>	
<b>Section Diameter [m]</b>	0,762
<b>X-Sectional Area [m2]</b>	0,456
<b>Section Height [m]</b>	4,252

**Taula 11.9.5.** Consideracions hidràuliques donades pel Hysys

<b>Hydraulic Results</b>	
<b>Max Flooding [%]</b>	60,213
<b>Section DeltaP [kPa]</b>	0,999
<b>DP per Length [kPa/m]</b>	0,234
<b>Flood Gas Vel. [m3/h-m2]</b>	2307,371
<b>Flood Gas Vel. [m/s]</b>	0,640

En el disseny de la columna es decideix fer dues seccions una de 2 m i l'altra de 2,9 m d'alçada amb una pèrdua de càrrega de 0,468 KPa la primera i de 0,678 KPa la segona.

### 11.9.6 Disseny mecànic de la columna CD-301

Per al disseny mecànic de la columna s'ha sobredimensionat un 15% l'alçada de la secció de rebliment obtinguda amb el mètode rigorós del programa Aspen Hysys. La columna de destil·lació opera a pressió atmosfèrica, per tant, a l'hora de fer el disseny mecànic es parteix de la pressió relativa.

#### A. Càlcul de l'espessor a la paret de la columna de destil·lació

Per al càlcul del espessor de la paret de la columna cal conèixer prèviament les característiques de treball de la columna, la temperatura ( $T_d$ ) i pressió disseny ( $P_d$ ), diàmetre intern ( $D_i$ ), factor de soldadura ( $E$ ) i el factor d'estres del material ( $S$ ).

Els càlculs es realitzen seguint el mateix procediment descrit en apartats anteriors, 11.6.4. Dissenys mecànics., per exemple

El material escollit per al disseny de la columna CD-301 és Hastelloy B-2, és un material a base de níquel-molibdè amb una excel·lent resistència al àcid clorhídric a tota temperatura i concentració. També resisteix al clorur d'hidrogen, àcid sulfúric, al àcid fluorhídric, àcid acètic i al àcid fosfòric pur. Té una excel·lent resistència al cracking (corrosió sota tensió i corrosió intergranular en les zones afectades per soldadura per absència de precipitació de carburs al ser escalfada. També pot ser utilitzat-se després de una soldadura sense tractament tèrmic.

El disseny es realitza a partir de la fórmules del codi ASME, i segons el procediment ja descrit anteriorment. La taula 11.9.6 mostra els resultats obtinguts.

**Taula. 11.9.6.** Resultats obtinguts del càlcul espessor a la paret del cilindre

<b>Material</b>	HASTEROLLY B2
<b><math>T_{\text{disseny}}</math> (°C)</b>	120
<b><math>P_{\text{disseny}}</math> (bar)</b>	1,54
<b>Factor estrés, S (bar)</b>	609,0
<b>D int (mm)</b>	762
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85

<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	1,14
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	3,45
<b>t (gruix total) (mm)</b>	4
<b>P màxima (bar)</b>	6,74

### **B. Càlcul de l'espessor al capçal**

Per al disseny del capçal superior de la columna s'ha escollit del tipus toriesfèric, ja que la pressió de treball del absorbidor es baixa.

El material que s'utilitza per aquesta secció de la columna es també Hasterolly B2, i es mantenen els valors utilitzats del factor de soldadura i del factor d'estrès.

Per al càlcul del espessor del capçal del toriesfèric es segueix el procediment del codi ASME, ja d'escrit en apartats anteriors.

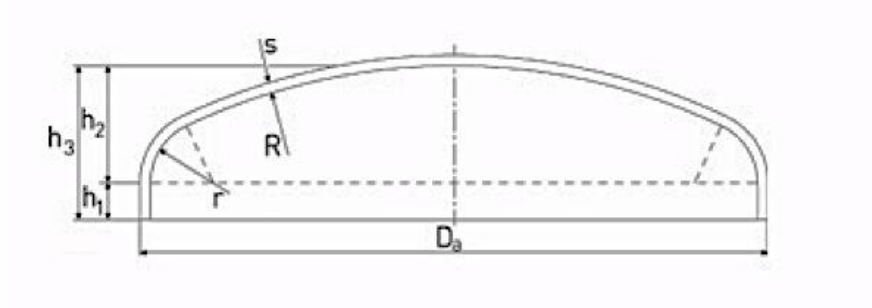
Aquest espessor se li suma un valor de tolerància a la corrosió de (2 mm) i es sobredimensiona un 10% (arrodonint a l'alça)

**Taula. 11.9.7.** Resultats obtinguts del càlcul del espessor al capçal

<b>Tipus</b>	Toriesfèric
<b>Material</b>	HASTEROLLY B2
<b>Factor estrès, S (bar)</b>	609,0
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>L (mm)</b>	762
<b>r (mm)</b>	76,2
<b>L/r</b>	10
<b>M</b>	1,54
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	1,75
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	4,123
<b>t (gruix total) (mm)</b>	4
<b>P màxima (bar)</b>	4,41



Per al càlcul de l'alçada total del capçal s'utilitza les equacions de l'empresa alemanya *WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH*, ja descrites anteriorment.



**Figura 11.9.10.** Capçal toriesfèric de l'empresa *WEISSTALER BÖDENPRESSWERKE GMBH*

**Taula. 11.9.8.** Resultats obtinguts de l'alçada del capçal

<b>R (mm)</b>	762
<b>r (mm)</b>	76,2
<b>h<sub>1</sub> (mm)</b>	17,5
<b>h<sub>2</sub> (mm)</b>	145,17
<b>h<sub>3</sub> (mm)</b>	162,67

A continuació es mostra els resultats del volum del capçal segons el procediment ja descrit anteriorment.

**Taula. 11.9.9.** Resultats obtinguts del volum al capçal

<b>V<sub>e</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,0372
<b>V<sub>i</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,0359
<b>V paret (m<sup>3</sup>)</b>	0,00142

### **C. Càlcul de l'espessor al fons de la columna**

Per al disseny del fons de la columna s'ha escollit el toriesfèric ja que la pressió de treball del absorbidor es baixa.

El material que s'utilitza per aquesta secció de la columna es també Hasterolly B2, i es mantenen els valors utilitzats del factor de soldadura i del factor d'estrès.

El procediment utilitzat és el mateix que pel capçal superior, els resultats es mostren de la taula 11.9.10 a la 11.9.12.

**Taula. 11.9.10.** Resultats del càlcul del espessor del fons

<b>Tipus</b>	Toriesfèric
<b>Material</b>	HASTEROLLY B2
<b>Factor estrés, S (bar)</b>	608,998
<b>Factor de soldadura, E</b>	0,85
<b>L (mm)</b>	762
<b>r (mm)</b>	76,2
<b>L/r</b>	10
<b>M</b>	1,54
<b>t (gruix, eq ASME) (mm)</b>	1,7489
<b>t (gruix, sobredim) (mm)</b>	4,1237
<b>t (gruix total) (mm)</b>	4
<b>P màxima (bar)</b>	4,407

Per al càlcul de l'alçada del fons de la columna es segueix el mateix procediment que en el càlcul de l'alçada del capçal i els resultats obtinguts s'exposen a continuació:

**Taula. 11.9.11.** Resultats obtinguts de l'alçada del fons

<b>R (m)</b>	762
<b>r (mm)</b>	76,2
<b>h<sub>1</sub> (mm)</b>	17,5
<b>h<sub>2</sub> (mm)</b>	145,172
<b>h<sub>3</sub> (mm)</b>	162,672

**Taula. 11.9.12.** Resultats obtinguts del volum del fons

<b>V<sub>e</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,0372
<b>V<sub>i</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,03578
<b>V paret (m<sup>3</sup>)</b>	0,001427

**D. Càlcul de l'alçada total i superfície lateral de la columna**

Per al càlcul de l'alçada total es fa ús de la fórmula següent:

$$Alçada_{total} = H_{secció1} + h_{capçal} + h_{fons} + 4 \quad \text{Equació 11.9.2}$$

A l'alçada total se li suma aquests dos metres que representen l'espai que ocupen els equips interns de la columna, com ara, els tubs per on s'introdueixen els fluids i l'espai per poder fer la neteja pertinent del equip.

**Taula. 11.9.13.** Alçada total

<b>Alçada total (m)</b>	9,21
-------------------------	------

Per al càlcul de l'àrea lateral d'un cilindre s'utilitza la fórmula:

$$A_{lateral} = L \cdot \pi \cdot D_e$$

Equació 11.9.3

**Taula. 11.9.14.** Dades de la superfície lateral

<b>Àrea lateral total (m<sup>2</sup>)</b>	11,861
---	--------

### **E. Càlcul de la columna buida**

El càlcul de la columna buida es fa a partir dels volums calculats, volum de la secció cilíndrica es multiplica per la seva àrea lateral i per l'espessor mentre que per al capçal superior e inferior de la columna es calcula el volum de la paret i es multiplica per l'espessor. Aquests volums es multipliquen per la densitat del material de qual està fet la columna, en aquest cas, Hasterolly.

$$Pes_{columna\ buida} = Pes_{secció1} + P_{capçal} + P_{fons} \quad \text{Equació 11.9.4}$$

Una altra forma d'expressar l'equació anterior es:

$$Pes_{columna\ buida} = \rho_{material} (V_{paret\ capçal} + V_{paret\ fons} + \acute{a}rea_{lateral\ total} \cdot espessor)$$

Equació 11.9.5.

Aquest pes de la columna buida, que dona com a resultat de l'Equació 11.9.5. és sobredimensiona un 10%, per tenir en compte el pes de tots els elements interns, com ara distribuïdors i recol·lectors de líquids, com els externs, com ara una boca d'home o les brides que es per on s'uniran les diferents parts de la del absorbidor.

**Taula. 11.9.15** Resultats del càlcul del pes de la columna buida

<b>Àrea lateral total (m<sup>2</sup>)</b>	20,123
<b>V<sub>capçal paret</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,00113
<b>V<sub>fons paret</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	0,00113
<b>Densitat HASTEROLLY B2 (kg/m<sup>3</sup>)</b>	9220

<b>Pes columna buida (Kg)</b>	577,626
<b>Pes sobredimensionat (Kg)</b>	635,389

### F. Càlcul de la columna plena

En aquest punt es fa el càlcul per a la columna d'absorció plena d'aigua i plena del fluid que hi circula per dintre de la columna, en aquest cas, es pren com a una simplificació que el fluid que hi circula per la columna és aquell que surt de la columna per cues.

$$Pes_{columna plena} = Pes_{columna buida} + Pes_{rebliment} + Pes_{liquid} \quad \text{Equació 11.9.6}$$

**Taula. 11.9.16.** Resultats del càlcul del pes de la columna plena

<b>Pes del rebliment (Kg)</b>	1299,384
<b>Pes Aigua (Kg)</b>	4158,497
<b>Pes operació (Kg)</b>	3890,875

### G. Càlcul del espessor d'aïllament

Per tal de realitzar un aïllament adequat per aquest equip s'empra el programa Insulan proporcionat per l'empresa CALORCOL S.A.

Les característiques introduïdes al programa per tal de treballar amb llana mineral de roca com a manta aïllant de 80Kg/m<sup>3</sup>, han estat:

- Temperatura Interior = 103 °C
- Temperatura Superficial del Aïllant = 35°C
- Temperatura Ambient = 16,9 °C (és la mitjana del territori)
- Velocitat de l'aire = 2,7 m/s (velocitat mitjana en direcció nord- oest)
- Superfície exterior de l'aïllament = Acer inoxidable brut (Emissivitat de 0,3)
- Superfície sense aïllant = Hastelloy B-2 (Suposant emissivitat de 0,3)

El resultat obtingut és d'un aïllament de 2,81 cm amb una eficiència del 92,57%.

## 11.10 Columna de destil·lació , CD-302

Tal i com ja s'ha comentat, el Clorur d'hidrogen (HCl) i el Fosgè són dos compostos molt perillós i de difícil tractament, és per això que és molt important que aquesta columna els elimini completament del corrent principal. Ambdós compostos seran extrets per caps i enviats a tractament on se'ls revaloritzarà, per altra banda, existeix un corrent de cues que contindrà MCC i Toluè que s'ajuntaran amb els de la columna CD-301, per tal de seguir la línia de procés. La composició dels corrents en funció de l'alimentació s'expressa en la taula 11.10.1

**Taula 11.10.1.** Composicions dels corrents de la columna CD-302 (Kmol/h).

	Aliment	Caps	Cues
HCl	8,183	8,183	0,000
Fosgè	2,046	2,046	0,000
MCC	0,319	0,000	0.319
Toluè	0,292	0,000	0.292

Per la realització del seu disseny s'ha utilitzat el programa HYSYS, amb una primera aproximació amb el paquet *ShortCut* i de manera més rigorosa amb el paquet *Distillation Column*.

### 11.10.1Avaluació del shortcut

Per tal de realitzar la simulació amb el *ShortCut*, ha estat precís fixar les variables especificades en la [taula 11.10.2](#), el programa HYSYS per ell sol proporciona els valors mostrats en la figura 11.10.1

**Taula 11.10.2.** Paràmetres fixats inicialment pel disseny amb ShortCut de la columna CD-302.

Composició del component clau a cues	0,000001
Composició del component pesat per caps	0,000001
Pressió del condensador (KPa)	2026
Pressió del calderí (KPa)	2026
Reflux extern	0.5

Tal i com es pot apreciar, s'ha simulat amb un requeriment de puresa molt elevat, d'aquesta manera, el corrent de caps podrà anar directe a l'àrea de medi ambient, i el producte de cues podrà mesclar-se amb el corrent ja especificat de la sortida de la torre CD-301 per dirigir-lo al reactor de piròlisi on continuarà la línia de procés.

Trays	
Minimum Number of Trays	10,083
Actual Number of Trays	16,556
Optimal Feed Stage	4,574

Temperatures	
Condenser [C]	1,616
Reboiler [C]	236,8

Flows	
Rectify Vapour [kgmole/h]	15,350
Rectify Liquid [kgmole/h]	5,117
Stripping Vapour [kgmole/h]	15,350
Stripping Liquid [kgmole/h]	15,961
Condenser Duty [kJ/h]	-246621,417
Reboiler Duty [kJ/h]	267152,510

*Figura 11.10.1.* Resultats del dimensionament de la CD-302 amb *ShortCut*

Tal i com es pot observar, el programa ha simulat de manera correcta la columna desitjada, no obstant és el disseny rigorós el que determinarà finalment la columna. Així doncs, a partir dels valors obtinguts en aquesta primera simulació es pot iniciar el disseny amb el paquet *Distillation Column*.

### 11.10.2 Avaluació de la simulació rigorosa

La taula 11.10.3 mostra els resultats obtinguts en el millor dels casos simulats amb el paquet proporcionat pel programa HYSYS, *Distillation Column*.

**Taula 11.10.3.** Resultats del dimensionament de la CD-302 de manera rigorosa

Nº d'etapes	18
Etapa de l'aliment	6
Pressió condensador (KPa)	2026
Pressió calderí (KPa)	2026
Temperatura condensador (°C)	1,616
Temperatura calderí (°C)	236,8
Relació de reflux	2,0
Cabal de Destil·lat (Kmol/h)	10,23
Cabal de Producte de cues (Kmol/h)	0,612

Un cop definida la columna s'inicia el dimensionament d'aquesta amb l'eina *Tray Sizing* que proporciona el programa HYSYS. Aquest realitza automàticament l'auto-secció de la columna, un cop se li proporciona el tipus d'etapa d'equilibri amb la que es vol treballar. En aquest cas s'ha definit una columna empacada amb Selles Intalox de ceràmica de 0,5 polsades de diàmetre degut a la naturalesa corrosiva del Clorur d'hidrogen, tal i com es mostra en la figura 11.10.3. La figura 11.10.2, mostra l'empacat utilitzat en aquesta la columna.



**Figura 11.10.2.** Selles Intalox ceràmiques de diferents diàmetres.



	Section_1	Section_2
<b>Internals</b>	Packed	Packed
Packing Type	Intalox Saddles (Cer	Intalox Saddles (Cer
Flooding Correlation	SLEv73	SLEv73
HETP Correlation	Frank	Frank
Est. # Pieces of Packing		
Est. Mass of Packing [kg]		
Est. Packing Cost (US\$)		
<b>Column Geometry</b>		
Section Diameter [m]	0,6096	0,6096
X-Sectional Area [m2]	0,2919	0,2919
Section Height [m]	2,586	5,172
<b>Hydraulic Results</b>		
Max Flooding [%]	41,37	57,21
Section DeltaP [kPa]	0,2251	0,8960
DP per Length [kPa/m]	8,704e-002	0,1732
Flood Gas Vel. [m3/h-m2]	285,8	200,7
Flood Gas Vel. [m/s]	7,938e-002	5,576e-002

**Figura 11.10.3.** Resultats del dimensionament de la columna CD-302.

Tal i com mostra la figura 11.10.3, la columna consta de 0.6096 metres de diàmetre i dos seccions empacades de 2,586 metres i 5,172 metres d'alçada. Per tal de dur a terme un control i manteniment adequat, serà precís instal·lar tres boques d'home repartides en la columna, una a la part superior, una a la part central, on es separen les dues zones empacades i una a la part inferior. Considerant aquest aspecte i deixant espai pel distribuïdor superior i inferior, el redistribuidor, els plats de subjecció i el col·lector de líquids, s'ha decidit incorporar 1 metres a la zona inferior, 1 a la part central i 1 a la part superior, fent un total de 3 metres afegits i per tant 10,758 metres d'alçada total, no obstant degut a la desconeixença de valors en el disseny i per tal d'obtenir un marge de seguretat s'aplica un sobredimensionament del 15% del rebliment (0,58 metres afegits per cada secció), així doncs, afegint els 0,231 metres d'alçada del cap i del fons torisfèric es pot determinar una columna total de 12,38 metres d'alçada.

### 11.10.3 Altura del rebliment. Mètode de la HEPT

Encara que la torre sigui de rebliment el contacte entre el líquid i vapor es continu, es pot analitzar com a una torre d'etapes. Es suposa que la part del rebliment es pot dividir en segments d'igual altura. Cada segment consta com si fos una etapa d'equilibri on el

líquid i el vapor que surten del segment es troben en equilibri. És important tenir en compte que el model d'etapes no és exactament lo que succeeix físicament en la columna, però es pot utilitzar per a fer els dissenys.

La HEPT, és l'altura del rebliment necessària per obtenir el canvi de composició al qual s'arriba amb un contacte teòric d'equilibri. Les HEPT poden variar des de 1/2 polzades (fluxos molt petits de gas en rebliments auto-humectants) fins a uns quants peus (anells Rasching grans).

En un equip industrial normal, la HETP varia entre 1 i 4 peus. Com menor sigui la HEPT més curta es la columna i el rebliment és més eficient. Per a mesurar l'HETP es determinen les composicions superiors e inferiors a reflux total i després es calcula el número d'etapes d'equilibri.

$$HEPT = \frac{\text{Alçada del rebliment}}{\text{número d'etapes teòriques}} \quad \text{Equació 11.10.1}$$

La HEPT varia segons el tipus i la mida del rebliment, de les substàncies que es van a separar i amb el flux del gas.

L'HEPT per aquesta columna és de 0,4957.

#### **11.10.4 Dispositius interns de la columna CD-302**

Tal i com ja s'ha comentat en l'apartat 11.9.1, dispositius interns de la columna CD-301, és molt important tindre un disseny rigorós de l'interior de les columnes, ja que aquest dispositius afegits determinaran el funcionament òptim de la columna. Així doncs per aquesta columna es precisa d'un distribuïdor de líquid a la part superior, un de gas a la part inferior i un redistribuïdor a la part central, tots aquest han estat especificats a l'apartat 3.1.3, la diferència principal entre els dispositius entre columnes és el material, ja que en aquest cas, al existir risc de corrosió per l'àcid clorhídric s'ha decidit dissenyar amb Hastelloy B-2, ja especificat anteriorment.

En aquesta columna també és precís un suport per l'empacat i un retenidor d'aquest, ja especificats ambdós anteriorment.

Finalment s'introdueix un col·lector de líquid tant a la part central com a la part inferior i un eliminador d'arrossegament a la part superior de la columna per evitar arrossegament de líquid per part dels vapors.

### 11.10.5 Disseny mecànic de la columna CD-302

Tal i com ja s'ha comentat s'utilitza Hastelloy B-2 pel disseny d'aquesta torre degut a la corrosió del clorur d'hidrogen. Així doncs, es comença amb el càlcul de l'espessor requerit per la columna a les condicions de treball. La taula 11.10.4 en mostra les condicions pel disseny, calculades aquestes amb les equacions ja vistes anteriorment, 11.4.40, 11.4.41 i 11.4.42.

**Taula 11.10.4.** Valors per iniciar el disseny mecànic de la columna CD-302

Ptreball (atm)	20
Phidràulica (atm)	1,15
Pdisseny (atm)	23,27
Ttreball (°C)	236,8
Tdisseny (°C)	256.8
Radi (mm)	304.8
Alçada (mm)	12383,7
(S) Tensió màxima admissible (psi)	8830,5

#### *11.10.5.1 Espessor del cos cilíndric per la pressió interna*

Els càlculs de l'espessor per pressió interna dels cossos cilíndrics es realitzen amb l'equació 11.1.4 i un cop sobredimensionat per seguretat i per corrosió s'obté un valor de 17,9 mm, buscant a la taula de espessos de fabricació s'obté un gruix final de 18 mm..

### ***11.10.5.2 Espessor del capçal per la pressió interna***

S'ha utilitzat l'equació 11.6.12 pel càlcul de l'espessor d'aquests per la pressió interna ja que ambdós seran toriesfèrics. Els resultats han estat de 26,5 mm, així doncs s'opta per un espessor de 27 mm en els espessors de fabricació.

La taula 11.10.5. mostra els resultats obtinguts pels espessors de la columna CD-302.

**Taula 11.10.5.** Taula resum dels espessors de la columna CD-302 en mil·límetres.

Cos	Espessor
Cilindre	18
Capçals	27

### ***11.10.5.3 Càlcul de l'aïllament de l'equip***

Per tal de realitzar un aïllament adequat per aquest equip s'empra el programa Insulan proporcionat per l'empresa CALORCOL S.A.

Les característiques introduïdes al programa per tal de treballar amb llana mineral de roca com a manta aïllant de 80Kg/m<sup>3</sup>, han estat:

- Temperatura Interior = 236,8 °C
- Temperatura Superficial del Aïllant = 35°C
- Temperatura Ambient = 16,9 °C (és la mitjana del territori)
- Velocitat de l'aire = 2,7 m/s (velocitat mitjana en direcció nord- oest)
- Superfície exterior de l'aïllament = Acer inoxidable brut (Emissivitat de 0,3)
- Superfície sense aïllant = Hastelloy B-2 (Emissivitat de 0,3)

El resultat obtingut és d'un aïllament de 10,16 cm amb una eficiència del 97,89%.

#### 11.10.5.4 Càlcul del pes de l'equip

Per arribar a conèixer el pes de l'equip en operació es calcula el pes de l'equip buit i el pes del líquid, sumant tots dos valors s'obindrà el pes real de l'equip a la planta.

Per tal de calcular el pes de l'equip buit és necessari conèixer la densitat del material de la instal·lació i del rebliment,  $9220 \text{ kg/m}^3$  i  $780 \text{ Kg/m}^3$  respectivament.

S'utilitza l'equació 11.10.2. per calcular el pes de les peces que formen l'equip per després sumar-les.

$$Pes = \text{Àrea} \cdot \text{Gruix} \cdot \text{Densitat} \quad \text{Equació 11.10.2}$$

On l'àrea de cada part es calcula de la següent manera (equacions 11.10.3 i 11.10.4)

$$\text{Àrea cilindre} = \pi \cdot 2 \cdot r \cdot h \quad \text{Equació 11.10.3}$$

$$\text{Àrea toriesfèric} = 0,842 \cdot D_c^2 \quad \text{Equació 11.10.4}$$

Utilitzant l'equació 11.9.6 i els valors ja descrits de gruix i densitat es pot representar la taula 11.10.6, amb els valors del pes de cada peça de l'equip.

**Taula 11.10.6** Resultats obtinguts d'àrea i pes de cada part de l'equip

Peça	Àrea (m <sup>2</sup> )	Pes (Kg)
Capçal toriesfèric	0,31	77,74
Cilindre	8,93	2055,20

Per últim cal conèixer el pes del rebliment. Pel càlcul d'aquest s'utilitza l'equació 11.10.5.

$$Pes \text{ rebliment} = \text{Volum}_{\text{Secció}} \cdot \rho_{\text{rebliment}} \quad \text{Equació 11.10.5}$$

On:

$$\cdot \text{Volum secció} = 2,60 \text{ m}^3$$

$$\cdot \rho \text{ rebliment} = 780 \text{ kg/m}^3$$

El pes del rebliment total és de 2027,06 Kg i per tant el pes de la columna buida afegint-li el pes de l'aïllament, 776,65 Kg, és de 5014,39 Kg. Aquest s'ha sobredimensionat un 10% degut a que es desconeix el pes de força dispositius inclosos en la columna, com serien els distribuïdors, els suports, els retenidors, les boques d'home, entre d'altres, així doncs, el pes total de l'equip buit és de 5515,83 Kg.

El Volum de la columna es representa seguint l'equació 11.10.6

$$\text{Volum columna} = V_{\text{toriesfèrics}} + \pi \cdot r_1^2 \cdot h_1 \quad \text{Equació 11.10.6}$$

On:

$$\cdot \text{Volum toriesfèrics} = 19,8 \text{ dm}^3 = 0,0198 \text{ m}^3 \text{ (x2)}$$

$$\cdot r_1 = \text{Radi del cos cilíndric, m}$$

$$\cdot h_1 = \text{Alçada del cos cilíndric, m}$$

El resultat obtingut és de 3,17 m<sup>3</sup>. Finalment es realitza la suma del pes del líquid, 1586,64 Kg, i del pes de l'equip buit per obtenir el pes de la columna en operació, aquest és de 7102,47 Kg.

#### **11.10.5.5 Dispositius de subjecció o recolzament**

Degut a les condicions d'elevada alçada, i pes de l'equip es decideix utilitzar un faldó cilíndric per suportar el pes de l'equip.

## 11.11 Columnes de destil·lació de l'Àrea 500

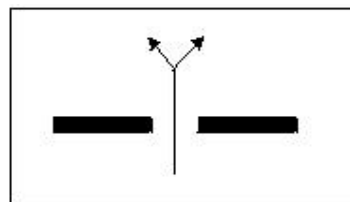
La rectificació o destil·lació per etapes amb reflux és un procés físic utilitzat per separar mescles líquides enriquint el corrent de vapor al posar-lo en contacte amb el reflux, sent aquest el corrent líquid que es genera en el condensador. Sempre que no es formin azeòtrops, el vapor que arriba al condensador podrà tindre una puresa tant gran com es desitgi utilitzant una columna suficientment alta y un reflux elevat. La part del condensat que no es retorni a la columna surt com a producte anomenat *producte de caps*. Per altra banda, del calderí es retira líquid que conté la major part del component menys volàtil, degut a que, a no se que es formi un azeòtrop, poca quantitat d'aquest component surti amb el producte per caps, aquest s'anomena *producte de cues*.

Abans de començar amb el disseny de les columnes és necessari conèixer el tipus d'etapes d'equilibri que es poden fer servir per tal d'optimitzar-ne el procés, aquestes posen en contacte les dos fases del procés el suficient temps perquè es pugui donar la transferència de matèria. Les possibles etapes són les següents:

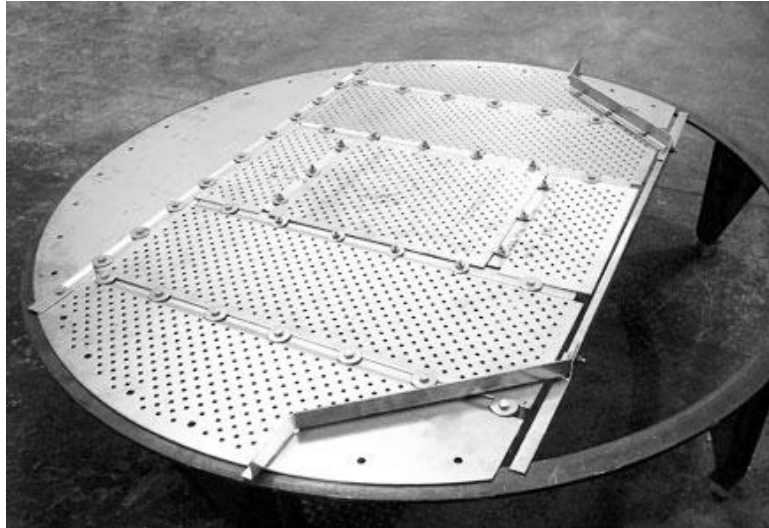
- PLATS

### · Perforats

Són plaques perforades que poden ser de diferent mida. De construcció senzilla i per tant de costos més reduïts que els altres tipus. El impediment principal que tenen és que un cop instal·lats, la regulació del pas del vapor ja no depèn de l'operador. Els plats perforats son molt bons per aplicacions brutes o quan hi ha sòlids presents, perquè són fàcil de netejar.



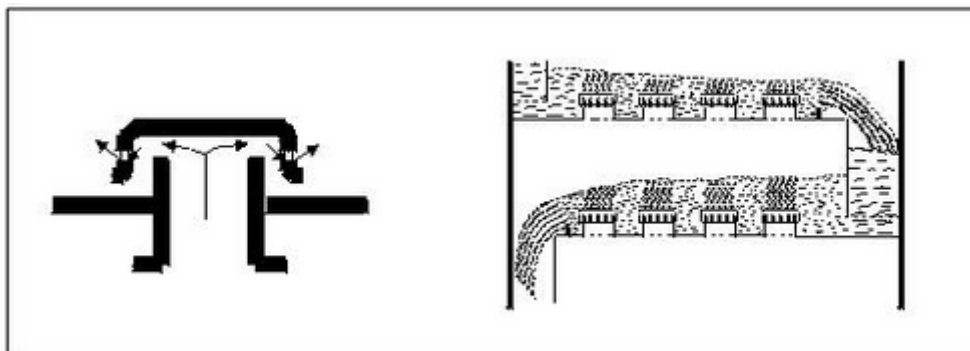
**Figura XX.** Esquema d'un plat perforat



**Figura XX2.** Plat perforat

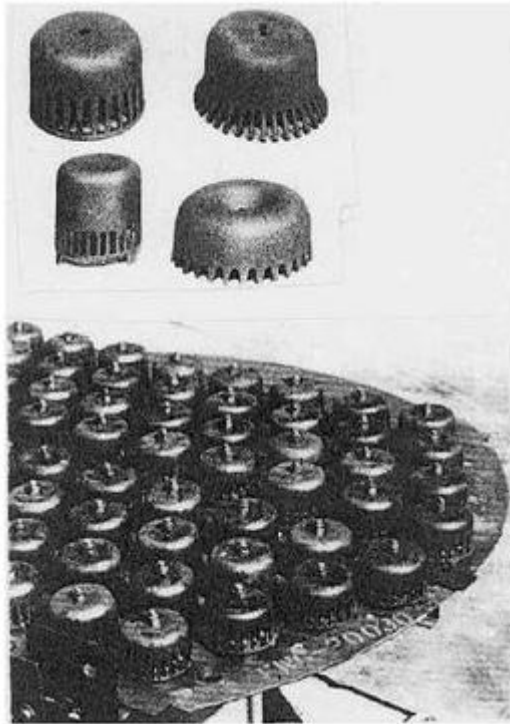
#### · Campanes de bombolleig

En l'exemple que es mostra en la **figura XX3** es pot observar com aquestes estan col·locades sobre uns conductes per on puja el gas. Aquest tipus de plats té moltes configuracions possibles i és molt emprat quan es vol controlar el temps de residència per aconseguir determinades reaccions químiques, quan es treballa amb càrregues de líquid o gas molt baixes i amb un mínim de degoteig requerit. La funció que la diferencia dels altres tipus és l'augment en la dispersió del gas quan aquest travessa la campana i és alliberat per les ranures que aquesta té.



**Figura XX3.** Esquema d'un plat amb campanes de bombolleig

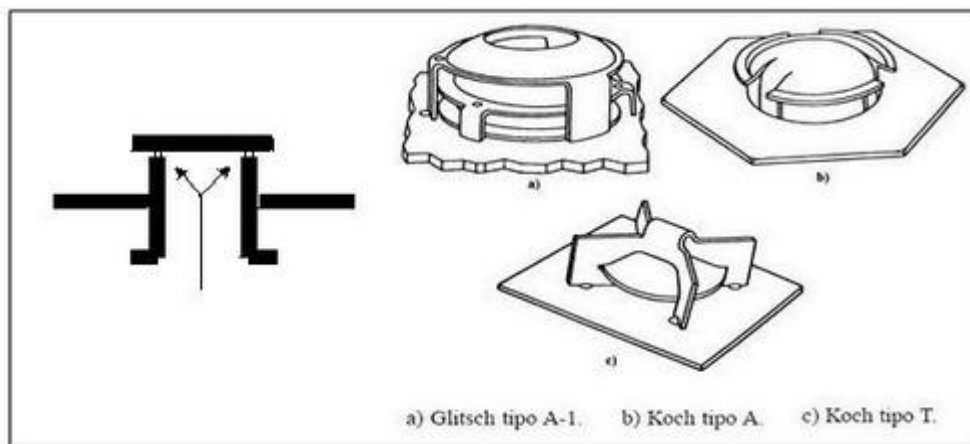




**Figura XX4.** Plat amb campanes de bombolleig i quatre tipus de campana

· **Vàlvules**

És un model entremig dels dos ja comentats, la seva construcció consisteix en un forat amb una vàlvula a la part superior la qual s'eleva amb el pas del corrent gas. De configuració molt similar al les ja comentades campanes de bombolleig i molt emprades per operar al buit.



**Figura XX5.** Esquema d'un plat de vàlvules i tres configuracions d'exemple



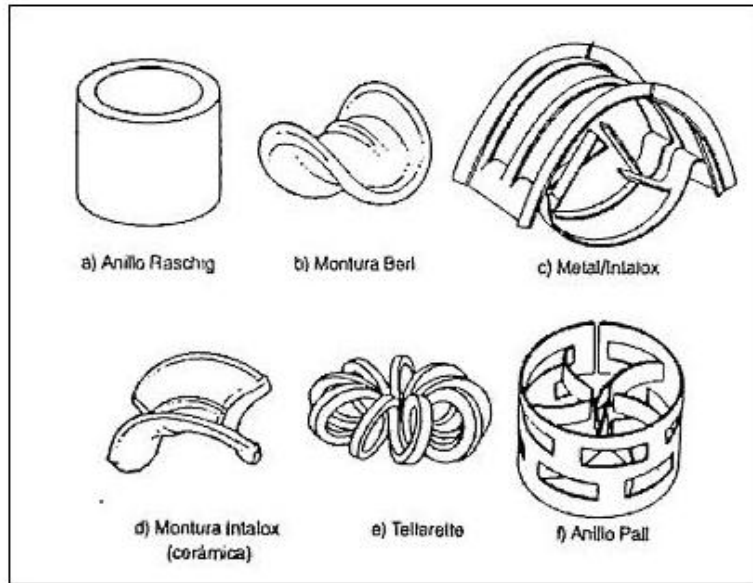
**Figura XX6.** Plat de vàlvules

## - EMPACAT

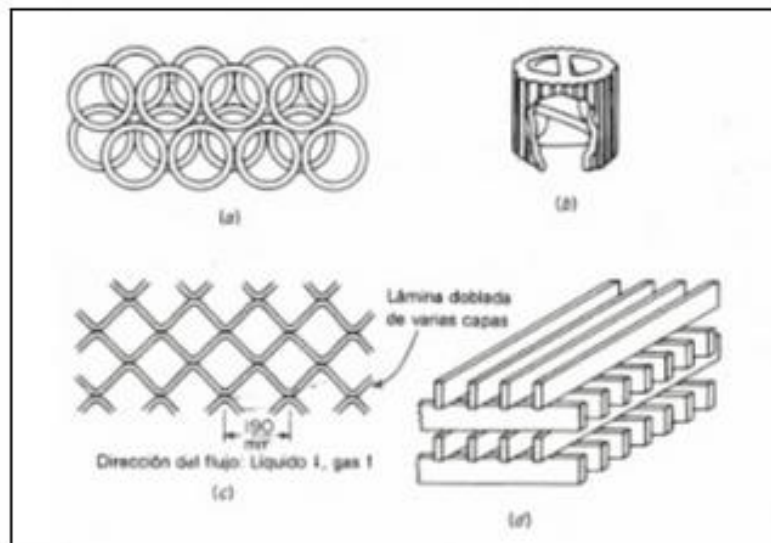
Aquesta tècnica revesteix la columna de peces per millorar-ne el contacte gas-líquid. En aquest cas aquest contacte és de manera continua i no per diferents etapes com en el cas de les columnes de plats. El flux de líquid cau de dalt a baix de la columna sobre l'àrea d'empacat i el gas puja en contracorrent per la columna.

La zona d'empacat està compresa per peces que poden ser metàl·liques, ceràmiques o de plàstic, i que s'acumulen en una regió de la torre per complir la funció de maximitzar el contacte entre líquid i gas. Aquesta acumulació de petites estructures pot ser de manera ordenada o desordenada depenent de la funció que tinguin que complir.

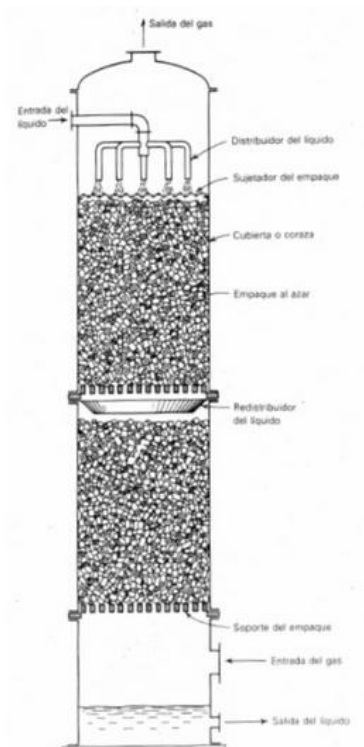
Les figura **XX7 i XX8** mostra alguns tipus d'empacat i la figura **XX9** en mostra una disposició desordenada en la columna.



**Figura XX7.** Diferents tipus d'empacat desordenat per a columnes



**Figura XX8.** Diferents tipus d'empacat ordenat per a columnes



**Figura XX9.** Distribució en la columna del rebliment

Després del reactor de piròlisi són requerides tres columnes de destil·lació, cada una d'elles implementant una funció diferents i necessària per procedir amb el procés. Aquestes són anomenades CD-501, CD-502 i CD-503. A continuació s'especifiquen les funcions que realitzen cada una d'elles.

CD-501:

Just després del reactor de piròlisi i per adequar-se el màxim possible a les condicions descrites en la patent ja esmentada, s'ha incorporat una columna de destil·lació capaça d'extreure de manera molt efectiva tot l'àcid clorhídric generat en la piròlisi. Així doncs s'aconsegueix evitar tota possibilitat de produir MCC de nou.

CD-502:

A continuació de la columna CD-501 és precís incorporar una columna que extregui completament el MIC del sistema, ja que és aquest compost el requerit per la tercera etapa de reacció. Així doncs s'incorpora una columna que dona per cues una mescla de MCC i toluè que alimentarà la tercera columna.

CD-503:

Finalment, la columna CD-503 permet extreure el màxim de toluè per cues per reciclar-lo a les columnes d'absorció ja descrites, i poder treure d'aquesta manera per caps, la resta de MCC no reaccionat que anirà de nou reciclat al reactor de piròlisi. La incorporació d'aquesta columna permet optimitzar el consum de toluè i minimitzar tant les pèrdues de MCC com els costos associats a tractament de residus.

Aquest apartat es dedicarà doncs al disseny detallat de cada una d'aquestes tres columnes de destil·lació, s'explicarà amb més detall les seves funcions i les condicions a les que aquestes ha de treballar.

### **11.12 Columna de destil·lació per separar l'àcid clorhídric, CD-501**

Tal i com ja s'ha especificat, aquesta columna té com a funció principal l'extracció completa del HCl de la mescla producte, d'aquesta manera s'evitarà la formació de MCC a partir de la reacció amb el MIC (producte d'interès).

Una columna de destil·lació no és l'única opció que s'ha contemplat per aquesta funció, no obstant és la que resultava més eficaç, i és per això que ha estat l'opció definitiva. Per la realització del seu disseny s'ha utilitzat el programa HYSYS, amb una primera aproximació amb el paquet *ShortCut* i de manera més rigorosa amb el paquet *Distillation Column*.

#### **11.12.1 Avaluació del shortcut**

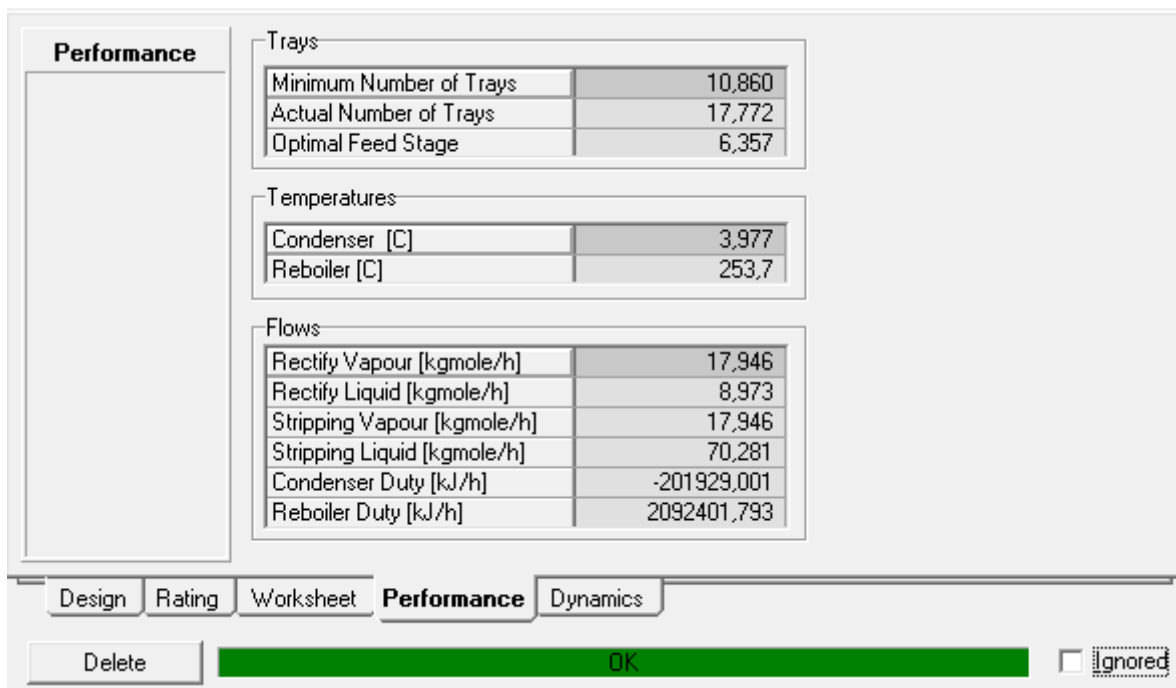
Per tal de realitzar la simulació amb el *ShortCut*, ha estat precís fixar les variables especificades en la taula 11.12.1, el programa HYSYS per ell sol proporciona els valors mostrats en la figura 11.12.1.

**Taula 11.12.1** Paràmetres fixats inicialment pel disseny amb ShortCut

Composició del component clau a cues	0,000001
Composició del component pesat per caps	0,000001
Pressió del condensador (KPa)	2837,1

Pressió del calderí (KPa)	2837,1
Reflux extern	1

Tal i com es pot apreciar, s'ha simulat amb un requeriment de puresa molt elevat, d'aquesta manera, el corrent de caps podrà ser comercialitzat, i el corrent de cues no tindrà cap problema en quant a la reacció ja esmentada entre el MIC i el HCl.



**Figura 11.12.1** Resultats del dimensionament de la CD-501 amb ShortCut

Tal i com es pot observar per tal d'extreure un corrent líquid pur d'àcid clorhídric per caps, és precís treballar a una pressió de 28 atm i una temperatura de 4°C. S'ha considerat una opció més correcta que no operar la columna a una pressió de 10 atm i a una temperatura al condensador de -35°C o fins i tot a 1 atm i a una temperatura al condensador de -85°C. Coneixent la perillositat d'un equip a tant elevada pressió es tindran que prendre mesures estrictes per tal d'operar-la sense risc ni problema algun.

A partir dels valors obtinguts en aquesta primera simulació es pot iniciar un disseny més rigorós.

### 11.12.2 Avaluació de la simulació rigorosa

La taula 11.12.2. mostra els resultats obtinguts en el millor dels casos simulats amb el paquet proporcionat pel programa HYSYS, *Distillation Column*.

**Taula 11.12.2.** Resultats del dimensionament de la CD-501 de manera rigorosa

Nº d'etapes	14
Etapa de l'aliment	5
Pressió condensador (KPa)	2837,1
Pressió calderí (KPa)	2837,1
Temperatura condensador (°C)	3,977
Temperatura calderí (°C)	257,3
Relació de reflux	3
Cabal de Destil·lat (Kmol/h)	8,973
Cabal de Producte de cues (Kmol/h)	52,3

Per tal de millorar-ne la puresa respecte el resultat que aportava el ShortCut, ha estat precis augmentar-ne la recirculació.

La taula 11.12.3 mostra els resultats obtinguts en comparació amb el corrent d'alimentació a la torre CD-501

**Taula 11.12.3.** Corrents molars de la torre CD-501

	Aliment (Kmol/h)	Caps (Kmol/h)	Cues (Kmol/h)
HCl	8,1825	8,1825	0,00
MIC	8,1825	0,00	8,1825
MCC	2,0456	0,00	2,0456
Toluè	41,1323	0,00	41,1323

Un cop definida la columna s'inicia el dimensionament d'aquesta amb l'eina *Tray Sizing* que proporciona el programa HYSYS. Aquest realitza automàticament l'auto-secció de la columna, un cop se li proporciona el tipus d'etapa d'equilibri amb la que es vol treballar. En aquest cas s'ha definit una columna empacada amb selles Intalox de ceràmica d'1,5 polsades, tal i com es mostren en la **figura** 11.12.2

L'elecció d'aquesta ha estat degut a la naturalesa corrosiva de l'àcid clorhídric. La **figura** 11.12.3, mostra els resultats obtinguts per la columna CD-501.



**Figura 11.12.2.** Selles intalox de ceràmica de diferents dimensions.

	Section_1	Section_2	Section_3
<b>Internals</b>	Packed	Packed	Packed
Packing Type	Intalox Saddles I	Intalox Saddles I	Intalox Saddles I
Flooding Correlation	SLEv73	SLEv73	SLEv73
HETP Correlation	Frank	Frank	Frank
Est. # Pieces of Packing			
Est. Mass of Packing [kg]			
Est. Packing Cost (US\$)			
<b>Column Geometry</b>			
Section Diameter [m]	0,6096	0,7620	0,7620
X-Sectional Area [m <sup>2</sup> ]	0,2919	0,4560	0,4560
Section Height [m]	2,586	1,843	1,843
<b>Hydraulic Results</b>			
Max Flooding [%]	59,50	50,35	54,73
Section DeltaP [kPa]	0,3698	0,1629	0,2035
DP per Length [kPa/m]	0,1430	8,839e-002	0,1104
Flood Gas Vel. [m <sup>3</sup> /h-m <sup>2</sup> ]	491,0	465,2	415,5
Flood Gas Vel. [m/s]	0,1364	0,1292	0,1154

**Figura 11.12.3.** Resultats del dimensionament de la columna CD-501



Tal i com mostra la figura 11.12.3, la columna consta de tres seccions la primera d'elles en la part alta de la torre és de 0,61 metres de diàmetre i una alçada de 2,59 metres de rebliment. Per altra banda, la part inferior és de 0,76 metres de diàmetre i amb dos seccions de rebliment internes de 1,84 metres d'alçada cada una.

Per tal de dur a terme un control i manteniment adequat, serà precís instal·lar quatre boques d'home repartides en la columna, una a la part superior, una segona a la part central de la columna on es diferencien les dues seccions de diferent diàmetre, una entre rebliments de mateix diàmetre i finalment una quarta a la part inferior de la columna. Considerant aquest aspecte i deixant espai pel distribuïdor i els redistribuïdors de líquid i gas, s'ha decidit incorporar 1 metre a la zona inferior, 0,5 metre entre seccions de mateix diàmetre i 1 metre més a la part superior, obtenint un total de 2,5 metres afegits i 8,77 metres d'alçada total, no obstant degut a la desconeixença de valors en el disseny i per tal d'obtenir un marge de seguretat s'aplica un sobredimensionament del 15% als rebliments (0,31 m per cada un), així doncs, incloent l'alçada dels dos toriesfèrics (0,18 m pel cap i 0,23 m pel fons) i l'alçada del con central d'1 metre, es pot determinar una columna total de 11,11 metres d'alçada.

### **11.12.3 Alçada del rebliment. Mètode de la HEPT**

Encara que la torre sigui de rebliment el contacte entre el líquid i vapor es continu, es pot analitzar com a una torre d'etapes. Es suposa que la part del rebliment es pot dividir en segments d'igual altura. Cada segment consta com si fos una etapa d'equilibri on el líquid i el vapor que surten del segment es troben en equilibri. És important tenir en compte que el model d'etapes no és exactament lo que succeeix físicament en la columna, però es pot utilitzar per a fer els dissenys.

La HEPT, és l'altura del rebliment necessària per obtenir el canvi de composició al qual s'arriba amb un contacte teòric d'equilibri. Les HEPT poden variar des de 1/2 polzades (fluxos molt petits de gas en rebliments auto-humectants) fins a uns quants peus (anells Rasching grans).

En un equip industrial normal, la HETP varia entre 1 i 4 peus. Com menor sigui la HEPT més curta és la columna i el rebliment és més eficient. Per a mesurar l'HETP es determinen les composicions superiors e inferiors a reflux total i després es calcula el número d'etapes d'equilibri.

$$HEPT = \frac{\text{Alçada del rebliment}}{\text{número d'etapes teòriques}} \quad \text{Equació 11.12.1}$$

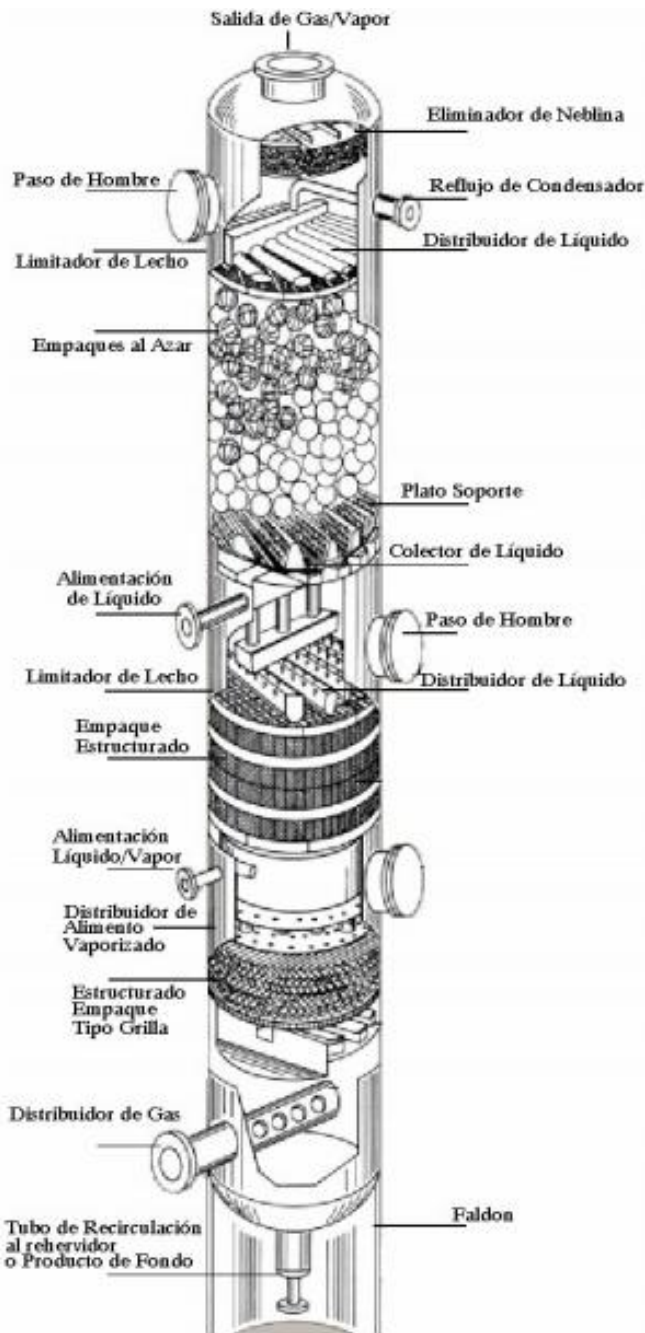
La HEPT varia segons el tipus i la mida del rebliment, de les substàncies que es van a separar i amb el flux del gas.

L'HEPT per aquesta columna és de 0,5152.

#### **11.12.4 Dispositius interns de la columna CD-501**

Per un funcionament òptim de la columna no tan sols s'ha de considerar l'empacat o l'alçada de la columna, hi ha un seguit d'elements que es requereixen per un bon funcionament d'aquesta. Aquest accessoris es poden identificar en la figura 11.12.4 i són:

- Distribuïdor de líquid
- Suports de l'empacat
- Retenidors d'empacat
- Col·lectors de líquid
- Eliminadors de l'arrossegament

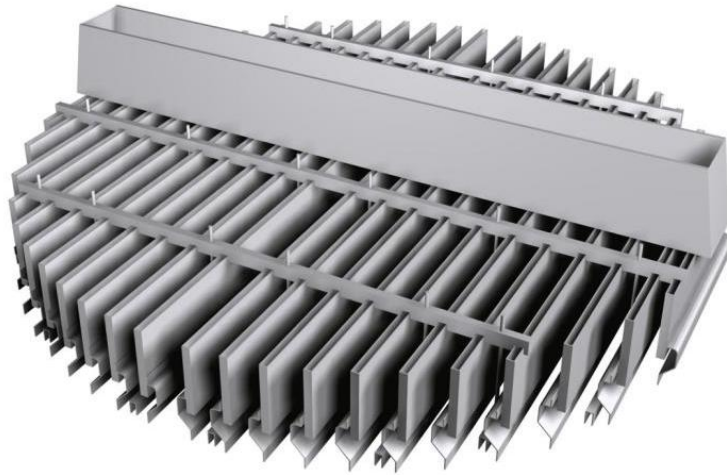


**Figura 11.12.4.** Esquema general d'una torre empacada

#### 11.12.4.1 *Distribuidors de líquid*

Una bona distribució de líquid a la part alta de la torre és essencial per tal d'obtenir una operació eficient. Per tant, els distribuïdors són una peça clau en el disseny de la columna empacada. Com que no és una columna amb una única secció d'empacament, és necessari instal·lar un redistribuïdor al inici de la segona secció, per redistribuir les

corrents internes. Aquests presenten el mateix disseny mecànic que els distribuïdors de líquid, però inclouen elevadors semicuberts (xemeneia) pel gas i, en alguns casos, netejaparets per tal de redirigir el líquid que cau per la superfície de la carcassa. En aquest cas s'ha escollit un distribuïdor de líquid de l'empresa SULZER com el que es mostra a la 11.12.5.



**Figura 11.12.5.** Distribuïdor de líquid

<http://www.sulzer.com/es/Products-and-Services/Separation-Technology/Mist-Eliminators/Sulzer-KM-Mist-Eliminators>

#### **11.12.4.2**      *Suports de l'empacat*

La funció d'aquest dispositiu és la de suportar l'empacat sense suposar una restricció excessiva al flux de les fases, també pot fer la funció de distribuïdor dels corrents. L'elegit per aquesta columna ha estat el que es mostra a la figura 11.12.6



**Figura 11.12.6.** Suport de l'empacat

<http://www.sulzer.com/es/Products-and-Services/Separation-Technology/Mist-Eliminators/Sulzer-KM-Mist-Eliminators>

#### **11.12.4.3**      *Retenidors d'empacat*

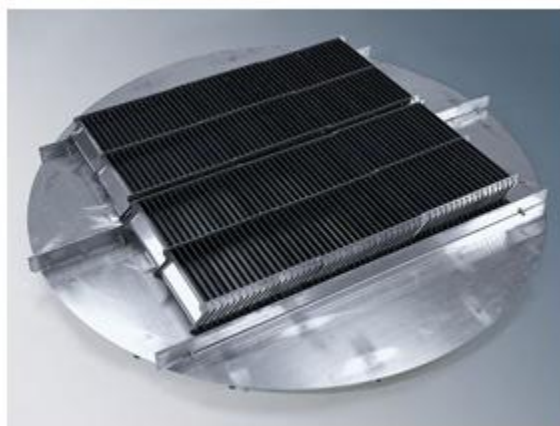
Els plats de sujecció o retenció es col·loquen a la part superior del rebliment per tal d'evitar el seu desplaçament o expansió a causa de l'elevada caiguda de pressió o cabal de líquid. Són utilitzats principalment en rebliments de ceràmica que es poden trencar fàcilment, i amb rebliments de plàstic, que poden flotar i sortir del llit empacat. El més freqüent és utilitzar recobriments de tela metàl·lica situats sobre el rebliment, juntament amb els plats de sujecció per prevenir l'arrossegament de líquid a la sortida del vapor.

#### **11.12.4.4**      *Col·lectors de líquid*

Els col·lectors de líquid són necessaris quan es vol retirar un corrent lateral o abans d'una recirculació, ja que mesclen el líquid abans de retirar-lo. El col·lector ha d'interrompre el pas de líquid, però no el de gas. Cal afegir que en columnes empacades, realitzen una funció molt important entre seccions i es recomanable instal·lar-los abans de cada redistribuïdor.

#### **11.12.4.5 Eliminadors de l'arrossegament**

Aquests es col·loquen generalment a la part alta de la columna per tal d'evitar l'arrossegament de líquid provocat pel gas ascendent. Degut a les condicions de corrosió que hi ha a la columna no es pot escollir una malla filamentosa de teixit. La figura 11.12.7, en mostra l'escollit per aquesta columna.



**Figura 11.12.7.** Malla eliminadora de boira de l'empresa LINCA C.A.

#### **11.12.5 Disseny mecànic de la columna CD-501**

De la mateix manera que el reactor de piròlisi, aquesta columna ha estat construïda amb el material Hastelloy B-2, la raó d'aquesta decisió és l'elevada resistència que aquest té a la corrosió per àcids.

Així doncs es comença amb el càlcul de l'espessor requerit per la columna a les condicions de treball. La taula 11.12.4 en mostra les condicions pel disseny. Al ser un equip que treballa a pressió, la pressió de disseny serà la pressió d'operació més la pressió hidràulica ja comentada, equacions 11.4.40 i 11.4.41, la temperatura de disseny es calcula amb l'equació 11.4.42.

**Taula 11.12.4.** Valors per iniciar el disseny mecànic de la columna CD-501

Ptreball (atm)	28
Phidràulica (atm)	1,36
Pdisseny (atm)	32,29
Ttreball (°C)	254
Tdisseny (°C)	274
Radi 1 (mm)	304,8
Radi 2 (mm)	381
Alçada 1 (mm)	4740
Alçada 2 (mm)	6390
(S) Tensió màxima admissible (psi)	8830,5

Els càlculs d'espessor realitzats pel cos cilíndric i pel capçal toriesfèric es realitzen per duplicat ja que la columna consta de dos seccions de diferent diàmetre. Així doncs la primera secció correspon a la part superior de la columna amb un diàmetre menor i la segona secció correspon a la part inferior amb un diàmetre major, ambdós seccions estan unides per una secció cònica de la qual també se'n realitza el càlcul de l'espessor.

#### **11.12.5.1** *Espessor del cos cilíndric per la pressió interna*

Els càlculs de l'espessor per pressió interna dels cossos cilíndrics es realitzen amb l'equació 11.1.4. i un cop sobredimensionat per seguretat i per corrosió s'obté un valor de 24,23 mm per la primera secció, i de 29,74 per la segona, així doncs, buscant en la taula de espessos de fabricació s'obté un gruix final de 25 mm pel primer cas i de 30 mm pel segon.

#### **11.12.5.2** *Espessor del capçal per la pressió interna*

S'ha utilitzat l'equació 11.6.12 pel càlcul de l'espessor d'aquests per la pressió interna ja que ambdós seran toriesfèrics. Els resultats han estat de 16,06 mm per la primera secció (capçal superior) i de 19,53 mm per la segona (capçal inferior), així doncs s'opta

per un espessor de 16 mm en l'espessor de fabricació pel capçal superior i de 20mm pel capçal inferior.

### 11.12.5.3 *Espessor del cos cònic per pressió interna*

Pel càlcul de l'espessor pel cos cònic per pressió interna s'utilitza l'equació 11.12.2.

$$t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \cos \alpha \cdot (SE - 0,6P)} \quad \text{Equació 11.12.2.}$$

On:

- P = Pressió de disseny, psi
- S = Valors de l'estrès del material, psi
- E = Factor de soldadura
- $\alpha$  = Angle de desviació entre diàmetres 80°

D'aquesta manera s'obté un valor de 34,0 mm i per tant al elegir-lo de entre els espessors de fabricació es determina un espessor de 34 mm.

La taula 11.12.5 mostra els resultats obtinguts pels espessors de la columna CD-501.

**Taula 11.12.5.** Taula resum dels espessors de la columna CD-501 en mil·límetres.

Cos	Espessor
Cilindre superior	25
Capçal superior	16
Cònic	34
Cilindre inferior	30
Capçal inferior	20



#### **11.12.5.4 Càlcul de l'aïllament de l'equip**

Per tal de realitzar un aïllament adequat per aquest equip s'empra el programa Insulan proporcionat per l'empresa CALORCOL S.A.

Les característiques introduïdes al programa per tal de treballar amb llana mineral de roca com a manta aïllant de  $80\text{Kg/m}^3$ , han estat:

- Temperatura Interior =  $257,3\text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura Superficial del Aïllant =  $35^\circ\text{C}$
- Temperatura Ambient =  $16,9\text{ }^\circ\text{C}$  (és la mitjana del territori)
- Velocitat de l'aire =  $2,7\text{ m/s}$  (velocitat mitjana en direcció nord- oest)
- Superfície exterior de l'aïllament = Acer inoxidable brut (Emissivitat de 0,3)
- Superfície sense aïllant = Hastelloy B-2 (Suposant emissivitat de 0,3)

El resultat obtingut és d'un aïllament de  $11,17\text{ cm}$  amb una eficiència del  $98,41\%$ .

#### **11.12.5.5 Càlcul del pes de l'equip**

Per arribar a conèixer el pes de l'equip en operació es calcula el pes de l'equip buit i el pes del líquid, sumant tots dos valors s'obté el pes real de l'equip a la planta.

Per tal de calcular el pes de l'equip buit és necessari conèixer la densitat del material de la instal·lació i del rebliment,  $9220\text{kg/m}^3$  i  $780\text{kg/m}^3$  respectivament.

S'utilitza l'equació 11.10.2. per calcular el pes de les peces que formen l'equip per després sumar-les.

Primer de tot doncs cal conèixer les àrees de cada peça de la columna, les equacions 11.10.3 i 11.10.4 ja descrites, juntament amb l'equació 11.12.3 descriuen cada una d'elles.

$$\text{\`{A}rea con} = \pi \cdot (R + r) \cdot g \quad \text{Equaci3} \text{ 11.12.3}$$

$$g = \sqrt{h^2 + (R - r)^2} \quad \text{Equaci3} \text{ 11.12.4}$$

On:

- h = Alçada del con, m
- r = Radi de la secci3 superior, m
- R = Radi de la secci3 inferior, m
- g = Longitud lateral del cos c3nic, m

Utilitzant l'equaci3 11.10.2 i els valors ja descrits de gruix i densitat es pot representar la taula 11.12.6, amb els valors del pes de cada peça de l'equip.

**Taula 11.12.6** Resultats obtinguts d'3rea i pes de cada part de l'equip

Peça	3rea (m2)	Pes (Kg)
Capçal toriesf. Superior	0,31	46,07
Cilindre superior	7,76	1788,87
Con	2,16	677,07
Cilindre inferior	13,54	3745,39
Capçal toriesf. Inferi	0,49	90,15

Per 3ltim cal con3ixer el pes del rebliment. Pel c3lcul d'aquest s'utilitza l'equaci3 11.12.5.

$$\text{Pes rebliment} = (\text{Volum}_{\text{secci3 1}} + \text{Volum}_{\text{secci3 2}}) \cdot \rho_{\text{rebliment}} \quad \text{Equaci3} \text{ 11.12.5}$$

On:

$$\cdot \text{Volum secció 1} = 1,2 \text{ m}^3$$

$$\cdot \text{Volum secció 2} = 2.61 \text{ m}^3$$

$$\cdot \rho \text{ rebliment} = 580 \text{ kg/m}^3$$

El pes del rebliment total és de 2181,44 Kg i per tant sumant-lo junt amb el pes de l'aïllament, 216,81 Kg, el pes de la columna buida és de 8745,81 Kg, aquest però es sobredimensiona un 10% degut a la desconeixença del pes dels dispositius interns i les boques d'home, s'assoleix un valor final de 9620,40 Kg.

Per conèixer el pes del líquid en la columna s'utilitza l'equació 11.12.6

$$\text{Pes líquid} = \left( \frac{\text{Volum}_{\text{columnna}}}{2} \right) \cdot \rho_{\text{líquid}} \quad \text{Equació 11.12.6}$$

On:

$$\cdot \text{Volum columna} = \text{Suma del Volum de cada una de les peces, m}^3$$

$$\cdot \rho_{\text{líquid}} = \text{Densitat de l'aigua, Kg/m}^3$$

El Volum de cada peça es representa seguint les equacions de la 11.12.7 a la 11.12.9

$$\text{Volum secció superior} = V_{\text{toriesf.Superior}} + \pi \cdot r^2_1 \cdot h_1 \quad \text{Equació 11.12.7}$$

$$\text{Volum secció inferior} = V_{\text{toriesf.Inferior}} + \pi \cdot r^2_2 \cdot h_2 \quad \text{Equació 11.12.8}$$

$$\text{Volum con} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot g \cdot (r_2^2 + r_1^2 \cdot r_2 \cdot r_1) \quad \text{Equació 11.12.9}$$

On:

- Volum toriesf. Superior =  $20 \text{ dm}^3 = 0,002\text{m}^3$
- $r_1$  = Radi del cos cilíndric superior, m
- $h_1$  = Alçada del cos cilíndric superior, m
- Volum toriesf. Inferior =  $39,2\text{dm}^3 = 0,0392\text{m}^3$
- $r_2$  = Radi del cos cilíndric inferior, m
- $h_2$  = Alçada del cos cilíndric inferior, m
- $g$  = Longitud lateral del cos cònic, m

Els resultats obtinguts es sumen per obtenir el volum total de la columna, amb un valor de  $4,02\text{m}^3$ . S'utilitza l'equació 11.10.6 i s'obté un valor de 2008,46 Kg pel pes del líquid.

Finalment es realitza la suma del pes del líquid i del pes de l'equip buit per calcular el pes de la columna en operació, aquest és de 11628,85 Kg.

#### **11.12.5.6      *Dispositius de subjecció o recolzament***

Degut a les condicions d'elevada alçada, i pes de l'equip es decideix utilitzar un faldó cilíndric per suportar el pes de l'equip sense problema algun, aquest ja s'ha descrit anteriorment.

### **11.13 Columna per separar el isocianat de metil , CD-502**

Tal i com ja s'ha comentat, el Isocianat de Metil (MIC) és un compost molt perillós i de difícil tractament, és per això que aquesta columna és molt important que elimini el màxim del MIC del corrent d'alimentació extraient-lo per caps. La composició dels corrents en funció de l'alimentació s'expressa en la taula 11.13.1.

**Taula 11.13.1.** Composicions dels corrents de la columna CD-502 (Kmol/h).

	Aliment	Caps	Cues
MIC	8,1825	8,1825	0,00
MCC	2,0456	0,000	2,0456
Toluè	41,1323	0,000	41,1323

Per la realització del seu disseny s'ha utilitzat el programa HYSYS, amb una primera aproximació amb el paquet *ShortCut* i de manera més rigorosa amb el paquet *Distillation Column*.

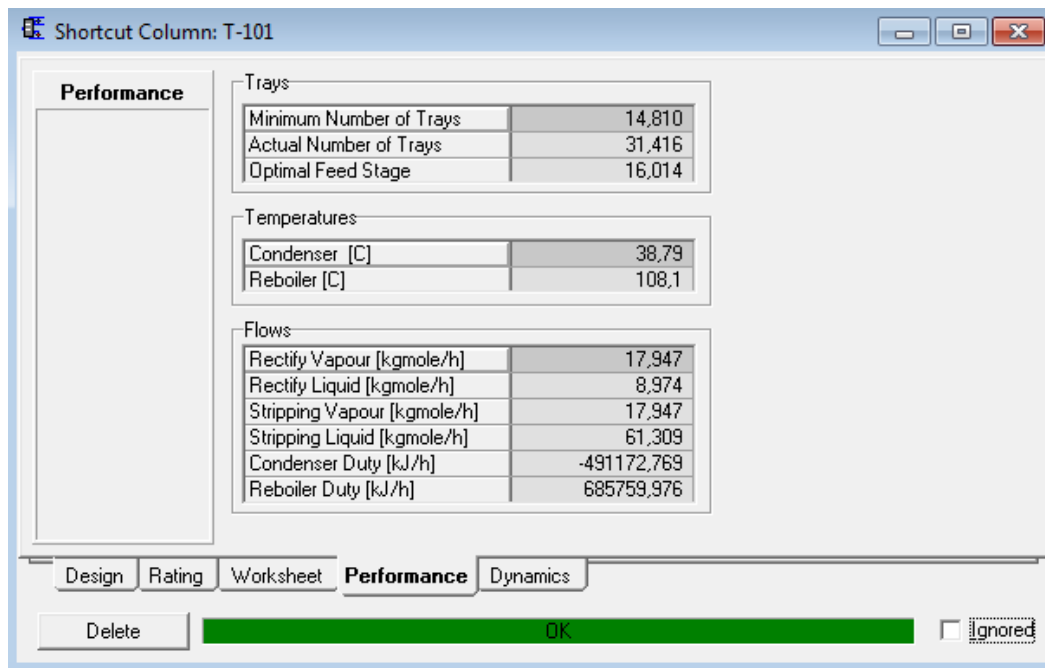
### 11.13.1 Avaluació del shortcut

Per tal de realitzar la simulació amb el *ShortCut*, ha estat precís fixar les variables especificades en la taula 11.13.2, el programa HYSYS per ell sol proporciona els valors mostrats en la figura 11.13.1

**Taula 11.13.2.** Paràmetres fixats inicialment pel disseny amb ShortCut de la columna CD-502.

Composició del component clau a cues	0,000001
Composició del component pesat per caps	0,000001
Pressió del condensador (KPa)	101,3
Pressió del calderí (KPa)	101,3
Reflux extern	1

Tal i com es pot apreciar, s'ha simulat amb un requeriment de puresa molt elevat, d'aquesta manera, el corrent de caps podrà anar directe al tanc pulmó abans del següent equip (tercer reactor), i el producte de cues podrà entrar a la columna CD-503, per reciclar part als absorbidors i part al reactor, tal i com ja s'ha comentat amb anterioritat.



**Figura 11.13.1.** Resultats del dimensionament de la CD-502 amb ShortCut

Tal i com es pot observar, el programa ha simulat de manera correcta la columna desitjada, no obstant és el disseny rigorós el que determinarà finalment la columna. Així doncs, a partir dels valors obtinguts en aquesta primera simulació es pot iniciar el disseny amb el paquet *Distillation Column*.

### 11.13.2 Avaluació de la simulació rigorosa

La taula 11.13.3 mostra els resultats obtinguts en el millor dels casos simulats amb el paquet proporcionat pel programa HYSYS, *Distillation Column*.

**Taula 11.13.3.** Resultats del dimensionament de la CD-502 de manera rigorosa

Nº d'etapes	23
Etapa de l'aliment	12
Pressió condensador (KPa)	101,3
Pressió calderí (KPa)	101,3
Temperatura condensador (°C)	38,79

Temperatura calderí (°C)	108,1
Relació de reflux	1
Cabal de Destil·lat (Kmol/h)	8,974
Cabal de Producte de cues (Kmol/h)	43,36

Un cop definida la columna s'inicia el dimensionament d'aquesta amb l'eina *Tray Sizing* que proporciona el programa HYSYS. Aquest realitza automàticament l'auto-secció de la columna, un cop se li proporciona el tipus d'etapa d'equilibri amb la que es vol treballar. En aquest cas s'ha definit una columna empacada amb Selles intalox de 0,375'' de diàmetre, tal i com es mostren en la figura 11.13.2 per evitar la corrosió deguda al MCC. La figura 11.13.3, mostra l'empacament utilitzat en la columna CD-502.



**Figura 11.13.3.** Selles intalox ceràmiques de diferents diàmetres.

	Section_1
<b>Internals</b>	Packed
Packing Type	Intalox Saddles I
Flooding Correlation	SLEv73
HETP Correlation	Frank
Est. # Pieces of Packing	1061285
Est. Mass of Packing [kg]	3166,0
Est. Packing Cost (US\$)	
<b>Column Geometry</b>	
Section Diameter [m]	0,9144
X-Sectional Area [m <sup>2</sup> ]	0,6567
Section Height [m]	4,014
<b>Hydraulic Results</b>	
Max Flooding [%]	67,48
Section DeltaP [kPa]	1,383
DP per Length [kPa/m]	0,3444
Flood Gas Vel. [m <sup>3</sup> /h-m <sup>2</sup> ]	1399
Flood Gas Vel. [m/s]	0,3887

**Figura 11.13.2** Resultats del dimensionament de la columna CD-502.

Tal i com mostra la figura 14, la columna consta de 0.9144 metres de diàmetre i 4.014 metres d'alçada empacada. Per tal de dur a terme un control i manteniment adequat, serà precís instal·lar dos boques d'home repartides en la columna, una a la part superior, una a la part inferior. Considerant aquest aspecte i deixant espai pel distribuïdor superior i inferior, i els plats de subjecció, s'ha decidit incorporar 1 metre a la zona inferior i 1 a la part superior, fent un total de 2 metres afegits i per tant 6,014 metres d'alçada total, no obstant degut a la desconeixença de valors en el disseny i per tal d'obtenir un marge de seguretat s'aplica un sobredimensionament del 15% del rebliment (0,6 metres afegits), així doncs, afegint els 0,19 metres d'alçada del cap i del fons toriesfèric es pot determinar una columna total de 7,0 metres d'alçada.

### 11.13.3 Altura del rebliment. Mètode de la HEPT

Encara que la torre sigui de rebliment el contacte entre el líquid i vapor es continu, es pot analitzar com a una torre d'etapes. Es suposa que la part del rebliment es pot dividir en segments d'igual altura. Cada segment consta com si fos una etapa d'equilibri on el líquid i el vapor que surten del segment es troben en equilibri. És important tenir en compte que el model d'etapes no és exactament lo que succeeix físicament en la columna, però es pot utilitzar per a fer els dissenys.



La HEPT, es l'altura del rebliment necessària per obtenir el canvi de composició al qual s'arriba amb un contacte teòric d'equilibri. Les HEPT poden variar des de 1/2 polzades (fluxos molt petits de gas en rebliments auto-humectants) fins a uns quants peus (anells Rasching grans).

En un equip industrial normal, la HETP varia entre 1 i 4 peus. Com menor sigui la HEPT més curta es la columna i el rebliment es més eficient. Per a mesurar l'HETP es determinen les composicions superiors e inferiors a reflux total i després es calcula el numero d'etapes d'equilibri.

$$HEPT = \frac{\text{Alçada del rebliment}}{\text{número d'etapes teòriques}} \quad \text{Equació 11.13.1}$$

La HEPT varia segons el tipus i la mida del rebliment, de les substàncies que es van a separar i amb el flux del gas.

L'HEPT per aquesta columna és de 0,2007.

#### **11.13.4 Dispositius interns de la columna CD-502**

Tal i com ja s'ha comentat en l'apartat 11.12.4, dispositius interns de la columna CD-501, és molt important tindre un disseny rigorós de l'interior de les columnes, ja que aquest dispositius afegits determinaran el funcionament òptim de la columna. Així doncs per aquesta columna es precisa d'un distribuïdor de líquid a la part superior, un de gas a la part inferior i un redistribuïdor a la part central, tots aquest han estat especificats a l'apartat 3.1.3.

En aquesta columna també és precís un suport per l'empacat i un retenidor d'aquest, ja especificats ambdós anteriorment.

Finalment s'introdueix un col·lector de líquid tant a la part central com a la part inferior i un eliminador d'arrossegament a la part superior de la columna per evitar arrossegament de líquid per part dels vapors.

### 11.13.5 Disseny mecànic de la columna CD-502

Es comença amb el càlcul de l'espessor requerit per la columna a les condicions de treball. La taula 11.13.4 en mostra les condicions pel disseny, calculades aquestes amb les equacions 11.4.40 i 11.4.42 ja vistes.

**Taula 11.13.4.** Valors per iniciar el disseny mecànic de la columna CD-502

Ptreball (atm)	1,61
Phidràulica (atm)	1,15
Pdisseny (atm)	1,77
Ttreball (°C)	108,1
Tdisseny (°C)	128.1
Radi (mm)	457.2
Alçada (mm)	7000
(S) Tensió màxima admissible (psi)	8830,5

#### **11.13.5.1** *Espessor del cos cilíndric per la pressió interna*

Els càlculs de l'espessor per pressió interna dels cossos cilíndrics es realitzen amb l'equació 11.1.4. i un cop sobredimensionat per seguretat i per corrosió s'obté un valor de 3,22 mm, buscant a la taula de espessos de fabricació s'obté un gruix final de 4mm.

#### **11.13.5.2** *Espessor del capçal per la pressió interna*

S'ha utilitzat l'equació 11.6.12 pel càlcul de l'espessor d'aquests per la pressió interna ja que ambdós seran toriesfèrics. Els resultats han estat de 2,88 mm, així doncs s'opta per un espessor de 3 mm en els espessos de fabricació.

La taula 11.13.5. mostra els resultats obtinguts pels espessos de la columna CD-502.

**Taula 11.13.5.** Taula resum dels espessors de la columna CD-502 en mil·límetres.

Cos	Espessor
Cilindre	4
Capçals	3

### **11.13.5.3** *Càlcul de l'aïllament de l'equip*

Per tal de realitzar un aïllament adequat per aquest equip s'empra el programa Insulan proporcionat per l'empresa CALORCOL S.A.

Les característiques introduïdes al programa per tal de treballar amb llana mineral de roca com a manta aïllant de  $80\text{Kg/m}^3$ , han estat:

- Temperatura Interior =  $108,1\text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura Superficial del Aïllant =  $35^\circ\text{C}$
- Temperatura Ambient =  $16,9\text{ }^\circ\text{C}$  (és la mitjana del territori)
- Velocitat de l'aire =  $2,7\text{ m/s}$  (velocitat mitjana en direcció nord- oest)
- Superfície exterior de l'aïllament = Acer inoxidable brut (Emissivitat de 0,3)
- Superfície sense aïllant = Acer Inoxidable (Emissivitat de 0,3)

El resultat obtingut és d'un aïllament de  $3,1\text{ cm}$  amb una eficiència del  $94,4\%$ .

### **11.13.5.4** *Càlcul del pes de l'equip*

Per arribar a conèixer el pes de l'equip en operació es calcula el pes de l'equip buit i el pes del líquid, sumant tots dos valors s'obindrà el pes real de l'equip a la planta.

Per tal de calcular el pes de l'equip buit és necessari conèixer la densitat del material de la instal·lació i del rebliment,  $9220\text{kg/m}^3$  i  $780\text{Kg/m}^3$  respectivament.

S'utilitza l'equació 11.10.2. per calcular el pes de les peces que formen l'equip per després sumar-les.

Primer de tot doncs cal conèixer les àrees de cada peça de la columna, les equacions 11.10.3 i 11.10.4 ja descrites,

Per arribar a conèixer el pes de l'equip en operació es calcula el pes de l'equip buit i el pes del líquid, sumant tots dos valors s'obtindrà el pes real de l'equip a la planta.

Utilitzant l'equació 11.10.2 i els valors ja descrits de gruix i densitat es pot representar la taula 11.13.6, amb els valors del pes de cada peça de l'equip.

**Taula 11.13.6.** Resultats obtinguts d'àrea i pes de cada part de l'equip

Peça	Àrea (m <sup>2</sup> )	Pes (Kg)
Capçal toriesfèric	0,70	19,47
Cilindre	13,26	489,05

Per últim cal conèixer el pes del rebliment. Pel càlcul d'aquest s'utilitza l'equació 11.10.5

El pes del rebliment total és de 3010,3 Kg i per tant el pes de la columna buida afegint-li el pes de l'aïllament, 36,38 Kg, és de 3504,8 Kg. Aquest s'ha sobredimensionat un 10% degut a que es desconeix el pes de força dispositius inclosos en la columna, com serien els distribuïdors, els suports, els retenidors, les boques d'home, entre d'altres, així doncs, el pes total de l'equip buit és de 3855,28 Kg.

Per conèixer el pes del líquid en la columna s'utilitza l'equació 11.10.6. El Volum de la columna es representa seguint l'equació 11.12.6

$$\cdot \text{Volum toriesfèric} = 73,5\text{dm}^3 = 0,0735\text{m}^3$$

El resultat obtingut és de 3,18m<sup>3</sup>. S'utilitza l'equació 11.10.6 per obtenir un valor de 1589,18Kg pel pes del líquid. Finalment es realitza la suma del pes del líquid i del pes de l'equip buit per obtenir el pes de la columna en operació, aquest és de 4144,0 Kg.

### 11.13.5.5 *Dispositius de subjecció o recolzament*

Degut a les condicions d'elevada alçada, i pes de l'equip es decideix utilitzar un faldó cilíndric per suportar el pes de l'equip.

## 11.14 Columna per separar el Clorur de Metilcarbamoil, CD-503

Tal i com ja s'ha comentat, la funció d'aquesta torre és la de recuperació de compostos, tant el producte per caps com el producte per cues seran reciclats al reactor de piròlisi i als absorbidors respectivament. La composició dels corrents en funció de l'alimentació s'expressa en la taula 11.14.1.

**Taula 11.14.1.** Composicions dels corrents de la columna CD-502 (Kmol/h).

	Aliment	Caps	Cues
Toluè	41,13	1,49	39,62
MCC	2,0456	2,0415	0,0041

Per la realització del seu disseny s'ha utilitzat el programa HYSYS, amb una primera aproximació amb el paquet *ShortCut* i de manera més rigorosa amb el paquet *Distillation Column*.

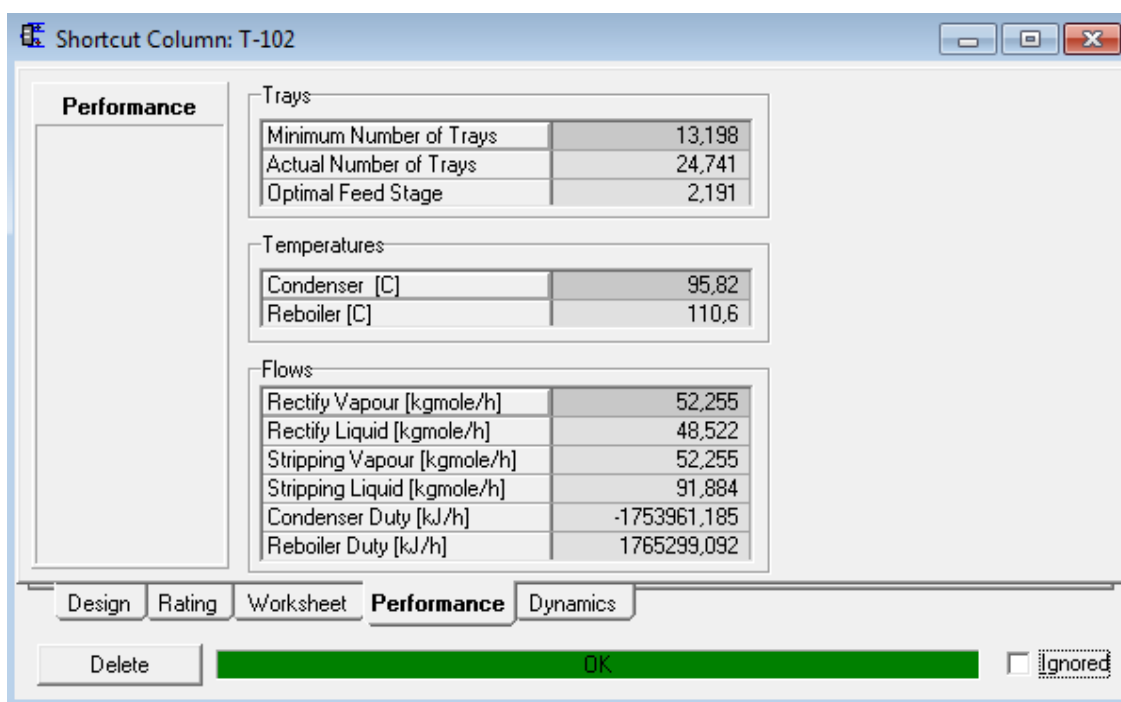
### 11.14.1 Avaluació del shortcut

Per tal de realitzar la simulació amb el *ShortCut*, ha sigut precís fixar les variables especificades en la taula 1.14.2. El programa HYSYS proporciona els valors mostrats en la figura 11.14.1

**Taula 1.14.2.** Paràmetres fixats inicialment pel disseny amb ShortCut de la columna CD-503.

Composició del component clau a cues	0,0001
Composició del component pesat per caps	0,4
Pressió del condensador (KPa)	101,3
Pressió del calderí (KPa)	101,3
Reflux extern	13

Tal i com es pot apreciar, s'ha simulat amb un requeriment de puresa força baix pel corrent de caps, d'aquesta manera assegurem que el corrent de cues conté la fracció més baixa possible d'impureses per una operació més òptima dels absorbidors. El corrent de caps conté el 100% del MCC que no ha pogut reaccionar al reactor de piròlisi i, per aquest motiu és recirulat.



**Figura 11.14.1.** Resultats del dimensionament de la CD-503 amb ShortCut

Tal i com es pot observar, el programa ha simulat de manera correcta la columna desitjada, no obstant és el disseny rigorós el que determinarà finalment la columna. Així doncs, a partir dels valors obtinguts en aquesta primera simulació es pot iniciar el disseny amb el paquet *Distillation Column*.

### 11.14.2 Avaluació de la simulació rigorosa

La taula 11.14.3 mostra els resultats obtinguts en el millor dels casos simulats amb el paquet proporcionat pel programa HYSYS, *Distillation Column*.

**Taula 11.14.3** Resultats del dimensionament de la CD-503 de manera rigorosa

Nº d'etapes	25
Etapa de l'aliment	4
Pressió condensador (KPa)	101,3
Pressió calderí (KPa)	101,3
Temperatura condensador (°C)	95,82
Temperatura calderí (°C)	110,6
Relació de reflux	13
Cabal de Destil·lat (Kmol/h)	3,732
Cabal de Producte de cues (Kmol/h)	39,63

Un cop definida la columna s'inicia el dimensionament d'aquesta amb l'eina *Tray Sizing* que proporciona el programa HYSYS. Aquest realitza automàticament l'auto-secció de la columna, un cop se li proporciona el tipus d'etapa d'equilibri amb la qual es vol treballar. En aquest cas s'ha definit una columna de plats perforats, tal i com es mostren en la figura 11.14.13. La figura 11.14.2, mostra el tipus de plat utilitzat en la columna CD-503.

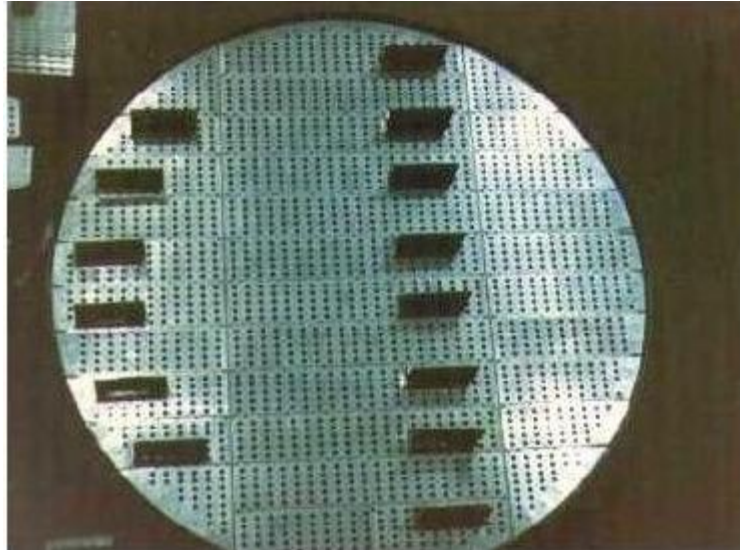


Figura 11.14.2. Plat perforat utilitzat en la columna CD-503.

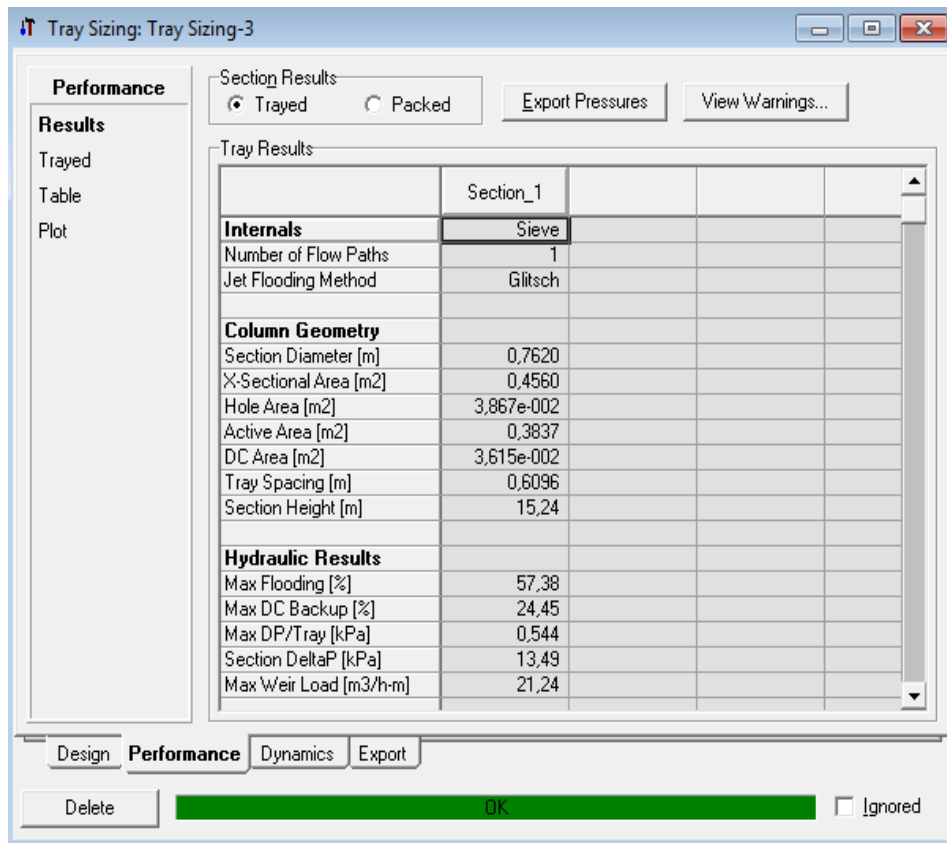


Figura 11.14.3 Resultats del dimensionament de la columna CD-503.

Tal i com mostra la figura 17, la columna consta de 0,7620 metres de diàmetre i 15,24 metres d'alçada. Per tal de dur a terme un control i manteniment adequat, serà precis



instal·lar dos boques d'home repartides en la columna, una a la part superior i una a la part inferior de la columna. Considerant aquest aspecte i deixant espai pel distribuïdor superior i inferior i pel col·lector de líquid en la part inferior, s'ha decidit incorporar 1,5 metres a la zona inferior, i 1 a la part superior, fent un total de 2,5 metres afegits i per tant 17,74 metres d'alçada total, no obstant degut a la desconeixença de valors en el disseny i per tal d'obtenir un marge de seguretat s'aplica un sobredimensionament del 15%, així doncs, afegint l'alçat del cap i el fons torisfèric, 0,164 metres es pot determinar una columna total de 20,35 metres d'alçada.

### **11.14.3 Distribució i consideracions hidràuliques**

Al ser una columna de plats, cal comentar la distribució i les consideracions hidràuliques per a plats foradats

Els forats d'un plat perforat no es distribueixen al atzar. En el seu lloc s'utilitza una pauta detallada per assegurar que els fluxos de vapor i líquid sobre el plat siguin uniformes.

El diàmetre dels forats toquejats en el plat va de 1/8 a 1/2 polzada. Els forats de 1/8 toquejats són empleats de sota cap a dalt, s'utilitzen amb freqüència en l'operació al buit per reduir l'arrossegament i minimitzar la pèrdua de carrega. En el funcionament normal, es toquegen els forats cap avall, perquè es més segur per al personal de manteniment. En aplicacions amb embrutiment, els forats són de 1/2 polzades, o majors. Per a un bon servei de neteja, 3/16 de polzada es una primera suposició raonable per al diàmetre dels forats.

El ús de pautes normals de toquejats serà menys costosos que utilitzar pautes normals. La distància entre forat i forat va de  $2,5 d_0$  a  $5 d_0$  i  $3,8 d_0$  és un valor promig raonable.

La regió de forats ha d'estar a una distància mínima de 2 a 3 polzades lliures de la envoltant de la columna i de la entrada al baixant. S'utilitza un espai mínim de 3 a 5 polzades abans del abocament del baixant, perquè es important permetre la separació del líquid i vapor.

Com el flux en el plat es altament turbulent, el vapor no va directe cap a dalt des de els forats. L'àrea activa dels forats es considera entre 2 i 3 polzades de distancia de la perifèria, llavors, l'àrea fins l'envoltant de la columna és activa. La fracció de la columna ocupada per als forats depèn de la mida del forat, el seu pas, la distancia entre forats, els espais lliures i la mida dels baixants.

#### 11.14.4 Dispositius interns de la columna CD-503

Tal i com ja s'ha comentat en l'apartat 11.12.4, dispositius interns de la columna CD-501, és molt important tindre un disseny rigorós de l'interior de les columnes, ja que aquest dispositius afegits determinaran el funcionament òptim de la columna. Així doncs per aquesta columna es precisa d'un distribuïdor de líquid a la part superior i un de gas a la part inferior. Tots aquest han estat especificats a l'apartat 3.1.3. La diferència principal entre els dispositius entre columnes és el material. En aquest cas, no existeix cap tipus de risc de corrosió per l'àcid clorhídric; per aquest motiu, s'ha decidit dissenyar d'acer inoxidable 316L.

Finalment s'introdueix un col·lector de líquid a la part inferior i un eliminador d'arrossegament a la part superior de la columna per evitar arrossegament de líquid per part dels vapors.

#### 11.14.5 Disseny mecànic de la columna CD-503

Tal i com ja s'ha comentat, com que no hi ha risc de corrosió per part de l'àcid clorhídric, s'ha decidit dissenyar aquesta columna amb acer inoxidable 316L.

Així doncs, es comença amb el càlcul de l'espessor requerit per la columna a les condicions de treball. La taula 11.14.4 en mostra les condicions pel disseny, calculades aquestes amb les equacions 11.4.40 i 11.4.42, ja vistes.

**Taula 11.14.4.** Valors per iniciar el disseny mecànic de la columna CD-503

Ptreball (atm)	2,69
Phidràulica (atm)	2,19
Pdisseny (atm)	2,96
Ttreball (°C)	110.6
Tdisseny (°C)	130.6

Radi (mm)	381
Alçada (mm)	20354
(S) Tensió màxima admissible (psi)	8830.5

#### **11.14.5.1** *Espessor del cos cilíndric per la pressió interna*

Els càlculs de l'espessor per pressió interna dels cossos cilíndrics es realitzen amb l'equació 11.1.4. i un cop sobredimensionat per seguretat i per corrosió s'obté un valor de 3,56 mm, buscant a la taula de espessos de fabricació s'obté un gruix final de 4 mm.

#### **11.14.5.2** *Espessor del capçal per la pressió interna*

S'ha utilitzat l'equació 11.6.12 pel càlcul de l'espessor d'aquests per la pressió interna ja que ambdós seran toriesfèrics. Els resultats han estat de 3,1 mm, així doncs s'opta per un espessor de 4 mm en els espessos de fabricació.

La taula 11.14.5. mostra els resultats obtinguts pels espessos de la columna CD-503.

**Taula 11.14.5.** Taula resum dels espessos de la columna CD-503 en mil·límetres.

Cos	Espessor
Cilindre	4
Capçals	4

### ***11.14.5.3 Càlcul de l'aïllament de l'equip***

Per tal de realitzar un aïllament adequat per aquest equip s'empra el programa Insulan proporcionat per l'empresa CALORCOL S.A.

Les característiques introduïdes al programa per tal de treballar amb llana mineral de roca com a manta aïllant de  $80 \text{ Kg/m}^3$ , han estat:

- Temperatura Interior =  $110,6 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura Superficial del Aïllant =  $35^\circ\text{C}$
- Temperatura Ambient =  $16,9 \text{ }^\circ\text{C}$  (és la mitjana del territori)
- Velocitat de l'aire =  $2,7 \text{ m/s}$  (velocitat mitjana en direcció nord- oest)
- Superfície exterior de l'aïllament = Acer inoxidable brut (Emissivitat de 0,3)
- Superfície sense aïllant = Acer Inoxidable (Emissivitat de 0,3)

El resultat obtingut és d'un aïllament de  $3,18 \text{ cm}$  amb una eficiència del  $94,59\%$ .

### ***11.14.5.4 Càlcul del pes de l'equip***

Per arribar a conèixer el pes de l'equip en operació es calcula el pes de l'equip buit i el pes del líquid, sumant tots dos valors s'obté el pes real de l'equip a la planta.

Per tal de calcular el pes de l'equip buit és necessari conèixer la densitat del material de la instal·lació  $9220 \text{ kg/m}^3$ .

S'utilitza l'equació 11.10.2. per calcular el pes de les peces que formen l'equip per després sumar-les.

Primer de tot doncs cal conèixer les àrees de cada peça de la columna, les equacions 11.10.3 i 11.10.4 ja descrites,

Per arribar a conèixer el pes de l'equip en operació es calcula el pes de l'equip buit i el pes del líquid, sumant tots dos valors s'obté el pes real de l'equip a la planta.

Utilitzant l'equació 11.10.2 i els valors ja descrits de gruix i densitat es pot representar la taula 11.14.6, amb els valors del pes de cada peça de l'equip.

**Taula 11.14.6.** Resultats obtinguts d'àrea i pes de cada part de l'equip

Peça	Àrea (m <sup>2</sup> )	Pes (Kg)
Capçal toriesf.	0,49	15,64
Cilindre	41,96	1342,57

Per últim cal conèixer el pes dels plats. Pel càlcul d'aquest s'utilitza l'equació 11.14.1

$$Pes\ plat = Àrea_{plat} \cdot Gruix_{plat} \cdot N^{\circ}\ de\ plats \cdot \rho_{inox316L} \quad \text{Equació 11.14.1}$$

On:

- Àrea d'un plat = 0,61m<sup>2</sup>
- Gruix d'un plat = 0,0031m

El pes dels plats total és de 387,1 Kg i sumant-li el pes de l'aïllament, 109,22 Kg, el pes de la columna buida és de 1870,18 Kg. Aquest s'ha sobredimensionat un 10% degut a que es desconeix el pes de força dispositius inclosos en la columna, com serien els distribuïdors i les boques d'home, entre d'altres, així doncs, el pes total de l'equip buit és de 2057,2 Kg.

Per conèixer el pes del líquid en la columna s'utilitza l'equació 11.10.6. El Volum de la columna es representa seguint l'equació 11.12.6.

$$\cdot \text{Volum toriesfèric} = 42,5\text{dm}^3 = 0,0425\text{m}^3$$

Els resultats obtinguts és de 8,1m<sup>3</sup>. S'utilitza l'equació 11.10.6 per obtenir un valor de 4038,75Kg pel pes del líquid. Finalment es realitza la suma del pes del líquid i del pes de l'equip buit per calcular el pes de la columna en operació, aquest és de 6095,95 Kg.

#### **11.14.5.5 Dispositius de subjecció o recolzament**

Degut a les condicions d'elevada alçada, i pes de l'equip es decideix utilitzar un faldó cilíndric per suportar el pes de l'equip.

## 11.15 Columna per separar el isocianat de metil, CD-701

L'objectiu d'aquesta columna és eliminar el MIC de la corrent d'alimentació extraient-lo per caps, evitant l'entrada al cristal·litzador.

La columna treballa a 40 kPa i tracta un cabal de 67,28 kmol/h totals; la composició dels corrents s'expressa en la taula següent.

**Taula 11.15.1** . Composicions dels corrents de la columna CD-701 (Kmol/h).

	Aliment	Caps	Cues
MIC	0,79	0,79	0
Toluè	57,43	4,21	53,22
A-naftol	0,88	0	0,88
Carbaril	8,18	0	8,18

Per la realització del seu disseny s'ha utilitzat el programa HYSYS, amb una primera aproximació amb el paquet *ShortCut* i de manera més rigorosa amb el paquet *Distillation Column*.

S'ha simulat de tal manera que el que surti per caps es recirculi al tanc de mescla TM-601, ja que hi ha MIC i toluè.

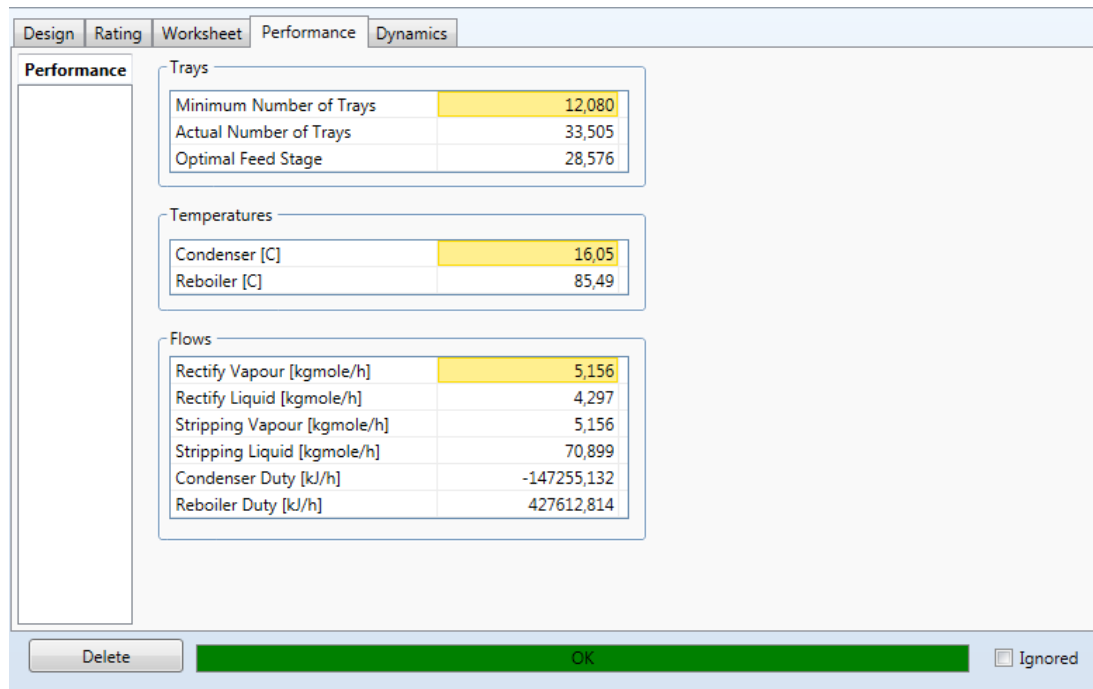
### 11.15.1Avaluació del *shortcut*

Per tal de realitzar la simulació amb el *ShortCut*, ha estat precís fixar les variables especificades en la taula següent:

**Taula 11.15.2.** Paràmetres fixats inicialment pel disseny amb ShortCut de la columna CD-701.

Composició del component clau a cues	0,0
Composició del component pesat per caps	0,0
Pressió del condensador (KPa)	40
Pressió del calderí (KPa)	40
Reflux extern	5

El programa ha simulat de manera correcta la columna desitjada, no obstant és el disseny rigorós el que determinarà finalment la columna.



**Figura 11.15.1.** Resultat del Short Cut realitzat amb Hysys.

### 11.15.2 Avaluació de la simulació rigorosa

La taula 11.15.3. mostra els resultats obtinguts en el millor dels casos simulats amb el paquet proporcionat pel programa HYSYS, *Distillation Column*.

**Taula 11.15.3.** Resultats del dimensionament de la C-701 de manera rigorosa

Nº d'etapes	9
Etapa de l'aliment	2
Pressió condensador (KPa)	40
Pressió calderí (KPa)	40
Relació de reflux	6,5
Cabal de sortida per caps (Kmol/h)	5,0
Cabal de sortida per cues (Kmol/h)	62,28

Un cop definida la columna s'inicia el dimensionament d'aquesta amb l'eina *Tray Sizing* que proporciona el programa HYSYS. Aquest realitza automàticament l'auto-secció de la columna, un cop se li proporciona el tipus d'etapa d'equilibri amb la que es vol treballar. En aquest cas s'ha definit una columna de rebliment de dos seccions del mateix diàmetre.

La primera secció té una alçada de 2,1 metres i la segona 1,7 metres. El diàmetre és de 0,9144 metres. S'han dissenyat dues seccions per tal que la pèrdua de càrrega no sigui molt significativa, ja que no es recomana una alçada de rebliment de més 3 metres.

El rebliment es col·loca aleatòriament i el material escollit és anells ballast metàl·lics de una polzada. A la figura 11.15.2 es pot observar la seva forma i les diferents mides.





**Figura 111.15.2.** Anells ballast metàl·lics.

Design Performance Dynamics Export

**Performance**

Results  
Trayed  
Table  
Plot

Section Results  
 Trayed  Packed  
 Export Pressures View Warnings...

Packing Results

	Section_1	Section_2
<b>Internals</b>	Packed	Packed
Packing Type	Ballast Rings (Metal)	Ballast Rings (Metal)
Flooding Correlation	SLEv73	SLEv73
HETP Correlation	Norton	Norton
Est. # Pieces of Packing	68735	55178
Est. Mass of Packing [kg]	665,2	534,0
Est. Packing Cost (US\$)		
<b>Column Geometry</b>		
Section Diameter [m]	0,9144	0,9144
X-Sectional Area [m2]	0,6567	0,6567
Section Height [m]	2,110	1,694
<b>Hydraulic Results</b>		
Max Flooding [%]	62,01	62,03
Section DeltaP [kPa]	0,6781	0,5449
DP per Length [kPa/m]	0,3213	0,3217
Flood Gas Vel. [m3/h-m2]	8812	8812

Delete OK

**Figura 11.15.3.** Resultat de la simulació rigorosa de la columna amb Hysys

Per tal de dur a terme un control i manteniment adequat, serà precís instal·lar tres boques d'home repartides en la columna, una a la part superior, una a la part inferior, i una tercera a la part central de la columna on s'inclourà un redistribuïment del líquid

baixant i del gas pujant. Considerant aquest aspecte i deixant espai pel distribuïdor superior i inferior, s'ha decidit incorporar 1,5 metres a la zona inferior, 1,5 a la part central i 3 a la part superior, fent un total de 6 metres afegits i sobredimensionant un 15%, finalment la columna té 11,5 metres d'alçada total.

### **11.15.3 Altura del rebliment. Mètode de la HEPT**

Com s'ha introduït abans; les columnes de rebliment es poden analitzar com columnes de plats suposant que el rebliment es divideix en segments i que cada segment és una etapa d'equilibri. La HEPT, es l'altura del rebliment necessària per obtenir el canvi de composició al qual s'arriba amb un contacte teòric d'equilibri.

L'HEPT per aquesta columna és de 0,4219m per la primera secció i 0,4233m per la segona secció.

### **11.15.4 Dispositius interns de la columna CD-701**

Tal i com ja s'ha comentat en l'apartat 11.12.4, dispositius interns de la columna CD-501, és molt important tindre un disseny rigorós de l'interior de les columnes, ja que aquest dispositius afegits determinaran el funcionament òptim de la columna. Així doncs per aquesta columna es precisa d'un distribuïdor de líquid a la part superior, un de gas a la part inferior i un redistribuïdor a la part central.

En aquesta columna també és precís un suport per l'empacat i un retenidor d'aquest, ja especificats ambdós anteriorment.

Finalment s'introdueix un col·lector de líquid tant a la part central com a la part inferior i un eliminador d'arrossegament a la part superior de la columna per evitar arrossegament de líquid per part dels vapors.

### 11.15.5 Disseny mecànic de la columna CD-701

Aquesta torre és d'acer inoxidable AISI 316 i treballa al buit.

A la taula 11.15.4. s'introdueixen les condicions per el càlcul de l'espessor requerit per la columna a les condicions de treball; calculades aquestes amb les equacions 11.4.40 i 11.4.42, introduïdes anteriorment.

**Taula 11.15.4..** Valors per iniciar el disseny mecànic de la columna CD-701

Ptreball (atm)	0,39
Pdisseny (atm)	1
Ttreball (°C)	85
Tdisseny (°C)	105
Diàmetre (m)	0,9
Alçada (m)	11,5
(S) Tensió màxima admissible (psi)	1570

#### 11.15.5.1 *Espessor del cos cilíndric per la pressió externa*

Pel càlcul de l'espessor per pressió externa és necessari entrar en un cicle iteratiu suposant un gruix i calculant el valor de pressió que aquest suportaria, si el valor de pressió és major que el de disseny es dona per bo el gruix suposat.

Les equacions utilitzades per aquest són la 11.15.1 i la 11.15.2

$$P_a = \frac{4 \cdot B}{3 \cdot \left(\frac{D_0}{t}\right)} \quad \text{Equació 11.15.1}$$

$$P_a = \frac{2 \cdot A \cdot E}{3 \cdot \left(\frac{D_0}{t}\right)} \quad \text{Equació 11.15.2}$$

On:

- A = Coeficient determinat pel codi ASME
- B = Coeficient determinat pel codi ASME
- Do = Diàmetre intern amb la suma de l'espessor, mm
- t = Espessor suposat menys el factor de corrosió, mm
- E = Mòdul d'elasticitat del material, psi

Els càlculs de l'espessor per pressió externa dels cos cilíndric utilitzant les equacions anteriors amb les gràfiques del codi ASME pel material escollit, la temperatura de disseny i un cop sobredimensionat per seguretat i per corrosió s'obté un valor de 2,9 mm, buscant a la taula de espessos de fabricació s'obté un gruix final de 5 mm.

#### ***11.15.5.2 Espessor del capçal per la pressió externa***

Per un fons o capçal toriesfèric el càlcul es realitzarà de la mateixa forma que per un fons el·lipsoïdal. Es realitza el càlcul d'aquest amb dos procediments diferents i s'elegeix el de valor major.

Procediment 1.

Càlcul igual que per a pressió interna però utilitzant una pressió de disseny 1,67 cops major que l'externa i el factor  $E=1$ .

Procediment 2.

Es calcula l'espessor iterativament amb l'equació 11.15.3 o l'equació 11.15.4. depenent dels valors emprats.

$$P_a = \frac{B}{\left(\frac{0,9 \cdot D_0}{t}\right)} \quad \text{Equació 11.15.3}$$

$$P_a = \frac{0,0625 \cdot E}{\left(\frac{0,9 \cdot D_0}{t}\right)^2} \quad \text{Equació 11.15.4}$$

On:

- A = Coeficient determinat pel codi ASME
- B = Coeficient determinat pel codi ASME
- Do = Diàmetre intern amb la suma de l'espessor, mm
- t = Espessor suposat menys el factor de corrosió i el de seguretat, mm
- E = Mòdul d'elasticitat del material, psi

Cal que  $P_a > P_e$ , és a dir, que la pressió de disseny sigui menor a la màxima pressió admissible.

El resultat de gruix escollit és el major dels dos valors. Els resultats han estat de 2,7 mm, així doncs s'opta per un espessor de 5 mm en els espessors de fabricació.

La taula 11.15.5. mostra els resultats obtinguts pels espessors de la columna CD-701.

**Taula 11.15.5.** Taula resum dels espessors de la columna CD-701 en mil·límetres.

Cos	Espessor (mm)
Cilindre	5
Capçals	5

### 11.15.5.3 Càlcul de l'aïllament de l'equip

Per tal de realitzar un aïllament adequat per aquest equip s'empra el programa Insulan proporcionat per l'empresa CALORCOL S.A.

Les característiques introduïdes al programa per tal de treballar amb llana mineral de roca com a manta aïllant de  $80 \text{ kg/m}^3$ , han estat:

- Temperatura Interior =  $85 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura Superficial del Aïllant =  $35^\circ\text{C}$
- Temperatura Ambient =  $16,9 \text{ }^\circ\text{C}$  (és la mitjana del territori)
- Velocitat de l'aire =  $2,7 \text{ m/s}$  (velocitat mitjana en direcció nord- oest)
- Superfície exterior de l'aïllament = Acer inoxidable brut (Emissivitat de 0,3)
- Superfície sense aïllant = AISI 316L (Emissivitat de 0,3)

El resultat obtingut és d'un aïllament de  $12,7 \text{ mm}$  amb una eficiència del  $98,79\%$ .

#### **11.15.5.4 Càlcul del pes de l'equip**

Per arribar a conèixer el pes de l'equip en operació es calcula el pes de l'equip buit i el pes del líquid, sumant tots dos valors s'obtindrà el pes real de l'equip a la planta.

Per tal de calcular el pes de l'equip buit és necessari conèixer la densitat del material i del reblliment,  $7960 \text{ kg/m}^3$  i  $224 \text{ kg/m}^3$  respectivament.

Utilitzant l'equació 11.10.2 i els valors ja descrits de gruix i densitat es pot representar la taula 11.15.6, amb els valors del pes de cada peça de l'equip.

**Taula 11.15.6.** Resultats obtinguts d'àrea i pes de cada part de l'equip

Peça	Àrea (m <sup>2</sup> )	Pes (Kg)
Capçal toriesfèric	0,706	77,74
Cilindre	33,59	2055,20

Per últim cal conèixer el pes del reblliment. Pel càlcul d'aquest s'utilitza l'equació 11.15.5.

$$Pes\ rebliment = Volum_{secció} \cdot \rho_{rebliment} \quad \text{Equació 11.15.5}$$

On:

- Volum secció 1 = 1,38 m<sup>3</sup>
- Volum secció 2 = 1,11 m<sup>3</sup>
- $\rho$  rebliment = 224 kg/m<sup>3</sup>

El pes del rebliment total és de 2166,04 kg i per tant el pes de la columna buida afegint-li el pes de l'aïllament, 34,13 kg, és de 5128,58 kg.

Amb les equacions introduïdes anteriorment, és calcula el pes de la columna amb aigua: 12804,24 kg; i finalment amb el líquid de procés: 12087,09 kg

#### **11.15.5.5      *Dispositius de subjecció o recolzament***

Degut a les condicions d'elevada alçada, i pes de l'equip es decideix utilitzar un faldó cilíndric per suportar el pes de l'equip sense problema algun.

## 11.16 Disseny de cristal·litzadors

En el procés de purificació es pretén obtenir carbaril cristal·lí el més pur possible. Un cristall és un material constituït per àtoms, molècules o ions, els quals es troben ordenats tridimensionalment.

El procés de purificació dissenyat consta de tres etapes:

- Cristal·lització: formació del cristall.
- Centrifugació: separació dels cristalls formats del dissolvent.
- Assecament: obtenció del producte sec.

El procés dissenyat per la purificació del carbaril està basat en el procés de purificació emprat per Union Carbide, tal i com s'explica al llibre "*The Use and Storage of Methylisocyanate*".

La cristal·lització és un procés de separació basat en la transferència de matèria des del si d'una fase líquida a la superfície d'un sòlid. Operacionalment, aquest procés de purificació no requereix de tanta energies com a altres operacions de separació com podria ser la destil·lació. No obstant això, no es pot fer una separació multicomponent; és una operació d'una sola etapa.

La cristal·lització es basa en la formació de nuclis i en el seu posterior creixement. Per tal de dur a terme la nucleació cal que la dissolució es trobi en condicions de sobresaturació. Aquesta pot ser aconseguida emprant diferents tècniques:

**Taula 11.16.1.** Tipus de cristal·lització.

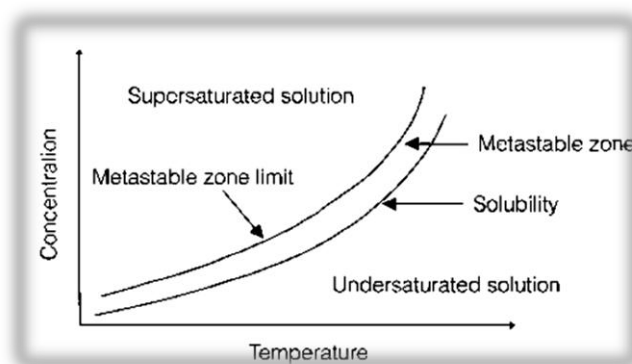
<b>Tipus de cristal·lització</b>	<b>Mecanisme de sobresaturació</b>
Per refredament	Disminució de la temperatura
Per evaporació	Evaporació de dissolvent
Per buit	Evaporació del dissolvent i disminució de la temperatura
Per reacció	Reacció química
Per Salting-out	Addició d'una altra substància
Combinat	Combinant els mecanismes anteriors



La sobresaturació és la força impulsora respecte la cinètica de cristal·lització. Una sobresaturació òptima és un requisit que s'ha de complir per la producció de cristalls de mida, forma i puresa desitjada.

Per tal de realitzar el disseny dels cristal·litzadors s'han de realitzar balanços de matèria i energia de cada un dels equips. A més a més, s'han d'emprar les dades d'equilibri, com per la solubilitat, per tal de calcular la composició final i rendiment.

La solubilitat d'una substància és la quantitat de solut que es dissol en una determinada quantitat de dissolvent. Ambdós estan en equilibri a unes condicions de temperatura i pressió determinades. La solubilitat de les substàncies varia amb la temperatura, pH, presència d'altres soluts, etc. En la majoria de substàncies, la solubilitat augmenta en augmentar la temperatura.



**Figura 11.16.1.** Representació de la solubilitat de la majoria de substàncies

Industrialment, s'ha de controlar els factors que afecten al creixement del cristall per tal que la superfície de les cares sigui la desitjada i no hi hagi imperfeccions en el creixement, és a dir, que les cares no creixin de manera proporcional.

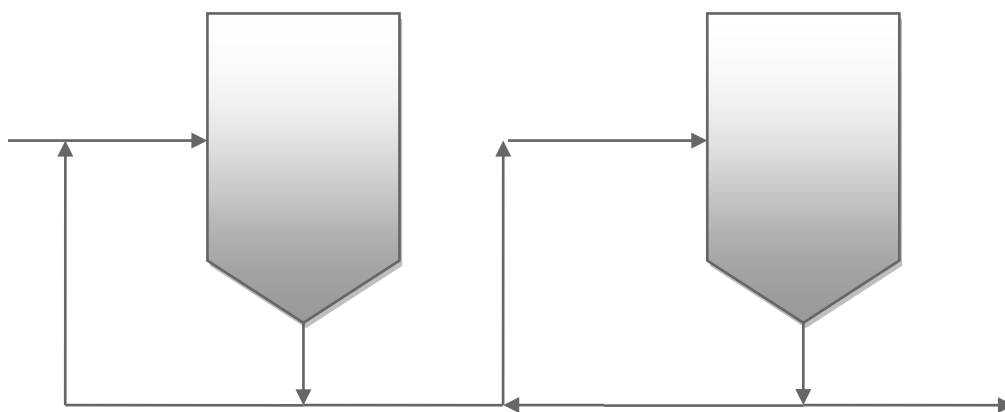
És important generar una sobresaturació uniforme en el magma de cristal·lització, és a dir, una distribució uniforme de les molècules de solut i un gradient de temperatures negligible a gran escala i a nivell molecular, durant el curs de la cristal·lització. D'altra banda, una densitat de sòlids uniforme proporciona una distribució homogènia de l'àrea del cristall pel seu correcte creixement. Si la sobresaturació local és major a on hi ha una deficiència d'àrea de superfície del cristall, s'iniciarà la nucleació espontània i es crearan cristalls de mida mitjana petits i, com a conseqüència, una ampla CSD (Crystall Size Distribution).

Les propietats del cristall en els cristal·litzadors en continu, es troben afectades per la geometria del cristal·litzador, la intensitat de l'agitació en la solució, el lloc i diàmetre de la recirculació, la velocitat d'evaporació del solvent, el temps de residència de les aigües mare, el cabal de recirculació i la sembra.

El control efectiu dels cristal·litzador, els quals poden compensar els efectes adversos de les perturbacions més grans, ha d'estar basat tant en la regulació de les variables com en un bon disseny de l'equip.

### 11.16.1 Procés dissenyat

S'han dissenyat tres cristal·litzadors, els dos primers es troben en sèrie, que operen a 150 mmHg i a 65°C . És a dir, s'indueix la cristal·lització a partir d'un refredament i una evaporació simultània del dissolvent.



**Figura 11.16.2.** Representació de l'ordre dels cristal·litzadors

El cabal d'entrada al primer cristal·litzador conté carbaril, toluè i  $\alpha$ -naftol. En el primer efecte, part del toluè serà evaporat i cristal·litzarà part del carbaril. Es crearan els nuclis de cristall i aquests augmentaran de mida en aquest i en el segon cristal·litzador. A la sortida del segon cristal·litzador es centrifugarà la mescla per tal d'obtenir un corrent amb el sòlid cristal·lí que haurà de ser posteriorment assecat per tal de comercialitzar-lo. A la centrífuga també s'obtindrà un corrent líquid amb part de nuclis fins de carbaril que la centrífuga no és capaç de separar. Aquests seran introduïts en un tercer cristal·litzador per tal que la mida del cristall augmenti. A la sortida del tercer cristal·litzador es torna a centrifugar la mescla. D'aquesta manera es recupera la part del

carbaril que en el segon cristal·litzador no havia assolit la mida de partícula necessària. El corrent de sòlid a la sortida de la centrífuga serà dut al procés d'assecatge. El corrent líquid de la sortida de la centrífuga que conté part de carbaril serà introduït al segon cristal·litzador per tal d'augmentar l'eficàcia del procés de purificació.

Els cristal·litzadors emprats corresponen a unitats de buit que utilitzen el refredament per evaporació adiabàtica per generar la sobresaturació . En la seva forma original i més senzilla. Un cristal·litzador d'aquest tipus és un recipient tancat en el qual es manté el buit per mitjà d'un condensador, generalment amb l'ajuda d'una bomba de buit tipus ejector de vapor.

L'aliment s'introdueix com una dissolució saturada calenta a una temperatura molt superior a la d'ebullició per la pressió existent en el cristal·litzador.

Es manté un volum de magma controlant el nivell del líquid i del sòlid que cristal·litz , mentre que el situat per sobre del magma s'utilitza per retirar el vapor i eliminar l'arrossegament. La dissolució d'alimentació es refreda espontàniament fins a la temperatura d'equilibri.

Ja que tant la entalpia de refredament com la de cristal·lització apareixen com a calor latent de vaporització , s'evapora una part del dissolvent . La sobresaturació generada per refredament i evaporació dóna lloc a nucleació i creixement.

El magma producte es retira del fons del cristal·litzador. Aquest circula des del fons cònic del cos del cristal·litzador, a través d'un tub descendent, fins a una bomba de circulació de baixa velocitat i baixa càrrega, puja a través d' un escalfador tubular vertical , amb vapor d'aigua que condensa en la carcassa , i després retorna al cos del cristal·litzador.

El corrent calent penetra a través d'una entrada tangencial justament sota del nivell de la superfície del magma. Això imparteix un moviment rotatiu al magma, la qual cosa facilita l'evaporació flash i equilibra el magma amb el vapor a través de la acció d'un flash adiabàtic. La sobresaturació que així es genera proporciona el la força impulsora per a la nucleació i el creixement.

Les condicions d'operació que treballaran els tres cristal·litzadors són idèntiques. S'ha agafat com a referència el diagrama del procés de purificació de Union Carbide, "*The Use and Storage the Methylisocyanate*".

**Taula 11.16.2.** Variables d'operació

Variable	Condicions d'operació
T (°C)	65,00
P (atm)	0,197

### 11.16.2 Balanç de matèria

Es considera un sistema en estat estacionari on la generació i l'acumulació és nul·la. A continuació s'especifiquen els balanços de matèria emprats en la resolució:

El balanç de matèria global és,

$$F = V + L + S \quad \text{Equació 11.16.1}$$

On,

- F = cabal d'entrada al cristallitzador, kg/h
- V = cabal de vapor produït, kg/h
- L = cabal de líquid, kg/h
- S = cabal de sòlid, kg/h

Tenint en compte que no hi ha solut en el corrent de vapor, el balanç de matèria del carbaril és

$$F \cdot x_{F,C} = L \cdot x_{L,C} + S \cdot x_{S,C} \quad \text{Equació 11.16.2}$$

On,

- $x_{F,C}$  = fracció màssica de carbaril al corrent d'entrada, kg solut anhidre/kg totals

- $x_{L,C}$  = fracció màssica de carbaril al corrent líquid, kg solut anhidre/kg líquid
- $x_{S,C}$  = fracció màssica de carbaril al corrent sòlid, kg solut anhidre/kg sòlid hidratat

Tenint en compte que al corrent sòlid no hi ha dissolvent, el balanç de matèria del toluè és

$$F \cdot x_{F,T} = L \cdot x_{L,T} + V \cdot x_{V,C} \quad \text{Equació 11.16.3}$$

On,

- $x_{F,T}$  = fracció màssica de toluè al corrent d'entrada, kg dissolvent/kg totals
- $x_{L,T}$  = fracció màssica de carbaril al corrent líquid, kg dissolvent /kg líquid
- $x_{V,T}$  = fracció màssica de carbaril al corrent sòlid, kg **dissolvent /kg (solut/diss n?)??**

Tenint en compte que l' $\alpha$ -naftol dissolt en el toluè ni cristal·litza ni s'evapora, el balanç de matèria corresponent és

$$F \cdot x_{F,\alpha} = L \cdot x_{L,\alpha} \quad \text{Equació 11.16.4}$$

On,

- $x_{F,\alpha}$  = fracció màssica d' $\alpha$  - naftol al corrent d'entrada, kg d' $\alpha$  -naftol /kg totals
- $x_{L,\alpha}$  = fracció màssica de carbaril al corrent líquid, d' $\alpha$ -naftol /kg líquid

Tal i com ja s'ha fet esmena, la solubilitat és el paràmetre clau a l'hora de modelitzar el comportament dels cristal·litzadors. Les solubilitats bibliogràfiques de carbaril en diferents dissolvents són les següents:

**Taula 11.16.3.** Solubilitats bibliogràfiques del carbaril

Dissolvents	T (°C)	S <sub>CA</sub> (ppm ò mg/L)
Metanol	25	7960
Xilè	25	1000

Hexà	25	214
Clorur de metilè	25	242,66

S'ha considerat que el component més similar al toluè és el xilè. D'aquesta manera, s'empra el seu corresponent valor de solubilitat per tal de realitzar els balanços de matèria.

S'ha estimat el valor de toluè evaporat mitjançant el simulador HYSYS.

Els resultats obtinguts del balanç de matèria per cada cristal·litzador són els següents:

**Taula 11.16.4.** Balanç de matèria del primer cristal·litzador

Component	F (Kg/h)	V (Kg/h)	S (Kg/h)	L (Kg/h)
Carbaril	1646,47	0,00	1113,68	565,88
$\alpha$ - naftol	126,76	0,00	0,00	111,27
toluè	4903,10	980,62	0,00	4189,45
Total	6676,34	980,62	1113,68	4866,60

**Taula 11.16.5.** Balanç de matèria del segon cristal·litzador

Component	F (Kg/h)	V (Kg/h)	S (Kg/h)	L (Kg/h)
Carbaril	2257,30	0,00	1358,19	565,88
$\alpha$ - naftol	169,02	0,00	0,00	111,27
toluè	8330,32	1666,06	0,00	4189,45
Total	10756,64	1666,06	1358,19	4866,60

**Taula 11.16.6.** Balanç de matèria del tercer cristal·litzador

Component	F (Kg/h)	V (Kg/h)	S (Kg/h)	L (Kg/h)
Carbaril	899,12	0,00	288,29	610,83
$\alpha$ - naftol	84,51	0,00	0,00	84,51
toluè	5843,31	1285,53	0,00	4557,78
Total	6826,93	1285,53	288,29	5253,12

### 11.16.3 Balanç d'energia

Tenint en compte que hi ha evaporació de toluè, el balanç d'energia global és el següent:

$$F \cdot H_F + Q = V \cdot H_V + L \cdot H_L + S \cdot H_S \quad \text{Equació 11.16.5}$$

On,

- Q = calor que s'ha d'afegir al sistema, kJ/h
- $H_F$  = entalpia del corrent d'entrada, kJ/h
- $H_V$  = entalpia del corrent de vapor, kJ/h
- $H_L$  = entalpia del corrent líquid, kJ/h
- $H_S$  = entalpia del corrent sòlid, kJ/h

Desenvolupant les expressions que descriuen les entalpies,

$$\begin{aligned}
 H_F &= (T_F - T_{ref}) \cdot Cp_L^F \\
 H_V &= (T_V - T_{ref}) \cdot Cp_L^V + \lambda_{vap} \\
 H_L &= (T_L - T_{ref}) \cdot Cp_L^L \\
 H_S &= (T_S - T_{ref}) \cdot Cp_L^S + \lambda_{crist}
 \end{aligned}
 \quad \text{Equació 11.16.6}$$

Considerant que  $T_{ref} = T_{operació} = T_V = T_L = T_S$ ,

$$Q = V \cdot \lambda_{vap} + S \cdot \lambda_{crist} - (T_F - T_{ref}) \cdot Cp_L^F \quad \text{Equació 11.16.7}$$

On,

- $C_p^i$  = la capacitat calorífica massica del corrent i, kJ/kg·°C
- $\lambda_{VAP}$  = calor latent de vaporització del corrent de toluè, kJ/kg
- $\lambda_{CRIST}$  = calor latent de crist·lització del corrent sòlid, kJ/kg
- $T_i$  = temperatura del corrent i (°C)
- $T_{ref}$  = la temperatura de Referència, °C

Per tal de calcular la Cp de l'aliment, s'ha utilitzat la següent equació:

$$Cp_L^F = \sum_{xi, F} \cdot C_{p,i} \quad \text{Equació 11.16.8}$$

Les propietats termodinàmiques emprades són les següents:

**Taula 11.16.7.** Propietats termodinàmiques emprades

Component	Cp (KJ/Kg°C)	λ (KJ/Kg)
Carbaril	0,590	-148,808
a - naftol	1,987	-
Toluè	1,648	357,400

Com a conseqüència de la manca de dades bibliogràfiques corresponents al carbaril, s'ha emprat com a valor de calor latent de cristal·lització del corrent sòlid el valor bibliogràfic corresponent a la naftalina.

Els resultats obtinguts són els següents:

**Taula 11.16.8.** Resultats obtinguts

Equip	Q (KW)
CR - 701	25,479
CR - 702	107,841
CR - 703	113,072

#### 11.16.4 Disseny mecànic

El creixement dels cristalls és un procés que es realitza capa per capa. Tal i com explica "Perry's Handbook", el temps de residència que han de menester els cristal·litzadors per produir cristalls de la mida desitjada varia d'entre 2 i 6 hores.

Coneixent el temps de residència i el cabal volumètric d'entrada al cristal·litzador, es pot obtenir el volum d'aquest.

$$V = \tau \cdot Qv \quad \text{Equació 11.16.9}$$

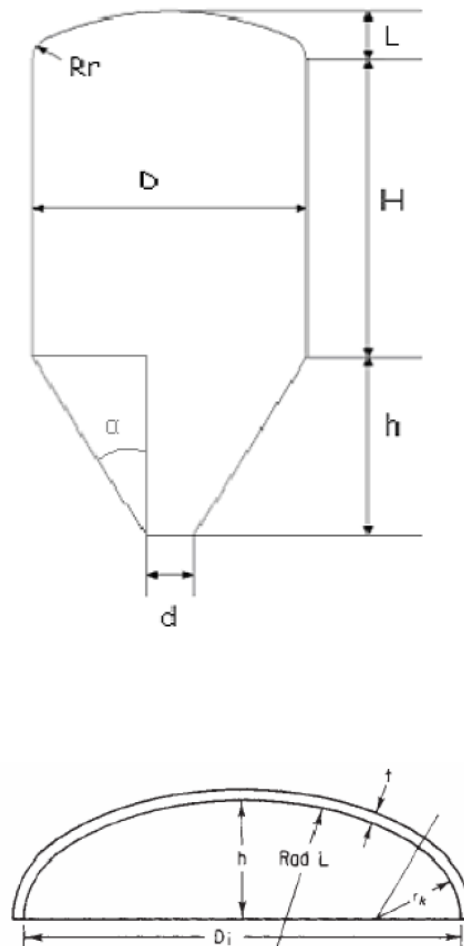
On:

· V = volum, m<sup>3</sup>



•  $Q_v = \text{cabal volumètric, m}^3/\text{h}$

Un cop obtingut el volum del cristal·litzador es pot realitzar el seu dimensionament. Tal i com mostra la figura, els cristal·litzadors emprats consten del cos cilíndric amb un tronc cònic a la part inferior i un fons toriesfèric a la part superior.



**Figura 11.16.3.** Representació de les dimensions en els cristal·litzadors i els capçals toriesfèrics

Per tal de dimensionar el cristal·litzador s'ha fixat el diàmetre intern del cilindre, (igual a la part superior del tronc cònic), el diàmetre inferior del fons cònic i l'angle  $\alpha$ . Fixades aquestes tres variables, es pot obtenir l'altura i el volum del fons cònic. D'aquesta manera, es pot obtenir el volum del cilindre que serà la diferència entre el volum total i el volum del fons cònic. S'han obtingut les mesures característiques del cristal·litzador. a partir de les equacions que es mostren a continuació:

- Volum del cilindre:

$$V_{\text{cilindre}} = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot H \quad \text{Equació 11.16.10}$$

- Volum del fons cònic

$$V_{\text{fons cònic}} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h \cdot \left(\frac{D^2}{4} + \frac{d^2}{4} + \frac{D \cdot d}{4}\right) \quad \text{Equació 11.16.11}$$

- Altura del fons cònic

$$h = \frac{\frac{D-d}{2}}{\tan(\alpha)} \quad \text{Equació 11.16.12}$$

- Radi fons toriesfèric

$$rk = 0.1 \cdot D \quad \text{Equació 11.16.13}$$

On:

- V = volum corresponent, m.
- D = diàmetre del cilindre, m.
- d = diàmetre de la part inferior del tronc cònic, m.
- H = altura del cilindre, m.
- h = altura del tronc cònic, m.
- rk = radi del fons toriesfèric, m.

**Taula 11.16.9.** Resultats geomètrics dels cristal·litzadors

	CR - 701	CR - 702	CR - 703
D (m)	3,5	3,5	3,2
d (m)	0,3	0,3	0,3
alfa	30	30	30
tan (alfa)	0,58	0,58	0,58
h (m)	3	3	3
V tronc cònic (m3)	9,71	9,71	7,42
V cilindre (m3)	40,29	40,29	32,58
Hcilindre (m)	4	4	4
L (m)	3,5	3,5	3,2
rk	0,35	0,35	0,32
h' (m)	0,68	0,68	0,62

### 11.16.4.1 Dimensionament de l'agitació:

La facilitat amb la qual els sòlids queden sostinguts en un líquid depèn de les propietats físiques de la partícula i del líquid, així com els models de circulació del tanc.

Quan s'augmenta la velocitat d'agitació hi ha una disminució del període de nucleació ja que aquesta afavoreix el procés de creació de nuclis. D'aquesta manera, quanta més agitació hi hagi, s'apreciarà més formació de nuclis cristal·lins.

L'agitació dels tres cristal·litzadors és del tipus hèlix marina. Les pales giren al centre del tanc impulsant el líquid de forma tangencial i radial. Es fixa una velocitat de 300 rpm.

Es calculen les dimensions de l'agitació a partir de la figura que es mostra a continuació:

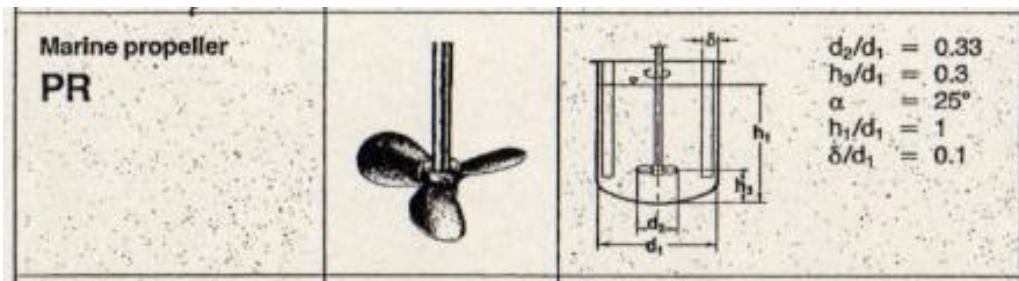


Figura 11.16.4. Tipus d'agitació i dimensionament d'aquest.

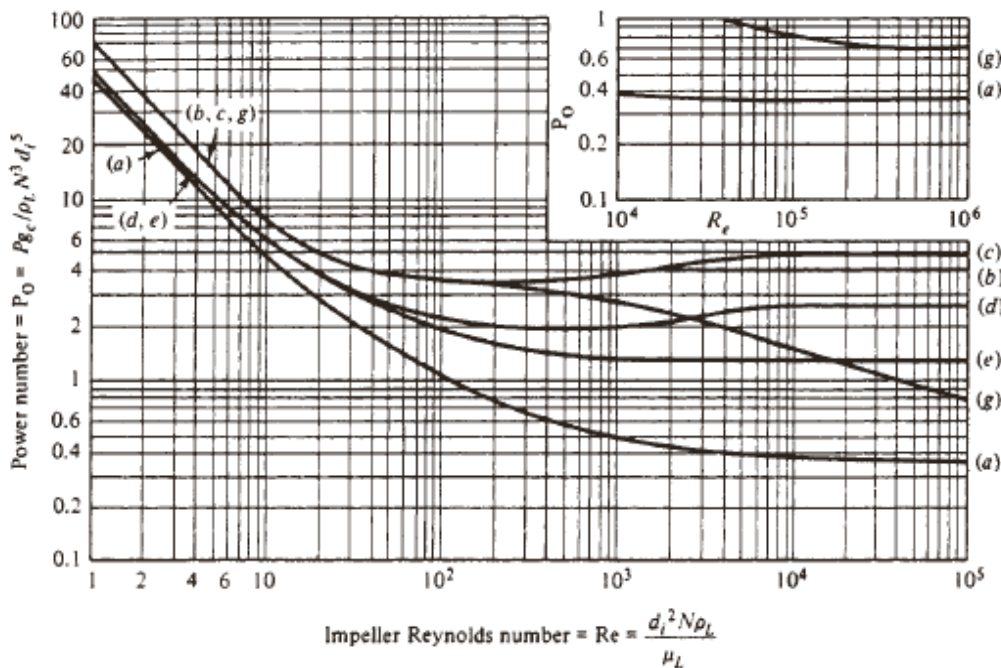


Figura 11.16.5. Figura per relacionar el numero de Reynolds i N° de la potència.

Per tal de calcular la potència necessària, primerament s'ha de calcular el Reynolds. Seguidament, es calcularà el número de potència mitjançant la figura 11.16.5. Finalment, s'aïlla el valor de la potència de l'equació 11.16.15.

$$N^{\circ} \text{ Re} = \frac{N_R \cdot D_A^2 \cdot \rho}{\mu} \quad \text{Equació 11.16.14}$$

$$N^{\circ} \text{ Pot} = \frac{\text{Pot}}{\rho \cdot N_R^3 \cdot D_A^5} \quad \text{Equació 11.16.15}$$

On:

- P = Potencia de l'agitador, W
- $g_c$  = Factor de conversió, 1 (utilitzant el S.I)
- $\rho$  = Densitat,  $\text{kg/m}^3$
- N = Velocitat d'agitació, rpm
- $D_a$  = Diàmetre de la turbina, m

**Taula 11.16.10.** Dimensions de les agitacions dels cristal·litzadors.

Dimensions agitador	CR 301	CR 302	CR 303
<b>d1 (m)</b>	3,5	3,5	3,2
<b>d2 (m)</b>	1,155	1,155	1,056
<b>h3 (m)</b>	1,05	1,05	0,96
<b><math>\alpha</math></b>	25	25	25
<b>h1 (m)</b>	3,5	3,5	3,2
<b><math>\delta</math> (m)</b>	0,35	0,35	0,32

#### 11.16.4.2 *Gruix dels cristal·litzadors:*

Al ser equips que treballen al buit, els espessors de paret d'aquests equips són dissenyats seguint el mateix procediment especificat en la columna de destil·lació CD-701. La taula 11.16.11. mostra els valors dels gruixos obtinguts en cada cristal·litzador.

**Taula 11.16.11.** Espessor de paret per a cada cristal·litzador.

<b>Equip</b>	<b>Guix (mm)</b>
CR - 701	15,00
CR - 702	15,00
CR - 703	14,00

#### **11.16.4.3 Pes dels cristal·litzadors:**

Seguint el procediment explicat en el càlcul de pesos dels equips posteriors, s'arriba a determinar la taula 11.16.12 per als tres cristal·litzadors.

**Taula 11.16.12.** Pes buit i en operació dels tres cristal·litzador.

<b>Equip</b>	<b>Pes buit (Kg)</b>	<b>Pes ple (Kg)</b>
CR - 701	7580	57479,70
CR - 702	7580	7579,70
CR - 703	6168	6168,11

#### **11.16.4.4 Aïllament:**

Per tal de realitzar un aïllament adequat per aquest equip s'empra el programa Insulan proporcionat per l'empresa CALORCOL S.A.

Les característiques introduïdes al programa per tal de treballar amb llana mineral de roca com a manta aïllant de  $80\text{Kg/m}^3$ , han estat:

- Temperatura Interior = 65 °C
- Temperatura Superficial del Aïllant = 35°C
- Temperatura Ambient = 16,9 °C (és la mitjana del territori)
- Velocitat de l'aire = 2,7 m/s (velocitat mitjana en direcció nord- oest)
- Superfície exterior de l'aïllament = Acer inoxidable brut (Emissivitat de 0,3)
- Superfície sense aïllant = AISI 316L (Suposant emissivitat de 0,3)

El resultat obtingut és d'un aïllament de 1,2 cm amb una eficiència del 84.54%.

### 11.17 Disseny de la centrífuga

Els cristalls produïts en la cristallització seran separats mitjançant centrífugues. La centrifugació consisteix en aplicar una força centrífuga suficientment elevada de manera que el líquid es desplaça en direcció de la força, produint-se la separació. És a dir, la centrifugació està basada en la distinta velocitat de desplaçament de les partícules en un medi líquid al ser sotmeses a un tanc centrífug. Aquesta operació és aplicable tant en separacions sòlid – líquid com en la separació de dos líquids immiscibles. Ambdós casos es basen en la diferència de densitats entre les dues fases.

Es diferencia de la sedimentació en el fet que en aquesta només actua la força de la gravetat. Per tant, la centrifugació aconsegueix una major efectivitat i menor temps d'operació, tot i que les despeses energètiques són majors.

#### 11.17.1 Balanç de matèria

La centrífuga no té una eficàcia del 100%, és a dir, no és capaç de separar plenament la fase líquida de la fase sòlida. Per tal de determinar aquestes dues fases, s'ha considerat que s'obindrà el carbaril sòlid amb un 40 % de humitat.

D'aquesta manera, el balanç de matèria a les dues centrífugues és el següent:

**Taula 11.17.1.** Balanç de matèria per la primera centrífuga

Component	F (Kg/h)	S (Kg/h)	L (Kg/h)
Carbaril	2257,30	1358,19	899,12
$\alpha$ - naftol	169,02	84,51	84,51
toluè	6664,26	820,95	5843,31
Total	9090,58	2263,65	6826,93

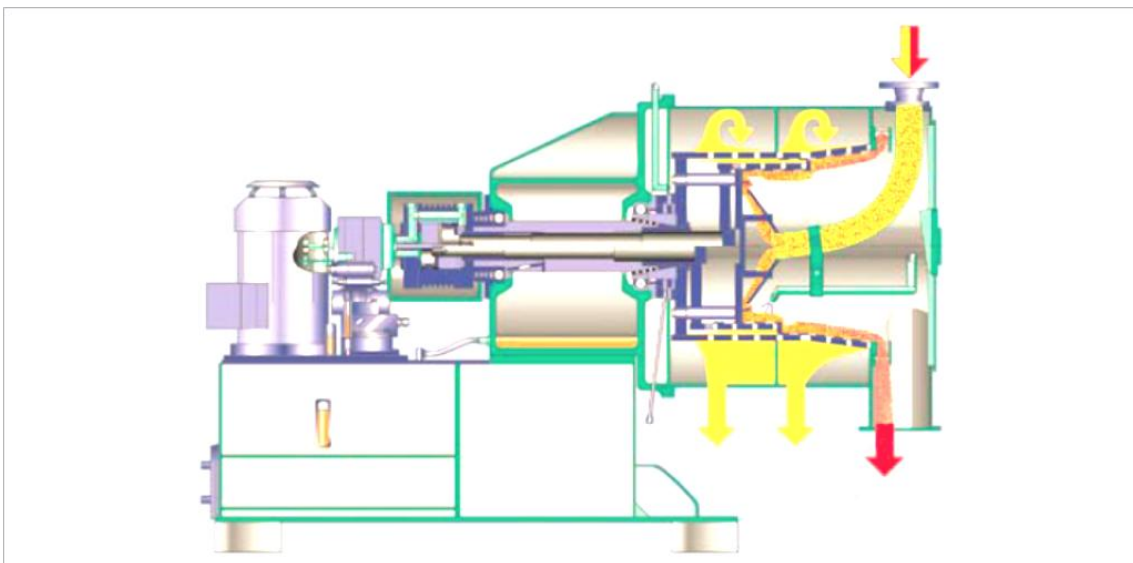
**Taula 11.17.2.** Balanç de matèria per la segona centrífuga

Component	F (Kg/h)	S (Kg/h)	L (Kg/h)
Carbaril	899,12	288,29	610,83
$\alpha$ - naftol	84,51	42,25	42,25

toluè	4557,78	149,94	4407,84
Total	5541,40	480,48	5060,92

### 11.17.2 Disseny mecànic

La centrífuga d'empenta Pusher, d'execució simple, doble o triple esglaó, i amb cistell cilíndric / cònic, és una centrífuga de filtració i operació contínua. Els sòlids són retinguts en forma de torta al cistell de perfil trapezoïdal i a continuació són transportats axialment per mitjà d'un moviment oscil·lant de la cistella.



**Figura 11.17.1.** Exemple del moviment del sòlid a l'interior de la centrífuga

La barreja de sòlids i líquid s'alimenta de forma contínua al tub d'entrada fins a arribar al con de distribució que gira a la mateixa velocitat que el cistell. Dins del distribuïdor la barreja accelera suaument fins a aconseguir la velocitat desitjada i, consegüentment, flueix com una capa de suspensió per sobre de la vora del distribuïdor fins tota l'àrea de cribratge a la zona d'alimentació.

La major part del líquid es centrifuga cap a fora a través de les obertures de la reixeta, mentre que els sòlids són retinguts sobre de la reixeta en forma de coca de filtratge. A més de girar, el cistell interior efectua un moviment axialment oscil·lant. Aquest moviment d'empenta mou la coca de filtratge cap endavant i l'empeny gradualment cap a la cistella exterior des del qual es descarrega a través de la part oberta cap a la zona de sòlids de la carcassa.

El gruix de la coca de filtrat està directament vinculat a la longitud efectiva de pas, la

fricció interna a la coca de filtrat i la fricció de la coca de filtrat sobre la reixeta. L'alçada de la coca de filtrat és 15-80 mm. La capacitat d'una centrífuga d'empenta depèn en primer lloc del efecte de desguàs de la mescla. La coca de filtrat acabada de formar es descarrega en un curt espai de temps entre dos moviments d'empenta de tal manera que les forces tenen la potència suficient per moure i deslligar la coca de filtrat existent en el cistell. Una concentració major de sòlids en la alimentació influeix en una productivitat major i una humitat de descàrrega menor.



**Figura 11.17.2.** Exemple d'una centrífuga industrial

La centrífuga d'empenta Siebtechnik està compresa per:

- Àrea de procés
- Rodaments i accionament
- Mecanisme hidràulic

Les peces rotatives estan en posició horitzontal, de manera que la zona de procés i d'accionament sigui fàcilment accessible . Aquesta centrífuga està dissenyada d'acord amb un sistema modular, considerant criteris de construcció i operació . L'element bàsic és la carcassa de la màquina, que inclou els següents elements:

- Àrea de rodaments
- Accionament per a la rotació i l'empenta
- Bomba hidràulica ( incloent control elèctric - hidràulic )



La carcassa base de la màquina consisteix en 2 càmeres independents. La primera càmera serveix com a reserva d'oli per a l'oli hidràulic i també per acomodar el refredador intern d'oli. La segona càmera està dissenyada per omplir amb ciment i per tant no es necessita cap fonamentació addicional. La màquina sencera està elàsticament fixada a una planxa d'acer o directament al sòl mitjançant amortidors amb un baix punt de gravetat, eliminant la necessitat d'una fonamentació especial.

La carcassa de producte i tots els components rotatius són de disseny suspès respecte al allotjament dels rodaments. La carcassa de producte està dividida en una àrea de descàrrega de filtratge i una altra de descàrrega de sòlids .

Els cistells de les reixetes de perfil trapezoïdal tenen ranures per permetre el desguàs del filtrat. Aquestes ranures estan posicionades paral·leles a l'eix, és a dir en la direcció del moviment d'empenta i el transport dels sòlids.

El front de la carcassa de producte ve equipat amb una porta articulada gran dissenyada d'una peça o " Splitt - door ". Els components rotatius ( cistells i reixetes ), el canaló de descàrrega de sòlids, tub d'alimentació, etc. són fàcilment accessibles a través d'aquesta porta frontal.

Les parts d'empenta operen mitjançant un sistema elèctric - hidràulic. El volum i la pressió d'oli són subministrats per una bomba de cargol, accionada per un motor trifàsic.

**Taula 11.17.3.** Dimensionament de les centrífugues

<b>Dimensions</b>	<b>C – 701</b>	<b>C – 702</b>
<b>Longitud (mm)</b>	2600	1900
<b>Amplada (mm)</b>	1800	1100
<b>Alçada (mm)</b>	1700	1050
<b>Potència (Kw)</b>	15	10

Cal dir que l'elecció de la centrífuga, així com el valor de la potència, ha sigut fent una analogia a les centrífugues de marca *Pieralisi*.

## 11.18 Disseny del sistema d'assecatge

Per finalitzar el procés de purificació, els cristalls seran processats mitjançant un procés d'assecatge. El terme d'assecatge es refereix, generalment, a la reducció del contingut d'humitat en un sòlid.

Aquest procés és emprat comunament ja que presenta una sèrie d'avantatges tals com:

- Facilitar la manipulació del sòlid en etapes posteriors.
- Reduir el volum.
- Facilitar la conservació del producte.
- Reduir les despeses de transport.

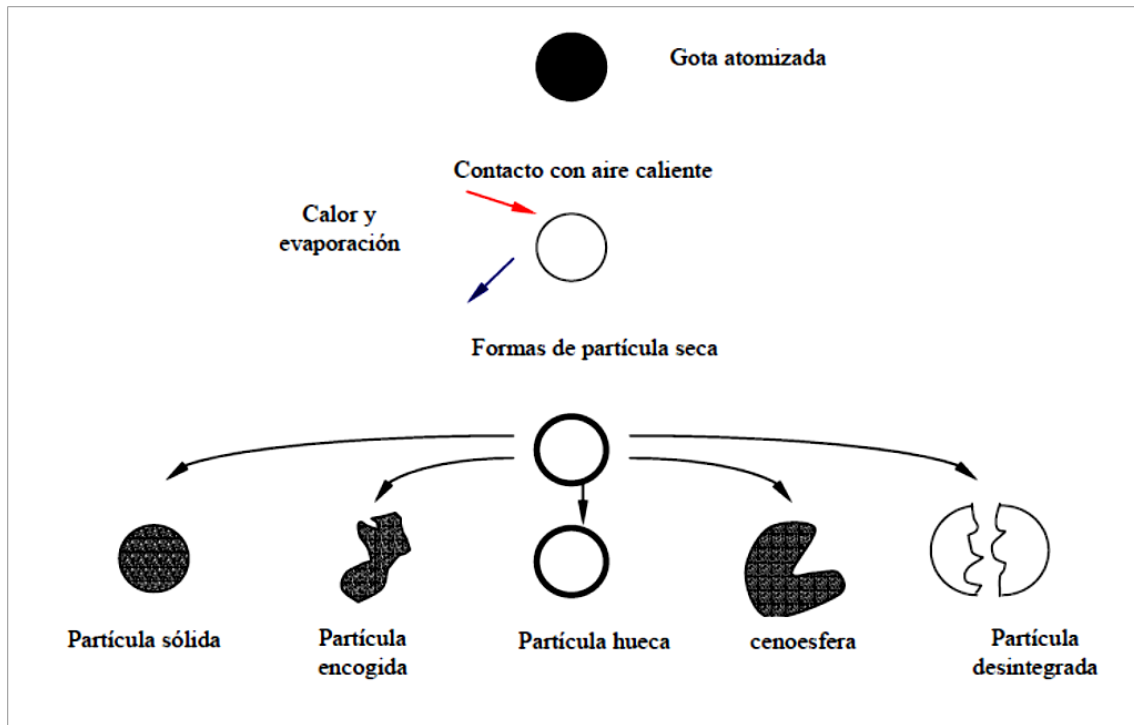
La humitat continguda en un sòlid humit exerceix una pressió de vapor depenent de la naturalesa de la humitat, la naturalesa del sòlid i de la temperatura. Si el sòlid humit s'exposa a un corrent de gas amb una pressió parcial de vapor, el sòlid perdrà humitat per evaporació, o la guanyarà agafant la del gas fins que la pressió de vapor de la humitat s'iguali a la pressió parcial de la corrent gasosa. Llavors, el sòlid i el gas es troben en equilibri i la humitat del sòlid s'anomena humitat d'equilibri.

En els processos d'assecatge ocorren simultàniament fenòmens de transferència de matèria i energia. Per tal d'obtenir les dades cinètiques de la velocitat d'assecament, s'hauria de disposar de cobres d'humitat del sòlid respecte el temps.

El temps d'assecament ve influenciat per diverses variables com:

- Naturalesa del material: les corbes d'assecament seran diferents segons el tipus de partícula sòlida a tractar.
- Temperatura del gas: com major sigui la temperatura de l'aire major serà la velocitat d'assecament,
- Velocitat màssica del gas: si l'etapa controlant del procés d'assecatge és la transferència de matèria a través del sòlid, la velocitat màssica del gas no afectarà al temps d'assecament. En cas contrari, en augmentar la velocitat del gas, també ho farà la velocitat d'assecament.
- Humitat absoluta del gas: quant més humitat presenti el gas, menor serà la velocitat d'assecament ja que la força impulsora serà menor.
- Mida de les partícules: la velocitat d'assecament augmenta en disminuir la mida de les partícules.

Quan la pressió de vapor del líquid dins de la gota excedeix la pressió ambient, la gota s'infla i es trenca formant partícules sòlides buides. L'aparició de fractures o buits en l'estructura de la partícula accelera la velocitat es assecat a causa del escurçament del camí per al moviment intern d'humitat.



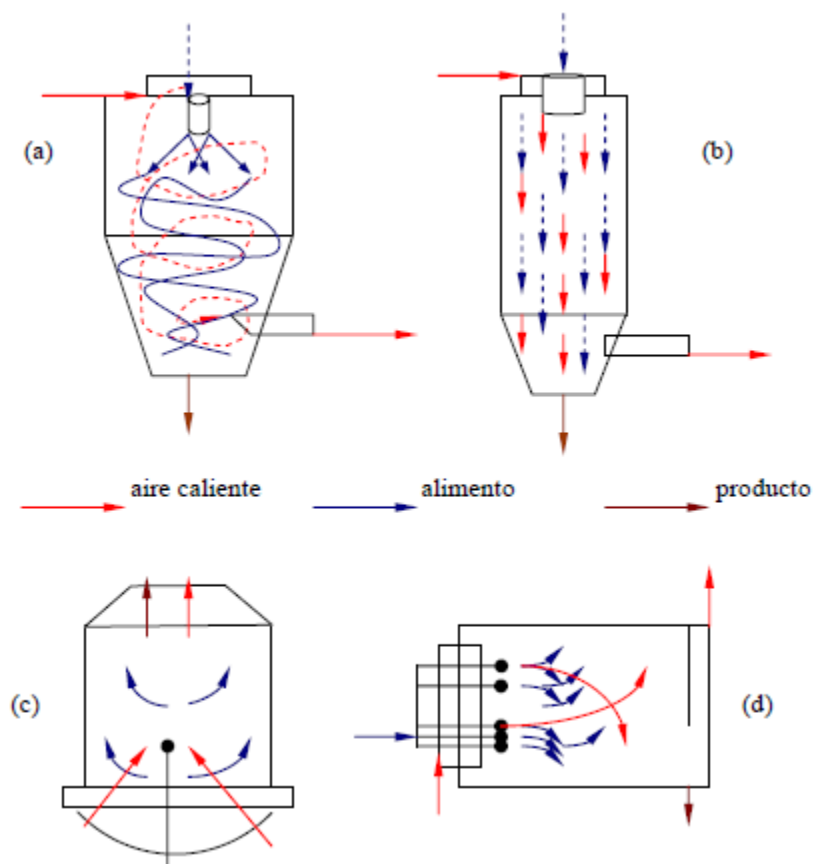
**Figura 11.18.1.** Tipus de partícula seca

S'han de tenir en compte una sèrie de consideracions:

- Les gotetes més grans, s'assequen amb més lentitud. Són elles les que determinen les dimensions finals de la càmera.
- Causa de la turbulència i la barreja de gasos, les condicions de dessecació són uniformes en tots els punts de la càmera, excepte a la zona immediata de la entrada del gas.
- La força impulsora de la temperatura per a la dessecació és la diferència entre la temperatura de sortida del gas assecant i, en el cas d'utilitzar aigua pura, la temperatura de bulb humit del gas. En el cas d'una solució, s'utilitza la temperatura de saturació adiabàtica de la solució saturada, en lloc de la temperatura de bulb humit.

La principal funció de la càmera és tancar l'esprai que es produeix i assegurar que les gotes són assecades amb el flux de gas calent i per subministrar un temps de residència suficient per evaporar la humitat. La velocitat d'assecat és molt alta en el primer període d'assecat quan la majoria de la humitat és evaporada en intervals de temps molt curt, però durant el segon període d'assecat la velocitat cau ràpidament i requereix més temps per reduir encara més la humitat del producte fins a un nivell acceptable . Corbes de velocitat d'assecat per a una gota poden subministrar informació de el temps de residència necessari en l'assecat. El temps de residència pot ser calculat , en primera instància , dividint el volum de la cambra pel cabal total d'aire . És d' particular importància que les gotes no xoquin contra les parets de la càmera quan encara estan humides

A la següent figura es mostren els diferents tipus d'assecadors en paral·lel. Tant l'atomitzador com el flux d'aire estan localitzats al cim o a un costat de la càmera. Els tipus (a) i (b) són els més comuns. El del tipus (a) té flux d'aire rotatori i inclinat això s'aconsegueix per una entrada tangencial o per aspes inclinades.



**Figura 11.18.2.** Tipus d'assecadors en paral·lel

### 11.18.1 Balanç de matèria

**Taula 11.18.1.** Balanç de matèria del assecador

Compost	F (Kg/h)	S (Kg/h)	G (Kg/h)
Carbaril	1646,48	1646,48	0,00
$\alpha$ - naftol	126,76	126,76	0,00
toluè	970,89	0,00	970,89
Total	2744,13	1773,24	970,89

### 11.18.2 Dimensionament del assecador

En quant al dimensionament de l'assecador s'han seguit les figures 11.18.3 i 11.18.4, en la qual es permet dissenyar a partir de valors típics un assecat en spray dryer.

Figura 11.18.3:

Cuadro 15. Relación entre tamaño promedio de partícula y diámetro mínimo para la cámara de secado

Tipo de spray	Tamaño medio aproximado ( $\mu\text{m}$ )	D mínimo (m)	Emáx Aproximada (Kg/h)
Muy fino	20-40	1.5	20
Fino	40-80	2	150
Medio- grueso	80-100	4	1000
Grueso	100-120	5	1500
	120-150	6	1500

Fuente: Spray Drying Handbook (Masters, 1991)

Figura 11.18.4:

Cuadro 16. Relación entre altura y diámetro para la cámara de secado

Cámara de secado/ atomizador Combinación	H:D (altura cilindro/ diámetro cámara)
Flujo en paralelo / rotatorio	0.6:1 a 1:1
Flujo paralelo / boquilla atomizadora en la cima	3:1 a 4:1
Boquilla atomizadora en contracorriente	3:1 a 5:1
Flujo mezclado( fuente) boquilla atomizadora	1:1 a 1.5:1
Flujo mezclado (lecho fluidizado)	0.15:1 a 0.4:1

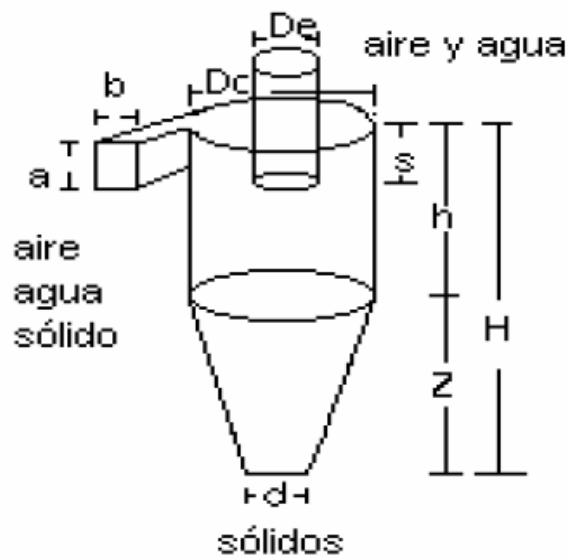
Fuente: Spray Drying Handbook (Masters, 1991)

Utilitzant les equacions pel càlcul del volum d'un con i d'un cilindre i amb els valors típics anteriors, es pot determinar un assecador amb les dimensions especificades a la taula 11.18.2.

**Taula 11.18.2.** Dimensionament de l'assecador, Spray dryer

D (m)	5
L (m)	7,5
h cilindre(m)	6
h con (m)	1,5
V assecador (m <sup>3</sup> )	146,14
V cilindre (m <sup>3</sup> )	117,81
Volum con (m <sup>3</sup> )	3,125

Per tal de millorar l'eficiència del assecatge i de la separació de compost sòlid, s'ha dissenyat un cicló just a la sortida de cues del assecador. Aquest es mostra en la figura 11.18.3 i a la taula 11.18.3.



**Figura 11.18.3.** Dimensions del cicló

<b>D</b>	1,3	<b>a</b>	0,65
<b>a/D</b>	0,5	<b>b</b>	0,325
<b>b/D</b>	0,25	<b>s</b>	0,975
<b>s/D</b>	0,75	<b>De</b>	0,65
<b>De/D</b>	0,5	<b>h</b>	2,6
<b>h/D</b>	2	<b>H</b>	5,2
<b>H/D</b>	4	<b>B</b>	0,325
<b>B/D</b>	0,25		
<b>v=h/a</b>	-		

k	0,729
K	34,7

**Taula 11.18.3.** Dimensions del cicló

## **11.19 Bescanviadors de calor**

### **11.19.1 Introducció**

Els bescanviadors són equips molt utilitzats en la indústria. La planta disposa d'un total de 35 bescanviadors, d'entre els quals es poden diferenciar intercanviadors de carcassa i tubs, condensadors i kettle-reboilers de les columnes de destil·lació. Tant en els kettle-reboilers com en els condensadors es produeix el canvi de fase. En canvi, es poden trobar bescanviadors de carcassa i tubs amb i sense canvi de fase.

A continuació, s'expliquen les principals característiques de cada un dels tipus de bescanviadors utilitzats:

- bescanviadors de carcassa i tubs

És el més utilitzat en la indústria, presenten una gran diversitat de configuracions i permeten treballar en un ampli rang de temperatures i pressions. A més, presenten grans àrees de contacte, de manera que es poden utilitzar en casos en què es requereixi tenir un gran intercanvi de calor entre el fluid de procés i el fluid refrigerant. Un altre dels avantatges que presenten són el baix cost i la seva fàcil operació.

Aquest tipus de bescanviador consisteix en una carcassa cilíndrica amb un feix de tubs en l'interior. Els tubs poden ser llisos, aletejats, longitudinals i també poden ser rectes o corbats en U.

- Kettle-reboilers

Són bescanviadors de carcassa i tubs especials, que s'utilitzen en fons de columnes de destil·lació per evaporar part del corrent d'entrada, crear el reflux i proporcionar el calor de reebullició que es necessita per a la destil·lació.

- Condensadors de columnes

També són bescanviadors de carcassa i tubs, però el fluid de procés entra en fase gas i passa a líquid.

### 11.19.2 Fluid tèrmic

El fluid tèrmic o refrigerant utilitzat en tots els casos exceptuant la refrigeració de MIC, és un oli tèrmic, concretament el Dowtherm Q. Aquest oli té un color groc clar i la seva composició és: blenda de difeniletà i alquils aromàtics. Té un pes molecular promig de 190. A la taula 11.19.1 adjuntada a continuació s'introdueixen les seves propietats.

**Taula 11.19.1.** Propietats de l'oli tèrmic

<b>Propietat</b>	<b>Valor</b>
<b>Rang de temperatura (°C)</b>	-35 a 330
<b>Punt d'ebullició (°C)</b>	267
<b>Punt d'inflamació (°C)</b>	120
<b>Temperatura d'autoignició (°C)</b>	124
<b>Coefficient de transferència de calor (W/m<sup>2</sup>/K)</b>	295
<b>Límit superior d'inflamabilitat, 5,5Vol. % en l'aire (°C)</b>	190
<b>Límit inferior d'inflamabilitat, 0,55Vol. % en l'aire (°C)</b>	135
<b>Temperatura crítica (°C)</b>	489
<b>Pressió crítica (bar)</b>	24

### 11.19.3 Resum dels bescanviadors de la planta



A la taula 11.19.2. es mostra un resum de tots els bescanviadors i les temperatures d'entrada i sortida del fluid de procés i del fluid refrigerant que s'utilitza. S'hauria d'estudiar com recuperar l'energia creada; a nivell de costos seria molt rentable, però en la planta dissenyada es requereixen moltes hores de treball per obtenir una solució òptima als problemes d'aprofitament d'energia que es presenten.

**Taula 11.199.1.** Taula dels bescanviadors de la planta.

<b>Nom</b>	<b>Tipus</b>	<b>T<sub>entrada fluid</sub> tèrmic</b>	<b>T<sub>sortida fluid</sub> tèrmic</b>	<b>T<sub>entrada fluid de</sub> procés</b>	<b>T<sub>sortida fluid de</sub> procés</b>
H-201	Carcassa i tubs BEM	280	265,1	7,57	205
H-202	Carcassa i tubs BEM	280	265,02	-6,35	120
H-203	Carcassa i tubs BEM	280	265,1	120	240
H-204	Carcassa i tubs BEM	0	26,45	260	100
H-301	Carcassa i tubs BEM	0	13	76,31	51
C-301	Carcassa i tubs BEM	0	28,34	83,68	57,86
K-301	Carcassa i tubs BKU	280	270	102,21	103,4
H-302	Carcassa i tubs BEM	0	10	363,44	183
H-303	Carcassa i tubs BEM	183	4,64	-15	-3
C-302	Carcassa i tubs BEM	-15	-5	6,72	6,67
K-302	Carcassa i tubs	280	266,37	237,7	236,02

	BKU				
H-401	Carcassa i tubs BEM	0	15	259,2	55
C-501	Carcassa i tubs BEM	-15	-3	4,04	3,97
K-501	Carcassa i tubs BKU	280	265,09	238	253,8
H-501	Carcassa i tubs BEM	0	30	103,7	7,43
C-502	Carcassa i tubs BEM	0	19,64	38,81	38,77
K-502	Carcassa i tubs BKU	280	268,19	110,6	107,95
C-503	Carcassa i tubs BEM	0	23	97,54	97,75
K-503	Carcassa i tubs BKU	280	270,13	110,6	110,6
H-701	Carcassa i tubs BEM	0	12,12	88	55
C-701	Carcassa i tubs BEM	0	13	76,31	51
K-701	Carcassa i tubs BKU	280	267	83,54	85,97
H-702	Carcassa i tubs BEM	280	278,04	67	75
C-702	Carcassa i tubs BEM	0	24,64	65,01	24,72
H-703	Carcassa i tubs BEM	280	278	67	75

C-703	Carcassa i tubs BEM	0	10	65,01	45,4
H-704	Carcassa i tubs BEM	280	279,27	67	75
C-704	Carcassa i tubs BEM	0	20	150	70
C-705	Carcassa i tubs BEM	0	25	278	115,26
H-705	Carcassa i tubs BEM	280	274,02	70	86,3
H-801	Carcassa i tubs BEM	-15	-10,55	38	0
H-802	Carcassa i tubs BEM	280	275	0	37
H-1201	Carcassa i tubs BEM	-20	-12	21	0
H-1202	Carcassa i tubs BEM	-20	-18,13	-4	-15

A la Figura 11.19.1 es mostren els diferents bescanviadors de calor existents en la indústria segons les característiques dels seus capçals i les seves carcasses. En aquest cas s'ha utilitzat el tipus B o BEM per als condensadors i els bescanviadors de carcassa i tubs sense canvi de fase i el tipus BKU per als kettle-reboilers.

Frente Cabezas estacionarios		Tipo de carcasa		Terminal Tipos de cabezal	
<b>A</b>	 Canal y cubierta removible	<b>E</b>	 Un pase de carcasa	<b>L</b>	 Similar a cabezal A
<b>B</b>	 Bonete (cubierta integral)	<b>F</b>	 Dos pases de carcasa con separador horizontal	<b>M</b>	 Similar a cabezal B
<b>C</b>	 Haz de tubo removible Canal integral Cubierta removible	<b>G</b>	 Flujo dividido	<b>N</b>	 Similar a cabezal N
<b>N</b>	 Canal integral Cubierta removible	<b>H</b>	 Doble flujo dividido	<b>P</b>	 Cabezal flotante empacado por el exterior
<b>D</b>	 Altas presiones	<b>J</b>	 Flujo dividido	<b>S</b>	 Cabezal flotante
		<b>K</b>	 Rehervidor	<b>T</b>	 Cabezal flotante deslizante
		<b>X</b>	 Flujo cruzado	<b>U</b>	 Haz de tubo en U
				<b>W</b>	 Sello externo

Figura 11.19.1. Diferents tipus de carcassa i capçals.

#### 11.19.4 Disseny de bescanviadors

Tots els bescanviadors han estat dissenyats amb el programa Exchanger Design & Rating de Aspen que permet el disseny dels diferents tipus d'intercanviadors i presenta una extensa base de dades de propietats físiques i models termodinàmics.

A continuació s'introdueixen els paràmetres importants en el disseny de bescanviadors.

Paràmetres de procés:

- Decidir quin fluid circula per carcassa i què fluid circula per tubs
- Selecció de l'increment de temperatura del fluid de procés
- Establir els límits de pèrdues de pressió tant en carcassa com en tubs
- Selecció dels models de transferència d'energia i els coeficients d'embrutiment

Paràmetres mecànics:

- Selecció del nombre de passos per tub i per carcassa
- Especificació de paràmetres de tubs (mida, pitch, material...)
- Especificació dels paràmetres de carcassa (bafles, espai entre bafles, material...)

És important la distribució dels fluids al bescanviador, ja que segons aquesta decisió la seva mida pot variar considerablement en tenir millor o pitjor aprofitament de la calor. A continuació s'introdueixen les regles bàsiques d'assignació dels fluids:

- El fluid a major temperatura circula per tubs
- El fluid a major pressió circula per tubs
- El fluid més corrosiu circula per tubs
- El fluid més tòxic circula per tubs
- El fluid més brut circula per tubs
- El fluid amb menys pèrdua de pressió circula per carcassa
- El fluid més viscos circula per carcassa
- El fluid amb menys cabal circula per carcassa
- El fluid a condensar circula per carcassa

Molts cops s'ha d'arribar a una solució d'equilibri en decidir la distribució dels fluids i decidir quin paràmetre serà més influent en el resultat final.

#### **11.19.4.1 Balanç d'energia**

En el disseny de bescanviadors s'ha de complir el balanç d'energia, el calor dels tubs ha de ser igual al calor de carcassa.

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} = w_t \cdot Cp_{(t)} \cdot (t_2 - t_1) = w_s \cdot Cp_{(s)} \cdot (T_1 - T_2) \quad \text{Equació 11.19.1}$$

on:

Q: calor intercanviada per unitat de temps (kJ/h)

U: coeficient global de transferència de calor (kJ/h/m<sup>2</sup>)

A: àrea de transferència de calor (m<sup>2</sup>)

$\Delta T_{ml}$ : Increment de temperatura mitjana logarítmica

$Cp(t)$ : Capacitat calorífica del fluid que circula per tubs (kJ/kg/K)

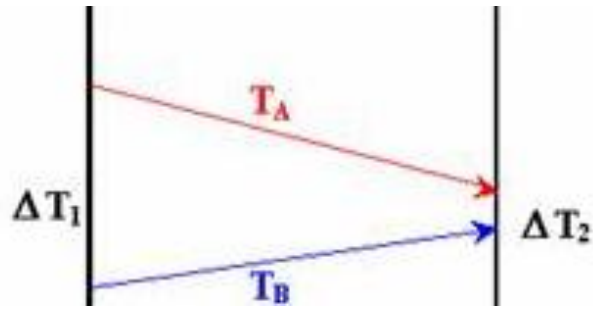
$W_t$ : cabal màssic del fluid que circula per tubs (kg/h)

$Cp(s)$ : Capacitat calorífica del fluid que circula per carcassa (kJ/kg/K)

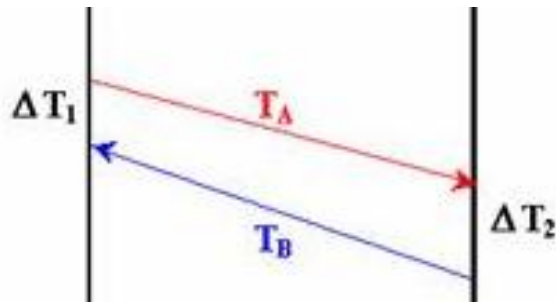
$W_s$ : cabal màssic del fluid que circula per carcassa

#### **11.19.4.2 DTML**

L'increment de temperatura mitjana logarítmica depèn dels valors de les temperatures d'entrada i sortida de tubs i carcassa. Un paràmetre a decidir és el tipus de circulació dels dos fluids: paral·lel o contracorrent.



**Figura 11.19.2** Circulació en paral·lel.



**Figura 11.19.2.** Circulació en contracorrent.

Per fer el disseny s'ha decidit sempre circulació en contracorrent en tots els bescanviadors per millorar la transferència de calor, ja que la mitjana logarítmica de la temperatura per contracorrent és major que la dels fluids en paral·lel. S'ha calculat la diferència mitjana logarítmica segons l'equació 11.19.2.

$$DTML = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} \quad \text{Equació 11.19.2}$$

on:

T1: temperatura d'entrada a carcassa

T2: temperatura de sortida de carcassa

t1: temperatura d'entrada a tubs

t2: temperatura de sortida de tubs

Si en el disseny del bescanviador es té més d'un pas per tubs caldrà corregir la DTML. El número de passos per tub pot variar de 1 a 16.

$$(DTML)_c = DTML \cdot F \quad \text{Equació 11.19.3}$$

Aquest factor es determina en funció del nombre de passos per tub i per carcassa i dels paràmetres adimensionals (R i S) que depenen de la distribució de temperatures al bescanviador i es mostren en les equacions 11.19.4 i 11.19.5.

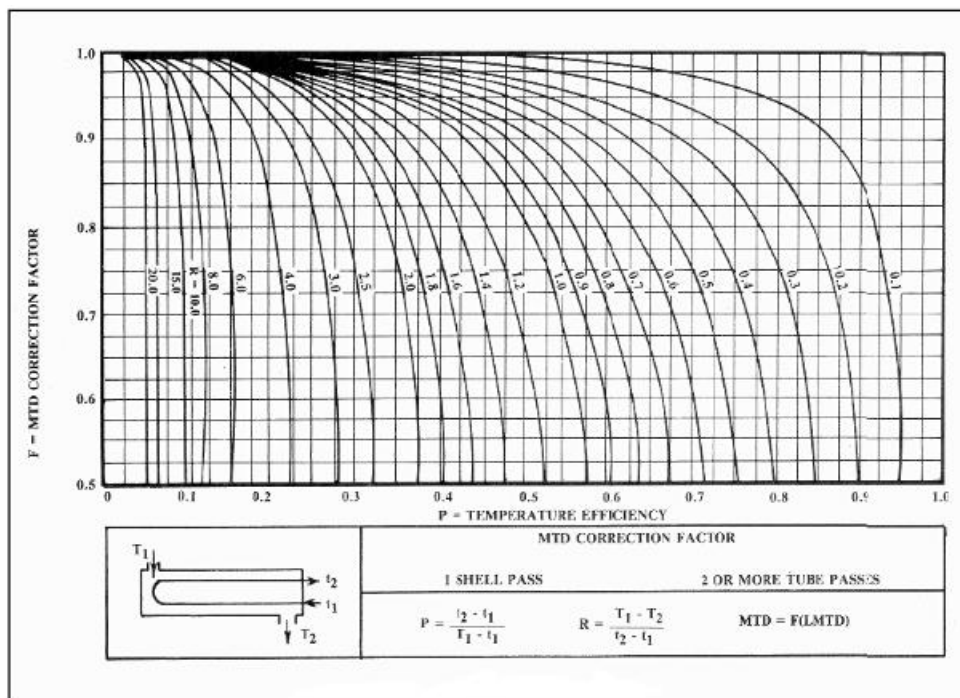
$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)} \quad \text{Equació 11.19.4}$$

$$S = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)} \quad \text{Equació 11.19.5}$$

Si  $F > 0.85$  corregir DTML i si  $F < 0.85$  augmentar el número de passos per carcassa.

La figura 11.19.4 es mostra la gràfica del mètode de Kern per a la determinació del factor F de qualsevol bescanviador que presenti un pas per carcassa i un o més passos per tub.





**Figura 11.19.3.** Valor de F per un pas per carcassa i número parell de passos per tub.

### 11.19.4.3 *Altres paràmetres de disseny*

Segons les dades de temperatura, amb el valor conegut de la calor que es vol 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 al disseny del bescanviador.

Hi ha una sèrie de paràmetres que s'han de tenir en compte durant el disseny. En treballar amb un programa s'ha de vigilar que els resultats estiguin dins dels rangs establerts segons el codi TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association), si no és així s'ha d'aconseguir un disseny correcte canviant el valor de les variables.

A continuació es mostren els rangs d'alguns paràmetres:

### **- Diàmetre de tub**

Els més comuns són de  $\frac{3}{4}$  polzades de diàmetre exterior o 1 polzada. 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. Com a excepció es pot utilitzar un diàmetre de 0,5 polzades per a tubs curts de menys de 1,2 metres de llarg.

### **- Nombre de tubs i longitud**

El nombre de tubs es varia per aconseguir una velocitat bona del fluid que circula per tubs. El rang de velocitats típiques és el següent:

Líquid per tubs: entre 1 i 2 m/s, màxim 4 m/s. Si el fluid és aigua entre 1,5 i 2,5 m/s.  
Gasos: depèn de la pressió d'operació i densitat del gas. En el rang següent, els valors més baixos corresponen a vapors de pes molecular més alt.

Buit: 50 - 80 m / s.

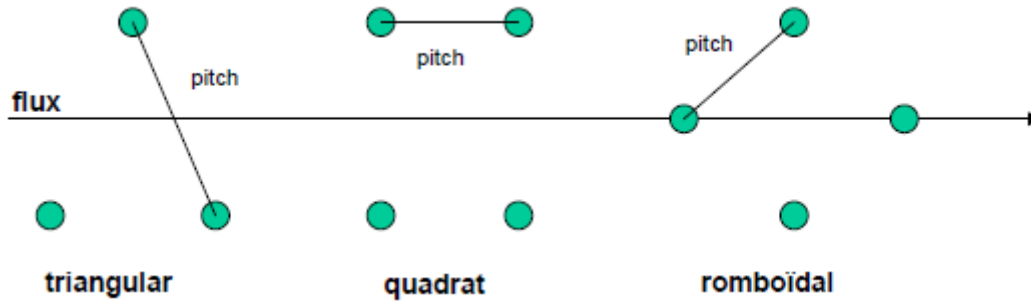
Pressió atmosfèrica: 10-30 m / s.

Alta pressió: 5 - 13 m / s

La longitud de tubs afecta a la pèrdua de càrrega, aquesta última no pot superar uns certs límits, i per tant la longitud de tubs influeix en el nombre de tubs necessaris.

### **-Disposició, espai entre tubs i Pitch**

A la figura 11.19.5 es mostra un esquema de diferents pitch:



**Figura.11.19.4.** Diferents pitch

El pitch triangular i romboïdal proporcionen altes velocitats de transferència de calor, però la pèrdua de pressió és alta.

S'ha triat un pitch quadrat perquè comporta una menor pèrdua de càrrega i per temes de manteniment és més fàcil dur a terme la neteja del costat de carcassa. Es sol utilitzar per kettle-reboilers.

$$pitch = 1.25 \cdot De \quad \text{Equació 11.19.6}$$

#### - Diàmetre de carcassa

El diàmetre de carcassa es determina segons el nombre de tubs que tenen i la velocitat a la qual es vol treballar al costat de carcassa. Normalment es millora l'eficiència en tenir el nombre màxim de tubs, ja que d'aquesta manera es maximitza la transferència de calor global.

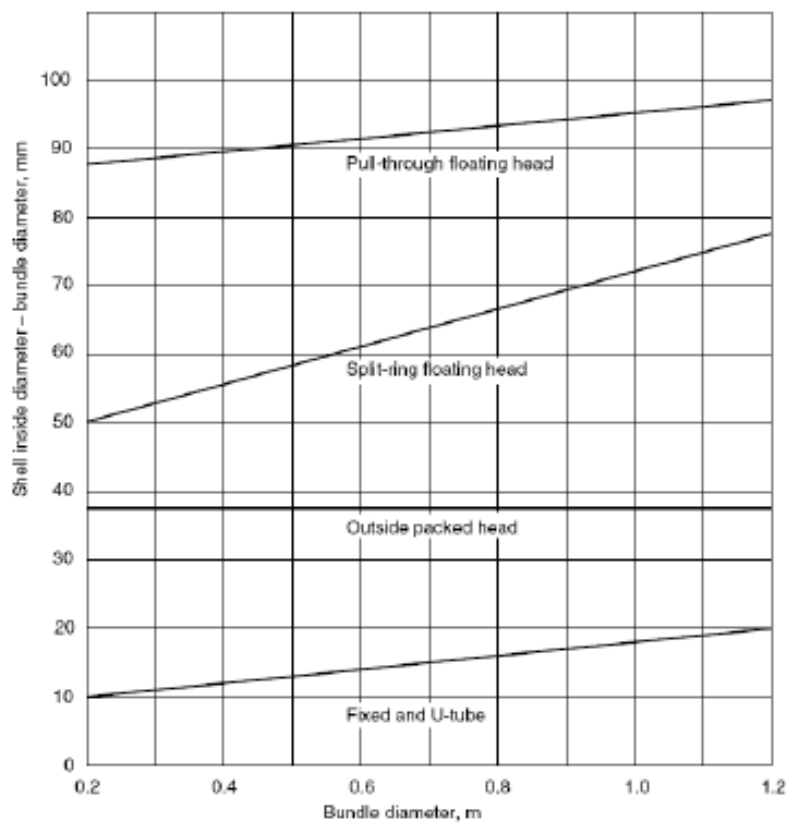
Si es segueix el mètode de Kern, per calcular el diàmetre de carcassa s'ha de sumar el diàmetre del feix de tubs i l'espai que hi ha d'haver entre el feix de tubs i la paret externa de la carcassa, que dependrà del tipus de carcassa utilitzada.

$$Db = De \cdot \left( \frac{Nt}{K1} \right)^{(1/nt)} \quad \text{Equació 11.19.7}$$

On K1 i n1 són valors tabulats en funció del número de passos, s'observen a la taula 11.19.3.

**Taula 11.199.3.** Taula de valors de  $K_1$  i  $n_1$  segons el pitch i el número de passos per tub

<i>Pitch triangular <math>p_t = 1.25 D_E</math></i>					
Passos per tub	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
<i>Pitch quadrat <math>p_t = 1.25 D_E</math></i>					
Passos per tub	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 11.19.5.** Gràfic pel càlcul del diàmetre de carcassa següent Kern

A més, hi ha una relació òptima entre la longitud de tubs i el diàmetre de carcassa, que correspon a un rang entre 4 i 10. Segons el codi TEMA el diàmetre de carcassa ha d'estar entre 0,15 i 1,5 metres.

### - Material de tubs

El material de tubs s'ha de triar tenint en compte les propietats dels fluids de procés i de refrigeració i el cost econòmic.

### - 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 com es mostra a l'equació 11.19.8.

$$Area = \frac{D_{carc} \cdot C \cdot B}{P_T} \quad \text{Equació 11.19.8}$$

On:

·  $D_{carc}$  = diàmetre de carcassa

·  $B$  = distància entre bafles

Per tant, a major distància entre bafles menor nombre de bafles a l'intercanviador i més àrea de flux transversal disponible.

S'ha de tenir cura amb la caiguda de pressió en carcassa.

Un rang de valors típics del bafle cut és de 15 a 45% respecte el diàmetre intern de la carcassa. El mètode de Kern utilitza un valor intermedi del 25 %.

### - Espai entre bafles (lb)

ha de tenir una distància mínima entre el límit exterior dels tubs i el diàmetre del deflector per prevenir l'avanç del tub a causa de vibracions generades en l'equip. La distància entre bafles normalment pren valors entre 0,2 i 1 vegades el diàmetre de la carcassa.

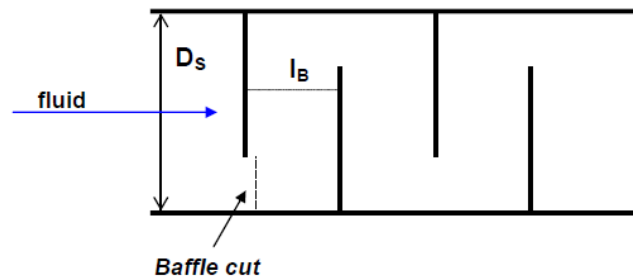
Les pantalles serveixen per generar flux turbulent i incrementar així el bescanvi de calor.

Les característiques de les pantalles venen determinades per dos paràmetres, que es fixen segons uns rangs típics:

-L'altura lliure de la pantalla (baffle cut) = 25% del diàmetre extern de carcassa

-L'espaiat entre pantalles (IB) = 0.5 el diàmetre de carcassa

Es calcula el número de pantalles com  $(L/IB)-1$ .



**Figura 11.19.6.** Baffle cut i lb

#### **11.19.4.4 Pèrdua de càrrega**

Cal comprovar que els valors de pèrdua de càrrega calculats no superin els límits. Els límits considerats són:

Líquids:  $\mu < 1 \text{ cp}$       $\Delta P < 35 \text{ kN/m}^2$

$1 \text{ cp} < \mu < 10 \text{ cp}$       $\Delta P < 50 - 70 \text{ kN/m}^2$

Gasos i vapors:

Buit elevat:  $0.4 - 0.8 \text{ kN/m}^2$

Buit mitjà:  $0.1 \text{ Pabsoluta}$

1 - 2 bar:  $0.5 \text{ pressió manomètrica}$

$>10 \text{ atm}$ :  $0.1 \text{ pressió manomètrica}$

#### **11.19.4.5 Disseny amb Aspen**

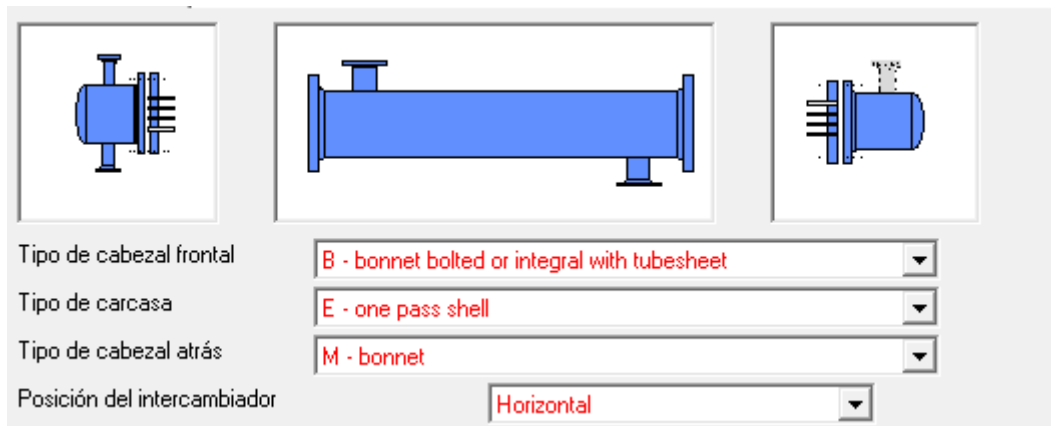
Amb el software *Exchanger Design & Rating* de Aspen és el mateix programa realitza les iteracions necessàries seleccionant la millor opció. A més del disseny optimitzat, aquest software també proporciona l'esquema de l'equip tant per carcassa com per tubs i la fitxa d'especificacions.

Prèviament els bescanviadors s'han simulat de manera senzilla amb el programa Aspen Hysys i després s'han importat al *Exchanger Design & Rating* per tal de fer un disseny més acurat d'aquests.

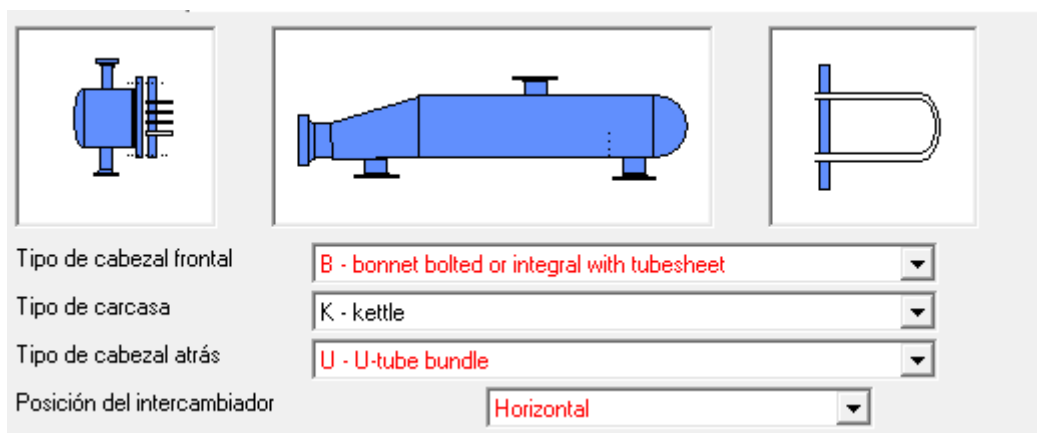
Amb el programa s'havien d'anar especificant algunes variables de disseny segons el tipus de fluid, temperatures, cabal, canvi de fase... a continuació es mostren algunes figures del programa:

	Hot Stream (1) Carcasa		Cold Stream (2) Lado-Tubos	
	Adentro	Afuera	Adentro	Afuera
Nombre de fluido	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Mass flow rate (total)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Temperatura	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Fracción masa de vapor	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Presión de operación (absoluta)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Pressure at liquid surface in column	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Calor intercambiado	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Exchanger effectiveness	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Adjust if over-specified	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Estimated pressure drop	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Caída de presión admisible	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Resist. Ensuciamiento	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

**Figura 11.19.7.** Introducció del cabal i temperatura d'entrada i sortida del fluid de procés, introducció de temperatures d'entrada i sortida o temperatura d'entrada i cabal del fluid refrigerant, introducció de la pressió de treball del bescanviador i de la resistència.



**Figura 11.19.8.** Escollir el model de carcassa i capçals del bescanviador i la posició.



**Figura 11.19.9.** Geometria del bescanviador si es tracte d'un kettle reboiler

Códigos y Normas	
Código de diseño	ASME Code Sec VIII Div 1
Clase de servicio	Normal
Clase TEMA	R - refinery service
Normas de Materiales	ASME
Normas Dimensionales	ANSI - American

Condiciones de Diseño		Lado-Tubos	Carcasa
		Lado Caliente	Lado frío
Design pressure (gauge)	bar		
Temperatura de diseño	C	37,78	37,78
Vacuum design pressure (gauge)	bar		
Test pressure (gauge)	bar		
Espesor de Corrosión	mm	3,18	3,18
Radiography		Spot	Spot

**Figura 11.19.11.** Codis utilitzats pel disseny del bescanviador i condicions de disseny



Geometry Limits				
		Increment	mínimo	máximo
Diámetro de carcasa	mm	25,4	127	2540
Longitud tubos	mm	609,6	1219,2	6096
Pasos tubos		1,2,4,6	2	8
Espacio entre deflectores	mm			
Corte de deflectores (% de diam.)				
Carcasas en serie			1	1
Carcasas en paralelo			1	10
Use pipe for shells below this diameter			609,6	mm

**Figura 11.19.10** Insertar els límits geomètrics que es vol que es compleixin

Process Limits			
		Lado	Lado frío
Velocidad mínima del fluido	m/s	0	
Velocidad máxima del fluido	m/s	100	
Target % pressure drop in nozzles		15	15
Maximum exit entrainment ratio (mass liquid/vapor) (pool boilers only)			0,02
Allow local temperature cross			Yes

**Figura 11.19.11** Insertar els límits del procés que es vol que es compleixin

Per a informació més completa, es mostren les fitxes tècniques i el disseny gràfic de cada un d'ells en l'Apartat 2.

Pel que fa a l'aïllant dels diferents bescanviadors s'han calculat amb el programa Insulan. Els resultats obtinguts es poden observar a la següent taula 11.19.4.

**Taula 11.199.2.** Característiques dels bescanviadors.

<b>Nom</b>	<b>Posició</b>	<b>T<sub>carcassa</sub> (°C)</b>	<b>Espessor aïllant (polzades)</b>	<b>Eficiència (%)</b>
H-201	Horitzontal	280	5,02	98,59
H-202	Horitzontal	240	4,47	98,37
H-203	Horitzontal	280	5,02	98,59
H-204	Horitzontal	260	4,5	98,44
H-301	Horitzontal	76	0,7	90,33
C-301	Horitzontal	0	2	100
K-301	Horitzontal	103	1,13	93,98
H-302	Horitzontal	0	2	100
H-303	Vertical	183	2,61	96,81
C-302	Horitzontal	-15	2	100
K-302	Horitzontal	236	4,0	98,26
H-401	Horitzontal	0	2	100
C-501	Horitzontal	-15	2	100
K-501	Horitzontal	254	4,31	98,38
H-501	Horitzontal	0	2	100
C-502	Horitzontal	0	2	100
K-502	Horitzontal	108	1,21	94,39
C-503	Horitzontal	0	2	100
K-503	Horitzontal	110	1,24	94,54
H-701	Horitzontal	88	1,0	93,22
C-701	Horitzontal	0	2	100
K-701	Horitzontal	86	1,0	93,23

H-702	Horitzontal	66	0,55	87,8
C-702	Horitzontal	0	2	100
H-703	Horitzontal	67	0,56	88,1
C-703	Horitzontal	0	2	100
H-704	Horitzontal	72	0,64	89,44
C-704	Horitzontal	0	2	100
C-705	Horitzontal	0	2	100
H-705	Horitzontal	86	1,0	93,23
H-801	Horitzontal	-15	2	100
H-802	Horitzontal	280	5,03	98,59
H-1201	Horitzontal	0	2	100
H-1202	Horitzontal	-15	2	100

## 11.20 Disseny de bombes

El balanç d'energia mecànica és el següent:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + g\Delta z + \frac{1}{2}\Delta\left(\frac{v^2}{\alpha}\right) = \widehat{W} - ev \quad \text{Equació 11.20.1}$$

El fregament d'un fluid contra les parets de la canonada per la qual circula provoca una caiguda de pressió en aquest. Conèixer el valor de tal caiguda és necessari pel càlcul de bombes.

Les **pèrdues de càrrega** es quantifiquen tenint en compte les pèrdues en trams rectes i en accidents. Les pèrdues de càrrega en trams rectes és deguda al fregament del fluid amb les parets de la canonada i els pèrdues de càrrega en accidents és deguda al pas dels fluids per diferents accessoris.

$$\Sigma F = \Sigma F_{tram recte} + \Sigma F_{accidents} \quad \text{Equació 11.20.2}$$

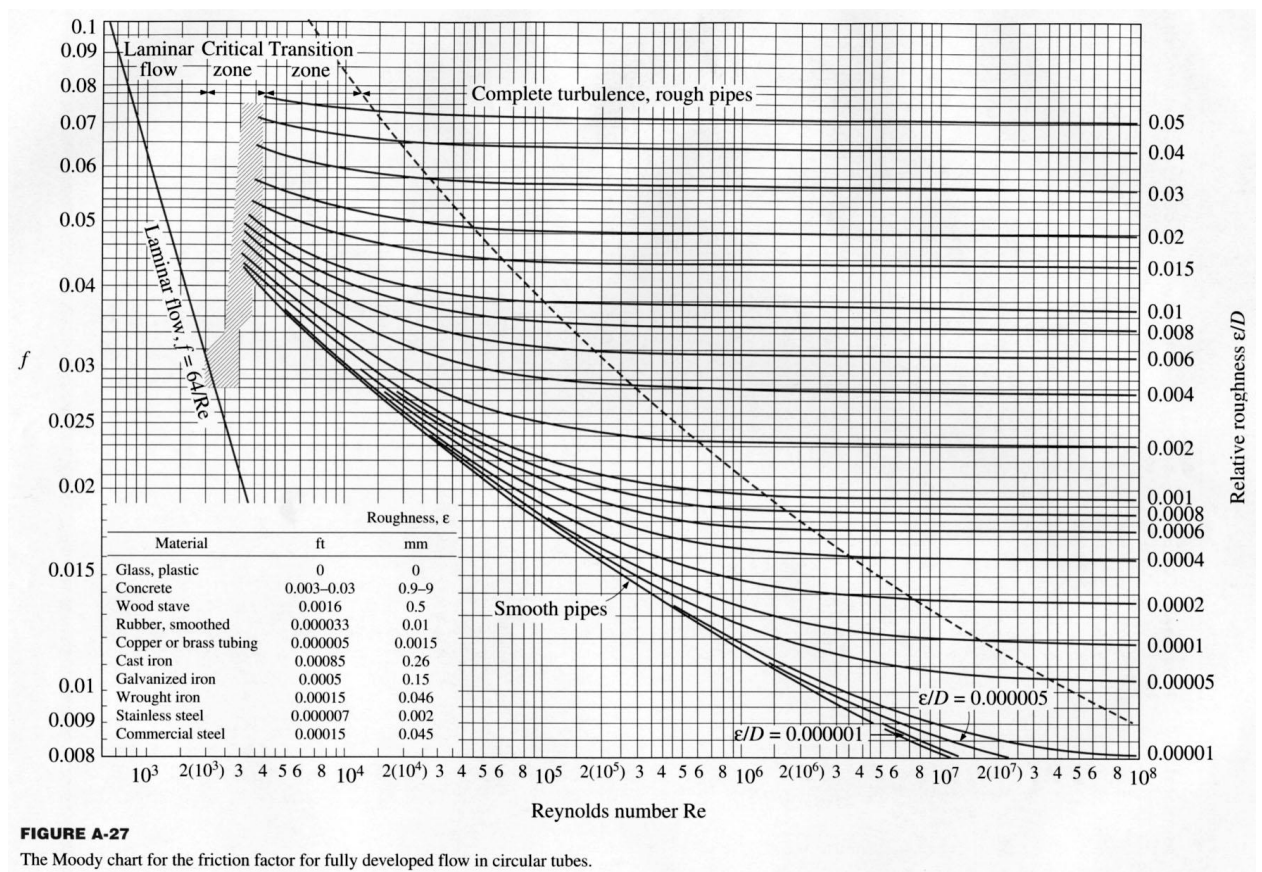
Les pèrdues de càrrega en trams rectes es calculen a partir de l'equació de Fanning.

$$\Sigma F_{tram recte} = 2 \cdot f \cdot \frac{L}{D} \cdot v^2 \quad \text{Equació 11.20.3}$$

On,

- $f$  = factor de fricció de Fanning (veure gràfica adjunta)
- $L$  = longitud de la canonada, m
- $D$  = diàmetre de canonada, m
- $v$  = velocitat del fluid, m/s

Per determinar el factor de fricció de Fanning, s'empra la gràfica de Moody. Prèviament s'ha de calcular el Reynolds i la rugositat típica del material canonada.



**FIGURE A-27**  
The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular tubes.

**Figura 11.20.1.** Relació entre el Reynolds i el valor de  $f$ .

El Reynolds es calcula coneixent les propietats del fluid

$$Re = \frac{D \cdot \rho \cdot v}{\mu} \quad \text{Equació 11.20.4}$$

On,

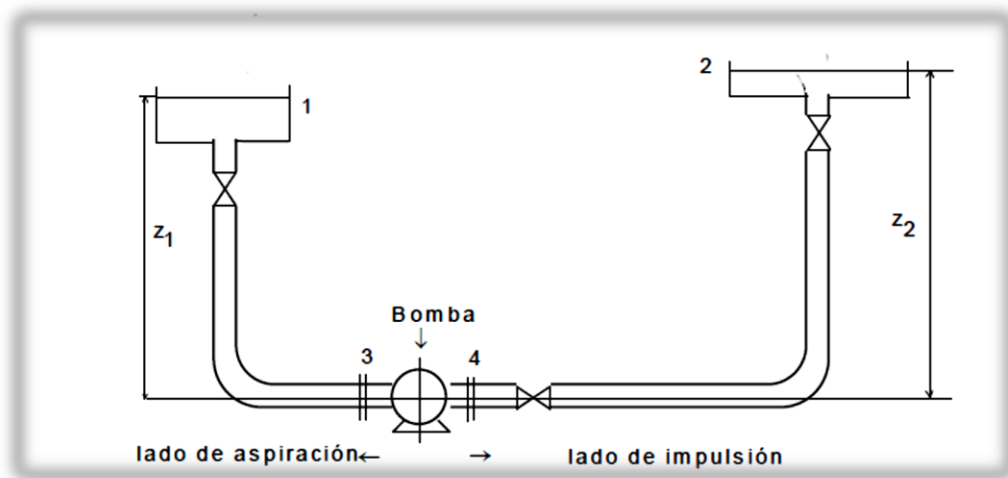
- D = diàmetre de la canonada, m
- $\rho$  = densitat del fluid, Kg/m<sup>3</sup>
- v = velocitat de pas, m/s
- $\mu$  = viscositat del fluid, Kg/m<sup>3</sup>

La **pèrdua de càrrega deguda a accidents** és deguda al pas del fluid pels diferents accessoris. Per aquesta raó, és difícil de quantificar de manera acurada. S'ha optat per aproximar les pèrdues de càrrega degudes a accidents com un 30% a les degudes en trams rectes.

$$\Sigma F_{accidents} = 0.3 \cdot \Sigma F_{tram rectes} \quad \text{Equació 11.20.5}$$

També s'ha d'assegurar que el diàmetre de canonada sigui tal que no provoqui que aquesta pèrdua de càrrega sigui molt elevada. Si no hi ha energia de pressió ni alçada suficient per compensar les pèrdues de fregament, s'ha d'emprar una bomba.

Suposem un sistema com el següent:



**Figura 11.20.1.** Exemple de circulació de fluids entre dos tancs units per una bomba

La **càrrega d'aspiració** és el valor de l'energia expressada en metres que té el fluid a l'arribar a la boca d'aspiració de la bomba.

$$h_a = \frac{1}{g} \cdot \left( \frac{P_3}{\rho} + \frac{v_3^2}{2 \cdot \alpha} \right) = (z_1 - z_3) + \frac{1}{g} \cdot \left( \frac{v_1^2}{2 \cdot \alpha} + \frac{P_1}{\rho} - ev_a \right) \quad \text{Equació 11.20.6}$$

La **càrrega d'impulsió** és l'energia expressada en metres que té el fluid a la sortida de la bomba.

$$h_i = \frac{1}{g} \cdot \left( \frac{P_4}{\rho} + \frac{v_4^2}{2 \cdot \alpha} \right) = (z_2 - z_4) + \frac{1}{g} \cdot \left( \frac{v_2^2}{2 \cdot \alpha} + \frac{P_2}{\rho} + ev_{imp} \right) \quad \text{Equació 11.20.7}$$

On,

·g = acceleració de la gravetat, el seu valor es de 9,81 m/s<sup>2</sup>

·z<sub>i</sub> = alçada del punt i del sistema, m

·v<sub>i</sub> = velocitat mitjana del fluid en la conducció al punt i, m/s

·α = coeficient adimensional de valor 0,5 en règim laminar i 1,0 en règim turbulent.

·P<sub>i</sub> = pressió absoluta en el punt i del sistema, Pa=N/m<sup>2</sup>

·ρ = densitat del fluid ( kg/m<sup>3</sup>)

També s'ha de tenir en compte que hi ha d'haver una quantitat mínima de fluid que circuli per la bomba per tal de no malmetre aquesta. Si la pressió és menor que la pressió de vapor del fluid, aquest es pot vaporitzar parcialment causant cavitacions i danys a la bomba. Això s'evita procurant que hi hagi un NPSH suficient.

La **càrrega neta positiva d'aspiració (NPSH) requerida** depèn del disseny de la bomba i representa l'energia necessària per omplir la part d'aspiració i vèncer la pèrdua de càrrega per fregaments. És un valor que ha de subministrar el fabricant de la bomba ja que depèn plenament d'aquesta.

La **càrrega neta positiva d'aspiració (NPSH) disponible** és l'energia expressada en metres que pot perdre el líquid abans d'arribar al punt d'aspiració de la bomba. Ha de

ser el més gran possible pe evitar que la pressió sigui menor que la pressió de vapor del líquid i poder evitar la cavitació.

Sempre s'ha de complir que  $NPSH_{disponible} > NPSH_{requerit}$

$$NPSH_{disponible} = h_a - \frac{P_v}{\rho \cdot g} \quad \text{Equació 11.20.8}$$

On,

- $h_a$  = càrrega d'aspiració, m
- $P_v$  = pressió de vapor, Pa= N/m<sup>2</sup>
- $\rho$  = densitat del fluid, Kg/m<sup>3</sup>
- $\mu$  = viscositat del fluid expressada, Kg/m·s

El terme  $\frac{P_v}{\rho \cdot g}$  representa la pressió necessària per mantenir-se líquid.

### Potència total de la bomba

Per tal de determinar la potència de la bomba, cal saber el valor de la càrrega total que ha de subministrar la bomba. Aquesta serà la diferència entre la càrrega d'impulsió i d'aspiració.

$$h = h_i - h_a \quad \text{Equació 11.20.9}$$

$$h = \frac{\widehat{W}}{g} \quad \text{Equació 11.20.10}$$

$$P_{teòrica} = \widehat{W} \cdot m \quad \text{Equació 11.20.11}$$

On,

- $h$  = càrrega total del sistema, m
- $P$  = potència de la bomba, W
- $\widehat{W}$  = treball per unitat de massa, J/Kg
- $m$  = cabal màssic Kg/s

S'ha de tenir en compte que la bomba té una eficiència ja que no tota l'energia és transferida a la impulsió, sinó que part d'aquesta es dissipa en forma de calor. S'ha optat per prendre un valor de rendiment del 65%.

$$P_{real} = \frac{P_{teòrica}}{\eta} \quad \text{Equació 11.20.12}$$

On,

·  $\eta$  =eficàcia de la bomba

### 11.21 Disseny de compressors

Per a la impulsió de gasos, s'escollirà l'equip en funció de la pressió de sortida que es desitgi. Com més es comprimeixi el gas, més s'escalfarà.

La potència necessària és la següent,

$$\hat{W} = \int_{P_1}^{P_2} v \, dP \quad \text{Equació 11.20.13}$$

On,

· P = pressió.

· v = viscositat cinemàtica.

El seu càlcul variarà en cada cas.

Definint,

$$r = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{Equació 11.20.14}$$

On,

· r = raó de compressió.

·  $P_2$  = pressió de sortida.

·  $P_1$  = pressió d'entrada.

S'empraran els següents equips segons s'esculli en cada cas:

- **Ventiladors:** per cabals elevats i baixes pressions



$$\frac{P_2}{P_1} < 1,2 \text{ atm} \quad \text{Equació 11.20.15}$$

Suposant que la densitat és constant ja que la raó de pressions és aproximadament la unitat,

$$\widehat{W} = \int_{P_1}^{P_2} v \, dP = \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{\rho} = \frac{\Delta P}{\rho} \quad \text{Equació 11.20.16}$$

$$W = m \cdot \frac{\Delta P}{\rho} = Ql \cdot \Delta P \quad \text{Equació 11.20.17}$$

- **Bufadors:** per pressions i cabals entremetjats

$$1,2 \text{ atm} < \frac{P_2}{P_1} < 3 \text{ atm} \quad \text{Equació 11.20.18}$$

Tenint en compte que la densitat no és constant,

$$P \cdot v = \frac{zRT}{M} \quad \text{Equació 11.20.19}$$

$$\widehat{W} = \frac{zRT}{M} \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} = \frac{zRT}{M} \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} \quad \text{Equació 11.20.20}$$

Sabent que  $P \cdot v$  és constant,

$$\widehat{W} = P_1 \cdot v_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} \quad \text{Equació 11.20.21}$$

On,

- $z$  = factor de compressibilitat.
- $M$  = pes molecular.

- **Compressors:** per altes pressions

$$\frac{P_2}{P_1} > 3 \text{ atm}$$

Equació 11.20.22

$$W = \left( \frac{\gamma}{(\gamma - 1)} \right) \cdot \left( \frac{z \cdot R \cdot T}{PM} \right) \cdot \left( \frac{P_2^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{P_1} - 1 \right)$$

Equació 11.20.23

On,

- W = potència del compressor, KJ/Kg.
- $\gamma$  = eficàcia de compressió, Cp/Cv.
- z = factor de compressibilitat.
- R = constant dels gasos ideals
- PM = pes molecular, Kg/Kmol
- $P_2/P_1$  = raó de compressió

La potència real del compressor serà

$$P = \frac{W \cdot m}{\eta}$$

Equació 11.20.24

On,

- W = potència del compressor, KJ/Kg.
- m = és el cabal màssic, Kg/s.
- $\eta$  = eficàcia del compressor

L'augment de la temperatura es calcula mitjançant la següent expressió

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Equació 11.20.25

On,

- $T_2$  = temperatura de sortida
- $T_1$  = temperatura d'entrada.

## 11.22 Serveis

### 11.22.1 Caldera d'oli tèrmic

La caldera d'oli tèrmic s'utilitza per a tota la planta ja que el fluid escollit com a refrigerant d'uns equips i com a calefactor d'altres equips és el mateix.

L'oli tèrmic que s'utilitza en la planta és de l'empresa DOW Chemical, en concret "DOWTHERM Q" que permet un rang de treball de -35°C a 330°C.

El fluid de transferència tèrmica DOWTHERM Q, conte blenda de difeniletà i aromàtics alquilats. Aquest tipus de fluid exhibeix una estabilitat tèrmica elevada i una millora de bombabilitat a temperatura més baixa.

A més aquest fluid no es corrosiu respecte als metalls i aliatges comuns. Inclús a altes temperatures el equip presenta normalment una excel·lent vida útil.

**Taula 11.22.1.** Propietats típiques del líquid de DOWTHERM Q

#### **Las Propiedades típicas del Líquido de DOWTHERM Q**

Composición: Blenda de Difeniletano e Aromáticos Alquilados<sup>†</sup>

Color: Claro a Leve Amarillo

<b>Propiedad</b>	<b>Unidades SI</b>	<b>Sistema Inglés</b>
Rango de Temperatura	-35° to 330°C	-30 to 625°F
Punto de Ebullición Atmosférico (con Reflujo)	267°C	513°F
Punto de Inflamación <sup>1</sup>	120°C	249°F
Punto de Fuego <sup>2</sup>	124°C	255°F
Temperatura de Autoignición <sup>3</sup>	412°C	773°F
Coefficiente de Filme, W/m <sup>2</sup> .K (Btu/hr.ft <sup>2</sup> .°F) <sup>4</sup>	295	563
Límites de Flamabilidad de Vapor en el Aire		
Límite Superior, 5.5 Vol. % en el Aire	190°C	375°F
Límite Inferior, 0.55 Vol. % en el Aire	135°C	275°F
Temperatura Crítica Estimada	489°C	912°F
Presión Crítica Estimada	24 bar	23.7 atm
Volumen Crítico Estimado	3.258 L/kg	0.0522 ft <sup>3</sup> /lb
Peso Molecular (promedio)		190

Per tant, en aquest apartat s'analitza les temperatures d'entrada i sortida dels equips que utilitzen l'oli tèrmic.

Per fer el disseny de la caldera d'oli tèrmic i poder dimensionar-la cal saber prèviament la quantitat de cabal amb el qual es treballa.

**Taula 11.22.2.** Dades dels cabals i temperatures del servi de caldera

Referència	Cabal (Kg/s)	T <sub>0</sub> (°C)	T (°C)	C <sub>p</sub> (KJ/Kg °C)
H-201	1,34	280	269,301	2,444
H-202	0,56	280	269,301	2,444
H-203	0,59	280	269,301	2,444
K-301	10,05	280	269,301	2,444
K-302	2,55	280	269,301	2,444
K-501	21,75	280	269,301	2,444
K-502	4,26	280	269,301	2,444
K-503	24,81	280	269,301	2,444
R-401	2,18	280	269,301	2,444
K-701	18,77	280	269,301	2,444
H-702	6,00	280	269,301	2,444
H-703	5,53	280	269,301	2,444
H-704	2,65	280	269,301	2,444
H-705	2,69	280	269,301	2,444
H-802	0,88	280	269,301	2,444
H-1501	1,27	280	269,301	2,444
H-1505	6,16	280	269,301	2,444
<b>Cabal Total (Kg/s)</b>	<b>112,02</b>			

Cal remarcar que els bescanviadors H-1503 (A-200) i H-1505 (A-600) són dos bescanviadors especial per posar el oli de entrada al reactor, R-201 i al R-601 a la temperatura adequada que s'estableix en el balanç d'energia des reactors.

Un cop es sap el valor del cabal de servei d'oli tèrmic es pot calcular la seva potència per tal de poder escollir una caldera comercial que sigui capaç de proporcionar-nos-el.

El càlcul de la potencia de la caldera ve determinar per la següent equació:

$$Q = M_t \cdot C_{p0} \cdot (T_s - T_0) \quad \text{Equació 11.22.1}$$

on:

Q és la potencia necessària per subministrar a la caldera (KW)

M<sub>t</sub> és el cabal màssic d'oli tèrmic (Kg/s)

C<sub>p0</sub> és la capacitat calorífica del amoníac a T= -20°C

$T_s$  és temperatura de sortida del oli tèrmic (°C)

$T_0$  és temperatura d'entrada del oli tèrmic (°C)

**Taula 11.22.3**Dades i resultat del càlcul de la potència de la caldera

<b><math>M_t</math> (Kg/s)</b>	112,02
<b><math>C_{p0}</math> (KJ/Kg °C)</b>	2,44
<b><math>T_s</math> (°C)</b>	280
<b><math>T_0</math> (°C)</b>	267
<b>Q (KW)</b>	3558,94

Per tal de subministrar la potència requerida s'escull com a caldera d'oli tèrmica sèrie EPC-H tipus 4000.

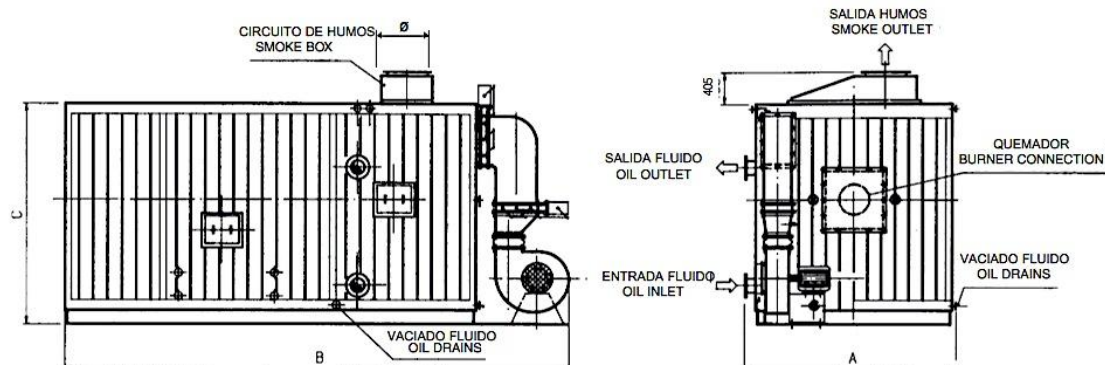
### Calderas de aceite térmico – serie EPC-H

serie EPC-H desde 2.000.000 hasta 12.000.000 kcal/h (2.326 hasta 13.953 kW)

Tipos	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	10000	12000
Capacidad neta (kW)	2.326	3.488	4.651	5.814	6.977	8.140	9.302	11.628	13.953
Contenido de aceite (L)	1.060	1.250	1.700	1.950	2.250	3.650	4.400	5.500	6.600

**Figura 11.22.1.** Calderes de la series EPC-H

Per tenir un idea de com es la caldera d'aquesta gamma, es mostra una figura que facilita el fabricant.



**Figura 11.22.2.** Esquema de la Calderes de la series EPC-H

A continuació es mostra una taula amb les característiques principals de les calderes de la gamma EPC-H donades per al fabricant.

**Taula 11.22.4.** Característiques de les Calderes de la gamma EPC-H

Carcterísticas - Characteristics										
EPC - H	mod.	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	10000	12000
Potencia térmica Net capacity	kCal/hx1000 kw.	2000 2326	3000 3488	4000 4651	5000 5814	6000 6977	7000 8140	8000 9302	10000 11628	12000 13953
Peso en vacío Empty weight	kg.	9000	13000	15000	17000	21000	23000	24000	30000	34000
Contenido de fluido Oil content	l.	1060	1250	1700	1950	2250	3650	4400	5500	6600
Caudal fluido Circulated oil	mc/h.	120	150	200	222	240	280	320	400	400
$\Delta T$ . fluido $\Delta T$ . oil	°C	33	40	40	45	50	50	50	50	60
$\Delta P$ . fluido $\Delta P$ . oil	m.c.l.	11	18	19	20	19	18	21	26	25
Ancho- Width <b>A</b>	mm.	2368	2472	2668	2768	3096	3268	3268	3668	3668
Largo- Lenght <b>B</b>	mm.	5744	6557	6921	7191	7391	8450	9058	9595	9595
Alto- Eight <b>C</b>	mm.	2413	2543	2795	2901	3216	3462	3512	3797	4091
Ø Chimenea - Chimney	mm.	350	400	500	550	600	700	700	800	900
Conexión fluido In-out oil	DN. PN.	125 16	125 16	200 16	200 16	200 16	200 16	250 16	250 16	250 16

**Características principales:**



- ▶ **Caldera multi-tubular horizontal con alta eficiencia.**
- ▶ Construcción tubular con baterías paralelas de tubos conectadas al caudal y cabezales de retorno para dar la temperatura óptima de distribución de transferencia.
- ▶ Cámara de combustión rodeada por baterías de tubo fijadas tangencialmente.
- ▶ Grandes superficies de intercambio con precalentador de aire de combustión integral ⇨ **alta eficiencia térmica del 92%**.
- ▶ Refractarios reducidos al mínimo.
- ▶ Completo quemador integral, panel de control, controles de sistema y equipo de seguridad **preparado para la conexión** al sistema de combustible, circuitos de potencia agotados e inestables.
- ▶ **Quemador BABCOCK WANSON:** con vapor o atomización de aire comprimido para pesados tipos de combustibles líquidos.
- ▶ **Todos los quemadores:** para gas natural, combustibles obligados líquidos o mixtos que cumplen con las Normas Europeas.
- ▶ Niveles de emisiones según las regulaciones Europeas.

**Figura 11.22.3.** Característiques de les Calderes de la gamma EPC-H

A continuació es calcula el número de calderes necessàries:

$$N^{\circ} \text{ calderes} = \frac{Q}{Q_{\text{caldera}}} \quad \text{Equació 11.22.2}$$

on:

Q és la potència necessària per subministrar a la caldera

$Q_{\text{caldera}}$  és la potència de la caldera seleccionada del catàleg

**Taula 11.22.5** Resultats del càlcul del número de calderes

<b>P<sub>calculat</sub></b>	3558,94
<b>P<sub>caldera</sub></b>	4651
<b>n<sup>o</sup> calderes</b>	1

Es recomana que les calderes no treballin més del 80% de la seva capacitat per tant es recalcula la potència a la qual treballa les calderes de la planta:

$$W(\%) = \frac{Q}{N_C} \cdot 100 = 76,5 \quad \text{Equació 11.22.3}$$

Amb una caldera, amb la potència 4651 KW, estaríem treballant a W (%) de 76,5, però per raons de seguretat, es pren la decisió de instal·lar dos calderes en la planta, per assegurar que en cas que una s'espalli poder continuar servint el oli tèrmic necessari a la planta sense tenir que parar-la.

De forma operacional, per tal de tenir l'assegurança que les dos calderes funcionen correctament, s'aniran alternant, es a dir, cada mes o cada dos mesos es parerà la caldera que esta en funcionament i es posarà en marxa la que es troba en repòs.

Ara es calcula les necessitats energètiques de la caldera. El combustible que s'utilitza es el gas natural.

$$Q_{\text{Gas}} = \frac{Q}{\text{PCI} \cdot \varphi} \quad \text{Equació 11.22.4}$$

on:

PCI és el PCI del gas natural ( 41800 KJ/m<sup>3</sup>)

$\varphi$  és la eficiència

Q és la potència

**Taula 11.22.6.** Dades i resultats del càlcul del cabal de combustible necessari total per les dues calderes

<b>P (KW)</b>	3558,94
<b>PCI (KJ/m<sup>3</sup>)</b>	41800
<b>Eficiència</b>	0,8
<b>Q gas(m<sup>3</sup>/h)</b>	383,13

A continuació es mostra un exemple de com aniria una instal·lació d'oli tèrmic DOWTHERM Q:



Figura 11.22.4. Exemple d'instal·lació

**Instrument Legend**

- BA - Burner Alarm
- BC - Burner Control
- BE - Burner Element (Fire-Eye)
- FI - Flow Indicator (Orifice)
- FRC - Flow Recording Controller
- FSL - Flow Switch Low
- LA<sup>H/L</sup> - Level Alarm-High/Low
- LI - Level Indicator
- LC - Level Controller
- LSL - Level Switch Low
- PCV - Pressure Control Valve
- PI - Pressure Indicator
- PIC - Pressure Indicating Controller
- PRV - Pressure Relief Valve
- PSH - Pressure Switch High

- PSL - Pressure Switch Low
- TIC - Temperature Indicating Controller
- TRC - Temperature Recorder Controller
- TSH - Temperature Switch High
- Principal Circuits with DOWTHERM Fluid
- - - Electrical Lines
- /// Instrument Air Lines

- (A) - External heating required if fluid pumpability is limiting in cold weather.
- (B) - Heat exchanger #2 is cooled with DOWTHERM Q Fluid to avoid any possibility of contaminating the process fluid with water in the event of a tube leak.
- (C) - Process fluid freezes at 100°F (81°C).

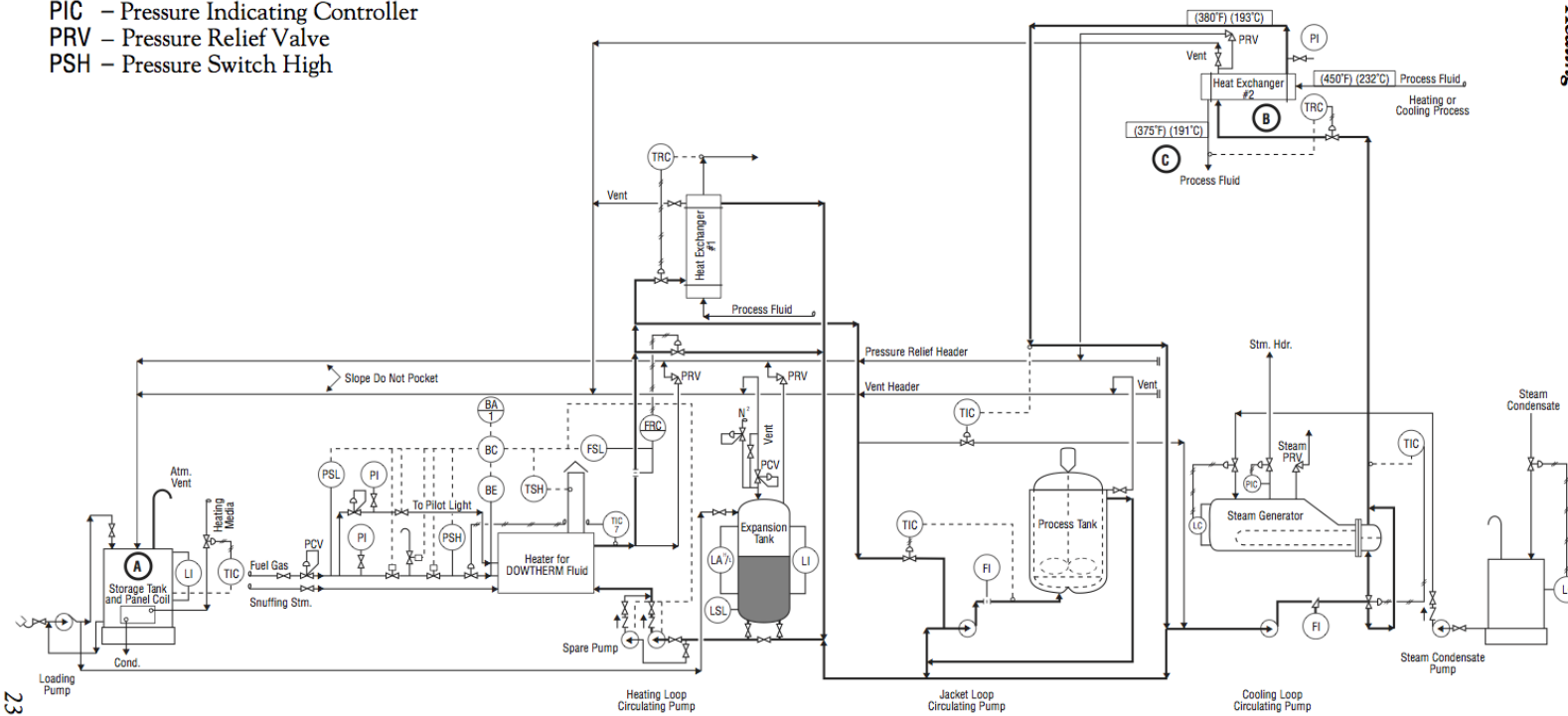
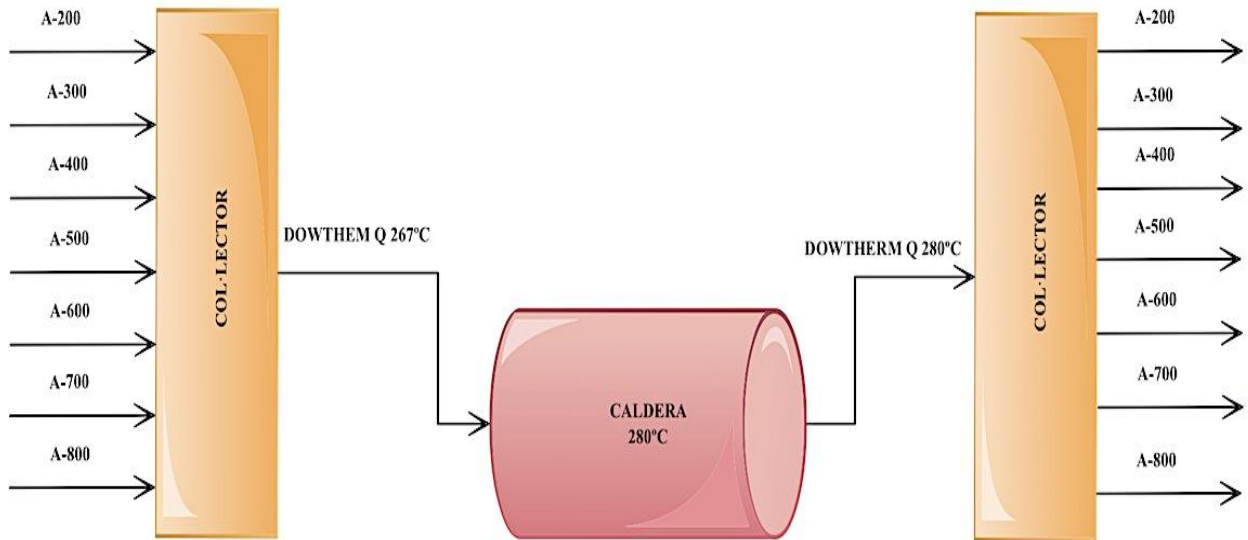


Figure 19 — Typical Liquid Phase Heating Scheme Using DOWTHERM Fluids

A continuació es mostra un esquema de com aniria connectada la caldera als diferents col·lectors de l'àrea de serveis, el de entrada i el de sortida d'oli.



**Figura 11.22.5.** Exemple d'instal·lació de la caldera amb els col·lectors de sortida i entrada del oli.

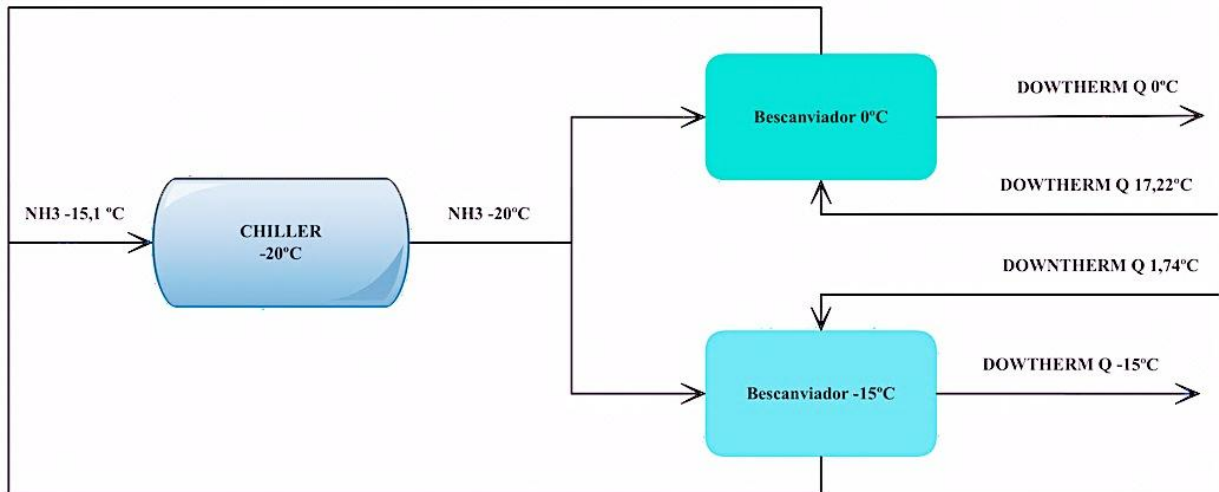
### 11.22.2 Chiller

El fluid refrigerant que s'utilitza en planta per refredar els equips que ho necessitin és el mateix fluid tèrmic que s'utilitza en la caldera, és el DOWTHERM Q, ja que ens permet treballar fins a  $-35^{\circ}\text{C}$ . La temperatura més baixa requerida en el procés es de  $-15^{\circ}\text{C}$ , per tant, s'entra dintre del rang de temperatures del fluid tèrmic.

Per tal de poder refredar aquest oli tèrmic fins a  $-15^{\circ}\text{C}$  es necessita que el chiller treballi com a mínim a  $-20^{\circ}\text{C}$ , per tal que compleixi aquesta condició s'escull con a fluid del chiller l'amoníac.

A més cal tenir en compte, que el DOWTHERM Q no té cap derivat del glycol sinó és una mescla de blenda de difeniletà i aromàtics alquilats, així per raons de seguretat es fa que el refredament entre l'amoníac i el fluid tèrmic es doni en un circuit extern al chiller, mitjançant bescanviadors.

En planta es refrigera els equips a dos temperatures diferents, una es l'anomenada anteriorment,  $-15^{\circ}\text{C}$  i l'altra es a  $0^{\circ}\text{C}$ . Per tant, la descripció del procés és la que es mostra en la Figura 11.22.6.



**Figura 11.22.6.** Esquema del funcionament del servei del chiller i dels dos bescanviadors

Per poder dimensionar el chiller és necessari conèixer el cabal d'amoníac que es necessita.

Per això primer es calcula el cabal de tot el fluid tèrmic que s'ha de refredar, es a dir, els cabals totals que entren als dos bescanviadors externs del chiller.

**Taula 11.22.7** Equips que treballen a un temperatura de -15°C i els seus respectius cabals

<b>Bescanviador T= -15°C</b>	
<b>Referència</b>	<b>Cabal (kg/s)</b>
C-301	2,235
C-302	3,388
H-303	3,76
C-501	5,672
H-801	1,546
H-1504	2,856
H-1506	6,268
<b>Cabal Total (Kg/s)</b>	<b>25,725</b>

Cal remarcar que els bescanviadors H-1504 (A-200) i H-1506 (A-600) són dos bescanviadors especials per posar el oli a la sortida, R-201 i al R-601 per modificar la temperatura del oli.

**Taula 11.22.8** Equips que treballen a un temperatura de 0°C i els seus respectius cabals

<b>Bescanviador T=0°C</b>	
<b>Referència</b>	<b>Cabal (kg/s)</b>
H-204	1,354
H-301	17,082
H-302	1,630

H-401	32,470
H-501	9,710
C-502	3,986
C-503	12,738
C-701	17,082
H-701	4,989
C-702	2,986
C-703	6,451
C-704	0,350
C-705	5,929
R-201	0,498
R-601	2,731
<b>Cabal Total (Kg/s)</b>	<b>119,986</b>

Un cop que es té els cabals totals per a cadascuna de les temperatures fixades, ja sigui la de  $-15^{\circ}\text{C}$  o la  $0^{\circ}\text{C}$ , es passa al càlcul del disseny dels dos bescanviadors externs al chiller. Aquest disseny ens donarà com a resultat el cabal total d'amoníac necessari amb el qual a treballar el chiller.

A continuació es mostra en la Taula 11.22.9 els cabals d'amoníac necessaris per a refredar el fluid tèrmic provinent del procés.

**Taula 11.22.9.** Cabal d'amoníac utilitzat al chiller

<b>Referència</b>	<b>Cabal NH3 (kg/s)</b>
H-1501	241,4
H-1502	60
<b>Cabal NH3 (kg/s) total</b>	<b>301,7</b>

Un cop es sap el valor del cabal de servei de l'amoníac es pot calcular la seva potència per tal de poder escollir una caldera comercial que sigui capaç de proporcionar-nos-lo.

El càlcul de la potència del chiller en frigories ve determinar per la següent equació:

$$Q = M_t \cdot C_{p0} \cdot (T_s - T_0) \quad \text{Equació 11.22.5}$$

on:

Q és la potència en frigories necessària per subministrar a la chiller (KW)

$M_t$  és el cabal màssic d'amoníac al chiller (Kg/s)

$C_{p0}$  és la capacitat calorífica del amoníac a  $T = -20^{\circ}\text{C}$

$T_s$  és la temperatura del amoníac que surt del chiller ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_0$  és la temperatura del amoníac que entra al chiller (°C)

**Taula 11.22.10** Dades i resultat del càlcul de les frigories del chiller

$M_t$ (Kg/s)	301,7
$C_{p0}$ (KJ/Kg °C)	1,96
$T_s$ (°C)	-15,06
$T_0$ (°C)	-20
$Q$ (KW)	2918,22

Per tal de subministrar la potencia requerida s'escull com a chiller Reynold Amonia chillers.



60 kW to 3200 kW, +30°C to -40°C

**Figura 11.22.7.** Reynold Amonia chiller

Aquest tipus de chillers permeten treballar en un rang de potencia de 60KW fins a 3200 KW i amb un rang de temperatura de 30 a -40°C. Tenen la característica de ser compactes i muntat sobre patins i són utilitzables per a un ampli rang de temperatures , des de mitjanes a aplicacions de baixa temperatura de refrigeració de procés , com en la indústria farmacèutica, química, de productes lactis, processament d'aliments, begudes, emmagatzematge en fred, fabricació de gel, gasos industrials, així com el medi aplicació de temperatura com HVAC, plàstics, refrigeració de formigó, etc.

A continuació es calcula el número de calderes necessàries:

$$N^{\circ} \text{ chiller} = \frac{Q}{Q_{\text{chiller}}} \quad \text{Equació 11.22.6}$$

on:

$Q$  és la potència necessària per subministrar a la chiller

$Q_{\text{chiller}}$  és la potència de la chiller seleccionada del catàleg

**Taula 11.22.11** Resultats del càlcul del número de chiller

<b>Q calculat (KW)</b>	3010,11
<b>Q chiller (KW)</b>	3200
<b>Nº chiller</b>	1

Es calcula en percentatge la potencia a la que el chiller treballa:

$$W(\%) = \frac{Q}{Q_c} \cdot 100 = 91,19 \quad \text{Equació 11.22.7}$$

Amb un chiller, amb la potencia 3200 KW, estariem treballant a W (%) de 91,14, en aquest cas també es pren la dedició de instal·lar dos chillers en l'àrea de serveis, perquè així en cas que es s'espallí un es podria continuar treballant en planta sense cap mena de problema.

De forma operacional, per tal de tenir l'assegurança que els dos chillers funcionen correctament, s'aniran alternant, es a dir, cada mes o cada dos mesos es parará el chiller que esta en funcionament i es posará en marxa el que es troba en repòs.

### **11.22.3 Nitrogen per al blanketting**

El nitrogen per la blanketting s'utilitza per mantindre la pressió dintre de les sitges i dels tancs d'emmagatzematge. Les zones a les quals es fa el blanketting són a l'àrea A-100, als tancs d'emmagatzematge TE-101 i TE-102, i l'àrea A-800 a TP-801 i TP-802.

Es necessita 1,335 Kg/h de nitrogen per mantenir la pressió en els tancs d'emmagatzematge, TE-101 i TE-102, com a mínim per a 10 dies, es necessita 320,58 Kg de nitrogen.

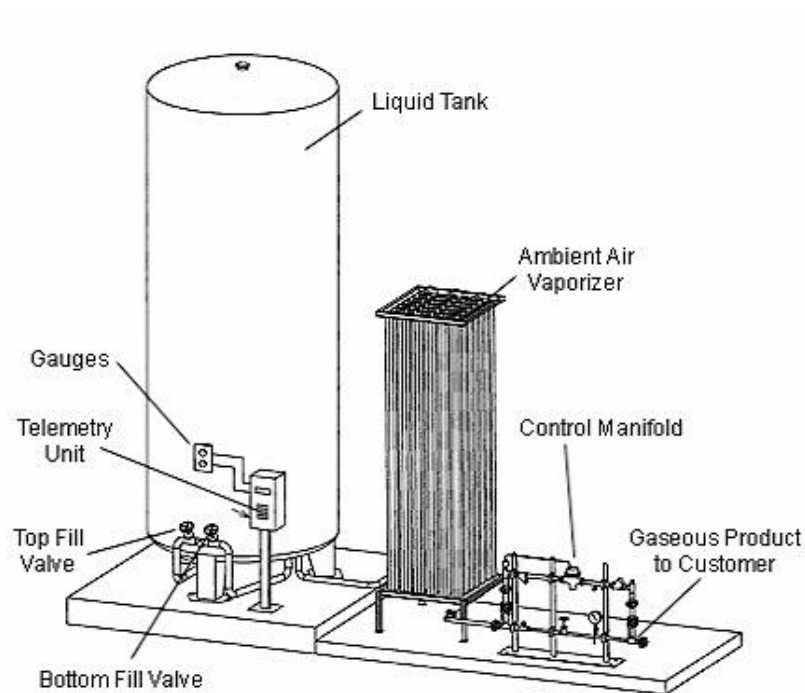
Mentre que per als TP-801 i TP-802 es necessiten 24,5 m<sup>3</sup> de N<sub>2</sub> per a cadascun que són 61,27 Kg de nitrogen. Aquesta quantitat de nitrogen es mantindrà constant dintre d'aquests tancs, ja que aquests dos tancs pulmons estan per seguretat de la planta però no s'utilitzen en el procés de fabricació del Carbaril.

En total es necessiten 381,86 Kg de nitrogen, per la posada en marxa de la planta, mentre que quan la planta es trobi en operació només faran falta 320,58 Kg de nitrogen.

Per tal de disposar del nitrogen necessari es contracta l'empresa de "Carburos metàlics" aquesta disposa d'una planta de dipòsits criogènics estàtics que permeten la instal·lació tipus per Nitrogen, Oxigen, Argó i Diòxid de Carboni líquids.

Un procediment d'arribada del nitrogen a la planta es que l'empresa de "Carburos metàlics" ens el faci arribar mitjançant una canonada o un camió cisterna vaporitzant el gas ja que el gas es troba emmagatzemat en forma líquida i a baixa temperatura.

Per aplicacions criogèniques que requereixen el subministrament del líquid a baixa temperatures llavors el líquid es pot obtenir de tancs de emmagatzematge i el subministrament al procés a través de les canonades aïllades.



**Figura 11.22.8.** Sistema típic d'emmagatzematge de líquids utilitzat per l'argó, nitrogen i oxigen



**Figura 11.22.9.** Emmagatzematge real del Carburos Metálicos

#### 11.22.4 Aire comprimit

Per subministrar l'aire comprimit es farà ús d'un compressor que enviarà l'aire comprimit a tota la planta per a tota la valvuleria. En la planta hi ha un total de 141 vàlvules de control, es suposa que no totes es troben treballant a la vegada, s'ha decidit un que només el 60% de les vàlvules es troben en funcionament, a més cada vàlvula treballa amb un cabal de  $1\text{m}^3/\text{h}$  amb una pressió total de 4,5 bars.

Mitjançant l'equació 11.22.8., es calcula la potencia necessària del compressor.

$$\text{Potencia (HP)} = 0,0044 P_1 \cdot Q_1 \cdot \ln[P_2/Q_2] \quad \text{Equació 11.22.8}$$

On:

$P_1$  és la pressió al compressor (lb/polçada<sup>2</sup>)

$Q_1$  és el cabal d'aire del compressor (ft<sup>3</sup>/min)

$P_2$  és la pressió a la vàlvula de control (lb/polçada<sup>2</sup>)

$Q_2$  és el cabal d'aire que necessita la vàlvula de control (ft<sup>3</sup>/min)

Es suposa de forma general que el cabal que necessiten les vàlvules de control es de  $1\text{m}^3/\text{h}$  i una pressió de 2 bars.



En la següent taula es mostra les necessitats d'aire comprimit de la planta:

**Taula 11.22.12** Necessitats d'aire comprimit

<b>P gas(bars)</b>	<b>cabal (m3/h)</b>	<b>Pot (Kw)</b>
4,5	84,6	34,06

A partir de la potencia calculada, es busca un compressor d'aire comprimit que ens aporti com a mínim aquesta potencia. El que s'ha escollit el compressor de la Serie Optima que subministra l'Empresa ECenercontrol, S.L.

■ **Compresor de aire, SERIE OPTIMA de 30 a 90 kW**

<b>Modelo OPTIMA</b>		<b>m3/min</b>	<b>Kw</b>	<b>Bar</b>
	Optima 35	5,1	30	5 - 10,5
	Optima 45	7,35 / 6	45	7 / 10
	Optima 75	12,9 / 10,5	75	7 / 10
	Optima 90	16 / 12,5	90	7 / 10

**Figura 11.22.10.** Característiques de la Serie Optima de compressors de l'Empresa ECenercontrol, S.L.



**Figura 11.22.11.** Imatge del compressor de la Serie Optima.

D'aquesta gamma de compressors s'escull Optima 45 que proporciona una potencia de 45 KW. Per raons de seguretat de la planta, es decideix doblar en compressor de servei d'aire comprimit, per tant, el ús d'aquestes compressors s'anirà alternat.

### 11.22.5 Electricitat

Les necessitats d'il·luminació de la planta són:

**Taula 11.22.13** Necessitats d'il·luminació de la planta

Àrea	Descripció de la zona	Àrea (m2)	P (lux)	P (W/m2)	P(Kw)
100	Àrea d'emmagatzematge	1127,89	200	11,43	12,89
200	Àrea de reacció MCC	300,51	500	28,57	8,59
300	Àrea de purificació MCC	447,33	500	28,57	12,78
400	Àrea de reacció Mic	300,51	500	28,57	8,59
500	Àrea de purificació Mic	406,34	500	28,57	11,61
600	Àrea de reacció Carbaryl	153,10	500	28,57	4,37
700	Àrea de purificació Carbaryl	757,73	500	28,57	21,65
800	Àrea d'emmagatzematge del Mic	198,75	500	28,57	5,68
900	Àrea d'emmagatzematge del Sevin	546,91	500	28,57	15,63
1000	Àrea de carrega i descarrega	4929,19	200	11,43	56,33
1100	Laboratori	203,92	1000	57,14	11,65
1200	Àrea de Control	148,58	1000	57,14	8,49
1300	Oficines	917,28	1000	57,14	52,42
1400	Parking	1198,58	1000	57,14	68,49
1500	Serveis	648,45	500	28,57	18,53
1600	Àrea de tractament de residus (medi ambient)	512,61	200	11,43	5,86
1700	Protecció contra incendis	724,70	200	11,43	8,28

Les potències elèctriques necessàries per als equips de la planta són:

**Taula 11.22.14** Potències elèctriques per als equips de la planta

<b>Bombes</b>	
Àrea	P (Kw)
100	5,01
200	-
300	7,69
400	1,64
500	3,23
600	1,18
700	3,49
800	0,38

<b>Bescanviadors</b>	
Àrea	Potència (Kw)
200	194,4
300	929
400	851,2

500	2879
600	404,7
700	1547,6
800	30,3
1500	4645,8

<b>Serveis</b>	<b>P (Kw)</b>
Chiller	3010,11
Caldera	3558,94
Compressor	34,056

<b>Bufadors</b>	<b>P (Kw)</b>
B-201	2,63
B-202	2,24
B-203	2,28
B-301	0,10
B-701	0,83

<b>Agitador</b>	<b>P (Kw)</b>
AG-401	81,7
AG-601	8,2
AG-701	97,6
AG-702	93,38
AG-703	9,32
AG-704	68,46
AG-705/A	5,48
AG-705/B	5,48

<b>Compresores</b>	<b>P(Kw)</b>
CP-301	14,83
CP-401	9,92

<b>Centrifugues</b>	<b>P(KW)</b>
CR-701	15
CR-702	10

A partir d'aquí es pot calcular el consum elèctric per a cada àrea:

**Taula 11.22.15** Potències elèctriques per a cada àrea

Àrea	Descripció de la zona	P(Kw)
100	Àrea d'emmagatzematge	17,90
200	Àrea de reacció MCC	210,16
300	Àrea de purificació MCC	964,41
400	Àrea de reacció Mic	953,06
500	Àrea de purificació Mic	2893,84
600	Àrea de reacció Carbaryl	418,45
700	Àrea de purificació Carbaryl	2298,57
800	Àrea d'emmagatzematge del Mic	36,35
900	Àrea d'emmagatzematge del Sevin	15,63
1000	Àrea de carrega i descarrega	56,33
1100	Laboratori	11,65
1200	Àrea de Control	8,49
1300	Oficines	52,42
1400	Parking	68,49
1500	Serveis	11214,86
1600	Àrea de tractament de residus (medi ambient)	5,86
1700	Protecció contra incendis	8,28

<b>Consum total (Kw)</b>	19234,76
--------------------------	----------

Un cop obtingut el valor del consum total 19234,76 KW es calcula en KVA:

$$P_{KVA} = \frac{P}{\cos\phi} = \frac{19234,76}{0,8} = 24043,44 \quad \text{Equació 11.22.9}$$

Per cobrir les necessitats elèctriques de la planta s'escull el model Standby de l'Empresa Caterpillar, que té una capacitat elèctrica de 7150 KVA.



**Valor nominal mínimo**

3660 ekW (4725 kVA)

**Valor nominal máximo**

5320 ekW (7150 kVA)

**Estrategia de emisiones/combustible**

Bajo consumo de combustible

**Figura 11.22.12.** Model Standby amb algunes de les seves característiques

A continuació es calculen el número de grups electrògens necessaris per cobrir les necessitats de la planta, el seu càlcul ve determinat per la següent equació:

$$N^{\circ} \text{ de grups electrogens} = \frac{P_{KVA}}{P_{standby}} \quad \text{Equació 11.22.10}$$

**Taula 11.22.16** Dades i resultats del càlcul del número de grups electrògens

<b>P (KVA)</b>	24043,44
<b>P standby</b>	7150
<b>Nº de grupos electrogens</b>	3,36

Per tant, es tindran 4 grups electrògens per poder subministrar tota l'energia elèctrica necessària a la planta.

Cal tenir en compte que els equips d'aquest estil es recomana treballar entre el 70-80% de les seva potencia, per tant es decideix tenir dos grups electrògens en planta ja que per possible

### 11.23 Disseny de canonades

Per tal de determinar el diàmetre nominal de les canonades, primerament s'ha de conèixer la velocitat a la qual circula el fluid. Per fer-ho, es fixen velocitats típiques de circulació.

Fluido	Tipo de flujo	Velocidad	
		pies/s	m/s
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0,5-1	0,15-0,30
	Entrada de bomba	1-3	0,3-0,9
	Salida de bomba	4-10	1,2-3
	Línea de conducción	4-8	1,2-2,4
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0,2-0,5	0,06-0,15
	Salida de bomba	0,5-2	0,15-0,6
Vapor de agua		30-50	9-15
Aire o gas		30-100	9-30

**Figura 11.23.12.** Velocitats típiques. “Operaciones Unitarias en Ingeniería Química; Mc Cabe”

A continuació, es calcula el diàmetre de canonada seguint les següents equacions:

$$A = \frac{Qv}{v} \quad \text{Equació 11.23.1}$$

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot A} \quad \text{Equació 11.23.2}$$

On,

- A = secció de pas de la canonada, m<sup>2</sup>
- Qv = cabal volumètric, m<sup>3</sup>/s
- v = velocitat del fluid, m/s
- D = diàmetre de canonada, m

Finalment, s'ajusta el valor obtingut als diàmetres nominals estàndards tal i com mostra la següent taula:

**Taula 11.23.1.** Diàmetres nominals estàndards per canonades.

<b>Polzades</b>	<b>DIN(mm)</b>	<b>Polzades</b>	<b>DIN(mm)</b>
0,25	10	24	600
0,5	15	26	650
0,75	20	28	700
1	25	30	750
1,25	32	32	800
1,5	40	34	850
2	50	36	900
2,5	65	38	950
4	100	40	1000
5	125	12	300
6	150	14	350
8	200	16	400
10	250	18	450
20	500		

## 11.24 Transport de sòlids

Els transports a granel presenten unes propietats que varien en funció de la mida, distribució del gra, humitat, temperatura i resistència a la fricció.

Les diferents propietats dels materials a granel tenen una importància decisiva a l'hora de seleccionar el procediment adequat de transport neumàtic i es deuran tenir en compte els estats de flux que generen aquests productes tant en el transport per impulsió com per al buit.

### 11.24.1 Divisió de materials de granel segons Geldat

Geldat, divideix els materials a granel en funció de la seva capacitat de fluidificació i retenció d'aire, classificant així el seu comportament en el transport en quatre grans grups, A, B, C i D.

- A- Pols de gra fines i baixa densitat , bona fluidificació i retenció d'aire
- B- Grans mitjans de densitat mitja, fluidificables i retenció d'aire baixa
- C- Pols fins de major densitat, cohesius, difícils de fluidificar amb dolenta retenció d'aire
- D- Granulometries grosses, major densitat, no fluidificables, sense capacitat de retenció d'aire.

Geldart, D.: Types of gas fluidization. *Powder Technol.* 7 (1973), S. 285/292

### 11.24.2 Procediment de transport neumàtic

En la patent alemanya DE-PS 2-122858 del autor H.J Linder, es descriu per primer cop en 1970 un procediment integral per al transport neumàtic per cartutxos. Aquest procediment es caracteritza per la incorporació d'una vàlvula d'impulsos encarregada de formar els cartutxos de material. El transport es lent de uns 0,5 m/s, degut a aquesta baixa velocitat i al moviment laminar dels cartutxos no es destrueix el gra i s'eviten obstruccions en la canonada.

El procediment escollit en el present projecte es basa en el procediment de *sòlids VIBRO PULS PNEU* extret de la patent anterior, on es pot duu a terme el transport de productes a granel, inclús productes humits, cohesius adherents, en general tot tipus de productes que siguin incapaços de fluir, són introduïts en un sistema de canonades de

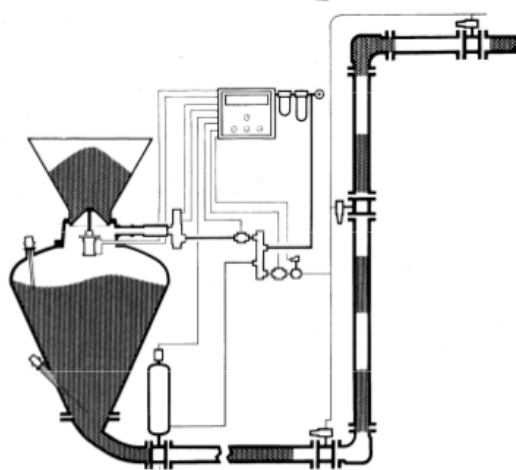


transport d'una forma segura mitjançant un pulsor de vibració i transport en forma de cartutxos.

### Descripció detallada

Mitjançant impulsos d'aire comprimit, la columna continua de material de sortida del pulsor es divideix en bosses d'aire i cartutxos de material. Les bosses d'aire actuen com fonts d'energia per desplaçar els cartutxos de material que tenen per davant. En la canonada de transport es troben incorporades estacions de relé que mantenen els cartutxos distants entre si. Les estacions de relé son alimentades amb aire comprimit i es troben equipades amb un regulador que aporta energia amb pressió addicional a la canonada de transport solament amb el necessari.






Per això es pràcticament impossible que es produeixi un embús en la canonada de transport. Mitjançant l'aplicació d'estacions de relé s'assegura a més el funcionament del transport sense problemes en front a una eventual pèrdua de carrega de l'aire comprimit. En aquest cas, cada estació de relé treballaria com a un petit pulsor, vist des del sistema del trajecte, l'última comença amb el transport.







**Figura 11.24.1.** Procediment de transport pneumàtic, sòlids PLUS-PNEU

En les taules següents es mostren els procediments de transport oferts per *Sòlids Solutions Group* segons les propietats del producte i les funcions a realitzar.

**Taula 11.24.1.** Sistema de transport neumàtic, sòlids PLUS-PNEU (1).

Modo de flujo	Descripción	Depresión hasta bar (abs.)	Sobrepresión hasta bar (abs.)	Granulometría de - hasta $\mu\text{m}$ (mm)	Velocidad m/seg comienzo -fin	Relación $\mu$ Kg/prod. Kg/gas	Aplicación en productos
<b>solids Fly Pneu</b> 	<b>Transporte en fase diluida</b> Clásico sistema de transporte neumático, tanto por presión como vacío, donde el producto es transportado en suspensión y diluido en un flujo de aire.	0,5	2,5	0,0005 - 20	<b>Producto</b> 12 - 36 <b>Aire</b> 15 - 45	Hasta aprox. 10	Harinas, cereales, sémola, pulverulentos, recortes, polvo en general
<b>solids Fluid Pneu</b> 	<b>Transporte en fase densa</b> Sistema de transporte en fase densa, para productos fluidificables, el producto en mezcla homogénea con el aire, utilizando fuerza de empuje del aire.	0,2	4,0	0,01 - 1	<b>Producto</b> 3 - 15 <b>Aire</b> 5 - 20	15 - 30	Cemento, caliza molida, cenizas volantes, bentonita, cal viva, hidróxido cálcico, adsorbentes, polvo, ácido tereftálico, creta
<b>solids Vacu Fill</b> 	<b>Transporte en fase densa por vacío y baches</b> Transporte neumático en fase densa, secuencial y por vacío. Productos en estado fluidificados o atravesados por el aire de transporte aprovechando la fuerza del vacío	0,2	/	0,01 - 5	<b>Producto</b> 1 - 15 <b>Aire</b> 3 - 20	15 - 30	Polvos, fibras, granulados plásticos, minerales, harinas, sémolas, granulados alimentarios
<b>solids Step Pneu</b> 	<b>Transporte por empuje de cartuchos</b> Transporte neumático por empuje a presión, adecuado para productos con un espectro granulométrico uniforme, los cartuchos formados por impulsos de aire, permeables por su granulometría, son atravesados y empujados por el aire a presión.	/	6,0	1 - 10	<b>Producto</b> 0,5 - 10 <b>Aire</b> 1 - 15	20 - 40	Arenas, granulados, cenizas, nueces, guisantes, alubias, HOK, píldoras, pastillas, café en grano
<b>solids Split Pneu</b> 	<b>Transporte en fase densa con tubería auxiliar</b> Transporte neumático en fase densa, con tubería auxiliar para inyecciones de aire, para productos difíciles, cartuchas largas se disgregan con la inyección de aire evitando el atasco.	/	4,0	0,001 - 1	<b>Producto</b> 3 - 15 <b>Aire</b> 5 - 20	15 - 40	Minerales, bióxido de titanio, óxidos metálicos, Creta, leche en polvo, PVC de pasta, hollín en polvo, óxido de plomo, polvos metálicos

Taula 11.24.2. Sistema de transport neumàtic, sòlids PLUS-PNEU (2).

Modo de flujo	Descripción	Depresión hasta bar (abs.)	Sobrepresión hasta bar (abs.)	Granulometría de - hasta $\mu\text{m}$ (mm)	Velocidad m/seg comienzo -fin	Relación $\mu$ Kg/prod. Kg/gas	Aplicación en productos
<b>solids Puls Pneu</b> 	<b>Transporte por empuje de cartuchos con válvula de impulsos y estaciones relé</b> Transporte neumático cuidadoso por cartuchos formados y mantenidos en el trayecto. El sistema mas cuidadoso para productos sensibles y abrasivos.	/	5,0	0,001 - 10	<b>Producto</b> 0,5 - 6 <b>Aire</b> 1 - 9	20 - 60	Azúcar, productos atomizados, productos instant, leche en polvo grasienda, carburo de silicio, abrasivos, minerales duros, percarbonato de sodio, café soluble, ácido adipino, negro de humo granulado, copos, chips
<b>solids Vibro Puls Pneu</b> 	<b>Transporte por empuje de cartuchos con valvula de impulsos y estaciones relé</b> Transporte neumático para productos sin fluidez que se incorporan en la tubería per vibracion y presio. Los cartuchos formados se mantienen en el trayecto.	/	5,0	0,0005 - 20	<b>Producto</b> 0,5 - 10 <b>Aire</b> 1 - 15	20 - 100	Arenas húmedas, sólidos centri-fugados, húmedos productos cohesivos, compuestos, mezclas acabadas, morteros secos con componentes ligerios, material reciclado, cascotes, carbón, coque
<b>solids Vacu Dense</b> 	<b>Transporte por vacio en cartuchos</b> Transporte neumático por vacio, lento y cuidadoso con válvula de impulsos y tubería auxiliar a presión.	0,2	/	0,001 - 5	<b>Producto</b> 0,5 - 10 <b>Aire</b> 2 - 15	20 - 40	Productos atomizados, productos instant, minerales duros, leche en polvo, arenas, granulados, cenizas, legumbres, copos, chips, negro de humo, ácido adipino
<b>solids Truck Discharge</b> 	<b>Transporte por empuje de cartuchos con valvula de impulsos y estaciones relé</b> Como <b>solids Puls Pneu</b> utilizando el camion cisterna como deposito a presión.	/	3,0	0,01 - 10	<b>Producto</b> 0,5 - 6 <b>Aire</b> 1 - 9	20 - 60	Azúcar, Productos atomizados, productos instant, leche en polvo grasienda, carburo de silicio, abrasivos, minerales duros, percarbonato de sodio, café soluble, ácido adipino, copos, chips

Els sistemes de transport neumàtics es poden dividir en sistemes d'impulsió, en sistemes d'aspiració, o en sistemes que siguin una combinació dels dos anteriors.

Els sistemes d'impulsió ofereixen avantatges per aquells casos en els que existeixen un punt d'investida. En la pràctica les pressions de treball poden variar des de uns pocs mil·libars fins a sis bars.

Un dispositiu clàssic utilitzat en el transport per impulsió en fase diluïda per alimentar la canonada de transport, el constitueixen les vàlvules rotatòries alveolars.

Per al transport per impulsió en fase densa, a l'hora d'alimentar la canonada de transport, es poden utilitzar les vàlvules rotatives alveolars d'alta pressió.

Per a les característiques de la planta s'utilitza el transport de fase densa per buit i en pulsacions. S'estableix una relació de  $20 \text{ Kg}_{\text{producte}} / \text{Kg}_{\text{aire}}$  per tant si es té una producció de 1646,47 Kg/h ens farà falta un cabal de 82,32 Kg/h de aire.

Mentre que per al transport del naftol sòlid amb un cabal de 1306,43 desde la ST-101 fins al tanc de mescla TM-702/A o TM-702/B, s'estableix una relació de  $15 \text{ Kg}_{\text{producte}} / \text{Kg}_{\text{aire}}$  ens farà falta un cabal d'aire de 87,09 Kg/h.

### **La carrega i descarrega en big bag**

Per la descripció del procés de la carrega del producte acabat, carbaril, en els big bag i per la instal·lació del sistema de descarrega dels big bags de  $\alpha$ -Naftol s'utilitza la descripció i la maquinària que proporciona l'empresa EUROTEK,

Les característiques principals són:

- Estructura ajustable al tipus de big bag que s'instal·larà.
- Construcció d'acer inoxidable (AISI 304 i 316L) o d'acer al carboni.
- Nomes de construcció (ISO, ASME, AD- MERKBLATTER)
- Es poden construir també per a zona classificada per entorns d'atmosfera explosiva ATEX.
- Medi Ambient, disposen d'un dispositiu de disseny exclusiu BIGFIX, que evita la generació de pols en la boca de descarrega o el coll de carrega depenen de l'aplicació.

Accessoris:

- Porten incorporat un passatge de control de l'extracció o carrega de big bag.
- Elements d'extracció en funció del producte
- Elements de dosificació: vàlvules rotatòries, dosificadors de plats,
- Elements per la connexió amb línies neumàtiques.
- Polispast per al maneig del big bag



**Figura 11.24.2.** Sistemes de carrega i descarrega del big bag

A continuació es mostra el sistema de carrega del big bag:



**Figura 11.24.3.** Carrega del Big Bag

### **Elements per al transport neumàtic**

Els elements per al transport neumàtic del sòlids són proporcionats per l'empresa EUROTEK, existeixen dos tipus pel transport de fase densa:

- Emissor II-Pro, per al transport de productes fràgils i abrasius.
- Emissor Venturi, per a línies que necessitin grans quantitats de transport de materials amb un índex de abrasió baix-mitjà.



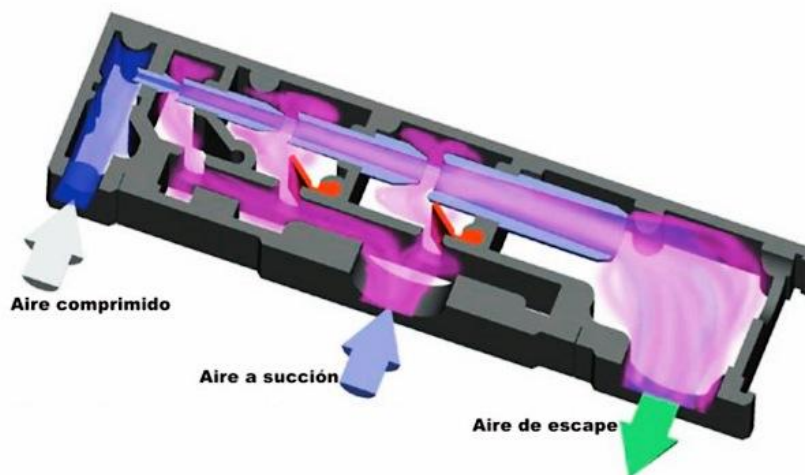
**Figura 11.24.4.** Emissor II-Pro



**Figura 11.24.5.** Emissor Venturi

Per a les necessitats que es té en planta s'escull per al transport neumàtic l'Emissor Venturi, ja que es caracteritza per tenir una alta capacitat de transport del sòlid fins a 120 Tn/h, pot recorre llargues distàncies fins a 500 m, el material de construcció potser tant d'acer inoxidable (304 o 316L) com d'acer al carboni, compleix amb les normes (ISO,ASME, AD-MERBLATTER), i també es dona l'opció de que utilitzi materials ATEX per la seva instal·lació en zones classificades.

L'Emissor Venturi no deixa de ser un mecanisme de "bomba" al buit. Aquest s'omple des de la part superior per gravetat, des de una sitja o des d'una estació de descarrega de big-bags. Un cop ple, es tanca la vàlvula i l'aire comprimit de transport requerit s'aplica des de l'interior del recipient. Aquest aire pot ser tant del subministrament general o generat mitjançant un compressor. La pressió màxima del aire comprimit es troba entre 2 i 4 bar.



**Figura 11.24.6.** Emissor Venturi

La distribució del aire amb el producte es controlada per una unitat de control, amb la finalitat d'una màxima optimització. Una vàlvula antiretorn assegura la seguretat i fiabilitat del sistema. Solament quan hi ha la senyal del buidatge del transport, es torna a iniciar el procés d'ompliment del dipòsit a pressió.

A més ens dona la possibilitat, de si es vol mantenir el estat de fluïdització del sòlid que es transporta es manté mitjançant un subministra d'aire secundari per la canonada. El resultat es un menor consum d'aire comprimit i una important reducció de la fricció entre la canonada y el producte transportat.



