



PLANTA PER A LA FABRICACIÓ DE SEVIN®



Aida Ballester López
Álex del Pino García
Guillem Pascual Sanahuja
Maria Santafé Villarroya
Joan Serra Delgado

UAB
Universitat Autònoma
de Barcelona

e escola
d'enginyeria

ÍNDIX

11. Manual de Càlcul.....	6
11.1 Introducció.....	6
11.2 Tancs d'emmagatzematge	9
11.2.1 Emmagatzematge de MMA.....	11
11.2.2 Emmagatzematge de Fosgè.....	17
11.2.3 Dipòsit de metil isocianat (MIC)	21
11.2.4 Emmagatzematge de Sevin®	25
11.2.5 Emmagatzematge de NaOH 4% i al 10 %	29
11.2.6 Emmagatzematge HCL 37% en pes	37
11.2.7 Emmagatzematge de Toluè.....	41
11.3 Reactor de formació de clorur de metilcarbamil R-201	46
11.3.1. Reacció de formació de clorur de metilcarbamil.....	46
11.3.2. Condicions d'operació.....	47
11.3.3. Paràmetres de disseny.....	48
11.3.4. Balanç de matèria.....	50
11.3.5. Balanç d'energia	52
11.3.6. Mètode de Kern	55
11.3.7. Selecció del material.....	60
11.3.8. Disseny del gruix de la carcassa amb el codi ASME	62
11.3.9. Aïllament tèrmic.....	63
11.4 Reactor R-202 (Piròlisi)	66
11.4.1 Equilibri termodinàmic entre el metil isocianat i el clorur de metilcarbamil	66
11.4.2 Condicions d'operació de la reacció de piròlisi	67
11.4.3 Condicions d'operació del reactor R-202.....	68
11.4.4 Paràmetres de disseny.....	69
11.4.5 Balanç de matèria.....	70
11.4.6 Balanç d'energia	71

11.4.7	Selecció del material.....	75
11.4.8	Disseny del gruix de la carcassa amb el codi ASME	75
11.4.9	Pes de l'equip	76
11.4.10	Agitació.....	77
11.4.11	Venteig.....	81
11.5.	Reactor de formació del carbaril R-203 i R-204	82
11.5.1.	Química del procés de formació del carbaril	82
11.5.2.	Condicions d'operació.....	84
11.5.3.	Paràmetres de disseny	84
11.5.4.	Balanç de matèria.....	85
11.5.5.	Balanç d'energia	87
11.5.6.	Disseny reactors R-203 i R-204	89
11.5.6.1.	Càlcul dels paràmetres de disseny del reactor patent.....	89
11.5.6.2.	Càlcul dels paràmetres de disseny dels reactors R-203 i R-204	90
11.5.6.3.	Catalitzador	91
11.5.6.4.	Pèrdua de càrrega	95
11.5.6.5.	Mètode de Kern	95
11.5.6.6.	Disseny mecànic amb codi ASME.....	97
11.5.6.7.	Càlcul del volum i pesos dels reactors	98
11.5.6.8.	Material de construcció	98
11.5	Mescladors	99
11.5.1	Dipòsits mescla DM-201 i DM-202.....	100
11.5.2	Dipòsit de mescla DM-203	109
11.5.3	Dipòsit de mescla DM-204	116
11.5.4	Dipòsit de mescla DM-301	122
11.5.5	Dipòsit de mescla DM-302	128
11.5.6	Dipòsit de mescla DR-301 i DR-302.....	135
11.9.	Columnes d'absorció	143
11.9.1	Disseny columna d'absorció CA-201	146

11.9.1.1.	Disseny intern de la columna CA-201.....	148
11.9.1.2.	Disseny mecànic de la columna CA-201	152
11.9.1.....		156
11.9.2	Disseny columna d'absorció CA-301 i CA-302.....	156
11.9.3.	Dimensionament de la columna CA-301	157
11.9.4.	Disseny mecànic de la columna CA-302.....	158
11.10.	Columnes d'absorció.....	161
11.10.1.	Disseny columna d'absorció CA-201	164
11.10.2.	Disseny columna d'absorció CA-301 i CA-302.....	174
11.11.	Procés de purificació del carbaril	179
11.11.1.	Columna de destil·lació de MIC CD-301	180
11.11.2.	Cristal·litzadors CR-301, CR-302 i CR-303.....	181
11.11.2.1.	Condicions d'operació.....	182
11.11.2.2.	Paràmetres de disseny.....	184
11.11.2.3.	Balanç de matèria.....	184
11.11.2.4.	Balanç d'energia.....	188
11.11.2.5.	Disseny cristal·litzadors.....	189
11.11.3.	Centrifugues CT-301 i CT-302.....	196
11.11.3.1.	Balanç de matèria.....	196
11.11.3.2.	Definició i paràmetres de les centrífugues.....	198
11.11.4.	Assecatge	201
11.11.4.1.	Balanç de matèria.....	202
11.11.4.2.	Balanç d'energia.....	203
11.11.4.3.	Definició de l'assecador.....	203
11.11.5.	Processador Holo-Flite®.....	206
11.11.6.	Dipòsits amb refredament A/C Chiller	209
11.11.6.1.	Condicions d'operació.....	209
11.11.6.2.	Balanç de matèria.....	209
11.11.6.3.	Balanç d'energia.....	213

11.11.6.4.	A/C Chiller requerit	214
11.11.7.	Evaporació toluè	217
11.12.	Bescanviadors de calor	217
11.12.1.	Introducció teòrica	217
11.12.2.	Agrupació dels bescanviadors de calor	218
11.12.3.	Programa informàtic i disseny	220
11.12.4.	Informació bàsica dels bescanviadors de calor de la planta	227
11.12.4.1.	Buit als equips en els quals es requereix	235
11.13.	Impulsió de fluids	238
11.13.1.	Balanç d'energia mecànica	238
11.13.2.	Càlcul del diàmetre de les canonades	242
11.13.3.	Impulsió de sòlids	242
11.14.	Dipòsits de procés	244
11.14.1.	Dipòsits per les columnes	244
11.14.2.	Dipòsits de toluè	248
11.14.3.	Dipòsits de condensats	252
11.14.4.	Tancs de condensats del downstream	256

11. Manual de Càlcul

11.1 Introducció

Hi ha varies normes per al dimensionament, la selecció del gruix, les inspeccions, els criteris d'aprovació i la fabricació dels equips presentats a continuació. S'escull la norma ASME (American Society of Mechanical Engineers) Secció VIII Divisió 1 "Presure Vessels" que és la que té més reconeixement i la que té un ús més comú. La norma ASME es complementa amb les instruccions tècniques complementaries de emmagatzemament de productes químics (ITC MIE APQ) descrites a l'apartat de Seguretat i Higiene (taula 5.4.3.2).

El disseny es realitzarà considerant les condicions més severes de pressió i temperatura, és a dir, es farà un sobredimensionament de les condicions d'operació.

- Càlcul del gruix

A continuació es presenten les equacions requerides pel càlcul dels gruixos de les diferents geometries presents en els equips.

L'equació 11.1.1 s'utilitza pel càlcul del gruix de recipients cilíndrics (cos cilíndric):

On:

- $t_{cilindre}$ és el gruix mínim de la paret (m).
- P és la pressió interna de disseny (Pa).
- R és el radi intern del equip (m).
- S és l'esforç màxim admissible (Pa).
- E és l'eficiència de soldadura.
- C_A és el sobreessessor per corrosió (m).

L'equació 11.1.2 s'utilitza pel càlcul del gruix del fons toriesfèric (tapa superior i/o inferior):

$$t_{toriesfèric} = \frac{P L M}{2 S E - 0.2 P} + C_A + C_{FAB} \quad [Eq. 11.1.2]$$

On:

- $t_{toriesfèric}$ és el gruix mínim de la paret (m).
- P és la pressió interna de disseny (Pa).
- L és el radi intern del equip del cos cilíndric (m).
- S és l'esforç màxim admissible (Pa).
- E és l'eficiència de soldadura.

- C_A és el sobreessidor per corrosió (m).
- C_{FAB} és el sobreessidor de fabricació (m).

L'equació 11.1.3 s'utilitza pel càlcul del gruix del fons cònic (tapa inferior)

$$t_{cònic} = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \cos \alpha (S E - 0,6 P)} + C_A + C_{FAB} \rightarrow \alpha = 30^\circ \quad [Eq. 11.1.3]$$

On:

- $t_{toriesfèric}$ és el gruix mínim de la paret (m).
- P és la pressió interna de disseny (Pa).
- D és el radi intern del equip del cos cilíndric (m).
- S és l'esforç màxim admissible (Pa).
- E és l'eficiència de soldadura.
- C_A és el sobreessidor per corrosió (m).
- C_{FAB} és el sobreessidor de fabricació (m).
- α és l'angle de vèrtex ($^\circ$).

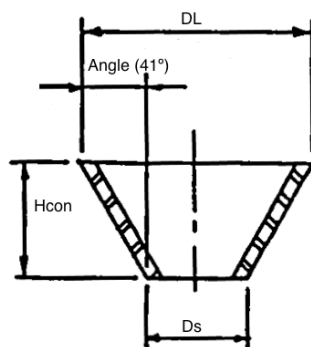


Figura 11.1.1 Esquema fons cònic.

El mètode iteratiu seguit per al càlcul dels espessors seguint la norma ASME Secció VIII Divisió 1 "Pressure Vessels" s'explica a continuació de manera esquemàtica:

- Pressió interna
 - 1) Es calcula el gruix amb les equacions mostrades anteriorment de cada part de l'equip (cos cilíndric, fons torisfèric...)
 - 2) S'arrodoneix a un gruix que es pugi fabricar o a un gruix estàndard.
 - 3) Es calcula la pressió màxima admissible (MAWP) amb el gruix calculat en el punt 1. Si la pressió MAWP és més gran o igual que la pressió interna de disseny el gruix s'accepta.
- Pressió externa

- 4) Es suposa un gruix (el primer valor suposat serà el calculat en el punt 1).
- 5) Es calculen una sèrie de paràmetres diferents per a cada part de l'equip i amb les expressions corresponents i les gràfiques del factor A i B de la norma ASME (per exemple la gràfica UGO28.0 o UCS 28.2), es calcula la pressió màxima admissible. Si la pressió calculada MAWP és major que l'externa s'accepta el gruix suposat.
- 6) Finalment s'escull el gruix més gran dels punts 1 i 4 i en el cas que hi hagi perill de buit (per descarrega) s'agafa el gruix de pressió interna.

- Factor de soldadura

Una de les zones més debilitades que presenten els equips són les soldadures, ja que es on la paret presenta discontinuïtats. En les soldadures es poden intensificar les tensions a les que està sotmès el material. La norma ASME estableix diferents factors de soldadura en funció del tipus de soldadura i del radiografiat posterior que presenti. La taula 11.1.1 mostra alguns d'aquests valor de factor de soldadura.

Tabla 11.1.1. Valors del factor de soldadura segons radiografiat.

Soldadura	Radiografiat Parcial	Radiografiat Total
Simple	0,85	1
Doble	0,8	0,9

Pel cas de cossos cilíndrics es té un valor de factor de soldadura de 0,85 i pel cas del fons toriesfèric i cònic es té un valor de factor de soldadura de 1.

- Selecció del material

El material que s'utilitzi per a la construcció d'un equip ha de respondre a tres principis bàsics. El primer és saber si el material que es vol utilitzar és resistent a la corrosió del material que es vol emmagatzemar. El segon és saber la resistència mecànica del material en les condicions d'operació de temperatura i pressió. Per últim, s'ha de conèixer el preu del material emprat. A l'hora de seleccionar el material s'haurà de buscar un equilibri entre aquests tres principis bàsics exposats anteriorment.

- Temperatura i pressió de disseny

Cal diferenciar entre les condicions de disseny i les condicions d'operació. La pressió de disseny és el valor que s'ha d'utilitzar en les equacions pel càlcul de les parts dels recipients sotmeses a

pressió, mentre que la pressió d'operació és la pressió de treball i la pressió manomètrica a la que estarà sotmès l'equip en les condicions d'operació normals.

$$P = (P_o + \Delta P) \cdot 1.15 \quad [\text{Eq. 11.1.4}]$$

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h \quad [\text{Eq. 11.1.5}]$$

La temperatura d'operació és la temperatura a la que estarà sotmès l'equip, mentre que la temperatura de disseny és la mateixa que la d'operació però afegint 20°C de temperatura per motius de seguretat.

$$T = T_o + 20^\circ C \quad [\text{Eq. 11.1.6}]$$

- Tancs enterrats

Els recipients enterrats estan dissenyats segons el ITC-MIE-APQ, on es diu que els recipients enterrats s'han de cobrir amb un mínim de 600 mm de terra o un altre material adequat, o bé per 300 mm de terra o un altre material adequat més una llosa de formigó armat de 100 mm de gruix. També cita que s'han d'instal·lar sistemes de detecció i contenció de fugues, tals com, cubeta estanca amb un tub de bus o doble paret amb detecció de fugues.

Línia

- Arrodoniments

Per poder comprar materials amb mesures estàndard de venda s'arrodoneixen la altura i el diàmetre del cilindre intentant mantenir el volum necessari i una relació típica de L/D per tancs d'emmagatzematge i mescladors de 1,5.

11.2 Tancs d'emmagatzematge

Per al disseny dels tancs d'emmagatzematge es tindrà en compte les condicions de treball i el codi ASME (American Society of Mechanical Engineers) Secció VIII Divisió 1 "Pressure Vessels", el codi API 650, el ITC-MIE-APQ i les consideracions de l'apartat "Seguretat i Higiene".

A banda de dissenyar els tancs d'emmagatzematge també es dissenyen els elements secundaris d'aquests com el venteig i les cubetes de retenció.

- Cubetes de retenció

Les cubetes de retenció estan pensades per a contenir abocaments, millorar la seguretat i reduir el risc de contaminació, manipulant amb seguretat els líquids a abocar i emmagatzemar. Per a dissenyar les cubetes de retenció es seguiran les normes de la ITC-MIE-APQ.

La norma diu, entre altres, que els tancs d'emmagatzematge de líquids inflamables i combustibles hauran de disposar d'una cubeta de retenció. Les cubetes no poden estar en més de dos files, és precís que cada fila tingui una via d'accés que permeti la intervenció de la brigada d'incendis. La distància en projecció horitzontal entre la paret del recipient i la part interior de la cubeta serà, com a mínim, de un metre.

El fons de la cubeta ha de tindre una pendent de forma que el vessat flueixi ràpidament fins a una zona de la cubeta el més allunyada possible de la projecció dels recipients, de les canonades i dels òrgans de control de la xarxa d'incendis.

- Venteig

Tot recipient haurà de disposar de sistemes de venteig o alleujament de pressió per prevenir la formació de buit o pressió interna. Aquest sistema estarà allunyat dels punts d'operació i vies de circulació on les persones puguin resultar exposades, o es protegiran adequadament per evitar les projeccions de líquids i vapors.

Els venteigs normals d'un tanc atmosfèric es dimensionaran d'acord amb codis de reconeguda solvència, o com a mínim, hauran de tindre una mida igual a la major de les canonades de buidat o emplenat, i en cap cas, inferior a 35 mm de diàmetre interior. Si el recipient té més d'una connexió de carrega o descarrega la mida del venteig haurà de basar-se en el flux màxim possible.

En el cas de recipients amb capacitat superior a 5 m³ que emmagatzemin líquids amb un punt d'ebullició igual o inferior a 38°C, el venteig estarà normalment tancat, excepte quan es ventegi a l'atmosfera en condicions de pressió interna o buidat.

Els venteig de recipients que emmagatzemin líquids de classe B1, així com els de classe B2, C i D que estiguin emmagatzemats a temperatures superiors al seu punt d'inflamació, estaran equipats amb un sistema que eviti la penetració de espurnes o flames (apagaflames, tancat hidràulic, inertització sempre garantida, etc..).

En el cas de recipients a pressió, el venteig d'emergència permetrà donar sortida a els vapors produïts per el efecte del calor rebut, sense que es pugui augmentar la pressió en l'interior del recipient en més d'un 10% la màxima pressió de disseny.

- Stock

Per calcular les capacitats dels tancs d'emmagatzemament es necessari especificar quina serà la quantitat demandada, ja sigui de reactius o productes. S'ha de preveure els possibles retards en la rebuda dels reactius, els augments en la producció, aturades de producció. Segons les previsions es fixarà un stock o un altre.

11.2.1 Emmagatzematge de MMA

- Condicions d'emmagatzematge

La monometilamina és un reactiu principal de procés, es necessita per la formació de MCC en el reactor R-201. És una substància catalogada com corrosiva, inflamable i nociva per això s'ha de realitzar un disseny que garanteixi una bona seguretat. En l'apartat de "Seguretat i Higiene" es realitza un estudi més exhaustiu sobre la catalogació de perillositat de la MMA.

Hi han dos tancs de MMA enterrats sota terra i col·locats en horitzontal per motius de seguretat. LA MMA s'emmagatzema en el tanc líquid a 6,5 atm i a temperatura ambient 25°C.

- Capacitat d'emmagatzematge

La monometilamina és un reactiu principal de procés, es necessita per la formació de MCC en el reactor R-201. La capacitat d'emmagatzematge ve donada per la quantitat de MMA que necessita el reactor R-201, per la fracció de líquid i per els dies de stock que es fixen. Es fixa un stock de 5 dies ja que es tracta d'un reactiu principal i no pot haver-hi cap mena de problema amb el subministrament. La MMA arriba en camions cisterna els quals tenen una capacitat de 25 m³.

La quantitat que es necessita al dia de MMA al reactor R-201 és:

$$\dot{M}_{amoníaco} = 298,16 \frac{kg}{h}$$

Fixant un stock de 5 dies i sabent la densitat a la temperatura de 25 °C i a una pressió de 6,5 atm es pot saber el volum necessari de monometilamina..

$$V_{MMA} = 298,16 \frac{kg}{h} \cdot \frac{24 h}{1 dia} \cdot 5 dies \cdot \frac{m^3}{615 Kg} = 81,8 m^3 \rightarrow 80\% ple \rightarrow 98,2 m^3$$

S'ha instal·lat 2 tancs (T-101 i T-102) per poder facilitar el manteniment i el control dels mateixos, per tant el volum requerit a cada tanc serà de 49,09 m³, encara que els equips tindran una capacitat de 50,8 m³ degut als arrodoniments descrits en la introducció.

- Dimensions

A continuació s'exposen les equacions utilitzades per al càlcul del volum dels tancs d'emmagatzematge de MMA. Es suposa un valor típic de 2 per a la relació L/D. El equip consta d'un cos central cilíndric més un fons superior i inferior toriesfèric ,per tant el volum de l'equip serà la suma del volum de les parts descrites anteriorment.

$$V_{equip} = V_{cilindre} + V_{toriesfèric} + V_{toriesfèric} \text{ [Eq 11.2.1.1]}$$

$$V_{cilindre} = \pi \frac{D^2}{4} H_{cilindre} \text{ [Eq. 11.2.1.2]}$$

$$V_{toriesfèric} = 0.08089 \cdot D^3 \text{ [Eq. 11.2.1.3]}$$

$$H_{cilindre} = 2 \cdot D \text{ [Eq. 11.2.1.4]}$$

$$H_{toriesfèric} = 0.1935 \cdot D - 0,455 \cdot t + 3,5 \cdot t \text{ [Eq. 11.2.1.5]}$$

$$V_{equip} = \pi \frac{D^2}{4} 2 \cdot D + 2 \cdot (0.08089 \cdot D^3) \text{ [Eq. 11.2.1.6]}$$

La taula 11.2.1.1 mostra les dimensions obtingudes dels tancs d'emmagatzematge de MMA calculades amb les expressions anteriors.

Taula 11.2.1.1. Paràmetres de disseny dels tancs d'emmagatzematge de MMA

PARÀMETRES DE DISSENY DELS TANCS DE MMA			
Material		SA-240 316L	
TANC D'EMMAGATZEMATGE DE MMA			
Volum equip (m³)	50,8	T disseny (°C)	45
V cilindre (m³)	46,04	P disseny (atm)	7,6
V fons toriesfèric (m³)	2,41	S (Psi) SA-240 316L	15700
Altura fons toriesfèric (m)	0,661	r [m]	0,31
V fons toriesfèrics (m³)	4,82	R [m]	3,1
Altura cilindre (m)	6,1	L [m]	0,661
Diàmetre intern (m)	3,1	M	1,54
Altura equip	7,42	ρ material [Kg/m3]	7980

- Disseny mecànic

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix la columna de líquid que hi ha dins del tanc. Com els tancs estan col·locats de manera horitzontal, el càlcul de l'altura del líquid es fa sobre el diàmetre del cilindre.

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 615 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \cdot 3,1 \cdot 0,8 = 14954,2 Pa = 0,15 atm \quad [Eq. 11.1.5]$$

A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{disseny} = (6,5 atm + 0,15 atm) \cdot 1,15 = 7,6 atm \quad [Eq. 11.1.4]$$

$$T = 25^{\circ}C + 20^{\circ}C = 45^{\circ}C \quad (Eq. 11.1.6)$$

Els tancs consten d'un fons inferior i superior toriesfèric i un cos cilíndric com s'ha dit anteriorment. Amb les equacions que es presenten a continuació es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior i inferior toriesfèric.

$$t_{cilindre} = \frac{P R}{S E - 0,6 P} + C_A \quad [Eq. 11.1.1]$$

$$t_{toriesfèric} = \frac{P L M}{2 S E - 0,2 P} + C_A + C_{FAB} \quad [Eq. 11.1.2]$$

El material que s'ha escollit és el acer inoxidable AISI 316L, degut a que es treballa amb MMA i aquest és corrosiu i ataca els materials que continguin Cu. A continuació es mostra la taula 11.2.1.2 que mostra la composició del acer AISI 316L.

Taula 11.2.1.2 % en pes de la composició del acer AISI 316 i AISI 316L.

	C máx.	Si máx.	Mn máx.	P máx.	S máx.	Cr	Ni	Mo
316	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	16.00-18.00	10.00-14.00	2.00-3.00
316L	0.03	1.00	2.00	0.045	0.030	16.00-18.00	10.00-14.00	2.00-3.00

Per escollir la S (esforç màxim admissible) s'utilitza la taula 11.2.1.3 que es presenta a continuació. El resum d'especificacions generals del disseny mecànic dels tancs de MMA es mostra a la taula 11.2.1.4.

Taula 11.2.1.3 Valors de S per diferents acers i temperatures.

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

Taula 11.2.3.4. Especificacions generals dels tancs d'emmagatzematge de MMA

ESPECIFICACIONS GENERALS			
T disseny (°C)	5,8	t total toriesfèric (mm)	20
P disseny (atm)	25	S [Psi] SA-240 316L	15700
t cilindre (mm)	14	E cilindre (m)	0,85
t total cilindre (mm)	15	Presió externa (atm)	1
t toriesfèric (mm)	17	E toriesfèric (m)	1

- Pes de l'equip

Per calcular els pes dels tancs d'emmagatzematge sencers s'ha de calcular el pes dels fons toriesfèrics i el del cilindre. Es calcula el pes de les tres estructures per separat i es sumen els pesos.

$$M_{cilindre} = \pi \cdot H_{cilindre} \left(\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right) \rho_{material} \text{ [Eq. 11.2.1.7]}$$

$$M_{toriesfèric} = \left((0.08089 D_e^3) - (0.08089 D_i^3) \right) \rho_{material} \text{ [Eq. 11.2.1.8]}$$

$$M_{op.} = M_{equip.} + (V_{sòlid} \cdot \rho_{aparent}) \text{ [Eq 11.2.1.9]}$$

$$M_{líquid} = \rho \cdot fracció líquid \cdot V líquid \text{ [Eq. 11.2.1.10]}$$

A continuació la taula 11.2.1.5 mostra els resultats obtinguts per els pesos dels tancs d'emmagatzematge de monometilamina.

Taula 11.2.1.5. Pesos dels tancs d'emmagatzematge de MMA buits i en operació.

PES DE L'EQUIP	
ρ material (Kg/m3)	7980
M líquid (Kg)	25035,5
M cilindre (Kg)	3564,1
M fons toriesf. (Kg)	749,2
M buit (Kg)	4313,3
M en operació (Kg)	29348,9

- Venteig

Els sistemes de venteig son sistemes dissenyats per prevenir els efectes de les alteracions de la pressió interna de un recipient d'emmagatzematge. La mida del venteig d'un tanc, com s'ha dit en les notes introductòries ha de ser de mida com a mínim igual o major a la de les canonades de carga o descarrega i en cap cas ser inferiors a 35 mm de diàmetre.

En el cas d'emmagatzematges atmosfèrics o a baixa pressió la capacitat total de venteig pot ser determinada per la següent fórmula:

$$m^3 \text{ de aire per hora} = \frac{4,414 \cdot Q}{L \cdot \sqrt{PM}} \quad [Eq. 11.2.1.11]$$

On:

- Q és el calor rebut (kJ/h).
- L és el calor latent de vaporització.
- PM és el pes molecular.

$$A = \pi \cdot D \cdot H_{cilindre} = 59,41 \text{ m}^2 \quad [Eq. 11.2.1.12]$$

On:

- D és el diàmetre del recipient.
- H_{cil} és l'alçada del cilindre.

$$Q = 139,7 \cdot F \cdot A^{0,82} \cdot 10^3 = 596812,1 \text{ kJ/h} \quad [Eq. 11.2.1.13]$$

On:

- F és el factor de reducció adimensional.
- A superfície humida (m^2).

La figura 11.2.1.6 serveix per triar el valor factor de reducció, en el cas que la situació no aparegui en la figura el valor de F serà la unitat. En aquest cas el valor de F és 0,15 ja que el tanc està soterrat i té un sistema de polvorització d'aigua fixe i automàtic.

Taula 11.2.1.6. Valors del factor adimensional de reducció.

Protección	Factor F
Drenaje alejado o cubeto a distancia y superficie húmeda superior a 20 m ²	0,5
Sistema de pulverizadores de agua fijos y automáticos para la prevención de incendios y cubeto a distancia	0,3
Aislamiento no afectado por fuego ni chorro de agua y con una conductividad térmica máxima a 900 °C de 83,75 kJ/(h × m × ° K) [20 kcal/(h × m × ° C)]	0,3
Aislamiento igual al anterior y sistema de pulverización de agua fijo y automático	0,15

En el cas d'emmagatzematges de recipients a pressió el càlcul del venteg d'emergència es farà de amb l'equació 11.2.1.14 on el càlcul de Q i A és realitzarà de la mateixa manera que amb els ventegs dels emmagatzemaments atmosfèrics. Per al tanc de MMA el cabal de venteg d'emergència és:

$$\frac{kg}{h} \text{ de vapor de líquid} = \frac{Q}{L} = 28,15 [Eq. 11.2.1.14]$$

On:

- Q és el calor rebut (kJ/hg).
- L és el calor latent de vaporització.

11.2.2 Emmagatzematge de Fosgè

- Condicions d'emmagatzematge

La el fosgè és un reactiu principal de procés i igual que la MMA es necessita per la formació de MCC en el reactor R-201. És una substància catalogada com corrosiva, i molt tòxica per això s'ha de realitzar un disseny que garanteixi una bona seguretat.

El tanc de fosgè, igual que el de MMA, estarà enterrat sota terra i col·locat en horitzontal per motius de seguretat. S'emmagatzema líquid a pressió de 3,5 atmosferes i a temperatura ambient.

- Capacitat d'emmagatzematge

Com el fosgè és un reactiu principal la capacitat d'emmagatzematge ve donada per la quantitat de Fosgè que necessita el reactor R-201 i per els dies de stock fixats. Es fixa un stock de 5 dies. El fosgè arriba en camions cisterna els quals tenen una capacitat de 25 m³.

La quantitat que es necessita al dia de Fosgè al reactor R-201 és:

$$\dot{M}_{Fosgè} = 949,6 \frac{kg}{h}$$

Fixant un stock de 5 dies i una fracció de líquid de 80% i sabent la densitat del Fosgè en les condicions descrites anteriorment es pot saber el volum necessari.

$$V_{Fosgè} = 949,6 \frac{kg}{h} \cdot \frac{24 h}{1 dia} \cdot 5 dies \cdot \frac{1 m^3}{1294 Kg} = 88,06 m^3 \rightarrow 80\% ple \rightarrow 105,67 m^3$$

El volum de fosgè que es necessita emmagatzemar es divideix en tres tancs iguals (T-103, T-104 i T-105), per tant el volum de cada dipòsit serà de 35,22 m³.

- Dimensions

Les equacions utilitzades per el dimensionament dels tancs de fosgè són les mateixes que s'utilitzen per la MMA ja que la relació L/D és la mateixa, com també són iguals les parts de les que consten els tancs de fosgè.

La taula 11.2.2.1 mostra les dimensions obtingudes dels tancs d'emmagatzematge de fosgè.

Taula 11.2.2.1. Paràmetres de disseny dels tancs d'emmagatzematge de fosgè

PARÀMETRES DE DISSENY DELS TANCs DE FOSGÈ			
Material		SA-240 316L	
TANC D'EMMAGATZEMATGE DE FOSGÈ			
Volum equip (m³)	36,03	T disseny (°C)	45
V cilindre (m³)	32,66	P disseny (atm)	4,34
V fons toriesfèric (m³)	1,68	S (Psi) SA-240 316L	15700
Altura fons toriesfèric (m)	0,568	r [m]	0,275
V fons toriesfèrics (m³)	3,36	R [m]	2,75
Altura cilindre (m)	5,5	L [m]	0,568
Diàmetre intern (m)	2,75	M	1,54
Altura equip (m)	6,63	ρ material [Kg/m3]	7980

- Disseny mecànic

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix la columna de líquid que hi ha dins del tanc. Com els tancs estan col·locats de manera horitzontal, el càlcul de l'altura del líquid es fa sobre el diàmetre del cilindre.

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 1294 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \cdot 2,75 \cdot 0,8 = 27898,6 Pa = 0,275 atm \text{ [Eq. 11.1.5]}$$

A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{disseny} = (3,5 atm + 0,275 atm) \cdot 1.15 = 4,34 atm \text{ [Eq. 11.1.4]}$$

$$T = 25^{\circ}C + 20^{\circ}C = 45^{\circ}C \text{ [Eq. 11.1.6]}$$

Els tancs consten d'un fons inferior i superior toriesfèric i un cos cilíndric. Amb les equacions Eq.11.1.1 i Eq.11.1.2 es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior i inferior toriesfèric.

El material que s'utilitza per a la construcció del tanc és el mateix que el de MMA (AISI 316L) perquè el fosc es corrosiu i ataca els metalls que continguin Cu. La taula 11.2.1.4 serveix per escollir l'esforç màxim admissible S.

El resum d'especificacions generals del disseny mecànic del tanc de Fosc es mostra a la taula 11.2.2.2.

Taula 11.2.2.2. Especificacions generals dels tancs de fosc

ESPECIFICACIONS GENERALS			
T disseny (°C)	45	t total toriesfèric (mm)	12
P disseny (atm)	4,34	S [Psi] SA-240 316L	15700
t cilindre (mm)	9	E cilindre (m)	0,85
t total cilindre (mm)	10	Presió externa (atm)	1
t toriesfèric (mm)	9,8	E toriesfèric (m)	1

- Pes de l'equip

Per calcular el pes dels tancs d'emmagatzematge sencers s'ha de calcular el pes dels fons toriesfèrics i el del cilindre amb les equacions Eq.11.2.1.7, Eq.11.2.1.8, Eq.11.2.1.9, Eq.11.2.1.10. Es calcula el pes de les tres estructures per separat i es sumen els pesos.

A continuació la taula 11.2.2.3 mostra els resultats obtinguts per els pesos dels tanc d'emmagatzematge de fosc.

Taula 11.2.2.3 Pesos dels tancs d'emmagatzematge de fosc buits i en operació.

PES DE L'EQUIP	
ρ material (Kg/m ³)	7980
M líquid (Kg)	37300,5
M cilindre (Kg)	1899,4
M fons toriesf. (Kg)	353,0
M buit (Kg)	2252,4
M en operació (Kg)	39552,9

- Venteig

La mida del venteig, com s'ha dit en les notes introductòries ha de ser de mida com a mínim igual o major a la de les canonades de carga o descarrega i en cap cas ser inferiors a 35 mm de diàmetre.

En el cas d'emmagatzematges de recipients a pressió el càlcul del venteig d'emergència es farà de la següent forma.

$$\frac{kg}{h} \text{ de vapor de líquid} = \frac{Q}{L} = 22,05 \text{ [Eq. 11.2.1.14]}$$

On:

- Q és el calor rebut (kJ/hg).
- L és el calor latent de vaporització.

$$A = \pi \cdot D \cdot H_{cilindre} = 47,52 \text{ m}^2 \text{ [Eq. 11.2.1.12]}$$

$$Q = 139,7 \cdot F \cdot A^{0,82} \cdot 10^3 = 496936,3 \text{ kJ/h [Eq. 11.2.1.13]}$$

Els valors de superfície humida i del calor rebut per el recipient es calcula amb les mateixes expressions que amb recipients atmosfèrics. En aquest cas el valor de F és 0,15 ja que es troba soterrat i té un sistema de lluita anti incendis igual que el tanc de MMA.

11.2.3 Dipòsit de metil isocianat (MIC)

- Condicions d'emmagatzematge

El metil isocianat (MIC) és una substància química volàtil i molt perillosa. Es tracta d'una substància classificada com molt tòxica, corrosiva, nociva, sensibilitzant (per inhalació i contacte de la pell), irritant i fàcilment inflamable, per això s'ha de maximitzar la seguretat per minimitzar els riscos.

Les condicions d'operació, es a dir, temperatura, pressió i fracció de ple han estat extretes del article Report No. 2008-08-I-WV fet per BAYER CROPSCIENCE, LP. El material de construcció és el SA-240 316L ja que es resistent a la corrosió del MIC i a més també apareix en l'article mencionat anteriorment.

Es de vital importància que el MIC entri pur al reactor R-203 i R-204 , per això s'ha decidit instal·lar un HPLC (High-performance liquid chromatography) al corrent de sortida del dipòsit de condensats de la columna CD-204. El metil isocianat ha d'entrar pur al reactor per tal de complir les especificacions com a reactiu i per tal d'evitar reaccions secundàries. Aquesta informació s'ha extret de l'article "Review of Methyl Isocyanate (MIC) production at the Union Carbide Corporation Facility Institute, West Virginia".

El dipòsit ha estat dissenyat per suportar una pressió de 100 psi i a una temperatura de -5°C. La refrigeració es fa amb un intercanviador de calor col·locat fora del tanc ja que aquest es troba soterrat per seguretat. El líquid refrigerant que s'usa és el Dowtherm J ja que el aigua reacciona de forma violenta amb el MIC.

Donada la perillositat del MIC s'ha de procurar emmagatzemar la mínima quantitat possible. Per seguretat l'àrea que hi ha al voltant del tanc de MIC ha de tindre monitors d'aire per tal de detectar possibles fuites de MIC a més a més de tenir boquets de vaporització d'aigua fixes.

- Capacitat de emmagatzematge

La capacitat d'emmagatzematge del dipòsit de MIC ve fixada per la quantitat d'aquest compost que es necessita per fer-lo reaccionar i convertir-lo en SEVIN al reactor R-203. S'ha establert una fracció de ple al reactor de 75% i un temps de residència de 2,5 h.

$$V_{MIC} = 0,5914 \frac{m^3 MIC}{h} \cdot 2,5 h = 1,47 m^3 \rightarrow 75\% ple \rightarrow 1,77 m^3$$

- Dimensions

Les equacions utilitzades per el dimensionament del dipòsits de MIC són les mateixes que s'utilitzen per la MMA i foscè ja que la relació L/D és la mateixa, com també són iguals les parts de les que consta el dipòsit de MIC.

La taula 11.2.3.1 mostra les dimensions obtingudes del dipòsit de MIC calculades amb les expressions anteriors.

Taula 11.2.3.1. Paràmetres de disseny del dipòsit de MIC.

PARÀMETRES DE DISSENY DEL DIPÒSIT DE MIC			
Material		SA-240 316L	
DIPÒSIT DE MIC			
Volum equip (m³)	1,73	T disseny (°C)	15
V cilindre	1,57	P disseny (atm)	7,9
V fons toriesfèric	0,08	S (Psi) SA-240 316L	15700
Altura fons toriesfèric	0,19	r [m]	0,1
V fons toriesfèrics	0,38	R [m]	1

Altura cilindre (m)	2	L [m]	0,19
Diàmetre intern (m)	1	M	1,54
Altura equip	1,39	ρ material [Kg/m ³]	7980

- Disseny mecànic

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix la columna de líquid que hi ha dins del dipòsit. Com el dipòsit està col·locat de manera horitzontal, el càlcul de l'altura del líquid es fa sobre el diàmetre del cilindre.:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 923 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \cdot 1 \cdot 0,75 = 6791 Pa = 0,07 atm \text{ [Eq. 11.1.5]}$$

La temperatura i la pressió d'operació és de -5°C i 6,805 atm respectivament. A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{disseny} = (6,805 atm + 0,07 atm) \cdot 1,15 = 7,9 atm \text{ [Eq. 11.1.4]}$$

$$T = -5^{\circ}C + 20^{\circ}C = 15^{\circ}C \text{ [Eq. 11.1.6]}$$

Els dipòsits consten d'un fons inferior i superior toriesfèric i un cos cilíndric. Amb les equacions Eq.11.1.1 i Eq.11.1.2 es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior i inferior toriesfèric.

La taula 11.2.3.3 presenta a continuació les especificacions generals del dipòsit de MIC.

Taula 11.2.3.3 Especificacions generals del dipòsit de MIC.

ESPECIFICACIONS GENERALS			
T disseny (°C)	15	t total toriesfèric (mm)	8
P disseny (atm)	7,9	S [Psi] SA-240 316L	15700
t cilindre (mm)	5	E cilindre (m)	0,85
t total cilindre (mm)	6	Presió externa (atm)	1
t toriesfèric (mm)	6,2	E toriesfèric (m)	1

- Pes de l'equip

Per calcular el pes dels dipòsits sencers s'ha de calcular el pes dels fons toriesfèrics i el del cilindre amb les equacions Eq.11.2.1.7, Eq.11.2.1.8, Eq.11.2.1.9, Eq.11.2.1.10. Es calcula el pes de les tres estructures per separat i es sumen els pesos.

La taula 11.2.3.5 mostra els pesos del dipòsit de MIC.

Taula 11.2.3.5 Pesos del dipòsit de MIC buit i en operació.

PES DE L'EQUIP	
ρ material (Kg/m ³)	7980
M líquid (Kg)	1199,38
M cilindre (Kg)	302,64
M fons toriesf. (Kg)	29,49
M buit (Kg)	332,13
M en operació (Kg)	1531,51

- Venteig

La mida del venteig, com s'ha dit en les notes introductòries ha de ser de mida com a mínim igual o major a la de les canonades de carga o descarrega i en cap cas ser inferiors a 35 mm de diàmetre.

En el cas d'emmagatzematges de recipients a pressió el càlcul del venteig d'emergència es farà amb les equacions 11.2.1.11 i 11.2.1.12 i 11.2.1.14. En aquest cas el valor de F és 0,3 ja que es troba soterrat. En la taula 11.2.3.6. es mostren kg/h de vapor de líquid del dipòsit de MIC.

Taula 11.2.3.7 Kg/h de vapor de líquid del venteig d'emergència del dipòsit de MIC.

	Dipòsit MIC
A (m ²)	6,28
Q (kJ/h)	189158,2
kg/h de vap.	8,11

11.2.4 Emmagatzematge de Sevin®

- Condicions d'emmagatzematge

El Sevin® no és una substància corrosiva o inflamable i el seu punt de fusió és de 142°C , per això es decideix emmagatzemar-lo a pressió atmosfèrica i temperatura ambiental amb una fracció plena de 0,9.

- Capacitat de emmagatzematge

La producció anual de Sevin® fixada per a la seva venda és de 12600 Tn/any el que equival en hores i dies:

$$\text{Producció} \frac{\text{Kg}}{\text{dia}} = 12874,7 \frac{\text{Tn}}{\text{any}} \cdot \frac{1 \text{ any}}{365 \text{ dies}} = 35,27 \frac{\text{Tn}}{\text{dia}} \cdot \frac{1 \text{ dia}}{24 \text{ h}} = 1,47 \frac{\text{Tn}}{\text{h}}$$

Com el Sevin® és el producte d'interès principal de procés es fixa un stock de 5 dies, per tant es tindran 176,36 Tn emmagatzemades de Sevin®. Com està en estat sòlid, el producte s'ha de presentar en big bags de 700 kg. Un terç del Sevin® produït s'emmagatzema en big bags i els altres dos terços en les sitjes.

$$N_{\text{Big bags}} = 176,36 \frac{\text{Tn}}{\text{dia}} \cdot \frac{1000 \text{ Kg}}{\text{Tn}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{300 \text{ Kg}} \cdot 5 \text{ dies} \cdot \frac{1 \text{ big bag}}{700 \text{ Kg}} = 81,65 \text{ big bags}$$

$$\approx 82 \text{ big bags}$$

El producte es distribueix amb camions que tenen una capacitat per carregar aproximadament 30 big bags de 700 Kg de capacitat cada big bag.

$$N_{camions} = 176,36 \text{ Tn} \cdot \frac{1000 \text{ Kg}}{\text{Tn}} \cdot \frac{1 \text{ camió}}{30 \cdot 700 \text{ Kg}} = 8,4 \frac{\text{camions}}{\text{dia}} \approx 9 \frac{\text{camions}}{\text{dia}}$$

El producte és un sòlid que troba en forma de pols, per tant si es coneix densitat aparent del Sevin® sòlid, que és de 300 Kg/m³ (dada extreta de la fulla de especificacions del Sevin® Bayern) , es pot conèixer el volum i per tant el número de sitges necessàries.

$$V_{\text{Sevin}} = \frac{176365,7 \text{ Kg}}{300 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 587,88 \text{ m}^3$$

Escollint un volum de sitja de 150 m³ i sabent que un terç de la capacitat d'emmagatzematge es tindrà en big bags i la resta en els silos:

$$N_{\text{sitges}} = \frac{391,9 \text{ m}^3}{150 \text{ m}^3 \cdot \frac{90}{100}} = 2,90 \text{ sitges} \approx 3 \text{ sitges}$$

- Dimensions

A continuació s'exposen les equacions utilitzades per al càlcul del volum de la sitja. Es suposa un valor típic de 1,5 per a la relació L/D. El equip consta d'un cos central cilíndric més un fons superior toriesfèric i un fons inferior cònic, per tant el volum de l'equip serà la suma del volum de les parts descrites anteriorment.

$$V_{\text{equip}} = V_{\text{cilindre}} + V_{\text{con}} + V_{\text{toriesfèric}} \quad [\text{Eq. 11.2.4.1}]$$

$$V_{\text{cilindre}} = \pi \frac{D^2}{4} H_{\text{cilindre}} \quad [\text{Eq. 11.2.4.2}]$$

$$V_{\text{con}} = \pi \frac{D^2}{12} H_{\text{con}} \quad [\text{Eq. 11.2.4.3}]$$

$$V_{\text{toriesfèric}} = 0.08089 \cdot D^3 \quad [\text{Eq. 11.2.4.4}]$$

$$H_{\text{cilindre}} = 1.5 \cdot D \quad [\text{Eq. 11.2.4.5}]$$

$$H_{\text{con}} = \frac{Dl - D_s}{2 \cdot \tan(\alpha)} \quad [\text{Eq. 11.2.4.6}]$$

$$H_{\text{toriesfèric}} = 0.1935 \cdot D - 0,455 \cdot t + 3,5 \cdot t \quad [\text{Eq. 11.2.4.7}]$$

La taula 11.2.4.1 mostra les dimensions obtingudes de la sitja calculades amb les expressions anteriors.

Taula 11.2.4.1. Paràmetres de disseny de la sitja de Sevin®

PARÀMETRES DE DISSENY DE LA SITJA DE SEVIN®			
Material		SA-515 grau 55	
SITJA DE SEVIN®			
Volum equip (m³)	154,5	Angle vèrtex con (°)	41
V cilindre (m³)	130,3	Ds (m)	0,48
V fons toriesfèric superior (m³)	9,27	Altura equip (m)	10,67
V fons cònic inferior (m³)	14,98	r [m]	0,480
Altura con (m)	2,48	R [m]	4,8
Altura cilindre (m)	7,2	L [m]	0,989
Altura toriesfèric (m)	0,989	M	1,54
Diàmetre intern (m)	4,8	ρ material (Kg/m3)	7850

- Disseny mecànic

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix la columna de sòlid que hi ha dins del tanc. Si la altura màxima del sòlid és de 9,6 m:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 300 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \cdot 10,67 \cdot 0,9 = 28244 Pa \quad [Eq. 11.1.5]$$

La temperatura i la pressió d'operació és de 25°C i 1 atm respectivament. A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{disseny} = (101325 Pa + 27491 Pa) \cdot 1.15 = 148976 Pa \quad [Eq. 11.1.4]$$

$$T = 25 + 20^\circ C = 45^\circ C \quad [Eq. 11.1.6]$$

La sitja consta d'un fons inferior cònic, un cos cilíndric i un fons superior toriesfèric con ha s'ha dit anteriorment. . Amb les equacions Eq.11.1.1 i Eq.11.1.2, Eq. 11.1.3 es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior, inferior toriesfèric del fons inferior cònic.

El material utilitzat és acer al carboni SA-515 grau 55 ja que el Sevin® no és ni corrosiu, ni explosiu ni inflamable.

Taula 11.2.4.2 Especificacions generals de la sitja Sevin®

ESPECIFICACIONS GENERALS			
T disseny (°C)	45	t toriesfèric (mm)	8,9
P disseny (atm)	1,48	t tori total (mm)	10
t cilindre (mm)	17	S [Psi] SA-515 G55	13800
t total cilindre (mm)	8	E cilindre (m)	0,85
t con (mm)	6,2	E con (m)	1
t con total (mm)	8	E toriesfèric (m)	1

- Pes de l'equip

Per calcular el pes de la sitja sencera s'ha de calcular el pes del fons superior toriesfèric, el del fons inferior cònic i el del cilindre amb les equacions Eq.11.2.1.7, Eq.11.2.1.8, Eq.11.2.1.9, Eq.11.2.1.10 i les equacions Eq.11.2.4.8, Eq. 11.2.4.9 i Eq. 11.2.4.10. Es calcula el pes de les tres estructures per separat i es sumen els pesos.

A continuació la taula 11.2.4.3 mostra els resultats obtinguts per els pesos de la sitja d'emmagatzematge de Sevin®.

Taula 11.2.4.3 Pesos de la sitja de Sevin® buida i en operació

PES DE L'EQUIP	
ρ material (Kg/m ³)	7850
M sòlid (Kg)	41727,3
M cilindre (Kg)	3412,0
M fons toriesf. (Kg)	439,8
M fons cònic (Kg)	1635,8
M buit (Kg)	5487,6
M en operació (Kg)	47214,9

- Venteig

La mida del venteig, com s'ha dit en les notes introductòries ha de ser de mida com a mínim igual o major a la de les canonades de carga o descarrega i en cap cas ser inferiors a 35 mm de diàmetre.

En el cas d'emmagatzematges a pressió atmosfèrica el càlcul del venteig es farà amb les equacions 11.2.1.11 i 11.2.1.12 i 11.2.1.13. En aquest cas el valor de F és 1 ja que no disposa de cap situació descrita en la taula 11.2.1.6. En la taula 11.2.4.4 es mostren m³/h d'aire del venteig atmosfèric.

Taula 11.2.4.4 m³/h d'aire del venteig atmosfèric de la sitja de Sevin®.

	Sitja
A (m ²)	108,57
Q (kJ/h)	6523636,6
m ³ /h d'aire	44,5

11.2.5 Emmagatzematge de NaOH 4% i al 10 %

- Condicions d'emmagatzematge

Es decideix emmagatzemar NaOH ja que es necessita per fer un rentat del catalitzador del reactor R-203 i R-204 i per absorbir les possibles fugues de MIC en cas d'emergència.

Hi hauran dos tancs d'emmagatzematge de NaOH, un per a la dissolució del 4% en pes, que es el que serveix per fer el rentat de catalitzador, i un altre al 10% que serveix per absorbir les possibles fuges de MIC en la columna d'absorció CA-601. Els dos tancs treballen a 1 atm de pressió i temperatura ambient.

- Capacitat d'emmagatzematge

El NaOH que s'ha d'emmagatzemar al 4% és el que es necessita per realitzar cinc rentats del catalitzador i el NaOH al 10% és el necessari per absorbir el volum total de MIC que s'emmagatzema. El volum de NaOH al 10% que es necessita és de 4,61 m³.

La NaOH arriba en camions cisterna els quals tenen una capacitat de 25 m³.

El volum de NaOH al 4% en pes depèn de el n° de cargues en stock que es volen tenir, si es fixa un stock de 5 cargues el volum és:

$$\dot{V}_{NaOH\ 4\%} = 6,57 \frac{m^3}{rentat} \cdot 5 \text{ cargues} = 32,85 m^3 \rightarrow 80\% ple \rightarrow 39,4 m^3$$

- Dimensions

A continuació s'exposen les equacions utilitzades per al càlcul del volum dels tancs d'emmagatzematge de NaOH. Es suposa un valor de 3 per a la relació L/D. Els equips consten d'un cos central cilíndric més un fons superior i inferior torisfèric, per tant el volum de l'equip serà la suma del volum de les parts descrites anteriorment.

$$V_{equip} = V_{cilindre} + V_{torisfèric} + V_{torisfèric} [Eq. 11.2.6.1]$$

$$V_{cilindre} = \pi \frac{D^2}{4} H_{cilindre} [Eq. 11.2.6.2]$$

$$V_{torisfèric} = 0.08089 \cdot D^3 [Eq. 11.2.6.3]$$

$$H_{cilindre} = 3 \cdot D [Eq. 11.2.6.4]$$

$$H_{torisfèric} = 0.1935 \cdot D - 0,455 \cdot t + 3,5 \cdot t [Eq. 11.2.6.5]$$

$$V_{equip} = \pi \frac{D^2}{4} 3 \cdot D + 2 \cdot (0.08089 \cdot D^3) [Eq. 11.2.6.6]$$

L'alçada del líquid es calcula amb les expressions 11.2.6.7, 11.2.6.8 i 11.2.6.9. Per al càlcul de l'alçada del fons torisfèric primer s'ha de suposar un valor d'espessor i després substituir-lo pel

valor final calculat a partir del mètode ASME comprovant que aquest nou valor d'espessor és apte per al disseny de l'equip.

$$V \cdot 0.8\% = \pi \frac{D^2}{4} H_{liq'} + 0.08089 D^3 \quad [\text{Eq. 11.2.6.7}]$$

$$H_{toriesfèric} = 0.1935 \cdot D - 0,455 \cdot t + 3,5 \cdot t \quad [\text{Eq. 11.2.6.8}]$$

$$H_{liq} = H_{liq'} + H_{toriesfèric} \quad [\text{Eq. 11.2.6.9}]$$

Les taules 11.2.6.1 i 11.2.6.2 mostren les dimensions obtingudes dels tancs d'emmagatzematge de NaOH calculades amb les expressions anteriors.

Taula 11.2.6.1. Paràmetres de disseny del tanc d'emmagatzematge de NaOH al 4%.

PARÀMETRES DE DISSENY DELS TANCS DE NaOH			
Material		SA-240 316L	
TANC D'EMMAGATZEMATGE NaOH			
Volum equip (m³)	41,16	T disseny (°C)	45
V cilindre (m³)	38,51	P disseny (atm)	1,90
V fons toriesfèric (m³)	1,32	S (Psi) SA-240 316L	15700
Altura fons toriesfèric (m)	0,492	r [m]	0,254
V fons toriesfèrics (m³)	2,65	R [m]	2,54
Altura cilindre (m)	7,6	L [m]	0,492
Diàmetre intern (m)	2,54	M	1,54
Altura equip	8,58	ρ material [Kg/m3]	7980

Taula 11.2.6.2. Paràmetres de disseny del tanc d'emmagatzematge de NaOH al 10%.

PARÀMETRES DE DISSENY DELS TANCS DE NaOH			
Material		SA-240 316L	
TANC D'EMMAGATZEMATGE NaOH			
Volum equip (m³)	4,98	T disseny (°C)	45
V cilindre (m³)	4,66	P disseny (atm)	1,56
V fons toriesfèric (m³)	0,158	S (Psi) SA-240 316L	15700
Altura fons toriesfèric (m)	0,242	r [m]	0,125
V fons toriesfèrics (m³)	0,316	R [m]	1,25
Altura cilindre (m)	3,8	L [m]	0,242
Diàmetre intern (m)	1,25	M	1,54
Altura equip	4,28	ρ material [Kg/m3]	7980

- Disseny mecànic

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix la columna de líquid que hi ha dins del tanc. Com els tancs estan col·locats de manera vertical els càlculs es fan en base a l'altura de l'equip i amb l'equació 11.1.4.

Per al tanc de NaOH al 4%:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 1043,1 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \cdot 6,82 \cdot 0,8 = 65712,2 Pa = 0,65 atm \quad [Eq. 11.1.5]$$

A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{disseny} = (1 atm + 0,65 atm) \cdot 1,15 = 1,90 atm \quad [Eq. 11.1.4]$$

$$T = 25 ^\circ C + 20 ^\circ C = 45 ^\circ C \quad [Eq. 11.1.6]$$

Per al tanc de NaOH al 10%:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 1110 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \cdot 3,36 \cdot 36540 Pa = 0,36 atm [Eq. 11.1.5]$$

A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{disseny} = (1 atm + 0,36 atm) \cdot 1.15 = 1,54 atm [Eq. 11.1.4]$$

$$T = 25\text{ }^{\circ}C + 20^{\circ}C = 45^{\circ}C [Eq. 11.1.6]$$

Els tancs consten d'un fons inferior i superior toriesfèric i un cos cilíndric. Amb les equacions Eq.11.1.1 i Eq.11.1.2 es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior i inferior toriesfèric.

El material que s'ha escollit és el acer inoxidable AISI 316L, degut a que el NaOH no és compatible amb els materials que continguin Al, Sn i Zn. En taula 11.2.1.3 mostrada en l'apartat d'emmagatzematge de MMA es pot observar la composició en pes del metall AISI 316L.

Taula 11.2.6.3. Especificacions generals del tanc d'emmagatzematge de NaOH al 4%.

ESPECIFICACIONS GENERALS			
T disseny (°C)	4	t total toriesfèric (mm)	5
P disseny (atm)	1,94	S [Psi] SA-240 316L	15700
t cilindre (mm)	4	E cilindre (m)	0,85
t total cilindre (mm)	5	Presió externa (atm)	1
t toriesfèric (mm)	3,5	E toriesfèric (m)	1

Taula 11.2.6.4. Especificacions generals del tanc d'emmagatzematge de NaOH al 10%.

ESPECIFICACIONS GENERALS			
T disseny (°C)	4	t total toriesfèric (mm)	5
P disseny (atm)	1,54	S [Psi] SA-240 316L	15700
t cilindre (mm)	4	E cilindre (m)	0,85
t total cilindre (mm)	5	Presió externa (atm)	1
t toriesfèric (mm)	3,5	E toriesfèric (m)	1

- Pes de l'equip

Per calcular el pes dels tancs sencers s'ha de calcular el pes dels fons toriesfèrics i el del cilindre amb les equacions Eq.11.2.1.7, Eq.11.2.1.8, Eq.11.2.1.9, Eq.11.2.1.10. Es calcula el pes de les tres estructures per separat i es sumen els pesos.

A continuació les taules 11.2.6.5 i 11.2.6.6 mostren els resultats obtinguts per els pesos dels tancs d'emmagatzematge de NaOH al 4 i 10 % respectivament.

Taula 11.2.6.5 Pesos del tanc d'emmagatzematge de NaOH al 4 % buit i en operació.

PES DE L'EQUIP NaOH 4%	
ρ material (Kg/m ³)	7980
M líquid (Kg)	34347,9
M cilindre (Kg)	1256,0
M fons toriesf. (Kg)	131,2
M buit (Kg)	1387,1
M en operació (Kg)	35735,0

Taula 11.2.6.6 Pesos del tanc d'emmagatzematge de NaOH al 10 % buit i en operació.

PES DE L'EQUIP NaOH 10%	
ρ material (Kg/m ³)	7980
M líquid (Kg)	4421,6
M cilindre (Kg)	298,3
M fons toriesf. (Kg)	30,4
M buit (Kg)	328,7
M en operació (Kg)	4750,3

- Venteig

Els sistemes de venteig son sistemes dissenyats per prevenir els efectes de les alteracions de la pressió interna de un recipient d'emmagatzematge. La mida del venteig d'un tanc, com s'ha dit en les notes introductòries ha de ser de mida com a mínim igual o major a la de les canonades de carga o descarrega i en cap cas ser inferiors a 35 mm de diàmetre.

En el cas d'emmagatzematges atmosfèrics o a baixa pressió la capacitat total de venteig pot ser determinada per les equacions 11.2.1.11, 11.2.1.12 i 11.2.1.13, i a més en aquest cas es tria un valor unitari pel factor de reducció adimensional F. La taula 11.2.6.5 mostra els resultats del venteig per als tancs de NaOH al 4 i 10%.

Taula 11.2.6.5 m³/h d'aire dels venteigs atmosfèrics dels tancs d'emmagatzematge de NaOH.

	NaOH 4%	NaOH 10%
A (m ²)	60,65	14,92
Q (kJ/h)	4046598	1281586
m ³ /h d'aire	57,33	16,6

- Cubetes de retenció

El NaOH està classificat en el grup D segons la norma ITC-MIE-APQ per tant s'apliquen les mesures de seguretat i dimensionament pròpies d'aquest grup com es descriu en l'apartat de "Seguretat i Higiene".

Els tres tancs es col·locaran en una fila de 3 on la distància en projecció horitzontal entre la paret dels tancs i la paret interior de la cubeta serà com a mínim de 1 m. Per a productes de la classe D aquesta pot reduir-se a 0,8 però per a maximitzar la seguretat es decideix aplicar la distància de 1 m.

Quan hi han varis tancs en una mateixa cubeta, la capacitat d'aquest serà, al menys, igual o major dels dos valors següents:

1. El 100% de la capacitat total de tots els tancs

$$Capacitat = 41,16 \text{ m}^3$$

2. El 10% de la capacitat del tanc amb més capacitat.

$$Capacitat = 41,16 \cdot 0,1 + 4,97 = 9,08 \text{ m}^3$$

Per tant, s'escull com a valor el 41,16 m³ com a capacitat de la cubeta dels tancs de NaOH. Encara que els tancs s'ompen fins al 80% es dissenyen les cubetes amb el 100 % de la capacitat del tanc. La normativa fixa un coeficient de 0,25 per a distàncies entre tancs del grup D. S'agafa el diàmetre del tanc més gran per maximitzar la seguretat.

$$Distancia \text{ entre tancs} = 0,25 \cdot D = 0,57 \text{ m [Eq. 11.2.6.7]}$$

On:

D és el diàmetre del tanc més gran (NaOH 4%)

Per tant la longitud, l'amplada de la cubeta i l'àrea de la cubeta es calculen amb les expressions presentades a continuació:

$$Longitud = 0,57 + 2 \cdot 1 + 2,54 + 1,25 = 6,36 \text{ m} \sim 6,5 \text{ m [Eq. 11.2.6.8]}$$

$$Amplada = 2 \cdot 1 + 2,54 = 4,54 \text{ m} \sim 5 \text{ m [Eq. 11.2.6.9]}$$

$$A_{cubeta} = 6,5 \text{ m} \cdot 5 \text{ m} = 32,5 \text{ m}^2 \text{ [Eq. 11.2.6.10]}$$

Per calcular l'àrea útil de la cubeta s'ha de restar l'àrea dels tancs.

$$A_{\text{útil}} = 32,5 \text{ m}^2 - \left(\frac{\pi}{4} \cdot 2,54^2 \right) - \left(\frac{\pi}{4} \cdot 1,25^2 \right) = 26,2 \text{ m}^2 \text{ [Eq. 11.2.6.11]}$$

Amb la capacitat de la cubeta i l'àrea útil i l'equació 11.2.6.12 es pot calcular l'altura de la cubeta.

$$H = \frac{41,16 \text{ m}^3}{26,2 \text{ m}^2} = 1,57 \text{ m} \sim 1,6 \text{ m} \text{ [Eq. 11.2.6.12]}$$

11.2.6 Emmagatzematge HCL 37% en pes

- Condicions d'emmagatzematge

El HCL s'obté com producte en les reaccions del reactor R-201 i R-202 respectivament. Es decideix comercialitzar aquest producte en forma àcida dissolta en aigua a concentració de 37% en pes. La dissolució de àcid clorhídric al 37% es forma en les torres d'absorció CA-301 i CA-302 i aquest s'emmagatzema per la seva posterior comercialització.

- Capacitat d'emmagatzematge

Es fixa un stock de 3 dies ja que no és tracta d'un reactiu o producte principal del procés. Si es formen 38,47 m³/dia de HCL, la quantitat en stock que es tindrà serà:

$$\dot{V}_{HCL\ 37\%} = 38,47 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \cdot 3 \text{ dies} = 115,4 \text{ m}^3 \rightarrow 80\% \text{ ple} \rightarrow 138,5 \text{ m}^3$$

Es compren 3 tancs d'emmagatzematge de 45 m³ a l'empresa REFROPLAS. Són tancs fabricats amb materials contituïts de fibra de vidre i resines termostables resistents a la corrosió del àcid clorhídric. Donat el alt contingut en reforç i a la orientació del mateix el tanc proporciona propietats físiques i mecàniques excepcionals difícils d'aconseguir amb materials tradicionals com l'acer, l'alumini o la fusta.

La recollida del subproducte es farà mitjançant camions amb una capacitat de 25m³, per tant el nº de camions al dia seran:

$$N_{\text{camions}} = 45 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \cdot \frac{1 \text{ camió}}{25 \text{ m}^3} = 1,8 \frac{\text{camions}}{\text{dia}} \approx 2 \frac{\text{camions}}{\text{dia}}$$

- Dimensions

En la taula 11.2.6.1 es proporcionen diferents dimensions per diferents capacitats i diàmetres. La fletxa vermella indica la selecció del tanc de HCL (45m³, H=7,86; D=2,7). La relació de L/D del tanc és d'aproximadament 3.

Taula 11.2.6.1 Capacitat i dimensions del tanc d'emmagatzematge de HCL.

CAPACIDADES Y DIMENSIONES PARA TANQUES VERTICALES DE ALMACENAMIENTO										
ALTURA (mm)		DIÁMETRO INTERNO (mm)								
CAPACIDAD (gal)	CAPACIDAD (L)	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300	3600	3660
793	3.000	1698	-	-	-	-	-	-	-	-
1.057	4.000	2264	-	-	-	-	-	-	-	-
1.321	5.000	2829	1965	-	-	-	-	-	-	-
1.585	6.000	3395	2358	-	-	-	-	-	-	-
2.113	8.000	4527	3144	2310	-	-	-	-	-	-
2.642	10.000	5659	3930	2887	-	-	-	-	-	-
3.170	12.000	6791	4716	3465	2653	-	-	-	-	-
3.963	15.000	-	5895	4331	3316	-	-	-	-	-
4.755	18.000	-	7074	5197	3979	3144	-	-	-	-
5.283	20.000	-	7860	5774	4421	3493	-	-	-	-
6.604	25.000	-	-	7218	5526	4366	3537	-	-	-
7.925	30.000	-	-	8661	6631	5240	4244	3508	-	-
9.246	35.000	-	-	10105	7737	6113	4951	4092	-	-
10.567	40.000	-	-	-	8842	6986	5659	4677	3930	3802
11.888	45.000	-	-	-	9947	7860	6366	5261	4421	4277
13.209	50.000	-	-	-	11052	8733	7074	5846	4912	4752
14.530	55.000	-	-	-	-	9606	7781	6431	5403	5228
15.850	60.000	-	-	-	-	10479	8488	7015	5895	5703
17.171	65.000	-	-	-	-	11353	9196	7600	6386	6178
18.492	70.000	-	-	-	-	-	9903	8184	6877	6653
19.813	75.000	-	-	-	-	-	10610	8769	7368	7129
21.134	80.000	-	-	-	-	-	11318	9353	7860	7604
22.455	85.000	-	-	-	-	-	-	9938	8351	8079
23.776	90.000	-	-	-	-	-	-	10523	8842	8554
25.096	95.000	-	-	-	-	-	-	11107	9333	9030
26.417	100.000	-	-	-	-	-	-	11692	9824	9505
27.738	105.000	-	-	-	-	-	-	-	10316	9980
29.059	110.000	-	-	-	-	-	-	-	10807	10455

- Disseny mecànic i pesos

El fabricant no especifica el gruix del tanc, però en la figura 11.2.6.1 es mostra les parts de que consten les parets del tancs.

✓

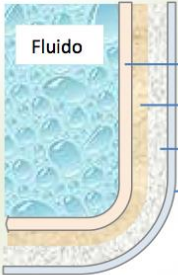
TANQUES



Tanques de alta resistencia mecánica y a la corrosión, diseñados para el manejo de productos químicos, agua, alimentos o cualquier producto sensible a la contaminación.

Fabricación bajo normas NTC 2888, NTC 2889 y NTC 2890 (Equivalentes ASTM D3299, ASTM D4097 y ASTM C582-02).

Fluido



Capas	Composición	Función
Superficie Interior	▶Resina +Velo de superficie▶	▶ Protección contra la corrosión del fluido.
Capa Interior	▶Resina + Fibra de vidrio ▶	▶ Brinda resistencia química y mecánica.
Capa Estructural	▶Resina + Fibra de vidrio ▶	▶ Brinda resistencia Mecánica.
Superficie Exterior	▶Resina (Top Coat)	▶ Protección al medio ambiente. (Opcional)

Taula 11.2.6.1 Capacitat i dimensions del tanc d’emmagatzematge de HCL.

Les parets dels tancs tenen quatre capes, on les dos primeres ofereixen protecció contra la corrosió i resistència química i mecànica, la tercera només ofereix resistència mecànica i la quarta és opcional i serveix per protegir el tanc del medi ambient. Pel que fa al pes, la fitxa tècnica del fabricant especifica que un tanc de 15m³ pesa al voltant de 500 kg, per tant aplicant una regla de tres es pot obtenir un valor aproximat del pes dels tancs de HCL.

Taula 11.2.6.2 Pesos dels tancs d’emmagatzematge aproximats de HCL buit i en operació.

PES DE L'EQUIP HCL	
M líquid (Kg)	53550
M buit (Kg)	1350
M en operació (Kg)	54900

- Tanc pulmó de HCL (DP-308)

S'instal·la un dipòsit pulmó de les mateixes característiques i del mateix fabricant que els tancs de HCL però amb una capacitat de 15 m³ i un pes de 500 Kg.

- Cubetes de retenció

El HCL, igual que el NaOH, està classificat en el grup D segons la norma ITC-MIE-APQ per tant s'apliquen les mesures de seguretat i dimensionament pròpies d'aquest grup com es descriu en l'apartat de "Seguretat i Higiene".

S'ha decidit no emmagatzemar el NaOH en la mateixa cubeta que el HCL ja que aquests dos compostos són reactius i les normes seguides diuen que no es poden emmagatzemar junts dos compostos reactius.

Els dos tancs es col·locaran en una fila de 2 on la distància en projecció horitzontal entre la paret dels tancs i la paret interior de la cubeta serà com a mínim de 1 m. Per a productes de la classe D aquesta pot reduir-se a 0,8 però per a maximitzar la seguretat es decideix aplicar la distància de 1 m.

Quan hi han varis tancs en una mateixa cubeta, la capacitat d'aquest serà, al menys, igual o major dels dos valors següents:

3. El 100% de la capacitat total de tots els tancs

$$Capacitat = 45 \text{ m}^3$$

4. El 10% de la capacitat del tanc amb més capacitat.

$$Capacitat = 3 \cdot 50,13 \cdot 0,1 = 15,04 \text{ m}^3$$

Per tant, s'escull com a valor el 41,16 m³ com a capacitat de la cubeta dels tancs de NaOH. Encara que els tancs s'ompen fins al 80% es dissenyen les cubetes amb el 100 % de la capacitat del tanc. La normativa fixa un coeficient de 0,25 per a distàncies entre tancs del grup D.

$$Distancia \text{ entre tancs} = 0,25 \cdot D = 0,607 \text{ m [Eq. 11.2.6.7]}$$

On:

D és el diàmetre del tanc (m).

Per tant la longitud, l'amplada de la cubeta i l'àrea de la cubeta es calculen amb les equacions 11.2.6.8, 11.2.6.9 i 11.2.6.10.

$$Longitud = 2 \cdot 0,607 + 2 \cdot 1 + 3 \cdot 2,7 = 11,31 \text{ m} \sim 11,5 \text{ m} \quad [Eq. 11.2.6.8]$$

$$Amplada = 2 \cdot 1 + 2,7 = 4,7 \text{ m} \sim 5 \text{ m} \quad [Eq. 11.2.6.9]$$

$$A_{cubeta} = 11,5 \text{ m} \cdot 5 \text{ m} = 57,5 \text{ m}^2 \quad [Eq. 11.2.6.10]$$

Per calcular l'àrea útil de la cubeta s'ha de restar l'àrea dels tancs.

$$A_{\text{útil}} = 57,5 \text{ m}^2 - \left(3 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2,7^2 \right) = 40,32 \text{ m}^2 \quad [Eq. 11.2.6.11]$$

Amb la capacitat de la cubeta i l'àrea útil i l'equació 11.2.6.12 es pot calcular l'altura de la cubeta.

$$H = \frac{45 \text{ m}^3}{40,3 \text{ m}^2} = 1,11 \text{ m} \sim 1,25 \text{ m} \quad [Eq. 11.2.6.12]$$

11.2.7 Emmagatzematge de Toluè

- Condicions d'emmagatzematge

El toluè és el dissolvent apolar escollit per dissoldre el MCC, també s'utilitza per bescanviar calor en el reactor R-203 i R-204 i per absorbir el MCC en la columna. És una substància molt inflamable i catalogada en la classe B1 segons la norma ITC-MIE-APQ. El toluè s'emmagatzema a temperatura ambient i pressió atmosfèrica.

- Capacitat d'emmagatzematge

La capacitat d'emmagatzematge que hauran de tindre els tancs de toluè serà tot el toluè que es necessiti per posar la planta en marxa. S'ha determinat tot el toluè que hi han en els equips ja que aquest serà el toluè necessari per posar la planta en marxa. A aquest volum s'aplica un coeficient de sobredimensionament de 0,4 per assegurar el subministrament de toluè. Aquest càlcul de la capacitat d'emmagatzematge s'ha realitzat d'aquesta manera ja que les pèrdues de toluè mentre la planta està en operació són molt minses perquè es recupera gairebé tot el toluè que s'utilitza.

La capacitat d'emmagatzematge que tenen els tancs de toluè és de 500m^3 i reparteixen en 4 tancs de 150m^3 .

- Dimensions

A continuació s'exposen les equacions utilitzades per al càlcul del volum dels tancs d'emmagatzematge de toluè. Es suposa un valor de 2 per a la relació L/D. El equip consta d'un cos central cilíndric més un fons superior i inferior toriesfèric ,per tant el volum de l'equip es calcularà amb les mateixes equacions que s'utilitzen en els tancs de MMA, fosc i MIC encara que la disposició del tanc en aquest cas és vertical i no horitzontal.

L'alçada del líquid es calcula amb les expressions 11.X.X, 11.X.X i 11.X.X. La taula 11.2.7.1 mostra les dimensions obtingudes dels tancs d'emmagatzematge de toluè calculades amb les expressions anteriors.

Taula 11.2.7.1 Paràmetres de disseny dels tancs d'emmagatzematge de toluè.

PARÀMETRES DE DISSENY DELS TANCs DE HCL			
Material		AISI 316L	
TANC D'EMMAGATZEMATGE HCL			
Volum equip (m³)	152,6	T disseny (°C)	45
V cilindre (m³)	138,4	P disseny (atm)	1,95
V fons toriesfèric (m³)	7,13	S (Psi) SA-240 316L	15700
Altura fons toriesfèric (m)	0,876	r [m]	0,445
V fons toriesfèrics (m³)	14,26	R [m]	4,45
Altura cilindre (m)	8,9	L [m]	0,876
Diàmetre intern (m)	4,45	M	1,54
Altura equip	10,65	ρ material [Kg/m3]	7980

- Disseny mecànic

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix la columna de líquid que hi ha dins del tanc. Com els tancs estan col·locats de manera vertical els càlculs es fan en base a l'altura de l'equip i amb l'equació 11.1.5.

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 1190 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 8,27 m \cdot 0,8 = 70269,7 Pa$$

$$= 0,693 atm [Eq. 11.1.5]$$

A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{disseny} = (1 atm + 0,693 atm) \cdot 1,15 = 1,95 atm [Eq. 11.1.4]$$

$$T = 25 ^\circ C + 20 ^\circ C = 45 ^\circ C [Eq. 11.1.6]$$

Els tancs consten d'un fons inferior i superior toriesfèric i un cos cilíndric. Amb les equacions Eq.11.1.1 i Eq.11.1.2 es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior i inferior toriesfèric.

El material que s'ha escollit és el AISI 316L ja que el toluè no presenta cap tipus d'incompatibilitat. La taula 11.2.7.2 mostra les especificacions generals dels tancs de toluè

Taula 11.2.7.2 Especificacions generals dels tancs d'emmagatzematge de toluè

ESPECIFICACIONS GENERALS			
T disseny (°C)	45	t total toriesfèric (mm)	5
P disseny (atm)	1,95	S [Psi] SA-240 316L	15700
t cilindre (mm)	4	E cilindre (m)	0,85
t total cilindre (mm)	5	Presió externa (atm)	1
t toriesfèric (mm)	3,5	E toriesfèric (m)	1

- Pes de l'equip

Per calcular el pes dels tancs sencers s'ha de calcular el pes dels fons toriesfèrics i el del cilindre amb les equacions Eq.11.2.1.7, Eq.11.2.1.8, Eq.11.2.1.9, Eq.11.2.1.10. Es calcula el pes de les tres estructures per separat i es sumen els pesos.

A continuació la taula 11.2.7.3 mostra els resultats obtinguts per els pesos dels tancs d'emmagatzematge de toluè.

Taula 11.2.7.3. Pesos del tanc d'emmagatzematge de toluè buits i en operació.

PES DE L'EQUIP	
ρ material (Kg/m ³)	7980
M líquid (Kg)	105884,3
M cilindre (Kg)	2483,6
M fons toriesf. (Kg)	383,9
M buit (Kg)	2867,5
M en operació (Kg)	108751,8

- Venteig

Els sistemes de venteig son sistemes dissenyats per prevenir els efectes de les alteracions de la pressió interna de un recipient d'emmagatzematge. La mida del venteig d'un tanc, com s'ha dit en les notes introductòries ha de ser de mida com a mínim igual o major a la de les canonades de carga o descarrega i en cap cas ser inferiors a 35 mm de diàmetre. Els següents tancs i dipòsits estan internitzats amb nitrogen llavors s'ha de calcular el venteig dels equips amb les equacions 11.2.1.1.12, 11.2.1.1.13 i 11.2.1.1.14.

Taula 11.2.7.4 kg/h de vapor de líquid dels tancs d'emmagatzematge de toluè.

	HCL 37%
A (m ²)	124,4
Q (kJ/h)	2188444
Kg/h d'aire	66,3

- Cubetes de retenció

El toluè, com ja s'ha dit anteriorment, està classificat en el grup B1 segons la norma ITC-MIE-APQ per tant s'apliquen les mesures de seguretat i dimensionament pròpies d'aquest grup com es descriu en l'apartat de "Seguretat i Higiene".

Els 4 tancs es col·loquen en 2 files de dos on la distància en projecció horitzontal entre la paret dels tancs i la paret interior de la cubeta serà com a mínim de 1 m i la distància entre cubetes de 2,5 m per garantir un bon accés als tancs.

Quan hi han varis tancs en una mateixa cubeta, la capacitat d'aquest serà, al menys, igual o major dels dos valors següents:

5. El 100% de la capacitat total de tots els tancs

$$Capacitat = 150 \text{ m}^3$$

6. El 10% de la capacitat del tanc amb més capacitat.

$$Capacitat = 2 \cdot 150 \cdot 0,1 = 30 \text{ m}^3$$

Per tant, s'escull com a valor el 60 m³ com a capacitat de la cubeta dels tancs de toluè. Encara que els tancs s'ompen fins al 80% es dissenyen les cubetes amb el 100 % de la capacitat del tanc. La normativa fixa un coeficient de 0,5 per a distàncies entre tancs del grup B1.

$$Distancia \text{ entre tancs} = 0,5 \cdot D = 2,225 \text{ m [Eq. 11.2.6.7]}$$

On:

D és el diàmetre del tanc (m).

Per tant la longitud, l'amplada de la cubeta i l'àrea de la cubeta es calculen amb les equacions 11.2.6.8, 11.2.6.9 i 11.2.6.10.

$$Longitud = 11,31 \text{ m} \sim 13,5 \text{ m [Eq. 11.2.6.8]}$$

$$Amplada = 6,45 \text{ m} \sim 6,5 \text{ m [Eq. 11.2.6.9]}$$

$$A_{cubeta} = 13,5 \text{ m} \cdot 6,5 \text{ m} = 87,75 \text{ m}^2 \quad [Eq. 11.2.6.10]$$

Per calcular l'àrea útil de la cubeta s'ha de restar l'àrea dels tancs.

$$A_{útil} = 56,6 \text{ m}^2 \quad [Eq. 11.2.6.11]$$

Amb la capacitat de la cubeta i l'àrea útil i l'equació 11.2.6.12 es pot calcular l'altura de la cubeta.

$$H = \frac{150 \text{ m}^3}{56,6 \text{ m}^2} = 2,64 \text{ m} \sim 2,7 \text{ m} \quad [Eq. 11.2.6.12]$$

11.3 Reactor de formació de clorur de metilcarbamil R-201

El primer pas en la producció de carbaril és la reacció de formació de clorur de metilcarbamil (MCC) a partir de monometilamina (MMA) i fosgè. Aquesta reacció succeeix en fase gas introduint el fosgè en excés per garantir la total conversió de MMA a MCC. A continuació, s'esdevé la dehidrocloració tèrmica o reacció de piròlisi que descompon el MCC en metil isocianat (MIC). Ambdós etapes es porten a terme en continu a dos reactors separats (R-201 i R-202 respectivament).

11.3.1. Reacció de formació de clorur de metilcarbamil

La reacció en fase gas de MMA (CH_3NH_2) amb fosgè (COCl_2) es dona de forma continua al reactor multitubular R-201 de carcassa i tubs segons la següent expressió [Rx. 11.3.1.1], formant un mol de MIC (CH_3NCO) i dos de clorur d'hidrogen (HCl) per cada mol de MMA:



Alhora, els productes resultants de l'anterior reacció estableixen un equilibri termodinàmic [Rx. 11.3.1.2] amb el MCC, el qual es considerarà com a producte únic (assumint que la MMA reacciona totalment en presència de fosgè en excés) per fer el disseny del reactor R-201, al tenir l'equilibri desplaçat completament cap a la dreta.



És imprescindible garantir una bona mescla a la fase gas d'ambdós reactius establint un flux suficientment turbulent per assegurar una reacció completa i quasi instantània. Els productes de la reacció es mantenen tota l'estona en fase gas al llarg de la reacció.

Aquesta reacció és fortament exotèrmica amb una cinètica extremadament ràpida, fet que implica el disseny d'un bescanvi de calor amb una elevada transferència de calor per mantenir el reactor R-201 isoterm a la temperatura d'operació fixada. Per això, s'utilitza l'oli tèrmic *Dowtherm J* com a refrigerant, bescanviant satisfactòriament la calor de reacció a les condicions d'operació donades. L'oli tèrmic entra en contacte amb els tubs calents on succeeix la reacció fluint en cocorrent respecte els reactius, recorrent la carcassa del reactor multitubular tal i com mostra de forma esquemàtica la figura 11.3.1.1.

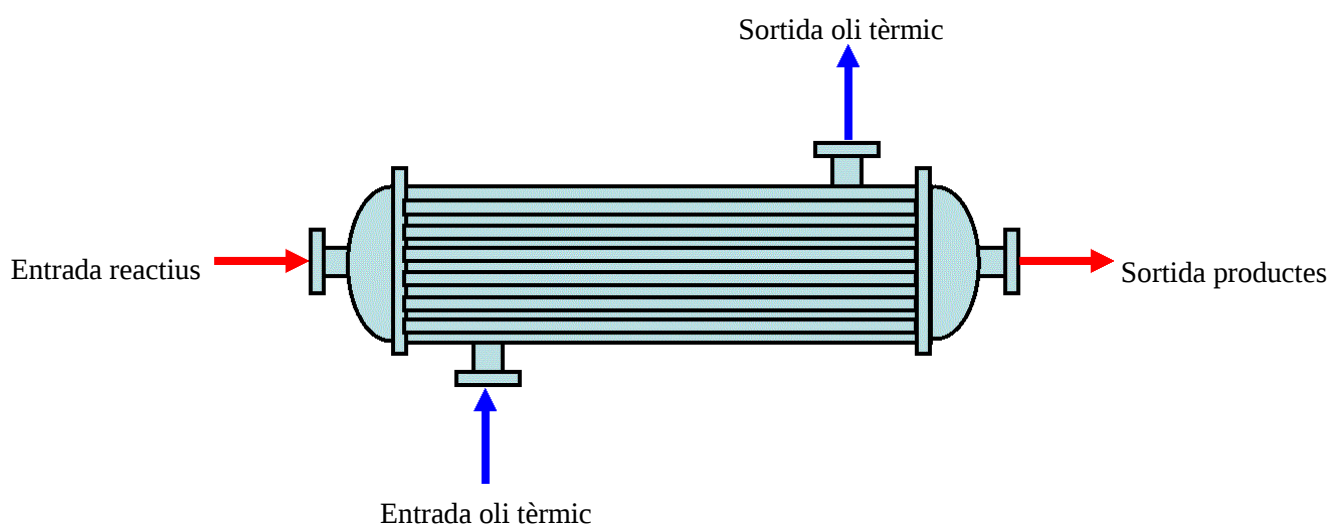


Figura 11.3.1.1 Disseny multitubular de carcassa i tubs del reactor R-201.

11.3.2. Condicions d'operació

La temperatura d'operació del reactor R-201 ha de ser igual o superior als 240°C per assolir el 100% de conversió de MMA en MCC, essent el valor de disseny escollit de 260°C. Pel mateix motiu, s'introdueix un excés de fosc del 25% respecte la relació molar MMA:Fosc. El temps de residència es troba dins el rang teòric de 0,67 a 2,5 segons, on el valor òptim dins l'interval segons les fonts bibliogràfiques correspon a 1,5 segons. La pressió d'operació és 1 atm. La taula 11.3.2.1 resumeix les condicions d'operació relatives al reactor R-201.

Taula 11.3.2.1. Condicions d'operació a l'entrada i a la sortida del reactor R-201.

CONDICIONS D'OPERACIÓ DEL REACTOR R-201		
Rendiment (%)	100	
Calor de reacció (kJ/kmol)	-19000	
Puresa al corrent producte de MCC (%)	44,44	
PARÀMETRE	ENTRADA	SORTIDA
Temperatura MMA (°C)	240	-
Temperatura foscà (°C)	205	260
Temperatura oli tèrmic (°C)	90	130
Temperatura MCC (°C)	-	260
Temperatura HCl (°C)	-	260
Cabal màssic total (kmol/h)	1485,15	1485,15
Pes molecular mescla (kg/kmol)	68,76	68,76
Densitat mescla (kg/m³)	1,576	1,577
Viscositat cinemàtica mescla (Pa·s)	$1,184 \cdot 10^{-5}$	$1,310 \cdot 10^{-5}$
Capacitat calorífica mescla (kJ/(kmol·°C))	71,17	77,59
Densitat oli tèrmic (kg/m³)	825,4	809,4
Viscositat dinàmica oli tèrmic (Pa·s)	$5,10 \cdot 10^{-4}$	$4,30 \cdot 10^{-4}$
Capacitat calorífica oli tèrmic (J/(kg·°C))	1,989	2,058

11.3.3. Paràmetres de disseny

Per tal de realitzar el disseny del reactor R-201 s'ha emprat el mètode de Kern per obtenir les especificacions dels tubs per on passa la mescla reactant i d'altra banda la carcassa que contindrà l'oli tèrmic. El resultat de l'aplicació d'aquest mètode es mostren a la taula 11.3.3.1.

Taula 11.3.2.1. Paràmetres de disseny del reactor R-201 aplicant el mètode de Kern.

PARÀMETRES DE DISSENY DEL REACTOR R-201			
Material		Hastelloy C-276	
Tensió de trencament a 260°C - S (psi)		106000	
Tensió de trencament a 260°C - S (N/mm ²)		731	
Densitat a 25°C (kg/m ³)		8690	
Volum total (m ³)		2,07	
Pes buit (kg)		5093	
Pes en operació (kg)		7398	
Tubs			
Número total de tubs	60	Longitud 1 tub (m)	18,00
Cabal volumètric tubs (m ³ /h)	62,94	Velocitat superficial (m/s)	12,00
Temps de residència (s)	1,5	Àrea bescanvi tub (m ²)	2,82
Volum 1 tub (m ³)	0,0262	Volum total tubs (m ³)	0,53
Àrea pas 1 tub (m ²)	0,00146	Àrea bescanvi total tubs (m ²)	36,53
Diàmetre intern 1 tub (mm)	43	Reynolds per tubs	39464,14
Diàmetre extern 1 tub (mm)	50	Factor de fricció de Fanning	0,01813
Gruix 1 tub (mm)	3,4	ΔP/L (Pa/m)	191,13
Carcassa: tipus P (Outside Packed Head)			
Cabal màssic oli tèrmic (kg/h)	3901,59	Número de passos per carcassa	1
Reynolds per carcassa	33928,46	Longitud carcassa (m)	4,5
Geometria pitch	Triangular	Distància entre pantalles (m)	0,34
Número de tubs per pas	15	Baffle cut (m)	0,17
Número de passos per tubs	4	Número de pantalles deflectores	12
K1 (funció del pitch)	0,175	Diàmetre feix tubs - Db (m)	0,64
n1 (funció del pitch)	2,285	Ds-Db (mm)	38
Volum carcassa (m ³)	1,66	Diàmetre carcassa - Ds (m)	0,68
Fons superior i inferior toriesfèrics			
Alçada part esfèrica toriesfèric - h1 (mm)		130	
Alçada part recta toriesfèric - h2 (mm)		14	
Alçada total fons toriesfèric - H (mm)		144	
Radi gran fons (mm)		680	
Radi petit fons (mm)		68	
Volum fons toriesfèric (m3)		0,21	

El volum total equival al volum equivalent de carcassa [Eq. 11.X.X] el qual inclou també el volum dels tubs [Eq. 11.X.X].

El càlcul del pes buit es fa amb les equacions [Eq. 11.X.X] i [Eq. 11.X.X]. El càlcul del pes del reactor R-201 en operació es fa amb l'equació amb els volums interns [Eq. 11.3.3.1].

$$M_{operació} = Pes\ buit + V_{tubs} \cdot \overline{\rho_{mescla}} + (V_{carcassa} + V_{toriesfèric} \cdot 2) \cdot \overline{\rho_{oli\ tèrmic}} \quad [Eq. 11.3.3.1]$$

Els càlculs de les alçades de cada part del toriesfèric es fan amb les equacions [Eq. 11.X.X] i [Eq. 11.X.X].

La longitud de tubs tabulada correspon a la zona on succeeix la reacció però s'ha de tindre en compte que a ambdós costats dels capçals s'haurà d'afegir 2,5 centímetres per fer les unions amb els capçals toriesfèrics.

11.3.4. Balanç de matèria

Partint de l'objectiu principal de producció de 10500 tones anuals de carbaril, es determina la quantitat necessària de MMA i foscè a reaccionar al R-201 començant el balanç de matèria del procés global des del final cap al principi. S'estableix com a criteri de disseny per tots els equips un sobre dimensionament del 30% (ja que la zona de purificació del carbaril implica unes pèrdues d'aproximadament un 10% de producte un cop simulat amb el software Aspen HYSYS v. 8.2, i al final resulta en un 20% de sobre dimensionament final).

Amb l'estequiometria i el rendiment de les reaccions [Rx. 11.3.1] i [Rx. 11.3.2] i sabent que el procés es dona en continu, es sap la quantitat de reactius que entren al reactor R-201 [Rx. 11.3.3]:



$$E + G = S + A \rightarrow A = 0 \rightarrow G = (S - E) = 0$$

$$n_{\text{MMA},E} = n_{\text{MCC},S} = n_{\text{HCl},S} \quad 1,25 \cdot n_{\text{MMA},E} = n_{\text{Foscè},E} \quad n_{\text{Foscè},S} = 0,25 \cdot n_{\text{MMA},E}$$

$$(S - E) = (n_{\text{MCC},S} + n_{\text{HCl},S} + n_{\text{Foscè},S} - n_{\text{MMA},E} - n_{\text{Foscè},E}) \quad G = n_{\text{MCC},S} + n_{\text{HCl},S}$$

La taula 11.3.4.1 mostra el resum de cabals i fraccions a l'entrada i a la sortida del reactor R-201 per tal d'assolir 10500 tones de producció anuals de carbaril.

Taula 11.3.4.1. Corrents d'entrada i sortida al reactor R-201 i les corresponents fraccions.

CABALS DE DISSENY AL REACTOR R-201					
ENTRADA REACTOR MCC					
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	m³/h	% en pes	% molar
MMA	9,60	298,16	419,58	20	44
Fosgè	12,00	1186,99	524,47	80	56
SORTIDA REACTOR MCC					
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	m³/h	% en pes	% molar
MCC	9,60	897,70	419,58	60	44
Fosgè	2,40	237,40	104,89	16	11
HCl	9,60	350,02	419,58	24	44
BALANÇ TOTAL					
Cabals totals (entrada = sortida)	21,60	1485,11	944,05	100	100

La conversió de cabals inclosos a la taula 11.3.4.1 es pot realitzar mitjançant les dades de la taula 11.3.4.2 tal i com mostren les equacions [Eq. 11.3.4.1] i [Eq. 11.3.4.2]. El càlcul de les fraccions de cada component als corrents d'entrada i sortida al reactor R-201 es realitza amb les equacions [Eq. 11.3.4.3] i [Eq. 11.3.4.4].

Taula 11.3.4.2. Dades dels pesos moleculars dels components al reactor R-201.

	MMA	Fosgè	MCC	HCl	MIC
Pes molecular (kg/kmol)	31,058	98,916	93,51	36,46	57,052

$$m_i = n_i \cdot PM_i = \left[\frac{\text{kmol}}{h} \right] \cdot \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right] = \left[\frac{\text{kg}}{h} \right] \quad [\text{Eq. 11.3.4.1}]$$

On la nomenclatura correspon a $\underline{n}$ per cabals molars, $\underline{m}$ per cabals màssics, Q per cabals volumètrics, PM per pesos moleculars i ρ la densitat dels diversos gasos "i".

$$Q_i = \frac{m_i}{\rho_i} = \left[\frac{\text{kg}}{h} \right] / \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = \left[\frac{\text{m}^3}{h} \right] \quad [\text{Eq. 11.3.4.2}]$$

$$w_i = \frac{m_i}{m_T} = \left[\frac{\text{kg component "i"/h}}{\text{kg totals/h}} \right] = \left[\frac{\text{kg component "i"}}{\text{kg totals}} \right] \quad [\text{Eq. 11.3.4.3}]$$

$$w_i = \frac{n_i}{n_T} = \left[\frac{\text{mols component "i"/h}}{\text{mols totals/h}} \right] = \left[\frac{\text{mols component "i"}}{\text{mols totals}} \right] \quad [\text{Eq. 11.3.4.4}]$$

D'altra banda, considerant que els gasos tindran un comportament ideal, el cabal volumètric dels diversos gasos que conformen la mescla també es pot calcular amb l'equació [Eq. 11.3.4.5].

$$Q_i = \frac{n_i \cdot R \cdot T \cdot Z}{P} = \left[\frac{\text{kmol}/h \cdot \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \cdot \text{K}}{\text{atm}} \right] = \left[\frac{\text{m}^3}{h} \right] \quad [\text{Eq. 11.3.4.5}]$$

On R correspon a la constant dels gasos ideals amb valor de 0,082 i T i P són les condicions d'operació al reactor R-201 (260°C i 1 atm, respectivament). El factor de compressibilitat Z indica la desviació respecte la idealitat de la mescla reactant, el qual es considera igual a 1 per poder admetre un comportament totalment ideal (aquesta suposició només és vàlida quan es treballa a pressió atmosfèrica: 1 atm).

11.3.5. Balanç d'energia

El balanç d'energia del reactor R-201 parteix del valor obtingut de la calor de reacció generada al produir el MCC inclòs a la taula 11.3.2.1. Degut a l'absència d'informació relativa al MCC en fonts bibliogràfiques la calor de reacció tabulada prové de l'Aspen HYSYS v. 8.2.

Així doncs, el balanç d'energia al reactor R-201 per determinar la calor total a bescanviar es pot realitzar mitjançant l'equació [Eq. 11.3.5.1].

$$q = \sum_{i=1}^{i=S} n_{iE} \cdot C_{p_i} \cdot (T_{op} - T_{i,E}) - \frac{n_{k_0}}{\nu_k} \cdot X_k \cdot \Delta H_R - \frac{n_{k_0}}{\nu_k} \cdot X_k \cdot \Delta \bar{C}_p \cdot (T_{op} - T_{ref}) \quad [\text{Eq. 11.3.5.1}]$$

On q s'obté en kJ/s equivalent a kW. El subíndex "k" correspon al reactiu clau o limitant, que en aquest cas és la MMA. El primer terme correspon a la calor requerida per escalfar l'aliment fins a la temperatura d'operació del reactor ($T_{op} = 260^\circ\text{C}$). El segon terme és la calor consumida durant la reacció i el tercer terme la correcció a aplicar al segon terme degut a que no es treballa a la temperatura de referència (25°C).

El paràmetre $\Delta \bar{C}_p$ correspon a la variació mitjana de la capacitat calorífica de la mescla, la qual es calcula resolent individualment les capacitats calorífiques de cada component (C_{p_i}) amb les dades de la taula 11.3.5.1 i aplicant l'equació [Eq. 11.3.5.2].

Taula 11.3.5.1. Constants pel càlcul de les capacitats calorífiques dels gasos ideals.

		MMA	Fosgè	HCl	MIC
Constants pel càlcul de Cp per gasos ideals	A	11,48	28,089	30,291	35,76
	B	$1,43 \cdot 10^{-1}$	$1,36E \cdot 10^{-1}$	$-7,10 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-1}$
	C	$-5,33 \cdot 10^{-5}$	$-1,37 \cdot 10^{-4}$	$1,25E \cdot 10^{-5}$	$-5,82 \cdot 10^{-6}$
	D	$4,75 \cdot 10^{-9}$	$5,07 \cdot 10^{-8}$	$-3,90 \cdot 10^{-9}$	$-1,69 \cdot 10^{-8}$

$$Cp_{gas} \left[\frac{kJ}{kmol \cdot K} \right] = A + B \cdot T_{op} + C \cdot T_{op}^2 + D \cdot T_{op}^3 \quad [Eq. 11.3.5.2]$$

La taula 11.3.5.2 recopila els resultats del càlcul de les Cp per cada component i les dades bibliogràfiques de calors de formació dels diversos gasos emprats (excepte pel MCC, ja que no es tenen fonts bibliogràfiques i prové del Aspen HYSYS v. 8.2).

Taula 11.3.5.2. Resultats del càlcul de Cp pels gasos ideals i dades de les calors de formació dels components a 25°C.

	MMA	Fosgè	MCC	HCl	MIC
Capacitat calorífica del gas (kJ/(kmol·K))	71,30	67,27	98,49	29,46	86,97
Entalpia de formació a 25°C (kJ/mol)	-23,03	-221,06	-170,8	-92,36	-90,02

Doncs, ja es pot calcular $\Delta \bar{Cp}$ emprant l'equació [Eq. 11.3.5.3].

$$\Delta \bar{Cp} = \sum_{i=1}^{i=S} v_i \cdot Cp_i \quad [Eq. 11.3.5.3]$$

Resolent l'equació anterior, es troba la variació de la capacitat calorífica de la fase gas segons:

$$\Delta \bar{Cp} = Cp_{MCC} + Cp_{HCl} - Cp_{MMA} - Cp_{Fosgè} = 98,49 + 29,46 - 73,12 - 69,26 = -14,43 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$

Llavors la calor total a bescanviar al reactor R-201 es resol substituint valors a l'equació [Ec. 11.3.5.1].

$$q = 9,6 \cdot 73,12 \cdot (260 - 240) + 12 \cdot 69,26 \cdot (260 - 205) + 9,6 \cdot (-19000) - 9,6 \cdot 14,43 \cdot (260 - 25)$$

$$q = -155205,27 \frac{kJ}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} = -43,11 kW$$

Un cop es sap la calor total a bescanviar, es determina l'àrea de transferència necessària per poder retirar la calor generada segons l'equació [Eq. 11.3.5.4].

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad [Eq. 11.3.5.4]$$

On ΔT_{ml} correspon a la variació mitjana logarítmica de les temperatures d'entrada i sortida de la mescla reactant i l'oli tèrmic calculada amb l'equació [Eq. 11.3.5.5] pel cas concret de circulació de l'oli tèrmic en paral·lel al fluid de procés.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad [Eq. 11.3.5.5]$$

Desglossant els increments de temperatura i sabent que el subíndex “f” s’associa a l’oli tèrmic com a refrigerant, s’obté que:

$$\Delta T_1 = T_1 - T_{f,1} \quad \Delta T_2 = T_2 - T_{f,2}$$

Considerant T_1 com la mitjana de les temperatures d'entrada de la MMA i el fosc i T_2 la temperatura d'operació al reactor R-201:

$$T_1 = \frac{(240 + 205)}{2} = 220,56^\circ\text{C} \quad T_2 = 260^\circ\text{C}$$

Admetent un valor del coeficient global de transmissió de calor (U) de $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ segons les referències bibliogràfiques de la figura 11.3.5.1 extretes del Coulson, es pot calcular el cabal requerit de refrigerant amb l'equació [Eq. 11.3.5.6].

Shell and tube exchangers		
Hot fluid	Cold fluid	$U \text{ (W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$
<i>Heat exchangers</i>		
Water	Water	800–1500
Organic solvents	Organic solvents	100–300
Light oils	Light oils	100–400
Heavy oils	Heavy oils	50–300
Gases	Gases	10–50

Figura 11.3.5.1. Valors típics de coeficients globals de transmissió de calor per bescanviadors de carcassa i tubs.

S'estima el valor de U bastant petit donat el cas més desfavorable, per poder fer front al pic de calor generat al principi de la reacció en condicions satisfactòries, assumint una transmissió de calor molt inferior a la que hi haurà a la instal·lació real. D'aquesta manera, es garanteix que l'oli tèrmic podrà retirar la calor generada correctament.

$$q = m_f \cdot C_{p_f} \cdot \Delta T \quad [Eq. 11.3.5.6]$$

La taula 11.3.5.3 mostra els resultats finals obtinguts al realitzar el balanç d'energia emprant com a refrigerant l'oli tèrmic Dowtherm J.

Taula 11.3.5.3. Resultats del balanç d'energia emprant oli tèrmic com a refrigerant.

BALANÇ D'ENERGIA			
Refrigerant (oli tèrmic)		Dowtherm J	
Cabal màssic de refrigerant (kg/h)		1950,80	
ΔT_1	130,56	$U \text{ (W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C))}$	20
ΔT_2	130	$U \text{ (kJ/(h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C))}$	72
$\Delta T_{ml} \text{ (K)}$	130,28	$A \text{ (m}^2\text{)}$	16,55

11.3.6. Mètode de Kern

El mètode de Kern permet el disseny de bescanviadors de carcassa i tubs obtenint un elevat nombre de paràmetres. Tot i així, només es farà menció dels aspectes que es consideren més rellevants pel disseny del reactor R-201.

Es fixa el nombre de tubs pels quals es dividirà el cabal total de reactius junt amb el temps de residència i la velocitat superficial dels gasos a l'interior dels tubs per tal de fer el disseny del reactor R-201 (taules 11.3.1.1 i 11.3.2.1).

El fet de fixar el nombre de tubs prové d'ajustar el diàmetre intern resultant a una mesura que faci que el diàmetre extern s'aproximi a les 2 polzades, de manera que la neteja i manteniment dels tubs sigui més accessible. El rang de velocitat superficial es fixa entre 10-15 m/s ja que es coneix bibliogràficament que a pressió atmosfèrica els gasos de pes molecular més alt circulen a aproximadament aquestes velocitats per tubs. A més, derivat d'aquest ajust de la velocitat superficial es garanteix que el flux per l'interior dels tubs sigui suficientment turbulent per assumir que la conversió de la MMA a MCC sigui completa.

Per tant, ja es tenen fixats també tant l'àrea de pas dels tubs com el diàmetre intern dels tubs segons les equacions [Eq. 11.3.6.1] i [Eq. 11.3.6.2].

$$A_{pas \text{ 1 tub}} = \frac{Q_{1 \text{ tub}}}{v_{sup}} = \frac{Q_T / n^{\circ} \text{ tubs}}{v_{sup}} = \left[\frac{m^3/s}{m/s} \right] = [m^2] \quad [Eq. 11.3.6.1]$$

$$D_i[m] = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{pas \text{ 1 tub}}}{\pi}} \quad [Eq. 11.3.6.2]$$

D'igual forma, es coneix el volum respecte de cada tub amb el temps de residència fixat i el nombre de tubs segons l'equació [Eq. 11.3.6.3]. Amb el volum i l'àrea de pas de cada tub es resol la longitud dels tubs utilitzant l'equació [Eq. 11.3.6.4].

$$V_{1\text{ tub}} = \frac{Q_{1\text{ tub}}}{\tau} = \left[\frac{m^3/s}{s} \right] = [m^3] \quad [Eq. 11.3.6.3]$$

$$L_{1\text{ tub}} = \frac{Q_{1\text{ tub}}}{A_{pas\ 1\text{ tub}}} = \left[\frac{m^3/s}{m^2} \right] = [m] \quad [Eq. 11.3.6.4]$$

L'espessor dels tubs es calcula resolent la velocitat equivalent per 1 L/min circulant per l'interior dels tubs i buscant el gruix de paret corresponent a la taula 11.3.6.1 extreta del McCabe.

$$v_{1\text{ L/min}} = \frac{v_{sup}}{Q_{1\text{ tub}}} = \frac{12\ m/s}{62,94\ m^3/h \cdot 1000\ L/m^3 \cdot 1h/60\ min} = 0,0114\ \frac{m/s}{L/min}$$

Taula 11.3.6.1. Gruixos dels tubs en funció de la velocitat per 1 L/min.

Diàmetre exterior pulg	Espesor de pared		Diámetro interior cm	Area de la sección transversal de metal cm ²	Area de la sección interior dm ²	Circunferencia m, ϕ superficie m ² /m de longitud		Velocidad en m/seg para 1 litro/min	Capacidad para la velocidad de 1 m/seg litros/min	Peso kg/m*
	Núm. BWG	cm				Exterior	Interior			
5/8	12	0,277	1,034	1,142	0,00839	0,0499	0,0325	0,1993	5,038	0,896
	14	0,211	1,166	0,910	401068	0,0499	0,0366	0,1361	6,407	0,713
	16	0,165	1,257	0,735	0,01245	0,0499	0,0395	0,1343	7,446	0,377
	18	0,124	1,339	0,574	0,01403	0,0499	0,0421	0,1184	8,449	0,451
3/4	12	0,277	1,351	1,419	0,01431	0,0598	0,0425	0,1163	8,601	1,113
	14	0,211	1,483	1,123	0,01728	0,0598	0,0466	0,0965	10,36	0,881
	16	0,165	1,575	0,903	0,01951	0,0598	0,0495	0,0856	11,69	0,708
	18	0,124	1,656	0,697	0,02155	0,0598	0,0520	0,0774	12,92	0,346
7/8	12	0,277	1,669	1,690	0,02183	0,0698	0,0524	0,0762	13,13	1,326
	14	0,211	1,801	1,335	0,02546	0,0698	0,0366	0,0634	15,29	1,048
	16	0,165	1,892	1,065	0,02815	0,0698	0,0594	0,0593	16,87	0,835
	18	0,124	1,974	0,819	0,03057	0,0698	0,0620	0,0545	18,36	0,643
1	10	0,340	1,859	2,348	0,02713	0,0798	0,0584	0,0614	16,29	1,841
	12	0,277	1,986	1,968	0,03103	0,0798	0,0624	0,0538	18,59	1,543
	14	0,211	2,118	1,542	0,03521	0,0798	0,0665	0,0473	21,14	1,210
	16	0,165	2,210	1,232	0,03837	0,0798	0,0694	0,0435	23,02	0,966
1 1/4	10	0,340	2,494	3,032	0,04887	0,0997	0,0784	0,0341	29,31	2,378
	12	0,277	2,621	2,523	0,05398	0,0997	0,0824	0,0309	32,37	1,978
	14	0,211	2,753	1,961	0,05955	0,0997	0,0865	0,0280	35,72	1,537
	16	0,165	2,845	1,561	0,06355	0,0997	0,0894	0,0262	38,14	1,225
1 1/2	10	0,340	3,129	3,710	0,07692	0,1197	0,0983	0,0217	46,14	2,909
	12	0,277	3,256	3,071	0,08324	0,1197	0,1023	0,0200	49,96	2,408
	14	0,211	3,388	2,387	0,09021	0,1197	0,1064	0,0185	54,09	1,872
	16	0,165	3,499	5,068	0,15236	0,1596	0,1382	0,0110	91,19	3,988
2	10	0,340	4,399	5,068	0,15236	0,1596	0,1382	0,0110	91,19	3,988
	12	0,277	4,526	4,177	0,16072	0,1596	0,1422	0,0104	96,53	3,304

† Resumidos, con autorización, de J. H. Perry (ed.), «Chemical Engineers' Handbook», 4.ª ed., págs. II-II, McGraw-Hill Book Company, Copyright © 1963.

* Para acero; para cobre, multiplicar por 1,14; para latón, multiplicar por 1,06.

Consultant la taula 11.3.6.1 s'obté que l'espessor de paret (Δx) necessari és de 3,4 mm donant com a resultat un diàmetre extern de 50 mm tal i com mostra l'equació [Eq. 11.3.6.5].

$$D_e = D_i + 2 \cdot \Delta x \quad [Eq. 11.3.6.5]$$

Un cop es coneix el diàmetre extern dels tubs es pot calcular l'àrea de bescanvi de cada tub amb l'equació [Eq. 11.3.6.6].

$$A_{bescanvi\ 1\text{ tub}} = \pi \cdot D_e \cdot L_{1\text{ tub}} \quad [Eq. 11.3.6.6]$$

Pel càlcul de l'àrea total de bescanvi [Eq. 11.3.6.8], abans s'ha de resoldre el valor del nombre de tubs (N_t) amb l'equació [Eq. 11.3.6.7], multiplicant el nombre de tubs per pas (fixat) pel nombre de passos per tub establert amb valor de 4.

$$N_t = N_{tp} \cdot n_{pt} \quad [Eq. 11.3.6.7]$$

$$A = A_{bescanvi \ 1 \ tub} \cdot N_t \quad [Eq. 11.3.6.8]$$

La distribució dels tubs a l'interior de la carcassa prové de la geometria escollida pel pitch (distància entre els centres de dos tubs consecutius) dels tubs, que tal i com mostra la figura 11.3.6.1 pot tenir diverses configuracions.

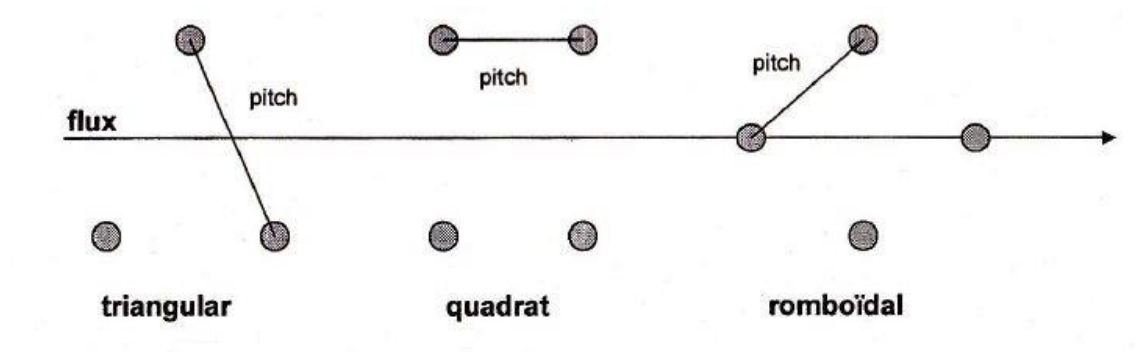


Figura 11.3.6.1. Geometries possibles pel pitch dels tubs.

La taula 11.3.6.2 mostra les constants relatives al tipus de pitch escollit en funció del número de passos per tubs escollit pel càlcul del diàmetre del feix de tubs amb l'equació [Eq. 11.3.6.9].

Taula 11.3.6.2. Constants en funció del pitch escollit i el número de passos per tubs.

	Passos per tub	K_1	n_1
Triangular	1	0,319	2,142
	2	0,249	2,207
	4	0,175	2,285
	6	0,0743	2,499
	8	0,0365	2,675
Quadrat	1	0,215	2,207
	2	0,156	2,291
	4	0,158	2,263
	6	0,0402	2,617
	8	0,0331	2,643

$$D_b = D_e \cdot \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{1/n_1} \quad [Eq. 11.3.6.9]$$

El diàmetre de carcassa es pot calcular doncs, tenint en compte el tipus de carcassa escollit i la diferència entre $D_s - D_b$ segons la figura 11.3.6.2.

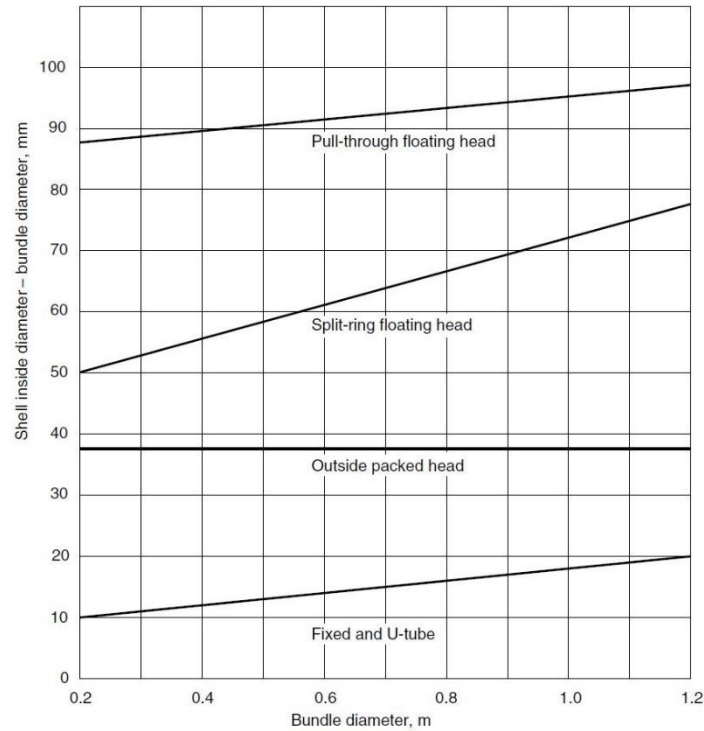


Figura 11.3.6.2. Diferència entre el diàmetre del feix de tubs i el de la carcassa en funció del tipus de carcassa escollit per fer el disseny.

Donada la diferència constant per les carcasses de tipus P (Outside Packed Head), el càlcul del diàmetre de carcassa a partir del diàmetre del feix de tubs es fa amb l'equació [Eq. 11.3.6.10].

$$D_s [mm] = (D_s - D_b) + D_b [mm] = 38 + D_b \quad [Eq. 11.3.6.10]$$

La determinació de la separació entre les pantalles deflectores (I_B) i el número de pantalles es fa mitjançant les equacions [Eq. 11.3.6.11] i [Eq. 11.3.6.12].

$$I_B = 0,5 \cdot D_s \quad [Eq. 11.3.6.11]$$

$$N^{\circ} \text{ pantalles} = \left(\frac{L}{I_B} \right) - 1 \quad [Eq. 11.3.6.12]$$

Un altre paràmetre important a determinar és l'alçada lliure de la pantalla o altrament dit baffle cut tal i com representa la figura 11.3.6.3.

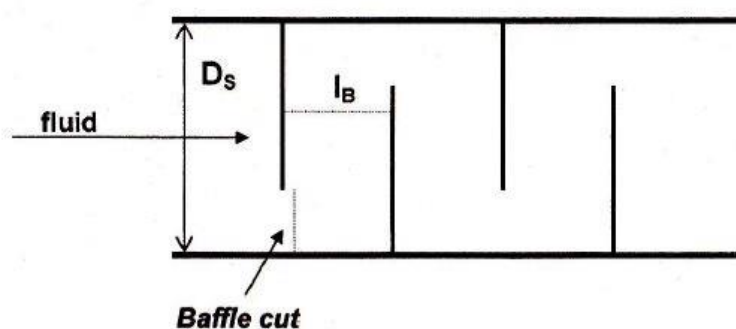


Figura 11.16.3. Representació de la distància “baffle cut”.

El baffle cut es pot calcular emprant l'equació [Eq. 11.3.6.13].

$$Baffle\ cut = 0,25 \cdot D_s \quad [Eq. 11.3.6.13]$$

Per comprovar que el flux és turbulent tant per tubs com per carcassa es calcula el nombre adimensional de Reynolds per tubs (Re_t) i per carcassa (Re_s) amb les equacions [Eq. 11.3.6.14], [Eq. 11.3.6.15], [Eq. 11.3.6.16], [Eq. 11.3.6.17] i [Eq. 11.3.6.18].

$$Re_t = \frac{\rho_{mescla} \cdot v_{sup} \cdot D_i}{\mu_{mescla}} \quad [Eq. 11.3.6.14]$$

$$v_s = \frac{m_s}{A_{st} \cdot \overline{\rho_{oli\ t\grave{e}rmic}}} \quad [Eq. 11.3.6.15]$$

$$A_{st} = \frac{l_B \cdot D_s \cdot (Pitch - D_e)}{(Pitch \cdot n_{ps})} \quad [Eq. 11.3.6.16]$$

$$Pitch = 1,25 \cdot D_e \quad [Eq. 11.3.6.17]$$

$$Re_s = \frac{\overline{\rho_{oli\ t\grave{e}rmic}} \cdot v_s \cdot D_s}{\mu_{oli\ t\grave{e}rmic}} \quad [Eq. 11.3.6.18]$$

Finalment, el càlcul de les pèrdues de pressió (ΔP) es fa amb l'equació de Fanning [Eq. 11.3.6.19] per règims turbulents, determinant el factor de fricció “f” amb la figura 11.3.6.4 en funció del Reynolds obtingut per tubs i la rugositat de la canonada (s'assumeix el pitjor cas de tots en què la rugositat de les canonades és màxima $\rightarrow \varepsilon/D = 0,05$).

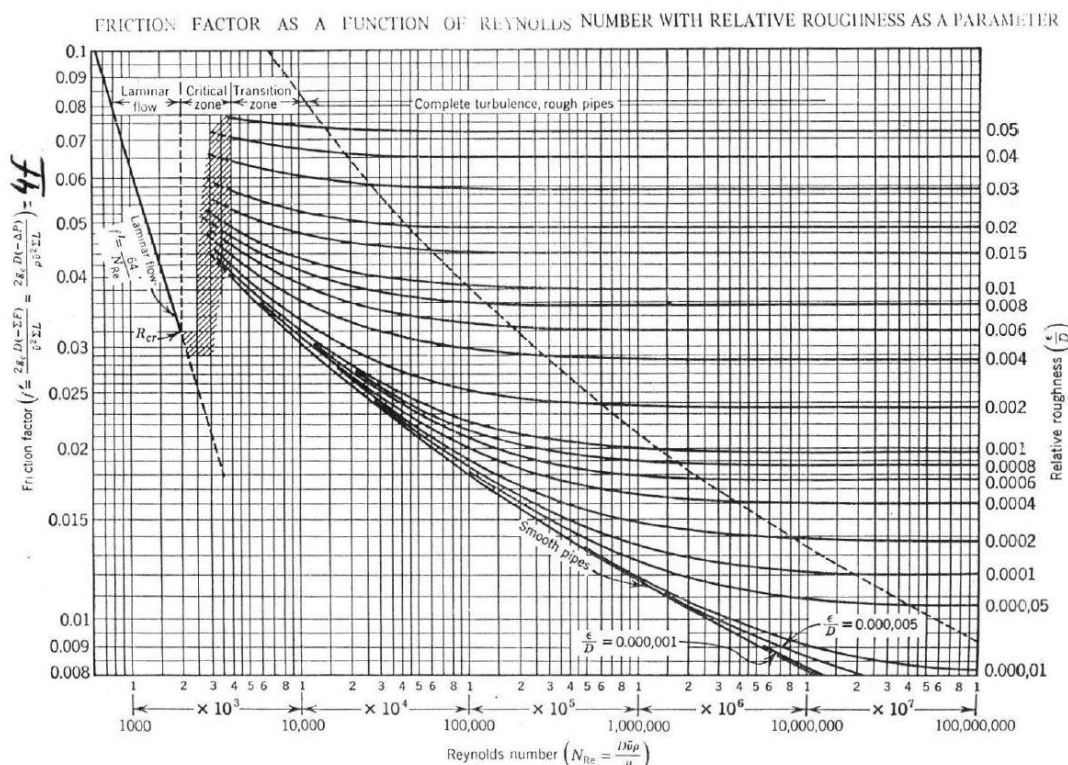


Figura 11.3.6.4. Factor de fricció de Fanning en funció del nombre de Reynolds.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{2f \cdot \rho \cdot v^2}{D_i} \quad [Eq. 11.3.6.19]$$

El resultat de l'equació [Eq. 11.3.6.19] s'ha de multiplicar per la longitud dels tubs i no pot superar el valor de 0,5 vegades la pressió manomètrica al reactor, la qual en aquest cas correspon a 0,5 atm equivalents a 50,5 kPa.

11.3.7. Selecció del material

Degut a l'extrema severitat en quant a corrosió que presenta el clorur d'hidrogen sec, es centrarà l'estudi de la selecció de material pel reactor R-201 en buscar materials resistents a la corrosió causada per aquest component, deixant de banda els efectes menors de la resta de substàncies.

Contrastant diverses fonts bibliogràfiques extretes del "Perry's Handbook" 7^a edició i d'articles divulgatius a internet, es constata que el material més adient es tracta d'un aliatge de níquel pur o níquel amb petites quantitats d'altres metalls de transició.

La figura 11.3.7.1 mostra el llistat de metalls emprats per transportar i emmagatzemar clorur d'hidrogen i la seva resistència front a la corrosió.

Ratings:

0: Unsuitable. Not available in form required or not suitable for fabrication requirements or not suitable for corrosion conditions.

1: Poor to fair.

2: Fair. For mild conditions or when periodic replacement is possible. Restricted use.

3: Fair to good.

4: Good. Suitable when superior alternatives are uneconomic.

5: Good to excellent.

6: Normally excellent.

Material	Gases (<i>continued</i>)			
	Halogens and derivatives			
	Halogens		Halide acids, moist, e.g., hydrochloric hydrolysis products of organic halides	Hydrogen halides, dry,† e.g., dry hydrogen chloride, °F
	Moist, e.g., chlorine below dew point	Dry, e.g., fluorine above dew point		
Stainless steel, austenitic 20 Cr; 29 Ni; 2.5 Mo; 3.5 Cu type	1	3	3	4 < 400 3 < 750
Incoloy 825 nickel-iron-chromium alloy (40 Ni; 21 Cr; 3 Mo; 1.5 Cu; bal. Fe)	2	3	3	4 < 400 3 < 750
Hastelloy alloy C-276 (55 Ni; 17 Mo; 16 Cr; 6 Fe; 4 W)	5	4	4	4 < 750 3 < 900
Hastelloy alloy B-2 (61 Ni; 28 Mo; 6 Fe)	1	3	5	4 < 750 3 < 900
Inconel 600 (78 Ni; 15 Cr; 7 Fe)	2	5	3	5 < 400 4 < 900
Copper-nickel alloys up to 30% nickel	1	5	2	4 < 400 3 < 750
Monel 400 nickel-copper alloy (66 Ni; 30 Cu; 2 Fe)	2	6	3	6 < 400 3 < 750
Nickel 200—commercial (99.4 Ni)	2	6	2	2 < 900 6 < 400 5 < 750 4 < 900

Figura 11.1.7.1. Resistència de materials a clorur d'hidrogen (HCl sec), extret de "Perry's Handbook", 7^a edició.

D'altra banda, els metalls industrialment més usats per la manipulació de clorur d'hidrogen es poden trobar a la figura 11.3.7.2 extrets d'un article divulgatiu del "Nickel Development Institute".

Materials	Reference in text	Nominal composition, %					ASTM/ ASME B number	UNS number	Most common Tradenames
		Ni	Cr	Mo	Cu	Fe			
Nickel									
Nickel	Alloy 200	99.6	—	—	—	—	161-163	N02200	Nickel 200
Low-carbon nickel	Alloy 201	99.6	—	—	—	—	161-163	N02201	Nickel 201
Nickel-copper alloys									
Nickel-copper alloy	Alloy 400	67	—	—	31	1.5	163-165	N04400	Monel 400
Nickel-chromium-iron alloys									
Nickel-chromium-iron alloy	Alloy 600	76	15	—	—	8	163-168	N06600	Inconel 600
Nickel-iron-chromium alloy	Alloy 800	32	21	—	—	46	163-407	N08800	Incoloy 800
Nickel-iron-chromium-molybdenum-copper alloy	Alloy 825	42	21	3	2.3	30	163-423	N08825	Incoloy 825
High-molybdenum alloys									
Nickel-chromium-molybdenum-iron alloy	Alloy 625	61	21.5	9	—	4	443-446	N06625	Inconel 625
Nickel-chromium-molybdenum-iron alloy	Alloy C-4	63	16	15	—	2	575-622	N06455	Hastelloy C-4
Nickel-chromium-molybdenum-iron alloy	Alloy C276	58	16	15	—	6	575-622	N10276	Hastelloy C276
Nickel-iron-chromium-molybdenum-copper alloy	Alloy G	48	23	7	2	20	588-622	N06007	Hastelloy G
Nickel-molybdenum-iron alloy	Alloy B-2	68	—	28	—	1.5	333-622	N10665	Hastelloy B-2
NOTE: Monel, Inconel, Incoloy are registered trademarks of The International Nickel Co. Hastelloy is a registered trademark of Haynes International									

Figura 11.3.7.2. Aliatges de níquel industrialment usats per manipular clorur d'hidrogen i les seves marques comercials.

Tenint en compte la classificació qualitativa que proposa el Perry's i fent un petit balanç econòmic dels materials de la figura 11.3.7.2, s'arriba a la conclusió de què la millor opció qualitat-preu seria el níquel pur.

D'altra banda, no es tenen dades suficients per poder fer el disseny mecànic dels espessors de paret i s'opta per agafar el Hastelloy C-276 (segona millor opció), del qual es tenen dades per l'aliatge C-4 amb composició molt semblant. Es desestimen tots aquells aliatges que continguin petites quantitats de coure ja que tant la MMA com el fosc són incompatibles amb aquest metall.

11.3.8. Disseny del gruix de la carcassa amb el codi ASME

Els espessors de paret (t) corresponents al cos cilíndric que compona la carcassa del reactor R-201 i els fons superior i inferior toriesfèrics es calculen amb les equacions [Eq. 11.3.8.1] i [Eq. 11.3.8.2] extreptes del codi ASME. Els resultats de l'aplicació del codi ASME explicat al principi del manual de càlcul relatiu als tancs d'emmagatzematge es mostra a la taula 11.3.8.1.

$$t_{cilindre} = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C_A \quad [Eq. 11.3.8.1]$$

$$t_{toriesfèric} = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} + C_A + C_{FAB} \quad [Eq. 11.3.8.2]$$

Taula 11.3.8.1. Resultats de l'aplicació del codi ASME pel càlcul dels espessors de paret junt amb l'espessor de l'aïllant.

CODI ASME	
Sobreessessor de fabricació - C_{FAB} (mm)	0,1·Espessor fons toriesfèric
Sobreessessor de corrosió - C_A (mm)	1
	Pressió interna
Espessor cos cilíndric (mm)	3
Espessor fons toriesfèric (mm)	3

Com que s'admet que no hi ha perill d'arribar a pressions de buit al reactor R-201 no s'ha calculat els espessors corresponents a pressió externa i es pren els valors de la pressió interna pel disseny definitiu del reactor R-201.

11.3.9. Aïllament tèrmic

És necessari aplicar un aïllament tèrmic en els casos en què es vulgui minimitzar les pèrdues de calor amb el medi ambient i, concretament pel reactor R-201, especialment per garantir que la temperatura a la superfície accessible del reactor no superi els 50°C tal i com estableix la normativa UNE 9-310-92 d'*Instal·lacions transmissores de calor mitjançant líquids diferents a l'aigua*.

Llavors, caldrà afegir un espessor d'aïllament tèrmic per motius de seguretat i així evitar riscos de cremades al personal treballador. Alhora, es té com a objectiu minimitzar les pèrdues de calor per convecció i així poder reaprofitar l'energia generada a les reaccions exotèrmiques recuperant-la en bescanviadors posteriors que aprofitin la calor proporcionada.

S'opta per la llana de roca mineral degut al caràcter versàtil que presenta tant a elevades temperatures (fins a 1000°C), com a baixes i també per les seves característiques antigífugues. A més, presenta una resistència a la humitat i a la compressió considerables oferint gran eficiència tèrmica.

El disseny de l'aïllament tèrmic es porta a terme amb el programa *Insulan* propietat de l'empresa CALORCOL, on introduint les següents dades es pot simular l'aïllament industrial adequat pel cas de disseny:

- a) Temperatura a l'interior del reactor.
- b) Temperatura desitjada a la superfície del reactor.
- c) Temperatura ambient, s'admet de 25°C a tots els casos.
- d) Velocitat de l'aire: donat el cas de tindre l'equip a l'interior d'un edifici aquesta velocitat serà nul·la.
- e) Material de la superfície d'aïllament: el programa ofereix una gama de materials la qual no inclou l'aliatge Hastelloy C-276, pel que es prendrà acer inoxidable nou com al material més pròxim a les propietats del Hastelloy C-276.
- f) Material de la superfície nua: mateix raonament que pel punt e).

Amb tota aquesta informació, es pot simular els espessors d'aïllant tèrmic dels que constaria el reactor amb diferents densitats de la llana mineral de roca i en funció de la configuració amb el que es col·locaria l'equip a la instal·lació (secció vertical, superfície plana horitzontal boca dalt, superfície plana horitzontal boca baix...).

Empíricament, s'ha arribat a la conclusió que l'opció més eficient tèrmicament parlant es la llana mineral de roca amb densitat de 140 kg/m³ pel que s'agafarà aquest disseny com el millor dins de les opcions possibles (el disseny final correspondrà als valors anomenats pràctics, no els valors ideals, on el gruix de l'aïllant s'ajusta a valors típics a l'indústria).

La figura 11.3.9.1 mostra els resultats de la simulació amb llana de roca mineral de 140 kg/m³ per l'aïllament tèrmic amb les condicions d'operació al reactor R-201.



CALORCOL S.A.

**TRANSFERENCIA DE CALOR PARA SUPERFICIES PLANAS (CALOR)
MANTAS AISLANTES DE 140 kg/m³**

SUPERFICIE PLANA HORIZONTAL CARA HACIA ARRIBA

CALCULOS PARA ESPESOR IDEAL

Temperatura Interior (TI)	°C	130.0
Temperatura Superficie Aislamiento (TS)	°C	45.0
Temperatura Ambiente (TA)	°C	25.0
Velocidad del Aire (V)	mi/h	0.0
Material Superficie Aislamiento		7
Emisividad Superficie Aislamiento (Es)		0.13
Emisividad Superficie Desnuda (Ed)		0.13
Temperatura Media (TM)	°F	189.5
Coefficiente de Conductividad Térmica (k)	BTU plg/pie² h °F	0.31
Conductancia de la película de aire (f)	BTU/pie² h °F	0.93
Espesor del Aislamiento recomendado (E)	plg	1.42
Pérdida de Calor por Radiación (Qr)	BTU/pie² h	5.56
Pérdida de Calor por Convección (Qc)	BTU/pie² h	28.0
Pérdida de Calor Total (Qt)	BTU/pie² h	33.56
Pérdida de Calor Superficie Desnuda (Qdt)	BTU/pie² h	267.19
Eficiencia del aislamiento (Ef)	%	87.44

SUPERFICIE PLANA HORIZONTAL CARA HACIA ARRIBA

CALCULOS PARA ESPESOR PRACTICO

Temperatura Interior (TI)	°C	130.0
Temperatura Superficie Aislamiento (TS)	°C	44.1
Temperatura Ambiente (TA)	°C	25.0
Velocidad del Aire (V)	mi/h	0.0
Material Superficie Aislamiento		7
Emisividad Superficie Aislamiento (Es)		0.13
Emisividad Superficie Desnuda (Ed)		0.13
Temperatura Media (TM)	°F	188.69
Coefficiente de Conductividad Térmica (k)	BTU plg/pie² h °F	0.31
Conductancia de la película de aire (f)	BTU/pie² h °F	0.93
Espesor del Aislamiento recomendado (E)	plg	1.5
Pérdida de Calor por Radiación (Qr)	BTU/pie² h	5.29
Pérdida de Calor por Convección (Qc)	BTU/pie² h	26.42
Pérdida de Calor Total (Qt)	BTU/pie² h	31.71
Pérdida de Calor Superficie Desnuda (Qdt)	BTU/pie² h	267.19
Eficiencia del aislamiento (Ef)	%	88.13

SUPERFICIE PLANA VERTICAL

CALCULOS PARA ESPESOR IDEAL

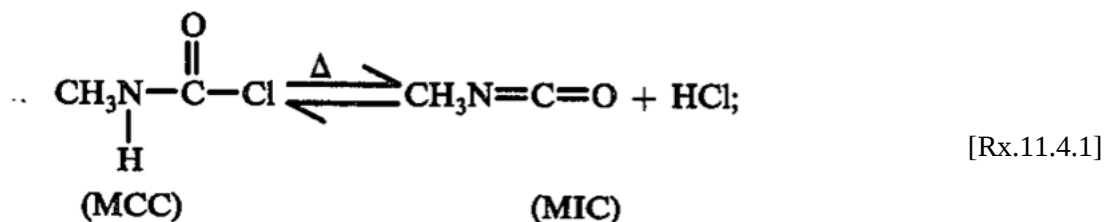
Temperatura Interior (TI)	°C	130.0
Temperatura Superficie Aislamiento (TS)	°C	48.49
Temperatura Ambiente (TA)	°C	25.0
Velocidad del Aire (V)	mi/h	0.0
Material Superficie Aislamiento		7
Emisividad Superficie Aislamiento (Es)		0.13
Emisividad Superficie Desnuda (Ed)		0.13
Temperatura Media (TM)	°F	192.64
Coefficiente de Conductividad Térmica (k)	BTU plg/pie² h °F	0.31

Figura 11.3.9.1. Càlcul de l'espessor de l'aïllament tèrmic amb el programa *Insulan*.

11.4 Reactor R-202 (Piròlisi)

11.4.1 Equilibri termodinàmic entre el metil isocianat i el clorur de metilcarbamil

El MIC i el clorur d'hidrogen (HCl sec en fase gas) estableixen un equilibri termodinàmic [Rx. 11.4.1] amb el MCC (CH_3NHCOCl), que en funció de la temperatura d'operació dona la dissociació del MCC en fase gas per donar un mol de MIC i un mol de HCl segons:



La dehidrocloració del MCC es pot dur a terme addicionant calor (reacció endotèrmica) o afegint una base orgànica terciària com per exemple la piridina que interaccioni químicament amb el MCC per descompondre'l.

Les característiques que permeten desplaçar aquest equilibri termodinàmic cap a la formació de MIC, mitjançant una dehidrocloració tèrmica o piròlisi del MCC són les següents:

- Dissolució del MCC en un dissolvent orgànic apolar (toluè) que permeti extreure el HCl format a la fase gas, i destil·lar posteriorment el MIC que es troba en fase gas i dissolt a la fase líquida.
- La dissolució de MCC en el dissolvent orgànic té un percentatge en massa que pot variar des del 20 fins al 50% respecte el pes total a nivell teòric.
- Elevada variació de temperatura entre l'estabilitat a ambdós costats de l'equilibri.
- La dehidrocloració tèrmica o reacció de piròlisi es porta a terme a 10 bars de pressió per a que la piròlisi resulti suficientment satisfactòria.

Tant el producte gas i líquid resultant del reactor R-202 es porta a una columna de destil·lació a pressió, on entren per diferents plats. En la torre de destil·lació a pressió es separa el HCl de tota la resta de la mescla.

11.4.2 Condicions d'operació de la reacció de piròlisi

- Temperatures d'operació

La solució de MCC en toluè s'escalfa fins els 90°C i es manté la temperatura dins aquest rang a 10 bar de pressió per portar a terme la descomposició del MCC.

Les condicions d'operació de la torre de destil·lació a pressió que ve a continuació del reactor de piròlisi s'han de mantenir a 90°C i 10 bar de pressió per evitar la recombinació del HCL i MIC en MCC.

- Ús d'un dissolvent orgànic inert (apolar)

El dissolvent utilitzat no ha de poder descompondre's o polimeritzar en fase vapor, per tant ha de ser químicament inert amb la única funció de dissoldre el MCC. Alhora, el dissolvent orgànic ha de tindre un punt d'ebullició d'almenys 10°C per sobre del punt d'ebullició del MIC. D'aquesta manera, es pot portar a terme de forma simultània la descomposició tèrmica del MCC per extreure el HCl i la destil·lació del MIC.

Quan la descomposició del MCC es porta a terme en un dissolvent orgànic apolar es donen una sèrie d'avantatges:

- Reducció/minimització de la pèrdua de MCC en reaccions secundàries no desitjades durant la condensació.
- Permet operar a elevades temperatures.

El dissolvent es troba a una temperatura d'aproximadament 90°C. Els més utilitzats són dissolvents de tipus aromàtic (en el procés s'utilitza toluè). Altres exemples de dissolvents són: benzè, xilè, querosè, ciclohexà, tetràclorur de carboni... Essencialment, s'introduirà dissolvent únicament per suplir les pèrdues d'aquest mateix.

- Percentatges en pes de a les solucions

En el cas d'utilitzar toluè com a dissolvent orgànic, el percentatge de MCC màssic adient a la solució oscil·la entre el 40 i el 50% en pes. La quantitat de solució de MCC introduïda al reactor al llarg del temps vindrà determinada per la velocitat a la qual s'extreu el producte format.

El líquid condensat haurà de contenir un percentatge màssic de MIC d'entre el 10 i el 18% que posteriorment anirà a la columna de refinament de MIC.

- Columna de destil·lació

La columna de refinament de MIC CD-204 és de rebliment on aquest consta de muntures de intalox ceràmics, ja que el material ceràmic és resistent a la corrosió provocada per el HCL. El

material de construcció és Hastelloy C-270 ja que ha de suportar la corrosió del HCL. Part del MIC destil·lat es reintrodurà a la columna com a reflux.

11.4.3 Condicions d'operació del reactor R-202

La reacció (Rx. 11.4.1) és monofàsica L-L i reversible, on el MIC format es volatilitza instantàniament ja que la reacció es dona a temperatura més elevada que la de ebullició del MIC. És una reacció endotèrmica, es a dir, necessita addició d'energia per desplaçar la reacció cap a metil isocianat (MIC). La reacció és no catalítica tot i que la presència de clorur d'hidrogen catalitza la reacció.

Per al disseny del reactor s'ha utilitzat les dades corresponents al article “Bhopal: could we have avoided it?” on s'especificava el percentatge de MCC descompost en HCL i MIC a una pressió i temperatura indicada. El percentatge de descomposició es de 80% a 10 bar i 90°C amb un temps de residència de 21h.

Tabla 11.4.3.1. *Condicions d'operació a l'entrada i a la sortida del reactor R-202.*

CONDICIONS D'OPERACIÓ DEL REACTOR R-201		
Rendiment (%)	80	
Calor de reacció (kJ/kmol)	17620	
Temps de residència (h)	21	
PARÀMETRE	ENTRADA	SORTIDA
Temperatura mescla líquida (°C)	98	90
Temperatura mescla gas (°C)	-	90
Temperatura oli tèrmic (°C)	130	110
Caball màssic total (kg/h)	2241,9	2241,9
Densitat mescla líquida (kg/ m ³)	922	799
Densitat mescla gasosa (kg/m ³)	-	13,9
Viscositat cinemàtica mescla líquida (Pa·s)	0,282	0,253
Capacitat calorífica mescla líquida (kJ/(kmol·°C))	150,7	143,32
Capacitat calorífica mescla gas (kJ/(kmol·°C))	-	36,3

Densitat oli tèrmic (kg/m ³)	801,2	809,4
Viscositat dinàmica oli tèrmic (cP)	77,5	77,5
Capacitat calorífica oli tèrmic (KJ/(kg·°K))	2,147	2,147

11.4.4 Paràmetres de disseny

S'ha escollit una relació altura i longitud de 1.5 (L/D) ja que es suposa la mateixa relació que per a tancs agitats (Perry's Chemical Engineer Handbook, 8th edition). Amb el temps de residència de 21h i sabent el cabal volumètric de disseny amb la l'equació 11.4.1 es pot saber el volum de disseny.

$$V = \frac{Q}{\tau} \quad [Eq. 11.4.4.1]$$

El reactor constarà d'una part central cilíndrica i un fons superior i inferior toriesfèric. Per dimensionament del equip es tindrà en compte aquestes parts. A continuació es mostren les equacions utilitzades per al càlcul del volum de les parts de l'equip i del volum total.

$$V_{equip} = V_{cilindre} + V_{toriesfèric} + V_{toriesfèric} \quad [Eq. 11.4.4.2]$$

$$V_{cilindre} = \pi \frac{D^2}{4} H_{cilindre} \quad [Eq. 11.4.4.3]$$

$$V_{toriesfèric} = 0.08089 \cdot D^3 \quad [Eq. 11.4.4.4]$$

$$H_{cilindre} = 1.5 \cdot D \quad [Eq. 11.4.4.5]$$

$$V_{equip} = \pi \frac{D^2}{4} 1.5 \cdot D + 2 \cdot (0.08089 \cdot D^3) \quad [Eq. 11.4.4.6]$$

L'alçada del líquid es calcula amb les expressions 11.2.6.7, 11.2.6.8 i 11.2.6.9. Igual que en els tancs d'emmagatzemament, per al càlcul de l'alçada del fons toriesfèric primer s'ha de suposar un valor d'espessor i després substituir-lo pel valor final calculat a partir del mètode ASME comprovant que aquest nou valor d'espessor és apte per al disseny de l'equip.

La taula 11.4.4.1 mostra les dimensions obtingudes del reactor de piròlisi calculades amb les expressions anteriors

Tabla 11.4.4.1. Paràmetres de disseny del reactor R-202.

PARÀMETRES DE DISSENY DEL REACTOR R-202			
Material		Hastelloy C-276	
Reactor R-202			
Volum equip (m³)	70,38	T disseny (°C)	110
V cilindre	61,85	P disseny (atm)	11,75
V fons toriesfèric superior	4,27	S (Psi) Hastelloy C-276	108060
V fons toriesfèric inferior	4,27	r [m]	0,375
V fons toriesfèrics	8,53	R [m]	3,75
Altura cilindre (m)	5,60	L [m]	0,75
Diàmetre intern (m)	3,75	M	1,54
Altura equip	7,1	ρ material [Kg/m3]	8690

11.4.5 Balanç de matèria

La quantitat necessària de MCC a processar en el reactor R-202 es determina, igual que per al reactor R-201, començant el balanç de matèria del procés global des del final cap al principi.

Amb l'estequiometria i el rendiment del 80% de la reacció 11.4.1 i sabent que el procés es dona en continu, es sap la quantitat de reactiu que es necessita per al reactor R-202:

$$E + G = S + A \quad \rightarrow \quad A = 0 \quad \rightarrow \quad G = (S - E) = 0$$



La Taula 11.4.5.1 mostra el resum de cabals i fraccions a l'entrada i a la sortida del reactor R-202 per assolir el objectius de producció de Carbaril.

Tabla 11.4.5.1. Corrents d'entrada i sortida al reactor R-201 i les corresponents fraccions.

ENTRADA PIROLISI					
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	m ³ /h	% en pes (w)	% molar (x)
MCC	12,25	1145,12	1,24	0,511	0,507
Toluè	11,90	1096,80	1,19	0,489	0,493
SORTIDA LÍQUIDA PIROLISI					
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	m ³ /h	% en pes	% molar
MCC	2,32	217,50	0,570	0,12	0,10
MIC	9,57	546,10	0,184	0,30	0,41
HCL	0	0	0	0	0
Toluè	11,54	1064,00	1,220	0,58	0,49
SORTIDA GAS PIROLISI					
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	m ³ /h	% en pes	% molar
MCC	0,35	32,30	0,026	0,08	0,03
MIC	0	0	0	0	0
HCL	9,57	349,10	0,400	0,84	0,93
Toluè	0,36	32,87	0,037	0,08	0,03

La conversió de cabals inclosos a la Taula 11.4.5.1 es pot realitzar mitjançant les equacions [Eq. 11.1.4.1] i [Eq. 11.1.4.2] mostrades en el apartat del reactor R-201. El càlcul de les fraccions de cada component als corrents d'entrada i sortida al reactor R-202 es realitza amb les equacions mostrades també anteriorment [Eq. 11.1.4.3] i [Eq. 11.1.4.4].

11.4.6 Balanç d'energia

El balanç d'energia del reactor R-202 parteix del valor obtingut de la calor de reacció generada al produir MIC inclòs a la Taula 11.4.3.1. Degut a l'absència d'informació relativa al MCC, igual que en el cas del reactor R-201, en fonts bibliogràfiques la calor de reacció tabulada prové de l'Aspen HYSYS v 8.2. En el cas dels calors de reacció del HCL i del MIC provenen del DIPPR (Design Institute for Physical Properties).

Així doncs, el balanç d'energia al reactor R-202 per determinar la calor total a bescanviar es pot realitzar mitjançant l'equació [Eq. 11.1.5.1].

El paràmetre $\Delta \overline{Cp}$ correspon a la variació mitjana de la capacitat calorífica de la mescla, la qual es calcula resolent la diferència estequiomètrica de Cp de entrada i sortida al reactor de cada component, tenint en compte que la sortida té una fracció de gas (0,35) i una fracció líquida (0,65).

La Taula 11.4.6.1 recopila els resultats del càlcul de les Cp per cada component i les dades bibliogràfiques de calors de formació dels diversos gasos emprats (excepte pel MCC, ja que no es tenen fonts bibliogràfiques i prové del Aspen HYSYS v. 8.2).

Tabla 11.4.6.1. Resultats del càlcul de Cp a 90°C i 10 bar i dels calors de formació dels components.

	MCC	HCl	MIC
Capacitat calorífica líquid mescla sort (kJ/(kmol·K))	146,8		
Capacitat calorífica gas mescla sort (kJ/(kmol·K))	41,6		
Capacitat calorífica líquid mescla ent (kJ/(kmol·K))	147,76		-----
Entalpia de formació a 25°C (kJ/mol)	-170,8	-92,36	-62,4

Doncs, ja es pot calcular $\Delta \overline{Cp}$ emprant l'equació [Eq. 11.4.6.1]:

$$\Delta \overline{Cp} = (Cp_{Mescla,LIQ}) \cdot 0,65 + (Cp_{Mescla,GAS}) \cdot 0,35 - Cp_{MCC} - Cp_{Toluè} = -37,7 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$

En l'expressió de la calor total a bescanviar l'ha d'incloure el calor absorbit de la fase gas i líquida a més de la calor necessària per generar el canvi de fase de líquid a gas (calor vaporització 27323 KJ/Kmol).

Llavors la calor total a bescanviar al reactor R-202 es resol substituint valors a l'equació [Eq. 11.1.5.1].

$$q = \sum_{i=1}^{i=S} n_{i_E} \cdot C p_i \cdot (T_{op} - T_{i,E}) - \frac{n_{k_0}}{v_k} \cdot X_k \cdot \Delta H_R - \frac{n_{k_0}}{v_k} \cdot X_k \cdot \Delta \bar{C} p \cdot (T_{op} - T_{ref}) + \Delta H_{VAP} \cdot n_{T_E} \quad [Eq. 11.1.5.1]$$

$$q = 385195 \frac{kJ}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} = 106,9 \text{ kW}$$

Un cop es sap la calor total a bescanviar, es determina l'àrea de transferència necessària per poder retirar la calor generada segons l'equació [Eq. 11.2.5.4].

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T} = \frac{385195 \text{ W}}{300 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} (30^\circ C)} = 11,89 \rightarrow 12 \text{ m}^2$$

On ΔT correspon a la variació de les temperatures de l'oli tèrmic i del reactor. La temperatura que s'usa per el oli és la mitja de temperatures entre l'entrada i la sortida.

S'ha triat un valor de coeficient global de transferència de calor de $300 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ C$, ja que la mitja canya és com una camisa (Jacket) i la U serà el valor superior de 250 perquè el fluid que hi circula per fora es un Dowtherm i es molt millor que el vapor d'aigua i menor de 500 per assegurar-nos un bon funcionament.

Jacketed vessels

Jacket	Vessel	
Steam	Dilute aqueous solutions	500–700
Steam	Light organics	250–500
Water	Dilute aqueous solutions	200–500
Water	Light organics	200–300

Figura 11.4.6.1. Valors típics de coeficients globals de transmissió de calor $W/m^2 \cdot ^\circ C$ per bescanviadors de camisa.

Per al càlcul del cabal màssic de refrigerant s'utilitza l'equació 11.1.5.6 on la $C p_f$ (capacitat calorífica del oli tèrmic) a la temperatura de $120^\circ C$ (temperatura mitja entre l'entrada i la sortida) és de 2,165. Aquest valor s'ha extret de la fitxa tècnica de l'oli de la companya DOW. La diferència de temperatura correspon a la diferència entre l'entrada i sortida de la mitja canya.

$$q = m_f \cdot C p_f \cdot \Delta T \quad [Eq. 11.1.5.6]$$

La Taula 11.2.5.3 mostra els resultats finals obtinguts al realitzar el balanç d'energia emprant com a refrigerant l'oli tèrmic Dowtherm J.

- Disseny del sistema de calefacció

La reacció és endotèrmica $\Delta H > 0$ per tant es necessita aplicar calor al reactor perquè es dugi a terme la reacció. El sistema de calefacció seleccionat ha sigut el de mitja canya. Aquest sistema de calefacció consta d'un tub que envolta exteriorment el reactor en el qual hi circula l'oli tèrmic Dowtherm J.

Primer s'ha de calcular l'àrea de pas de la mitja canya, per realitzar aquest càlcul s'utilitza la equació 11.X.X i es suposa una velocitat típica de fluid de 3 m/s.

$$A_{PAS} = \frac{Q_{volumètric}}{v_{circulació\ fluid}} \quad [Eq. 11.4.4.7]$$

$$D_{mitja\ canya} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{PAS}}{\pi}} \quad [Eq. 11.4.4.8]$$

També s'ha de comprovar que l'àrea del cilindre que està en contacte amb el líquid del reactor sigui suficient per albergar tota l'àrea de bescanvi de calor que necessita el sistema.

$$A_{bescanvi\ camisa} (12\ m^2) \leq A_{cilindre} (44,4\ m^2)$$

Un cop calculat el àrea i el diàmetre de mitja canya ja es pot determinar la allargada de la mitja canya amb l'equació següent i suposant que l'àrea de contacte entre la mitja canya i el reactor és la que es mostra en la figura 11.4.4.2.



Figura 11.4.6.2 Àrea de contacte de la mitja canya (vermell).

$$L_{mitja\ canya} = \frac{A_{bescanvi}}{D_{mitja\ canya}} \quad [Eq. 11.4.4.9]$$

Tabla 11.2.5.3. Resultats del balanç d'energia emprant oli tèrmic com a refrigerant.

BALANÇ D'ENERGIA			
Refrigerant (oli tèrmic)	Dowtherm J		
Cabal màssic de refrigerant (kg/h)	8895,8		
ΔT (oli tèrmic)	20	A (m ²)	12
ΔT (ent-sort reactor)	8	D mitja canya (cm)	3,6
U (W/(m ² ·°C))	300	L mitja canya (m)	333

Els 10 m² d'àrea de bescanvi es reparteixen per la part inferior del reactor on es troba el líquid, ja que energèticament és més efectiu escalfar un líquid que un gas donat a que la Cp del líquid és més gran.

11.4.7 Selecció del material

Degut a l'extrema severitat en quant a corrosió que presenta el clorur d'hidrogen sec i en dissolt en un dissolvent orgànic com el toluè, es centrarà l'estudi de la selecció de material pel reactor R-202 en buscar materials resistents a la corrosió causada per aquest component, deixant de banda els efectes menors de la resta de substàncies.

Igual que per el reactor R-202, es contrasten diverses fonts bibliogràfiques extretes del "Perry's Handbook" 7^a edició i d'articles divulgatius a internet, es constata que el material més adient es tracta d'un aliatge de níquel pur o amb petites quantitats d'altres metalls de transició. Aplicant els mateixos raonaments que per a la selecció del material del reactor R-201 es tria el Hastelloy C-276. L'únic paràmetre diferent per a la elecció del material respecte el reactor R-201 és la temperatura, però aquest no afectarà ja que la temperatura del reactor R-201 és molt més inferior (90°C).

11.4.8 Disseny del gruix de la carcassa amb el codi ASME

El càlcul del gruix és fa seguint els mateixos passos del ASME per a tancs d'emmagatzematge.

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix la columna de líquid que hi ha dins del reactor R-202. L'alçada del líquid ha estat calculada anteriorment.

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 808,7 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \cdot 4,5 \cdot 0,65 = 35710 Pa = 0,35 atm [Eq. 11.1.5]$$

La temperatura i la pressió d'operació és de 90°C i 10 bar respectivament. A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{disseny} = (0,35 \text{ atm} + 9,869 \text{ atm}) \cdot 1.15 = 11,76 \text{ atm} \text{ [Eq. 11.1.4]}$$

$$T = 90^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C} = 110^{\circ}\text{C} \text{ [Eq. 11.1.6]}$$

El reactor consta d'un fons inferior i superior toriesfèric i un cos cilíndric com s'ha dit anteriorment. Amb les equacions que es presenten a continuació es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior i inferior toriesfèric.

$$t_{cilindre} = \frac{P R}{S E - 0.6 P} + C_A \text{ [Eq. 11.1.1]}$$

$$t_{toriesfèric} = \frac{P L M}{2 S E - 0.2 P} + C_A + C_{FAB} \text{ [Eq. 11.1.2]}$$

Taula 11.4.8.1. Especificacions generals del reactor R-202.

ESPECIFICACIONS GENERALS			
T disseny (°C)	110	t total toriesfèric (mm)	8
P disseny (atm)	11,76	S [Psi] SA-240 316L	108060
t cilindre (mm)	4	E cilindre (m)	0,85
t total cilindre (mm)	5	Presió externa (atm)	1
t toriesfèric (mm)	6,2	E toriesfèric (m)	1

11.4.9 Pes de l'equip

Per calcular el pes del reactor R-202 sencer s'ha de calcular el pes dels fons toriesfèrics i el del cilindre. Es calcula el pes de les tres estructures per separat i es sumen els pesos.

$$M_{cilindre} = \pi \cdot H_{cilindre} \left(\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right) \rho_{material} \quad [Eq. 11.2.1.7]$$

$$M_{toriesfèric} = \left((0.08089 D_e^3) - (0.08089 D_i^3) \right) \rho_{material} \quad [Eq. 11.2.1.8]$$

$$M_{op.} = M_{equip.} + (V_{sòlid} \cdot \rho_{aparent}) \quad [Eq. 11.2.1.9]$$

$$M_{sòlid} = \rho \cdot fracció \text{ líquid} \cdot V \text{ líquid} \quad [Eq. 11.2.1.10]$$

Taula 11.4.9.1 Pesos del reactor R-202 buit i en operació

PES DE L'EQUIP	
M líquid (Kg)	36552,6
M cilindre (Kg)	1434,2
M fons toriesf. (Kg)	296,9
M buit (Kg)	1731,2
M en operació (Kg)	38283,8

11.4.10 Agitació

La mescla està classificada com un sistema de viscositat baixa segons la classificació de la bibliografia consultada (Coulson and Richardson's Chemical Engineering) ja que les viscositats està per sota de $10 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$. Per aquests fluids la velocitat d'agitació sol estar entre 10 i 25 rps o Hz però com el temps de residència és tan elevat, les g són elevades degut al diàmetre del agitador i la densitat de la mescla es molt molt baixa és decideix seleccionar una velocitat d'agitació de 325 rpm o 5,41 rps

L'agitador escollit és un de tipus marítim amb tres aspes donada la seva ampla implantació i perquè són molt útils per sistemes amb viscositats baixes.

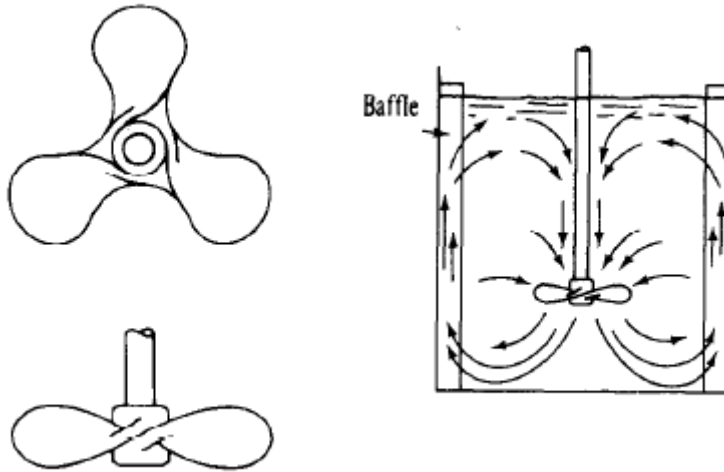


Figura 11.4.10.1. Agitador de tipus marí de tres aspes.

Amb la figura 11.X.X extreta del “Perry’s Chemical Engineering Handbook” es pot determinar el número de potència amb la corba corresponent a l’agitador marítim de tres pales (a) i amb el número de del mesclador (Eq 11.4.10.1)

$$Re = \frac{N \cdot \rho_L \cdot D^2}{\mu_L} \quad [Eq. 11.4.10.1]$$

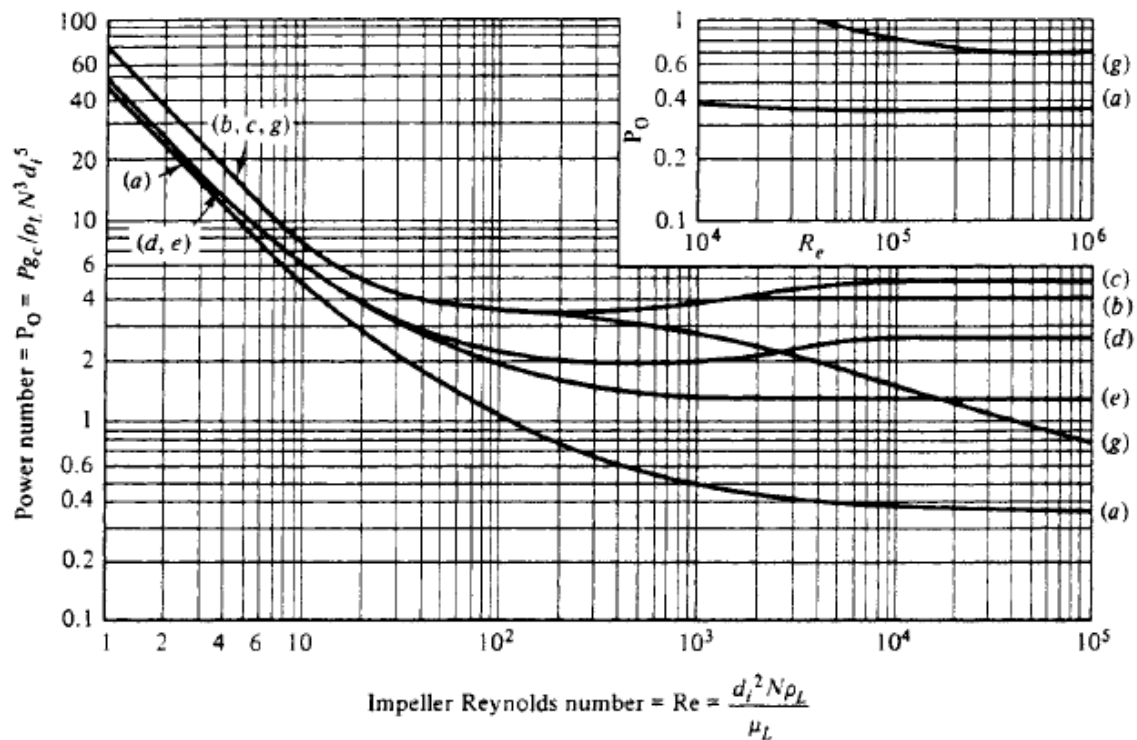


Figura 11.4.10.2. Número de potència per diferents tipus de agitador en base al número de Reynolds.

Un cop obtingut el número de potència amb l'equació 11.4.10.2 es calcula la potència necessària d'agitació.

$$P = N_p \cdot \rho_L \cdot N^3 \cdot D^5 \quad [Eq. 11.4.10.2]$$

El sistema d'agitació ha d'incloure bafles que millorin la transferència de matèria i energia evitant els vòrtex. Aquest sistema es dissenya amb la figura 11.4.10.2 extreta del "Coulson and Richardson's Chemical Engineering"

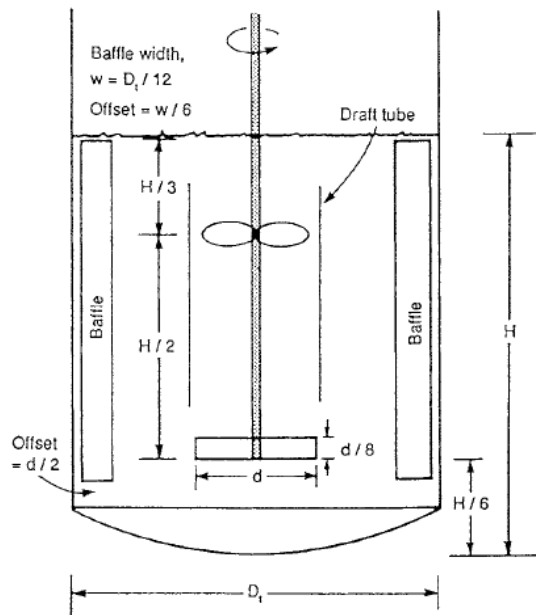


Figura 11.4.10.3. Dimensionament de la posició de l'agitador i dels bafles.

En la següent taula es fa un resum dels diferents paràmetres obtinguts per al sistema d'agitació.

Taula 11.4.10.1. Resultats del paràmetres del sistema d'agitació.

Tipus d'agitador	
Agitador maritim de 3 pales	
kW/m ²	1,52
rps	5,42
Densitat mescla [Kg/m ³]	922
Viscositat mescla [cP]	0,28
Re	249415,7089
D/Dt	0,33
Np	0,35
Diametro agitador [m]	1,159
Potencia (kW)	107,3

altura primer agitador [m]	1,756
altura segon agitador [m]	2,635
w agitador	0,145
4 Baffles	
offset [m]	0,580
w baffle	0,293
distància a la pared [m]	0,049

Si s'observa el valor de kW/m² i es compara amb la taula 11.4.10.2 es pot veure com la agitació es classifica com severa per assegurar una bona transferència de matèria i de energia.

Taula 11.4.10.2. Requeriments de potència en tancs agitats en funció del volum i de la potència d'agitació.

Agitation	Applications	Power, kW/m ³
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

11.4.11 Venteig

Els sistemes de venteig son sistemes dissenyats per prevenir els efectes de les alteracions de la pressió interna de un recipient d'emmagatzematge. La mida del venteig d'un tanc, com s'ha dit en les notes introductòries ha de ser de mida com a mínim igual o major a la de les canonades de carga o descarrega i en cap cas ser inferiors a 35 mm de diàmetre.

Per el cas d'emmagatzematges a pressió el venteig d'emergència es calcula amb l'equació:

$$\frac{kg}{h} \text{ de vapor de líquid} = \frac{Q}{L} = 18,05 \text{ m}^3 \text{ [Eq. 11.2.1.14]}$$

On:

- Q és el calor rebut (kJ/h).
- L és el calor latent de vaporització.

$$A = \pi \cdot D \cdot H_{cilindre} = 65,9 \text{ m}^2 \text{ [Eq. 11.2.1.12]}$$

On:

- D és el diàmetre del recipient.
- H_{cil} és l'alçada del cilindre.

$$Q = 139,7 \cdot F \cdot A^{0,82} \cdot 10^3 = 650384 \text{ kJ/h [Eq. 11.2.1.13]}$$

On:

- F és el factor de reducció adimensional.
- A superfície humida (m^2).

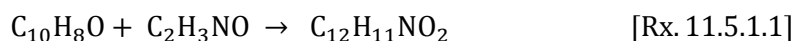
La figura 11.2.1.6 servei per triar el valor factor de reducció, en el cas que la situació no aparegui en la figura el valor de F serà la unitat. En aquest cas el valor de F és 0,15 ja que el tanc esta soterrat i té un sistema de polvorització d'aigua fixe i automàtic.

11.5. Reactor de formació del carbaril R-203 i R-204

Finalment s'arriba a l'últim punt de reacció en el qual es duu a terme la reacció de formació del carbaril a partir de 1-naftol i MIC, i mitjançant l'ús d'una reïna catalítica d'intercanvi aniònic, concretament s'usa Amberlyst A21.

11.5.1. Química del procés de formació del carbaril

La reacció de 1-naftol ($\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}$) amb MIC (CH_3NCO) es dona de forma continua als reactors multitubulars R-203 i R-204 de llit fix segons la següent expressió [Rx. 11.5.1.1], donant lloc a un mol de metilcarbammat d'1-naftil ($\text{C}_{12}\text{H}_{11}\text{NO}_2$) per a cada un mol d'1-naftol, estan el MIC en excés respecte aquest, tot i que en poca mesura.



Per a fer que es dugui a terme la reacció de forma continua es necessari l'ús d'un solvent que permeti la dissolució total dels dos reactius i del producte en ell a la temperatura d'operació. També ha d'impedir la dissolució de la reïna d'intercanvi iònic. Alguns dels solvents adequats són el benzè, toluè, xilè, hexà, pentà, heptà, cloroform, etc. El solvent utilitzat en la planta és el toluè. El motiu d'aquesta decisió és l'ús de la patent US 4,278,807 per al disseny del reactor fent l'escalat tal i com s'explica en l'apartat 11.5.6.

La reacció es duu a terme al estar en contacte la solució amb la reïna, essent aquesta doncs la que permeti la formació del carbaril. La necessitat de que la reïna sigui d'intercanvi aniònic és perquè pretén convertir els grups febles bàsics en els centres actius lliures, mentre mantén els grups forts bàsics en la seva forma de sal catalíticament inactiva. El fet de buscar aquest comportament és causat pels grups funcionals forts que donen lloc a reaccions no desitjables produint el subproducte 1-naphthyl 2,4-dimethylallophanate. Aquest subproducte és inevitable en la producció del carbaril, però reduïble amb una reïna d'intercanvi aniònic.

La regeneració del catalitzador és la que marca les parades i manteniment de la planta, essent la part temporal limitant. Per tal de prolongar el temps de la planta en operació, i en conseqüència pel manteniment, es dissenyen dos reactors en paral·lel que permeten tractar el 100% de la producció cada un. D'aquesta manera, estarà en operació un sol, i en arribar al temps de saturació de la reïna començarà a treballar el segon mentre el primer es regenera.

El corrent d'entrada al reactor és en fase líquida per tal de que el contacte amb la reïna sigui més efectiu, fent que el reactor sigui bifàsic. La reacció és fortament exotèrmica fet que implica un bescanvi de calor important per tal d'intentar mantenir la temperatura al reactor constant i fer que aquest sigui isoterm. El refrigerant ha de ser no aquós degut a la presència del MIC com a reactiu en el reactor, ja que en el cas de que estigués en contacte amb aigua, esdevindria a reaccions exotèrmiques no controlables, d'hidròlisi, donant lloc a productes com el 1,3-dimetilurea més diòxid de carboni en el cas d'excés d'aigua, o 1,3,5-trimetilbiuret més CO₂ en cas d'excés de MIC però també en presència d'aigua.

Així doncs, s'ha decidit utilitzar toluè com a refrigerant amb la idea d'aprofitar part d'aquest calor que es desprèn en la reacció, per a posteriorment utilitzar-lo com al solvent dins el reactor. Com que el cabal de refrigerant necessari a aportar per a absorbir tot el calor de la reacció és força elevat, una part es destinarà al reactor tal i com s'ha comentat, i l'altre part es condensarà per a ser redirigit un tanc pulmó a l'entrada per a refrigerar aquests reactors, reduint doncs també l'energia del condensador pel fet de tenir un cabal menor.

El refrigerant circula en paral·lel amb el fluid de procés ja que el calor a bescanviar al inici del reactor multitubular és major que a la resta de la seva longitud.

11.5.2. Condicions d'operació

Les condicions d'operació per aquest reactor venen fixades per la patent mencionada per tal d'obtenir un rendiment del 91,2%. La corrent d'entrada al reactor és una sola composta dels tres components dissolts (MIC i 1-naftol en toluè), de manera que les condicions de temperatura i pressió d'entrada són les mateixes pels tres. La pressió és de 1 atmosfera.

Taula 11.5.2.1. Condicions d'operació a l'entrada i a la sortida dels reactors R-203 i R-204.

CONDICIONS D'OPERACIÓ DELS REACTORS R-203 i R-204		
Rendiment (%)	91,2	
Calor de reacció (kJ/kmol)	-48000	
Puresa al corrent producte Carbaril	12,0	
Productivitat (kg Carbaril/kgReïna/h)	3,2	
PARÀMETRE	ENTRADA	SORTIDA
Temperatura corrent (°C)	88	93
Temperatura toluè (°C)	25	40
Cabal màssic total (kg/h)	8405,4	8405,4
Pes molecular mescla (kg/kmol)	98,98	117,71
Densitat mescla (kg/m³)	784,12	835,19
Viscositat cinemàtica mescla (Pa·s)	4,68E-04	5,93E-04
Capacitat calorífica mescla (kJ/(kmol·°C))	168,0	179,1
Densitat toluè (kg/m³)	864,2	850,3
Viscositat dinàmica toluè (Pa·s)	5,46E-04	4,62E-04
Capacitat calorífica toluè (kJ/(kmol·°C))	151,8	157,2

11.5.3. Paràmetres de disseny

El disseny dels reactors R-203 i R-204 consisteixen en l'escalat de la patent US 4,278,807 tal i com s'explica a l'apartat 11.5.6 amb la utilització posterior del mètode de kern per al dimensionament del diàmetre del feix de tubs i de carcassa, juntament amb altres paràmetres d'aquesta carcassa. El codi ASME finalitza el disseny amb el càlcul dels gruixos del cilindre i els fons superior i inferior, els quals són toriesfèrics. En aquest apartat, taula 11.5.3.1, es mostren els resultats agrupats dels quals s'anirà fent referència al llarg del manual de càlcul.

Taula 11.5.3.1. Paràmetres de disseny dels reactors R-203 i R-204

PARÀMETRES DE DISSENY DELS REACTORS R-203 i R-204	
Material	Acer inoxidable 316L
Tensió de trencament a 113°C - S (psi)	15700
Tensió de trencament a 113°C - S (N/mm²)	108

Densitat a 25°C (kg/m³)		7960	
Volum total (m³)		7,49	
Pes buit (kg)		9134	
Pes en operació (kg)		11501,4	
Tubs			
Número de tubs	285	Número de passos per tubs	1
Cabal volumètric tubs (m³/h)	0,033	Longitud 1 tub (m)	4
Temps de residència (min)	11,84	Velocitat superficial (m/h)	20,3
Volum 1 tub (m³)	0,0064	Àrea bescanvi tub (m²)	0,64
Volum total tubs (m³)	2,31	Àrea bescanvi total tubs (m²)	181,94
Àrea pas 1 tub (m²)	0,0016	Reynolds per tubs	5,19
Diàmetre intern 1 tub (mm)	45,26	Massa catalitzador 1 tub (kg)	2,22
Diàmetre intern 1 tub (inch)	1,78	Massa catalitzador total (kg)	632,51
Diàmetre extern 1 tub (mm)	50,8	Temps saturació catalitzador (dies)	12
Gruix 1 tub (mm)	2,77	ΔP/L (Pa/m)	2646,15
Carcassa: tipus P (Outside Packed Head)			
Cabal màssic toluè (kg/h)	13528,64	Número de passos per carcassa	1
Àrea transversal - Ast (m²)	0,781	Longitud carcassa (m)	4
Velocitat fluid carcassa (m/s)	0,0056	Distància entre pantalles (m)	0,63
Reynolds per carcassa	11994,57	Baffle cut (m)	0,31
Geometria pitch	Triangular	Número de pantalles deflectores	6
K1 (funció del pitch)	0,319	Diàmetre feix tubs - Db (m)	1,21
n1 (funció del pitch)	2,142	Ds-Db (mm)	38
Volum carcassa (m³)	4,93	Diàmetre carcassa - Ds (m)	1,25
Fons superior i inferior toriesfèrics			
Alçada part esfèrica toriesfèric - h1 (mm)		239,3	
Alçada part recta toriesfèric - h2 (mm)		21,0	
Alçada total fons toriesfèric - H (mm)		260,3	
Radi gran fons (mm)		1251	
Radi petit fons (mm)		125,1	
Volum d'un fons toriesfèric (m³)		1,28	

La longitud de tubs de la taula plasmada correspon a la zona on succeeix la reacció. No obstant, s'ha de tenir en compte que a ambdós costats dels capçals s'afegeix 2,5 centímetres per fer les unions amb els capçals toriesfèrics.

11.5.4. Balanç de matèria

Tal i com ja s'ha comentat en l'apartat 11.1.4 en el disseny del reactor R-201, s'ha basat el disseny en un sobredimensionament del cabal del 30%, de manera que el sobredimensionament de l'equip sigui també d'aproximadament del 30%.

Així doncs, per a la realització del balanç de matèria dels reactors R-203 i R-204, es parteix de les relacions màssiques fixades (per la patent) dels components a l'entrada i el rendiment de la reacció també fixat en un 91,2%. Sabent que el 1-naftol és el component clau i que el MIC és el que es troba en excés amb una relació molar 1-naftol/MIC de 1:1,01, es troba els cabals a l'entrada i a la sortida del reactor tal i com es plasma a la taula 11.5.4.1.

Taula 11.5.4.1. Corrents d'entrada i sortida als reactors R-203 i R-204 amb les corresponents fraccions màssiques i molars.

ENTRADA REACTOR CARBARIL					
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	m3/h	% en pes	% molar
1-Naftol	10,49	1512,98	1,38	18,0	11,75
MIC	10,61	605,19	0,66	7,2	11,87
Toluè	68,24	6287,27	7,25	74,8	76,38
Cabals totals	89,34	8405,44	9,29	100,00	100,00
SORTIDA REACTOR CARBARIL					
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	m3/h	% en pes	% molar
1-Naftol	0,92	133,14	0,12	1,58	1,16
MIC	1,04	59,15	0,06	0,70	1,30
Toluè	68,24	6287,27	7,25	74,80	85,54
Carbaril	9,57	1925,86	1,57	22,91	12,00
Cabals totals	79,77	8405,42	9,00	100,00	100,00

Per a realitzar els càlculs del cabals màssics, volumètrics i les fraccions s'utilitzen les equacions 11.1.4.1.-11.1.4.4. compreses al apartat 11.1.4. per al reactor de formació de clorur de metilcarbamil R-201.

Els pesos moleculars dels components que participen en la formació del carbaril, es plasmen a la taula 11.5.4.2.

Taula 11.5.4.2. Dades dels pesos moleculars dels components als reactors R-203 i R-204.

	1-Naftol	MIC	Toluè	Carbaril
Pes molecular (kg/kmol)	144,17	57,05	92,14	201,22

11.5.5. Balanç d'energia

Per a la realització del balanç d'energia es requereix el valor de la calor de reacció per a produir carbaril. Aquesta s'ha obtingut per mitjà de les energies d'enllaç realitzant l'equació [Eq. 11.5.5.1], i amb els valors remarcats de la taula 11.5.5.1.

$$\Delta H_r \text{ (kJ/kmol)} = \Delta H_{\text{enllaços formats}} - \Delta H_{\text{enllaços trencats}} \quad [\text{Eq. 11.5.5.1}]$$

Taula 11.5.5.1. Energies d'enllaç a 25°C i 1 atmosfera

Enlace	Energías de Enlace (ΔH) en kJ/mol
H-H	436
C-H	415
N-H	390
O-H	460
C-C	347
C=C	610
C≡C	830
C-N	285
C=N	615
C≡N	887
C-O	352
C=O	743
C=O (en CO ₂)	802

Els enllaços trencats són H-O (1-naftol) i N=C (MIC), mentre que els formats en el carbaril són C-O, N-H i N-C, trobant així el valor de -48 kJ/mol tal i com s'havia especificat a la taula 11.5.3.1.

Així doncs, el balanç d'energia als reactors R-203 i R-204 per a determinar la calor total a bescanviar es pot realitzar mitjançant l'equació [Eq. 11.1.5.1] de l'apartat del manual de càlcul del reactor R-201.

$$q = \sum_{i=1}^{i=S} n_{iE} \cdot C p_i \cdot (T_{op} - T_{iE}) - \frac{n_{k0}}{v_k} \cdot X_k \cdot \Delta H_R - \frac{n_{k0}}{v_k} \cdot X_k \cdot \Delta \bar{C}_p \cdot (T_{op} - T_{ref}) \quad [\text{Eq. 11.1.5.1}]$$

Per a poder realitzar el corresponent càlcul és necessari obtenir el valor de $\Delta \bar{C}_p$ el qual consta només dels components que intervenen en la reacció, de manera que el toluè no es té en compte. Els valors de les capacitats calorífiques s'han obtingut del Aspen HYSYS v. 8.2 a la temperatura d'operació del reactor, 93°C, i es plasmen a la taula 11.5.5.2.

Taula 11.5.5.2. Capacitats calorífiques dels compostos a 93°C i una atmosfera.

	1-Naftol	MIC	Toluè	Carbaril
C_p (J/mol·K)	190,7	58,48	176,2	296,4

Amb aquests valors es pot calcular el terme $\Delta\bar{C}_p$ de la següent manera:

$$\Delta\bar{C}_p = C_{p_{carbaril}} - C_{p_{1-naftol}} - C_{p_{MIC}} = 296,4 - 190,7 - 58,48 = 47,22 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$

Així doncs, amb el valor de $\Delta\bar{C}_p$ de 47,22 kJ/kmol/K i sabent que el component clau és el 1-naftol i que la mescla entra a 88°C i surt a 93°C, es pot calcular el calor a bescanviar amb l'equació [Eq. 11.1.5.1.] trobant:

$$q = (10,61 \cdot 58,48 + 10,49 \cdot 190,7 + 68,24 \cdot 176,2) \cdot (366 - 361) - \frac{10,49}{-1} \cdot 0,912 \cdot (-48000) - \frac{10,49}{-1} \cdot 0,912 \cdot 47,22 \cdot (366 - 298) = -355448 \text{ kJ/h}$$

$$q = -355448 \text{ kJ/h} \cdot 1\text{h}/3600\text{s} = \mathbf{-98,74 \text{ kW}}$$

Obtingut el valor de la calor de reacció, es determina quina és l'àrea mínima de bescanvi que s'ha de tenir en el disseny del reactor. Aquesta es calcula reallant l'equació [Eq. 11.1.5.4] de l'apartat del manual de càlcul del reactor R-201:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad [Eq. 11.1.5.4]$$

Per a poder resoldre-la cal determinar quin serà el valor que tindrem del coeficient global de transmissió de calor (U) i el valor de la mitjana logarítmica de la temperatura (ΔT_{ml}).

Per al primer paràmetre es té en compte la naturalesa de la mescla que circula per tubs i el refrigerant que circula per carcassa, toluè. Ambdós són solvents orgànics de manera que fa pensar en un valor de U entre 100 i 300 W/m²·°C tal com mostra la figura 11.5.5.1.

Shell and tube exchangers		
Hot fluid	Cold fluid	U (W/m ² ·°C)
<i>Heat exchangers</i>		
Water	Water	800–1500
Organic solvents	Organic solvents	100–300
Light oils	Light oils	100–400
Heavy oils	Heavy oils	50–300
Gases	Gases	10–50

Figura 11.5.5.1. Valors típics de coeficients globals de transmissió de calor per bescanviadors de carcassa i tubs.

No obstant, el valor de la velocitat superficial del cabal de reactius que circulen pels tubs és molt petit (15,2m/h) fent que no es pugui assumir que la transmissió de calor es dugui a terme per convecció forçada com seria amb els valors plasmats a la figura 11.5.5.1., sinó més per convecció natural. Es sap que el valor del coeficient global de transmissió de calor per convecció natural de

l'aire es troba entre 5 i 25 W/m²·°C. Així doncs s'ha decidit prendre un valor més proper a aquest darrer per remarcar la influència de la velocitat superficial suposant-lo i fixant-lo en 35 W/m²·°C.

Respecte el valor de la mitjana logarítmica, s'utilitza la mateixa equació que en el reactor R-201 essent també en paral·lel l'entrada del refrigerant amb la de la mescla de reactius. Així doncs, fixant la temperatura d'entrada i sortida del refrigerant en 25 i 40°C respectivament, ja es pot calcular ΔT_{ml} tal i com es plasma a continuació:

$$\Delta T_1 = T_1 - T_{f,1} = 88 - 25 = 63^\circ\text{C} \qquad \Delta T_2 = T_2 - T_{f,2} = 93 - 40 = 53^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} = \frac{53 - 63}{\ln\left(\frac{53}{63}\right)} = 57,85^\circ\text{C}$$

Així doncs reaïllant l'equació [Eq. 11.1.5.4] i amb els valors de U i ΔT_{ml} es troba que l'àrea mínima de bescanvi és de 48,8 m².

Per acabar aquest apartat, és necessari saber el cabal de refrigerant necessari per a poder bescanviar el calor que es desprèn a la reacció i mantenir el reactor el més isoterm possible, ja que és una suposició realitzada per tal de poder dissenyar-lo. Aquest, tal i com ja s'ha anat comentant és toluè amb una C_{p_f} de 161,39 kJ/kmol·°C a la temperatura mitjana a la que es troba, 32,5°C, trobant al valor amb l'equació reaïllada [Eq. 11.1.5.6] de la següent manera:

$$m_f = \frac{q}{C_{p_f} \cdot \Delta T_f} = \frac{355448}{161,39 \cdot 15} = 146,83 \text{ kmol/h} = 3,76 \text{ kg/s}$$

11.5.6. Disseny reactors R-203 i R-204

En aquest apartat es plasma l'escalat de la patent US 4,278,807 per al disseny dels dos reactors, tot i que es centra en l'explicació respecte el R-203 ja que el R-204 és igual a aquest primer.

11.5.6.1. Càlcul dels paràmetres de disseny del reactor patent

Els paràmetres de disseny per al reactor de la patent es mostren a la taula 11.5.6.1 amb l'explicació posterior dels càlculs realitzats per a la seva obtenció.

Taula 11.5.6.1. Paràmetres de disseny del reactor de la patent.

REACTOR PATENT	
Longitud tubs – $L_{1 \text{ tub}}$ (m)	0,5842
Diàmetre tubs – D_{tubs} (m)	0,0254

Secció de pas 1 tub - $A_{pas\ 1\ tub}$ (m²)	5,07E-04
Volum 1 tub - $V_{1\ tub}$ (m³)	2,96E-04
Cabal volumètric 1 tub - $Q_{1\ tub}$ (m³/h)	1,50E-03
Velocitat superficial 1 tub - $v_{sup\ tub}$ (m/h)	2,96
Temps de residència - τ (h)	0,197
Reynolds de partícula - Re_p	0,758

En la patent es troben fixats els valors de longitud i diàmetre de tubs i el cabal volumètric (25 cm³/min), trobant a partir d'aquests la resta de paràmetres.

$$A_{pas\ 1\ tub} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{tub}^2 \quad [Eq. 11.5.6.1]$$

$$V_{1\ tub} = A_{pas\ 1\ tub} \cdot L_{1\ tub} \quad [Eq. 11.5.6.2]$$

$$v_{sup\ tub} = Q_{1\ tub} / A_{pas\ 1\ tub} \quad [Eq. 11.5.6.3.]$$

$$\tau = V_{1\ tub} / Q_{1\ tub} \quad [Eq. 11.5.6.4]$$

$$Re_p = \frac{\rho_{mescla} \cdot v_{sup\ tub} \cdot D_{partícula}}{\mu_{mescla}} \quad [Eq. 11.5.6.5]$$

El diàmetre de partícula es troba a la taula 11.5.6.2 juntament amb la resta de propietats de la reïna utilitzada.

11.5.6.2. Càlcul dels paràmetres de disseny dels reactors R-203 i R-204

L'escalat de la patent es centra en la fixació del mateix temps de residència per als reactors i fixant un diàmetre intern i una longitud del tubs d'aquests. El diàmetre intern s'ha fixat prenent un valor per tal de que l'extern sigui de dues polzades, per a un millor tractament d'aquests ja que també contenen la reïna en el seu interior. El resum dels valors es troba al apartat 11.5.3. concretament a la taula 11.5.3.1.

Així doncs es troba el valor de la velocitat superficial real amb l'equació [Eq. 11.5.6.6]

$$v_{sup\ tub} = L_{1\ tub} / \tau \quad [Eq. 11.5.6.6]$$

Per al càlcul de la secció de pas, volum i Reynolds de partícula s'utilitza les equacions [Eq. 11.5.6.1], [Eq. 11.5.6.2] i [Eq. 11.5.6.5] respectivament, i per al cabal volumètric que circula per l'interior dels tubs es calcula amb l'equació [Eq. 11.5.6.3] aïllada.

Per a trobar el número de tubs reals al reactor es realitza l'equació [Eq. 11.5.6.7]

$$n^{\circ} \text{ tubs} = \frac{Q_{\text{entrada total}}}{Q_{1 \text{ tub}}} \qquad [Eq. 11.5.6.7]$$

Resolent-la es troba:

$$n^{\circ} \text{ tubs} = \frac{9,29}{0,0245} = 380$$

11.5.6.3. Catalitzador

La taula 11.5.6.2 presenta les propietats més importants de la reïna escollida, Amberlyst A21, juntament amb paràmetres d'aquesta per al disseny dels reactors.

Taula 11.5.6.2. Dades i paràmetres de disseny de la reïna aniònica

REÏNA AMBERLYST A21	
DADES	
Productivitat (kg Carbaril/kg reïna/h)	3,2
Diàmetre partícula (m)	0,00055
Densitat reïna (kg/m3)	660
Concentració centres actius (n° Eq/kg)	4,6
PARÀMETRES DISSENY	
Porositat del llit	0,52
Porositat de partícula	0,48
Volum reïna (m³)	0,0031
Massa reïna 1 tub (kg reïna/tub)	2,03
Massa reïna total (kg reïna)	578,05
Equivalents totals	2659,03
Temps saturació (dies)	11,6
Temps saturació disseny (dies)	11,0

Per al càlcul de la porositat del llit s'utilitza l'equació de Haughey-Beveridge [Eq. 11.5.6.8] considerant que el catalitzador són esferes, i per al de la porositat de partícula l'equació [Eq. 11.5.6.9].

$$\varepsilon = 0,38 + 0,073 \cdot \left[1 + \frac{\left(\frac{D_{tub}}{D_p} - 2\right)^2}{\left(\frac{D_{tub}}{D_p}\right)^2} \right] \qquad [Eq. 11.5.6.8]$$

$$\varepsilon_p = 1 - \varepsilon \qquad [Eq. 11.5.6.9]$$

Un cop trobats aquests paràmetres i els del disseny dels tubs del reactor es calcula el volum i la massa de la reïna que hi ha en un tub, la massa de la reïna total al reactor, i els equivalents totals amb les equacions [Eq. 11.5.6.10], [Eq. 11.5.6.11] [Eq. 11.5.6.12], [Eq. 11.5.6.13] respectivament.

$$Vr_{1\ tub} = V_{1\ tub} \cdot \varepsilon_p \quad [Eq. 11.5.6.10]$$

$$Mr_{1\ tub} = Volum\ reïna \cdot densitat\ reïna \quad [Eq. 11.5.6.11]$$

$$Mr_{total} = Mr_{1\ tub} \cdot n^{\circ}\ tubs \quad [Eq. 11.5.6.12]$$

$$Equiv.\ totals = Mr_{total} \cdot Concentració\ centres\ actius \quad [Eq. 11.5.6.13]$$

Per a poder trobar el temps de saturació de la reïna es fa la suposició de que un kmol de reactiu satura un equivalent de reïna de manera que els equivalents totals són els kmols reactius, trobant doncs el temps de saturació amb l'equació [Eq. 11.5.6.14].

$$Temps\ saturació = \frac{kmols\ reactius}{Cabal\ reaccionat} \quad [Eq. 11.5.6.14]$$

Substituint valors i canviant unitats es troba el temps de saturació de la següent manera:

$$Temps\ saturació = \frac{2659,03\ kmol}{9,5709\ kmol/h} = 277,82\ h \cdot \frac{1\ dia}{24\ h} = 11,58\ dies$$

Aquest és el temps de saturació considerant el 100%, no obstant es prefereix realitzar un 95% d'aquest temps per assegurar que la reïna no estigui saturada del tot, obtenint així un temps de saturació de 11 dies. Aquest paràmetre serà el que marcarà el canvi d'utilització del reactor R-203 a R-204 per tal de no haver de parar la planta cada cop que es satura la reïna.

11.5.6.3.1. Regeneració catalitzador

Per a la regeneració del catalitzador s'utilitza NaOH, el qual es fa circular en contracorrent (RFR, reverse flow regeneration) amb el fluid de procés tal i com mostra la figura 11.5.6.1.

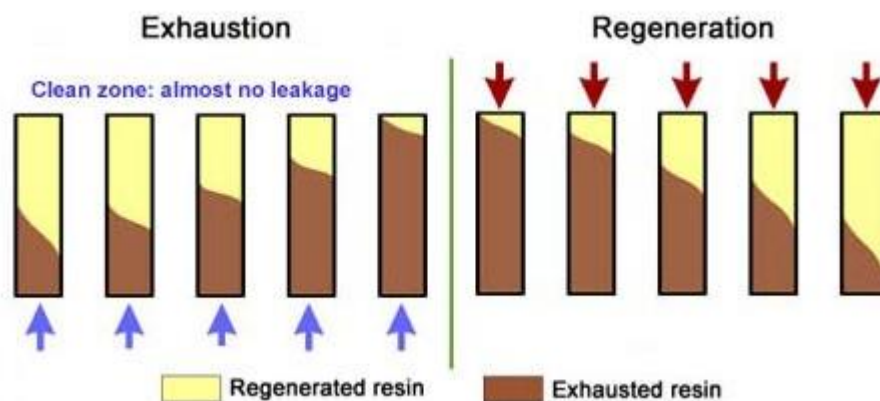


Figura 11.5.6.1. Circulació del fluid de procés (Esgotament reïna) i del fluid de NaOH (Regeneració reïna) en CONTRACORRENT

Per tal d'entendre el motiu de l'elecció d'aquest sentit, s'explica primerament el que suposaria que el corrent de NaOH fos en paral·lel (CFR, co-flow regeneration) amb el fluid de procés tal i com mostra la figura 11.5.6.2.

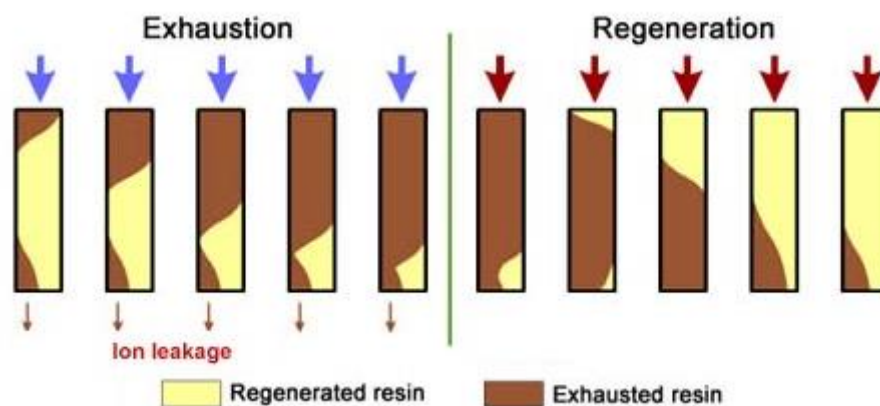


Figura 11.5.6.1. Circulació del fluid de procés (Esgotament reïna) i del fluid de NaOH (Regeneració reïna) en PARAL·LEL.

El problema que representa aquest sentit de flux és que en la regeneració no s'arriba a convertir del tot els ions, és a dir a regenerar la reïna, de manera que les capes a la sortida del reactor estan més contaminades que a l'entrada. Així doncs, en tornar a carregar el reactor hi hauria unes pèrdues més elevades a causa dels ions contaminats, aconseguint només una millora en l'augment massa elevat del cabal del fluid regenerador, en aquest cas sosa.

Aquest problema es representa a la figura 11.5.6.3. en la qual es mostra les zones esgotades i regenerades un cop s'ha dut a terme la regeneració.

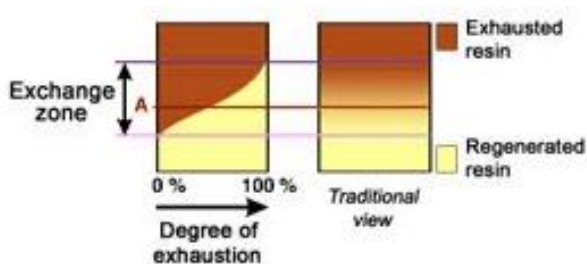


Figura 11.5.6.3. Proporcions esgotades i regenerades de la reïna quan es realitza una regeneració CFR.

La figura 11.5.6.3 representa un 50% de reïna esgotada i un 50% regenerada en el punt A obtenint doncs la reïna completament esgotada per sobre d'aquest punt i completament regenerada per sota d'aquest.

Així doncs, el flux RFR té dues avantatges significatives respecte el CFR les quals són una puresa major del fluid de procés a causa d'una pèrdua menor, i el requeriment menor de regenerant ja que els ions contaminants no han de ser impulsats per aquest al llarg de tot el llit de reïna a diferència del CFR, essent les pèrdues independents de la dosi de regenerant que s'hi fa circular. Les capes que estiguin menys esgotades seran les primeres a regenerar-se i les més netes en iniciar-se un altre cop la etapa d'esgotament.

L'efecte total de la regeneració de flux invers (RFR) es basa en capes de reïna fixes. La reïna amb el més alt grau de regeneració ha d'estar sempre a la sortida de la columna. Per tant, el llit de reïna no ha de ser rentat amb cap altre fluid abans de la regeneració, i no s'ha de permetre que aquest fluïditi en cap moment. Així doncs, o els tubs estan completament plens de reïna o el llit es manté premsat durant la regeneració.

La solució de NaOH especificada a la fitxa de seguretat per a la regeneració de la reïna, està concentrada del 2 al 4%, de manera que per seguretat es fa circular toluè abans que la sosa, per evitar la possible reacció del MIC amb l'aigua d'aquesta.

Finalment, i un cop regenerada la reïna també es fa circular toluè pur per tal d'eliminar del tot el compost regenerant, NaOH, i que d'aquesta manera no afecti en la producció del carbaril pel motiu acabat d'explicar. El temps en el que es fa passar aquest corrent és de 20 minuts, essent el mateix cabal que el de sosa, de manera que es consumiria 1,6 m³ de toluè tan abans com després de la regeneració.

Posteriorment s'ha de realitzar un assecament d'aquesta reïna per tal d'evitar que la reïna no actuï correctament o puguin quedar traces d'aigua o altres compostos, fent que el temps de saturació sigui el suposat. L'assecament d'aquesta consisteix en un cabal de nitrogen a 25°C a una velocitat de 30m³/h (rang típic 10-30m³/h) durant 30 minuts.

Per al càlcul del volum necessari de NaOH per a regenerar la reïna és necessari saber el cabal d'aquest obtingut de la Fitxa de Amberlyst A21, el temps de contacte d'aquest amb la reïna i el volum de reïna que hi ha en tots els tubs.

El primer paràmetre és troba entre 4 i 6 BV/h de manera que es pren el valor de 5 BV/h i es realitza l'equació [Eq. 11.5.6.15]:

$$Q_{NaOH} = 5 \cdot Volum\ reïna_{1\ tub} \cdot n^o\ tubs \quad [Eq. 11.5.6.15]$$

D'aquesta manera s'obté un cabal volumètric de NaOH de 4,38 m³/h.

El temps el qual es fa circular la sosa és de 90 minuts per tal d'assegurar una completa regeneració ja que el temps mínim de contacte especificat a la fitxa de la reïna és de 30 minuts.

Finalment, es calcula el volum de NaOH el com al producte d'aquest amb el cabal de sosa i el temps de contacte de 90 min especificat, obtenint un valor de 6,57 m³.

11.5.6.4. Pèrdua de càrrega

Abans de seguir amb el disseny de la carcassa del reactor es calculen les pèrdues de càrrega amb l'equació d'Ergun [Eq. 11.5.6.16].

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \cdot \frac{\mu_{mescla} \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot v_{sup}}{\varepsilon^3 \cdot D_p^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \varepsilon) \cdot V_s^2 \cdot \rho_{mescla}}{\varepsilon^3 \cdot D_p} \quad [Eq. 11.5.6.16]$$

El segon terme d'aquesta equació no es té en compte perquè fa referència a règim turbulent i nosaltres tenim règim laminar ($Re_p = 5,187$, menor a 20), de manera que el resultat és només respecte el primer.

El valor obtingut és superior a 2500 Pa/m tal i com es plasma a la taula 11.5.3.1, evitant d'aquesta manera els bypassos, i obtenint una ΔP de 10584,58 Pa.

11.5.6.5. Mètode de Kern

Per a prosseguir amb el disseny del reactor i per a corroborar alguns paràmetres ja dissenyats es duu a terme algunes parts del mètode de Kern.

L'espessor dels tubs es calcula resolent la velocitat equivalent per 1 L/min circulant per l'interior dels tubs i buscant el gruix de paret corresponent a la taula 11.1.6.1 extreta del McCabe (taula mostrada a l'apartat del manual de càlcul del reactor de clorur de metilcarbamil).

$$v_{1\text{ L/min}} = \frac{v_{sup}}{Q_{1\text{ tub}}} = \frac{0,0056\text{ m/s}}{0,0326\text{ m}^3/\text{h} \cdot 1000\text{ L/m}^3 \cdot 1\text{ h}/60\text{ min}} = 0,0104\frac{\text{m/s}}{\text{L/min}}$$

Consultant la taula 11.1.6.1 s'obté que l'espessor de paret (Δx) necessari és de 2,77 mm donant com a resultat un diàmetre extern de 50,8 mm tal i com mostra l'equació [Eq. 11.1.6.5].

$$D_e = D_i + 2 \cdot \Delta x \quad [\text{Eq. 11.1.6.5}]$$

Un cop es coneix el diàmetre extern dels tubs es pot calcular l'àrea de bescanvi de cada tub amb l'equació [Eq. 11.1.6.6] del manual de càlcul del reactor R-201, el qual és necessari pel càlcul del nombre mínim de tubs [Eq. 11.5.6.17].

$$n^{\circ} \text{ tubs mínim} = \frac{\text{Àrea total mínima}}{A_{\text{bescanvi 1 tub}}} \quad [\text{Eq. 11.5.6.17}]$$

Es troba que el número mínim de tubs per al bescanvi de calor és de 77, valor inferior al de disseny, de manera que no es tindrà cap problema per a una bona transferència de calor. Aquest fet també es corrobora amb el càlcul de l'àrea de bescanvi real total (taula 11.5.3.1), la qual resulta del producte de l'àrea de bescanvi d'un tub amb el nombre de tubs, essent major a la mínima requerida (obtinguda del balanç d'energia).

La distribució dels tubs a l'interior de la carcassa tal i com ja s'ha explicat a l'apartat 11.1.6 prové de la geometria escollida pel pitch. En aquest reactor s'ha escollit un pitch triangular, obtenint-se les constants per al càlcul del diàmetre del feix de tubs ([Eq. 11.1.6.9]) de la taula 11.1.6.2. per a un pas per tub. Resolent l'equació [Eq. 11.1.6.9]:

$$D_b = 50,8 \cdot \left(\frac{285}{0,319} \right)^{1/2,142} = 1212,2 \text{ mm}$$

El diàmetre de carcassa es pot calcular doncs, tenint en compte el tipus de carcassa escollit i la diferència entre $D_s - D_b$ segons la figura 11.1.6.2. del manual de càlcul del reactor de formació de clorur de metilcarbamat. S'ha escollit una carcassa de tipus P (Outside Packed Head), de manera que s'obté el diàmetre de carcassa amb l'equació [Eq. 11.1.6.10].

La determinació de la separació entre les pantalles deflectores (I_B) i el número de pantalles es fa mitjançant les equacions [Eq. 11.1.6.11] i [Eq. 11.1.6.12] del manual de càlcul del reactor R-201.

Un altre paràmetre important a determinar és l'alçada lliure de la pantalla o altrament dit baffle cut calculat amb l'equació [Eq. 11.1.6.13].

Per comprovar que el flux per carcassa és turbulent es calcula el nombre adimensional de Reynolds (Re_s) amb les mateixes equacions que per al reactor R-201 [Eq. 11.1.6.15], [Eq. 11.1.6.16], [Eq. 11.1.6.17] i [Eq. 11.1.6.18].

$$v_s = \frac{m_s}{A_{st} \cdot \rho_{oli\ t\grave{e}rmic}} \quad [Eq. 11.1.6.15]$$

$$A_{st} = \frac{I_B \cdot D_s \cdot (Pitch - D_e)}{(Pitch \cdot n_{ps})} \quad [Eq. 11.1.6.16]$$

$$Pitch = 1,25 \cdot D_e \quad [Eq. 11.1.6.17]$$

$$Re_s = \frac{\overline{\rho_{oli\ t\grave{e}rmic}} \cdot v_s \cdot D_s}{\overline{\mu_{oli\ t\grave{e}rmic}}} \quad [Eq. 11.1.6.18]$$

11.5.6.6. Disseny mecànic amb codi ASME

El disseny mecànic de la carcassa del reactor es realitza només per pressió interna. Aquest fet és degut a que no hi ha la possibilitat de que es formi el buit al reactor ja que té una sortida de venteig que porta el corrent als scrubbers de seguretat (per a la neutralització de MIC) i posteriorment té una incineradora en cas de no ser del tot neutralitzat, fent que estigui a l'atmosfera i per tant que impedeixi el buit en els equips.

La taula 11.5.6.3 mostra els valors de gruix obtingut amb el codi ASME explicat a l'apartat de tancs d'emmagatzematge per a pressió interna amb els paràmetres de corrosió utilitzats. El valor de la tensió de trencament (S) a la temperatura de disseny es troba a la taula de l'apartat 11.5.3. de paràmetres de disseny.

Taula 11.5.6.3. Gruixos obtinguts amb el codi ASME

CODI ASME	
Sobreesspessor de fabricació - CFAB (mm)	0,1·Espessor fons toriesfèric
Sobreesspessor de corrosió - CA (mm)	1
	Pressió interna
Espessor cos cilíndric (mm)	3
Espessor fons toriesfèric (mm)	3

11.5.6.7. Càlcul del volum i pesos dels reactors

Es realitza el càlcul del pes del reactor buit i ple, al igual que el volum de la carcassa i els fons torisfèrics. Per el càlcul dels volums s'utilitza les mateixes equacions que en els tancs d'emmagatzematge.

No obstant, pel càlcul del pes buit del reactor és necessari l'adició del pes dels tubs al igual que el pes de la reïna. De manera que el pes del reactor buit correspon a l'equació global [Eq. 11.5.7.1]

$$M_{equip} = \pi \cdot L_{cilind} \left(\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right) \cdot \rho_{material} + 2 \cdot \left((0.08089 D_e^3) - (0.08089 D_i^3) \right) \cdot \rho_{material} \\ + n^{\circ} tubs \cdot \pi \cdot L_{tubs} \left(\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right) \cdot \rho_{material} + Mr_{total} \quad [Eq. 11.5.7.1]$$

En el càlcul del pes del reactor d'operació, es realitza l'equació [Eq. 11.5.7.2] la qual difereix una mica tant en el reactor R-201 com en els tancs d'emmagatzematge degut a la reïna.

$$M_{operació} = M_{equip} + (V_{tubs} - V_{r1 tub} \cdot n^{\circ} tubs) \cdot \rho_{mescla tubs} \\ + (V_{carcassa+fondos} - V_{tubs}) \rho_{refrig} \quad [Eq. 11.5.7.2]$$

Els valors d'aquests paràmetres es troben agrupats a l'apartat 11.5.3. de paràmetres de disseny.

11.5.6.8. Material de construcció

Per a determinar el material utilitzat en el reactor es centra l'elecció en el MIC i el 1-naftol ja que tant el carbaril com el toluè no són corrosius.

A través de les MSDS del MIC i el 1-naftol s'observa com aquests compostos són corrosius però per al ésser humà, provocant lesions oculars greus entre d'altres. Aquest fet fa pensar en la possibilitat d'utilitzar qualsevol tipus d'acer inoxidable, i es constata amb l'article "Review of Methyl isocyanate (MIC) production at The Union Carbide Corporation facility Institute, West Virginia" obtingut de "US Environmental Protection Ambient (EPA)", on s'indica que tots aquells equips que no estiguin en contacte amb el clorur d'hidrogen gas poden ser fabricats d'acer inoxidable.

Dins la possibilitat de ser un acer inoxidable, s'ha decidit utilitzar el 316L ja que és un dels més resistents i comuns en ambients marins, tenint problemes en presència d'alts continguts en clor. Aquest darrer fet no afecta, essent una bona elecció pel disseny. L'acer inoxidable 316L està compost per un 16% massic de crom, 10% de níquel, 0,03% de carboni i un 2% de molibdè.

L'ús de crom es caracteritza pel fet de millorar la passivitat i per tant la resistència al inici de l'atac. Per contra, un cop comença la corrosió empitjora l'acidesa i els resultats en l'elevada propagació de l'atac.

Per altra banda el níquel té un petit efecte positiu en la resistència a esquerdes a l'inici de la corrosió, i en el cas de que s'iniciï aquesta, redueix la velocitat d'atac.

Finalment, el molibdè millora la passivitat i la resistència a la corrosió per picades i esquerdes.

11.6. Mescladors

El mesclat es una operació important, inclús fonamental, en casi tots els processos químics. El procés de mescla implica la interposició de dos o més components separats per formar un producte més o menys homogeni.

Els avantatges de l'agitació són entre d'altres garantir una mescla homogènia, millorar la transferència de matèria i de energia ,prevenir possibles col·lapses en el procés i mantenir una producció constant.

En la planta es disposen de mescladors de naftol-toluè, de naftol-toluè-mic (previs al reactor R-203 i R-204) i mescladors al downstream o etapa de purificació. A continuació es mostra el procediment del càlcul de disseny d'aquestes unitats.

- Venteig

Els sistemes de venteig son sistemes dissenyats per prevenir els efectes de les alteracions de la pressió interna de un recipient d'emmagatzematge. La mida del venteig d'un tanc, com s'ha dit en les notes introductòries ha de ser de mida com a mínim igual o major a la de les canonades de carga o descarrega i en cap cas ser inferiors a 35 mm de diàmetre.

La figura 11.2.1.6 servei per triar el valor factor de reducció, en el cas que la situació no aparegui en la figura el valor de F serà la unitat. En aquest cas el valor de F és 1. La figura 11.6.2 mostra les capacitats totals d'emergència dels mescladors que treballen a sobrepressió deguda a la inertització amb nitrogen.

Taula 11.6.2 Kg/h de vap. de líquid de venteig dels mescladors.

DM-301	DM-302	DR-301 i DR-302
--------	--------	-----------------

A (m ²)	5,87	2,42	11,06
Q (kJ/h)	596718	288258,8	1002127,8
Kg/h	13,78	3,96	22,1 (DR-301), 21,94 (DR-302)

11.6.1. Dipòsits mescla DM-201 i DM-202

Es necessari preparar la mescla de reactius dels reactors R-203 i R-204 abans d'introduir-los en ells. El α -naftol es fabrica en una fabrica dintre del complex industrial i arriba a planta en estat sòlid en big bags de 1000kg. El reactor també necessita toluè (dissolvent) provinent part del sistema de bescanvi de calor reactor de producció de Sevin®, per tant es decideix dissoldre el α -naftol en toluè en els dipòsits mescla DM-201 i DM-202. El reactor de producció de Sevin® també necessita MIC que s'introdueix posteriorment en la mescla de α -naftol toluè.

El α -naftol es dissol de manera lliure i gairebé de manera instantània en dissolvents orgànics com etil alcohol, isopropil, acetona, cloroform, toluè i altres substàncies creant solucions clares i estables, aquesta informació ha estat extreta de la patent US2171555 A.

- Condicions de mescla

El α -naftol (sòlid) i el toluè (líquid) s'introdueixen a 40°C i pressió atmosfèrica en els mescladors DM-201 i DM-202 on s'agita i s'escalfa la mescla fins a 88°C, que es la temperatura d'entrada al reactor R-203 i R-204 i a més escalfant la mescla fa que el α -naftol es dissol més ràpidament. Per garantir una bona mescla i un bon bescanvi de calor s'estableix un temps de residència de 1 hora.

- Capacitat de mescla

La capacitat dels mescladors ve fixada per els cabals de Toluè recirculats i per el α -naftol que es necessita als reactors de producció de Sevin®. A continuació la taula 11.6.1.1 mostra els cabals d'entrada massics, volumètrics i molars dels mescladors.

Fixant una fracció de líquid típica per a tancs agitats de 65% i sabent que el temps de residència es de 1 hora, el volum dels mescladors resulta de:

$$V_{DM-201,DM-202} = 5,09 \text{ m}^3 \rightarrow 65\% \text{ ple} \rightarrow 6,87 \text{ m}^3$$

- Dimensions

A continuació s'exposen les equacions utilitzades per al càlcul del volum dels mescladors DP-202 i DP-202. Es suposa un valor típic aproximat de 1,5 per a la relació L/D. El equip consta d'un cos central cilíndric més un fons superior i inferior toriesfèric ,per tant el volum de l'equip serà la suma del volum de les parts descrites anteriorment.

$$V_{equip} = V_{cilindre} + V_{toriesfèric} + V_{toriesfèric} \text{ [Eq. 11.4.4.2]}$$

$$V_{cilindre} = \pi \frac{D^2}{4} H_{cilindre} \text{ [Eq. 11.4.4.3]}$$

$$V_{toriesfèric} = 0.08089 \cdot D^3 \text{ [Eq. 11.4.4.4]}$$

$$H_{cilindre} = 1.5 \cdot D \text{ [Eq. 11.4.4.5]}$$

$$V_{equip} = \pi \frac{D^2}{4} 1.5 \cdot D + 2 \cdot (0.08089 \cdot D^3) \text{ [Eq. 11.4.4.6]}$$

La taula 11.6.1.1 mostra les dimensions obtingudes dels mescladors DM-201 i DM-202 calculades amb les expressions anteriors. El material de construcció és el AISI 316L ja que la mescla no presenta cap tipus d'incompatibilitat amb aquest material.

L'alçada del líquid es calcula amb les mateixes expressions utilitzades del reactor R-202. Per calcular l'alçada del fons toriesfèric primer s'ha de suposar un valor d'espessor i després substituir-lo pel valor final calculat a partir del mètode ASME comprovant que aquest nou valor d'espessor és apte per al disseny de l'equip.

Taula 11.6.1.1. Paràmetres de disseny del mescladors DM-201 i DM-202.

PARÀMETRES DE DISSENY DELS MESCLADOR DM-201 i DM-202			
Material		AISI 316L	
DM-201 i DM-202			
Volum equip (m³)	6,95	T disseny (°C)	108
V cilindre	6,11	P disseny (atm)	1,35
V fons toriesfèric	0,419	S (Psi) SA-240 316L	15700

Altura fons toriesfèric	0,35	r [m]	0,173
V fons toriesfèrics	0,838	R [m]	1,73
Altura cilindre (m)	2,6	L [m]	0,35
Diàmetre intern (m)	1,73	M	1,54
Altura equip	3,3	ρ material [Kg/m ³]	7980

- Disseny mecànic

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix la columna de líquid que hi ha dins del mesclador. Si l'alçada del líquid es de 2,42m;

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 844 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \cdot 2,42 \cdot 0,65 = 17325 \text{ Pa} = 0,17 \text{ atm} \quad [\text{Eq. 11.1.5}]$$

La temperatura i la pressió d'operació és de 88°C i 1 atm respectivament. A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{\text{disseny}} = (1 \text{ atm} + 0,17 \text{ atm}) \cdot 1,15 = 1,35 \text{ atm} \quad [\text{Eq. 11.1.4}]$$

$$T = 88^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C} = 108^\circ\text{C} \quad [\text{Eq. 11.1.6}]$$

El mesclador té fons inferior i superior toriesfèric i un cos cilíndric com s'ha dit anteriorment. Amb les equacions que es presenten a continuació es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior i inferior toriesfèric.

$$t_{\text{cilindre}} = \frac{P R}{S E - 0,6 P} + C_A \quad [\text{Eq. 11.1.1}]$$

$$t_{\text{toriesfèric}} = \frac{P L M}{2 S E - 0,2 P} + C_A + C_{FAB} \quad [\text{Eq. 11.1.2}]$$

Taula 11. Especificacions generals dels mescladors DM-201 i DM-202

ESPECIFICACIONS GENERALS			
T disseny (°C)	108	t total toriesfèric (mm)	5
P disseny (atm)	1,38	S [Psi] SA-240 316L	15700
t cilindre (mm)	4	E cilindre (m)	0,85
t total cilindre (mm)	5	Presió externa (atm)	1
t toriesfèric (mm)	3,5	E toriesfèric (m)	1

- Pes de l'equip

Per calcular el pes mescladors sensers s'ha de calcular el pes dels fons toriesfèrics i el del cilindre.

Es calcula el pes de les tres estructures per separat i es sumen els pesos.

$$M_{cilindre} = \pi \cdot H_{cilindre} \left(\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right) \rho_{material} \quad [Eq. 11.2.1.7]$$

$$M_{toriesfèric} = \left((0.08089 D_e^3) - (0.08089 D_i^3) \right) \rho_{material} \quad [Eq. 11.2.1.8]$$

$$M_{op.} = M_{equip.} + (V_{sòlid} \cdot \rho_{aparent}) \quad [Eq. 11.2.1.9]$$

$$M_{sòlid} = \rho \cdot fracció \text{ liquid} \cdot V \text{ liquid} \quad [Eq. 11.2.1.10]$$

Taula 11. Pesos dels mescladors DM-201 i DM-202 buits i en operació

PES DE L'EQUIP	
ρ material (Kg/m3)	7980

M líquid (Kg)	3814,6
M cilindre (Kg)	282,3
M fons toriesf. (Kg)	58,1
M buit (Kg)	340,4
M en operació (Kg)	4155,1

- Balanç d'energia

El balanç d'energia dels mescladors per determinar la calor total a bescanviar es realitza amb l'equació 11.1.5.1 només tenint en compte la part de l'equació que pertany al calor bescanviat de la mescla ja que no hi ha reacció.

Les Cp per a cada component s'obtenen del simulador de processos Aspen HYSYS v.8.2. Llavors la calor total a bescanviar als mescladors DM-201 i DM-202 es resol substituint valors a l'equació [Ec. 11.1.5.1].

$$q = 65,77 \cdot 174,4 \cdot (40 - 88) + 10,49 \cdot 187,8 \cdot (40 - 88)$$

$$q = 674759 \frac{kJ}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} = 187,4 kW$$

Un cop es sap la calor total a bescanviar, es determina l'àrea de transferència necessària per poder retirar la calor generada segons l'equació [Eq. 11.2.5.4].

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T} = \frac{187433 W}{500 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} (32^\circ C)} = 11,71 m^2$$

On ΔT correspon a la variació de les temperatures de l'oli tèrmic i del reactor. La temperatura que s'usa per el oli és la mitja de temperatures entre l'entrada i la sortida.

Al no tenir dades de oil (camisa)-light orgànics (recipient) es tria una U d'entre 250-500 W/m²·°C que és la que correspon a vapor d'aigua (camisa)-light orgànics (recipient). S'ha triat un valor de 500 W/m²·°C ja que el Dowtherm J és molt millor que el vapor d'aigua.

Jacketed vessels

Jacket	Vessel	
Steam	Dilute aqueous solutions	500–700
Steam	Light organics	250–500
Water	Dilute aqueous solutions	200–500
Water	Light organics	200–300

Figura 11.2.5.1. *Valors típics de coeficients globals de transmissió de calor $W/m^2 \cdot ^\circ C$ per bescanviadors de camisa.*

Per al càlcul del cabal màssic de refrigerant s'utilitza l'equació 11.1.5.6 on la C_{pf} (capacitat calorífica del oli tèrmic) a la temperatura de $88^\circ C$ és de 2,058. Aquest valor s'ha extret de la fitxa tècnica de l'oli de la companyia DOW. La diferència de temperatura correspon a la diferència entre l'entrada i sortida de la camisa.

$$q = m_f \cdot C_{pf} \cdot \Delta T \quad [Eq. 11.1.5.6]$$

- Disseny del sistema de calefacció

El sistema necessita aportació de calor com ja s'ha explicat anteriorment i aquesta aportació es farà mitjançant una camisa. Aquest sistema consta d'una cambra que recobreix el mesclador per el qual hi circula l'oli tèrmic. S'ha descartat un sistema de bescanvi de calor amb un serpentí ja que aquest dificultaria l'agitació, i també s'ha descartat bescanvi de calor amb mitja canya ja que la camisa és més simple. La figura 11.X.X mostra un esquema d'una camisa aplicada a un dipòsit amb fons superior i inferior toriesfèric, on per la part superior entra l'oli tèrmic i per la part inferior surt.

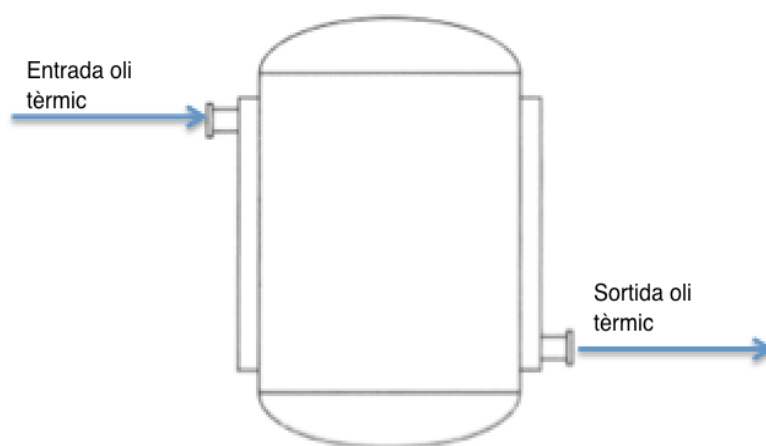


Figura 11.X.X.X. *Esquema d'una camisa.*

S'ha de comprovar que l'àrea del cilindre que està en contacte amb el líquid dels mesclador sigui suficient per albergar tota l'àrea de bescanvi de calor que necessita el sistema.

$$A_{\text{bescanvi camisa}} (11,71 m^2) \leq A_{\text{cilindre}} (12,64 m^2)$$

La Taula 11.2.5.3 mostra els resultats finals obtinguts al realitzar el balanç d'energia emprant com a refrigerant l'oli tèrmic Dowtherm J.

Taula 11.2.5.3. Resultats del balanç d'energia emprant oli tèrmic com a refrigerant.

BALANÇ D'ENERGIA			
Refrigerant (oli tèrmic)		Dowtherm J	
Cabal màssic de refrigerant (kg/h)		15583	
ΔT (oli tèrmic)	32	A (m ²)	11,71
U (W/(m ² ·°C))	500	Cpf (kJ/kg·K)	2,165
A cilindre(m ²)	12,64	mf (kmol/h)	116,3

Els 11,71 m² d'àrea de bescanvi es reparteixen des de la part inferior del mesclador on es troba el líquid.

- Agitació

La mescla està classificada com un sistema de viscositat baixa segons la classificació de la bibliografia consultada (Coulson and Richardson's Chemical Engineering) ja que les viscositats està per sota de 10 N·s/m². Per aquests fluids la velocitat d'agitació sol estar entre 10 i 25 rps o Hz, per això s'ha escollit una de 10 rps.

L'agitador escollit és un de tipus marítim amb tres aspes donada la seva ampla implantació i perquè són molt útils per sistemes amb viscositats baixes.

Amb la figura 11.4.10.2 extreta del "Perry's Chemical Engineering Handbook" es pot determinar el número de potència amb la corba corresponent a l'agitador marítim de tres pales (a) i amb el número de Reynolds del mesclador (Eq 11.4.10.1).

$$Re = \frac{N \cdot \rho_L \cdot D^2}{\mu_L} \quad [Eq. 11.4.10.1]$$

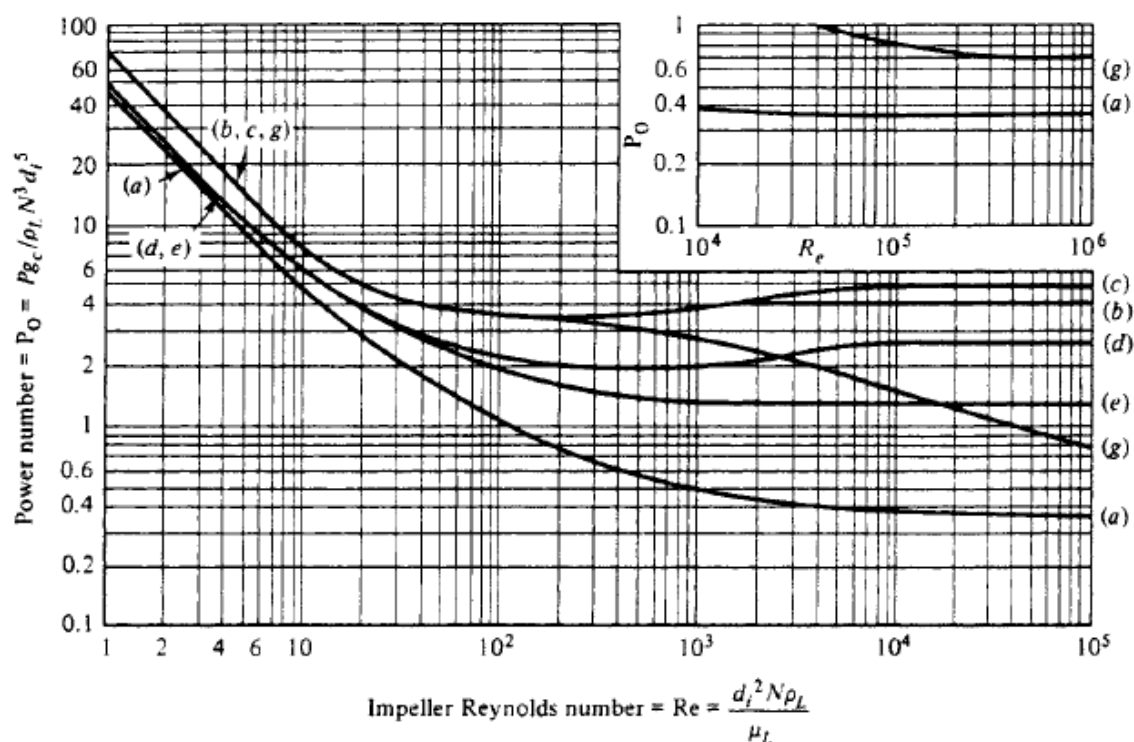


Figura 11.4.10.2. Número de potència per diferents tipus de agitador en base al número de Reynolds.

Un cop obtingut el número de potència amb l'equació 11.4.10.2 es calcula la potència necessària d'agitació.

$$P = N_p \cdot \rho_L \cdot N^3 \cdot D^5 \quad [Eq. 11.4.10.2]$$

El sistema d'agitació ha d'incloure bafles que millorin la transferència de matèria i energia evitant els vòrtex. Aquest sistema es dissenya amb la figura 11.4.3.10 extreta del "Coulson and Richardson's Chemical Engineering"

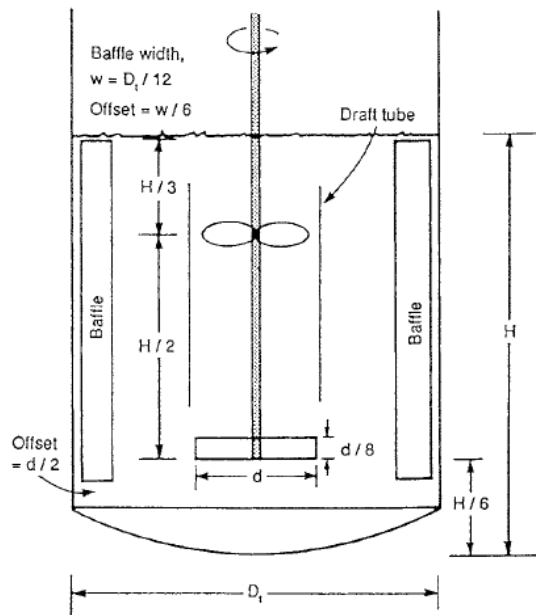


Figura 11.4.3.10. Dimensionament de la posició de l'agitador i dels bafles.

En la següent taula es fa un resum dels diferents paràmetres obtinguts per al sistema d'agitació.

Taula 11.2.5.3. Resultats del paràmetres del sistema d'agitació.

Tipus d'agitador	
Agitador maritim de 3 pales	
kW/m ²	3,45
rps	10
Densitat mescla [Kg/m ³]	844,5
Viscositat mescla [cP]	0,38
Re	88661,41732
D/Dt	0,33
Np	0,35
Diametro agitador [m]	0,660
Potencia (kW)	37,016

altura primer agitador [m]	0,671
altura segon agitador [m]	0,335
w agitador	0,083
4 Baffles	
offset [m]	0,330
w baffle	0,167
distància a la pared [m]	0,014

Si s'observa el valor de kW/m^2 i es compara amb la taula 11.X.X es pot veure com la agitació es classifica com violenta, i s'ha fixat aquest ja que es pretén dissoldre ràpidament el α -naftol en el Toluè.

Si s'observa el valor de kW/m^2 i es compara amb la taula 11.4.10.2 es pot veure com la agitació es classifica com violenta per assegurar una bona transferència de matèria i de energia.

Taula 11.4.10.3. Requeriments de potència en tancs agitats en funció del volum i de la potència d'agitació.

Agitation	Applications	Power, kW/m^3
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

11.6.2. Dipòsit de mescla DM-203

Un cop la mescla de α -naftol i toluè surt del DM-202 a 88°C s'introdueix en un altre mesclador (DM-203) per acabar de dissoldre el α -naftol garantint així una mescla homogènia. La mescla, al sortir del mesclador DM-203, s'introdueix en el últim mesclador, en el qual s'introdueix MIC a

la mescla de α -naftol i toluè, abans d'entrar al reactor R-203 i R-204. El mesclador a diferència dels altres dos no s'escalfa sinó que s'aïlla tèrmicament per evitar pèrdues de calor ja que el temps de residència és petit.

- Condicions de mescla

El α -naftol (sòlid) i el toluè (líquid) s'introdueixen a 88°C i pressió atmosfèrica en el mesclador DM-203. Per garantir una bona mescla i un bon bescanvi de calor s'estableix un temps de residència de 1 hora.

- Capacitat de mescla

La capacitat del mesclador es calcula al establir un temps de residència de 20 minuts, ja que el cabal de mescla serà el mateix que en els mescladors DM-201 i DM-202.

Fixant una fracció de líquid típica per a tancs agitats de 65% i sabent que el temps de residència es de 20 min, es pot determinar el volum dels mescladors de la següent manera.

$$V_{DM-203} = 7,697 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1 h}{60 min} 15 min = 2,57 m^3 \rightarrow 65\% ple \rightarrow 3,46 m^3$$

- Dimensions

Les suposicions per al dimensionament del mesclador DM-203 són les mateixes que per els mescladors anteriors ja que és igual però de menor volum per tant les equacions utilitzades seran les mateixes.

La taula 11.1X mostra les dimensions obtingudes dels mesclador DM-203 calculades amb les expressions anteriors. El material de construcció és el AISI 316L igual que per els mescladors anteriors.

Taula 11. Paràmetres de disseny del mesclador DM-203.

PARÀMETRES DE DISSENY DELS MESCLADOR DM-203			
Material		AISI 316L	
DM-203			
Volum equip (m³)	3,52	T disseny (°C)	108

V cilindre	3,08	P disseny (atm)	1,3
V fons toriesfèric	0,22	S (Psi) SA-240 316L	15700
Altura fons toriesfèric	0,289	r [m]	0,140
V fons toriesfèrics	0,44	R [m]	1,4
Altura cilindre (m)	2	L [m]	0,289
Diàmetre intern (m)	1,4	M	1,54
Altura equip	2,58	ρ material [Kg/m ³]	7980

- Disseny mecànic

Encara que el mesclador té la mateixa geometria que els mescladors anteriors, aquest té diferents gruixos degut a que té un volum menor.

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix la columna de líquid que hi ha dins del mesclador. Si l'alçada del líquid es de 1,63m;

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 844 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \cdot 1,63 \cdot 0,65 = 13510 \text{ Pa} = 0,133 \text{ atm} \quad [\text{Eq. 11.1.5}]$$

La temperatura i la pressió d'operació és de 88C i 1 atm respectivament. A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{\text{disseny}} = (1 \text{ atm} + 0,198 \text{ atm}) \cdot 1,15 = 1,30 \text{ atm} \quad [\text{Eq. 11.1.4}]$$

$$T = 88^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C} = 108^\circ\text{C} \quad [\text{Eq. 11.1.6}]$$

El mesclador té fons inferior i superior toriesfèric i un cos cilíndric com s'ha dit anteriorment. Amb les equacions que es presenten a continuació es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior i inferior toriesfèric. La taula 11.1.X mostra les especificacions del mesclador DM-203.

$$t_{\text{cilindre}} = \frac{P R}{S E - 0,6 P} + C_A \quad [\text{Eq. 11.1.1}]$$

$$t_{\text{toriesfèric}} = \frac{P L M}{2 S E - 0.2 P} + C_A + C_{FAB} \text{ [Eq. 11.1.2]}$$

Taula 11. Especificacions generals dels mesclador DM-203.

ESPECIFICACIONS GENERALS			
T disseny (°C)	108	t total toriesfèric (mm)	5
P disseny (atm)	1,3	S [Psi] SA-240 316L	15700
t cilindre (mm)	4	E cilindre (m)	0,85
t total cilindre (mm)	5	Presió externa (atm)	1
t toriesfèric (mm)	3,5	E toriesfèric (m)	1

- Pes de l'equip

Per calcular el pes mesclador senser s'ha de calcular el pes dels fons toriesfèrics i el del cilindre. S'utilitzen les mateixes equacions que per els altres mescladors.

Taula 11. Pesos del dipòsit de DM-203 buit i en operació

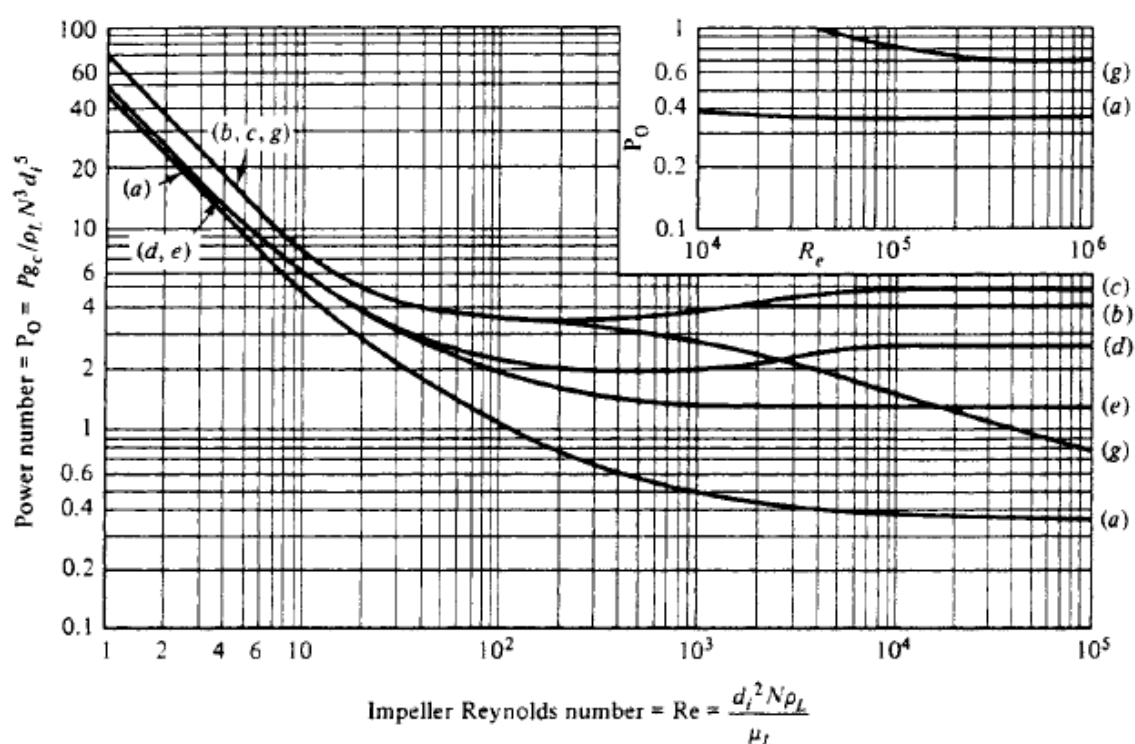
PES DE L'EQUIP	
ρ material (Kg/m3)	7980
M líquid (Kg)	1933,7
M cilindre (Kg)	175,8
M fons toriesf. (Kg)	38,1
M buit (Kg)	213,9
M en operació (Kg)	2147,6

- Agitació

La mescla és la mateixa que l'anterior per tant està classificada com un sistema de viscositat baixa segons la classificació de la bibliografia consultada. En aquest cas s'ha fixat una velocitat d'agitació de 10 rps ja que el temps de residència es menor que el dels mescladors.

L'agitador escollit és un de tipus marítim amb tres aspes donada la seva ampla implantació i perquè són molt útils per sistemes amb viscositats baixes.

Amb la figura 11.4.10.2 extreta del "Perry's Chemical Engineering Handbook" es pot determinar el número de potència amb la corba corresponent a l'agitador marítim de tres pales (a) i amb el número de Reynolds del mesclador (Eq 11.4.10.1).



$$Re = \frac{N \cdot \rho_L \cdot D^2}{\mu_L} \quad [Eq. 11.4.10.1]$$

Figura 11.4.10.2. Número de potència per diferents tipus de agitador en base al número de Reynolds.

Un cop obtingut el número de potència amb l'equació 11.4.10.2 és calcula la potència necessària d'agitació.

$$P = N_p \cdot \rho_L \cdot N^3 \cdot D^5 \quad [Eq. 11.4.10.2]$$

El sistema d'agitació ha d'incloure bafles que millorin la transferència de matèria i energia evitant els vòrtex. Aquest sistema es dissenya amb la figura 11.4.3.10 extreta del “Coulson and Richardson's Chemical Engineering”

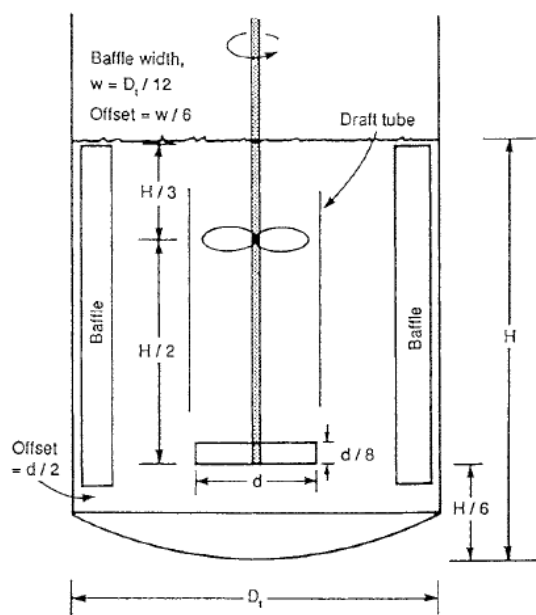


Figura 11.4.3.10. Dimensionament de la posició de l'agitador i dels bafles.

En la següent taula es fa un resum dels diferents paràmetres obtinguts per al sistema d'agitació.

Taula 11.2.5.3. Resultats del paràmetres del sistema d'agitació.

Tipus d'agitador	
Agitador marítim de 3 pales	
kW/m ³	1,69
rps	10,000
Densitat mescla [Kg/m ³]	844,50
Viscositat mescla [cP]	0,38
Re	43444,09
D/Dt	0,33
Np	0,35

Diametro agitador [m]	0,458
Potencia (kW)	5,958
altura primer agitador [m]	0,448
altura segon agitador [m]	0,224
w agitador	0,057
4 Baffles	
offset [m]	0,229
w baffle	0,117
distància a la pared [m]	0,010

Si s'observa el valor de kW/m² i es compara amb la taula 11.4.10.3 es pot veure com la agitació es classifica com severa. L'agitació del mesclador del DM-203 està classificada amb un grau menys d'intensitat que els mescladors anterior degut a que en el mesclador DM-203 només es vol garantir una mescla homogènia i no dissoldre el α -naftol en el toluè.

Taula 11.4.10.3 Requeriments de potència en tancs agitats en funció del volum i de la potència d'agitació.

Agitation	Applications	Power, kW/m ³
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

11.6.3. Dipòsit de mescla DM-204

- Condicions de mescla

La mescla de α -naftol i toluè a 84°C s'introdueix en l'últim mesclador juntament amb toluè i MIC a 40°C provinent de la torre de CD-301 i MIC a -5°C provinent del dipòsit de MIC. La mescla de α -naftol i toluè surt a una temperatura de 88°C dels mescladors DM-201 i DM-202 i entra al mesclador DM-204 a 84°C, ja que es suposa una pèrdua de 4°C entre mescladors.

El conjunt s'escalfa fins a 88°C que és la temperatura d'entrada del reactor R-203 i R-204. S'estableix un temps de residència de 20 minuts ja que segons els càlculs realitzats al balanç d'energia és suficient temps per obtenir un àrea de bescanvi raonable i per assegurar la dissolució de MIC.

- Capacitat de mescla

La capacitat dels mescladors ve fixada per els cabals de Toluè i MIC recirculats de la torre CD-301 i per el MIC que es necessita als reactors de producció de Sevin®. A continuació la taula 11.X.X mostra els cabals d'entrada massics, volumètrics i molars del mesclador.

Taula 11. Cabals d'entrada als mesclador DM-204.

Cabal entrada	kmol/h	kg/h	m ³ /h	w(% pes)
Q(Toluè)	68,23	6287,26	7,25	74,8
Q(Naftol)	10,49	1512,97	1,38	18
Q(MIC)	10,60	605,19	0,655	7,2
Q total	89,33	8405,43	9,28	100

Fixant una fracció de líquid típica per a tancs agitats de 65% i sabent que el temps de residència es de 20 minuts, es pot determinar el volum dels mescladors de la següent manera.

$$V_{DM-201,DM-202} = 9,289 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1 h}{60 min} \cdot 20 min = 3,09 m^3 \rightarrow 65\% ple \rightarrow 4,180 m^3$$

- Dimensions

Les suposicions per al dimensionament del mesclador DM-204 són les mateixes que per els mescladors anteriors ja que és igual però de volum diferent per tant les equacions utilitzades seran les mateixes.

La taula 11.1X mostra les dimensions obtingudes dels mesclador DM-204 calculades amb les expressions anteriors. El material de construcció és el AISI 316L igual que per els mescladors anteriors.

Taula 11. Paràmetres de disseny del mesclador DM-204.

PARÀMETRES DE DISSENY DELS MESCLADOR DM-203			
Material		AISI 316L	
DM-203			
Volum equip (m³)	4,24	T disseny (°C)	108
V cilindre	3,73	P disseny (atm)	1,32
V fons toriesfèric	0,257	S (Psi) SA-240 316L	15700
Altura fons toriesfèric	0,303	r [m]	0,147
V fons toriesfèrics	0,513	R [m]	1,47
Altura cilindre (m)	2,2	L [m]	0,303
Diàmetre intern (m)	1,47	M	1,54
Altura equip	2,805	ρ material [Kg/m3]	7980

- Disseny mecànic

Encara que el mesclador té la mateixa geometria que els mescladors anteriors, aquest té diferents gruixos degut a que té un volum menor als mescladors DM-201 i DM-202.

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix la columna de líquid que hi ha dins del mesclador. Si l'alçada del líquid es de 1,78m;

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 835,5 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \cdot 1,78 \cdot 0,65 = 14559,2 Pa = 0,143 atm \text{ [Eq. 11.1.5]}$$

La temperatura i la pressió d'operació és de 88°C i 1 atm respectivament. A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{disseny} = (1 \text{ atm} + 0,143 \text{ atm}) \cdot 1,15 = 1,32 \text{ atm} \quad [Eq. 11.1.4]$$

$$T = 88^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C} = 108^{\circ}\text{C} \quad [Eq. 11.1.6]$$

El mesclador té fons inferior i superior toriesfèric i un cos cilíndric com s'ha dit anteriorment. Amb les equacions que es presenten a continuació es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior i inferior toriesfèric. La taula 11.1.X mostra les especificacions del mesclador DM-204.

$$t_{cilindre} = \frac{P R}{S E - 0,6 P} + C_A \quad [Eq. 11.1.1]$$

$$t_{toriesfèric} = \frac{P L M}{2 S E - 0,2 P} + C_A + C_{FAB} \quad [Eq. 11.1.2]$$

Taula 11. Especificacions generals dels mesclador DM-204.

ESPECIFICACIONS GENERALS			
T disseny (°C)	108	t total toriesfèric (mm)	5
P disseny (atm)	1,32	S [Psi] SA-240 316L	15700
t cilindre (mm)	4	E cilindre (m)	0,85
t total cilindre (mm)	5	Presió externa (atm)	1
t toriesfèric (mm)	3,5	E toriesfèric (m)	1

- Pes de l'equip

Per calcular el pes mesclador senser s'ha de calcular el pes dels fons toriesfèrics i el del cilindre. Es calcula el pes de les tres estructures per separat i es sumen els pesos. S'utilitzen les mateixes equacions que per els altres mescladors.

Taula 11. Pesos del mesclador DM-204 buit i en operació

PES DE L'EQUIP	
ρ material (Kg/m ³)	7980
M líquid (Kg)	2306,8
M cilindre (Kg)	203,0
M fons toriesf. (Kg)	42,0
M buit (Kg)	245,0
M en operació (Kg)	2551,8

- Balanç d'energia

El balanç d'energia dels mescladors per determinar la calor total a bescanviar es realitza amb l'equació 11.1.5.1 només tenint en compte la part de l'equació que pertany al calor bescanviat de la mescla ja que no hi ha reacció, igual que per als mescladors amb camisa anteriors.

Les Cp per a cada component s'obtenen del simulador de processos Aspen HYSYS v.8.2. Llavors la calor total a bescanviar al mesclador DM-204 es resol substituint valors a l'equació [Ec. 11.1.5.1] on es tenen en compte les temperatures dels diferents corrents d'entrada.

$$q = 68,24 \cdot 174,4 \cdot (84 - 88) + 10,49 \cdot 187,8 \cdot (40 - 88) + 1,036 \cdot 58,55 \cdot (40 - 88) + 9,57 \cdot 58,55 \cdot ((-5) - 88)$$

$$q = 110513 \frac{kJ}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} = 30,69 kW$$

Un cop es sap la calor total a bescanviar, es determina l'àrea de transferència necessària per poder retirar la calor generada segons l'equació [Eq. 11.2.5.4].

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T} = \frac{30698,8 W}{500 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} (32^\circ C)} = 1,92 m^2$$

On ΔT correspon a la variació de les temperatures de l'oli tèrmic i del reactor. La temperatura que s'usa per el oli és la mitja de temperatures entre l'entrada i la sortida.

Al no tenir dades de oil (camisa)-light orgànics (recipient) es tria una U de entre 250 i 500 W/m²·°C (500 W/m²·°C). S'utilitza la mateixa U que els mescladors DM-201 i DM-202, ja que el raonament fet per aquests mescladors també s'aplica al mesclador DM-204.

Per al càlcul del cabal màssic de refrigerant s'utilitza l'equació 11.1.5.6 on la C_{pf} (capacitat calorífica del oli tèrmic) a la temperatura de 88°C és de 2,058. La diferència de temperatura correspon a la diferència entre l'entrada i sortida de la camisa.

$$q = m_f \cdot C_{p_f} \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 11.1.5.6})$$

- Disseny del sistema de calefacció

El sistema necessita aportació de calor com ja s'ha explicat anteriorment i aquesta aportació es farà mitjançant una camisa. El sistema de calefacció consta d'una camisa aplicada a un dipòsit amb fons superior i inferior toriesfèric, on per la part superior entra l'oli tèrmic i per la part inferior surt.

S'ha de comprovar que l'àrea del cilindre que esta en contacte amb el líquid dels mesclador sigui suficient per albergar tota l'àrea de bescanvi de calor que necessita el sistema.

$$A_{\text{bescanvi camisa}} (1,92 \text{ m}^2) \leq A_{\text{cilindre}} (6,81 \text{ m}^2)$$

La Taula 11.2.5.3 mostra els resultats finals obtinguts al realitzar el balanç d'energia emprant com a refrigerant l'oli tèrmic Dowtherm J.

Taula 11.2.5.3. Resultats del balanç d'energia emprant oli tèrmic com a refrigerant.

BALANÇ D'ENERGIA			
Refrigerant (oli tèrmic)		Dowtherm J	
Cabal màssic de refrigerant (kg/h)		2552,3	
ΔT (oli tèrmic)	32	A besc(m ²)	1,92
U (W/(m ² ·°C))	500	C _{pf} (kJ/kg·K)	2,165
A cilindre(m ²)	6,81	m _f (kmol/h)	20

Els 1,92 m² d'àrea de bescanvi es reparteixen des de la part inferior del mesclador on es troba el líquid.

- Agitació

La mescla és la mateixa que l'anterior per tant està classificada com un sistema de viscositat baixa segons la classificació de la bibliografia consultada. En aquest cas s'ha fixat una velocitat d'agitació de 10 rps ja que el temps de residència es menor que el dels mescladors DM-201 i DM-202.

L'agitador escollit és un de tipus marítim amb tres aspes donada la seva ampla implantació i perquè són molt útils per sistemes amb viscositats baixes.

Amb la figura 11.4.10.2 extreta del "Perry's Chemical Engineering Handbook" es pot determinar el número de potència amb la corba corresponent a l'agitador marítim de tres pales (a) i amb el número de Reynolds del mesclador (Eq 11.4.10.1).

Un cop obtingut el número de potència amb l'equació 11.4.10.2 és calcula la potència necessària d'agitació.

$$P = N_P \cdot \rho_L \cdot N^3 \cdot D^5 \quad [Eq. 11.4.10.2]$$

El sistema d'agitació ha d'incloure bafles que millorin la transferència de matèria i energia evitant els vòrtex. A continuació en la següent taula es fa un resum dels diferents paràmetres obtinguts per al sistema d'agitació.

Taula 11.2.5.3. Resultats del paràmetres del sistema d'agitació.

Tipus d'agitador	
Agitador marítim de 3 pales	
kW/m ³	1,86
rps (Hz)	10,000
Densitat mescla [Kg/m ³]	835,50
Viscositat mescla [cP]	0,34

Re	53210,49
D/Dt	0,33
Np	0,35
Diametro agitador [m]	0,486
Potencia (kW)	7,925
altura primer agitador [m]	0,492
altura segon agitador [m]	0,246
w agitador	0,061
4 Baffles	
offset [m]	0,243
w baffle	0,123
distància a la pared [m]	0,010

Si s'observa el valor de kW/m² i es compara amb la taula 11.4.10.3 es pot veure com la agitació es classifica com severa. Es necessita una agitació severa en el DM-204 degut a que s'ha de garantir que el MIC es dissolgui en la mescla de α -naftol i toluè.

11.6.4. Dipòsit de mescla DM-301

- Condicions de mescla

El dipòsit de mescla DM-301 es carrega amb el corrent líquid provinent de la centrifugadora CT-301. La funció d'aquest mesclador es proporcionar una mescla homogènia i constant al cristal·litzador CR-303, a més de fer una reducció en la temperatura, a pressió 1 psig, de 68,5 fins a 50°C.

- Capacitat de mescla

La capacitat de mescla requerida serà funció del cabal que es necessiti en el cristal·litzador, del temps de residència i de la fracció plena de líquid. La taula 11.X.X mostra els cabals d'entrada al

mesclador DM-301. Fixant un temps de residència de 15 minuts i una fracció plena de líquid de 0,65%, el volum es pot calcular de la següent manera:

$$V_{DM-301} = 4721,5 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{m^3}{855,5 kg} \cdot \frac{1 h}{60 min} \cdot 15 min = 1,38 m^3 \rightarrow 65\% ple \rightarrow 1,86 m^3$$

- **Taula 11.** Cabals d'entrada al mesclador DM-301.

Cabal entrada	kmol/h	kg/h	w(% pes)
Q(Toluè)	46,81	4313,0	0,913
Q(Carbaril)	1,399	281,5	0,060
Q(Naftol)	0,880	126,9	0,027
total	49,09	4721,5	1

- Dimensions

Les suposicions per al dimensionament del mesclador DM-301 són les mateixes que per els mescladors anteriors ja que és igual però de volum diferent per tant les equacions utilitzades seran les mateixes.

La següent taula mostra les dimensions obtingudes dels mesclador DM-301 calculades amb les expressions anteriors. El material de construcció és el AISI 316L igual que per els mescladors anteriors

Taula 11. Paràmetres de disseny del mesclador DM-301.

PARÀMETRES DE DISSENY DELS MESCLADOR DM-301	
Material	AISI 316L
DM-301	

Volum equip (m ³)	1,83	T disseny (°C)	70
V cilindre	1,61	P disseny (atm)	1,36
V fons toriesfèric	0,108	S (Psi) SA-240 316L	15700
Altura fons toriesfèric	0,213	r [m]	0,11
V fons toriesfèrics	0,216	R [m]	1,1
Altura cilindre (m)	1,7	L [m]	0,213
Diàmetre intern (m)	1,1	M	1,54
Altura equip	2,12	ρ material [Kg/m ³]	7980

- Disseny mecànic

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix la columna de líquid que hi ha dins del mesclador. Si l'alçada del líquid es de 1,78m;

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 855,5 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \cdot 1,35 \cdot 0,65 = 11333,8 Pa = 0,11 atm \text{ [Eq. 11.1.5]}$$

A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{disseny} = (1,07 atm + 0,11 atm) \cdot 1,15 = 1,36 atm \text{ [Eq. 11.1.4]}$$

$$T = 50^{\circ}C + 20^{\circ}C = 70^{\circ}C \text{ [Eq. 11.1.6]}$$

El mesclador té fons inferior i superior toriesfèric i un cos cilíndric com s'ha dit anteriorment. Amb les equacions que es presenten a continuació es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior i inferior toriesfèric. La taula següent mostra les especificacions del mesclador DM-301.

$$t_{cilindre} = \frac{P R}{S E - 0.6 P} + C_A \text{ [Eq. 11.1.1]}$$

$$t_{toriesfèric} = \frac{P L M}{2 S E - 0.2 P} + C_A + C_{FAB} \text{ [Eq. 11.1.2]}$$

Taula 11. Especificacions generals del mesclador DM-301.

ESPECIFICACIONS GENERALS			
T disseny (°C)	70	t total toriesfèric (mm)	5
P disseny (atm)	1,36	S [Psi] SA-240 316L	15700
t cilindre (mm)	4	E cilindre (m)	0,85
t total cilindre (mm)	5	Presió externa (atm)	1
t toriesfèric (mm)	3,5	E toriesfèric (m)	1

- Pes de l'equip

Per calcular el pes mesclador sencer s'ha de calcular el pes dels fons toriesfèrics i el del cilindre. Es calcula el pes de les tres estructures per separat i es sumen els pesos. Com la geometria és la mateixa s'utilitzen les mateixes equacions que per els casos anteriors.

Taula 11. Pesos del mesclador DM-301 buit i en operació

PES DE L'EQUIP	
ρ material (Kg/m ³)	7980
M líquid (Kg)	1018,1
M cilindre (Kg)	117,5
M fons toriesf. (Kg)	23,5
M buit (Kg)	141,0
M en operació (Kg)	1159,1

- Balanç d'energia

El balanç d'energia dels mescladors per determinar la calor total a bescanviar es realitza amb l'equació 11.1.5.1 només tenint en compte la part de l'equació que pertany al calor bescanviat de la mescla ja que no hi ha reacció, a més és menysprea el calor de dissolució.

Les Cp per a cada component s'obtenen del simulador de processos Aspen HYSYS v.8.2. Llavors la calor total a bescanviar al mesclador DM-301 es resol amb l'equació [Ec. 11.1.5.1] on es té en compte la temperatura d'entrada i d'operació.

$$q = 46,81 \cdot 167,4 \cdot (50 - 68,5) + 1,39 \cdot 276,2 \cdot (50 - 68,5) + 0,88 \cdot 176,4 \cdot (50 - 68,5)$$

$$q = -154986 \frac{kJ}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} = -43.05 kW$$

Un cop es sap la calor total a bescanviar, es determina l'àrea de transferència necessària per poder retirar la calor generada segons l'equació [Eq. 11.2.5.4].

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T} = \frac{-43051 W}{400 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} (-45^\circ C)} = 2,39 m^2$$

On ΔT correspon a la variació de les temperatures de l'oli tèrmic i del reactor. La temperatura que s'usa per el oli és la mitja de temperatures entre l'entrada i la sortida.

Al no tenir dades de oil (camisa)-light orgànics (recipient) es tria una U de entre 250 i 500 W/m²·°C (400 W/m²·°C). S'utilitza la mateixa U que els mescladors del àrea 200, ja que és gairebé tot toluè com en els mescladors de l'àrea 200.

Per al càlcul del cabal màssic de refrigerant s'utilitza l'equació 11.1.5.6 on la Cpf (capacitat calorífica del oli tèrmic) a la temperatura de 50°C és de 1,923. La diferència de temperatura correspon a la diferència entre l'entrada i sortida de la camisa.

$$q = m_f \cdot C_{p_f} \cdot \Delta T \quad (Eq. 11.1.5.6)$$

- Disseny del sistema de calefacció

El sistema necessita aportació de calor com ja s'ha explicat anteriorment i aquesta aportació es farà mitjançant una camisa. El sistema de calefacció consta d'una camisa aplicada a un dipòsit amb fons superior i inferior toriesfèric, on per la part superior entra l'oli tèrmic i per la part inferior surt.

S'ha de comprovar que l'àrea del cilindre que esta en contacte amb el líquid dels mesclador sigui suficient per albergar tota l'àrea de bescanvi de calor que necessita el sistema.

$$A_{bescanvi\ camisa} (1,91 m^2) \leq A_{cilindre} (4,3 m^2)$$

Taula 11.2.5.3. Resultats del balanç d'energia emprant oli tèrmic com a refrigerant.

BALANÇ D'ENERGIA			
Refrigerant (oli tèrmic)		Dowtherm J	
Caball màssic de refrigerant (kg/h)		3579,3	
ΔT (oli tèrmic)	-45	A besc(m ²)	2,39
U (W/(m ² ·°C))	400	Cpf (kJ/kg·K)	2,165
A cilindre(m ²)	4,3	mf (kmol/h)	26,7

Els 2,39 m² d'àrea de bescanvi es reparteixen des de la part inferior del mesclador on es troba el líquid.

- Agitació

La mescla està classificada com un sistema de viscositat baixa segons la classificació de la bibliografia consultada. En aquest cas s'ha fixat una velocitat d'agitació de 10 rps o 600 rpm.

Amb la figura 11.4.10.2 extreta del "Perry's Chemical Engineering Handbook" es pot determinar el número de potència amb la corba corresponent a l'agitador marítim de tres pales (a) i amb el número de Reynolds del mesclador (Eq 11.4.10.1).

Un cop obtingut el número de potència amb l'equació 11.X.X és calcula la potència necessària d'agitació.

$$P = N_P \cdot \rho_L \cdot N^3 \cdot D^5 \quad [Eq. 11.4.10.2]$$

El sistema d'agitació ha d'incloure bafles que millorin la transferència de matèria i energia evitant els vòrtex. A continuació en la següent taula es fa un resum dels diferents paràmetres obtinguts per al sistema d'agitació.

Taula 11.2.5.3. Resultats del paràmetres del sistema d'agitació.

Tipus d'agitador
Agitador marítim de 3 pales

kW/m ³	1,03
rpm (Hz)	10
Densitat mescla [Kg/m ³]	855,5
Viscositat mescla [cP]	0,48
Re	21701,4
D/Dt	0,33
Np	0,35
Diametro agitador [m]	0,363
Potencia (kW)	1,887
altura primer agitador [m]	0,380
altura segon agitador [m]	0,190
w agitador	0,045
4 Baffles	
offset [m]	0,182
w baffle	0,092
distància a la pared [m]	0,008

S'ha fixat una velocitat d'agitació de 600 rpm per assegurar una agitació mitjana segons el paràmetre kW/m³ mostrat en la taula 11.4.10.3 Es necessita una agitació mitjana en el mesclador DM-301 degut a que bàsicament el que es necessita es mesclar un líquid amb poca quantitat de sòlid i garantir un bon intercanvi de calor.

11.6.5. Dipòsit de mescla DM-302

- Condicions de mescla

En el dipòsit de mescla DM-302 es prepara la mescla per recircular-la al cristal·litzador CR-302, ja que d'aquesta manera es permet una millor recuperació i purificació de carbaril, ja que no només no es perd el carbaril sinó que aquest fa de nucli (nucleació) de cristal·lització en el cristal·litzador CR-302. La mescla provinent de la centrifugadora CT-302 s'escalfa mitjançant una camisa de 50 fins a 80°C treballant a una pressió de 1 psig.

- Capacitat de mescla

La capacitat de mescla requerida serà funció del cabal que es necessiti en el cristal·litzador CR-302, del temps de residència i de la fracció plena de líquid. La següent taula mostra els cabals d'entrada al mesclador DM-302. Fixant un temps de residència de 60 min, donat a que hi ha molt sòlid i s'ha de garantir una mescla homogènia, i una fracció plena de líquid de 0,65%, el volum es pot calcular de la següent manera:

$$V_{DM-302} = 325,19 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{m^3}{953,1 kg} \cdot 1 h = 0,34 m^3 \rightarrow 65\% ple \rightarrow 0,46 m^3$$

Taula 11. Cabals d'entrada al mesclador DM-301.

Cabal entrada	kmol/h	kg/h	w(% pes)/h
Q(Toluè)	0,453	41,74	0,128
Q(Carbaril)	1,399	281,52	0,866
Q(Naftol)	0,013	1,92	0,006
total	1,87	325,19	1

- Dimensions

Les suposicions per al dimensionament del mesclador DM-302 són les mateixes que per els mescladors anteriors ja que és igual però de volum diferent per tant les equacions utilitzades seran les mateixes.

La següent taula mostra les dimensions obtingudes dels mesclador DM-302 calculades amb les expressions anteriors. El material de construcció és el AISI 316L igual que per els mescladors anteriors.

Taula 11. Paràmetres de disseny del mesclador DM-302.

PARÀMETRES DE DISSENY DELS MESCLADOR DM-302			
Material		AISI 316L	
DM-302			
Volum equip (m³)	0,478	T disseny (°C)	105
V cilindre	0,423	P disseny (atm)	1,32
V fons toriesfèric	0,028	S (Psi) SA-240 316L	15700
Altura fons toriesfèric	0,135	r [m]	0,07
V fons toriesfèrics	0,056	R [m]	0,7
Altura cilindre (m)	1,1	L [m]	0,213
Diàmetre intern (m)	0,7	M	1,54
Altura equip	1,37	ρ material [Kg/m3]	7980

- Disseny mecànic

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix la columna de líquid que hi ha dins del mesclador. Si l'alçada del líquid es de 0,872 m;

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 953,1 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \cdot 0,872 \cdot 0,65 = 8145,7 Pa = 0,08 atm \text{ [Eq. 11.1.5]}$$

A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{disseny} = (1,07 atm + 0,08 atm) \cdot 1,15 = 1,32 atm \text{ [Eq. 11.1.4]}$$

$$T = 85^{\circ}C + 20^{\circ}C = 105^{\circ}C \text{ [Eq. 11.1.6]}$$

El mesclador té fons inferior i superior toriesfèric i un cos cilíndric com s'ha dit anteriorment. Amb les equacions que es presenten a continuació es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior i inferior toriesfèric. La taula següent mostra les especificacions del mesclador DM-302.

$$t_{cilindre} = \frac{P R}{S E - 0.6 P} + C_A [Eq. 11.1.1]$$

$$t_{toriesfèric} = \frac{P L M}{2 S E - 0.2 P} + C_A + C_{FAB} [Eq. 11.1.2]$$

Taula 11. Especificacions generals del mesclador DM-302.

ESPECIFICACIONS GENERALS			
T disseny (°C)	105	t total toriesfèric (mm)	5
P disseny (atm)	1,32	S [Psi] SA-240 316L	15700
t cilindre (mm)	4	E cilindre (m)	0,85
t total cilindre (mm)	5	Presió externa (atm)	1
t toriesfèric (mm)	3,5	E toriesfèric (m)	1

- Pes de l'equip

Per calcular el pes mesclador sencer s'ha de calcular el pes dels fons toriesfèrics i el del cilindre. Es calcula el pes de les tres estructures per separat i es sumen els pesos. Com la geometria és la mateixa s'utilitzen les mateixes equacions per al càlcul dels pesos.

Taula 11. Pesos del mesclador DM-302 buit i en operació

PES DE L'EQUIP	
ρ material (Kg/m3)	7980
M líquid (Kg)	296,6
M cilindre (Kg)	52,7
M fons toriesf. (Kg)	10,4
M buit (Kg)	63,1

M en operació (Kg)	359,8
--------------------	-------

- Balanç d'energia

El balanç d'energia dels mescladors per determinar la calor total a bescanviar es realitza amb l'equació 11.1.5.1 només tenint en compte la part de l'equació que pertany al calor bescanviat de la mescla ja que no hi ha reacció, a més és menysprea el calor de dissolució.

Les Cp per a cada component s'obtenen del simulador de processos Aspen HYSYS v.8.2. Llavors la calor total a bescanviar al mesclador DM-302 es resol amb l'equació [Ec. 11.1.5.1] on es té en compte la temperatura d'entrada i d'operació.

$$q = 0,453 \cdot 173,3 \cdot (85 - 17) + 1,399 \cdot 289,9 \cdot (85 - 17) + 0,013 \cdot 186,1 \cdot (85 - 17)$$

$$q = 37635 \frac{kJ}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} = 10,54 kW$$

Un cop es sap la calor total a bescanviar, es determina l'àrea de transferència necessària per poder retirar la calor generada segons l'equació [Eq. 11.2.5.4].

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T} = \frac{-10454,3 W}{400 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} (35^\circ C)} = 0,75 m^2$$

On ΔT correspon a la variació de les temperatures de l'oli tèrmic i del reactor. La temperatura que s'usa per el oli és la mitja de temperatures entre l'entrada i la sortida.

Al no tenir dades de oil (camisa)-light orgànics (recipient) es tria una U de entre 250 i 500 W/m²·°C (300 W/m²·°C). S'utilitza una U menor que en els altres mescladors donat que en aquest la fracció de sòlid es molt més elevada cosa que dificultarà la transferència de calor.

Per al càlcul del cabal màssic de refrigerant s'utilitza l'equació 11.1.5.6 on la Cp_f (capacitat calorífica del oli tèrmic) a la temperatura de 85°C és de 2,0405. La diferència de temperatura correspon a la diferència entre l'entrada i sortida de la camisa.

$$q = m_f \cdot Cp_f \cdot \Delta T \quad (Eq. 11.1.5.6)$$

- Disseny del sistema de calefacció

El sistema necessita aportació de calor com ja s'ha explicat anteriorment i aquesta aportació es farà mitjançant una camisa. EL sistema de calefacció consta d'una camisa aplicada a un dipòsit amb fons superior i inferior toriesfèric, on per la part superior entra l'oli tèrmic i per la part inferior surt.

S'ha de comprovar que l'àrea del cilindre que esta en contacte amb el líquid dels mesclador sigui suficient per albergar tota l'àrea de bescanvi de calor que necessita el sistema.

$$A_{\text{bescanvi camisa}} (0,75 \text{ m}^2) \leq A_{\text{cilindre}} (1,62 \text{ m}^2)$$

La següent taula mostra els resultats finals obtinguts al realitzar el balanç d'energia emprant com a refrigerant l'oli tèrmic Dowtherm J.

Taula 11.2.5.3. Resultats del balanç d'energia emprant oli tèrmic com a refrigerant.

BALANÇ D'ENERGIA			
Refrigerant (oli tèrmic)		Dowtherm J	
Cabal màssic de refrigerant (kg/h)		869,18	
ΔT (oli tèrmic)	35	A besc(m ²)	0,75
U (W/(m ² ·°C))	400	Cpf (kJ/kg·K)	2,165
A cilindre(m ²)	1,62	mf (kmol/h)	6,46

Els 0,75 m² d'àrea de bescanvi es reparteixen des de la part inferior del mesclador on es troba el líquid.

- Agitació

La mescla està classificada com un sistema de viscositat baixa segons la classificació de la bibliografia consultada. En aquest cas s'ha fixat una velocitat d'agitació de 15 rps o 900 rpm.

L'agitador escollit és un de tipus marítim amb tres aspes donada la seva ampla implantació i perquè són molt útils per sistemes amb viscositats baixes (1,702 cP segons el simulador de processos Aspen HYSYS v.8.2) .

Amb la figura 11.4.10.2 extreta del “Perry's Chemical Engineering Handbook” es pot determinar el número de potència amb la corba corresponent a l'agitador marítim de tres pales (a) i amb el número de Reynolds del mesclador (Eq 11.4.10.1).

Un cop obtingut el número de potència amb l'equació 11.X.X és calcula la potència necessària d'agitació.

$$P = N_p \cdot \rho_L \cdot N^3 \cdot D^5 \quad [Eq. 11.4.10.2]$$

El sistema d'agitació ha d'incloure bafles que millorin la transferència de matèria i energia evitant els vòrtex. A continuació en la següent taula es fa un resum dels diferents paràmetres obtinguts per al sistema d'agitació.

Taula 11.2.5.3. Resultats del paràmetres del sistema d'agitació.

Tipus d'agitador	
Agitador maritim de 3 pales	
kW/m ³	1,54
rps (Hz)	15
Densitat mescla [Kg/m3]	953,1
Viscositat mescla [cP]	1,32
Re	5295
D/Dt	0,33
Np	0,35
Diametro agitador [m]	0,231
Potencia (kW)	0,741
altura primer agitador [m]	0,246
altura segon agitador [m]	0,123
w agitador	0,029
4 Baffles	
offset [m]	0,116
w baffle	0,058

distància a la pared [m]	0,005
--------------------------	-------

S'ha fixat una velocitat d'agitació de 900 rpm per assegurar una agitació severa segons el paràmetre kW/m³ mostrat en la taula 11.4.10.3. Es necessita una agitació severa en el mesclador DM-302 degut a que hi ha una gran part de sòlid en la mescla juntament amb el toluè líquid.

11.6.6. Dipòsit de mescla DR-301 i DR-302

- Condicions de mescla

La mescla provinent del cristal·litzador CR-303 s'ha de refredar en una sèrie de dos dipòsits de mescla refrigerats DR-301 i DR-302, els quals estan refrigerats amb chillers. La funció d'aquests dipòsits de mescla és refredar la mescla i acabar de cristal·litzar encara més el carbaril. La mescla entra en el primer dipòsit de mescla a 64°C, entra al segon a 25°C i surt del segon a 17°C. El DR-301 treballa a una pressió de 5 psig i el DR-302 a una pressió de 1 psig.

- Capacitat de mescla

La capacitat de mescla requerida serà funció del cabal que hi circuli, del temps de residència i de la fracció plena de líquid. Com necessiten aproximadament la mateixa capacitat es construiran els dos dipòsits iguals. La taula 11.X.X, 11.X.X mostren els cabals d'entrada als DR-301 i DR-302. Fixant un temps de residència de 15 minuts i una fracció plena de líquid de 0,65%, el volum es pot calcular de la següent manera:

$$V_{DR-301} = (3,51 + 10,86) \frac{m^3}{h} \cdot 0,25 h = 3,55 m^3 \rightarrow 65\% ple \rightarrow 4,8 m^3$$

$$V_{DR-302} = 14,24 \frac{m^3}{h} \cdot 0,25 h = 3,56 m^3 \rightarrow 65\% ple \rightarrow 4,8 m^3$$

Taula 11. Cabals d'entrada al mesclador DR-301 provinent del cristal·litzador CR-303.

Cabal entrada	kmol/h	kg/h	w(% pes)/h
Q(Toluè)	0,88	126,89	0,0401
Q(Carbaril)	29,93	2757,33	0,8710

Q(Naftol)	1,4	281,52	0,0889
total	32,21	3165,74	1

Taula 11. Cabals d'entrada al mesclador DR-301 provinent de la recirculació del DR-302.

Cabal entrada	kmol/h	kg/h	w(% pes)/h
Q(Toluè)	2,64	380,66	0,040
Q(Carbaril)	89,78	8271,99	0,871
Q(Naftol)	4,2	844,56	0,089
total	96,62	9497,21	1

Taula 11. Cabals d'entrada al mesclador DR-302 provinent de DR-301.

Cabal entrada	kmol/h	kg/h	w(% pes)/h
Q(Toluè)	3,52	507,55	0,040
Q(Carbaril)	119,7	11029,33	0,871
Q(Naftol)	5,6	1126,09	0,089
total	128,82	12662,97	1

- Dimensions

Les suposicions per al dimensionament dels mesclador DR-301 i DR-302 són les mateixes que per els mescladors anteriors ja que la geometria és igual però de volum diferent per tant les equacions utilitzades seran les mateixes.

La taula següent mostra les dimensions obtingudes dels mesclador DR-2' calculades amb les expressions anteriors. El material de construcció és el AISI 316L igual que per els mescladors anteriors.

Taula 11. Paràmetres de disseny dels mescladors refrigerats DR-301 i DR-302.

PARÀMETRES DE DISSENY DELS MESCLADOR DR-301 i DR-302			
Material		AISI 316L	
DR-301, DR-302			
Volum equip (m³)	4,8	T disseny (°C)	45 (DR-301) i 17 (DR-302)
V cilindre	4,23	P disseny (atm)	1,72 (DR-301) i 1,41 (DR-302)
V fons toriesfèric	0,29	S (Psi) SA-240 316L	15700
Altura fons toriesfèric	0,296	r [m]	0,153
V fons toriesfèrics	0,58	R [m]	1,53
Altura cilindre (m)	2,3	L [m]	0,296
Diàmetre intern (m)	1,53	M	1,54
Altura equip	2,89	ρ material [Kg/m3]	7980

- Disseny mecànic

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix la columna de líquid que hi ha dins del mesclador. Si l'alçada del líquid es de 1,838 m;

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 885,7 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \cdot 1,838 \cdot 0,65 = 15956,5 Pa$$

$$= 0,157 atm [Eq. 11.1.5]$$

A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny del DR-301:

$$P_{disseny} = (1,34 atm + 0,157 atm) \cdot 1,15 = 1,72 atm [Eq. 11.1.4]$$

$$T = 25^{\circ}C + 20^{\circ}C = 45^{\circ}C [Eq. 11.1.6]$$

Per el cas del DR-302:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h = 892,9 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \cdot 1,838 \cdot 0,65 = 16086,3 Pa$$

$$= 0,158 atm [Eq. 11.1.5]$$

$$P_{disseny} = (1,07 \text{ atm} + 0,158 \text{ atm}) \cdot 1,15 = 1,41 \text{ atm} \text{ [Eq. 11.1.4]}$$

$$T = 17^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C} = 37^{\circ}\text{C} \text{ [Eq. 11.1.6]}$$

El mescladors tenen fons inferior i superior toriesfèric i un cos cilíndric com s'ha dit anteriorment. Amb les equacions que es presenten a continuació es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior i inferior toriesfèric. La taula següent mostra les especificacions dels mescladors refrigerats DR-301 i DR-302.

$$t_{cilindre} = \frac{P R}{S E - 0,6 P} + C_A \text{ [Eq. 11.1.1]}$$

$$t_{toriesfèric} = \frac{P L M}{2 S E - 0,2 P} + C_A + C_{FAB} \text{ [Eq. 11.1.1]}$$

Taula 11. Especificacions generals dels mescladors DR-301 i DR-302.

ESPECIFICACIONS GENERALS			
T disseny (°C)	105	t total toriesfèric (mm)	5
P disseny (atm)	1,32	S [Psi] SA-240 316L	15700
t cilindre (mm)	4	E cilindre (m)	0,85
t total cilindre (mm)	5	Presió externa (atm)	1
t toriesfèric (mm)	3,5	E toriesfèric (m)	1

- Pes de l'equip

Per calcular els pesos dels mescladors DR-301 i DR-302 sencers s'ha de calcular el pes dels fons toriesfèrics i el del cilindre. Es calcula el pes de les tres estructures per separat i es sumen els pesos. Encara que són els mateixos equips tindran pesos en operació diferents degut a la diferència de densitats de les mescles.

Taula 11. Pesos del mesclador DR-301.

PES DE L'EQUIP	
ρ material (Kg/m ³)	7980
M líquid (Kg)	2768,0
M cilindre (Kg)	220,9
M fons toriesf. (Kg)	45,5
M buit (Kg)	266,4
M en operació (Kg)	3034,4

Taula 11. Pesos del mesclador DR-302.

PES DE L'EQUIP	
ρ material (Kg/m ³)	7980
M líquid (Kg)	2790,5
M cilindre (Kg)	220,9
M fons toriesf. (Kg)	45,5
M buit (Kg)	266,4
M en operació (Kg)	3056,9

- Balanç d'energia

El balanç d'energia dels mescladors per determinar la calor total a bescanviar es realitza en l'apartat dels chillers ja que ells són els encarregats de refredar el fluid de la camisa que en aquest cas serà el refrigerant R-134a.

Un cop es sap la calor total a bescanviar, es determina l'àrea de transferència necessària per poder retirar la calor generada segons l'equació [Eq. 11.2.5.4].

Al no tenir dades de R-134a (camisa)-light orgànics (recipient) es tria una U de $900 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$. S'utilitza aquesta U ja que al refredar amb el chiller la transferència de calor és molt millor si es compara amb vapor d'aigua o aigua.

Per al càlcul del cabal màssic de refrigerant s'utilitza l'equació 11.1.5.6 on la Cpf (capacitat calorífica del R-134a) a la temperatura de 25°C és de $1,51 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ i a 17°C és de $1,45 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$. La diferència de temperatura correspon a la diferència entre l'entrada i sortida de la camisa.

$$q = m_f \cdot C_{p_f} \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 11.1.5.6})$$

- Disseny del sistema de calefacció

El sistema necessita aportació de calor com ja s'ha explicat anteriorment i aquesta aportació es farà mitjançant una camisa. El sistema de calefacció d'una camisa aplicada a un dipòsit amb fons superior i inferior toriesfèric, on per la part superior entra el refrigerant tèrmic i per la part inferior surt.

S'ha de comprovar que l'àrea del cilindre que està en contacte amb el líquid dels mescladors sigui suficient per albergar tota l'àrea de bescanvi de calor que necessita el sistema.

$$A_{\text{bescanvi camisa DR-301}} (1,67 \text{ m}^2) \leq A_{\text{cilindre DR-301}} (7,41 \text{ m}^2)$$

$$A_{\text{bescanvi camisa DR-302}} (6,5 \text{ m}^2) \leq A_{\text{cilindre DR-302}} (7,41 \text{ m}^2)$$

Les taules següents mostren els resultats finals obtinguts al realitzar el balanç d'energia emprant com a refrigerant R-134a per als mescladors refrigerats DR-301 i DR-302 respectivament.

Taula 11.2.5.3. Resultats del balanç d'energia emprant R-134a com a refrigerant per al DR-301.

BALANÇ D'ENERGIA			
Refrigerant (oli tèrmic)		R-134a	
Cabal màssic de refrigerant (kg/h)		8107,8	
ΔT (oli tèrmic)	-15,5	A besc(m ²)	1,67
U (W/(m ² ·°C))	900	Cpf (kJ/kg·K)	2,165
A cilindre(m ²)	7,41	mf (kmol/h)	60,5

Taula 11.2.5.3. Resultats del balanç d'energia emprant R-134a com a refrigerant per al DR-302.

BALANÇ D'ENERGIA			
Refrigerant (oli tèrmic)	R-134a		
Cabal màssic de refrigerant (kg/h)	13354,5		
ΔT (oli tèrmic)	-7,55	A besc(m ²)	6,5
U (W/(m ² ·°C))	900	Cpf (kJ/kg·K)	2,165
A cilindre(m ²)	7,41	mf (kmol/h)	99,7

Els 1,67 m² i els 6,5 m² d'àrea de bescanvi dels mescladors es reparteixen des de la part inferior del mesclador on es troba el líquid.

- Agitació

La mescla està classificada com un sistema de viscositat baixa segons la classificació de la bibliografia consultada. En aquest cas s'ha fixat una velocitat d'agitació de 480 rpm per als dos mescladors.

L'agitador escollit és un de tipus marítim amb tres aspes donada la seva ampla implantació i perquè són molt útils per sistemes amb viscositats baixes (0,685 i 0,76 cP, per als mescladors DR-301 i DR-302, respectivament segons el simulador de processos Aspen HYSYS v.8.2) .

Amb la figura 11.4.10.2 extreta del "Perry's Chemical Engineering Handbook" es pot determinar el número de potència amb la corba corresponent a l'agitador marítim de tres pales (a) i amb el número de Reynolds del mesclador (Eq 11.4.10.1).

Un cop obtingut el número de potència amb l'equació 11.X.X és calcula la potència necessària d'agitació.

$$P = N_P \cdot \rho_L \cdot N^3 \cdot D^5 \quad [Eq. 11.4.10.2]$$

El sistema d'agitació ha d'incloure bafles que millorin la transferència de matèria i energia evitant els vòrtex. A continuació en les taules següents es fa un resum dels diferents paràmetres obtinguts per al sistema d'agitació.

Taula 11.2.5.3. Resultats del paràmetres del sistema d'agitació del mesclador DR-301.

Tipus d'agitador	
Agitador maritim de 3 pales	
kW/m ³	1,08
rps (Hz)	8
Densitat mescla [Kg/m3]	885,7
Viscositat mescla [cP]	0,69
Re	24185,9
D/Dt	0,33
Np	0,35
Diametro agitador [m]	0,505
Potencia (kW)	5,208
altura primer agitador [m]	0,514
altura segon agitador [m]	0,257
w agitador	0,063
4 Baffles	
offset [m]	0,252
w baffle	0,128
distància a la pared [m]	0,011

Taula 11.2.5.3. Resultats del paràmetres del sistema d'agitació del mesclador DR-302.

Tipus d'agitador	
Agitador maritim de 3 pales	
kW/m ³	1,09
rps (Hz)	8

Densitat mescla [Kg/m ³]	892,9
Viscositat mescla [cP]	0,76
Re	21984,6396
D/Dt	0,33
Np	0,35
Diametro agitador [m]	0,505
Potencia (kW)	5,250
altura primer agitador [m]	0,514
altura segon agitador [m]	0,257
w agitador	0,063
4 Baffles	
offset [m]	0,252
w baffle	0,128
distància a la pared [m]	0,011

S'ha fixat una velocitat d'agitació de 480 rpm per assegurar una agitació mitjana segons el paràmetre kW/m³ mostrat en la taula 11.4.10.3. Una agitació mitjana basta per que els cristalls de carbaril es vagin formant i per assegurar una bona transferència de calor entre la camisa i el líquid.

11.9. Columnes d'absorció

El procés d'absorció és una operació bàsica que s'utilitza per dissoldre un o més compostos gasosos en un solvent líquid. Aquest procés requereix del contacte entre fases (líquid i gas). La zona on es troben en contacte el líquid i el gas és l'àrea de transferència, com major sigui aquesta millor serà l'absorció.

L'absorció pot dur-se a terme en continu, discontinu o semicontinu si es disposa de dos columnes en paral·lel. L'estructura interna de la columna pot variar depenent de les necessitats d'àrea de transferència. L'estructura interna pot ser columna de rebliment, columna de plats o columna de borboleig.

- Columna de rebliment: aquest tipus de columna és la que pot oferir més àrea de transferència. El rebliment de la columna pot estar distribuït de forma estructurada o aleatòria. La forma estructurada consisteix en unes peces ordenades de manera que aportin la major àrea de transferència i la menor pèrdua de carrega; el problema d'aquest rebliment és que es construeix de metall o de plàstic el que fa que no sigui adequat per productes corrosius. El rebliment aleatori consisteix en peces distribuïdes de forma desordenada dins de la columna. Aquest rebliment no és tant efectiu com l'estructurat però es pot construir de material ceràmic fet que el fa resistent a la corrosió.

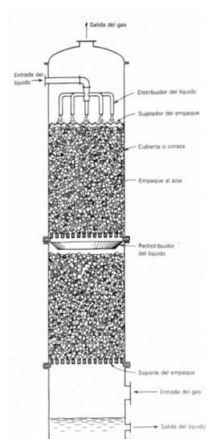


Figura 11.9.1. Columna d'absorció de rebliment

- Columna de plats: aquest tipus de columna pot donar menys àrea de transferència que les columnes de rebliment però són millors que les de borboleig. En cada plat s'entrecruen la fase gas i la líquida com es pot veure en la següent figura.

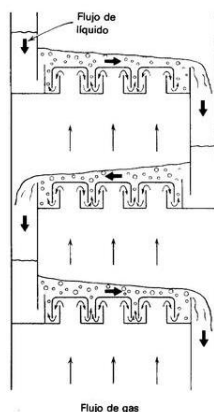


Figura 11.9.2. Columna d'absorció de plats

- Columna de borbolleig: aquest tipus de columnes treballen en discontinu o en semicontinu si treballen en paral·lel a una altra columna. L'àrea de transferència d'aquestes columnes depenen directament de l'alçada de líquid.

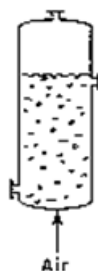


Figura 11.9.3. Columna d'absorció de borbolleig

Tot seguit es situa breument cada columna dins de la planta i s'explica la seva finalitat. Després d'aquesta breu explicació s'analitza el disseny de cada columna.

- Columna d'absorció CA-201

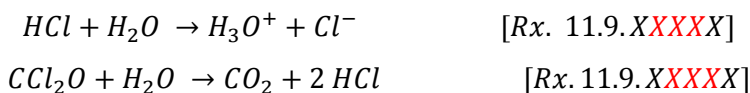
Aquesta columna treballa amb continu i té la finalitat d'absorbir en el líquid tot el MCC i una part del fòsgè. Dins de la columna s'entrecreuen toluè líquid a 5°C (solvent) i el corrent gasós de sortida del reactor de formació de MCC (R-201) que es troba a 260°C i està compost per fòsgè, MCC i HCl. La baixa temperatura del toluè a part de refredar el corrent gasós també és favorable per facilitar l'absorció de la fase gas en el líquid.

- Columna d'absorció CA-301

Com que el clorur d'hidrogen no es pot emetre a l'atmosfera ni emmagatzemar-lo en forma gasosa s'ha pres la decisió d'absorbir-lo amb aigua en una columna de borboleig (CA-301).

La columna de borboleig treballa en discontinu. Per aconseguir que el procés global sigui continu s'instal·la una columna idèntica en paral·lel que opera alternada a aquesta (CA-302).

L'absorció amb aigua produeix àcid clorhídric que es comercialitza a una concentració del 37%. El foscà que entra a la columna amb el clorur d'hidrogen reacciona amb l'aigua formant àcid clorhídric i diòxid de carboni.



11.9.1 Disseny columna d'absorció CA-201

Aquesta columna treballa en continu i cap dels compostos que hi circula reacciona entre ells, es pot utilitzar el programa informàtic Aspen Hysys v8.3 per dissenyar-la i aproximar el seu comportament.

Perquè el Aspen Hysys v8.3 pugui fer una bona simulació és necessari especificar un model termodinàmic que s'adeqüi a les condicions de treball. L'elecció d'aquest model s'ha pres seguin la guia ASPENTech tenint en compte que el model havia de ser adequat pels següents punts:

- Mescla Multi component
- Components polars no electròlits
- Equilibri líquid-líquid
- Equilibri líquid-vapor
- Mescla no aquoses
- No es disposen de coeficients d'interacció (experimentals o estimats)

El model escollit ha estat UNIQUAC amb el paquet Peng-Robinson pels gasos. Afegint la condició que el clorur d'hidrogen és insoluble en toluè.

Per a poder fer el disseny amb el Hysys, considerant que el clorur d'hidrogen és totalment insoluble amb el toluè, s'ha substituït el volum de clorur d'hidrogen per un volum igual de nitrogen. Amb el model termodinàmic escollit el nitrogen és insoluble en toluè. La finalitat d'aquesta substitució ha estat poder tenir un volum igual de gas que travessi els equips (CA-201 i BC-217) i així poder aproximar les dimensions d'aquests.

Per trobar el cabal adequat de solvent s'ha iterat fins trobar un cabal capaç d'absorbir el fosgè i tot el MCC. A continuació les taules 11.9.1.1 i 11.9.1.2 mostren les característiques de l'entrada gasosa, l'entrada de solvent, la sortida per caps i la sortida per cues de la columna.

Taula 11.9.1.1. característiques dels corrents de la columna CA-201

	SOLVENT	ALIMENT	CAPS	CUES
Cabal màssic (kg/h)	6000	1485,1	363,4	7121,7
Cabal molar (kmol/h)	65,1	21,6	9,7	65
Temperatura (°C)	5	260	5	86,67
Pressió (bar)	1,013	1,013	1,013	1,013
Densitat (kg/m³)	829,4	1,58	1,654	844,23

Taula 11.9.1.2.. composició dels corrents de la columna CA-201

	SOLVENT	ALIMENT	CAPS	CUES
Toluè (kg/h)	6000	0	13,4	5986,6
HCl (kg/h)	0	350	350	0
Fosgè (kg/h)	0	237,4	0	237,4
MCC (kg/h)	0	897,4	0	897,7

Per obtenir l'absorció descrita en les taules anteriors és necessari una àrea equivalent a 10 etapes d'equilibri.

A partir de la columna feta amb el HYSYS s'utilitza l'opció Tray Sizing per trobar paràmetres de disseny de la columna.

Taula 11.9.1.3. característiques Tray Sizing de la columna CA-201

Tipus columna	Llit empaquet
Tipus de rebliment	Berl Saddles (Ceramic) 0.5_inch (Norton)
Diàmetre (m)	0,914
Alçada (m)	4,868
Delta Pressió	0,638
Màxima inundació (%)	50

11.9.1.1. Disseny intern de la columna CA-201

L'opció Tray Sizing aporta els valors exactes del diàmetre de la columna i de l'alçada necessària del rebliment. Aquests valors s'han arrodonit per facilitar la construcció. L'alçada de rebliment s'ha arrodonit a 5m.

A l'hora de dissenyar l'interior de la columna s'ha tingut en compte que l'alçada màxima d'una secció de rebliment és 3m, l'alçada de les boques homes que s'han instal·lat a la part superior i inferior de cada secció de rebliment és 0,5m, l'alçada a la part superior de la columna per la boca home i pel distribuïdor del solvent 1m, 0,5m per l'entrada de l'aliment i 2m a la part inferior de la columna per la boca home, el distribuïdor de vapor del calderí i perquè sempre hi hagi líquid pel calderí. La següent taula mostra l'alçada final de la columna i el diàmetre arrodonit.

Taula 11.9.1.1.1. Característiques disseny de la columna CA-201

Alçada del cos cilíndric (m)	8,5
Diàmetre (m)	1

Rebliment

El rebliment ceràmic emparat és el Berl Saddles (Ceramic) 0.5_inch (Norton) també anomenades muntures Intalox el qual es pot veure a la següent figura.

**Figura 11.9.1.1.1.** Rebliment Berl Saddles (Ceramic)(Norton)

La decisió d'optar per un rebliment ceràmic s'ha pres per evitar problemes deguts a la corrosió del fòsgè i el clorur d'hidrogen.

Col·lector (suport superior del rebliment)

Per evitar que el líquid es concentri en les parets de la columna i ajudar a que es distribueixi uniformement en tot el rebliment es posen col·lectors damunt de cada secció de rebliment. Una altra funció del col·lector és fer de suport del distribuïdor de líquid i evitar que el rebliment pugui ser arrossegat. El col·lector SLT de Sulzer combina una reixeta de suport amb un col·lector de líquid.



Figura 11.9.1.1.2. Col·lector SLT de Sulzer

Suport del rebliment

El suport escollit per ficar a la part inferior de cada secció de rebliment és el model EMS de Sulzer que és adequat per rebliments distribuïts de forma aleatòria i per columnes amb diàmetres inferiors a 1,2 m. Aquests tipus de suports també serveixen com a distribuïdor de vapor perquè entri de forma homogènia per tota la secció de rebliment.

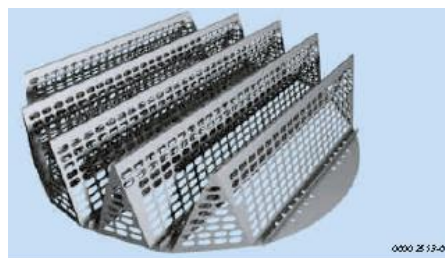


Figura 11.9.1.1.3. Suport EMS de Sulzer

Entrada de l'aliment

La columna s'alimenta amb un corrent 100% líquid i com que té un diàmetre petit s'utilitza el injector tipus LV de Sulzer.



Figura 11.9.1.1.4. Injector LV de Sulzer

Distribuïdors de líquid de l'aliment

És necessari disposar d'un distribuïdor en l'entrada de l'aliment solvent perquè el líquid es reparteixi de forma homogènia per tot el rebliment. El distribuïdor utilitzat és el VKG de l'empresa Sulzer perquè és el que correspon pel diàmetre de columna i el cabal de líquid.

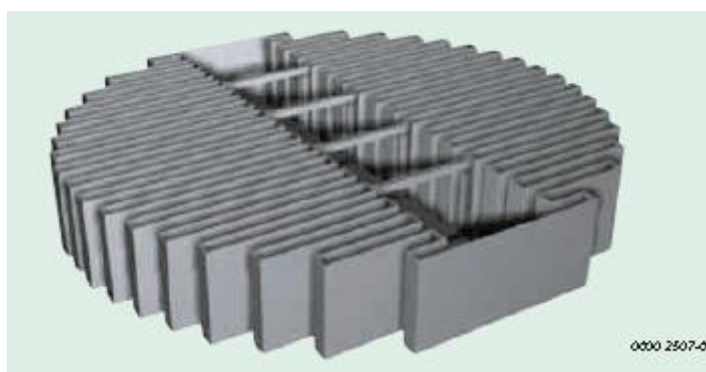


Figura 11.9.1.1.5. Distribuïdor de líquid VKG de Sulzer

Entrada vapor

L'entrada de vapor es fa amb el model GIG de l'empresa Sulzer

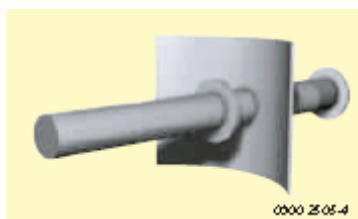


Figura 11.9.1.1.6. Entrada de vapor GIG de Sulzer

Boca home

Les boques homes instal·lades tenen un diàmetre de 500mm i han de ser del mateix material que la resta de la columna per evitar la corrosió.

11.9.1.2. Disseny mecànic de la columna CA-201

D'aquesta columna s'obté per caps fosc i HCl, de manera que el material de construcció de la columna ha de ser prou resistent per no corroir-se. El material utilitzat per aquesta columna i per tots els seus elements interns és Hastelloy C-276.

Gruix de paret de columna

Per trobar el gruix de les parets de la columna s'ha fet servir el codi ASME.

Per conèixer el pes del cilindre i els fons s'ha de calcular la quantitat de material emparat; aquest es troba a partir de les dimensions de la columna, el gruix de la xapa i la densitat del material

$$P_{disseny} = P_{treball} + 0,15 \cdot P_{treball} \quad [Eq. 11.XXX]$$

$$P_{disseny} = P_{treball} + 2atm \quad [Eq. 11.XXX]$$

$$P_{disseny} = 3 atm$$

La temperatura de disseny és la temperatura de treball més 20°C.

$$T_{disseny} = T_{treball} + 20^{\circ}C \quad [Eq. 11.XXX]$$

$$T_{disseny} = 280^{\circ}C$$

Per calcular el gruix del cos cilíndric es calcula el gruix mínim requerit per la pressió interna. No cal calcular el gruix necessari per pressió externa perquè dins la columna no s'hi fa el buit.

El valor del gruix de la xapa s'augmenta fins adequar-lo a un gruix comercial. El gruix mínim per construir equips a pressió és 3mm.

$$t = 1,038mm \approx 3mm$$

Els fons de la columna són toriesfèric. El gruix d'aquestes parts es calculen sols a pressió interna ja que tampoc estan sotmeses al buit.

El valor del gruix de la xapa s'augmenta fins adequar-lo a un gruix comercial. El gruix comercial mínim per construir equips a pressió és 3mm.

$$t = 1,054mm \approx 3mm$$

Pes de la columna

Per calcular el pes de la columna s'ha de sumar el pes de la columna buida (cilindre, fons i rebliment) amb el pes del líquid que hi ha en la columna quan està en operació.

El pes de la columna buida és la suma del pes del cilindre, el fons i el rebliment.

$$Pes_{columna\ buida} = Pes_{cilindre} + Pes_{fons} + Pes_{rebliment} \quad [Eq. 11.XXX]$$

Per conèixer el pes del cilindre i els fons s'ha de calcular la quantitat de material emparat que es troba a partir de les dimensions de la columna, el gruix de la xapa i la densitat del material.

$$Pes = Àrea \cdot Gruix \cdot Densitat \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$A_{cilindre} = \pi \cdot D_c \cdot L \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$A_{toriesfèric} = 0,842 \cdot D_c^2 \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$Pes_{cilindre} = \pi \cdot D_c \cdot L \cdot t \cdot \rho \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$Pes_{fons} = 0,842 \cdot D_c^2 \cdot t \cdot \rho \quad [Eq. 11.XXXX]$$

El pes del rebliment es calcula:

$$Pes_{Rebliment} = V_{Rebliment} \cdot \rho_{Rebliment} \cdot (1 - Espai lliure) \quad [Eq. 11.XXXX]$$

El pes del líquid que circula per la columna és la densitat del líquid pel volum de líquid que hi ha a la columna en operació. El volum de líquid que hi ha a la columna en operació s'ha suposat que és la meitat del volum de la columna.

$$Pes_{líquid} = \frac{V_{columna}}{2} \cdot \rho_{líquid} \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$V_{columna} = 2 \cdot (0,0778 \cdot D_c^2) + \frac{\pi}{4} \cdot D_c^2 \cdot h \quad [Eq. 11.XXXX]$$

El pes de la columna és:

Taula 11.9.1.2.1. Pes de la columna CA-201

Densitat Material (kg/m³)	8690
Densitat Rebliment (kg/m³)	650
A cilindre (m²)	21,366
t cilindre (m)	0,003
Pes Cilindre (kg)	556,929
A fons (m²)	0,539
t fons (m)	0,003
Pes fons (kg)	14,049
Espai lliure (%)	0,77

Pes rebliment (kg)	638,749
Pes columna buida (kg)	1223,775
Volum columna (m³)	4,372
Pes líquid (kg)	1845,555
Pes columna en operació (kg)	3069,330

Disseny del faldó de la columna

El suport més comú per subjectar equips verticals és el faldó. Aquest s'uneix a la columna per la part inferior amb una soldadura contínua. El gruix del Faldó sol determinar-se amb el gruix requerit per la soldadura. L'alçada del faldó és de 1m; el material de construcció és acer al carboni. A més del suport, la columna disposa d'una escala d'alçada igual a la de la columna i d'amplada 0,4m. L'escala té un sortint a l'alçada de cada boca home per facilitar possibles reparacions.

Aïllant tèrmic de la columna

L'aïllant tèrmic és necessari per mantenir la temperatura interna de l'equip i per evitar cremades als treballadors. L'aïllant escollit és llana de roca de 140kg/m³ i es cobreixen amb una xapa d'acer inoxidable. Mitjançant el programa Insulan de l'empresa Calorcol es calcula el gruix de l'aïllant tèrmic.

Taula 11.9.1.2.2. Aïllant de la columna CA-201

Temperatura interna (°C)	260
Temperatura ambiental (°C)	25
Temperatura externa de l'aïllant (°C)	40
Velocitat de l'aire (m/s)	0

Gruix de l'aïllant (mm)	157,23
Eficàcia de l'aïllant (%)	97,64

11.10.2. Disseny columna d'absorció CA-301 i CA-302

Per dissenyar aquesta columna s'ha tingut en compte el corrent que s'alimenta, la concentració final que s'ha volgut obtenir i el temps de residència amb el que s'ha volgut operar.

Aquesta columna està alimentada per la barreja de dos corrents que provenen de:

- Sortida de caps de la columna CA-201
- Sortida de caps del BC-217

La sortida de caps del BC-217 s'han de descomprimir abans d'entrar a la columna de absorció. Això provoca que la temperatura d'aquest corrent disminueixi. Els cabals que es mesclen per entrar a la columna i la mescla dels dos tenen les següents característiques:

Taula 11.9.1.2.3. Corrents que es mesclen per entrar a la columna CA-301 i CA-302

	Caps de la CA-201	Caps del BC-217	Mescla
Cabal màssic (kg/h)	363,4	342,4	705,8
Cabal molar (kmol/h)	9,7	9,4	19,4
Temperatura (°C)	5	-73,72	-26,45
Pressió (bar)	1,013	1,013	1,013
Densidad (kg/m³)	1,65	2,27	1,85

Taula 11.9.1.2.5. Composició del corrent d'entrada a la columna CA-301 i CA-302

	ALIMENT (kg/h)	ALIMENT (% màssic)
Toluè	13,4	1,90

HCl	692,4	98,10
------------	-------	-------

Per intentar que la feina a la planta sigui el més homogènia possible en els tres torns de treball s'ha decidit que el temps de residència de la columna sigui 8h.

Amb el temps de residència definit la quantitat d'aigua necessària per absorbir el clorur d'hidrogen i obtenir una concentració del 37% és 9431,61 Kg.

A part de l'àcid clorhídric, transcorregut el temps de residència també s'obté toluè que amb l'ajut de la centrifuga CT-303 es separa de l'àcid.

Taula 11.9.1.2.6. Productes de la columna CA-301 i CA-302

	Productes
Àcid Clorhídric (Kg/h)	1871,4
Toluè (Kg/h)	13,4

Per assegurar que no s'escapa clorur d'hidrogen gas quan la concentració de l'aigua s'aproxima al 37%, la sortida de caps de la columna està connectada a l'entrada de la columna que treballa en paral·lel a aquesta (CA-302).

11.9.3. Dimensionament de la columna CA-301

Per dimensionar aquesta columna s'ha tingut en compte el volum que ocupa l'àcid clorhídric al 37%, el toluè i un 25% extra de volum buit. Amb el volum que ha de tenir la columna s'ha fet una estructura de longitud 6,5 vegades el diàmetre perquè tingués forma de columna. Les dimensions finals són:

Taula 11.9.2.1.1. Dimensions de la columna CA-301 i CA-302

Alçada (m)	9,75
Diàmetre (m)	1,5
Volum (m³)	17,23

11.9.4. Disseny mecànic de la columna CA-302

D'aquesta columna s'obté per caps fosc i HCl de manera que el material de construcció de la columna ha de ser prou resistent per no corroir-se. El material utilitzat per aquesta columna i per tots els seus elements interns és Hastelloy C-276.

Gruix de paret de columna

Per trobar el gruix de les parets de la columna s'ha fet servir el codi ASME.

Per conèixer el pes del cilindre i els fons s'ha de calcular la quantitat de material emparat; aquest es troba a partir de les dimensions de la columna, el gruix de la xapa i la densitat del material

$$P_{disseny} = P_{treball} + 0,15 \cdot P_{treball} \quad [Eq. 11.XXX]$$

$$P_{disseny} = P_{treball} + 2atm \quad [Eq. 11.XXX]$$

$$P_{disseny} = 3 atm$$

La temperatura de disseny és la temperatura de treball més 20°C.

$$T_{disseny} = T_{treball} + 20^{\circ}C \quad [Eq. 11.XXX]$$

$$T_{disseny} = 45^{\circ}C$$

Per calcular el gruix del cos cilíndric es calcula el gruix mínim requerit per la pressió interna. No cal calcular el gruix necessari per pressió externa perquè dins la columna no s'hi fa el buit.

El valor del gruix de la xapa s'augmenta fins adequar-lo a un gruix comercial. El gruix mínim per construir equips a pressió és 3mm.

$$t = 1,048mm \approx 3mm$$

Els fons de la columna són toriesfèric. El gruix d'aquestes parts es calculen sols a pressió interna ja que tampoc estan sotmeses al buit.

El valor del gruix de la xapa s'augmenta fins adequar-lo a un gruix comercial. El gruix comercial mínim per construir equips a pressió és 3mm.

$$t = 1,047mm \approx 3mm$$

Pes de la columna

Per calcular el pes de la columna s'ha de sumar el pes de la columna buida (cilindre, fons i rebliment) amb el pes del líquid que hi ha en la columna quan està en operació.

El pes de la columna buida és la suma del pes del cilindre, el fons i el rebliment.

$$Pes_{columna\ buida} = Pes_{cilindre} + Pes_{fons} + Pes_{rebliment} \quad [Eq. 11.XXXX]$$

Per conèixer el pes del cilindre i els fons s'ha de calcular la quantitat de material emparat que es troba a partir de les dimensions de la columna, el gruix de la xapa i la densitat del material

$$Pes = Àrea \cdot Gruix \cdot Densitat \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$A_{cilindre} = \pi \cdot D_c \cdot L \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$A_{toriesfèric} = 0,842 \cdot D_c^2 \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$Pes_{cilindre} = \pi \cdot D_c \cdot L \cdot t \cdot \rho \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$Pes_{fons} = 0,842 \cdot D_c^2 \cdot t \cdot \rho \quad [Eq. 11.XXXX]$$

El pes del rebliment es calcula:

$$Pes_{Rebliment} = V_{Rebliment} \cdot \rho_{Rebliment} \cdot (1 - Espai lliure) \quad [Eq. 11.XXXX]$$

El pes del líquid que circula per la columna és la densitat del líquid pel volum de líquid que hi ha a la columna en operació. El volum de líquid que hi ha a la columna en operació es suposa que és la meitat del volum de la columna.

$$Pes_{líquid} = \frac{V_{columna}}{2} \cdot \rho_{líquid} \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$V_{columna} = 2 \cdot (0.0778 \cdot D_c^2) + \frac{\pi}{4} \cdot D_c^2 \cdot h \quad [Eq. 11.XXXX]$$

El pes de la columna és:

Taula 11.9.2.2.1. Pes de la columna CA-301 i CA-302

Densitat Material (kg/m³)	8690
A cilindre (m²)	45,946

t cilindre (m)	0,003
Pes Cilindre (kg)	1197,807
A fons (m²)	1,895
t fons (m)	0,003
Pes fons (kg)	49,390
Pes columna buida (kg)	1296,590
Volum columna (m³)	17,580
Pes líquid (kg)	15367,741
Pes columna en operació (kg)	16664,327

Disseny del faldó de la columna

El suport més comú per subjectar equips verticals és el faldó. Aquest s'uneix a la columna per la part inferior amb una soldadura continua. El gruix del faldó sol determinar-se amb el gruix requerit per la soldadura. L'alçada del faldó és de 1m; el material de construcció és acer al carboni. A més del suport, la columna disposa d'una escala d'alçada igual a la de la columna i d'amplada 0,4m. L'escala té un sortint a l'alçada de cada boca home per facilitar possibles reparacions.

Aïllant tèrmic de la columna

Aquestes columnes treballen a temperatura ambiental, per tant no requereixen d'aïllament.

11.10. Columnes d'absorció

El procés d'absorció és una operació bàsica que s'utilitza per dissoldre un o més compostos gasosos en un solvent líquid. Aquest procés requereix del contacte entre fases (líquid i gas). La zona on es troben en contacte el líquid i el gas és l'àrea de transferència, com major sigui aquesta millor serà l'absorció.

L'absorció pot dur-se a terme en continu, discontinu o semicontinu si es disposa de dos columnes en paral·lel. L'estructura interna de la columna pot variar depenent de les necessitats d'àrea de

transferència. L'estructura interna pot ser columna de rebliment, columna de plats o columna de borboleig.

- Columna de rebliment: aquest tipus de columna és la que pot oferir més àrea de transferència. El rebliment de la columna pot estar distribuït de forma estructurada o aleatòria. La forma estructurada consisteix en unes peces ordenades de manera que aportin la major àrea de transferència i la menor pèrdua de carrega; el problema d'aquest rebliment és que es construeix de metall o de plàstic el que fa que no sigui adequat per productes corrosius. El rebliment aleatori consisteix en peces distribuïdes de forma desordenada dins de la columna. Aquest rebliment no és tant efectiu com l'estructurat però es pot construir de material ceràmic fet que el fa resistent a la corrosió.

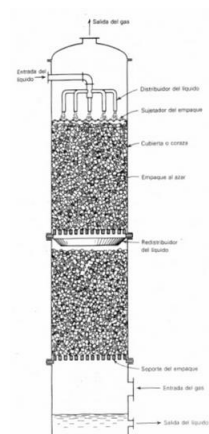


Figura 11.9.1. Columna d'absorció de rebliment

- Columna de plats: aquest tipus de columna pot donar menys àrea de transferència que les columnes de rebliment però són millors que les de borboleig. En cada plat s'entrecruen la fase gas i la líquida com es pot veure en la següent figura.

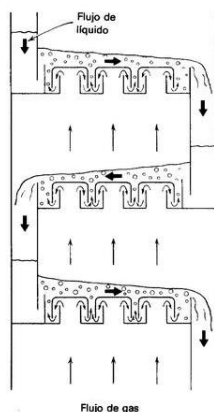


Figura 11.9.2. Columna d'absorció de plats

- Columna de borbolleig: aquest tipus de columnes treballen en discontinu o en semicontinu si treballen en paral·lel a una altra columna. L'àrea de transferència d'aquestes columnes depenen directament de l'alçada de líquid.

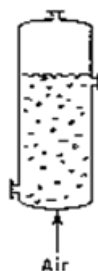


Figura 11.9.3. Columna d'absorció de borbolleig

Tot seguit es situa breument cada columna dins de la planta i s'explica la seva finalitat. Després d'aquesta breu explicació s'analitza el disseny de cada columna.

- Columna d'absorció CA-201

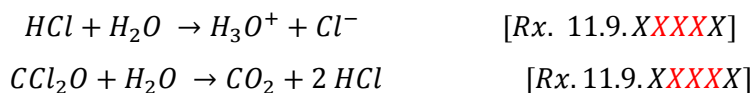
Aquesta columna treballa amb continu i té la finalitat d'absorbir en el líquid tot el MCC i una part del fosc. Dins de la columna s'entrecreuen toluè líquid a 5°C (solvent) i el corrent gasós de sortida del reactor de formació de MCC (R-201) que es troba a 260°C i està compost per fosc, MCC i HCl. La baixa temperatura del toluè a part de refredar el corrent gasós també és favorable per facilitar l'absorció de la fase gas en el líquid.

- Columna d'absorció CA-301

Com que el clorur d'hidrogen no es pot emetre a l'atmosfera ni emmagatzemar-lo en forma gasosa s'ha pres la decisió d'absorbir-lo amb aigua en una columna de borboleig (CA-301).

La columna de borboleig treballa en discontinu. Per aconseguir que el procés global sigui continu s'instal·la una columna idèntica en paral·lel que opera alternada a aquesta (CA-302).

L'absorció amb aigua produeix àcid clorhídric que es comercialitza a una concentració del 37%. El foscè que entra a la columna amb el clorur d'hidrogen reacciona amb l'aigua formant àcid clorhídric i diòxid de carboni.



11.10.1.Disseny columna d'absorció CA-201

Aquesta columna treballa en continu i cap dels compostos que hi circula reacciona entre ells, es pot utilitzar el programa informàtic Aspen Hysys v8.3 per dissenyar-la i aproximar el seu comportament.

Perquè el Aspen Hysys v8.3 pugui fer una bona simulació és necessari especificar un model termodinàmic que s'adeqüi a les condicions de treball. L'elecció d'aquest model s'ha pres seguin la guia ASPENTech tenint en compte que el model havia de ser adequat pels següents punts:

- Mescla Multi component
- Components polars no electròlits
- Equilibri líquid-líquid
- Equilibri líquid-vapor
- Mescla no aquoses
- No es disposen de coeficients d'interacció (experimentals o estimats)

El model escollit ha estat UNIQUAC amb el paquet Peng-Robinson pels gasos. Afegint la condició que el clorur d'hidrogen és insoluble en toluè.

Per a poder fer el disseny amb el Hysys, considerant que el clorur d'hidrogen és totalment insoluble amb el toluè, s'ha substituït el volum de clorur d'hidrogen per un volum igual de nitrogen. Amb el model termodinàmic escollit el nitrogen és insoluble en toluè. La finalitat d'aquesta substitució ha estat poder tenir un volum igual de gas que travessi els equips (CA-201 i BC-217) i així poder aproximar les dimensions d'aquests.

Per trobar el cabal adequat de solvent s'ha iterat fins trobar un cabal capaç d'absorbir el fosgè i tot el MCC. A continuació les taules 11.9.1.1 i 11.9.1.2 mostren les característiques de l'entrada gasosa, l'entrada de solvent, la sortida per caps i la sortida per cues de la columna.

Taula 11.9.1.1. característiques dels corrents de la columna CA-201

	SOLVENT	ALIMENT	CAPS	CUES
Cabal màssic (kg/h)	6000	1485,1	363,4	7121,7
Cabal molar (kmol/h)	65,1	21,6	9,7	65
Temperatura (°C)	5	260	5	86,67
Pressió (bar)	1,013	1,013	1,013	1,013
Densitat (kg/m³)	829,4	1,58	1,654	844,23

Taula 11.9.1.2.. composició dels corrents de la columna CA-201

	SOLVENT	ALIMENT	CAPS	CUES
Toluè (kg/h)	6000	0	13,4	5986,6
HCl (kg/h)	0	350	350	0
Fosgè (kg/h)	0	237,4	0	237,4
MCC (kg/h)	0	897,4	0	897,7

Per obtenir l'absorció descrita en les taules anteriors és necessari una àrea equivalent a 10 etapes d'equilibri.

A partir de la columna feta amb el HYSYS s'utilitza l'opció Tray Sizing per trobar paràmetres de disseny de la columna.

Taula 11.9.1.3. característiques Tray Sizing de la columna CA-201

Tipus columna	Llit empaquet
Tipus de rebliment	Berl Saddles (Ceramic) 0.5_inch (Norton)
Diàmetre (m)	0,914
Alçada (m)	4,868
Delta Pressió	0,638
Màxima inundació (%)	50

11.10.1.1. Disseny intern de la columna CA-201

L'opció Tray Sizing aporta els valors exactes del diàmetre de la columna i de l'alçada necessària del rebliment. Aquests valors s'han arrodonit per facilitar la construcció. L'alçada de rebliment s'ha arrodonit a 5m.

A l'hora de dissenyar l'interior de la columna s'ha tingut en compte que l'alçada màxima d'una secció de rebliment és 3m, l'alçada de les boques homes que s'han instal·lat a la part superior i inferior de cada secció de rebliment és 0,5m, l'alçada a la part superior de la columna per la boca home i pel distribuïdor del solvent 1m, 0,5m per l'entrada de l'aliment i 2m a la part inferior de la columna per la boca home, el distribuïdor de vapor del calderí i perquè sempre hi hagi líquid pel calderí. La següent taula mostra l'alçada final de la columna i el diàmetre arrodonit.

Taula 11.9.1.1.1. Característiques disseny de la columna CA-201

Alçada del cos cilíndric (m)	8,5
Diàmetre (m)	1

Rebliment

El rebliment ceràmic emparat és el Berl Saddles (Ceramic) 0.5_inch (Norton) també anomenades muntures Intalox el qual es pot veure a la següent figura.

**Figura 11.9.1.1.1.** Rebliment Berl Saddles (Ceramic)(Norton)

La decisió d'optar per un rebliment ceràmic s'ha pres per evitar problemes deguts a la corrosió del fòsgè i el clorur d'hidrogen.

Col·lector (suport superior del rebliment)

Per evitar que el líquid es concentri en les parets de la columna i ajudar a que es distribueixi uniformement en tot el rebliment es posen col·lectors damunt de cada secció de rebliment. Una altra funció del col·lector és fer de suport del distribuïdor de líquid i evitar que el rebliment pugui ser arrossegat. El col·lector SLT de Sulzer combina una reixeta de suport amb un col·lector de líquid.



Figura 11.9.1.1.2. Col·lector SLT de Sulzer

Suport del rebliment

El suport escollit per ficar a la part inferior de cada secció de rebliment és el model EMS de Sulzer que és adequat per rebliments distribuïts de forma aleatòria i per columnes amb diàmetres inferiors a 1,2 m. Aquests tipus de suports també serveixen com a distribuïdor de vapor perquè entri de forma homogènia per tota la secció de rebliment.

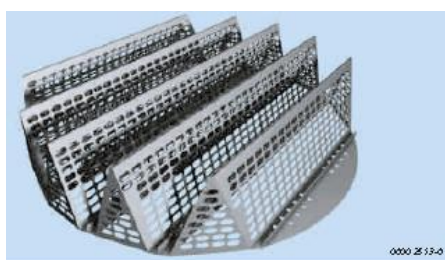
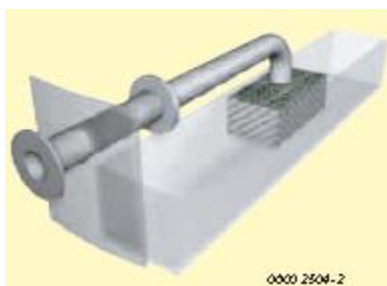
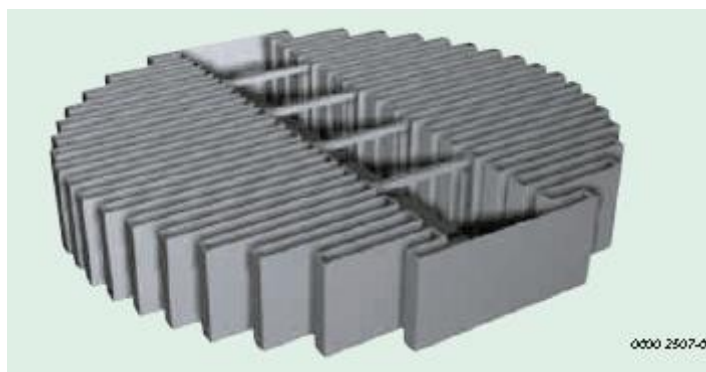


Figura 11.9.1.1.3. Suport EMS de Sulzer**Entrada de l'aliment**

La columna s'alimenta amb un corrent 100% líquid i com que té un diàmetre petit s'utilitza el injector tipus LV de Sulzer.

**Figura 11.9.1.1.4.** Injector LV de Sulzer**Distribuïdors de líquid de l'aliment**

És necessari disposar d'un distribuïdor en l'entrada de l'aliment solvent perquè el líquid es reparteixi de forma homogènia per tot el rebliment. El distribuïdor utilitzat és el VKG de l'empresa Sulzer perquè és el que correspon pel diàmetre de columna i el cabal de líquid.

**Figura 11.9.1.1.5.** Distribuïdor de líquid VKG de Sulzer**Entrada vapor**

L'entrada de vapor es fa amb el model GIG de l'empresa Sulzer

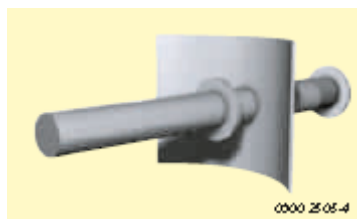


Figura 11.9.1.1.6. Entrada de vapor GIG de Sulzer

Boca home

Les boques homes instal·lades tenen un diàmetre de 500mm i han de ser del mateix material que la resta de la columna per evitar la corrosió.

11.10.1.2. Disseny mecànic de la columna CA-201

D'aquesta columna s'obté per caps fosc i HCl, de manera que el material de construcció de la columna ha de ser prou resistent per no corroir-se. El material utilitzat per aquesta columna i per tots els seus elements interns és Hastelloy C-276.

Gruix de paret de columna

Per trobar el gruix de les parets de la columna s'ha fet servir el codi ASME.

Per conèixer el pes del cilindre i els fons s'ha de calcular la quantitat de material emparat; aquest es troba a partir de les dimensions de la columna, el gruix de la xapa i la densitat del material

$$P_{disseny} = P_{treball} + 0,15 \cdot P_{treball} \quad [Eq. 11.XXX]$$

$$P_{disseny} = P_{treball} + 2atm \quad [Eq. 11.XXX]$$

$$P_{disseny} = 3 atm$$

La temperatura de disseny és la temperatura de treball més 20°C.

$$T_{disseny} = T_{treball} + 20^{\circ}C \quad [Eq. 11.XXX]$$

$$T_{disseny} = 280^{\circ}C$$

Per calcular el gruix del cos cilíndric es calcula el gruix mínim requerit per la pressió interna. No cal calcular el gruix necessari per pressió externa perquè dins la columna no s'hi fa el buit.

El valor del gruix de la xapa s'augmenta fins adequar-lo a un gruix comercial. El gruix mínim per construir equips a pressió és 3mm.

$$t = 1,038mm \approx 3mm$$

Els fons de la columna són toricsfèric. El gruix d'aquestes parts es calculen sols a pressió interna ja que tampoc estan sotmeses al buit.

El valor del gruix de la xapa s'augmenta fins adequar-lo a un gruix comercial. El gruix comercial mínim per construir equips a pressió és 3mm.

$$t = 1,054mm \approx 3mm$$

Pes de la columna

Per calcular el pes de la columna s'ha de sumar el pes de la columna buida (cilindre, fons i rebliment) amb el pes del líquid que hi ha en la columna quan està en operació.

El pes de la columna buida és la suma del pes del cilindre, el fons i el rebliment.

$$Pes_{columna\ buida} = Pes_{cilindre} + Pes_{fons} + Pes_{rebliment} \quad [Eq. 11.XXX]$$

Per conèixer el pes del cilindre i els fons s'ha de calcular la quantitat de material emparat que es troba a partir de les dimensions de la columna, el gruix de la xapa i la densitat del material.

$$Pes = Àrea \cdot Gruix \cdot Densitat \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$A_{cilindre} = \pi \cdot D_c \cdot L \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$A_{toriesféric} = 0,842 \cdot D_c^2 \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$Pes_{cilindre} = \pi \cdot D_c \cdot L \cdot t \cdot \rho \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$Pes_{fons} = 0,842 \cdot D_c^2 \cdot t \cdot \rho \quad [Eq. 11.XXXX]$$

El pes del rebliment es calcula:

$$Pes_{Rebliment} = V_{Rebliment} \cdot \rho_{Rebliment} \cdot (1 - \text{Espai lliure}) \quad [Eq. 11.XXXX]$$

El pes del líquid que circula per la columna és la densitat del líquid pel volum de líquid que hi ha a la columna en operació. El volum de líquid que hi ha a la columna en operació s'ha suposa que és la meitat del volum de la columna.

$$Pes_{líquid} = \frac{V_{columna}}{2} \cdot \rho_{líquid} \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$V_{columna} = 2 \cdot (0,0778 \cdot D_c^2) + \frac{\pi}{4} \cdot D_c^2 \cdot h \quad [Eq. 11.XXXX]$$

El pes de la columna és:

Taula 11.9.1.2.1. Pes de la columna CA-201

Densitat Material (kg/m³)	8690
Densitat Rebliment (kg/m³)	650
A cilindre (m²)	21,366
t cilindre (m)	0,003
Pes Cilindre (kg)	556,929
A fons (m²)	0,539

t fons (m)	0,003
Pes fons (kg)	14,049
Espai lliure (%)	0,77
Pes rebliment (kg)	638,749
Pes columna buida (kg)	1223,775
Volum columna (m³)	4,372
Pes líquid (kg)	1845,555
Pes columna en operació (kg)	3069,330

Disseny del faldó de la columna

El suport més comú per subjectar equips verticals és el faldó. Aquest s'uneix a la columna per la part inferior amb una soldadura contínua. El gruix del Faldó sol determinar-se amb el gruix requerit per la soldadura. L'alçada del faldó és de 1m; el material de construcció és acer al carboni. A més del suport, la columna disposa d'una escala d'alçada igual a la de la columna i d'amplada 0,4m. L'escala té un sortint a l'alçada de cada boca home per facilitar possibles reparacions.

Aïllant tèrmic de la columna

L'aïllant tèrmic és necessari per mantenir la temperatura interna de l'equip i per evitar cremades als treballadors. L'aïllant escollit és llana de roca de 140kg/m³ i es cobreixen amb una xapa d'acer inoxidable. Mitjançant el programa Insulan de l'empresa Calorcol es calcula el gruix de l'aïllant tèrmic.

Taula 11.9.1.2.2. Aïllant de la columna CA-201

Temperatura interna (°C)	260
Temperatura ambiental (°C)	25
Temperatura externa de l'aïllant (°C)	40
Velocitat de l'aire (m/s)	0
Gruix de l'aïllant (mm)	157,23
Eficàcia de l'aïllant (%)	97,64

11.10.2. Disseny columna d'absorció CA-301 i CA-302

Per dissenyar aquesta columna s'ha tingut en compte el corrent que s'alimenta, la concentració final que s'ha volgut obtenir i el temps de residència amb el que s'ha volgut operar.

Aquesta columna està alimentada per la barreja de dos corrents que provenen de:

- Sortida de caps de la columna CA-201
- Sortida de caps del BC-217

La sortida de caps del BC-217 s'han de descomprimir abans d'entrar a la columna de absorció. Això provoca que la temperatura d'aquest corrent disminueixi. Els cabals que es mesclen per entrar a la columna i la mescla dels dos tenen les següents característiques:

Taula 11.9.1.2.3. Corrents que es mesclen per entrar a la columna CA-301 i CA-302

	Caps de la CA-201	Caps del BC-217	Mescla
Cabal màssic (kg/h)	363,4	342,4	705,8
Cabal molar (kmol/h)	9,7	9,4	19,4
Temperatura (°C)	5	-73,72	-26,45
Pressió (bar)	1,013	1,013	1,013
Densidad (kg/m³)	1,65	2,27	1,85

Taula 11.9.1.2.5. Composició del corrent d'entrada a la columna CA-301 i CA-302

	ALIMENT (kg/h)	ALIMENT (% màssic)
Toluè	13,4	1,90
HCl	692,4	98,10

Per intentar que la feina a la planta sigui el més homogènia possible en els tres torns de treball s'ha decidit que el temps de residència de la columna sigui 8h.

Amb el temps de residència definit la quantitat d'aigua necessària per absorbir el clorur d'hidrogen i obtenir una concentració del 37% és 9431,61 Kg.

A part de l'àcid clorhídric, transcorregut el temps de residència també s'obté toluè que amb l'ajut de la centrifuga CT-303 es separa de l'àcid.

Taula 11.9.1.2.6. Productes de la columna CA-301 i CA-302

	Productes
Àcid Clorhídric (Kg/h)	1871,4
Toluè (Kg/h)	13,4

Per assegurar que no s'escapa clorur d'hidrogen gas quan la concentració de l'aigua s'aproxima al 37%, la sortida de caps de la columna està connectada a l'entrada de la columna que treballa en paral·lel a aquesta (CA-302).

11.10.2.1. 11.9.2.1. Dimensionament de la columna CA-301

Per dimensionar aquesta columna s'ha tingut en compte el volum que ocupa l'àcid clorhídric al 37%, el toluè i un 25% extra de volum buit. Amb el volum que ha de tenir la columna s'ha fet una estructura de longitud 6,5 vegades el diàmetre perquè tingués forma de columna. Les dimensions finals són:

Taula 11.9.2.1.1. Dimensions de la columna CA-301 i CA-302

Alçada (m)	9,75
-------------------	------

Diàmetre (m)	1,5
Volum (m³)	17,23

11.10.2.2. 11.9.2.2. Disseny mecànic de la columna CA-302

D'aquesta columna s'obté per caps fosc i HCl de manera que el material de construcció de la columna ha de ser prou resistent per no corroir-se. El material utilitzat per aquesta columna i per tots els seus elements interns és Hastelloy C-276.

Gruix de paret de columna

Per trobar el gruix de les parets de la columna s'ha fet servir el codi ASME.

Per conèixer el pes del cilindre i els fons s'ha de calcular la quantitat de material emparat; aquest es troba a partir de les dimensions de la columna, el gruix de la xapa i la densitat del material

$$P_{disseny} = P_{treball} + 0,15 \cdot P_{treball} \quad [Eq. 11.XXX]$$

$$P_{disseny} = P_{treball} + 2atm \quad [Eq. 11.XXX]$$

$$P_{disseny} = 3 atm$$

La temperatura de disseny és la temperatura de treball més 20°C.

$$T_{disseny} = T_{treball} + 20^{\circ}C \quad [Eq. 11.XXX]$$

$$T_{disseny} = 45^{\circ}C$$

Per calcular el gruix del cos cilíndric es calcula el gruix mínim requerit per la pressió interna. No cal calcular el gruix necessari per pressió externa perquè dins la columna no s'hi fa el buit.

El valor del gruix de la xapa s'augmenta fins adequar-lo a un gruix comercial. El gruix mínim per construir equips a pressió és 3mm.

$$t = 1,048mm \approx 3mm$$

Els fons de la columna són toricsfèric. El gruix d'aquestes parts es calculen sols a pressió interna ja que tampoc estan sotmeses al buit.

El valor del gruix de la xapa s'augmenta fins adequar-lo a un gruix comercial. El gruix comercial mínim per construir equips a pressió és 3mm.

$$t = 1,047mm \approx 3mm$$

Pes de la columna

Per calcular el pes de la columna s'ha de sumar el pes de la columna buida (cilindre, fons i rebliment) amb el pes del líquid que hi ha en la columna quan està en operació.

El pes de la columna buida és la suma del pes del cilindre, el fons i el rebliment.

$$Pes_{columna\ buida} = Pes_{cilindre} + Pes_{fons} + Pes_{rebliment} \quad [Eq. 11.XXXX]$$

Per conèixer el pes del cilindre i els fons s'ha de calcular la quantitat de material emparat que es troba a partir de les dimensions de la columna, el gruix de la xapa i la densitat del material

$$Pes = Àrea \cdot Gruix \cdot Densitat \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$A_{cilindre} = \pi \cdot D_c \cdot L \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$A_{toriesféric} = 0,842 \cdot D_c^2 \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$Pes_{cilindre} = \pi \cdot D_c \cdot L \cdot t \cdot \rho \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$Pes_{fons} = 0,842 \cdot D_c^2 \cdot t \cdot \rho \quad [Eq. 11.XXXX]$$

El pes del rebliment es calcula:

$$Pes_{Rebliment} = V_{Rebliment} \cdot \rho_{Rebliment} \cdot (1 - \text{Espai lliure}) \quad [Eq. 11.XXXX]$$

El pes del líquid que circula per la columna és la densitat del líquid pel volum de líquid que hi ha a la columna en operació. El volum de líquid que hi ha a la columna en operació es suposa que és la meitat del volum de la columna.

$$Pes_{líquid} = \frac{V_{columna}}{2} \cdot \rho_{líquid} \quad [Eq. 11.XXXX]$$

$$V_{columna} = 2 \cdot (0.0778 \cdot D_c^2) + \frac{\pi}{4} \cdot D_c^2 \cdot h \quad [Eq. 11.XXXX]$$

El pes de la columna és:

Taula 11.9.2.2.1. Pes de la columna CA-301 i CA-302

Densitat Material (kg/m³)	8690
A cilindre (m²)	45,946
t cilindre (m)	0,003
Pes Cilindre (kg)	1197,807
A fons (m²)	1,895
t fons (m)	0,003
Pes fons (kg)	49,390
Pes columna buida (kg)	1296,590
Volum columna (m³)	17,580
Pes líquid (kg)	15367,741
Pes columna en operació (kg)	16664,327

Disseny del faldó de la columna

El suport més comú per subjectar equips verticals és el faldó. Aquest s'uneix a la columna per la part inferior amb una soldadura continua. El gruix del faldó sol determinar-se amb el gruix requerit per la soldadura. L'alçada del faldó és de 1m; el material de construcció és acer al carboni. A més del suport, la columna disposa d'una escala d'alçada igual a la de la columna i d'amplada 0,4m. L'escala té un sortint a l'alçada de cada boca home per facilitar possibles reparacions.

Aïllant tèrmic de la columna

Aquestes columnes treballen a temperatura ambiental, per tant no requereixen d'aïllament.

11.11. Procés de purificació del carbaril

Per acabar el procés es centra aquest apartat en la zona de purificació del carbaril arribant doncs a l'obtenció d'aquest com a producte final sense altres compostos ni impureses. Primerament s'especifica quins equips componen aquest procés de purificació amb la corresponent justificació de cada un d'ells i posteriorment es centra el manual de càlcul d'aquests mateixos.

Un cop produït el carbaril pels reactors R-203 i R-204 es té una sortida amb carbaril, toluè i en menys mesura 1-naftol i MIC. La primera operació que es realitza és una columna de destil·lació CD-301 amb l'objectiu d'extreure tot el MIC que contingui el corrent per fer les posteriors operacions de separació sense tan perill i amb més efectivitat. El fet de que tingui un punt d'ebullició molt diferent a la resta fa possible aquesta separació amb efectivitat i al mateix temps una bona recuperació al recirculant-lo als reactors de producció de carbaril mencionats.

Seguidament, el corrent de cues de la columna de destil·lació és portat a una sèrie de dos cristal·litzadors DTB ("Draft Tube Baffle") CR-301 i CR-302 al buit que utilitzen el refredament per evaporació adiabàtica per generar la sobresaturació. D'aquesta manera s'evapora part del toluè en els dos cristal·litzadors.

El corrent concentrat de la sortida del segon cristal·litzador va a una centrífuga de la qual el corrent sòlid humit correspondrà a la sortida del producte desitjat, passant posteriorment per un procés d'assecatge. I el corrent líquid d'aigües mares passarà a un tanc per a redissoldre bé el carbaril i homogeneïtzar el corrent.

La sortida sòlida de l'assecatge es tracta amb un processador Holo-Flite® que refreda el producte fins a la sortida d'aquest, **on es troba l'emmagatzematge del carbaril.**

Posteriorment, el corrent de les aigües mares entra en un tercer cristal·litzador DTB CR-303 al buit igual que els dos primers ja comentats. El corrent reconcentrat de la sortida és portat a dos tancs en sèrie amb recirculació refredats per un sistema A/C Chiller (Air-Cooled Chiller) on el carbaril que està dissolt en les aigües mares precipita del tot per refredament, fent així que no hi hagi carbaril dissolt en el solvent.

Així doncs, es fa passar el corrent per una centrífuga, on el corrent de líquid és tractat en un evaporador per a l'eliminació de les impureses i **recuperació del toluè.** I el corrent de sòlid humit va a un tanc mescla amb unes condicions molt específiques per tal de redissoldre el carbaril i poder recircular-lo al segon cristal·litzador.

Amb aquesta recirculació, es permet una millor recuperació i purificació del carbaril, ja que no només no es perd el carbaril sinó que el sòlid precipitat en el primer i tercer cristal·litzador permeten dur a terme la nucleació dels cristalls a partir d'una fase homogènia, per tal que la cristal·lització en el segon sigui de creixement.

11.11.1. Columna de destil·lació de MIC CD-301

La columna de destil·lació de MIC es troba detallada a l'**apartat de columnes (XXXX)** per mantenir la homogeneïtat de l'estructura del projecte.

CONDICIONS D'OPERACIÓ??

11.11.2. Cristal·litzadors CR-301, CR-302 i CR-303

La cristal·lització és una operació de transferència de matèria on es formen partícules sòlides (cristall o precipitat) a partir d'una fase homogènia (solut en dissolució). En les cristal·litzacions comercials no només interessa el rendiment i la puresa dels cristalls, sinó també la mida i la forma d'aquests. La uniformitat de la mida és indispensable per assegurar un comportament uniforme en l'ús del cristal·litzador. No obstant, els balanços de matèria i energia no determinen la distribució de mida dels cristalls del producte.

Per la formació d'un cristall es requereixen dues etapes, la nucleació, la qual consisteix en el naixement d'una nova partícula, i el creixement d'aquestes partícules fins a la mida macroscòpica. Així doncs, la distribució de la mida dels cristalls ve determinada per la interacció de les velocitats d'ambdues etapes, essent determinant en aquestes la sobresaturació, ja que en una dissolució no saturada o saturada no pot donar-se lloc la nucleació ni el creixement.

Hi ha diferents mètodes per a generar la sobresaturació. Els més importants i donats comercialment són:

- Per refredament de la solució amb evaporació menyspreable (cristal·litzadors de tanc i en batch).
- Per evaporació d'una part de dissolvent amb poc refredament o sense.
- Per combinació de refredament i evaporació en evaporadors adiabàtics (cristal·litzadors al buit).

El mètode emprat en els tres cristal·litzadors és el tercer, en el qual una solució calenta es sotmet al buit per a què part del dissolvent s'evapori de manera sobtada i la solució es refredi adiabàticament. Aquest és el mètode per provocar sobresaturació més important a gran escala.

El cristal·litzador escollit és el cristal·litzador DTB (Draft Tube Baffle) ja que té una alta eficiència de transferència de calor, una configuració simple i un consum d'energia baix entre altres característiques; essent àmpliament utilitzat en la indústria farmacèutica, química, i en operacions de cristal·lització en la indústria de pesticides. La figura 11.6.2.1. mostra com és un cristal·litzador DTB (imatges obtingudes de fonts bibliogràfiques diferents, Perry's i McCabe respectivament).

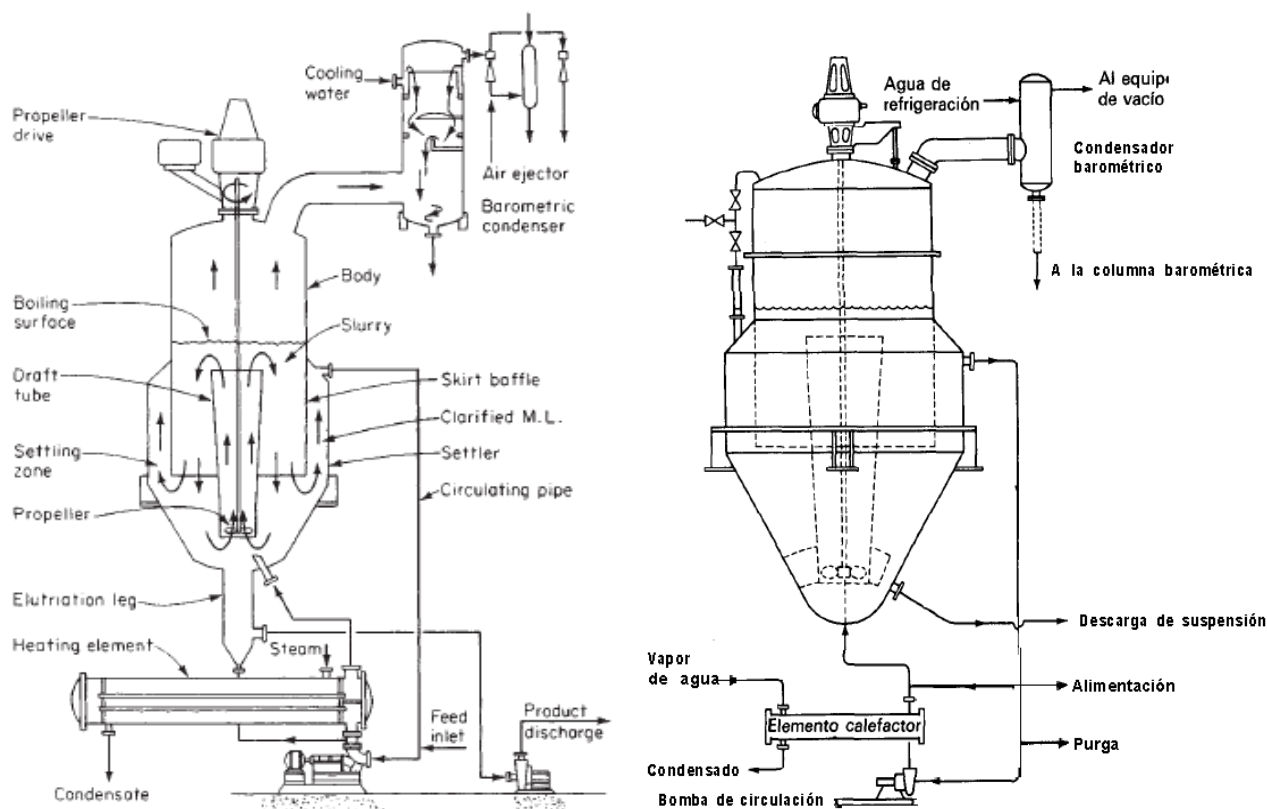


Figura 11.6.2.1. Cristal·litzador DTB al buit.

Aquest cristal·litzador consta de dos volums diferents. A la regió dels deflectors es duu a terme la sedimentació gravitacional on es separen els cristalls més grans dels fins. Els cristalls més grans s'assenten entre el deflector (baffle) i el tub d'aspiració (draft tube) i s'eliminen de la suspensió del producte, mentre que els fins es recirculen després de ser redissoltes en l'intercanviador de calor per a ser convertides en cristalls més grans. A la sortida d'aquest intercanviador (entrada cristal·litzador) es mescla el licor amb els fins produint una ebullició en la superfície del líquid, la qual causa la sobresaturació en el líquid més superficial. És aquí on es creen els cristalls de mida més gran, els quals surten per la canonada de circulació, mentre que els vapors surten per la part superior. El buit es duu a terme per mitjà del condensador i una bomba de buit situada a la sortida d'aquest.

11.11.2.1. Condicions d'operació

Les condicions d'operació dels cristal·litzadors difereixen una mica en la temperatura tenint en compte les composicions i el cabal de fluid calefactor necessari en els intercanviadors de calor per a escalfar la mescla. La pressió d'operació en els tres cristal·litzadors és de 150 mil·límetres de mercuri (0,197 atmosferes).

Les taules 11.6.2.1 fins 11.6.2.3 mostren els valors dels paràmetres d'operació per als tres cristal·litzadors respectivament.

Taula 11.6.2.1. Condicions d'operació a l'entrada i la sortida del cristal·litzador CR-301.

CONDICIONS D'OPERACIÓ CRISTAL·LITZADOR CR-301		
Calor de cristal·lització - λ_{crist} (kJ/kmol)	-24244,00	
Calor de vaporització toluè - λ_{vap} (kJ/kmol)	51849,17	
PARÀMETRE	ENTRADA	SORTIDA
Temperatura corrent (°C)	66,76	67
Temperatura oli tèrmic (°C)	130	90
Cabal màssic total (kg/h)	8119,4	8119,4
Pes molecular mescla (kg/kmol)	106,46	108,36
Calor específic mescla - C_p (kJ/kmol·°C)	174,10	181,30

Taula 11.6.2.2. Condicions d'operació a l'entrada i la sortida del cristal·litzador CR-302.

CONDICIONS D'OPERACIÓ CRISTAL·LITZADOR CR-302		
Calor de cristal·lització - λ_{crist} (kJ/kmol)	-24244,00	
Calor de vaporització toluè - λ_{vap} (kJ/kmol)	53806,41	
PARÀMETRE	ENTRADA	SORTIDA
Temperatura corrent (°C)	67	68,5
Temperatura oli tèrmic (°C)	130	90
Cabal màssic total (kg/h)	7621,5	7621,5
Pes molecular mescla (kg/kmol)	110,14	112,32
Calor específic mescla - C_p (kJ/kmol·°C)	178,60	185,70

Taula 11.6.2.3. Condicions d'operació a l'entrada i la sortida del cristal·litzador CR-303.

CONDICIONS D'OPERACIÓ CRISTAL·LITZADOR CR-303		
Calor de cristal·lització - λ_{crist} (kJ/kmol)	-24244,00	
Calor de vaporització toluè - λ_{vap} (kJ/kmol)	45111,42	
PARÀMETRE	ENTRADA	SORTIDA
Temperatura corrent (°C)	50	64
Temperatura oli tèrmic (°C)	130	90
Cabal màssic total (kg/h)	4721,5	4721,5
Pes molecular mescla (kg/kmol)	96,18	98,30
Calor específic mescla - C_p (kJ/kmol·°C)	151,90	169,50

11.11.2.2. Paràmetres de disseny

Les taules 11.6.2.4 fins 11.6.2.6 mostren els valors de disseny que s'ha pogut calcular degut a la falta d'informació de dades de cristal·lització, tal i com s'explica en l'apartat 11.6.x per als cristal·litzadors CR-301, CR-302 i CR-303.

Taula 11.6.2.4. Paràmetres de disseny pel cristal·litzador CR-301.

PARÀMETRES DE DISSENY CRISTAL·LITZADOR CR-301	
Material	Acer inoxidable 316L
Temps de residència (h)	5
Volum total (m³)	44,8
Condensador	BC-303
Intercanviador de calor	BC-304

Taula 11.6.2.5. Paràmetres de disseny pel cristal·litzador CR-302.

PARÀMETRES DE DISSENY CRISTAL·LITZADOR CR-302	
Material	Acer inoxidable 316L
Temps de residència (h)	5
Volum total (m³)	41,7
Condensador	BC-305
Intercanviador de calor	BC-306

Taula 11.6.2.6. Paràmetres de disseny pel cristal·litzador CR-303.

PARÀMETRES DE DISSENY CRISTAL·LITZADOR CR-303	
Material	Acer inoxidable 316L
Temps de residència (h)	5
Volum total (m³)	26,7
Condensador	BC-307
Intercanviador de calor	BC-308

11.11.2.3. Balanç de matèria

En la majoria dels processos industrials de cristal·lització, la solució (licor mare) i els cristalls sòlids estan en contacte durant el temps necessari per arribar a un equilibri. En conseqüència, el licor mare es troba saturat a la temperatura final del procés podent determinar així la concentració final de solut a la solució a partir de la corba de solubilitat.

La corba de solubilitat del carbaril no s'ha trobat, de manera que no s'ha pogut observar ni saber la variació de la solubilitat amb la temperatura. S'ha trobat bibliogràficament que la solubilitat del carbaril en toluè a 30°C es troba entre el 1 i 3% màssic, de manera que en la determinació de la solubilitat en els cristal·litzadors s'ha pres el valor de 3% multiplicat per dos amb la intenció d'assegurar el pitjor dels casos.

Per a poder realitzar els balanços de matèria s'ha requerit l'ajuda del Aspen HYSYS v. 8.2 del qual s'ha extret la fracció d'evaporació de toluè ($x_{\text{vap toluè}}$) a les condicions d'operació de cada cristal·litzador.

Les taules 11.6.2.7 fins 11.6.2.9 mostren els corrents d'entrada i sortida dels tres cristal·litzadors.

Taula 11.6.2.7. Cabals d'entrada i sortida del cristal·litzador CR-301 amb les respectives fraccions molars i màssiques.

ENTRADA CRISTAL·LITZADOR CR-301				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,92	133,14	1,21	1,64
Toluè	65,77	6060,37	86,24	74,64
Carbaril	9,57	1925,86	12,55	23,72
Cabals totals	76,27	8119,36	100,00	100,00
SORTIDA CRISTAL·LITZADOR CR-302				
PART LÍQUIDA				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,92	133,14	1,55	2,32
Toluè	56,84	5237,37	95,30	91,10
Carbaril	1,88	378,74	3,16	6,59
Cabals totals	59,65	5749,25	100,00	100,00
PART SÒLIDA				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Carbaril	7,69	1547,11	100,00	100,00
Cabals totals	7,69	1547,11	100,00	100,00
PART EVAPORADA				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Toluè	8,93	823,00	100,00	100,00
Cabals totals	8,93	823,00	100,00	100,00
Cabals totals SORTIDA	76,27	8119,36	100,00	100,00

Taula 11.6.2.8. Cabals d'entrada i sortida del cristal·litzador CR-302 amb les respectives fraccions molars i màssiques.

ENTRADA CRISTAL·LITZADOR CR-302

Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,94	135,06	1,35	1,77
Toluè	57,29	5279,11	82,79	69,27
Carbaril	10,97	2207,38	15,85	28,96
Cabals totals	69,20	7621,55	100,00	100,00
SORTIDA CRISTAL·LITZADOR CR-302				
PART LÍQUIDA				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,94	135,06	1,79	2,69
Toluè	49,82	4590,72	95,36	91,35
Carbaril	1,49	299,65	2,85	5,96
Cabals totals	52,25	5025,42	100,00	100,00
PART SÒLIDA				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Carbaril	9,48	1907,73	100,00	100,00
Cabals totals	9,48	1907,73	100,00	100,00
PART EVAPORADA				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Toluè	7,47	688,40	100,00	100,00
Cabals totals	7,47	688,40	100,00	100,00
Cabals totals SORTIDA	69,20	7621,55	100,00	100,00

Taula 11.6.2.9. Cabals d'entrada i sortida del cristal·litzador CR-303 amb les respectives fraccions molars i màssiques.

ENTRADA CRISTAL·LITZADOR CR-303				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,88	126,89	1,79	2,69
Toluè	46,81	4313,05	95,36	91,35
Carbaril	1,40	281,52	2,85	5,96
Cabals totals	49,09	4721,46	100,00	100,00
SORTIDA CRISTAL·LITZADOR CR-303				
PART LÍQUIDA				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,88	126,89	2,78	4,14
Toluè	29,93	2757,33	94,38	89,95
Carbaril	0,90	181,20	2,84	5,91
Cabals totals	31,71	3065,42	100,00	100,00
PART SÒLIDA				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Carbaril	0,50	100,32	100,00	100,00
Cabals totals	0,50	100,32	100,00	100,00
PART EVAPORADA				

Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Toluè	16,88	1555,72	100,00	100,00
Cabals totals	16,88	1555,72	100,00	100,00
Cabals totals SORTIDA	49,09	4721,46	100,00	100,00

Les equacions que s'han dut a terme per a l'obtenció dels corrents han estat l'equació del balanç de matèria global [Eq. 11.6.2.1] i l'equació de matèria pel carbaril [Eq. 11.6.2.2].

$$F = L + S + V \quad [Eq. 11.6.2.1]$$

$$F \cdot x_F = L \cdot x_L + S \cdot x_S + V \cdot x_V \quad [Eq. 11.6.2.2]$$

On:

- $F \rightarrow$ Cabal d'aliment al cristal·litzador (kmol/h).
- $L \rightarrow$ Fracció líquida del magma (kmol/h).
- $S \rightarrow$ Fracció sòlida del magma (kmol/h).
- $V \rightarrow$ Fracció vaporitzada de solvent (kmol/h).
- $x_F \rightarrow$ Fracció de carbaril a l'aliment (kmol carbaril/kmol mescla).
- $x_L \rightarrow$ Fracció de carbaril al corrent L (kmol carbaril/kmol mescla). Valor de solubilitat.
- $x_S \rightarrow$ Fracció de carbaril al corrent sòlid (kmol carbaril/kmol mescla). Es pren un valor de 1, assumint que tot és carbaril i que no es queda solvent a l'interior dels cristalls a diferència de com passa amb l'aigua.
- $x_V \rightarrow$ Fracció de carbaril al corrent V (kmol carbaril/kmol mescla). El seu valor és 0 ja que l'únic compost que s'evapora és el toluè.

El valor del cabal de vaporització de toluè s'obté de l'equació [Eq. 11.6.2.3].

$$V = x_{vap \text{ toluè}} \cdot x_{toluè \text{ ent}} \cdot F \quad [Eq. 11.6.2.3]$$

Així doncs es té un sistema de dues equacions ([Eq. 11.6.2.1] i [Eq. 11.6.2.2]) amb dues incògnites (L i S), sistema determinat, que permet la seva resolució per mitjà de la funció Solver de l'Excel. La dificultat sorgeix quan es realitza la recirculació de la sortida del mesclador M-302 al segon cristal·litzador, afectant també al tercer cristal·litzador.

En conclusió, la forma de resolució és iterativa incloent en el procés els balanços de matèria de les dues centrífugues i els Chillers explicats als apartats 11.6.3. i 11.6.4.

11.11.2.4. Balanç d'energia

Els paràmetres més importants obtinguts del balanç d'energia es troben recollits a les taules 11.6.2.10 a 11.6.2.12 corresponents als tres cristal·litzadors, amb l'explicació posterior de la seva obtenció.

Taula 11.6.2.10. Paràmetres del balanç d'energia del cristal·litzador CR-301.

BALANÇ D'ENERGIA AL CRISTAL·LITZADOR CR-301	
Refrigerant (oli tèrmic)	Dowtherm J
Calor necessari (kJ/h)	279896,6
Calor necessari (kW)	77,75
Calor específic oli tèrmic a 110°C (kJ/kg·°C)	2,13
Cabal màssic de fluid calefactor (kg/h)	3288,8

Taula 11.6.2.11. Paràmetres del balanç d'energia del cristal·litzador CR-302.

BALANÇ D'ENERGIA AL CRISTAL·LITZADOR CR-302	
Refrigerant (oli tèrmic)	Dowtherm J
Calor necessari (kJ/h)	190679,9
Calor necessari (kW)	52,97
Calor específic oli tèrmic a 110°C (kJ/kg·°C)	2,13
Cabal màssic de fluid calefactor (kg/h)	2240,5

Taula 11.6.2.12. Paràmetres del balanç d'energia del cristal·litzador CR-303.

BALANÇ D'ENERGIA AL CRISTAL·LITZADOR CR-303	
Refrigerant (oli tèrmic)	Dowtherm J
Calor necessari (kJ/h)	853968,9
Calor necessari (kW)	237,21
Calor específic oli tèrmic a 110°C (kJ/kg·°C)	2,13
Cabal màssic de fluid calefactor (kg/h)	10034,3

La calor obtinguda del balanç d'energia dels cristal·litzadors es realitza per mitjà de l'equació [Eq. 11.6.2.3].

$$Q = V \cdot \lambda_{\text{vap}} + S \cdot \lambda_{\text{crist}} - F \cdot (T_F - T_{op}) \cdot C_{p_F} \quad [\text{Eq. 11.6.2.3}]$$

Per a la realització del calor necessari per dur a terme la cristal·lització es requereix dels valors de V , S i F obtinguts del balanç de matèria, juntament amb el calor d'evaporació del toluè (λ_{vap}) i la calor específica de la corrent de l'aliment (C_{pF}) obtinguts per mitjà del Aspen Hysys v. 8.2. Les temperatures d'operació i de l'aliment (T_F) són plasmades a les taules 11.6.2.1 fins la 11.6.2.3.

Per a la determinació del valor del calor de cristal·lització del carbaril en toluè (λ_{crist}) s'ha utilitzat la de fusió del carbaril en toluè en signe contrari (negatiu) ja que no s'ha trobat bibliogràficament la de cristal·lització. De manera que s'assumeix que la fusió és el procés contrari a la cristal·lització, fent que el valor numèric de la calor que es necessita per a què el carbaril es fongui en el toluè correspon al que es requereix per a fer-lo cristal·litzar.

S'ha trobat bibliogràficament que el calor de fusió del carbaril en toluè és 5800 cal/mol, de manera que el valor de λ_{crist} utilitzat en el balanç d'energia correspon a -24244 kJ/kmol.

L'àrea mínima de bescanvi del intercanviador de calor no es pot determinar ja que no es sap quina és la relació de cabal recirculat, fent que no es pugui determinar les temperatures d'entrada i sortida del fluid de procés en l'intercanviador.

No obstant, sí que es pot determinar quin és el cabal de fluid calefactor necessari per al bescanvi de calor i fer treballar el cristal·lització a les condicions estipulades de temperatura. Aquest es troba reaïllant l'equació [Eq. 11.6.2.4], ja vista i utilitzada en els reactors.

$$Q = m_f \cdot C_{pf} \cdot \Delta T_f \quad [\text{Eq. 11.6.2.4}]$$

El fluid calefactor escollit és l'oli tèrmic Dowtherm J, ja que el requeriment pel cas de vapor era massa elevat per a bescanviar tot el calor. Les temperatures d'entrada i sortida es troben a l'apartat 11.6.2.1. de les condicions d'operació, assumint un salt tèrmic de 40°C. Elevat, però accessible.

El calor específic d'aquest es fixa a una temperatura intermèdia entre l'entrada i sortida de l'oli tèrmic obtinguda de la fitxa tècnica del refrigerant, amb el valor presentat a les taules 11.6.2.10 fins 11.6.2.12.

11.11.2.5. Disseny cristal·litzadors

Per a la determinació del volum del cristal·litzador és necessari conèixer quin és el temps de residència d'aquest. Si s'aproxima el sistema a un MSMPR (Mixed Suspension Mixed Product Removal Crystallization) suposant que els cristalls són esfèrics, es pot calcular el temps de residència per mitjà de l'equació [Eq. 11.6.2.5].

$$\tau = \frac{L_M}{3,67 \cdot G} \quad [Eq. 11.6.2.5]$$

On:

- $\tau \rightarrow$ Temps de residència de cristal·lització (h)
- $L_M \rightarrow$ Longitud mitjana dels cristalls (m)
- $G \rightarrow$ Velocitat de creixement dels cristalls (m/s)

Els valors de G i L_M no s'han trobat bibliogràficament pel cas del carbaril, fent que no hagi estat possible aplicar l'equació [Eq. 11.6.2.5]. No obstant, s'ha trobat que els cristal·litzadors solen tenir un temps de residència entre 2 i 6 hores, i a més a més, que els cristal·litzadors DTB el tenen comprès entre 4 i 6 hores, reduint encara més el rang d'aquest. Així doncs s'ha fixat en un valor de 5 hores.

Un cop es té el temps de residència es calcula el volum del cristal·litzador amb l'equació [Eq. 11.6.2.6].

$$V = Q_L \cdot \tau \quad [Eq. 11.6.2.6]$$

➤ Buit dels cristal·litzadors:

Tal i com ja s'ha comentat, els tres cristal·litzadors operen en condicions de quasi buit, concretament 0,197 atmosferes.

Per al càlcul del temps necessari per assegurar les condicions d'operació del nostre cristal·litzador, és a dir, la pressió de quasi buit en aquest cas, cal saber el volum dels equips als que es realitza el buit, els quals en el cas dels cristal·litzadors comprenen aquests mateixos, el bescanviador de calor, el condensador del solvent evaporat i el dipòsit de condensats. A la corrent de sortida d'aquests condensats és on s'inicia el buit per mitjà d'una bomba de buit.

Seguidament cal cercar quines són les fugues d'aire que entraran en funció del volum al qual es realitza el buit, és a dir, el volum acabat d'estipular. Per aquestes s'ha utilitzat la figura 11.6.2.2 (www.gea-wiegand.com), en la qual s'ha suposat el pitjor dels casos, és a dir, el cas de tenir més fugues, corresponent a la primera fila de valors.

Unit volume to be maintained under vacuum in m ³	0.2	1	3	5	10	25	50	100	200	500
Leakage air flow in kg/h										
Unit and duct connections										
with normal seals, mainly flanged	0.15-0.3	0.5-1	1-2	1.5-3	2-4	4-8	6-12	10-20	16-32	30-60
partly flanged, partly welded	0.1-0.2	0.25-0.5	0.5-1	0.7-1.5	1-2	2-4	3-6	5-10	8-16	15-30
mainly welded or designed with special seals	< 0.1	0.15-0.25	0.25-0.5	0.35-0.7	0.6-1.2	1-2	1.5-3	2.5-5	4-8	8-15

Figura 11.6.2.2. Taula de fugues d'aire en funció del volum de buit.

Es mostra les taules 11.6.2.13 fins 11.6.2.15 on s'especifica els volums als que realitzar el buit per a cada cristal·litzador juntament amb propietats necessàries pel càlcul del temps necessari per a realitzar el buit.

Taula 11.6.2.13. Propietats del cristal·litzador CR-301 per a la realització del càlcul del temps necessari de buit.

BUIT AL CRISTAL·LITZADOR CR-301				
VOLUM (m ³)				
Cristal·litzador	Condensador	Bescanviador de calor	Dipòsit de condensats	Total
44,849	0,017	0,090	0,310	45,3
Cabal de fugues (kg/h)				
11,25				
Cabal de la bomba de buit (m ³ /h)				
100				
Pressió de vapor del toluè evaporat (atm)				
0,0066				

Taula 11.6.2.14. Propietats del cristal·litzador CR-302 per a la realització del càlcul del temps necessari de buit.

BUIT AL CRISTAL·LITZADOR CR-302				
VOLUM (m ³)				
Cristal·litzador	Condensador	Bescanviador de calor	Dipòsit de condensats	Total
41,744	0,017	0,083	0,240	42,1
Cabal de fugues (kg/h)				
10,74				
Cabal de la bomba de buit (m ³ /h)				
100				
Pressió de vapor del toluè evaporat (atm)				
0,0066				

Taula 11.6.2.15. Propietats del cristal·litzador CR-303 per a la realització del càlcul del temps necessari de buit.

BUIT AL CRISTAL·LITZADOR CR-303				
VOLUM (m³)				
Cristal·litzador	Condensador	Bescanviador de calor	Dipòsit de condensats	Total
26,742	0,017	0,053	0,560	26,9
Cabal de fugues (kg/h)				
8,30				
Cabal de la bomba de buit (m³/h)				
100				
Pressió de vapor del toluè evaporat (atm)				
0,0066				

Els volums dels bescanviadors de calor han estat calculats com un 0,2% del volum dels cristal·litzadors ja que no es dissenyen degut a la falta de dades de cabal i temperatura de fluid de procés a través d'ells. D'aquesta manera, un cop es comprimin juntament amb els cristal·litzadors i després de realitzar un estudi en planta pilot, s'ajustaria aquest càlcul amb el valor exacte.

Per a la realització dels càlculs es suposa un cabal de bomba (m³/h) i es comprova que sigui suficient per a realitzar el buit.

Seguidament es mostra les taules 11.6.2.16 fins 11.6.2.18 on es plasma els paràmetres requerits a calcular per tal d'arribar al valor del temps de buit (últim valor remarcant en negreta). Els càlculs d'aquestes taules es troben especificats posteriorment.

Taula 11.6.2.16. Paràmetres necessaris en la determinació del temps de buit al CR-301.

CRISTAL·LITZADOR CR-301							
Pressió (atm)	Yd (fracció diss)	PM mescla (kg/kmol)	Densitat mescla (kg/m³)	Cabal bomba (kg/h)	Cabal bomba de succió (kg/h)	Massa mescla (kg)	Temps (min)
1,00	6,58E-03	29,42	1,07	106,38	95,13	48,51	0,00
0,95	6,93E-03	29,44	1,02	101,10	89,85	46,12	1,55
0,90	7,31E-03	29,46	0,97	95,82	84,57	43,73	3,20
0,85	7,75E-03	29,49	0,91	90,54	79,29	41,34	4,95
0,80	8,23E-03	29,52	0,86	85,26	74,01	38,94	6,82

0,75	8,78E-03	29,55	0,81	79,98	68,73	36,55	8,83
0,70	9,40E-03	29,59	0,75	74,70	63,45	34,16	11,00
0,65	1,01E-02	29,64	0,70	69,42	58,18	31,77	13,36
0,60	1,10E-02	29,69	0,65	64,14	52,90	29,38	15,94
0,55	1,20E-02	29,76	0,60	58,86	47,62	26,99	18,80
0,50	1,32E-02	29,83	0,54	53,58	42,34	24,60	21,99
0,45	1,46E-02	29,92	0,49	48,30	37,05	22,21	25,60
0,40	1,65E-02	30,04	0,44	43,02	31,77	19,81	29,77
0,35	1,88E-02	30,19	0,38	37,74	26,49	17,42	34,70
0,30	2,19E-02	30,39	0,33	32,46	21,21	15,03	40,71
0,25	2,63E-02	30,66	0,28	27,17	15,92	12,64	48,44
0,20	3,29E-02	31,08	0,23	21,88	10,63	10,25	59,24
0,20	3,34E-02	31,11	0,22	21,56	10,32	10,11	60,06

Taula 11.6.2.17. Paràmetres necessaris en la determinació del temps de buit al CR-302.

CRISTAL·LITZADOR CR-302							
Pressió (atm)	Yd (fracció diss)	PM mescla (kg/kmol)	Densitat mescla (kg/m ³)	Cabal bomba (kg/h)	Cabal bomba de succió (kg/h)	Massa mescla (kg)	Temps (min)
1,00	6,58E-03	29,42	1,07	106,38	95,64	45,08	0,00
0,95	6,93E-03	29,44	1,02	101,10	90,36	42,86	1,43
0,90	7,31E-03	29,46	0,97	95,82	85,08	40,64	2,95
0,85	7,75E-03	29,49	0,91	90,54	79,80	38,42	4,57
0,80	8,23E-03	29,52	0,86	85,26	74,53	36,19	6,30
0,75	8,78E-03	29,55	0,81	79,98	69,25	33,97	8,15
0,70	9,40E-03	29,59	0,75	74,70	63,97	31,75	10,16
0,65	1,01E-02	29,64	0,70	69,42	58,69	29,53	12,33
0,60	1,10E-02	29,69	0,65	64,14	53,41	27,30	14,71
0,55	1,20E-02	29,76	0,60	58,86	48,13	25,08	17,33
0,50	1,32E-02	29,83	0,54	53,58	42,85	22,86	20,27
0,45	1,46E-02	29,92	0,49	48,30	37,57	20,64	23,58
0,40	1,65E-02	30,04	0,44	43,02	32,29	18,41	27,40
0,35	1,88E-02	30,19	0,38	37,74	27,00	16,19	31,90
0,30	2,19E-02	30,39	0,33	32,46	21,72	13,97	37,37
0,25	2,63E-02	30,66	0,28	27,17	16,43	11,75	44,36
0,20	3,29E-02	31,08	0,23	21,88	11,15	9,53	54,03
0,20	3,34E-02	31,11	0,22	21,56	10,83	9,39	54,76

Taula 11.6.2.18. Paràmetres necessaris en la determinació del temps de buit al CR-303.

CRISTAL·LITZADOR CR-303							
Pressió (atm)	Yd (fracció diss)	PM mescla (kg/kmol)	Densitat mescla (kg/m3)	Cabal bomba (kg/h)	Cabal bomba de succió (kg/h)	Massa mescla (kg)	Temps (min)
1,00	6,58E-03	29,42	1,07	106,38	98,07	28,81	0,00
0,95	6,93E-03	29,44	1,02	101,10	92,79	27,39	0,89
0,90	7,31E-03	29,46	0,97	95,82	87,52	25,97	1,84
0,85	7,75E-03	29,49	0,91	90,54	82,24	24,55	2,84
0,80	8,23E-03	29,52	0,86	85,26	76,96	23,13	3,91
0,75	8,78E-03	29,55	0,81	79,98	71,68	21,71	5,06
0,70	9,40E-03	29,59	0,75	74,70	66,40	20,29	6,29
0,65	1,01E-02	29,64	0,70	69,42	61,12	18,87	7,63
0,60	1,10E-02	29,69	0,65	64,14	55,84	17,45	9,09
0,55	1,20E-02	29,76	0,60	58,86	50,56	16,03	10,69
0,50	1,32E-02	29,83	0,54	53,58	45,28	14,61	12,46
0,45	1,46E-02	29,92	0,49	48,30	40,00	13,19	14,46
0,40	1,65E-02	30,04	0,44	43,02	34,72	11,77	16,74
0,35	1,88E-02	30,19	0,38	37,74	29,44	10,35	19,40
0,30	2,19E-02	30,39	0,33	32,46	24,15	8,93	22,58
0,25	2,63E-02	30,66	0,28	27,17	18,87	7,51	26,54
0,20	3,29E-02	31,08	0,23	21,88	13,58	6,09	31,79
0,197	3,34E-02	31,11	0,22	21,56	13,26	6,00	32,17

Per a la realització dels càlculs es va disminuint el valor de la pressió a l'equip fins arribar al buit desitjat i es realitzen els càlculs amb aquests.

És necessari saber quina és la fracció d'incondensable, toluè, que és succionat amb l'aire que entra al volum de l'equip, com a fugues. Aquest correspon a Yd i es calcula amb l'equació [Eq. 11.6.2.7].

$$Y_d = \frac{P_v}{P} \quad [Eq. 11.6.2.7]$$

On Pv correspon a la pressió de vapor del toluè a la temperatura de sortida del condensador, i P és la pressió d'operació de l'equip, ambdues en atmosferes.

Seguidament es calcula el pes molecular de la mescla (PM_{mescla}) amb l'equació [Eq. 11.6.2.8] i amb aquest, la densitat de la mescla amb l'equació [Eq. 11.6.2.9].

$$PM_{mescla} = Y_d \cdot PM_{toluè} + (1 - Y_d) \cdot PM_{aire} \quad [Eq. 11.6.2.8]$$

$$\rho_{mescla} = \frac{P \cdot PM_{mescla}}{R \cdot T} \quad [Eq. 11.6.2.9]$$

On, el pes molecular de l'aire s'ha pres de 29 kg/kmol, la R correspon a 0,082 atm·L/mol·K, i T és la temperatura a la sortida del condensador.

Seguidament es calcula el cabal màssic de la bomba amb l'equació [Eq. 11.6.2.10] i el cabal màssic de succió de la bomba tenint en compte les fugues segons l'equació [Eq. 11.6.2.11].

$$m_{bomba} = Q_{bomba} \cdot \rho_{mescla} \quad [Eq. 11.6.2.10]$$

$$m_{succió} = m_{bomba} - F \quad [Eq. 11.6.2.11]$$

On:

- m_{bomba} = Cabal màssic de la bomba (kg/h)
- Q_{bomba} = Cabal volumètric de la bomba, suposat (m³/h)
- $m_{succió}$ = Cabal de succió de la bomba (kg/h)
- F = Cabal de fugues d'aire dins l'equip (kg/h)

Finalment, es calcula la massa de la mescla amb l'equació [Eq. 11.6.2.12] i el temps necessari per a realitzar el buit amb l'equació [Eq. 11.6.2.13].

$$M_{mescla} = V_{buit} \cdot \rho_{mescla} \quad [Eq. 11.6.2.12]$$

$$t_{buit,j+1} = t_j + \frac{V_{buit} \cdot \rho_{mescla,j} - V_{buit} \cdot \rho_{mescla,j+1}}{(m_{succió,j} + m_{succió,j+1})/2} \cdot 60 \quad [Eq. 11.6.2.13]$$

On:

- t_{buit} = Temps requerit per a realitzar el buit als equips (min)
- $j = 0$, en el nombre d'iteracions, en funció de la pressió d'operació suposada.
- V_{buit} = Volum en el que es realitza el buit (m³).

Així doncs, s'arriba al valor final de temps de buit, el qual correspon a la pressió de buit d'operació.

11.11.3. Centrífugues CT-301 i CT-302

La centrifugació és un mètode de separació de líquids no miscibles, o de sòlids i líquids per l'aplicació d'una força centrífuga. Aquesta força pot ser molt gran. Les separacions que es duen a terme lentament per gravetat poden accelerar-se en gran mesura amb la utilització d'un equip centrífug.

Concretament, una centrífuga és un equip que aplica una força centrífuga sostinguda (és a dir, una força produïda per rotació) per empènyer la matèria cap a fora en el centre de rotació. Aquest principi s'utilitza per separar partícules en un medi líquid per sedimentació.

Per a dur a terme la separació d'un sòlid en un líquid hi ha diversos mètodes de separació com són: filtres, filtres centrífugs, clarificadors, espessidors, centrífugues de sedimentació, ciclons líquids, tamís humit, separadors magnètics.

11.11.3.1. Balanç de matèria

Per a la realització del balanç de matèria de les centrífugues s'ha suposat una separació on el corrent sòlid és 75% sòlid amb un 25% de líquid.

A la **centrífuga CT-301** el corrent d'entrada prové del cristal·litzador CR-302 essent el sòlid que ha cristal·litzat en aquest el precipitat a la centrífuga, és a dir, que tot el cristal·litzat surt ha la centrífuga. La taula 11.6.3.1. correspon al balanç de matèria d'aquest amb l'entrada i sortides de la centrífuga.

Taula 11.6.3.1. Cabals d'entrada i sortida de la centrífuga CT-301 amb les respectives fraccions molars i màssiques.

ENTRADA CENTRÍFUGA CT-301				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,94	135,06	1,52	1,95
Toluè	49,82	4590,72	80,71	66,21
Carbaril	10,97	2207,38	17,77	31,84
Cabals totals ENTRADA	61,73	6933,15	100,00	100,00
SORTIDA CENTRÍFUGA CT-301				
CORRENT SÒLIDA				
75% SÒLID				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Carbaril	9,48	1907,73	100,00	100,00
25% LÍQUID				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes

1-Naftol	0,06	8,17	1,79	2,69
Toluè	3,01	277,67	95,36	91,35
Carbaril	0,09	18,12	2,85	5,96
Cabals totals	3,16	303,96	100,00	100,00
Cabals totals (75% S + 25% L)	12,64	2211,70	100,00	100,00
CORRENT LÍQUIDA				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,88	126,89	1,79	2,69
Toluè	46,81	4313,05	95,36	91,35
Carbaril	1,40	281,52	2,85	5,96
Cabals totals	49,09	4721,46	100,00	100,00
Cabals totals SORTIDA	61,73	6933,15	100,00	100,00

El corrent d'entrada de la **centrífuga CT-302** l'entrada prové dels chillers els quals s'expliquen a l'apartat 11.6.5. Igual que en la centrífuga CT-301 el percentatge en el corrent sòlid correspon a un 75% sòlid i un 25% líquid. En aquest cas, la sortida sòlida dels chillers correspon al 75% sòlid mencionat. La taula 11.6.3.2. mostra el balanç de matèria de la centrífuga CT-302.

Taula 11.6.3.2. Cabals d'entrada i sortida de la centrífuga CT-302 amb les respectives fraccions molars i màssiques.

ENTRADA CENTRÍFUGA CT-302				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,88	126,89	2,73	4,01
Toluè	29,93	2757,33	92,92	87,10
Carbaril	1,40	281,52	4,34	8,89
Cabals totals ENTRADA	32,20	3165,74	100,00	100,00
SORTIDA CENTRÍFUGA CT-302				
CORRENT SÒLIDA				
75% SÒLID				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Carbaril	1,40	281,52	100,00	100,00
25% LÍQUID				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,01	1,92	2,86	4,40
Toluè	0,45	41,74	97,14	95,60
Carbaril	0,00	0,00	0,00	0,00
Cabals totals	0,47	43,66	100,00	100,00
Cabals totals (75% S + 25% L)	1,87	325,19	100,00	100,00
CORRENT LÍQUIDA				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,87	124,97	2,86	4,40
Toluè	29,47	2715,59	97,14	95,60

Carbaril	0,00	0,00	0,00	0,00
Cabals totals	30,34	2840,56	100,00	100,00
Cabals totals SORTIDA	32,20	3165,74	100,00	100,00

11.11.3.2. Definició i paràmetres de les centrífugues

La **centrífuga CT-301** està pensada per separar la major quantitat de carbaril, ja que la sortida de sòlid amb el posterior assecatge correspondrà al corrent de producte desitjat de tota la planta. Així doncs, la centrífuga escollida és una centrífuga filtrant continua de l'empresa RIERA NADEU S.A. concretament el model 500F500 de RINA sèrie 500, les quals es caracteritzen per la simplicitat en el seu funcionament, la robustesa i la fiabilitat mecànica per un ús intensiu.

Aquestes centrífugues són equips filtrants d'eix vertical amb rotor cònic, destinades a la separació contínua sòlid-líquid de productes cristal·lins, granulars o fibrosos en un líquid. Es caracteritzen, entre altres coses, per la seva capacitat en relació al pes i mida, la seva fàcil operació i el seu funcionament en continu.

La figura 11.6.3.1 mostra com és la centrífuga RINA sèrie 500.

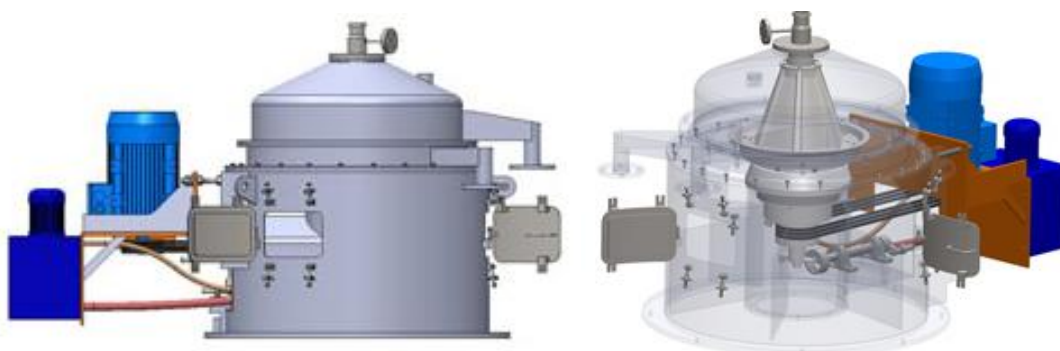


Figura 11.6.3.1. Centrífuga RINA sèrie 500 amb vista exterior massissa i interior.

Aquestes centrífugues consten d'un eix vertical amb un conjunt rotòric compost d'un cistell rasurat, un tamís filtrant perforat micromètricament i una hèlix extractora de sòlid. La suspensió de la mescla a tractar s'introdueix per la part superior de la màquina de forma contínua cap a l'interior del rotor, entre l'extractor de sòlid i el tamís. El sòlid es disposa a la paret interior del tamís per l'efecte de la força centrífuga i s'arrastra pel vis sense fi extractor helicoidal de pas variable cap a la sortida, situada per la part inferior de la màquina. La velocitat diferencial d'arrossegament entre l'hèlix del rotor en relació al cistell i el seu tamís s'aconsegueix mitjançant

un bloc reductor cinemàtic diferencial que fa que aquesta giri a una velocitat superior, permetent la descàrrega en continu del sòlid.

Les aigües mares i de rentat es recullen en col·lectors cap a l'exterior permetent recol·lectar-les per separat en cas necessari.

Les centrífugues filtrants contínues RINA sèrie 500 estan fabricades amb materials compatibles amb el producte a processar, el qual ve determinat en funció dels requeriments mecànics i la resistència química i especificacions requerides. En aquesta centrífuga es comprarà d'acer inoxidable AISI 316L.

El cabal màssic d'entrada de la centrífuga correspon a 6,93 Tn/h de manera que es pren una centrífuga que pugui tractar aquest cabal. Com que no està dins de cap dels rangs es pren una que permeti un cabal superior, assegurant la separació del corrent real, i permeten un ús futur en cas d'ampliació de la producció.

Les especificacions de la centrífuga RINA sèrie 500 es troben remarcades a la figura 11.6.3.2.

Modelo	Ø máx. cesto mm	Rendimiento Tm/h	Velocidad rpm	Capacidad dm ³	Factor centrífugo g	Potencia kW	Peso Kg	Medidas mm
500F300	300	1,5-2,5	3.400	4,40	1800-2100	15	950	1000x1500x2000
500F400	400	4-6	2.900	10,00	1750-2000	30	1500	1250x2000x1700
500F500	500	8-15	3.500	25,00	1600-1900	37	2200	1500x2500x1700
500F750	750	20-30	2.000	45,00	1500-1750	55	4000	1800x2800x2000

Figura 11.6.3.2. Especificacions tècniques de la centrífuga 500F500.

Per altra banda, la **centrífuga CT-302** es troba cap al final del procés de purificació permetent la obtenció del corrent sòlid que es recircula al segon cristal·litzador per recuperar tot el carbaril i obtenir un major rendiment de la planta. En aquest cas, la centrífuga escollida i la qual es comprarà també a l'empresa RIERA NADEU S.A. és una centrífuga decantadora contínua d'alta eficiència, model 600DSC180 de RINA sèrie 600 SC, la qual també es caracteritza per la simplicitat en el seu funcionament, la robustesa i la fiabilitat mecànica per un ús intensiu.

Aquestes centrífugues són equips decantadors continus horitzontals d'alta eficiència per la separació sòlid líquid en continu. Aquests equips de rotor cilíndric-cònic aconseguixen reduir la humitat amb una eficiència superior que els decantadors convencionals gràcies a la seva configuració i disseny. La figura 11.6.3.3. mostra com és la centrífuga RINA sèrie 600SC.

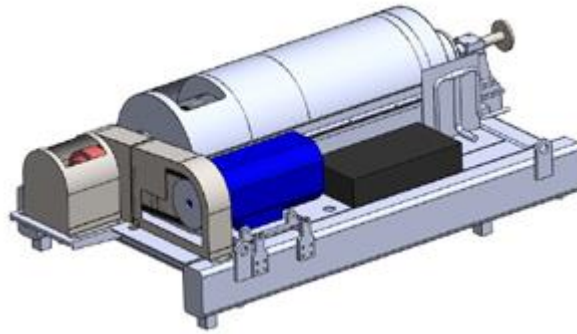


Figura 11.6.3.3. Centrífuga RINA sèrie 600SC.

El principi de funcionament d'aquestes centrífugues es basa en la teoria de la separació gravitacional. Gràcies a la aplicació de la rotació contínua, la força de la gravetat és substituïda per la força centrífuga la qual redueix el temps necessari per separar els sòlids més pesats dels líquids.

Les centrífugues RINA sèrie 600SC estan compostes d'un bol rotatori proveït d'un transportador intern que es desplaça en la mateixa direcció però a diferent velocitat. El transportador té un eix buit per l'alimentació del producte i en l'extrem oposat de la descàrrega del sòlid hi ha un sobreexidor per la descàrrega del líquid.

El mecanisme de deshidratació d'aquestes centrífugues utilitza la contrapressió que es genera per la força de lliscament a la part cònica. Aquesta actua en contra de la força de transport del cargol sense fi instal·lat a l'interior, el qual gira a una velocitat diferencial superior respecte el bol decantador, permetent la posterior sedimentació del sòlid, a més a més del premsat degut a la pròpia força centrífuga. En conseqüència, tots els sòlids deshidratats produïts a cada gir del transportador del cargol sense fi són desplaçats cap a la sortida del bol.

No obstant, la força centrífuga disminueix a mesura que el sòlid avança per la part cònica, el que provoca en el punt A de la figura 11.6.3.4 un menor contingut d'aigua en la circumferència interior, i en B un contingut major d'aigua en la circumferència exterior, sumant d'aquesta manera el contingut d'aigua de tot el sòlid deshidratat, essent el resultat final el valor mitjà dels dos.

La figura 11.6.3.4 mostra dos imatges per a entendre millor les forces com actuen amb el que s'acaba d'explicar.

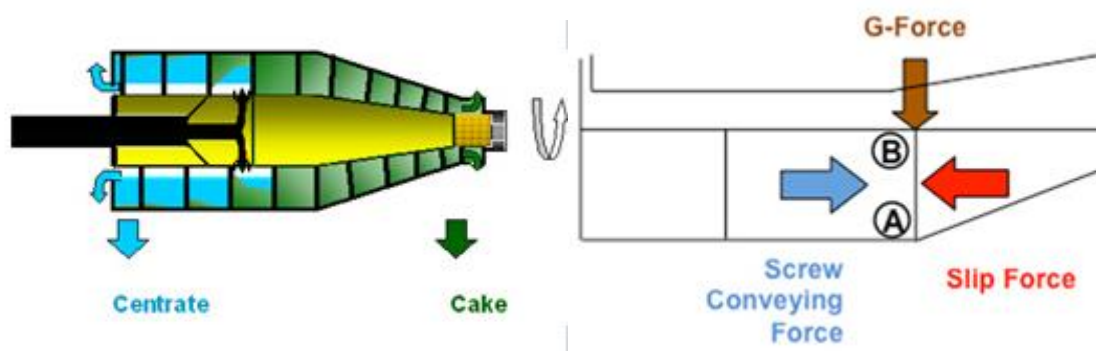


Figura 11.6.3.4. Imatges del bol rotatori amb la part cònica i les forces que actuen en la centrífuga RINA sèrie 600 SC

Igual que per la centrífuga 500F500 el material que es demanarà per a la centrífuga és acer inoxidable AISI 316L.

El cabal volumètric d'entrada de la centrífuga és de 3,6m³/h, de manera que s'escull una centrífuga que treballi a aquest cabal, o en defecte com és el cas, a un cabal major, fent que sigui permeti igualment dur a terme la separació, i que sigui útil en un futur si es desitja augmentar la producció.

Les especificacions de la centrífuga RINA sèrie 600 SC es troben remarcades a la figura 11.6.3.5.

Modelo	Throughput m3/h	E-Motor Main kW	Carga nominal Diff. kW	Factor centrifugo g	Peso en vacío Kg	Velocidad rpm	Dimensiones (anch/long/alt) mm
600DSC50	0,5-1	2,2	0,75	2000	600	4540	900x1450x540
600DSC100	1-2	3,7	1,50	2000	750	3600	1070x1700x650
600DSC180	6-8	15	2,20	2000	1900	2800	1400x3410x860
600DSC200	8-11	15	3,70	2000	2000	2412	1560x2980x700
600DSC300	12-16	30	3,70	2000	3300	1900	1640x3310x1000
600DSC350	18-22	55	11,00	2000	7100	1500	2130x4450x1260
600DSC380	22-25	75	15,00	2000	9900	1200	2230x5140x1340
600DSC400	25-35	90	22,00	2000	12000	1100	2250x5140x1340

Figura 11.6.3.5. Especificacions tècniques de la centrífuga 600DSC180

11.11.4. Assecatge

L'assecatge consisteix en separar petites quantitats d'un líquid d'un material sòlid, amb la finalitat de reduir el contingut del líquid residual al mínim possible.

11.11.4.1. Balanç de matèria

La finalitat en el procés és eliminar els 277,7 kg/h de líquid (toluè) que conté el corrent de carbaril (75% sòlid) de la sortida de la centrífuga. Així doncs, s'obtingria un corrent a la sortida d'aquest equip de 1934,03 kg/h de carbaril sòlid amb traces del naftol que es troba dissolt a l'entrada en el 25% de líquid (8,17kg/h de naftol).

El contingut de naftol en el corrent sòlid s'accepta ja que és un 0,42% del corrent, essent el màxim acceptat segons l'article *Aspects of pesticidal uses of carbaryl on Man and the environment* de l'EPA (Environmental Protection Agency de US).

L'objectiu mencionat del balanç de matèria es troba detallat a la taula 11.6.4.1.

Taula 11.6.4.1. Cabals d'entrada i sortida de l'assecador ST-301 amb les respectives fraccions molars i màssiques.

ENTRADA ASSECADOR ST-301				
CORRENT PART SÒLIDA				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Carbaril	9,48	1907,73	100,00	100,00
Cabals totals	9,48	1907,73	100,00	100,00
CORRENT PART LÍQUIDA				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,06	8,17	1,79	2,69
Toluè	3,01	277,67	95,36	91,35
Carbaril	0,09	18,12	2,85	5,96
Cabals totals	3,16	303,96	100,00	100,00
SORTIDA ASSECADOR ST-301				
CORRENT PART SÒLIDA				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Carbaril	9,57	1925,86	99,41	99,58
1-Naftol	0,06	8,17	0,59	0,42
Cabals totals	9,63	1934,02	100,00	100,00
CORRENT PART LÍQUIDA				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Toluè	3,01	277,67	100,00	100,00
Cabals totals	3,01	277,67	100,00	100,00

11.11.4.2. Balanç d'energia

El gas a utilitzar per a dur a terme l'assecatge del carbaril és nitrogen gas, calent. Els requeriments reals d'aquest es determinaran en planta pilot o un cop es tingui l'assecador dissenyat per Wyssmont. **El tanc de nitrogen calent s'encarregarà a l'empresa Linde o Air Liquide.**

No obstant, es realitza un càlcul aproximat d'aquest corrent per mitjà del balanç d'energia, en el qual es troba els paràmetres necessaris per al seu càlcul juntament amb el cabal calculat de nitrogen, a la taula 11.6.4.2.

Taula 11.6.4.2. Resum de les dades necessàries pel balanç d'energia de l'assecador ST-301

PARÀMETRES NECESSARIS PEL BE DE ST-301	
Cabal toluè a evaporar- m_T (kg/h)	277,67
Calor de vaporització - λ (kJ/kg)	365
Temperatura entrada (°C)	68,5
Temperatura sortida (°C)	110,6
Variació de temperatura - ΔT_T (°C)	42,1
Calor específic toluè - C_{p_T} (kJ/kg°C)	1,899
Calor necessari- Q (kJ/h)	123549,0
Calor necessari - Q (kW)	34,32
Calor específic nitrogen - C_{p_N} (kJ/kg°C)	1,047
Temperatura entrada nitrogen (°C)	120,0
Temperatura sortida nitrogen (°C)	112,0
Variació de temperatura - ΔT_N (°C)	8,0
Cabal de nitrogen - m_N (kg/h)	14743,83

Les equacions necessàries per a l'obtenció de la taula 11.6.4.2 són les [Eq. 11.6.4.1] i [Eq. 11.6.4.2].

$$Q = m_T \cdot (\lambda + C_{p_T} \cdot \Delta T_T) \quad [Eq. 11.6.4.1]$$

$$m_N = \frac{Q}{C_{p_N} \cdot \Delta T_N} \quad [Eq. 11.6.4.2]$$

11.11.4.3. Definició de l'assecador

L'assecador escollit prové de l'empresa Wyssmont, i correspon a un Turbo-Dryer® amb recuperació de solvent. Aquests assecadors es caracteritzen per a l'obtenció de productes molt secs de forma uniforme gràcies a l'operació de flux pistó que redistribueix el material de forma intermitent. Tenen una temperatura interior o per zones uniforme del producte, i el control

d'aquesta és una de les més precises que existeix. És capaç de donar la humitat residual més baixa respecte qualsevol assecador.

Wyssmont en el camp d'assecatge amb recuperació de dissolvent presenta unes avantatges respecte altres marques i equips, i es que són equips segurs, econòmics i continus, quasi sense requeriment d'atenció de l'operador. El seu disseny els permet treballar a pressió atmosfèrica amb un gas inert com a medi d'assecatge en un sistema tancat.

Aquest Turbo-Dryer® consisteix en una pila de safates circulars que giren lentament. La mescla s'alimenta per la safata superior i després d'una revolució es recull cap a la següent safata inferior, on es mescla i s'anivella. Posteriorment, després d'una altre revolució passa cap a la següent safata inferior on es repeteix la mateixa operació. Les safates estan contingudes en un recinte en el qual l'aire calent o gas, en el nostre cas nitrogen, es fa circular per ventiladors interns.

La figura 11.6.4.1. mostra com és l'assecador Turbo-Dryer® Wyssmont amb recuperació de solvent.

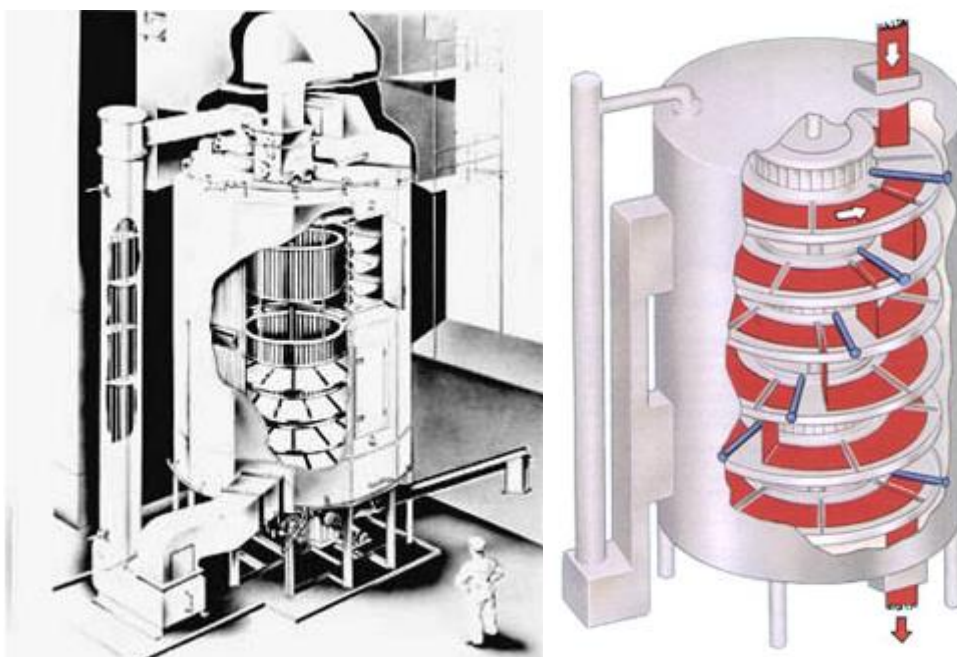


Figura 11.6.4.1. Assecador Turbo-Dryer® Wyssmont amb recuperació de solvent

Per a entendre el procediment explicat es mostra dos imatges més, una de la columna sencera amb els corrents de dins l'assecador i l'altre centralitzat en un plat, safata. Aquestes imatges corresponen a la figura 11.6.4.2.

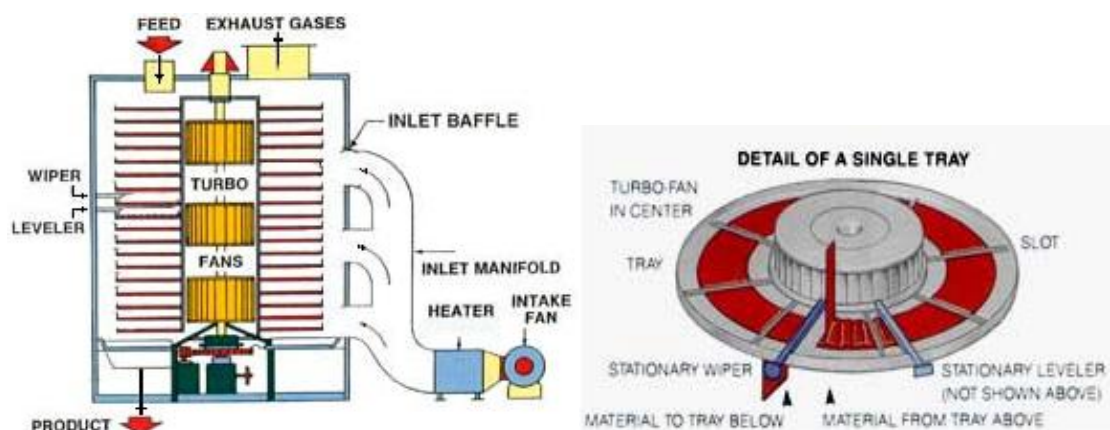


Figura 11.6.4.2. Perfils de l'assecador escollida

El tipus d'assecador escollit té incorporat una canonada que condensa el dissolvent, toluè, juntament amb un equip de recollida del dissolvent, en el qual s'emmagatzema aquest un cop convertit en líquid, sense impedir la circulació tancada del nitrogen calent. La temperatura del nitrogen d'entrada a l'assecador s'aconsegueix per mitjà del precalificador que porta també incorporat el conjunt de Wyssmont tal i com mostra la figura 11.6.4.3.



Figura 11.6.4.3. Conjunt Turbo dryer® amb recuperació de solvent de Wyssmont

Es sap que l'empresa Wyssmont ven els assecadors en funció dels requeriments del client, així doncs, se li comunicaria el cabal i les condicions d'operació juntament amb els paràmetres que necessitessin saber per al disseny d'aquesta.

11.11.5. Processador Holo-Flite®

S'ha decidit comprar el processador tèrmic Holo-Flite® de Metso el qual és un intercanviador de calor indirecte que serveix per escalfar, refredar o assecat sòlids a granel, pa de filtració, pastes o sediments. En aquest procés s'utilitza per a refredar el sòlid.

La figura 11.6.5.1. mostra com és el cargol del processador Holo-Flite® i les parts que té amb les respectives definicions.

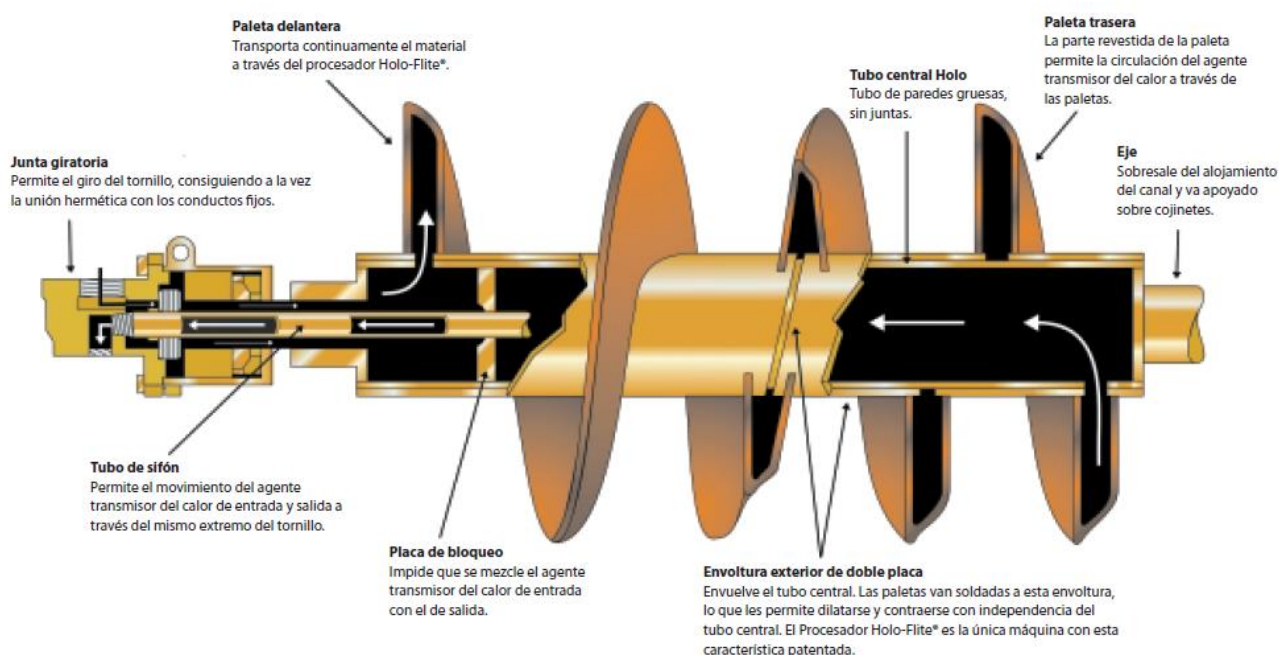


Figura 11.6.5.1. Especificacions de l'estructura cargol del processador Holo-Flite® de Metso

En aquest processador cada partícula es refreda al entrar en contacte amb la superfície dels àleps buits, el eix i el canal. El producte processat es desplaça contínuament en direcció axial per mitjà dels àleps del cargol giratori al llarg d'un canal de doble paret.

Aquest processador és un bescanviador de calor indirecte en el que el calor es transmet per conducció des d'un medi transmissor de calor fins el material processat. El medi transmissor de calor acostuma a ser aigua, vapor o oli tèrmic. El material processat no entra en contacte amb el medi transmissor del calor, de manera que no es produeix contaminació del producte.

La velocitat de cargol és de cinc revolucions per minut o menor, fent que un mecanisme de transmissió de baixa potència sigui suficient, de manera que no hi ha quasi desgast del cargol ni

del canal. Aquestes velocitats tan baixes produeixen una mescla suau del producte, reduint al mínim la degradació de les partícules i l'agitació de les partícules fines productores de pols.

Totes les unitats Holo-Flite® són dissenyades i fabricades amb ajust del Codi ASME, secció VIII.

La figura 11.6.5.2 mostra la imatge de l'estructura del processador per a entendre la figura 11.6.5.3 de les especificacions tècniques dels diferents processadors Holo-Flite® que té l'empresa Metso.

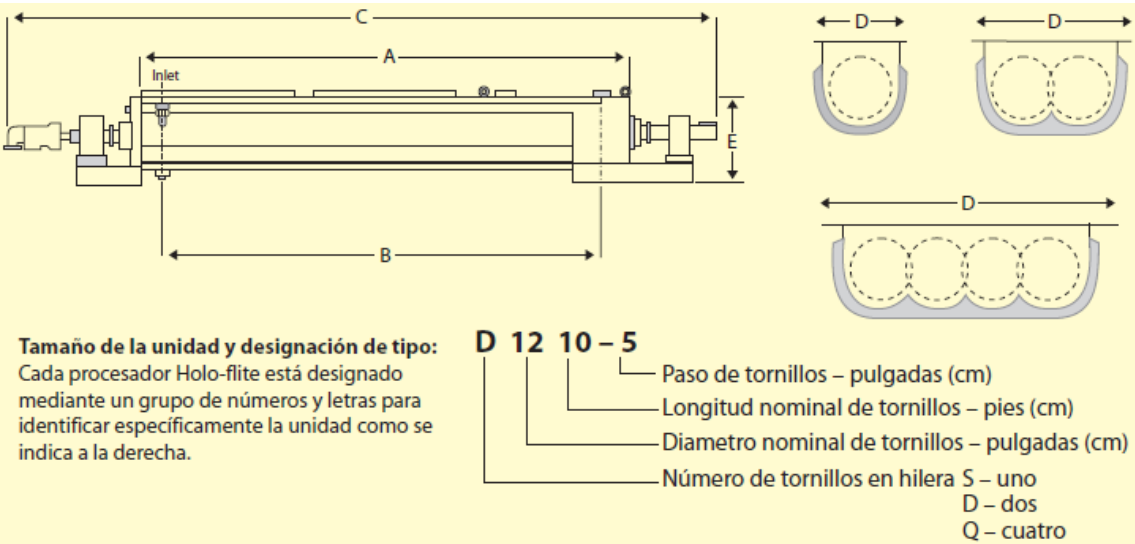


Figura 11.6.5.2. Representació de la localització de les especificacions tècniques del processador Holo-Flite®

Tamaño de unidad	A Longitud nominal	B C/L entrada a salida	C Longitud total	D Ancho total	E Altura total	Sup. del tornillo (ft)	Diám. del tornillo
D404-2	4' (1219)	3' - 7" (1099)	7' - 9" (2362)	2' - 3" (686)	2' - 6" (762)	10	4" (102)
S710-4	10' (3048)	9' - 2 1/16" (2799)	13' - 7" (4140)	1' - 0" (305)	1' - 1 3/16" (335)	21	7 3/8" (187)
S714-4	14' (4267)	13' - 2 3/16" (4018)	17' - 7" (5359)	1' - 0" (305)	1' - 1 3/16" (335)	30	
D710-4	10' (3048)	9' - 2 3/16" (2799)	13' - 8" (4178)	1' - 6" (457)	1' - 1 3/16" (335)	42	
D714-4	14' (4267)	13' - 2 3/16" (4018)	17' - 8" (5398)	1' - 6" (457)	1' - 1 3/16" (335)	60	
S1210-5	10' (3048)	8' - 6 13/16" (2611)	14' - 8" (4470)	1' - 6" (457)	1' - 10" (565)	39	12" (318)
S1218-5	18' (5486)	16' - 6 13/16" (5050)	22' - 8" (6909)	1' - 6" (457)	1' - 10" (565)	74	
D1210-5	10' (3048)	8' - 6 13/16" (2611)	15' - 8" (4775)	2' - 4" (711)	1' - 10" (565)	78	
D1218-5	18' (5486)	16' - 6 13/16" (5050)	23' - 8" (7214)	2' - 4" (711)	1' - 10" (565)	148	
S1616-6	16' (4877)	14' - 6 9/16" (4434)	21' - 4 3/16" (6507)	1' - 10" (559)	2' - 1" (641)	91	16" (406)
S1618-6	18' (5486)	16' - 6 9/16" (5043)	23' - 4 3/16" (7117)	1' - 10" (559)	2' - 1" (641)	106	
D1616-6	16' (4877)	14' - 6 9/16" (4434)	22' - 10 3/16" (6974)	2' - 11" (889)	2' - 1" (641)	183	
D1618-6	18' (5486)	16' - 6 9/16" (5043)	24' - 10 3/16" (7583)	2' - 11" (889)	2' - 1" (641)	207	
S2414-6	14' (4267)	12' - 6 9/16" (3824)	20' - 2 3/16" (6161)	2' - 6" (762)	2' - 10 11/16" (881)	173	24" (610)
S2424-6	24' (7315)	22' - 6 9/16" (6872)	30' - 2 3/16" (9209)	2' - 6" (762)	2' - 10 11/16" (881)	307	
D2414-6	14' (4267)	12' - 6 9/16" (3824)	21' - 6 9/16" (6567)	4' - 0" (1219)	2' - 10 11/16" (881)	346	
D2424-6	24' (7315)	22' - 6 9/16" (6872)	31' - 6 9/16" (9615)	4' - 0" (1219)	2' - 10 11/16" (881)	614	
Q2416-6	16' (4877)	14' - 6 9/16" (4434)	23' - 6 9/16" (7177)	7' - 1" (2159)	2' - 10 11/16" (881)	800	30" (762)
Q2424-6	24' (7315)	22' - 6 9/16" (6872)	31' - 6 9/16" (9615)	7' - 1" (2159)	2' - 10 11/16" (881)	1227	
S3020-7	20' (6096)	18' - 4" (5601)	27' - 2 1/4" (8288)	3' - 2" (965)	3' - 7" (1092)	292	
S3028-7	28' (8534)	26' - 4" (8039)	35' - 2 1/4" (10727)	3' - 2" (965)	3' - 7" (1092)	416	
D3020-7	20' (6096)	18' - 4" (5601)	28' - 5 3/16" (8675)	5' - 3" (1600)	3' - 7" (1092)	585	30" (762)
D3028-7	28' (8534)	26' - 4" (8039)	36' - 5 3/16" (11114)	5' - 3" (1600)	3' - 7" (1092)	831	
Q3020-7	20' (6096)	18' - 4" (5601)	28' - 5 3/16" (8675)	8' - 11" (2718)	3' - 7" (1092)	1169	
Q3028-7	28' (8534)	26' - 4" (8039)	36' - 5 3/16" (11114)	8' - 11" (2718)	3' - 7" (1092)	1663	

Figura 11.6.5.3. Especificacions tècniques dels models de processador Holo-Flite® de Metso

Per a escollir quin model es decideix comprar, es calcula el volum que pot comprendre el processador per mitjà de l'equació [Eq. 11.6.5.1].

$$V_{total\ processador} = L_{nominal}(A) \cdot Ancho_{total}(D) \cdot H_{total}(E) \quad [Eq. 11.6.5.1]$$

Els resultats obtinguts pels models remarcats són 1,59 i 2,72m³ respectivament. El cabal volumètric a tractar correspon a 1,94m³/h de manera que el primer no té suficient capacitat per tractar-lo, i el segon, malgrat sigui superior, no s'accepta degut al volum desconegut del cargol, el qual faria que el volum real pel que ha de circular el sòlid fos menor. Així doncs, es decideix comprar el model S-3020-7, remarcant en blau a la figura 11.6.5.3, el qual té un volum de 5,10m³.

El fluid refrigerant per l'interior del cargol correspon a salmorra. No obstant, s'hauria de fer proves a planta pilot per veure quin cabal es requeriria ja que el comportament dels sòlids és més difícil de determinar. Un cop es realitzés, es passés a escala industrial i es sabés quina quantitat es requereix d'aquest es dissenyaria el tanc d'emmagatzematge de salmorra.

11.11.6. Dipòsits amb refredament A/C Chiller

Un A/C chiller, Air-Cooled chiller, és un grup de fred el qual consisteix en un condensador, evaporador, compressor i vàlvula d'expansió. Aquest grup es ven com un sol equip amb unes especificacions determinades, el qual refreda un corrent que és l'utilitzat en els dipòsits de procés DR-301 i DR-302 per a refredar-los.

El dipòsit DR-302 està en sèrie amb el DR-301 i té una recirculació cap aquest. Per a assegurar la precipitació total del carbaril que queda dissolt en el corrent líquid s'ha marcat una recirculació del 75%, suposant que amb aquesta precipita per igual en els dos dipòsits.

11.11.6.1. Condicions d'operació

Les condicions d'operació en ambdós dipòsits pulmó refredats per mitjà del A/C chiller es troben compreses a la taula 11.6.6.1.

Taula 11.6.6.1. Condicions d'operació dels dipòsits DR-301 i DR-302

CONDICIONS D'OPERACIÓ DR-301		
Calor de cristal·lització - λ_{crist} (kJ/kmol)		-24244,00
Pressió d'operació (atm)		1,34
PARÀMETRE	ENTRADA	SORTIDA
Temperatura sortida 3r cristal·litzador (°C)	64	25
Temperatura recirculació (°C)	17	25
Cabal màssic total (kg/h)	12663,0	12663,0
Calor específic mescla - C_p (kg/kmol·°C)	151,90	151,90
CONDICIONS D'OPERACIÓ DR-302		
Calor de cristal·lització - λ_{crist} (kJ/kmol)		-24244,00
Pressió d'operació (atm)		1,07
PARÀMETRE	ENTRADA	SORTIDA
Temperatura sortida DR-301	25	17
Cabal màssic total (kg/h)	12663,0	12663,0
Calor específic mescla - C_p (kg/kmol·°C)	151,90	151,90

11.11.6.2. Balanç de matèria

S'ha realitzat dos tipus de balanç de matèria, un necessari per a la realització del balanç de matèria global del procés de purificació, en el qual s'especifica quina part del corrent d'entrada i sortida dels dipòsits refredats és líquid i sòlid; i l'altre necessari per a la determinació de la potència

calorífica necessària, la qual s'utilitza per a escollir quin equip i model de A/C chiller es necessita per a aconseguir les condicions d'operació de temperatura dels dipòsits de refredament.

La taula 11.6.6.2. correspon al primer balanç mencionat, en el qual es considera els dos dipòsits pulmó com a un únic bloc, fent entrada i sortida sense tenir en compte la recirculació.

Taula 11.6.6.2. Cabals d'entrada i sortida dels dipòsits refredats com a un bloc sol amb els respectius percentatges molars i màssics.

ENTRADA DIPÒSITS REFREDATS				
CORRENT PART SÒLIDA				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Carbaril	0,50	100,32	100,00	100,00
CORRENT PART LÍQUIDA				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,88	126,89	2,78	4,14
Toluè	29,93	2757,33	94,38	89,95
Carbaril	0,90	181,20	2,84	5,91
Cabals totals	31,71	3065,42	100,00	100,00
CORRENT GLOBAL				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,88	126,89	2,73	4,01
Toluè	29,93	2757,33	92,92	87,10
Carbaril	1,40	281,52	4,34	8,89
Cabals totals	32,20	3165,74	100,00	100,00
SORTIDA DIPÒSITS REFREDATS				
CORRENT PART SÒLIDA				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Carbaril	1,40	281,52	100,00	100,00
CORRENT PART LÍQUIDA				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,88	126,89	2,86	4,40
Toluè	29,93	2757,33	97,14	95,60
Carbaril	0,00	0,00	0,00	0,00
Cabals totals	30,81	2884,22	100,00	100,00
CORRENT GLOBAL				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,88	126,89	2,73	4,01
Toluè	29,93	2757,33	92,92	87,10
Carbaril	1,40	281,52	4,34	8,89
Cabals totals	32,20	3165,74	100,00	100,00

El corrent d'entrada correspon al de sortida líquida (amb sòlid cristal·litzat) del cristal·litzador CR-303 i el de sortida és el corresponent a l'entrada de la centrífuga CT-302 ja explicada. Aquestes dades són necessàries per a la realització del balanç global de matèria del procés de purificació, tal i com ja s'ha mencionat.

La taula 11.6.6.3. correspon al balanç de matèria dels corrents d'entrada i sortida dels dos dipòsits pulmó amb refrigeració chiller considerant la recirculació (75% respecte la sortida del dipòsit pulmó DR-302). En aquesta també s'especifica el corrent sòlid i líquid de cada corrent, considerant que precipita un 50% a cada dipòsit del carbaril que queda dissolt a la mescla.

Taula 11.6.6.3. Cabals d'entrada, sortida i recirculació dels dipòsits pulmó amb refredament chiller amb els respectius percentatges massics i molars.

ENTRADA DIPÒSIT REFREDAT DR-301				
CORRENT DEL TERCER CRISTAL·LITZADOR				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	0,88	126,89	2,73	4,01
Toluè	29,93	2757,33	92,92	87,10
Carbaril	1,40	281,52	4,34	8,89
Cabals totals	32,20	3165,74	100,00	100,00
CORRENT RECIRCULADA				
CORRENT PART SÒLIDA				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Carbaril	4,20	844,56	100,00	100,00
CORRENT PART LÍQUIDA				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	2,64	380,66	2,86	4,40
Toluè	89,78	8271,99	97,14	95,60
Carbaril	0,00	0,00	0,00	0,00
Cabals totals	92,42	8652,66	100,00	100,00
CORRENT GLOBAL				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	2,64	380,66	2,73	4,01
Toluè	89,78	8271,99	92,92	87,10
Carbaril	4,20	844,56	4,34	8,89
Cabals totals	96,61	9497,22	100,00	100,00
SORTIDA DIPÒSIT REFREDAT DR-301 = ENTRADA DIPÒSIT DR-302				
CORRENT PART SÒLIDA				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Carbaril	5,15	1035,49	100,00	100,00
CORRENT PART LÍQUIDA				

Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	3,52	507,55	2,85	4,37
Toluè	119,70	11029,33	96,79	94,86
Carbaril	0,45	90,60	0,36	0,78
Cabals totals	123,67	11627,48	100,00	100,00
CORRENT GLOBAL				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	3,52	507,55	2,73	4,01
Toluè	119,70	11029,33	92,92	87,10
Carbaril	5,60	1126,09	4,34	8,89
Cabals totals	128,82	12662,96	100,00	100,00
SORTIDA DIPÒSIT REFREDAT DR-302				
CORRENT PART SÒLIDA				
Cabals de sortida	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
Carbaril	5,60	1126,09	100,00	100,00
CORRENT PART LÍQUIDA				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	3,52	507,55	2,86	4,40
Toluè	119,70	11029,33	97,14	95,60
Carbaril	0,00	0,00	0,00	0,00
Cabals totals	123,22	11536,88	100,00	100,00
CORRENT GLOBAL				
Cabals d'entrada	kmol/h	kg/h	% molar	% en pes
1-Naftol	3,52	507,55	2,73	4,01
Toluè	119,70	11029,33	92,92	87,10
Carbaril	5,60	1126,09	4,34	8,89
Cabals totals ENTRADA	128,82	12662,96	100,00	100,00

En el corrent del tercer cristal·litzador de l'entrada al DR-301 no s'especifica la part sòlida i la líquida ja que estan expressades en la taula 11.6.6.2. mostrada anteriorment. El corrent de sortida que no és recirculat al dipòsit DR-301 tampoc s'expressa pel mateix motiu ja que seria una repetició de la informació donada.

Per a la realització dels càlculs de la taula 11.6.6.2. s'ha utilitzat la equació [Eq.11.6.6.1] en la qual només es té en compte el carbaril que precipita en el sistema global dels dipòsits de refredament, ja que tant el toluè com el naftol segueixen estant en la seva forma líquida.

$$\text{Balanç carbaril sòlid: } S_{\text{sort}} = S_{\text{ent}} + S_{\text{dissolt}} \quad [\text{Eq. 11.6.6.1}]$$

Realitzant aquest balanç s'obté:

$$0,499 + 0,900 = 1,399 \text{ kmol/h carbaril sòlid a la sortida dels dipòsits}$$

En la realització del balanç detallat per a cada dipòsit, ha estat necessari el valor del carbaril dissolt que queda a l'entrada (0,900 kmol/h) ja que és el que es fa precipitar, concretament un 50% d'aquest a cada un. Aquest valor s'ha suposat per a poder dissenyar els tancs i determinar la potència calorífica la qual marca el chiller a escollir i comprar. Sabent que el toluè i el naftol no canvien de fase tal i com ja s'ha comentat, les equacions mostrades i utilitzades per a l'obtenció de la taula 11.6.6.2. ([Eq. 11.6.6.2] fins [Eq. 11.6.6.5]) són per al carbaril en la fase sòlida.

$$DP - 304: \quad S_{ent(304)} = S_{sort,3r\ crist} + S_{recirc.} \quad [Eq. 11.6.6.2]$$

$$DP - 304 \text{ i } DP - 305: \quad S_{sort(304) i ent(305)} = S_{ent} + 0,5 \cdot S_{dissolt} \quad [Eq. 11.6.6.3]$$

$$DP - 305: \quad S_{sort(305)} = S_{ent(305)} + 0,5 \cdot S_{dissolt} \quad [Eq. 11.6.6.4]$$

$$S_{recirc.} = 0,75 \cdot S_{sort(305)} \quad [Eq. 11.6.6.5]$$

Amb aquestes equacions s'obté un cabal a la sortida del dipòsit DR-302 el qual tot el carbaril és sòlid, ajudant amb la recirculació a precipitar el que es troba dissolt de l'entrada del tercer cristal·litzador i obtenint una sortida del sistema de carbaril sòlid en el corrent líquid, afavorint a la centrífuga en la separació d'aquest.

11.11.6.3. Balanç d'energia

El balanç d'energia consisteix en el càlcul de la potència frigorífica necessària a aportar als dipòsits refredats per mitjà d'un equip A/C chiller. La taula 11.6.6.4 mostra la calor que es necessita bescanviar a cada corrent per estar a les condicions d'operació especificades i per als dos dipòsits refredats. També inclou quina és la potència frigorífica total requerida.

Taula 11.6.6.4. Balanç d'energia dels dos dipòsits refredats per mitjà d'un chiller

BALANÇ D'ENERGIA AL DIPÒSIT REFREDAT DR-301				
Cabals d'entrada	kmol/h	Q _{indiv} (kW)	Q _{precip} (kW)	Q _{calorífica} (kW)
Sortida 3r cristal·litzador	32,20	-52,99		
Recirculació	96,61	32,61		
Cabal total	128,82	-20,38	-3,03	-23,41
BALANÇ D'ENERGIA AL DIPÒSIT REFREDAT DR-302				
Cabals d'entrada	kmol/h	Q _{indiv} (kW)	Q _{precip} (kW)	Q _{calorífica} (kW)
Sortida de DP-304	128,82	-43,48	-3,03	-46,52
POTÈNCIA FRIGORÍFICA TOTAL REQUERIDA EN AMBDOÓS DIPÒSITS (kW)				
69,93				

Per a l'obtenció dels valors d'energia individuals (Q_{indiv} de la taula 11.6.5.3) s'ha utilitzat l'equació [Eq. 11.6.6.6].

$$Q_{\text{indiv}} = m \cdot Cp \cdot \Delta T / 3600 \quad [\text{Eq. 11.6.6.6}]$$

On per a la corrent “sortida 3r cristal·litzador” s'ha utilitzat un ΔT de -39°C ($25-64^{\circ}\text{C}$) i en el de recirculació un ΔT de 8°C ($25-17^{\circ}\text{C}$). Els valors de “m” (kmol/h) són els cabals mostrats a la primera columna i la Cp (kJ/kmol·°C) es troba a l'apartat 11.6.6.1 de condicions d'operació. El valor de Q_{indiv} per al cabal total consisteix en la suma dels dos primers.

Com que es suposa una cristal·lització en cada un dels dipòsits del 50% del carbaril que quedava dissolt en el corrent de sortida del tercer cristal·litzador, cal calcular la calor de cristal·lització Q_{crist} per mitjà de l'equació [Eq. 11.6.6.7].

$$Q_{\text{crist}} = S \cdot \lambda_{\text{crist}} \quad [\text{Eq. 11.6.6.7}]$$

On S és el cabal de sòlid que precipita en el dipòsit, és a dir, $0,5 \cdot 0,9$ kmol/h, en ambdós dipòsits.

Un cop obtingut aquests, es calcula l'energia calorífica global com a suma de Q_{indiv} i Q_{crist} . El valor obtingut en ambdós dipòsits és negatiu, fet que indica la calor a perdre la mescla per a complir amb les condicions d'operació especificades i per a fer precipitar el sòlid restant.

La potència frigorífica correspon a aquesta en sentit positiu. Com que la necessària per a cada dipòsit és baixa, es cerca un chiller que permeti refredar els dos dipòsits, de manera que la potència frigorífica a cercar seria la suma amb un valor de 70kW.

No obstant, pensant en la posada en marxa a la qual no hi haurà la recirculació que permeti disminuir aquesta potència frigorífica, o si més no amb la mateixa eficiència, s'escull un chiller de potència superior, concretament:

$$P_{\text{chiller}} = 52,99 + 3,03 + 46,52 = \mathbf{102,54 \text{ kW}}$$

11.11.6.4. A/C Chiller requerit

El chiller escollit és de l'empresa *Carrier*, concretament un chiller refredat per aire anomenat Aquaforce™ 30XA. El motiu d'utilitzar un chiller refredat per aire és la poca potència requerida aconseguint un estalvi de cost respecte un refredat per aigua. Gràcies a aquest fet, el chiller pot estar situat amb el **condensador a l'exterior**, utilitzant doncs l'aire ambient.

➤ Característiques clau del model Aquaforce™ 30XA

- EER (Rang d'eficiència energètica) fins a 10,7
- IPLV (Valors integrats amb càrrega parcial) de fins a 15,2
- Controls fàcils d'utilitzar
- Baix nivell de so
- Funcionament en condicions ambientals de -20°F (-28,9°C) a 125°F (51,7°C)
- Compresors de cargol d'alta eficiència
- Mòdul per la manipulació d'energia (EMM). Permet minimitzar el consum energètic del refredador (opció instal·lada a fàbrica o accessori per a instal·lació en el camp).
- Control de càrrega mínima (accessori per instal·lació en el camp)
- Arrencador tipus Wye-Delta disponible (opció instal·lada en fàbrica)
- Compleix amb ASHRAE 90.1 (*Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*), normativa dels estats units.

➤ Descripció del model Aquaforce™ 30XA

La unitat inclou **compressors de cargol** d'alta eficiència, refrigerant R-134a HFC (1,1,1,2-tetrafluoroetà), un silenciós sistema de ventilador AeroAcoustic™, controls ComfortLink™ fàcils d'utilitzar i el serpentí del condensador amb tecnologia Microchannel.

El refrigerant utilitzat té cura del medi ambient ja que no danya la capa d'ozó amb el clor que conté. És un refrigerant segur, no tòxic (classificat com a A1 refrigerant per a ASHRAE Standard 34-1992), eficaç i ecològicament racional.

La figura 11.6.6.1 mostra la imatge del Chiller refredat per aire escollit.

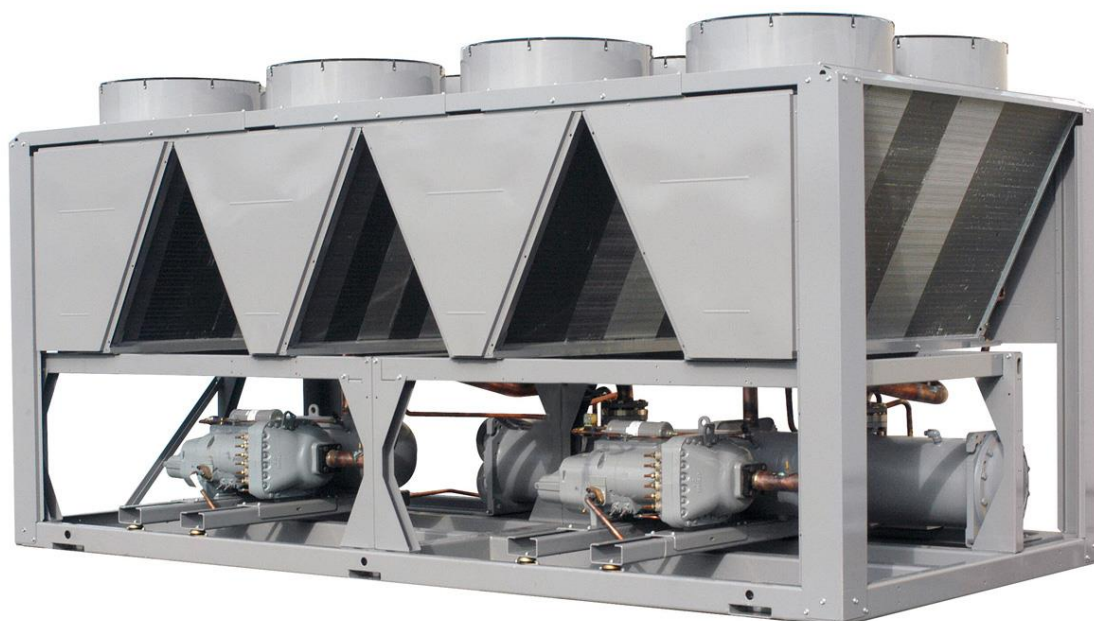


Figura 11.6.6.1. Chiller model Aquaforce™ 30XA de Carrier

La taula 11.6.6.5. mostra el model escollit de Aquaforce™ 30XA en funció de la potència frigorífica necessària, la qual és de 102,54kW tal i com s'ha comentat en l'apartat anterior (11.6.6.3).

Taula 11.6.6.5. Especificacions tècniques del model 100 de Aquaforce™ 30XA de Carrier

UNITS WITH AL/CU CONDENSER COILS

UNIT SIZE	CAPACITY		TOTAL POWER (kW)	FULL LOAD		IPLV		COOLER FLOW RATE		COOLER PRESSURE DROP	
	Tons	kW		EER	COP	EER	COP	GPM	L/s	ft wg	kPa
080	75.6	265.5	91.6	9.9	2.9	14.2	4.2	180.7	11.4	11.6	34.7
090	84.8	297.8	95.1	10.7	3.1	14.5	4.3	202.7	12.8	11.4	33.9
100	93.9	330.1	107.8	10.5	3.1	14.9	4.4	224.7	14.2	13.6	40.8
110	102.4	359.9	118.6	10.4	3.0	15.2	4.4	244.9	15.5	13.8	41.3
120	110.7	389.0	129.5	10.3	3.0	15.1	4.4	264.8	16.7	11.8	35.3
140	132.8	466.7	148.7	10.7	3.1	14.3	4.2	317.7	20.0	13.2	39.5
160	152.3	535.1	173.0	10.6	3.1	14.4	4.2	364.2	23.0	13.0	38.9
180	171.3	601.9	192.1	10.7	3.1	14.2	4.2	409.7	25.8	15.4	46.1
200	194.0	681.7	217.2	10.7	3.1	14.8	4.3	464.0	29.3	13.1	39.3
220	211.7	743.7	239.6	10.6	3.1	14.3	4.2	506.2	31.9	15.4	46.1
240	228.1	801.6	264.1	10.4	3.0	14.8	4.3	545.6	34.4	17.7	52.9
260	250.9	881.7	281.7	10.7	3.1	14.3	4.2	600.2	37.9	10.2	30.5
280	268.5	943.4	301.2	10.7	3.1	14.3	4.2	642.1	40.5	11.5	34.3
300	287.5	1010.2	326.3	10.6	3.1	14.5	4.2	687.6	43.4	13.1	39.0
325	306.6	1077.4	347.1	10.6	3.1	14.3	4.2	733.4	46.3	13.4	40.1
350	324.1	1138.7	374.8	10.4	3.0	14.2	4.2	775.1	48.9	14.8	44.4
400	383.6	1348.0	449.4	10.2	3.0	14.8	4.3	917.6	57.9	10.4	31.0
450	426.8	1499.5	509.3	10.1	2.9	14.1	4.1	1020.8	64.4	10.0	29.9
500	458.0	1609.4	549.2	10.0	2.9	14.3	4.2	1095.5	69.1	12.0	36.0

Aquest chiller compleix amb la norma ARI 550/590 de condicions de velocitat estàndard, on les temperatures d'entrada i sortida del fluid utilitzat per a refredar els tancs refrigerats són 6,7 i 12,2 °C respectivament. La temperatura d'entrada de l'aire en el sistema A/C chiller és de 35°C.

11.11.7. Evaporació toluè

Amb el corrent líquid que s'obté de la segona centrífuga es realitza un conjunt en sèrie de dos kettle reboilers amb el corresponents condensadors en els quals es duu a terme una evaporació del toluè amb l'objectiu de recuperar-lo i poder reutilitzar-lo. Les condicions d'operació d'ambdós són a 0,197 atmosferes, amb una temperatura de 65°C el primer conjunt i 75°C el segon. Posteriorment, aquests corrents, juntament amb els de la sortida dels condensadors dels cristal·litzadors, corrents de toluè pur, es refreden fins a una temperatura de 25°C i es porten al tanc d'emmagatzematge de toluè. Ambdós conjunt d'equips (kettle reboiler i condensador) estan especificats i mostrats al apartat 11.7 de bescanviadors de calor.

11.12. Bescanviadors de calor

11.12.1. Introducció teòrica

Els bescanviadors són unitats molt importants i àmpliament utilitzats en processos industrials permeten transferir calor entre dos medis. Al llarg de tota la planta química es requereix de 35 bescanviadors de calor, dels quals 14 són condensadors, 10 kettle reboilers, i 11 bescanviadors de carcassa i tubs. El major nombre de condensadors i kettle reboilers són de les columnes de destil·lació del procés.

A continuació es fa una breu descripció de cada un d'aquests.

- Bescanviador de calor de carcassa i tubs. És el tipus de bescanviador de calor més comú en refineries de petroli i altres processos químics, essent idoni per aplicacions a grans pressions i temperatures. Aquests bescanviadors consten d'una carcassa la qual és un gran recipient a pressió amb un feix de tubs al seu interior. Un fluid passa a través dels tubs i un altre per fora d'aquests (a través de la carcassa) per transmetre el calor entre els dos fluids. El conjunt de tubs es denomina feix tubular i pot estar comprès de varis tubs llisos, aletejats, longitudinals, etc.
Hi ha moltes variacions en els dissenys de carcassa i tubs. Generalment, els extrems de cada un dels tubs estan connectats als capçals a través d'uns forats realitzats en plaques tubulars. Els tubs poden tenir diferents formes, ja siguin rectes (un pas per tub i carcassa) o corbats en forma de U (varis passos per tub).
- Kettle reboiler. És una unitat d'ebullició, és a dir, que es duu a terme un canvi de fase de vaporització en aquest, essent conegut també com a bullidor tipus caldera, o calderí, denominat quan està connectat a una columna de destil·lació. Consisteix en una carcassa

horitzontal la qual conté un feix de tubs relativament petit, amb dos passos per tub, un capçal flotant i una placa tubular. El feix de tubs està submergit en una massa de líquid bullint, el nivell del qual es manté per mitjà de l'altura d'una resclosa. L'alimentació s'introdueix per la part inferior de la carcassa mentre que el vapor surt per la part superior d'aquesta. El líquid no vaporitzat desborda per la resclosa i es retirat pel fons de la carcassa. El fluid de calefacció és el que circula per tubs.

- **Condensadors.** Són els dispositius de transmissió de calor utilitzats per liquar vapors eliminant la seva calor latent de condensació. El calor latent es retira absorbint-se per un líquid més fred, el refrigerant. Es poden considerar com a escalfadors ja que la temperatura del fluid refrigerant augmenta; no obstant, funcionalment no és l'acció més important de l'equip. Els condensadors es divideixen en dues classes. Una corresponent als condensadors de contacte, en les quals les corrents de vapor i refrigerant, normalment aigua, es barregen físicament i abandonen el condensador formant una sola corrent; i els condensadors de carcassa i tubs (corresponents als utilitzats en tota la planta), on el vapor condensat i el refrigerant estan separats per una superfície tubular de transmissió de calor. En aquests el fluid a condensar circula per carcassa, mentre que el fluid refrigerant circula per tubs. Pot haver varis passos per tub amb l'objectiu d'obtenir velocitats més grans, coeficients de transmissió de calor majors i tubs més curts.

11.12.2. Agrupació dels bescanviadors de calor

Es mostra la taula 11.7.1.1. com a resum dels bescanviadors de calor de la planta, especificant el fluid refrigerant o calefactor utilitzat amb les respectives temperatures.

Taula 11.7.1.1. Resum dels bescanviadors de calor de la planta Magjaril.

ÍTEM	TIPUS	ENTRADA REFRIGERANT	SORTIDA REFRIGERANT
BC-101	Bescanviador carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a -6°C a chiller
BC-201	Kettle reboiler BKU	Dowtherm J a 130°C	Dowtherm J a 90°C a caldera
BC-202	Bescanviador de carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a 270°C	Dowtherm J a 230,09°C a caldera
BC-203	Bescanviador de carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a 270°C	Dowtherm J a 230,09°C a caldera
BC-204	Bescanviador de carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 5°C a chiller
BC-205	Condensador de CD-201, BEM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 20°C a chiller

BC-206	Kettle reboiler de CD-201, BKU	Dowtherm J a 270°C	Dowtherm J a 230°C a caldera
BC-207	Condensador de CD-202, BEM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a -2°C a chiller
BC-208	Kettle reboiler de CD-202, BKU	Dowtherm J a 130°C	Dowtherm J a 110°C a caldera
BC-209	Condensador de CD-203, BEM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 25°C a chiller
BC-210	Condensador de CD-203, BEM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 25°C a chiller
BC-211	Condensador de CD-203, BEM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 25°C a chiller
BC-212	Condensador de CD-203, BEM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 25°C a chiller
BC-213	Kettle reboiler de CD-203, BKU	Dowtherm J a 270°C	Dowtherm J a 230,01°C a caldera
BC-214	Kettle reboiler de CD-203, BKU	Dowtherm J a 270°C	Dowtherm J a 230,01°C a caldera
BC-215	Kettle reboiler de CD-203, BKU	Dowtherm J a 270°C	Dowtherm J a 230,01°C a caldera
BC-216	Bescanviador de carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 25°C a chiller
BC-217	Condensador de la sortida gas de la PIRÒLISIS, BJM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 0°C a chiller
BC-218	Condensador de CD-204, BEM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 25°C a chiller
BC-219	Kettle reboiler de CD-204, BKU	Dowtherm J a 130°C	Dowtherm J a 105,01°C a caldera
BC-220	Bescanviador de carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 0°C a chiller
BC-301	Condensador de CD-301, BEM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 25°C a chiller
BC-302	Kettle reboiler de CD-301, BKU	Dowtherm J a 270°C	Dowtherm J a 230°C a caldera
BC-303	Bescanviador carcassa i tubs de CR-301	No dissenyat	
BC-304	Condensador de CR-301, BJM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 20,01°C a chiller
BC-305	Bescanviador carcassa i tubs de CR-301	No dissenyat	
BC-306	Condensador de CR-302, BJM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 25°C a chiller
BC-307	Bescanviador carcassa i tubs de CR-301	No dissenyat	
BC-308	Condensador de CR-303. BJM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 25°C a chiller
BC-309	Kettle reboiler BKU	Dowtherm J a 130°C	Dowtherm J a 90°C a caldera
BC-310	Condensador BJM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 25°C a chiller
BC-311	Kettle reboiler BKU	Dowtherm J a 130°C	Dowtherm J a 90°C a caldera
BC-312	Condensador BEM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 25°C a chiller

BC-313	Bescanviador de carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a -15°C	Dowtherm J a 25°C a chiller
BC-314	Bescanviador de carcassa i tubs BEM	Dowtherm J a 130°C	Dowtherm J a 122°C a caldera

11.12.3. Programa informàtic i disseny

Tots els bescanviadors de calor han estat dissenyats amb el programa *Aspen Exchanger Design & Rating*, el qual permet obtenir dissenys tèrmics i mecànics precisos de la majoria dels tipus de bescanviadors de calor incloent fase simple, condensació i evaporació, amb el mínim d'hores d'enginyeria invertits i la mínima inversió de capital. És considerat el software més complet i qualificat en el disseny de bescanviadors de calor amb més de 40 anys d'experiència de HTFS i B-JAC integrant eines d'Aspen Plus i Aspen HYSYS.

El programa incorpora totes les aplicacions de *Tubular Exchanger Manufacturing Association* (TEMA) podent-se utilitzar pel disseny de tots els tipus de bescanviadors TEMA. Determina les configuracions òptimes de bescanviadors de calor que satisfan l'exigència de calor especificat, pèrdues de pressió permissibles i velocitats màximes. Optimitza en un número de paràmetres, incloent el diàmetre de carcassa, l'espaiat deflector, la longitud de tubs, el número de passos per tub, el número de tubs per pas i el número de tubs que hi ha en el diàmetre de carcassa arribant a l'àrea de transferència de calor requerida més petita.

Els paràmetres especificats per tal de que el programa realitzi el disseny dels bescanviadors de calor són:

- Determinació de la circulació del fluid de procés i refrigerant o calefactor per carcassa o tubs
- Determinació de les propietats del fluid de procés (pressió, temperatura, cabal i composició)
- Determinació del fluid de procés especificant la pressió i el salt tèrmic d'aquest.
- Determinació del material de construcció (AISI 316L o Hastelloy C)
- Determinació de l'espessor de corrosió (1mm)
- Especificació de quan és un kettle reboiler
- Especificació de la geometria del Pitch (triangular)
- Especificació dels capçals i cos del bescanviador d'acord amb la figuraa 11.7.3.1 i les característiques dels bescanviadors.
- Ajust del diàmetre dels tubs amb el corresponent gruix i la longitud dels tubs
- Ajust del diàmetre de carcassa

- Ajust de l'espaiat entre pantalles deflectores

Els paràmetres que s'han revisat que estiguin dins dels corresponents rangs per tal de comprovar que el disseny sigui correcte són:

- Les velocitats del fluid per tubs i per carcassa:
 - Líquid per tub entre 1 i 2 m/s, màxim 4 m/s
 - Líquid per carcassa entre 0,3 i 1 m/s
 - Vapors al buit entre 50 i 70 m/s
 - Vapors a pressió atmosfèrica entre 10 i 30 m/s
 - Vapors a alta pressió entre 5 i 10 m/s
- Les pèrdues de pressió per tubs:
 - Entre 50 i 70 kN/m².
- Les pèrdues de pressió per carcassa:
 - Líquids amb una viscositat inferior a 1 cP: ΔP menor de 35 kN/m².
 - Líquids amb una viscositat entre 1 i 10 cP: ΔP menor de 50-70 kN/m².
 - Gasos i vapors amb buit elevat: ΔP entre 0,4 i 0,8 kN/m².
 - Gasos i vapors amb buit mitjà: ΔP un 0,1 de la pressió absoluta.
 - Gasos i vapors d'un a dos bars: ΔP un 0,5 de la pressió manomètrica
 - Gasos i vapors amb pressió superior a 10 atm: ΔP un 0,1 de la pressió manomètrica

Tal i com s'ha mencionat, la decisió de quin fluid va per carcassa o per tubs és molt important, de manera que es fa una llista de les prioritats a tenir en compte per a aquesta determinació. No obstant, no sempre es pot complir amb totes les especificacions, de manera que es pren la decisió en funció de quina característica requereix més importància. Aquesta llista consisteix en:

- Fluid a circular per tubs:
 - Major temperatura
 - Major pressió
 - Més corrosiu
 - Més tòxic
 - Més brut
- Fluid a circular per carcassa:
 - Menys pèrdua de pressió

- Més viscos
- Menys cabal
- Fluid a condensar

Es mostra la figura 11.7.3.1 amb el resum de les diferents estructures que hi ha de bescanviadors de calor separant els capçals i el cos d'aquests.

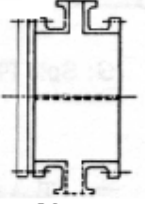
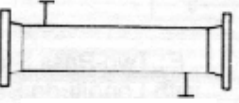
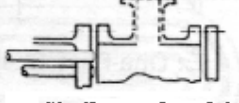
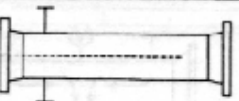
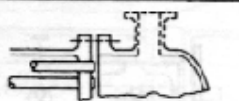
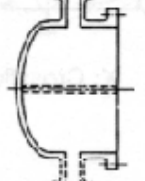
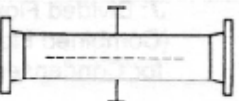
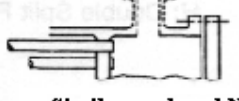
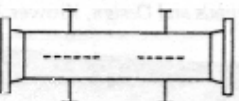
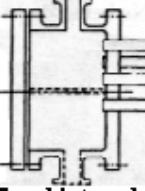
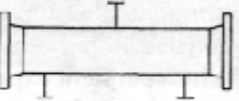
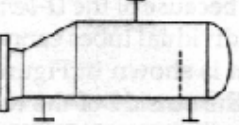
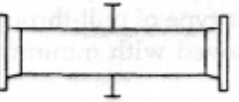
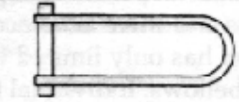
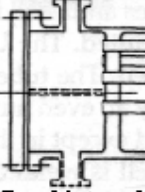
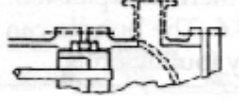
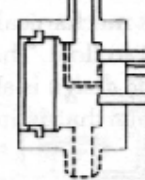
Frente Cabezales estacionarios		Tipo de carcasa		Terminal Tipos de cabezal	
A		E	 Un pase de carcasa	L	 Similar a cabezal A
	Canal y cubierta removible	F	 Dos pases de carcasa con separador horizontal	M	 Similar a cabezal B
B		G	 Flujo dividido	N	 Similar a cabezal N
	Bonete (cubierta integral)	H	 Doble flujo dividido	P	 Cabezal flotante empacado por el exterior
C		J	 Flujo dividido	S	 Cabezal flotante
	Haz de tubo removible	K	 Rehervidor	T	 Cabezal flotante deslizante
	Canal integral Cubierta removible	X	 Flujo cruzado	U	 Haz de tubo en U
N				W	 Sello externo
	Canal integral Cubierta removible				
D					
	Altas presiones				

Figura 11.7.3.1. Resum de les estructures dels bescanviadors de calor

Les especificacions de l'estructura que té cada bescanviador es troben a la taula 11.7.1.1.

L'equació [Eq. 11.7.3.1] mostra el balanç tèrmic que es duu a terme en els bescanviadors de calor.

$$Q = M_S \cdot C_{pS} \cdot (T_1 - T_2) = m_t \cdot C_{pt} \cdot (t_2 - t_1) \quad [Eq. 11.7.3.1]$$

On:

- Q = Calor bescanviat (kW)
- M_S = Cabal màssic del fluid de carcassa (kg/s)
- C_{pS} = Capacitat calorífica del fluid de carcassa (J/kg·°C)
- T_1 i T_2 = Temperatures d'entrada i sortida del fluid de carcassa (°C)
- m_t = Cabal màssic del fluid per tubs (kg/s)
- C_{pt} = Capacitat calorífica del fluid per tubs (J/kg·°C)
- t_1 i t_2 = Temperatures d'entrada i sortida del fluid per tubs (°C)

Cal realitzar el càlcul de l'àrea total de bescanvi el qual es calcula amb l'equació [Eq. 11.7.3.2].

$$A = \frac{Q}{U \cdot (\Delta T_{ml})_c} \quad [Eq. 11.7.3.2]$$

On:

- A = Àrea total de bescanvi (m²)
- U = Coeficient global de transmissió de calor (W/m²·°C)
- $(\Delta T_{ml})_c$ = Increment de temperatura mitjana logarítmica corregida (°C)

La determinació del coeficient global de transmissió de calor (U) depèn dels fluids que circulen per tubs i carcassa, essent d'un valor superior quan millor és la transmissió entre aquests.

L'increment de la temperatura (ΔT_{ml}) depèn de com és la circulació dels fluids. En tots els dissenys aquesta ha estat en contracorrent realitzant doncs l'equació [Eq. 11.7.3.3].

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad [Eq. 11.7.3.3]$$

Per el càlcul de $(\Delta T_{ml})_c$ es realitza l'equació [Eq. 11.7.3.4]

$$(\Delta T_{ml})_c = \Delta T_{ml} \cdot F \quad [Eq. 11.7.3.4]$$

On F és un factor de correcció que s'avalua gràficament i és funció del número de passos per carcassa i per tubs i de les temperatures d'entrada i sortida del bescanviador. El número de passos per tubs pot variar de 1 a 16. Si es té més d'un pas per carcassa, el número de passos per tubs mínim és el valor del número de passos per carcassa multiplicat per dos. La figura 11.7.3.2. mostra la gràfica que s'utilitza per a l'obtenció d'aquest factor de correcció on es calcula dos paràmetres, P [Eq. 11.7.3.5] i R [Eq. 11.7.3.6].

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad [Eq. 11.7.3.5]$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad [Eq. 11.7.3.6]$$

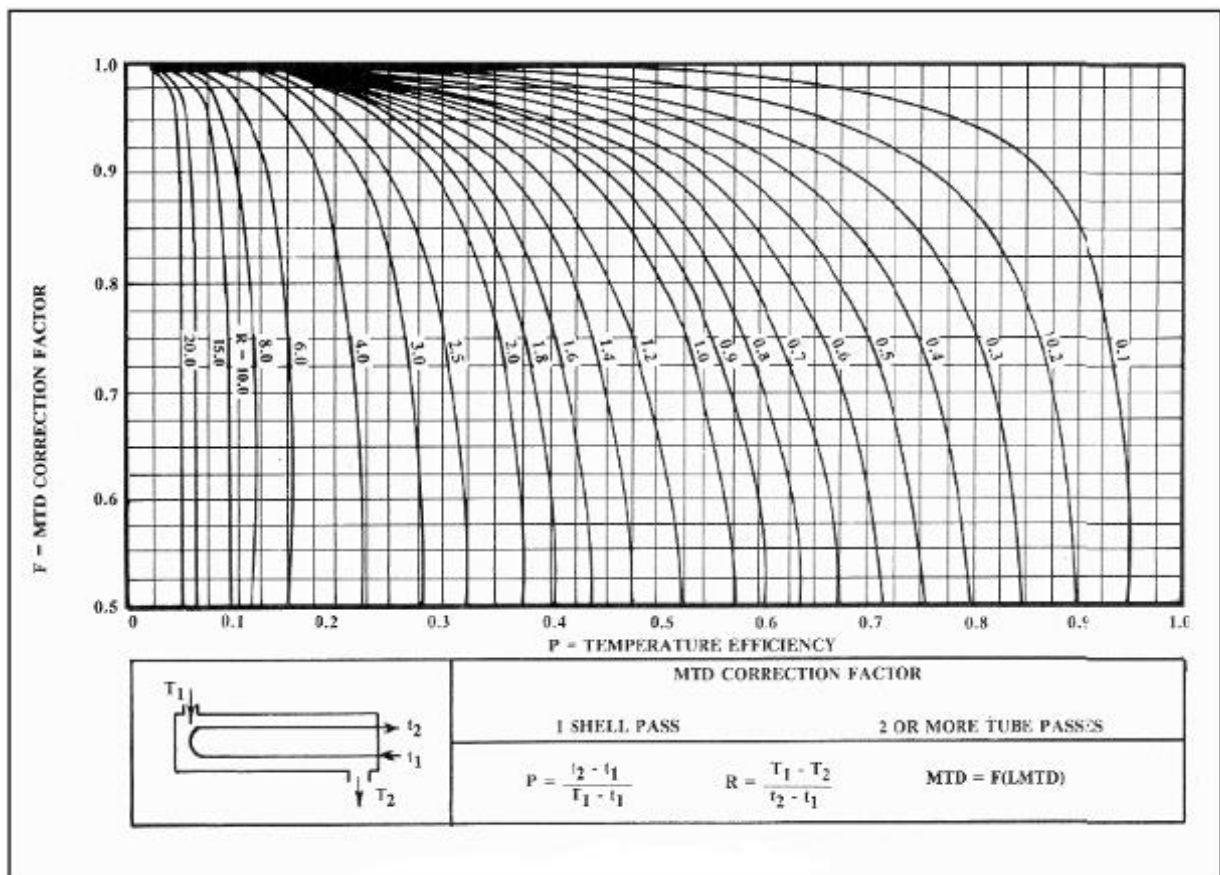


Figura 11.7.3.2. Correcció de l'increment de temperatura (factor F)

Un paràmetre important a determinar és la distribució de tubs, la qual segueix tres esquemes típics: triangular, quadrat i romboïdal tal i com es mostra a la figura 11.7.3.3.

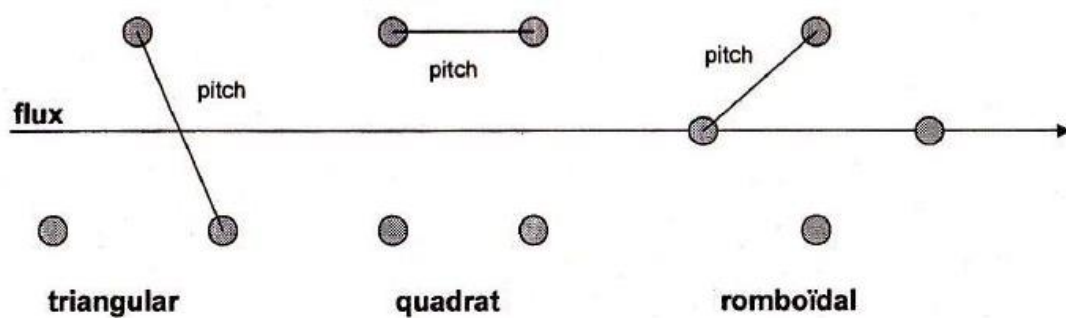


Figura 11.7.3.3. Distribució dels tubs, pitch

Es defineix pitch com la distància entre els centres de dos tubs consecutius. L'escollit, tal i com ja s'ha especificat amb anterioritat és el triangular el qual permet obtenir altes velocitats de transferència de calor. Per a calcular-lo s'utilitza l'equació [Eq. 11.7.3.7].

$$Pitch = 1,25 \cdot D_E \quad [Eq. 11.7.3.7]$$

On el D_E correspon al diàmetre extern de tubs (mm).

El nombre de tubs (N_t) necessari es calcula per mitjà de l'equació [Eq. 11.7.3.9] en la qual és necessari realitzar el càlcul de l'àrea de bescanvi d'un tub (A_t) per mitjà de l'equació [Eq. 11.7.3.8].

$$A_t = \pi \cdot D_E \cdot L \quad [Eq. 11.7.3.8] \quad N_t = \frac{A_{total}}{A_t} \quad [Eq. 11.7.3.9]$$

Paràmetres com el nombre de passos per tub (n_{pt}), l'àrea de pas per un tub ($A_{pas1tub}$), la velocitat de circulació per tubs (v_t), la secció de pas ($A_{pas,t}$), l'àrea transversal de carcassa (A_{ST}), el cabal màssic per unitat d'àrea (G_S) i la velocitat del fluid de carcassa (v_s) són necessaris per al disseny dels bescanviadors i es calculen amb les equacions [Eq. 11.7.3.10], [Eq. 11.7.3.11], [Eq. 11.7.3.12], [Eq. 11.7.3.13], [Eq. 11.7.3.14], [Eq. 11.7.3.15] i [Eq. 11.7.3.16] respectivament.

$$n_{pt} = \frac{N_t}{N_{tp}} \quad [Eq. 11.7.3.10] \quad A_{pas1tub} = \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \quad [Eq. 11.7.3.11]$$

$$v_t = \frac{m_t}{\rho_t \cdot A_{pas1tub} \cdot N_{tp}} \quad [Eq. 11.7.3.12]$$

$$A_{pas,t} = N_t \cdot \frac{A_{pas1tub}}{n_{pt}} \quad [Eq. 11.7.3.13]$$

$$A_{ST} = \frac{I_B \cdot D_S \cdot (pitch - D_E)}{pitch \cdot n_{ps}} \quad [Eq. 11.7.3.14]$$

$$G_S = \frac{M_S}{A_{ST}} \quad [Eq. 11.7.3.15]$$

$$v_S = \frac{M_S}{A_{ST} \cdot \rho_S} \quad [Eq. 11.7.3.15]$$

On:

- N_{tp} = Número de tubs per pas
- $A_{pas1tub}$ = Àrea de pas per un tub (m^2)
- Di = Diàmetre intern d'un tub (m)
- v_t = velocitat de circulació per tubs (m/s)
- ρ_t = Densitat del fluid que circula per tubs (kg/m^3)
- $A_{pas,t}$ = Àrea de pas de tots els tubs d'un mateix pas (m^2)
- A_{ST} = Àrea transversal de carcassa (m^2)
- n_{ps} = Número de passos per carcassa (un sol en tots els bescanviadors)
- D_S = Diàmetre de carcassa (m)
- G_S = Cabal màssic per unitat d'àrea ($kg/m^2 \cdot s$)
- M_S = Cabal màssic que circula per carcassa (kg/s)
- v_S = velocitat de circulació per carcassa (m/s)
- ρ_S = Densitat del fluid que circula per carcassa (kg/m^3)

Per a la determinació del número de pantalles deflectores i la separació entre elles, primerament cal conèixer dos paràmetres que determinen les característiques geomètriques de les pantalles deflectores. Aquests dos són:

- L'altura lliure de la pantalla (baffle cut), el qual és l'espai que queda entre la pantalla i la carcassa per on passarà el fluid del costat de la carcassa. S'expressa com un percentatge que oscil·la entre el 15 i el 45% del diàmetre de carcassa, essent els valors òptims entre el 20 i 25%
- L'espaiat entre pantalles (I_B), el qual oscil·la entre 0,2 i 1 vegades el diàmetre de carcassa, essent el rang òptim entre 0,3 i 0,5 vegades el diàmetre de carcassa.

Posteriorment es pot calcular el número de pantalles deflectores amb l'equació [Eq. 11.7.3.14].

$$n^o \text{ de pantalles deflectores} = \frac{L}{I_B} - 1 \quad [Eq. 11.7.3.14]$$

On L és la longitud dels tubs (m).

11.12.4. Informació bàsica dels bescanviadors de calor de la planta

A continuació es troba detallat els paràmetres bàsics de cada bescanviador, per saber quins corrents contenen, amb les corresponents condicions, i com són tractats, juntament amb dades bàsiques de disseny. Les fulles d'especificació dels bescanviadors presents al capítol 2 mostra tots els paràmetres de disseny i operació d'aquests.

➤ Bescanviador de calor BC-101

Bescanviador de carcassa i tubs per refredar el corrent de la sortida del condensador de la columna CD-204 cap al dipòsit de procés de MIC, D-101. L'objectiu d'aquest és mantenir les condicions de seguretat del dipòsit amb MIC. La temperatura d'entrada del fluid de procés correspon a 38,79°C, amb una sortida de -5°C. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 9°C i un cabal de 2939kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 500mm de longitud i 168,28mm de diàmetre extern, tenint 22 tubs en U amb un diàmetre extern de 16mm.

➤ Bescanviador de calor BC-201

Kettle reboiler que evapora el foscè provinent dels tancs d'emmagatzematge de foscè T-101 i T-102. La temperatura d'entrada i sortida d'aquest equip correspon a 7,56°C. El fluid calefactor és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'una caldera, a una temperatura de 130°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 3514kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 1200mm de longitud amb 152,4mm de diàmetre la part estreta i 279,4mm de diàmetre la part ampla. Té 7 tubs en U amb un diàmetre extern de 19,05mm.

➤ Bescanviador de calor BC-202

Bescanviador que escalfa la MMA provinent dels tancs d'emmagatzematge de MMA T-103 T-104 i T-105, per tal d'arribar a la temperatura necessària d'aquest a la entrada del reactor R-201. La temperatura d'entrada del fluid de procés, MMA, correspon a -6,35°C amb una sortida de 240°C. El fluid calefactor és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'una caldera, a una temperatura de 270°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 1653kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 3657,6mm de longitud i 219,08mm de diàmetre extern, tenint 40 tubs en U amb un diàmetre extern de 20mm.

➤ Bescanviador de calor BC-203

Bescanviador de carcassa i tubs que escalfa el foscè provinent del kettle reboiler BC-201 per tal d'arribar a la temperatura necessària d'aquest a la entrada del reactor R-201. La temperatura

d'entrada del fluid de procés, fosc, correspon a 7,56°C amb una sortida de 205°C. El fluid calefactor és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'una caldera, a una temperatura de 270°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 1753kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 1282,7mm de longitud i 323,85mm de diàmetre extern, tenint 108 tubs en U amb un diàmetre extern de 19,05mm.

➤ Bescanviador de calor BC-204

Bescanviador que refrigera el toluè provinent del tanc d'emmagatzematge de toluè T-103 i del corrent provinent del bescanviador de carcassa i tubs BC-216 (recirculació) per tal de que aquest estigui a la temperatura adequada en l'absorció del HCl gas de la columna CA-201. Així doncs, el toluè entra a una temperatura de 25°C sortint a 5°C. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 20°C i un cabal de 6134kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 1581,2mm de longitud i 219,08mm de diàmetre extern, tenint 43 tubs en U amb un diàmetre extern de 19,05mm.

➤ Bescanviador de calor BC-205

És el bescanviador que correspon al condensador de la columna de destil·lació CD-201 el qual realitza la condensació d'una part del destil·lat de la torre. La temperatura d'entrada de destil·lat és 77,08°C sortint a 21,26°C. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 35°C i un cabal de 4724kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 1778mm de longitud i 219,08mm de diàmetre extern, tenint 27 tubs en U amb un diàmetre extern de 20mm.

➤ Bescanviador de calor BC-206

Bescanviador que correspon al kettle reboiler de la columna de destil·lació CD-201 el qual evapora part del fluid d'entrada per a generar el reflux de la columna. La temperatura d'entrada a aquest equip correspon a 105,16°C amb una sortida de 105,72°C. El fluid calefactor és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'una caldera, a una temperatura de 270°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 5472kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 1000mm de longitud amb 203,2mm de diàmetre la part estreta i 355,6mm de diàmetre la part ampla. Té 7 tubs en U amb un diàmetre extern de 25mm.

➤ Bescanviador de calor BC-207

És el bescanviador que correspon al condensador de la columna de destil·lació CD-202 el qual realitza la condensació del destil·lat de la torre. La temperatura d'entrada de destil·lat és 7,59°C sortint a 7,56°C. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 13°C i un cabal de 4357kg/h. Les dimensions de la

carcassa del bescanviador són 1400mm de longitud i 219,08mm de diàmetre extern, tenint 20 tubs en U amb un diàmetre extern de 25mm.

➤ Bescanviador de calor BC-208

És el bescanviador que correspon al Kettle reboiler de la columna de destil·lació CD-202 el qual evapora part del fluid d'entrada per a generar el reflux de la columna. La temperatura d'entrada a aquest equip correspon a 98,42°C amb una sortida de 100,11°C. El fluid calefactor és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'una caldera, a una temperatura de 130°C, amb un salt tèrmic de 20°C i un cabal de 2548kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 900mm de longitud amb 254mm de diàmetre la part estreta i 406,4mm de diàmetre la part ampla. Té 40 tubs en U amb un diàmetre extern de 16mm.

➤ Bescanviador de calor BC-209

És un dels bescanviadors que correspon a un dels condensadors de la columna de destil·lació CD-203 el qual realitza la condensació del destil·lat de la torre. La temperatura d'entrada de destil·lat és 99,9°C sortint a 97,51°C. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 10458kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 1829mm de longitud i 273,05mm de diàmetre extern, tenint 52 tubs en U amb un diàmetre extern de 19,05mm.

➤ Bescanviador de calor BC-210

És un dels bescanviadors que correspon a un dels condensadors de la columna de destil·lació CD-203 el qual realitza la condensació del destil·lat de la torre. La temperatura d'entrada de destil·lat és 99,9°C sortint a 97,51°C. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 10458kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 1829mm de longitud i 273,05mm de diàmetre extern, tenint 52 tubs en U amb un diàmetre extern de 19,05mm.

➤ Bescanviador de calor BC-211

És un dels bescanviadors que correspon a un dels condensadors de la columna de destil·lació CD-203 el qual realitza la condensació del destil·lat de la torre. La temperatura d'entrada de destil·lat és 99,9°C sortint a 97,51°C. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 10458kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 1829mm de longitud i 273,05mm de diàmetre extern, tenint 52 tubs en U amb un diàmetre extern de 19,05mm.

➤ Bescanviador de calor BC-212

És un dels bescanviadors que correspon a un dels condensadors de la columna de destil·lació CD-203 el qual realitza la condensació del destil·lat de la torre. La temperatura d'entrada de destil·lat és 99,9°C sortint a 97,51°C. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 10458kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 1829mm de longitud i 273,05mm de diàmetre extern, tenint 52 tubs en U amb un diàmetre extern de 19,05mm.

➤ Bescanviador de calor BC-213

És un dels bescanviadors que correspon a un dels kettle reboilers de la columna de destil·lació CD-203 el qual evapora part del fluid d'entrada per a generar el reflux de la columna. La temperatura d'entrada a aquest equip correspon a 110,6°C amb una sortida de 110,62°C. El fluid calefactor és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'una caldera, a una temperatura de 270°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 11266kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 890,4 mm de longitud amb 736,6mm de diàmetre la part estreta i 1016mm de diàmetre la part ampla. Té 151 tubs en U amb un diàmetre extern de 25mm.

➤ Bescanviador de calor BC-214

És un dels bescanviadors que correspon a un dels kettle reboilers de la columna de destil·lació CD-203 el qual evapora part del fluid d'entrada per a generar el reflux de la columna. La temperatura d'entrada a aquest equip correspon a 110,6°C amb una sortida de 110,62°C. El fluid calefactor és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'una caldera, a una temperatura de 270°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 11266kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 890,4 mm de longitud amb 736,6mm de diàmetre la part estreta i 1016mm de diàmetre la part ampla. Té 151 tubs en U amb un diàmetre extern de 25mm.

➤ Bescanviador de calor BC-215

És un dels bescanviadors que correspon a un dels kettle reboilers de la columna de destil·lació CD-203 el qual evapora part del fluid d'entrada per a generar el reflux de la columna. La temperatura d'entrada a aquest equip correspon a 110,6°C amb una sortida de 110,62°C. El fluid calefactor és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'una caldera, a una temperatura de 270°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 11266kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 890,4 mm de longitud amb 736,6mm de diàmetre la part estreta i 1016mm de diàmetre la part ampla. Té 151 tubs en U amb un diàmetre extern de 25mm.

➤ Bescanviador de calor BC-216

Bescanviador de carcassa i tubs que refreda la corrent de sortida dels calderins de la columna CD-203 (BC-213, BC-214 i BC-215) per tal de recircular-lo al bescanviador BC-204. La temperatura

d'entrada del toluè és 110,62°C sortint a 25°C. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 14352kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 2000mm de longitud i 355,6mm de diàmetre extern, tenint 132 tubs en U amb un diàmetre extern de 19,05mm.

➤ Bescanviador de calor BC-217

Bescanviador que correspon al condensador de la sortida gas del reactor de piròlisis, amb l'objectiu de condensar els compostos orgànics mentre el clorur d'hidrogen és separat i portat a l'àrea 300c de formulació d'àcid clorhídric. Els orgànics condensats són posteriorment recirculats al dipòsit previ del reactor de piròlisis. La temperatura d'entrada a aquest equip correspon a 90°C amb una sortida de 46°C. El fluid calefactor és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller, a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 15°C i un cabal de 1492kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 800mm de longitud i 219,08mm de diàmetre extern, tenint 42 tubs en U amb un diàmetre extern de 16mm

➤ Bescanviador de calor BC-218

És el bescanviador que correspon al condensador de la columna de destil·lació CD-204 el qual realitza la condensació del destil·lat de la torre. Les temperatures d'entrada i sortida de destil·lat és 38,79°C. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 8073kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 1828,8mm de longitud i 219,08mm de diàmetre extern, tenint 54 tubs en U amb un diàmetre extern de 16mm.

➤ Bescanviador de calor BC-219

Bescanviador que correspon al kettle reboiler de la columna de destil·lació CD-204 el qual evapora part del fluid d'entrada per a generar el reflux de la columna. La temperatura d'entrada a aquest equip correspon a 102,47°C amb una sortida de 104,34°C. El fluid calefactor és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'una caldera, a una temperatura de 130°C, amb un salt tèrmic de 25°C i un cabal de 9822kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 2000mm de longitud amb 787,4mm de diàmetre la part estreta i 1092,2mm de diàmetre la part ampla. Té 423 tubs en U amb un diàmetre extern de 19,05mm.

➤ Bescanviador de calor BC-220

Bescanviador que refrigera el toluè corresponent a una part de la sortida de la refrigeració dels reactors R-203 i R-204, depenent de quin estigui funcionant en cada moment. Aquesta corrent es destina al dipòsit pulmó DP-210 per tal de recircular el toluè i reutilitzar-lo com ha refrigerant en els reactors mencionats. Així doncs, el toluè entra a una temperatura de 40°C sortint a 25°C. El

fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C , amb un salt tèrmic de 15°C i un cabal de 1454kg/h . Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 700 mm de longitud i $168,28\text{mm}$ de diàmetre extern, tenint 22 tubs en U amb un diàmetre extern de 16mm .

➤ Bescanviador de calor BC-301

Bescanviador que correspon al condensador de la columna de destil·lació CD-301 el qual realitza la condensació del destil·lat de la torre. És l'equip a partir del qual es realitza el buit d'operació de tot el grup (CD-301, BC-302, BC-301 i DP-302). La pressió és de $0,395\text{atm}$ amb una temperatura d'entrada de destil·lat de $71,85^{\circ}\text{C}$ sortint a $40,79^{\circ}\text{C}$. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C , amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 15656kg/h . Les dimensions de la carcassa del bescanviador són $1828,8\text{mm}$ de longitud i $323,85\text{mm}$ de diàmetre extern, tenint 91 tubs en U amb un diàmetre extern de $19,05\text{mm}$.

➤ Bescanviador de calor BC-302

Bescanviador que correspon al Kettle reboiler de la columna de destil·lació CD-301 el qual evapora part del fluid d'entrada per a generar el reflux de la columna. La pressió és de $0,395\text{atm}$ amb una temperatura d'entrada corresponen a $84,44^{\circ}\text{C}$ i una temperatura de sortida de $85,76^{\circ}\text{C}$. El fluid calefactor és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'una caldera, a una temperatura de 270°C , amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 9870kg/h . Les dimensions de la carcassa del bescanviador són $1219,2\text{ mm}$ de longitud amb $203,2\text{mm}$ de diàmetre la part estreta i $406,4\text{mm}$ de diàmetre la part ampla. Té 29 tubs en U amb un diàmetre extern de 16mm .

➤ Bescanviador de calor BC-303

Bescanviador de carcassa i tubs que escalfa el contingut del cristal·litzador CR-301 per tal de que estigui a les condicions de disseny d'aquest, de pressió ($0,197\text{atm}$) i temperatura, i així evaporar el toluè i cristal·litzar el carbaril. La desconexió del cabal del fluid de procés que circula per aquest bescanviador i la temperatura d'aquest mateix, necessaris per a mantenir les condicions del cristal·litzador, justifica el fet de no ser dissenyat el BC-303.

➤ Bescanviador de calor BC-304

És el bescanviador que correspon al condensador del cristal·litzador CR-301, que condensa el toluè evaporat. És el condensador a partir del qual es realitza el buit d'operació de tot el grup de cristal·lització (CR-301, BC-303 i BC-304, DP-303). La pressió d'operació és $0,197\text{atm}$ amb una temperatura d'entrada de 67°C i sortida de $61,9^{\circ}\text{C}$. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C , amb un salt tèrmic de 35°C i un cabal de

5434kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 1200mm de longitud i 168,28mm de diàmetre extern, tenint 19 tubs en U amb un diàmetre extern de 16mm.

➤ Bescanviador de calor BC-305

Bescanviador de carcassa i tubs que escalfa el contingut del cristal·litzador CR-302 per tal de que estigui a les condicions de disseny d'aquest, de pressió (0,197atm) i temperatura, i així evaporar el toluè i cristal·litzar el carbaril. La desconexió del cabal del fluid de procés que circula per aquest bescanviador i la temperatura d'aquest mateix, necessaris per a mantenir les condicions del cristal·litzador, justifica el fet de no ser dissenyat el BC-305.

➤ Bescanviador de calor BC-306

És el bescanviador que correspon al condensador del cristal·litzador CR-302, que condensa el toluè evaporat. És el condensador a partir del qual es realitza el buit d'operació de tot el grup de cristal·litzador (CR-302, BC-305 i BC-306, DP-304). La pressió d'operació és 0,197atm amb una temperatura d'entrada de 68,5°C i sortida de 61,9°C. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 3994kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 1219,2mm de longitud i 219,08mm de diàmetre extern, tenint 41 tubs en U amb un diàmetre extern de 16mm.

➤ Bescanviador de calor BC-307

Bescanviador de carcassa i tubs que escalfa el contingut del cristal·litzador CR-303 per tal de que estigui a les condicions de disseny d'aquest, de pressió (0,197atm) i temperatura, i així evaporar el toluè i cristal·litzar el carbaril. La desconexió del cabal del fluid de procés que circula per aquest bescanviador i la temperatura d'aquest mateix, necessaris per a mantenir les condicions del cristal·litzador, justifica el fet de no ser dissenyat el BC-307.

➤ Bescanviador de calor BC-308

És el bescanviador que correspon al condensador del cristal·litzador CR-303, que condensa el toluè evaporat. És el condensador a partir del qual es realitza el buit d'operació de tot el grup de cristal·litzador (CR-303, BC-307, BC-308 i DP-305). La pressió d'operació és 0,197atm amb una temperatura d'entrada de 64,01°C i sortida de 61,9°C. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 8893kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 2000mm de longitud i 273,05mm de diàmetre extern, tenint 87 tubs en U amb un diàmetre extern de 16mm.

➤ Bescanviador de calor BC-309

Kettle reboiler que evapora part del toluè provinent de la sortida líquida de la centrífuga CT-302 per tal de recuperar-lo. Es realitza a una pressió de 0,197atm on la temperatura d'entrada a aquest equip correspon a 17°C amb una sortida de 65°C. El fluid calefactor és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'una caldera, a una temperatura de 130°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 12125kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 1000mm de longitud amb 330,2mm de diàmetre la part estreta i 685,8mm de diàmetre la part ampla. Té 89 tubs en U amb un diàmetre extern de 16mm.

➤ Bescanviador de calor BC-310

És el bescanviador que correspon al condensador del kettle reboiler BC-309, que condensa el toluè evaporat. És el condensador a partir del qual es realitza el buit d'operació de tot el grup (BC-309, BC-310 i DP-306). La pressió d'operació és 0,197atm amb una temperatura d'entrada de 65,01°C i sortida de 61,9°C. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 11825kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 3657,6mm de longitud i 219,085mm de diàmetre extern, tenint 38 tubs en U amb un diàmetre extern de 19,05mm.

➤ Bescanviador de calor BC-311

Kettle reboiler que evapora part del corrent líquid del kettle reboiler BC-309 per tal de recuperar encara més toluè. El motiu de realitzar-ne dos en sèrie és evitar l'arrossegament de compostos no desitjats. Es realitza a una pressió de 0,197atm on la temperatura d'entrada a aquest equip correspon a 65°C amb una sortida de 75°C. El fluid calefactor és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'una caldera, a una temperatura de 130°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 2532kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 900mm de longitud amb 152,4mm de diàmetre la part estreta i 304,8mm de diàmetre la part ampla. Té 12 tubs en U amb un diàmetre extern de 16mm.

➤ Bescanviador de calor BC-312

És el bescanviador que correspon al condensador del kettle reboiler BC-311, que condensa el toluè evaporat. És el condensador a partir del qual es realitza el buit d'operació de tot el grup (BC-311, BC-312 i DP-307). La pressió d'operació és 0,197atm amb una temperatura d'entrada de 75°C i sortida de 61,9°C. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 3094kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 900mm de longitud i 273,05mm de diàmetre extern, tenint 76 tubs en U amb un diàmetre extern de 16mm.

➤ Bescanviador de calor BC-313

Aquest bescanviador de carcassa i tubs està pensat per a refrigerar el toluè líquid que surt dels condensadors BC-304, BC-306, BC-308, BC-310 i BC-312 per tal de ser recirculat el corrent al tanc d'emmagatzematge de toluè, ja que són corrents purs o amb unes mínimes traces de naftol. La temperatura d'entrada del toluè és 62°C sortint a 25°C del bescanviador. El fluid refrigerant és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'un chiller, a una temperatura de -15°C, amb un salt tèrmic de 40°C i un cabal de 5552kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 2387,6mm de longitud i 219,08mm de diàmetre extern, tenint 59 tubs en U amb un diàmetre extern de 16mm.

➤ Bescanviador de calor BC-314

Bescanviador de carcassa i tubs que escalfa el clorur d'hidrogen a l'entrada de les columnes d'absorció CA-301 i CA-302 per a afavorir les condicions d'absorció en la formació d'àcid clorhídric. La temperatura d'entrada del fluid de procés, correspon a -26,45°C amb una sortida de 5°C. El fluid calefactor és l'oli tèrmic Dowtherm J, provinent d'una caldera, a una temperatura de 130°C, amb un salt tèrmic de 8°C i un cabal de 1347kg/h. Les dimensions de la carcassa del bescanviador són 800mm de longitud i 219,08mm de diàmetre extern, tenint 30 tubs en U amb un diàmetre extern de 16mm.

11.12.4.1. Buit als equips en els quals es requereix

En aquest apartat es mostra les taules i valors necessaris per a la realització del buit en els bescanviadors evaporadors BC-309 amb el corresponent condensador i dipòsit de condensats, i en el BC-311 amb el corresponent condensador i dipòsit de condensats. El buit a la columna CD-301 s'especifica a l'apartat 11.8.

➤ Kettle reboiler BC-309

Els càlculs del temps de buit necessari per arribar a les condicions d'operació d'aquest estan detallats a l'apartat 11.6 per als cristal·litzadors, utilitzant la mateixa taula 11.6.2.2. per a la determinació del cabal d'aire de fugues en funció del volum.

Es mostra la taula 11.7.4.1. on s'especifica el volum total al qual s'ha de realitzar el buit juntament amb propietats necessàries pel càlcul del temps necessari per a realitzar el buit.

Taula 11.7.4.1. Propietats del evaporador BC-309, condensador BC-310 i dipòsit de condensats DP-306, per a la realització del càlcul del temps necessari de buit.

BUIT AL conjunt EVAPORADOR-CONDENSADOR			
VOLUM (m ³)			
Kettle reboiler	Condensador	Dipòsit de condensats	Total
0,076	0,091	0,750	1,0
Cabal de fugues (kg/h)			
1,00			
Cabal de la bomba de buit (m ³ /h)			
7,3			
Pressió de vapor del toluè evaporat (atm)			
0,0044			

Per a la realització dels càlculs es suposa un cabal de bomba (m³/h) i es comprova que sigui suficient per a realitzar el buit. En aquest cas, un cop s'ha cercat la bomba s'han recalculat els valors.

Seguidament es mostra la taula 11.7.4.2 on es plasma els paràmetres requerits a calcular per tal d'arribar al valor del temps de buit (últim valor remarcant en negreta). Els càlculs d'aquestes taules es troben especificats a l'apartat 11.6 per als cristal·litzadors ja mencionat.

Taula 11.7.4.2. Paràmetres necessaris en la determinació del temps de buit al conjunt de l'evaporador BC-309.

CONJUNT DEL EVAPORADOR BC-309							
Pressió (atm)	Yd (fracció diss)	PM mescla (kg/kmol)	Densitat mescla (kg/m ³)	Cabal bomba (kg/h)	Cabal bomba de succió (kg/h)	Massa mescla (kg)	Temps (min)
1,00	4,39E-03	29,28	1,20	8,71	7,71	1,20	0,00
0,95	4,62E-03	29,29	1,14	8,27	7,27	1,14	0,48
0,90	4,88E-03	29,31	1,08	7,84	6,84	1,08	0,98
0,85	5,16E-03	29,33	1,02	7,41	6,41	1,02	1,52
0,80	5,49E-03	29,35	0,96	6,98	5,98	0,96	2,09
0,75	5,85E-03	29,37	0,90	6,54	5,54	0,90	2,71
0,70	6,27E-03	29,40	0,84	6,11	5,11	0,84	3,38
0,65	6,75E-03	29,43	0,78	5,68	4,68	0,78	4,11
0,60	7,32E-03	29,46	0,72	5,24	4,24	0,72	4,91
0,55	7,98E-03	29,50	0,66	4,81	3,81	0,66	5,79
0,50	8,78E-03	29,55	0,60	4,38	3,38	0,60	6,78
0,45	9,76E-03	29,62	0,55	3,94	2,94	0,55	7,91
0,40	1,10E-02	29,69	0,49	3,51	2,51	0,49	9,21
0,35	1,25E-02	29,79	0,43	3,08	2,08	0,43	10,77
0,30	1,46E-02	29,92	0,37	2,64	1,64	0,37	12,68

0,25	1,76E-02	30,11	0,31	2,21	1,21	0,31	15,18
0,20	2,20E-02	30,39	0,25	1,78	0,78	0,25	18,77
0,197	2,23E-02	30,41	0,25	1,75	0,75	0,25	19,05

➤ Kettle reboiler BC-311

Els càlculs del temps de buit necessari per arribar a les condicions d'operació d'aquest estan detallats a l'apartat 11.6 per als cristal·litzadors, utilitzant la mateixa taula 11.6.2.2. per a la determinació del cabal d'aire de fugues en funció del volum.

Es mostra la taula 11.7.4.3. on s'especifica el volum total al qual s'ha de realitzar el buit juntament amb propietats necessàries pel càlcul del temps necessari per a realitzar el buit.

Taula 11.7.4.3. Propietats del evaporador BC-311, condensador BC-312 i dipòsit de condensats DP-307, per a la realització del càlcul del temps necessari de buit.

BUIT AL conjunt EVAPORADOR-CONDENSADOR			
VOLUM (m³)			
Kettle reboiler	Condensador	Dipòsit de condensats	Total
0,017	0,036	0,192	0,3
Cabal de fugues (kg/h)			
0,56			
Cabal de la bomba de buit (m³/h)			
7,3			
Pressió de vapor del toluè evaporat (atm)			
0,0044			

Igual que per al conjunt del BC-311, s'ha cercat la bomba, utilitzant el cabal d'aquest recalculant els valors. La bomba de buit en ambdós conjunts és el mateix model, el qual és de l'empresa Scharlab, concretament una de membrana amb referència ME8NT. Els detalls d'aquesta bomba es troben especificats al capítol 4.

Seguidament es mostra la taula 11.7.4.4 on es plasma els paràmetres requerits a calcular per tal d'arribar al valor del temps de buit (últim valor remarcant en negreta). Els càlculs d'aquestes taules es troben especificats a l'apartat 11.6 per als cristal·litzadors.

Taula 11.7.4.4. Paràmetres necessaris en la determinació del temps de buit al conjunt de l'evaporador BC-311

CONJUNT DEL EVAPORADOR BC-311

Pressió (atm)	Yd (fracció diss)	PM mescla (kg/kmol)	Densitat mescla (kg/m ³)	Cabal bomba (kg/h)	Cabal bomba de succió (kg/h)	Massa mescla (kg)	Temps (min)
1,00	4,39E-03	29,28	1,20	8,71	8,15	0,36	0,00
0,95	4,62E-03	29,29	1,14	8,27	7,71	0,34	0,13
0,90	4,88E-03	29,31	1,08	7,84	7,28	0,32	0,28
0,85	5,16E-03	29,33	1,02	7,41	6,85	0,31	0,43
0,80	5,49E-03	29,35	0,96	6,98	6,41	0,29	0,59
0,75	5,85E-03	29,37	0,90	6,54	5,98	0,27	0,76
0,70	6,27E-03	29,40	0,84	6,11	5,55	0,25	0,95
0,65	6,75E-03	29,43	0,78	5,68	5,11	0,23	1,15
0,60	7,32E-03	29,46	0,72	5,24	4,68	0,22	1,37
0,55	7,98E-03	29,50	0,66	4,81	4,25	0,20	1,61
0,50	8,78E-03	29,55	0,60	4,38	3,81	0,18	1,87
0,45	9,76E-03	29,62	0,55	3,94	3,38	0,16	2,17
0,40	1,10E-02	29,69	0,49	3,51	2,95	0,15	2,50
0,35	1,25E-02	29,79	0,43	3,08	2,51	0,13	2,90
0,30	1,46E-02	29,92	0,37	2,64	2,08	0,11	3,36
0,25	1,76E-02	30,11	0,31	2,21	1,65	0,09	3,93
0,20	2,20E-02	30,39	0,25	1,78	1,21	0,07	4,68
0,197	2,23E-02	30,41	0,25	1,75	1,19	0,07	4,73

11.13. Impulsió de fluids

11.13.1. Balanç d'energia mecànica

Per conèixer la pressió necessària de les bombes per poder fer que un fluid hi circuli d'un punt A fins a un punt B s'utilitza el balanç d'energia mecànica. Aquest balanç també ens permet saber on es requereix una bomba i quina potència hi necessita.

$$W + q = g \cdot (z_1 - z_2) + \left(\frac{p_2}{d_2} - \frac{p_1}{d_1} \right) + \frac{1}{2 \cdot \alpha} \cdot (v_2^2 - v_1^2) + \Sigma F \quad [Eq. 11.13.1]$$

On:

W és el treball degut a una força mecànica (J/Kg).

q és el calor resultant de la diferència de temperatures entre el sistema i els voltants, es suposarà un valor de 0 (J/Kg).

g és la força de la gravetat.

z és l'alçada entre os punts (m).

v_1 i v_2 és la velocitat de dos punts diferents de canonada (m/s).

p_2 i p_1 és la diferència de pressió entre dos punts amb igual o diferent diàmetre de canonada.

α és la constant de flux del sistema, que serà 1 per a règim turbulent i 0,5 per a règim laminar.

ΣF són les pèrdues d'energia (o carga) mecànica degudes a la fricció.

Per calcular les pèrdues per fricció s'han de tenir en compte tant els trams rectes de canonada com els diferents tipus d'accidents de les canonades, és a dir, colzes, estretaments, vàlvules...

La pèrdua de càrrega en els trams rectes són degudes al fregament del fluid amb les parets internes de la canonada i a la turbulència de circulació del fluid en qüestió.

Per al càlcul rigorós de les pèrdues de càrrega per accidents és necessari saber la forma exacta de la implementació de les canonades. Com les pèrdues de càrrega per trams rectes tenen més pes que les pèrdues de càrrega per accidents, es suposa que les pèrdues per accidents són el 30% del les pèrdues per trams rectes.

$$\Sigma F = \Sigma F_{trams rectes} + \Sigma F_{accidents} \quad [Eq. 11.13.2]$$

$$\Sigma F_{accidentes} = 0.3 \cdot \Sigma F_{tramo recto} \quad [Eq. 11.13.5]$$

$$\Sigma F_{trams rectes} = 2 \cdot f \cdot \frac{L}{D} \cdot \langle v \rangle^2 \quad [Eq. 11.13.3]$$

On:

$\langle v \rangle$ és la velocitat mitja de circulació del fluid en la canonada (m/s).

L és la longitud de canonada (m).

D és el diàmetre de canonada (m).

f és el factor de fricció de Fanning.

El factor de fricció de Fanning es pot calcular amb l'àbac de Moody (figura 11.13.1), on aquest relaciona la rugositat relativa i el Reynolds amb el factor de fricció de f .

El Reynolds depèn del diàmetre de la canonada i de les propietats físiques del fluid que hi circula.

$$Re = \frac{D \cdot \rho \cdot v}{\mu} \quad [Eq. 11.13.4]$$

On:

D és el diàmetre de la canonada (m).

ρ és la densitat del fluid (Kg/m^3).

μ és la viscositat ($\text{Kg/m}\cdot\text{s}$).

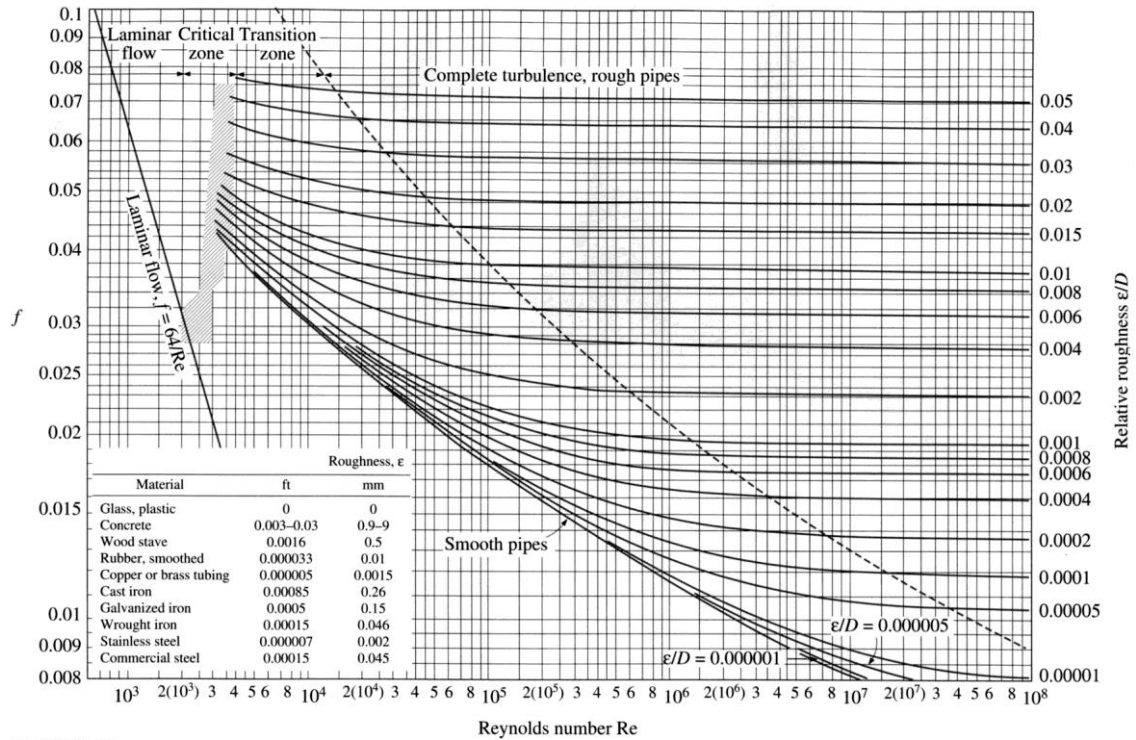


FIGURE A-27

The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular tubes.

Figura 11.13.1. Àbac de Moody

La rugositat relativa es una característica inherent de cada material. Per conèixer la rugositat dels diferents materials més comuns a l'indústria s'utilitza la taula 11.13.1.

Taula 11.13.1. Rugositat de diferents materials.

TUBERÍA O REVESTIMIENTO	ϵ mm
Tubos estirados de acero	0,0024
Tubos de latón o cobre	0,0015
Fundición revestida de cemento	0,0024
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024
Fundición centrifugada	0,003
Fundición asfaltada	0,06 - 0,18
Fundición	0,12 - 0,6
Acero comercial y soldado	0,03 - 0,09
Hierro forjado	0,03 - 0,09
Hierro galvanizado	0,06 - 0,24
Madera	0,18 - 0,9
Hormigón	0,3 - 3
Acero roblonado	0,9 - 9

Un cop calculat el treball que s'ha de realitzar per que hi circuli el fluid, es calculen la carga total, la potencia teòrica de la bomba i la potencia real de la bomba. Les bombes que impulsen els líquids en el procés són del tipus centrífugues, i la impulsio de gasos i sòlid s'explicarà més endavant.

La potència teòrica que ha d'exercir la bomba es calcula amb l'equació 11.13.7.

$$P_{Teòrica} = m \cdot W \quad [Eq. 11.13.7]$$

On:

W és el treball degut a una força mecànica (J/Kg).

g és la força de la gravetat.

No tota la potència de la bomba s'aplica a la impulsio del fluid, sinó que part es perd en forma de calor. Es fixa un rendiment η típic de 65%, es a dir, el 65% de la potència s'aplica per a la impulsio del fluid i un 35% es perd en forma de calor. La potència real es calcula amb l'equació 11.13.8.

$$P_{Real} = P_{Teòrica} / \eta \quad [Eq. 11.13.8]$$

La diferència entre la carga d'aspiració i la carga d'impulsio s'anomena carga total i es calcula amb l'equació 11.13.6.

$$h = W/g \quad [Eq. 11.13.6]$$

On:

W és el treball degut a una força mecànica (J/Kg).

g és la força de la gravetat.

11.13.2. Càlcul del diàmetre de les canonades

El material de la canonada, el diàmetre, l'aïllament, etc... ve determinat per les característiques físico-químiques del fluid i per la temperatura i pressió a la qual hi circula. Com en el projecte no s'entra en detalls profunds sobre el disseny de canonades, només es calcularà el diàmetre de les canonades. Per aquest càlcul del diàmetre intern de la canonada s'utilitza l'equació 11.14.1 presentada a continuació.

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{v \cdot \pi}} \quad [Eq. 11.14.1]$$

On:

Q és el cabal volumètric que hi circula (m³/s).

v és la velocitat de circulació del fluid (m/s).

Di és el diàmetre intern de la canonada (m).

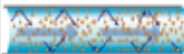
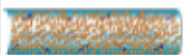
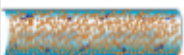
Sabent el cabal volumètric que hi circula i fixant una velocitat típica de circulació és pot calcular amb l'equació 11.14.1 el diàmetre requerit de canonada. En les taules 11.14.1.1 i 11.14.1.2 es presenten valors típics de circulació de fluids per diferents tipus de canonades.

11.13.3. Impulsió de sòlids

Per el sistema de impulsió pneumàtica s'escull el transport de fase densa, ja que el carbaril és un sòlid que es presenta en pols. El sistema de transport pneumàtic consisteix en traslladar material a través d'una canonada amb el moviment de l'aire causat al augmentar o disminuir la pressió normal o atmosfèrica.

Serà necessari l'ús d'un tipus de bombes capaç de transportar el sòlids en fase densa (taula 11.15.1.), i en aquest cas el tipus de bomba d'impulsió de sòlids és un compressor.

Taula 11.15.1. Sistemes d'impulsió de sòlids.

Modo de flujo	Descripción	Depresión hasta bar (abs.)	Sobrepresión hasta bar (abs.)	Granulometría de - hasta μm (mm)	Velocidad m/seg comienzo - fin	Relación μ Kg/prod. Kg/gas	Aplicación en productos
solids Fly Pneu 	Transporte en fase diluida 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	Producto 12 - 36 Aire 15 - 45	Hasta aprox. 10	Harinas, cereales, sémola, pulverulentos, recortes, polvo en general
solids Fluid Pneu 	Transporte en fase densa 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	Producto 3 - 15 Aire 5 - 20	15 - 30	Cemento, caliza molida, cenizas volantes, bentonita, cal viva, hidróxido cálcico, adsorbentes, polvo, ácido tereftálico, creta
solids Vacu Fill 	Transporte en fase densa por vacío y baches 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	Producto 1 - 15 Aire 3 - 20	15 - 30	Polvos, fibras, granulados plásticos, minerales, harinas, sémolas, granulados alimentarios
solids Step Pneu 	Transporte por empuje de cartuchos 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	Producto 0,5 - 10 Aire 1 - 15	20 - 40	Arenas, granulados, cenizas, nueces, guisantes, alubias, HOK, píldoras, pastillas, café en grano

El compressor utilitzat en el procés és el de la empresa ATLAS Copco model GA30+/-GA 37-90 VSD i impulsa a una pressió de 8 atmosferes.

11.14. Dipòsits de procés

11.14.1. Dipòsits per les columnes

Les columnes de destil·lació del procés tenen dipòsits pulmó just a l'entrada de les mateixes. La finalitat d'aquests dipòsits és garantir un cabal continu i sobretot per poder exercir un control a l'hora de realitzar la posta en marxa de les columnes. Les corrents de caps i cues es retornen als dipòsits fins que no hi ha un regim estacionari que permeti una bona separació de les mescles.

Tant el dimensionament, el disseny mecànic com el càlcul dels pesos de l'equip segueix la mateixa metodologia utilitzada en els tancs d'emmagatzematge anteriors a diferència que el temps de residència ha sigut de 4 h per assegurar un volum suficient per a la posta en marxa.

A continuació s'exposarà els càlculs generals que s'han de realitzar per el dimensionament, disseny mecànic i càlculs dels pesos dels dipòsits i posteriorment es mostrarà els resultats dels mateixos.

- Venteig

Els sistemes de venteig son sistemes dissenyats per prevenir els efectes de les alteracions de la pressió interna de un recipient d'emmagatzematge o de procés. La mida del venteig d'un tanc, com s'ha dit en les notes introductòries ha de ser de mida com a mínim igual o major a la de les canonades de carga o descarrega i en cap cas ser inferiors a 35 mm de diàmetre.

La figura 11.2.1.6 servei per triar el valor factor de reducció, en el cas que la situació no aparegui en la figura el valor de F serà la unitat. En aquest cas el valor de F és 1. La taula següent mostra les capacitats totals de venteig dels mescladors que treballen a pressió atmosfèrica.

Taula 11.7.1.1 Kg/h de líquid de venteig dels dipòsits.

Compost	A	Q	cabal pressió	L (kJ/kg)	F	Hcil	D
DP-201	60,17	4020452,09	115,497	3,48E+04	1	7,6	2,52
DP-203	6,94	684322,73	20,563	3,33E+04	1	2,6	0,85
DP-205	67,36	4410254,20	131,886	3,34E+04	1	8	2,68

DP-207	25,25	1972386,60	56,923	3,47E+04	1	4,9	1,64
	63,71	4213616,65	90,713	4,65E+04	1	7,8	2,6

- Condicions d'emmagatzematge

Les condicions d'emmagatzematge varien en funció de les condicions a les que es treballa en les diferents columnes. La taula següent presenta les condicions d'emmagatzematge dels diferents dipòsits pulmó de les columnes.

Taula 11. Condicions d'emmagatzematge dels dipòsits pulmó de les columnes.

Paràmetre	DP-201	DP-203	DP-205	DP-207	DP-301
T operació (°C)	86,6	21,26	105,1	90	93
T disseny (°C)	106,6	42,26	125,1	110	113
P operació (atm)	1	1	1	9,869	1
P disseny (atm)	1,78	1,45	1,79	11,51	1,42

- Capacitat d'emmagatzematge

La capacitat d'emmagatzematge ve donada per el cabal que hi circuli a l'entrada de la columna ,per el temps de residència fixat i per la fracció de buit o ple, com el temps de residència és el mateix per a tots i la fracció de buit o ple també, el que fixarà la capacitat serà el cabal volumètric que hi circuli. S'ha establert una fracció de ple típica per a dipòsits del 80%.

Per exemple, si el temps de residència es de 4h i el cabal volumètric del dipòsit DP-201 és 6,84:

$$V_{DP-201} = 7121,7 \frac{m^3}{h} \cdot 4 h = 33,75 m^3 \rightarrow 80\% ple \rightarrow 40,5 m^3$$

- Dimensions

A continuació s'exposen les equacions utilitzades per al càlcul del volum de les parts dels dipòsits.

Es suposa un valor típic per a dipòsits de 3 per a la relació L/D. El equip consta d'un cos central

cilíndric més un fons superior i inferior toriesfèric ,per tant el volum de l'equip serà la suma del volum de les parts descrites anteriorment.

L'alçada del líquid es calcula amb les expressions iguals que en els tancs d'emmagatzemament amb la mateixa metodologia i les mateixes suposicions.

En aquests dipòsits també es fan els arrodoniments de la alçada i diàmetre del cilindre per evitar sobre costos com bé s'explica a la introducció dels tancs d'emmagatzematge (apartat 11.1.1)

La taula següent mostra les dimensions obtingudes per els diferents dipòsits pulmó de les columnes.

Taula 11. Dimensions dels dipòsits pulmó de les columnes.

Paràmetre	DP-201	DP-203	DP-205	DP-207	DP-301
Volum real (m3)	40,49	1,57	48,2	11,06	10,4
H total (cil+fons) (m)	8,57	2,93	9,03	5,53	5,47
Diàmetre (m)	2,52	0,85	2,68	1,64	1,6

- Disseny mecànic

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix les columnes de líquid que hi ha dins dels dipòsits. Com els dipòsits estan col·locats de manera vertical els càlculs es fan en base a l'altura de l'equip i amb l'equació 11.X.X presentada a continuació.

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h \text{ [Eq. 11.1.5]}$$

La taula 11.X.X mostra les temperatures i pressions d'operació i de disseny. A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{disseny} = (\Delta P + P_o) \cdot 1.15 \text{ [Eq. 11.1.4]}$$

$$T = T_{operació} + 20^\circ C = 45^\circ C \text{ [Eq. 11.1.6]}$$

El dipòsit consta d'un fons inferior i superior toriesfèric i un cos cilíndric com s'ha dit anteriorment. Amb les equacions que es presenten a continuació es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior i inferior toriesfèric.

$$t_{cilindre} = \frac{P R}{S E - 0.6 P} + C_A \text{ [Eq. 11.1.1]}$$

$$t_{toriesfèric} = \frac{P L M}{2 S E - 0.2 P} + C_A + C_{FAB} \text{ [Eq. 11.1.6]}$$

El material que s'ha escollit és l'acer inoxidable AISI 316L, degut a que els fluids que hi circulen per els dipòsits son compatibles amb aquest material, a excepció del dipòsit DP-201 per el qual hi circula HCL, però és tan petita la concentració que es suposa com a menyspreable (0,3% molar) pel que fa a corrosió.

El resum d'especificacions generals del disseny mecànic dels dipòsits pulmó es mostra a la taula següent. La densitat del AISI 316L és de 7980 Kg/m³.

Taula 11. Especificacions generals dels dipòsits de les columnes.

Paràmetre	DP-201	DP-203	DP-205	DP-207	DP-301
t cilindre total (mm)	5	5	5	5	5
t toriesfèric total (mm)	5	5	5	5	5
S (PSI)	15700				
E cilindre	0,85				
E toriesfèric	1				

- Pes de l'equip

Per calcular el pes dels dipòsits de les columnes sencers s'ha de calcular el pes dels fons toriesfèrics i el del cilindre. Es calcula el pes de les tres estructures per separat i es sumen els pesos. A continuació la taula 11.X.X conté els resultats obtinguts per els pesos dels dipòsits buits i en operació.

Taula 11. Pesos del dipòsit pulmó de les columnes buides i en operació.

Paràmetre	DP-201	DP-203	DP-205	DP-207	DP-301
M líquid (Kg)	27342,0	1481,5	31554,4	7072,4	6990,0
M cilindre (Kg)	1201,5	138,9	1345,0	1213,2	487,1
M fons toriesf. (Kg)	123,2	14,1	139,3	210,9	49,7
M buit (Kg)	1324,8	153,0	1484,3	1424,1	536,8
M en operació (Kg)	28666,8	1634,5	33038,8	8496,4	7526,8

11.14.2. Dipòsits de toluè

El la refrigeració dels reactors R-203 i R-204 es fa mitjançant toluè recirculat, que una part prové del condensador del mateix sistema de refrigeració dels reactors, i una altra part del tanc d'emmagatzematge de toluè. El sistema de refrigeració necessitarà un dipòsit pulmó DP-210 a l'entrada del mateix per garantir un subministrament constant de refrigerant. La capacitat depèn del tems de residència i de la fracció de ple que s'ha fixat que són de 15 minuts i 80% respectivament.

Els mescladors DM-201, DM-202 i DM-203 treballen de forma seqüencial, es a dir, mentre un subministra la mescla de forma continua en l'altre es prepara la mescla. El α -Naftol s'introdueix al mesclador de forma discontinua amb un dosificador. Pel que fa al toluè, entra al mesclador provinent del sistema de refrigeració en forma continua, per tant s'instal·la un tanc pulmó just abans dels mescladors DM-201, DM-202 i DM-203. La capacitat del dipòsit correspon a 2 vegades el volum d'un dels mescladors.

A continuació s'exposarà els càlculs generals que s'han de realitzar per el dimensionament, disseny mecànic i càlculs dels pesos dels dipòsits i posteriorment es mostrarà els resultats dels mateixos.

- Venteig

Els sistemes de venteig son sistemes dissenyats per prevenir els efectes de les alteracions de la pressió interna de un recipient d'emmagatzematge o de procés. La mida del venteig d'un tanc, com s'ha dit en les notes introductòries ha de ser de mida com a mínim igual o major a la de les canonades de carga o descarrega i en cap cas ser inferiors a 35 mm de diàmetre.

La figura 11.2.1.6 servei per triar el valor factor de reducció, en el cas que la situació no aparegui en la figura el valor de F serà la unitat. En aquest cas el valor de F és 1. La taula 11.5.1 mostra les capacitats totals de venteig dels mescladors que treballen a pressió atmosfèrica.

Taula 11.2.3.6 Kg/h vapor de líquid de venteig dels dipòsits pulmó de toluè.

	DP-209	DP-210
A (m ²)	27,24	22,26
Q (kJ/h)	2099108	1778638,6
Kg/h	63	56

- Condicions d'emmagatzematge

Les condicions d'emmagatzematge varien en funció de les condicions a les que es treballa en les diferents columnes. La taula següent presenta les condicions d'emmagatzematge dels diferents dipòsits pulmó de les columnes.

Taula 11. Condicions d'emmagatzematge dels dipòsits pulmó de les columnes.

Paràmetre	DP-210	DP-209
T operació (°C)	25	40
T disseny (°C)	45	65
P operació (atm)	1	1
P disseny (atm)	1,65	1,65

- Capacitat d'emmagatzematge

Si es fixa un temps de residència de 15 minuts, la capacitat d'emmagatzematge del DP-210 resulta:

$$V_{DP-208} = 13528,6 \frac{kg^3}{h} \cdot \frac{1 h}{60 min} \cdot 15 min \cdot \frac{m^3}{845,5 kg} = 7,51 m^3 \rightarrow 80\% ple \rightarrow 9,01 m^3$$

La capacitat del DP-211 és el necessari per realitzar la seqüència dels mescladors DM-201, DM-202:

$$V_{DP-209} = 3,16 m^3 \rightarrow 80\% ple \rightarrow 3,8 m^3$$

- Dimensions

A continuació s'exposen les equacions utilitzades per al càlcul del volum de les parts dels dipòsits. Es suposa un valor típic per a dipòsits de 3 per a la relació L/D. El equip consta d'un cos central cilíndric més un fons superior i inferior toriesfèric ,per tant el volum de l'equip serà la suma del volum de les parts descrites anteriorment.

En aquests dipòsits també es fan els arrodoniments de la alçada i diàmetre del cilindre per evitar sobre costos com bé s'explica a la introducció dels tancs d'emmagatzematge (apartat 11.1.1)

La taula següent mostra les dimensions obtingudes per els diferents dipòsits pulmó de les columnes.

Taula 11. Dimensions dels dipòsits pulmó de les columnes.

Paràmetre	DP-210	DP-209
Volum real (m3)	9,16	3,83
H total (cil+fons) (m)	5,23	3,94
Diàmetre (m)	1,54	1,15

- Disseny mecànic

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix les columnes de líquid que hi ha dins dels dipòsits. Com els dipòsits estan col·locats de manera vertical els càlculs es fan en base a l'altura de l'equip i amb l'equació 11.1.5 presentada a continuació.

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h \text{ [Eq. 11.1.5]}$$

La taula 11.X.X mostra les temperatures i pressions d'operació i de disseny. A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{disseny} = (\Delta P + P_o) \cdot 1.15 \text{ [Eq. 11.1.4]}$$

$$T = T_{operació} + 20^{\circ}C = 45^{\circ}C \text{ [Eq. 11.1.6]}$$

El dipòsit consta d'un fons inferior i superior toriesfèric i un cos cilíndric com s'ha dit anteriorment. Amb les equacions que es presenten a continuació es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior i inferior toriesfèric.

$$t_{cilindre} = \frac{P R}{S E - 0.6 P} + C_A \text{ [Eq. 11.1.1]}$$

$$t_{toriesfèric} = \frac{P L M}{2 S E - 0.2 P} + C_A + C_{FAB} \text{ [Eq. 11.1.1]}$$

El material que s'ha escollit és l'acer inoxidable AISI 316L, degut a que els fluids que hi circulen per els dipòsits son compatibles amb aquest material.

Taula 11. Especificacions generals dels dipòsits de les columnes.

Paràmetre	DP-209	DP-210
t cilindre total (mm)	5	5
t toriesfèric total (mm)	5	5
S (PSI)	15700	
E cilindre	0,85	
E toriesfèric	1	

- Pes de l'equip

Per calcular el pes dels dipòsits DP-209 i DP-210 sencers s'ha de calcular el pes dels fons toriesfèrics i el del cilindre. Es calcula el pes de les tres estructures per separat i es sumen els pesos.

A continuació la taula següent conté els resultats obtinguts per els pesos dels dipòsits buits i en operació.

Taula 11. Pesos del dipòsits pulmó de les columnes buides i en operació.

Paràmetre	DP-209	DP-210
M líquid (Kg)	8579,4	2655,9
M cilindre (Kg)	544,2	249,2
M fons toriesf. (Kg)	56,1	25,7
M buit (Kg)	600,3	274,9
M en operació (Kg)	9179,7	2930,8

11.14.3. Dipòsits de condensats

Per assegurar un correcte funcionament de les columnes, aquestes han de portar instal·lades dipòsits de condensats. La funció dels dipòsits de condensats és acumular una certa quantitat de líquid constant com a reflux de condensats.

Tant el dimensionament, el disseny mecànic, el temps de residència, com el càlcul dels pesos de l'equip segueix la mateixa metodologia utilitzada en els dipòsits pulmó de les columnes anteriors.

A continuació s'exposarà els càlculs generals que s'han de realitzar per el dimensionament, disseny mecànic i càlculs dels pesos dels dipòsits de condensats amb els corresponents resultats.

- Venteig

Els sistemes de venteig son sistemes dissenyats per prevenir els efectes de les alteracions de la pressió interna de un recipient d'emmagatzematge o de procés. La mida del venteig d'un tanc, com s'ha dit en les notes introductòries ha de ser de mida com a mínim igual o major a la de les canonades de carga o descarrega i en cap cas ser inferiors a 35 mm de diàmetre.

La figura 11.2.1.6 servei per triar el valor factor de reducció, en el cas que la situació no aparegui en la figura el valor de F serà la unitat. En aquest cas el valor de F és 1. La taula 11.5.1 mostra les capacitats totals de venteig dels mescladors que treballen a pressió atmosfèrica.

Taula 11.6.1.1 Kg/h de vapor de líquid de venteig dels dipòsits.

Compost	A	Q	cabal pressió	L (kJ/kg)	F	Hcil	D
DP-202	1,76	221685,35	6,661	3,33E+04	1	1,3	0,43
DP-204	1,08	149235,09	6,099	2,45E+04	1	1	0,345
DP-206	9,42	879222,37	26,245	3,35E+04	1	3	1
DP-208	2,94	338065,61	12,352	2,74E+04	1	1,67	0,56
DP-302	4,21	454030,72	23,647	1,92E+04	1	2	0,67

- Condicions d'emmagatzematge

La taula següent presenta les condicions d'emmagatzematge dels diferents dipòsits pulmó de les columnes ja que aquestes varien en funció de les condicions a les que es treballa en les diferents columnes.

Taula 11. Condicions d'emmagatzematge dels dipòsits de condensats de les columnes.

Paràmetre	DP-202	DP-204	DP-206	DP-208	DP-302
T operació (°C)	77	7,6	100	38,8	40
T disseny (°C)	97	27,6	120	58,8	60
P operació (atm)	1	1	1	1	0,39
P disseny (atm)	1,3	1,29	1,42	1,28	0,62

- Capacitat d'emmagatzematge

La capacitat d'emmagatzematge ve donada per el cabal de vapor que condensa o millor dit del líquid condensat ,per el temps de residència fixat i per la fracció de buit o ple. Com el temps de residència és el mateix per a tots i la fracció de buit o ple també, el que fixarà la capacitat serà el cabal volumètric que hi circuli. S'ha establert una fracció de ple típica per a dipòsits del 80%. El temps de residència fixat es de 15 min ja que es creu suficient per garantir un cabal constant de líquid.

- Dimensions

A continuació s'exposen les equacions utilitzades per al càlcul del volum de les parts dels dipòsits. Es suposa un valor típic per a dipòsits de 3 per a la relació L/D. El equip consta d'un cos central

cilíndric més un fons superior i inferior toriesfèric ,per tant el volum de l'equip serà la suma del volum de les parts descrites anteriorment.

L'alçada del líquid es calcula amb les expressions iguals que els dipòsits de condensats i els tancs d'emmagatzematge amb la mateixa metodologia i les mateixes suposicions.

En aquests dipòsits també es fan els arrodoniments de la alçada i diàmetre del cilindre per evitar sobre costos com bé s'explica a la introducció dels tancs d'emmagatzematge (apartat 11.1.1)

La taula següent mostra les dimensions obtingudes per els diferents dipòsits de condensats de les columnes.

Taula 11. Dimensions dels dipòsits de condensats de les columnes.

Paràmetre	DP-202	DP-204	DP-206	DP-208	DP-302
Volum real (m3)	0,2	0,1	2,51	0,439	0,754
H total (cil+fons) (m)	1,46	1,13	3,38	1,88	2,25
Diàmetre (m)	0,43	0,345	1	0,56	0,67

- Disseny mecànic

Per calcular el gruix s'ha de tindre en compte la pressió que exerceix les columnes de líquid que hi ha dins dels dipòsits. Com el dipòsits estan col·locats de manera vertical, igual que els dipòsits pulmó de les columnes, els càlculs es fan en base a l'altura de l'equip i amb l'equació Eq. 11.1.5 presentada a continuació.

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h \text{ [Eq. 11.1.5]}$$

La taula 11.X.X mostra les temperatures i pressions d'operació i de disseny. A continuació es mostra com es calculen la pressió i temperatura de disseny:

$$P_{disseny} = (\Delta P + P_o) \cdot 1.15 \text{ [Eq. 11.1.4]}$$

$$T = T_{operació} + 20^\circ C = 45^\circ C \text{ [Eq. 11.1.6]}$$

El dipòsit consta d'un fons inferior i superior toriesfèric i un cos cilíndric com s'ha dit anteriorment. Amb les equacions que es presenten a continuació es calculen els gruixos del cilindre, del fons superior i inferior toriesfèric.

$$t_{cilindre} = \frac{P R}{S E - 0.6 P} + C_A \text{ [Eq. 11.1.1]}$$

$$t_{toriesfèric} = \frac{P L M}{2 S E - 0.2 P} + C_A + C_{FAB} \text{ [Eq. 11.1.2]}$$

El material que s'ha escollit és l'acer inoxidable AISI 316L, degut a que els fluids que hi circulen per els dipòsits son compatibles amb aquest material, a excepció del dipòsit DP-205 i DP-313 per el qual hi circula HCL. En el cas dels dipòsits per els quals hi circula HCL el material de construcció serà Hastelloy C-276.

Taula 11. Especificacions generals dels dipòsits de les columnes.

Paràmetre	DP-202	DP-204	DP-206	DP-208	DP-302
t cilindre total (mm)	5	5	5	5	5
t toriesfèric total (mm)	5	5	5	5	5
S (PSI)	15700				
E cilindre	0,85				
E toriesfèric	1				

- Pes de l'equip

Per calcular el pes dels dipòsits de condensats de les columnes sencers s'ha de calcular el pes dels fons toriesfèrics i el del cilindre. Es calcula el pes de les tres estructures per separat i es sumen els pesos.

A continuació la taula següent conté els resultats obtinguts per els pesos dels dipòsits buits i en operació.

Taula 11. Pesos del dipòsits de condensats de les columnes buides i en operació.

Paràmetre	DP-202	DP-204	DP-206	DP-208	DP-302
M líquid (Kg)	189,7	110,7	1856,7	268,1	504,1
M cilindre (Kg)	35,2	21,8	188,5	58,9	84,3
M fons toriesf. (Kg)	3,6	2,3	19,5	6,1	8,8
M buit (Kg)	38,9	24,1	208,0	65,0	93,1
M en operació (Kg)	228,6	134,8	2064,6	333,1	597,2

11.14.4. Tancs de condensats del downstream

A continuació s'exposarà els càlculs generals que s'han de realitzar per el dimensionament, disseny mecànic i càlculs dels pesos dels tancs de condensats del downstream amb els corresponents resultats.

- Venteig

Taula 11.14.1. Kg/h de vapor de líquid de venteig dels dipòsits

Compost	A	Q	cabal pressió	L (kJ/kg)	F	Hcil	D
DP-303	4,27	459580,09	13,071	3,52E+04	1	2	0,68
DP-304	2,36	282104,19	11,195	2,52E+04	1	1,5	0,5
DP-305	2,02	248969,25	6,711	3,71E+04	1	1,4	0,46
DP-306	3,45	385614,38	17,370	2,22E+04	1	1,8	0,61
DP-307	4,21	454030,72	14,100	3,22E+04	1	2	0,67

- Capacitat d'emmagatzematge

La capacitat d'emmagatzematge ve donada per el cabal de vapor que condensa ,per el temps de residència fixat i per la fracció de buit o ple. Com el temps de residència és el mateix per a tots i la fracció de buit o ple també, el que fixarà la capacitat serà el cabal volumètric que hi circuli.

S'ha establert una fracció de ple típica per a dipòsits del 80%. El temps de residència fixat es de 15 minuts.

- Dimensions

El dimensionament d'aquests dipòsits es realitzen seguint la mateixa metodologia i utilitzant les mateixes equacions i suposicions que per els dipòsits de condensats.

La taula següent mostra les dimensions obtingudes per els diferents tancs de buit.

Taula 11. Dimensions dels dipòsits de condensats.

Paràmetre	DP-302	DP-303	DP-304	DP-305	DP-306	DP-307
Volum real (m ³)	0,77	0,31	0,24	0,56	0,75	0,19
H total (cil+fons) (m)	2,26	1,69	1,57	2,03	2,25	1,46
Diàmetre (m)	0,68	0,5	0,46	0,61	0,67	0,67

- Disseny mecànic

El disseny mecànic i el pes de l'equip també es realitza utilitzant les mateixes equacions, suposicions i metodologia que per els dipòsits de condensats anteriors.

El material que s'ha escollit és l'acer inoxidable AISI 316L ja que el toluè que condensa es totalment compatible amb aquest material.

Taula 11. Especificacions generals dels dipòsits de condensats.

Paràmetre	DP-302/DP-303	DP-304	DP-305	DP-306	DP-307
t cilíndre total (mm)	5	5	5	5	5
t toriesfèric total (mm)	5	5	5	5	5
S (PSI)	15700				
E cilindre	0,85				
E toriesfèric	1				