

PLANTA DE PRODUCCIÓ DE MONOCLORBENZÈ

Universitat Autònoma de Barcelona

ESCOLA D'ENGINYERIA

Treball Fi de Grau

GRAU EN ENGINYERIA QUÍMICA



TUTOR: Marc Peris

BARCELÓ GIL, CARLOS

BERNABEU SANS, ALBERT

CARBÓ MONMANY, ORIOL

MELERO FLECHA, PERE

VERDÉS MAS, BERNAT

ÍNDEX

11. 1. Tancs d'emmagatzematge	5
11.1.1. Característiques de disseny a pressió atmosfèrica	5
11.1.1.1. Disseny del fons.....	5
11.1.1.2. Disseny del cos	6
11.1.1.3. Disseny del capçal del tanc.....	7
11.1.1.4. Pes del tanc buit.....	8
11.1.1.5. Pes del cos	8
11.1.1.6. Pes del sostre cònic	8
11.1.1.7. Pes del fons del tanc.....	9
11.1.1.8. Pes del tanc d'operació	9
11.1.1.9. Venteigs dels tancs.....	9
11.1.1.10. Disseny del serpentí	10
11.1.1.11. Disseny de cubetes de retenció	10
11.1.2. Disseny del tanc de benzè	11
11.1.3. Disseny del tanc de monoclorbenzè	14
11.1.4. Disseny del tanc d'àcid clorhídric.....	18
11.1.5. Disseny del tanc d'hidròxid de sodi.....	22
11.1.6. Característiques dels tancs a pressió	26
11.1.6.1. Pressió de disseny	26
11.1.6.2. Temperatura de disseny.....	26
11.1.6.3. Disseny del cos cilíndric.....	26
11.1.6.4. Disseny del fons i el sostre	27
11.1.6.5. Pes del tanc torisfèric buit.....	29
11.1.6.6. Pes del tanc d'operació	30

11.1.7. Disseny del tanc d'emmagatzematge de clor	30
11.1.8. Disseny de tancs per a sòlids.....	34
11.1.9. Disseny tanc d'emmagatzematge de clorur de ferro.....	34
11.1.10. Disseny tanc d'emmagatzematge de diclorbenzè	35
11.1.11. Disseny de tancs pulmó.....	35
11.1.12. Disseny del tanc pulmó de benzè fresc i recirculat.....	36
11.1.13. Disseny tanc pulmó de la sortida dels reactors	39
11.1.14. Disseny del tanc pulmó de la columna (C-401)	42
11.1.15. Disseny del tanc pulmó de la columna (C-402)	46
11.1.16. Disseny del tanc pulmó de la columna d'absorció d'hcl	49
11.1.17. Disseny de mescladors	52
11.1.17.1. Disseny dels agitadors dels mescladors	52
11.1.18. Disseny del tanc mesclador de benzè i catalitzador	55
11.1.19. Disseny tanc d'emmagatzematge del mesclador de naoh i aigua	58
11.1.20. Disseny tanc d'emmagatzematge de l'efluent residual	61
11.2. Reactors.....	66
11.2.1. Reactor de cloració.....	66
11.2.1.1. Disseny mecànic	68
11.2.1.2. Difusor o Sparger.....	71
11.2.1.3. Refrigeració	72
11.2.1.4. Agitació.....	74
11.2.1.5. Aïllament	75
11.2.2. Reactor de precipitació i neutralització	76
11.2.2.1. Disseny mecànic	77
11.2.2.2. Agitació.....	77
11.2.2.4. Refrigeració	78
11.2.2.5. Aïllament	78

11.3. Centrífuga.....	79
11.4. Decantadors	80
11.4.1. Decantador d-301	80
11.4.2. Decantador D-601	81
11.5. Columnes de destil·lació	83
11.5.1. Disseny de les columnes	83
11.5.2. Disseny intern de les columnes.....	85
11.5.3. Selecció del tipus de rebliment	85
11.5.4. Interns columnes.....	86
11.5.4.1. Distribuïdors de líquid	86
11.5.4.2. Redistribuïdors de líquid	87
11.5.4.3. Suport del rebliment	87
11.5.4.4. Entrada del líquid	87
11.5.5. Disseny mecànic de les columnes.	88
11.5.6. Determinació de l'alçada de les columnes.....	89
11.5.7. Determinació del pes de les columnes.	90
11.5.8. Gruix de l'aïllant	90
11.6. Columnes d'absorció	92
11.6.1. Columna d'absorció C-501	92
11.6.1.1. Disseny funcional de la columna d'absorció C-501.....	92
11.6.1.2. Dimensionament de la columna.	92
11.6.1.2.1. Selecció del tipus de rebliment.....	93
11.6.1.2.2. Interns columna	94
11.6.1.3. Disseny mecànic de la columna d'absorció.....	95
11.6.1.3. Determinació de l'alçada de la columna.....	96
11.6.1.4. Determinació del pes de la columna.....	96
11.6.1.5. Gruix d'aïllant.	97

11.6.2. Columna d'absorció d'hcl	98
11.6.2.1. Balanços de matèria	99
11.6.2.2. Temperatura d'operació i necessitats d'aigua de refrigeració	99
11.6.2.3. Diàmetre intern i nombre de tubs.	100
11.6.2.4. Càlcul del coeficient global de transferència U.....	100
11.6.2.5. Longitud de tubs segons la transferència de matèria.	102
11.6.3. Absorbidor adiabàtic c-602.	105
11.7. Disseny del separador vapor-líquid.....	107
11.7.1. Introducció	107
11.7.2. Disseny funcional i disseny mecànic	107
11.8. Disseny de canonades	108
11.8.1. Diàmetre de la canonada	108
11.8.2. Velocitats típiques dels fluids.....	109
11.8.3. Determinació del diàmetre de la canonada.....	110
11.8.4. Aïllament tèrmic.....	110
11.9. Disseny de bescanviadors de calor.	112
11.9.1. Disseny dels bescanviadors	112
11.10 Disseny de compressors.....	115
11.10.1 Número d'etapes.....	115
11.11 Bombes.....	116
11.11.1 Selecció de bombes.....	116
11.11.2 Càlcul de la potència de la bomba	119
11.12. Bibliografia	121

11. MANUAL DE CÀLCULS

11. 1. Tancs d'emmagatzematge

Els productes que s'emmagatzemen són els dos reactius (C_6H_6 , Cl_2), el catalitzador ($FeCl_3$) i els 3 productes que s'obtenen en el procés (C_6H_5Cl , $C_6H_4Cl_2$ i $HCl_{(aq)}$).

S'han dissenyat dos tipus de tancs, atmosfèrics i a pressió. D'aquesta manera, s'ha seguit el codi API 650 (*American Petroleum Institute*) pels tancs que es troben a pressió atmosfèrica i el codi ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) pels tancs a pressió.

Per fer el disseny s'ha de saber de quin material serà el tanc, ja que s'han de prendre certes consideracions a l'hora de fer el disseny. És per això que s'han adjuntat les característiques a tenir en compte en la taula 11,1,

Taula 1. Paràmetres dels materials amb els que s'ha fet el disseny de tancs atmosfèrics

Material	Sd (Mpa)	St (MPa)	CA (mm)	ρ (Kg(m ³))	E
AISI 304	155	140	2,5	7950	0,85
HC-22	155	145	2,5	8690	0,85

Taula 2. Paràmetres del material amb el que s'ha fet el disseny dels tancs a pressió.

Material	S (MPa)	CA (mm)	G (Cl_2)	E
St 35,7	200	2,5	1,6	0,85

11.1.1. Característiques de disseny a pressió atmosfèrica

Els tancs d'emmagatzematge es divideixen en 3 parts; el fons, el capçal i el cos del tanc. D'aquesta manera, i seguint la API 650, es mostren els passos que s'han seguit per a dissenyar tots els tancs a pressió.

11.1.1.1. Disseny del fons

Pel fons dels tancs d'emmagatzematge, s'ha escollit un fons pla ja que la restricció que s'aplica es que la resistència permissibile del terreny del sòl ha de ser, coma mínim, de 1,465 Kg/cm². El terreny on es construirà la planta té una resistència permissibile de 2 Kg/cm², per tant el fons escollit compleix amb els requeriments del la norma.

Les plaques del fons han de tenir un gruix de corrosió mínim de 6 mm i el seu diàmetre ha de ser 50 mm més gran que el diàmetre extern del cos. Per tant, el gruix de corrosió i el diàmetre del fons s'han de calcular de la següent manera:

$$CT = t - CA \quad (1)$$

On:

CT es el gruix de corrosió (mm)

t és l'espessor del fons (mm)

CA es la tolerància a la corrosió (mm).

El diàmetre del fons es calcula segons la següent equació:

$$D_{fons} = D_{ex,tanc} + 0,05 \text{ mm} \quad (2)$$

11.1.1.2. Disseny del cos

Per calcular l'espessor del cos del tancs s'ha seguit el mètode d'un peu (*1-foot Method*), ja que serveix per a un diàmetre de fins a 61 m.

Seguint aquest mètode s'ha calculat l'espessor mínim del cos, tenint en compte les 3 consideracions següents:

$$t_d = \frac{4,9 D (h - 0,3) G}{S_d E} + CA \quad (3)$$

$$t_t = \frac{4,9 D (h - 0,3)}{S_t E} \quad (4)$$

On:

t_d és l'espessor de disseny (mm)

t_t és l'espessor de la carcassa per prova hidrostàtica (mm)

D és el diàmetre del tanc (m)

h és el nivell de líquid (m)

G és la gravetat específica de disseny del líquid emmagatzemat (adimensional)

S_d és la tensió admissible per a la condició de disseny (MPa)

S_t és la tensió admissible per condicions de prova hidrostàtica (MPa)

El valor que s'ha de prendre d'espessor és el més gran de les equacions (3) i (4). Tot i això, hi ha una consideració més, ja que l'espessor mai pot ser inferior als valors que relacionen el diàmetre nominal del tanc amb l'espessor del cos de la taula 11,2:

Taula 3. Espessors mínims del cos del tanc en funció del diàmetre.

Diàmetre nominal del tanc (m)	Espessor nominal del cos (mm)
<15	5
15-36	6
36-60	8
>60	10

Per tant, el valor que s'ha de prendre per a l'espessor és el valor més gran de t_d , t_t i la taula 11,X.1,

11.1.1.3. Disseny del capçal del tanc

Pel disseny del capçal del tanc, s'ha escollit un fons superior cònic auto suportat ja que són els més utilitzats i econòmics en el tipus de tancs que té la planta, perquè no superen els 18 metres de diàmetre. Aquest capçal estan format per un con fet de plaques soldades que es capaç de sostenir-se sense cap element estructural addicional; només pel seu perfil de coronament. Aquest tipus de capçal han de tenir un angle entre 9,5 i 37 graus, i el seu espessor ha de prendre un valor entre 4,76 i 12,8 mm.

Les càrregues per neu s'han menyspreat i l'espessor del capçal s'ha calculat mitjançant la següent equació:

$$T_t = \frac{D}{4800 \sin \theta} + CA \quad (5)$$

On:

D és el diàmetre del cos del tanc (mm)

θ és l'angle del sostre respecte la horitzontal ($^\circ$)

CA és la tolerància a la corrosió (mm)

T_t és l'espessor del cos mínim requerit (mm)

Les característiques del sostre que s'ha escollit es poden veure a la figura 11,1 de forma molt visual.

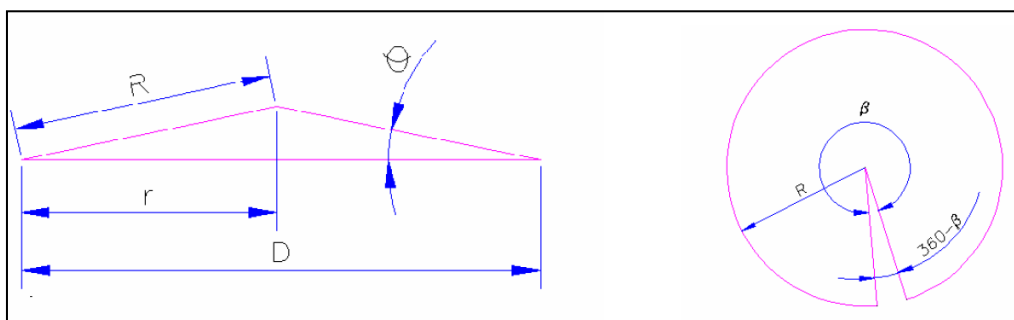


Figura 1. Característiques del sostre cònic.

A més de l'espessor del sostre, també s'ha de calcular l'alçada d'aquest en base a l'angle que s'hagi decidit, emprant les dues equacions següents:

$$r = K \cdot \cos \theta \quad (6)$$

$$H_{con} = \sin \theta \cdot K \quad (7)$$

Un altra dels punts a tenir en compte quan es dissenyen els tancs són els pesos d'aquests, tant buits com plens.

11.1.1.4. Pes del tanc buit

Per calcular el pes del tanc buit, i de la mateixa manera que s'ha fet amb els espessors, s'han calculat els de les 3 parts del tanc; cos, sostre i fons.

11.1.1.5. Pes del cos

Pel càlcul del cos s'ha tingut en compte el volum d'un cilindre, ja que els tancs tenen aquesta forma, l'espessor del tanc i finalment la densitat del material. D'aquesta manera l'equació per calcular el pes del cos és la següent:

$$M_{cos} = (V_{ext} - V_{int}) \cdot \rho_{material} \quad (8)$$

On:

M_{cos} és el pes del cos buit (Kg)

V_{ext} és el volum del cos tenint en compte l'espessor, calculat com: $V_{ext} = \frac{\pi}{4} D_e^2 H \text{ (m}^3\text{)}$

V_{int} és el volum interior del cos, calculat com: $V_{int} = \frac{\pi}{4} D_i^2 H \text{ (m}^3\text{)}$

$\rho_{material}$ és la densitat del material de construcció del tanc (Kg/m³)

11.1.1.6. Pes del sostre cònic

$$M_{sostre} = (V_{ext} - V_{int}) \cdot \rho_{material} \quad (9)$$

On:

M_{sostre} és el pes del sostre (Kg)

V_{ext} és el volum del sostre tenint en compte l'espessor, calculat com: $V_{ext} = \frac{\pi r e^2 H}{3} (m^3)$

V_{int} és el volum interior del sostre, calculat com: $V_{int} = \frac{\pi r i^2 H}{3} (m^3)$

$P_{material}$ és la densitat del material de construcció del tanc (Kg/m^3)

11.1.1.7. Pes del fons del tanc

Per calcular el pes del fons del tanc s'ha emprat l'equació del volum de la base d'un cilindre:

$$M_{fons} = (\pi \cdot r^2 \cdot t) \cdot \rho_{material} \quad (10)$$

On:

r és el radi del fons (m)

t és la gruixa del fons, per tant la seva alçada (m)

$\rho_{material}$ és la densitat del material de construcció del tanc (Kg/m^3)

11.1.1.8. Pes del tanc d'operació

Un cop calculat el pes de cada part del tanc buit, s'ha calculat el pes del tanc ple de la substància que s'emmagatzema de la forma següent:

$$M_{buit total} = M_{cos} + M_{sostre} + M_{fons} \quad (11)$$

$$M_{tanc ple} = M_{buit total} + (V_{fluid} \cdot \rho_{fluid}) \quad (12)$$

On:

$M_{buit total}$ és el pes del tanc buit en la seva totalitat (Kg)

$M_{tanc ple}$ és el pes del tanc ple del producte a emmagatzemar (Kg)

V_{fluid} és el volum de fluid que s'emmagatzema dins del tanc dissenyat (m)

P_{fluid} és la densitat del fluid emmagatzemat al tanc dissenyat (Kg/m^3)

11.1.1.9. Venteigs dels tancs

El venteig o l'àlibi de pressió dels tancs és necessari per prevenir la formació del buit o l'augment o disminució de pressió interna i evitar així la deformació dels capçals de les parets com a conseqüència de les variacions de pressió produïdes per efecte de càrrega i descàrrega o la variació brusca de la temperatura.

El disseny dels venteigs segueix la normativa ITC-MIE-APQ1 (“Almacenamiento de líquidos inflamables y combustibles”). La normativa també indica que el sistema de venteig tindrà com a mínim la mida igual o major a una de les canonades de entrada o sortida del tanc, però en cap moment aquesta tindrà un diàmetre inferior al 35 mm.

Just a la sortida del venteig s’ha implantat un filtre de carbó actiu per a tractar els gasos que surten pel venteig, tal i com s’ha explicat al punt (7) de medi ambient.

11.1.1.10. Disseny del serpentí

Certes substàncies, en el cas de la planta el benzè, tenen temperatures de fusió dins el rang en el què al llarg de l’any es troba la planta per la seva situació geogràfica. És per això que els tancs de benzè necessiten un escalfador per a què la temperatura del fluid no baixi per sota del punt de fusió i solidifiqui el benzè, ja que podria portar complicacions important en el procés.

En el cas de la planta, s’ha decidit posar serpentins als tancs d’emmagatzematge per tal de tenir el benzè per sobre de la seva temperatura de fusió durant tot l’any.

Com que durant l’any, les temperatures van fluctuant, i no més estaran actius quan les condicions meteorològiques ho requereixin, no s’ha establert un cabal d’aigua d’escalfament. Aquest cabal anirà fluctuant en funció de les condicions que hi hagi a cada moment.

11.1.1.11. Disseny de cubetes de retenció

Tal i com s’ha esmentat a l’apartat 2, les cubetes de retenció són imprescindibles per evitar grans accidents referents a les fuites de substàncies químiques. És per això que el seu disseny és molt important i s’ha de fer de forma acurada.

Pel que fa als tancs atmosfèrics, les cubetes de retenció han de seguir unes pautes que s’expliquen a continuació:

- Distància entre la paret de la cubeta i el tanc $\rightarrow 1\text{m}$
- La distància entre tancs ve donada per l’equació següent $\rightarrow d = 0,5 \cdot D_{tanc}^1$
- Alçada de la cubeta donada per la següent equació $\rightarrow h = \frac{V}{S}$

On:

V és el volum del tanc més gran

S és un factor corrector donat per l’equació: $S = (amplada \cdot llargada) - ((tancs - 1) \cdot \pi \cdot r^2)$

¹ Sempre per sobre 1,5m

11.1.2. Disseny del tanc de benzè

El primer pas per a començar el disseny del tanc ha estat calcular la quantitat de producte a emmagatzemar, amb un stock de 3 dies, de la següent forma:

$$8075 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{1 m^3}{878,9 Kg} \cdot \frac{24 h}{1 dia} \cdot 3 dies stock = 661,73 m^3$$

D'aquesta manera s'han establert els paràmetres inicials del disseny, recollits a la taula 11,3:

Taula 4. Paràmetres inicials del disseny del tanc de benzè.

T operació (°C)	20
P operació (bar)	1,01
Temps de stock (dies)	3
Q (kg/h)	8075
V a emmagatzemar (m³)	661,73

El següent pas ha estat dividir aquest volum per obtenir tancs més petits, adients a les consideracions. En el cas de la planta, s'ha decidit dividir el volum d'emmagatzematge en 8 tancs i amb un sobre dimensionament del 20%:

$$Volum tanc = \frac{661,73 m^3}{8 tancs} \cdot 1,2 = 99 m^3 \rightarrow 100 m^3$$

$$\% d'ocupació del tanc = \frac{100}{652,31/8} = 82,7 \%$$

Per tant, s'han obtingut 8 tancs de 100 m³ al 82,7% d'ocupació per tal d'emmagatzemar tot el benzè.

Un cop establert el volum de cada tanc s'han calculat les dimensions d'aquest, mitjançant una equació i una relació de H/D:

$$V_{tanc} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (13)$$

$$H/D = 1,5$$

Fent un sistema d'equacions s'han trobat els valors del diàmetre (D) i d'alçada del tanc (H)

- D = 4,4 m
- H = 6,6m

El nivell del líquid serà la relació entre l'alçada calculada i el sobre dimensionament del tanc; per tant:

$$H_{liquid} = 6,6 \cdot 0,827 = 5,46 \text{ m}$$

Càlcul de l'espessor del cos

L'espessor del cos s'ha calculat mitjançant les equacions (3) i (4). Aquests valors s'han comparat amb els de la taula 11,2 i s'ha escollit el més gran:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot 4,4 \cdot (6,6 - 0,3) \cdot 0,87}{155 \cdot 0,85} + 2,5 = 3,41 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4,9 \cdot 4,4 \cdot (6,6 - 0,3)}{140 \cdot 0,85} = 1,14 \text{ mm}$$

Valor de la taula 11,2 per a D <15m → 5 mm

Per tant, l'espessor del cos del tanc és de 5 mm.

Càlcul del sostre cònic del tanc

Per calcular les dimensions i l'espessor del sostre s'utilitzen varies correlacions de la norma API 650, amb els paràmetres inicials recollits a la taula següent:

Taula 5. Paràmetres del con.

R (m)	2,25
Θ (º)	15
Sin (Θ)	0,259
Cos (Θ)	0,966
K	2,329

Alçada del con equació (7): $H = 0,259 \cdot 2,329 = 0,603 \text{ m}$

Per calcular l'espessor del sostre s'ha emprat l'equació (5), tenint en compte que l'espessor mínim de disseny ha de ser 4,76 mm.

$$T_t = \frac{4400}{4800 \cdot 0,259} + 2,5 = 6,04 \text{ mm}$$

Per tant les especificacions del sostre del tanc de benzè són les recollides a la taula següent:

Taula 6. Especificacions del sostre cònic del tanc de benzè.

Tt (mm)	6,04
Di (m)	4,4
De (m)	4,41
H (m)	0,603
Θ (º)	15

Càlcul del fons del tanc

Tal com s'ha explicat, l'espessor del fons ve donat pel gruix i per la tolerància de corrosió. Sabent que el mínim gruix de corrosió és de 6 mm i que la tolerància a la corrosió és de 2,5 mm i amb l'equació (1) s'ha obtingut el valor.

$$t = 6 + 2,5 = 8,5 \text{ mm}$$

L'altre paràmetre a tenir en compte del fons és el diàmetre. El seu valor s'ha obtingut emprant l'equació (2).

$$D_{fons} = 4,41 + 0,05 = 4,46 \text{ m}$$

Càlcul del pes del tanc buit

Emprant les equacions (8), (9) i (10) s'han obtingut els valors dels 3 pesos de les 3 parts del tanc.

Pes cos

$$M_{cos} = \left(\left(\frac{\pi}{4} \cdot 4,41^2 \cdot 6,75 \right) - \left(\frac{\pi}{4} \cdot 4,4^2 \cdot 6,75 \right) \right) \cdot 7950 = 3631 \text{ Kg}$$

Pes del sostre

$$M_{sostre} = \left(\left(\frac{\pi \cdot 2,21^2 \cdot 0,603}{3} \right) - \left(\frac{\pi \cdot 2,2^2 \cdot 0,603}{3} \right) \right) \cdot 7950 = 508 \text{ Kg}$$

Pes del fons

$$M_{fons} = (\pi \cdot 2,33 \cdot 0,085) \cdot 7950 = 1156 \text{ Kg}$$

Pes d'operació del tanc

Pel càlcul d'operació del tanc s'han emprat les equacions (11) i (12) obtenint els següents valors.

$$M_{buit total} = 3631 + 508 + 1156 = 5195 \text{ Kg}$$

$$M_{tanc ple} = 5195 + (82 \cdot 878,9) = 77894 \text{ Kg}$$

Càlcul de cubetes

Tal i com s'ha explicat a l'apartat 11,X.1,11, s'han calculat les dimensions de les cubetes i les distàncies entre els tancs. Com tenim 8 tanc de benzè s'ha establert fer 2 files de 4 tancs cadascuna. Per tant, seguint els càlculs esmentats s'han assolit els resultats següents:

Taula 7. Distàncies interiors de la cubeta

Paret-tanc (m)	1
Tanc (m)	4,50
Tanc-tanc (m)	2,25

Taula 8. Paràmetres pel càlcul de les dimensions de la cubeta.

Vmax (m3)	100
S	243

Taula 9. Dimensions de la cubeta de benzè.

Amplada (m)	13,25
Llargada (m)	26,75
Alçada (m)	0,41

11.1.3. Disseny del tanc de monoclorbenzè

El primer pas per a començar el disseny del tanc ha estat calcular la quantitat de producte a emmagatzemar, amb un stock de 3 dies, de la següent forma:

$$10070 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1110 \text{ Kg}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ dia}} \cdot 3 \text{ dies stock} = 653,19 \text{ m}^3$$

D'aquesta manera s'han establert els paràmetres inicials del disseny, recollits a la taula 11,3:

Taula 10. Paràmetres inicials del disseny del tanc del monoclorbenzè.

T operació (°C)	20
P operació (bar)	1,01
Temps de stock (dies)	3
Q (kg/h)	10070
V a emmagatzemar (m³)	653,19

El següent pas ha estat dividir aquest volum per obtenir tancs més petits, adients a les consideracions. En el cas de la planta, s'ha decidit dividir el volum d'emmagatzematge en 8 tancs i amb un sobre dimensionament del 20%:

$$Volum\ tanc = \frac{653,19\ m^3}{8\ tancs} \cdot 1,2 = 98\ m^3 \rightarrow 100\ m^3$$

$$\% d'ocupació\ del\ tanc = \frac{100}{653,19/8} = 81,6\ \%$$

Per tant, s'han obtingut 8 tancs de 100 m³ al 81,6% d'ocupació per tal d'emmagatzemar tot el monoclorbenzè que es produeix.

Un cop establert el volum de cada tanc s'han calculat les dimensions d'aquest, mitjançant una equació i una relació de H/D:

$$V_{tanc} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (13)$$

$$H/D = 1,5$$

Fent un sistema d'equacions s'han trobat els valors del diàmetre (D) i d'alçada del tanc (H)

- D = 4,5 m
- H = 6,75 m

El nivell del líquid serà la relació entre l'alçada calculada i el sobre dimensionament del tanc; per tant:

$$H_{líquid} = 6,75 \cdot 0,816 = 5,51\ m$$

Càlcul de l'espessor del cos

L'espessor del cos s'ha calculat mitjançant les equacions (3) i (4). Aquests valors s'han comparat amb els de la taula 11,2 i s'ha escollit el més gran:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot 4,5 \cdot (6,75 - 0,3) \cdot 1,11}{155 \cdot 0,85} + 2,5 = 3,69 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4,9 \cdot 4,5 \cdot (6,75 - 0,3)}{140 \cdot 0,85} = 1,2 \text{ mm}$$

Valor de la taula 11,2 per a $D < 15\text{m} \rightarrow 5 \text{ mm}$

Per tant, l'espessor del cos del tanc és de 5 mm.

Càlcul del sostre cònic del tanc

Per calcular les dimensions i l'espessor del sostre s'utilitzen varies correlacions de la norma API 650, amb els paràmetres inicials recollits a la taula següent:

Taula 11. Paràmetres del con.

R (m)	2,25
Θ (º)	15
Sin (Θ)	0,259
Cos (Θ)	0,966
K	2,329

Alçada del con equació (7): $H = 0,259 \cdot 2,329 = 0,603 \text{ m}$

Per calcular l'espessor del sostre s'ha emprat l'equació (5), tenint en compte que l'espessor mínim de disseny ha de ser 4,76 mm.

$$T_t = \frac{4500}{4800 \cdot 0,259} + 2,5 = 6,12 \text{ mm}$$

Per tant les especificacions del sostre del tanc de benzè són les recollides a la taula següent:

Taula 12. Especificacions del sostre cònic del tanc de monoclorbenzè.

Tt (mm)	6,12
Di (m)	4,5
De (m)	4,51
H (m)	0,603
Θ (º)	15

Càlcul del fons del tanc

Tal com s'ha explicat, l'espessor del fons ve donat pel gruix i per la tolerància de corrosió. Sabent que el mínim gruix de corrosió és de 6 mm i que la tolerància a la corrosió és de 2,5 mm i amb l'equació (1) s'ha obtingut el valor.

$$t = 6 + 2,5 = 8,5 \text{ mm}$$

L'altre paràmetre a tenir en compte del fons és el diàmetre. El seu valor s'ha obtingut emprant l'equació (2).

$$D_{fons} = 4,51 + 0,05 = 4,56 \text{ m}$$

Càlcul del pes del tanc buit

Emprant les equacions (8), (9) i (10) s'han obtingut els valors dels 3 pesos de les 3 parts del tanc.

Pes cos

$$M_{cos} = \left(\left(\frac{\pi}{4} \cdot 4,51^2 \cdot 6,75 \right) - \left(\frac{\pi}{4} \cdot 4,5^2 \cdot 6,75 \right) \right) \cdot 7950 = 3797 \text{ Kg}$$

Pes del sostre

$$M_{sostre} = \left(\left(\frac{\pi \cdot 2,26^2 \cdot 0,603}{3} \right) - \left(\frac{\pi \cdot 2,25^2 \cdot 0,603}{3} \right) \right) \cdot 7950 = 538 \text{ Kg}$$

Pes del fons

$$M_{fons} = (\pi \cdot 2,33 \cdot 0,085) \cdot 7950 = 1104 \text{ Kg}$$

Pes d'operació del tanc

Pel càlcul d'operació del tanc s'han emprat les equacions (11) i (12) obtenint els següents valors.

$$M_{buit total} = 3797 + 538 + 1104 = 5440 \text{ Kg}$$

$$M_{tanc ple} = 5439,6 + (82 \cdot 1110) = 96065 \text{ Kg}$$

Càlcul de cubetes

Tal i com s'ha explicat a l'apartat 11.X.1.11, s'han calculat les dimensions de les cubetes i les distàncies entre els tancs. Com tenim 8 tanc de benzè s'ha establert fer 2 files de 4 tancs cadascuna. Per tant, seguint els càlculs esmentats s'han assolit els resultats següents:

Taula 13. Distàncies interiors de la cubeta.

Paret-tanc (m)	1
Tanc (m)	4,50
Tanc-tanc (m)	2,25

Taula 14. Paràmetres pel càlcul de les dimensions de la cubeta.

Vmax (m3)	100
S	153

Taula 15. Dimensions de la cubeta de benzè.

Amplada (m)	13,25
Llargada (m)	20
Alçada (m)	0,65

11.1.4. Disseny del tanc d'àcid clorhídric

El primer pas per a començar el disseny del tanc ha estat calcular la quantitat de producte a emmagatzemar, amb un stock de 3 dies, de la següent forma:

$$9307 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{1 m^3}{1160 Kg} \cdot \frac{24 h}{1 dia} \cdot 3 dies stock = 578 m^3$$

D'aquesta manera s'han establert els paràmetres inicials del disseny, recollits a la taula 11,3:

Taula 16. Paràmetres inicials del disseny del tanc de àcid clorhídric.

T operació (°C)	20
P operació (bar)	1,01
Temps de stock (dies)	3
Q (kg/h)	9307
V a emmagatzemar (m³)	577,66

El següent pas ha estat dividir aquest volum per obtenir tancs més petits, adients a les consideracions. En el cas de la planta, s'ha decidit dividir el volum d'emmagatzematge en 8 tancs i amb un sobre dimensionament del 20%:

$$Volum\ tanc = \frac{577,66\ m^3}{6\ tancs} \cdot 1,2 = 116\ m^3 \rightarrow 120\ m^3$$

$$\% d'ocupació\ del\ tanc = \frac{120}{577,66/8} = 80,2\ \%$$

Per tant, s'han obtingut 6 tancs de 120 m³ al 80,2% d'ocupació per tal d'emmagatzemar tot l'àcid clorhídric.

Un cop establert el volum de cada tanc s'han calculat les dimensions d'aquest, mitjançant una equació i una relació de H/D:

$$V_{tanc} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (13)$$

$$H/D = 1,5$$

Fent un sistema d'equacions s'han trobat els valors del diàmetre (D) i d'alçada del tanc (H)

- D = 5 m
- H = 7,5 m

El nivell del líquid serà la relació entre l'alçada calculada i el sobre dimensionament del tanc; per tant:

$$H_{liquid} = 7,5 \cdot 0,802 = 6,02\ m$$

Càlcul de l'espessor del cos

L'espessor del cos s'ha calculat mitjançant les equacions (3) i (4). Aquests valors s'han comparat amb els de la taula 11,2 i s'ha escollit el més gran:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot 5 \cdot (7,5 - 0,3) \cdot 1,2}{155 \cdot 0,85} + 2,5 = 4,11\ mm$$

$$t_t = \frac{4,9 \cdot 5 \cdot (7,5 - 0,3)}{140 \cdot 0,85} = 1,43\ mm$$

Valor de la taula 11,2 per a D <15m → 5 mm

Per tant, l'espessor del cos del tanc és de 5 mm.

Càlcul del sostre cònic del tanc

Per calcular les dimensions i l'espessor del sostre s'utilitzen varies correlacions de la norma API 650, amb els paràmetres inicials recollits a la taula següent:

Taula 17. Paràmetres del con.

Paràmetres de disseny del con	
R (m)	2,5
Θ (º)	15
Sin (Θ)	0,259
Cos (Θ)	0,966
K	2,588

Alçada del con equació (7): $H = 0,259 \cdot 2,588 = 0,670 \text{ m}$

Per calcular l'espessor del sostre s'ha emprat l'equació (5), tenint en compte que l'espessor mínim de disseny ha de ser 4,76 mm.

$$T_t = \frac{5000}{4800 \cdot 0,259} + 2,5 = 6,52 \text{ mm}$$

Per tant les especificacions del sostre del tanc de benzè són les recollides a la taula següent:

Taula 18. Especificacions del sostre cònic del tanc d'àcid clorhídric.

Tt (mm)	6,52
Di (m)	5
De (m)	5,01
H (m)	0,670
Θ (º)	15

Càlcul del fons del tanc

Tal com s'ha explicat, l'espessor del fons ve donat pel gruix i per la tolerància de corrosió. Sabent que el mínim gruix de corrosió és de 6 mm i que la tolerància a la corrosió és de 2,5 mm i amb l'equació (1) s'ha obtingut el valor.

$$t = 6 + 2,5 = 8,5 \text{ mm}$$

L'altre paràmetre a tenir en compte del fons és el diàmetre. El seu valor s'ha obtingut emprant l'equació (2).

$$D_{fons} = 5,01 + 0,05 = 5,06 \text{ m}$$

Càlcul del pes del tanc buit

Emprant les equacions (8), (9) i (10) s'han obtingut els valors dels 3 pesos de les 3 parts del tanc.

Pes cos

$$M_{cos} = \left(\left(\frac{\pi}{4} \cdot 5,01^2 \cdot 7,5 \right) - \left(\frac{\pi}{4} \cdot 5^2 \cdot 7,5 \right) \right) \cdot 8690 = 5124 \text{ Kg}$$

Pes del sostre

$$M_{sostre} = \left(\left(\frac{\pi \cdot 2,513^2 \cdot 0,670}{3} \right) - \left(\frac{\pi \cdot 2,5^2 \cdot 0,670}{3} \right) \right) \cdot 8690 = 774 \text{ Kg}$$

Pes del fons

$$M_{fons} = (\pi \cdot 2,625^2 \cdot 0,085) \cdot 8690 = 1480 \text{ Kg}$$

Pes d'operació del tanc

Pel càlcul d'operació del tanc s'han emprat les equacions (11) i (12) obtenint els següents valors.

$$M_{buit total} = 5124 + 774 + 1480 = 7378 \text{ Kg}$$

$$M_{tanc ple} = 7378 + (96 \cdot 1160) = 119059 \text{ Kg}$$

Càlcul de cubetes

Tal i com s'ha explicat a l'apartat 11,X.1,11, s'han calculat les dimensions de les cubetes i les distàncies entre els tancs. Com tenim 8 tanc de benzè s'ha establert fer 2 files de 4 tancs cadascuna. Per tant, seguint els càlculs esmentats s'han assolit els resultats següents:

Taula 19. Distàncies interiors de la cubeta.

Paret-tanc (m)	1
Tanc (m)	5
Tanc-tanc (m)	2,5

Taula 20. Paràmetres pel càlcul de les dimensions de la cubeta.

Vmax (m3)	120
S	330

Taula 21. Dimensions de la cubeta de benzè.

Amplada (m)	14,5
Llargada (m)	29,5
Alçada (m)	0,36

11.1.5. Disseny del tanc d'hidròxid de sodi

El primer pas per a començar el disseny del tanc ha estat calcular la quantitat d'hidròxid de sodi al 30% a emmagatzemar, amb un stock de 3 dies, de la següent forma:

$$1012 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{1 m^3}{1332 Kg} \cdot \frac{24 h}{1 dia} \cdot 3 dies stock = 54,72 m^3$$

D'aquesta manera s'han establert els paràmetres inicials del disseny, recollits a la taula 11,3:

Taula 22. Paràmetres inicials del disseny del tanc de benzè.

T operació (°C)	20
P operació (bar)	1,01
Temps de stock (dies)	3
Q (kg/h)	1012
V a emmagatzemar (m³)	54,72

El següent pas ha estat dividir aquest volum per obtenir tancs més petits, adients a les consideracions. En el cas de la planta, s'ha decidit emmagatzemar la quantitat d'hidròxid de sodi amb 1 tanc amb un sobre dimensionament del 20%:

$$Volum tanc = 54,7 \cdot 1,2 = 65,7 m^3 \rightarrow 70 m^3$$

$$\% d'ocupació del tanc = \frac{54,72}{70} = 78,2 \%$$

Per tant, s'ha obtingut 1 tanc de 70 m³ al 78,2% d'ocupació per tal d'emmagatzemar tot l'hidròxid de sodi.

Un cop establert el volum del tanc s'han calculat les dimensions d'aquest, mitjançant una equació i una relació de H/D:

$$V_{tanc} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (13)$$

$$H/D = 1,5$$

Fent un sistema d'equacions s'han trobat els valors del diàmetre (D) i d'alçada del tanc (H)

- D = 4 m
- H = 6 m

El nivell del líquid serà la relació entre l'alçada calculada i el sobre dimensionament del tanc; per tant:

$$H_{liquid} = 6 \cdot 0,782 = 4,69 \text{ m}$$

Càlcul de l'espessor del cos

L'espessor del cos s'ha calculat mitjançant les equacions (3) i (4). Aquests valors s'han comparat amb els de la taula 11,2 i s'ha escollit el més gran:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot 4 \cdot (6 - 0,3) \cdot 1,53}{155 \cdot 0,85} + 2,5 = 3,79 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4,9 \cdot 4 \cdot (6 - 0,3)}{140 \cdot 0,85} = 0,94 \text{ mm}$$

Valor de la taula 11,2 per a D < 15m → 5 mm

Per tant, l'espessor del cos del tanc és de 5 mm.

Càlcul del sostre cònic del tanc

Per calcular les dimensions i l'espessor del sostre s'utilitzen varies correlacions de la norma API 650, amb els paràmetres inicials recollits a la taula següent:

Taula 23. Paràmetres del con.

R (m)	2,25
Θ (º)	15
Sin (Θ)	0,259
Cos (Θ)	0,966
K	2,071

Alçada del con equació (7): $H = 0,259 \cdot 2,071 = 0,536 \text{ m}$

Per calcular l'espessor del sostre s'ha emprat l'equació (5), tenint en compte que l'espessor mínim de disseny ha de ser 4,76 mm.

$$T_t = \frac{4000}{4800 \cdot 0,259} + 2,5 = 5,72 \text{ mm}$$

Per tant les especificacions del sostre del tanc de benzè són les recollides a la taula següent:

Taula 24. Especificacions del sostre cònic del tanc de benzè

Tt (mm)	5,72
Di (m)	4
De (m)	4,01
H (m)	0,536
Θ (º)	15

Càlcul del fons del tanc

Tal com s'ha explicat, l'espessor del fons ve donat pel gruix i per la tolerància de corrosió. Sabent que el mínim gruix de corrosió és de 6 mm i que la tolerància a la corrosió és de 2,5 mm i amb l'equació (1) s'ha obtingut el valor.

$$t = 6 + 2,5 = 8,5 \text{ mm}$$

L'altre paràmetre a tenir en compte del fons és el diàmetre. El seu valor s'ha obtingut emprant l'equació (2).

$$D_{fons} = 4,01 + 0,05 = 4,06 \text{ m}$$

Càlcul del pes del tanc buit

Emprant les equacions (8), (9) i (10) s'han obtingut els valors dels 3 pesos de les 3 parts del tanc.

Pes cos

$$M_{cos} = \left(\left(\frac{\pi}{4} \cdot 4,01^2 \cdot 6 \right) - \left(\frac{\pi}{4} \cdot 4^2 \cdot 6,75 \right) \right) \cdot 7950 = 3000 \text{ Kg}$$

Pes del sostre

$$M_{sostre} = \left(\left(\frac{\pi \cdot 2,01^2 \cdot 0,536}{3} \right) - \left(\frac{\pi \cdot 2^2 \cdot 0,536}{3} \right) \right) \cdot 7950 = 397 \text{ Kg}$$

Pes del fons

$$M_{fons} = (\pi \cdot 2,03^2 \cdot 0,085) \cdot 7950 = 875 \text{ Kg}$$

Pes d'operació del tanc

Pel càlcul d'operació del tanc s'han emprat les equacions (11) i (12) obtenint els següents valors.

$$M_{buit\ total} = 3000 + 397 + 875 = 4272 \text{ Kg}$$

$$M_{tanc\ ple} = 4272 + (55 \cdot 1525) = 87737 \text{ Kg}$$

Càlcul de cubetes

Tal i com s'ha explicat a l'apartat 11,X.1,11, s'han calculat les dimensions de les cubetes i les distàncies entre els tancs. Com tenim 8 tanc de benzè s'ha establert fer 2 files de 4 tancs cadascuna. Per tant, seguint els càlculs esmentats s'han assolit els resultats següents:

Taula 25. Distàncies interiors de la cubeta.

Paret-tanc (m)	1
Tanc (m)	4

Taula 26. Dimensions de la cubeta de benzè.

Amplada (m)	6
Llargada (m)	6
Alçada (m)	1

11.1.6. Característiques dels tancs a pressió

Per dissenyar els tancs s'ha seguit la normativa per al disseny a pressió (ASME). Seguint aquesta norma s'ha efectuat el disseny de la següent manera.

11.1.6.1. Pressió de disseny

La pressió de disseny és la pressió màxima a la qual està dissenyat el tanc. El valor es troba prenent el valor màxim de les dues equacions següents:

$$P_d = P_{op} \cdot 1,1 \quad (14)$$

$$P_d = P_{op} + 25 \text{ psi} \quad (15)$$

On:

P_d és la pressió de disseny (psi)

P_{op} és la pressió d'operació (psi)

11.1.6.2. Temperatura de disseny

La temperatura de disseny és la temperatura màxima a la què està dissenyat el tanc. Es troba mitjançant la següent equació:

$$T_d = T_{op} + 15^\circ\text{C} \quad (16)$$

On:

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

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

11.1.6.3. Disseny del cos cilíndric

De la mateixa manera que en el cas dels tancs a pressió atmosfèrica, les dimensions del tanc es calculen de la mateixa forma, ja que tots tenen forma cilíndrica. Per fer-ho s'utilitzen les equacions de volum del tanc i la relació H/D:

$$V_{tanc} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (13)$$

$$H/D = 1,5$$

On:

D és el diàmetre intern del cos del cilindre (m)

H és l'alçada del cos del cilindre (m)

Pel que fa a l'espessor del cos del tanc s'ha calculat mitjançant la següent equació:

$$t_{cilindre} = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6P_d} + CA \quad (17)$$

On:

P_d és la pressió de disseny del tanc (psi)

R és el radi intern (polzades)

S és l'esforç màxim admissible del material (psi)

E és el factor de soldadura

CA és el sobre espessor per corrosió (polzades)

L'equació (N) és vàlida sempre i quan es compleixin les dues consideracions següents:

$$0,385 \cdot S \cdot E > P_d \quad (18)$$

$$\frac{R}{2} > t$$

11.1.6.4. Disseny del fons i el sostre

Per dissenyar el fons i el sostre del tanc s'ha escollit emprar un fons toriesfèric, en el qual s'ha dissenyat la seva espessor amb l'equació següent:

$$t_{fons} = \left(\frac{M \cdot P_d \cdot L}{2 \cdot S \cdot E - 0,2P_d} + CA \right) \cdot 1,1 \quad (19)$$

On:

M és el valor tabulat que pren en relació a L/r

P_d és la pressió de disseny (psi)

L és el diàmetre intern del tanc (polzades)

S és l'esforç màxim admissible del material (psi)

E és el factor de soldadura

CA és el sobre espessor per corrosió (polzades)

*s'incrementa un 10% aquesta espessor per defectes de fabricació que poden sorgir.

Pel que fa a la relació L/R, s'ha pres com un 10% de L. De tal forma s'obté que L/R = 10, A la figura següent es poden observar els valors que prenen els factors M en funció de L/R.

VALORES DEL FACTOR "M"

L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75
-----	------	------	------	------	------	------	------	------

M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17
---	------	------	------	------	------	------	------	------

L/r	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
-----	------	------	------	------	------	------	------	------

M	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36
---	------	------	------	------	------	------	------	------

L/r	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0
-----	------	------	------	------	------	------	------	------

M	1.39	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54
---	------	------	------	------	------	------	------	------

L/r	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.00	16.0
-----	------	------	------	------	------	------	-------	------

M	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75
---	------	------	------	------	------	------	------	------

Figura 2. Valors que pren el factor M.

Finalment, el valor d'espessor del fons i del capçal que s'ha d'escollir és el valor més gran entre el calculat amb la fórmula (17) i el valor mínim que pren aquesta espessor, que és 0,625 polzades.

Per acabar de dissenyar el sostre i fons del tanc a pressió falten certs paràmetres que s'expliquen a continuació, en base a la següent figura que representa el fons toriesfèric.

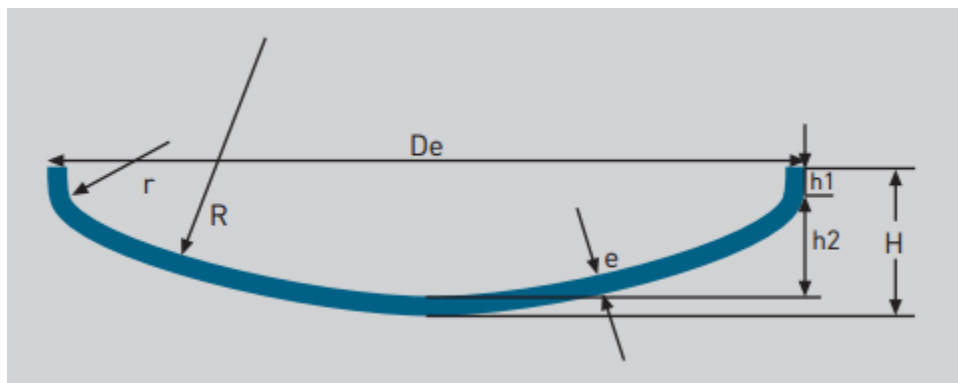


Figura 3. Dibuix representatiu de l'estructura del fons toriesfèric.

Taula 27. Paràmetres d'interès del fons toriesfèric.

Paràmetre	Valor
r	$0,1 \cdot D_{int}$
h_1	0,05 m
h_2	$L - \sqrt{(L - r)^2 - \left(\frac{D_{int}}{2} - r\right)^2}$

Finalment l'alçada del capçal es calcula com la suma de h_1 , h_2 i l'espessor com es pot apreciar a la següent equació.

$$H_{capçal} = h_1 + h_2 + t_{capçal} \quad (20)$$

11.1.6.5. Pes del tanc toriesfèric buit

Els pes del tanc d'emmagatzematge s'obté calculant els pesos de les tres parts del tanc per separat; cos del tanc i fons i sostre, que en aquests casos és el mateix.

Pes del cos cilíndric del tanc

Pel càlcul del cos s'ha tingut en compte el volum d'un cilindre, ja que els tancs tenen aquesta forma, l'espessor del tanc i finalment la densitat del material. D'aquesta manera l'equació per calcular el pes del cos és la següent:

$$M_{cos} = (V_{ext} - V_{int}) \cdot \rho_{material} \quad (21)$$

On:

M_{cos} és el pes del cos buit (Kg)

V_{ext} és el volum del cos tenint en compte l'espessor, calculat com: $V_{ext} = \frac{\pi}{4} D_e^2 H \text{ (m}^3\text{)}$

V_{int} és el volum interior del cos, calculat com: $V_{int} = \frac{\pi}{4} D_i^2 H \text{ (m}^3\text{)}$

$\rho_{material}$ és la densitat del material de construcció del tanc (Kg/m³)

Pes del fons toriesfèric

Pel càlcul del fons toriesfèric s'ha seguit el mateix procediment que en el càlcul del cos. Per tant, s'han calculat volums externs i interns tenint en compte l'espessor del fons, en relació al material del qual està construït.

$$M_{fons} = (V_{ext} - V_{int}) \cdot \rho_{material} \quad (22)$$

On:

M_{fons} és el pes del fons buit (Kg)

V_{ext} és el volum del cos tenint en compte l'espessor, calculat com: $V_{\text{ext}} = \frac{\pi}{3} r_{\text{ext}}^2 (H + t) \text{ (m}^3\text{)}$

V_{int} és el volum interior del cos, calculat com: $V_{\text{int}} = \frac{\pi}{3} r_i^2 H \text{ (m}^3\text{)}$

P_{material} és la densitat del material de construcció del tanc (Kg/m^3)

11.1.6.6. Pes del tanc d'operació

$$M_{\text{buit}} = M_{\text{cos}} + 2 \cdot M_{\text{fons}} \quad (23)$$

$$M_{\text{tanc ple}} = M_{\text{buit total}} + (V_{\text{fluid}} \cdot \rho_{\text{fluid}}) \quad (24)$$

On:

$M_{\text{buit total}}$ és el pes del tanc buit en la seva totalitat (Kg)

$M_{\text{tanc ple}}$ és el pes del tanc ple del producte a emmagatzemar (Kg)

V_{fluid} és el volum de fluid que s'emmagatzema dins del tanc dissenyat (m^3)

P_{fluid} és la densitat del fluid emmagatzemat al tanc dissenyat (Kg/m^3)

11.1.7. Disseny del tanc d'emmagatzematge de clor

Tal i com s'ha fet amb els tancs a pressió s'ha calculat la quantitat de clor líquid a emmagatzemar, segons els requeriments del procés i per tenir un stock de 3 dies.

$$7587 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1562 \text{ Kg}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ dia}} \cdot 3 \text{ dies} = 349,72 \text{ m}^3$$

Càlcul pressió i temperatura de disseny

Per calcular la pressió i la temperatura d'operació s'ha estudiat el diagrama de fases del clor. D'aquesta manera, i tenint en compte la situació més desfavorable (40°C a l'estiu), s'ha vist que la pressió necessària per tenir el clor líquid és de 10 bar. Tot i això, segons la ITC del clor (vist en l'apartat d'emmagatzematge de la part de seguretat) la pressió mínima a la qual s'ha d'emmagatzemar el clor líquid és de 15 bar. Per tant la pressió d'operació és de 15 bar i la temperatura de 40°C.

Amb aquestes consideracions, el valor de P_d es troba com el valor màxim entre les equacions (13) i (14).

$$P_d = 15 \cdot 1,1 = 16,5 \text{ bar} \cdot \frac{14,5 \text{ psi}}{1 \text{ bar}} = 239,31 \text{ psi}$$

$$P_d = 15 \text{ bar} \cdot \frac{14,5 \text{ psi}}{1 \text{ bar}} + 25 = 247,56 \text{ psi}$$

Per tant, la pressió de disseny $P_d = 247,56 \text{ psi} = 17,07 \text{ bar}$.

Pel que fa a la temperatura de disseny es troba emprant l'equació (15).

$$T_d = 40 + 15 = 55^\circ\text{C}$$

D'aquesta manera s'han establert els paràmetres inicials del disseny, recollits a la taula 11,3:

Taula 28. Paràmetres inicials del disseny del tanc de benzè.

T operació (°C)	40
P operació (bar)	15
P disseny (bar)	17,07
T disseny (°C)	55
Temps de stock (dies)	3
Q (kg/h)	7587
V a emmagatzemar (m³)	349,72

El següent pas ha estat dividir aquest volum per obtenir tancs més petits, adients a les consideracions. En el cas de la planta, s'ha decidit emmagatzemar el clor en 5 tancs i amb una sobre dimensió del 20%.

$$Volum \text{ tanc} = \frac{349,72}{5} \cdot 1,2 = 84 \text{ m}^3 \rightarrow 90 \text{ m}^3$$

$$\% \text{ d'ocupació del tanc} = \frac{70}{90} = 78 \%$$

Per tant, s'han obtingut 5 tancs de 90 m³ al 78% d'ocupació per tal d'emmagatzemar el clor per al procés.

Un cop establert el volum del tanc s'han calculat les dimensions d'aquest, mitjançant una equació i una relació de H/D:

$$V_{tanc} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (13)$$

$$H/D = 1,5$$

Fent un sistema d'equacions s'han trobat els valors del diàmetre (D) i d'alçada del tanc (H)

- D = 4,5 m
- H = 6,75 m

El nivell del líquid serà la relació entre l'alçada calculada i el sobre dimensionament del tanc; per tant:

$$H_{liquid} = 6,75 \cdot 0,78 = 5,25 \text{ m}$$

Disseny del cos del tanc

Per calcular l'espessor del cos cilíndric del tanc s'ha emprat l'equació (16), i amb les restriccions esmentades, de la següent manera:

$$t_{cilindre} = \frac{247,56 \text{ psi} \cdot 2250 \text{ mm}}{36260 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 247,56} + 2,5 = 20,7 \text{ mm}$$

- restriccions:

$$0,385 \cdot 36260 \cdot 0,86 > Pd \rightarrow 11866 > 247,56 \quad \text{SÍ}$$

$$\frac{2250}{2} > t \rightarrow 1125 > 20,7 \quad \text{SÍ}$$

Càlcul del fons toriesfèric

Pel càlcul del fons toriesfèric del tanc s'ha emprat l'equació (17), ajudats de les consideracions esmentades i de la figura (11,2). Aquest càlcul és el següent:

$$t_{fons} = \left(\frac{1,54 \cdot 247,56 \text{ psi} \cdot 177,17 \text{ inch}}{2 \cdot 36260 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 247,56 \text{ psi}} + 0,098 \text{ inch} \right) \cdot 1,1 = 1,315 \text{ inch}$$

Aquest valor es superior al valor mínim d'espessor, que és de 0,625 polzades. Per tant, l'espessor del fons és de 1,315 polzades.

$$1,315 \text{ polzades} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ polzades}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 33,39 \text{ mm}$$

Altres paràmetres per dissenyar el fons

A continuació es mostren els valors de r, h1 i h2, tal i com s'han explicat anteriorment.

$$r = 0,1 \cdot 4,5 = 0,45 \text{ m}$$

$$h_1 = 0,05 \text{ m}$$

$$h_2 = 4,5 - \sqrt{(4,5 - 0,45)^2 - (2,25 - 0,45)^2} = 0,87 \text{ m}$$

Per tant, l'alçada total del capçal, emprant l'equació (18) del sostre és la següent:

$$H_{capçal\ total} = 0,05 + 0,87 + 0,033 = 0,955m$$

I, en conseqüència, l'alçada total del tanc es:

$$H_{total} = 6,75 + 2 \cdot 0,955 = 8,66\ m$$

Pes del tanc buit

Tal i com s'ha explicat a la introducció de l'apartat, s'ha calculat el pes pel cos cilíndric i pel fons toriesfèric.

Pes del cos cilíndric buit

Emprant l'equació (8), s'ha trobat el valor del pes del cos cilíndric buit per emmagatzemar el clor.

$$M_{cos} = (109,33 - 107,35) \cdot 7580 = 15013\ Kg$$

Pes del fons toriesfèric buit

Emprant l'equació (19), s'ha calculat el pes del fons toriesfèric buit.

$$M_{fons} = (5,56 - 5,07) \cdot 7580 = 3735\ Kg$$

Pes del tanc d'operació

Amb les equacions (20) i (12), s'ha calculat primer el pes del tanc buit i posteriorment, el pes del tanc ple de clor.

$$M_{buit} = 15013 + 2 \cdot 3735 = 22483\ Kg$$

$$M_{tanc\ ple} = 22483 \cdot (69,94 \cdot 1562) = 131736\ Kg$$

Càlcul de cubetes

Tal i com s'ha explicat a l'apartat 11,X.1,11, s'han calculat les dimensions de les cubetes i les distàncies entre els tancs. Com tenim 5 tanc de clor s'ha establert fer 2 files de 3 i 2 tancs cadascuna. Per tant, seguint els càlculs esmentats s'han assolit els resultats següents:

Taula 29. Distàncies interiors de la cubeta.

Paret-tanc (m)	1
Tanc (m)	4,25
Tanc-tanc (m)	2,125

Taula 30. Paràmetres pel càlcul de les dimensions de la cubeta.

Vmax (m3)	90
S	224

Taula 31. Dimensions de la cubeta de clor.

Amplada (m)	14,75
Llargada (m)	19
Alçada (m)	1

11.1.8. Disseny de tancs per a sòlids

Dins el procés de la planta, també s'emmagatzemen tant reactius com productes en fase sòlida. És per això que aquestes substàncies han de estar emmagatzemades de forma adient a les seves condicions.

Les dues substàncies que s'emmagatzemen són, per una banda el clorur de ferro (FeCl_3), que actua com al catalitzador del procés. D'altra banda també s'ha d'emmagatzemar el diclorbenzè provinent del procés de solidificació un cop separat a la columna de destil·lació (C-402).

En aquest cas no s'ha fet un disseny tal i com s'ha anat fent amb tots els tancs d'emmagatzematge anteriors, sinó que s'ha buscat un proveïdor (MYSILO)^[*] que ens podria proporcionar aquest tipus de tancs.

Aquest tipus de tancs, tal i com s'ha mostrat a l'apartat (2), té una forma característica. Per tant, el que s'ha fet ha estat un càlcul dels requeriments de cada tanc i s'ha buscat al catàleg del proveïdor quin s'ajusta a les necessitats de la planta.

11.1.9. Disseny tanc d'emmagatzematge de clorur de ferro

Per trobar quin és el tanc que s'ajusta a les necessitats d'emmagatzematge del clorur de ferro, s'ha calculat quin és el volum necessari per emmagatzemar el clorur de ferro, amb un stock de 3 dies, de la següent forma:

$$195,3 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot \frac{24\text{h}}{1\text{dia}} \cdot 3 \text{ dies} = 14,000 \text{ Kg}$$

Sabent que aquesta és la quantitat ha emmagatzemar, s'ha buscat el tanc adient capaç d'emmagatzemar aquesta quantitat de clorur de ferro (III), sempre referit al proveïdor que s'ha trobat (SIMEZA). Aquestes són les seves característiques:

Taula 32. Valors d'interès del tanc d'emmagatzematge de clorur de ferro.

Paràmetre	Valor
Volum (m³)	26
Diàmetre (m)	3,6
Θ_{con} (º)	60
Capacitat (TM)	19
Alçada (m)	7,39

11.1.10. Disseny tanc d'emmagatzematge de diclorbenzè

Per emmagatzemar el diclorbenzè, s'ha calculat la quantitat de diclorbenzè que genera la planta en 3 dies, que és el que s'ha establert com a recollida del producte. Els resultats obtinguts han estat els següents:

$$1,237 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{24h}{1dia} \cdot 3 dies = 89,064 Kg \rightarrow 90,000Kg$$

Sabent que aquesta és la quantitat ha emmagatzemar, s'ha dividit la quantitat en 3 tancs i s'ha buscat el tanc adient capaç d'emmagatzemar aquesta quantitat de diclorbenzè, sempre referit al proveïdor que s'ha trobat (SIMEZA). Aquestes són les seves característiques:

Taula 33. Valors d'interès del tanc d'emmagatzematge de clorur de ferro.

Paràmetre	Valor
Nº de tancs	3
Volum (m³)	43
Diàmetre (m)	3,8
Θ_{con} (º)	60
Capacitat (TM)	31
Alçada (m)	7,05

11.1.11. Disseny de tancs pulmó

Els tancs pulmó s'han dissenyat per a què els corrents de varies procedències del procés s'adjuntessin i s'homogeneïtzin per evitar dificultats de transferència de matèria i/o de problemes mecànics com poden ser cavitacions de bombes i altres de diversa consideració. El disseny d'aquests tancs pulmó, s'ha fet seguint les normes API 650 i ASME, ja explicades i utilitzades en el disseny dels tancs d'emmagatzematge.

11.1.12. Disseny del tanc pulmó de benzè fresc i recirculat

En aquest tanc pulmó, s'emmagatzema i s'homogeneïtzen 2 corrents; el benzè fresc i el benzè recirculat que posteriorment s'escalfaran per poder dissoldre el catalitzador. Com són corrents amb característiques molt similars, s'ha decidit que el tanc tingui 1 min de temps de residència i s'ha calculat a partir del cabal que hi passa.

$$18935 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{1 h}{60 min} \cdot 1 min \cdot \frac{1 m^3}{849,7 Kg} = 0,37 m^3$$

Càlcul pressió i temperatura de disseny

La temperatura i pressió d'operació que s'han estimat són les mateixes que les del reactor, 20°C i 1,01 bar, ja que aquest tanc està immediatament després del reactor i els equips de purificació següents també operen a aquestes condicions.

Amb aquestes consideracions, el valor de P_d es troba com el valor màxim entre les equacions (13) i (14).

$$P_d = 1,01 \cdot 1,1 = 1,11 bar \cdot \frac{14,5 psi}{1 bar} = 16,11 psi$$

$$P_d = 1,01 bar \cdot \frac{14,5 psi}{1 bar} + 25 = 39,64 psi$$

Per tant, la pressió de disseny $P_d = 39,64 psi = 2,73 bar$.

Pel que fa a la temperatura de disseny es troba emprant l'equació (15).

$$T_d = 20 + 15 = 35^\circ C$$

D'aquesta manera s'han establert els paràmetres inicials del disseny, recollits a la taula 11,3:

Taula 34. Paràmetres inicials del disseny del tanc de benzè.

Parámetros operación	
T operació (°C)	20
T diseny (°C)	35
P operació (bar)	1,01
P diseny (bar)	2,73
Temps de residència (min)	1
Q (kg/h)	18935
V (m³)	0,37

El següent pas ha estat dividir aquest volum per obtenir tancs més petits, adients a les consideracions. En el cas de la planta, s'ha decidit emmagatzemar la quantitat d'hidròxid de sodi amb 1 tanc amb un sobre dimensionament del 20%:

$$Volum\ tanc = 0,37 \cdot 1,2 = 0,45\ m^3 \rightarrow 0,5\ m^3$$

$$\% d'ocupació\ del\ tanc = \frac{0,37}{0,5} = 74\ \%$$

Per tant, s'ha obtingut 1 tanc de 0,5 m³ al 74% d'ocupació.

Un cop establert el volum del tanc s'han calculat les dimensions d'aquest, mitjançant una equació i una relació de H/D:

$$V_{tanc} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (13)$$

$$H/D = 1,5$$

Fent un sistema d'equacions s'han trobat els valors del diàmetre (D) i d'alçada del tanc (H)

- D = 1 m
- H = 1,5 m

El nivell del líquid serà la relació entre l'alçada calculada i el sobre dimensionament del tanc; per tant:

$$H_{líquid} = 1,5 \cdot 0,74 = 1,11\ m$$

Càlcul de l'espessor del cos

L'espessor del cos s'ha calculat mitjançant les equacions (3) i (4). Aquests valors s'han comparat amb els de la taula 11,2 i s'ha escollit el més gran:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot 1,5 \cdot (2,25 - 0,3) \cdot 0,849}{155 \cdot 0,85} + 2,5 = 2,54\ mm$$

$$t_t = \frac{4,9 \cdot 1,5 \cdot (2,25 - 0,3)}{140 \cdot 0,85} = 0,05\ mm$$

Valor de la taula 11,2 per a D < 15m → 5 mm

Per tant, l'espessor del cos del tanc és de 5 mm.

Càlcul del fons toriesfèric

Pel càlcul del fons toriesfèric del tanc s'ha emprat l'equació (17), ajudats de les consideracions esmentades i de la figura (11,3). Aquest càlcul és el següent:

$$t_{fons} = \left(\frac{1,54 \cdot 39,64 \text{ psi} \cdot 39,37 \text{ inch}}{2 \cdot 36260 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 39,64 \text{ psi}} + 0,098 \text{ inch} \right) \cdot 1,1 = 0,151 \text{ inch}$$

Aquest valor es inferior al valor mínim d'espessor, que és de 0,625 polzades. Per tant, l'espessor del fons és de 0,625 polzades.

$$0,625 \text{ polzades} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ polzades}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 15,88 \text{ mm}$$

Altres paràmetres per dissenyar el fons

A continuació es mostren els valors de r , h_1 i h_2 , tal i com s'han explicat anteriorment.

$$r = 0,1 \cdot 1 = 0,1 \text{ m}$$

$$h_1 = 0,05 \text{ m}$$

$$h_2 = 1 - \sqrt{(1 - 0,1)^2 - (0,5 - 0,1)^2} = 0,19 \text{ m}$$

Per tant, l'alçada total del capçal, emprant l'equació (18) del sostre és la següent:

$$H_{capçal \text{ total}} = 0,05 + 0,19 + 0,01588 = 0,260 \text{ m}$$

I, en conseqüència, l'alçada total del tanc es:

$$H_{total} = 1,5 + 2 \cdot 0,260 = 1,52 \text{ m}$$

Pes del tanc buit

Tal i com s'ha explicat a la introducció de l'apartat, s'ha calculat el pes pel cos cilíndric i pel fons toriesfèric.

Pes del cos cilíndric buit

Emprant l'equació (9), s'ha trobat el valor del pes del cos cilíndric buit per emmagatzemar el clor.

$$M_{cos} = (1,2 - 1,18) \cdot 7950 = 188 \text{ Kg}$$

Pes del fons toriesfèric buit

Emprant l'equació (19), s'ha calculat el pes del fons toriesfèric buit.

$$M_{fons} = (0,082 - 0,068) \cdot 7950 = 108 \text{ Kg}$$

Pes del tanc d'operació

Amb les equacions (20) i (12), s'ha calculat primer el pes del tanc buit i posteriorment, el pes del tanc ple de clor.

$$M_{buit} = 188 + 2 \cdot 118 = 404 \text{ Kg}$$

$$M_{tanc\ ple} = 404 \cdot (0,37 \cdot 849) = 720 \text{ Kg}$$

11.1.13. Disseny tanc pulmó de la sortida dels reactors

En aquest tanc pulmó, es mesclen les fases líquides que surten del reactor per a portar-les a les fases d'extracció i de purificació. D'aquesta manera s'ha aconseguit tenir un sol corrent homogeni amb tot el producte líquid de la reacció. El càlcul per saber el volum s'ha fet a partir del cabal total que surt, emprant un temps de residència al tanc pulmó de 5 minuts, amb una sobre dimensió del 20%, per a que tot s'homogeneïtzi si es necessari.

$$21920 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot 5 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{963,1 \text{ Kg}} = 1,9 \text{ m}^3$$

Càlcul pressió i temperatura de disseny

La temperatura i pressió d'operació que s'han estimat són les mateixes que les del reactor, 55°C i 240 kPa, ja que aquest tanc està immediatament després del reactor i els equips de purificació següents també operen a aquestes condicions.

Amb aquestes consideracions, el valor de P_d es troba com el valor màxim entre les equacions (13) i (14).

$$P_d = 2,4 \cdot 1,1 = 2,64 \text{ bar} \cdot \frac{14,5 \text{ psi}}{1 \text{ bar}} = 38,29 \text{ psi}$$

$$P_d = 2,4 \text{ bar} \cdot \frac{14,5 \text{ psi}}{1 \text{ bar}} + 25 = 64,8 \text{ psi}$$

Per tant, la pressió de disseny $P_d = 64,8 \text{ psi} = 4,47 \text{ bar}$.

Pel que fa a la temperatura de disseny es troba emprant l'equació (15).

$$T_d = 55 + 15 = 70^\circ\text{C}$$

D'aquesta manera s'han establert els paràmetres inicials del disseny, recollits a la taula 11,3:

Taula 35. Paràmetres inicials del disseny del tanc de benzè.

T operació (°C)	55
P operació (bar)	2,4
P disseny (bar)	4,47
T disseny (°C)	70
Temps de residència (min)	5
Q (kg/h)	21920
V a emmagatzemar (m³)	1,9

El següent pas ha estat dividir aquest volum per obtenir tancs més petits, adients a les consideracions. En el cas de la planta, s'ha decidit emmagatzemar el clor en 5 tancs i amb uns sobre dimensió del 20%.

$$Volum\ tanc = 1,9 \cdot 1,2 = 2,28\ m^3 \rightarrow 2,5\ m^3$$

$$\% d'ocupació\ del\ tanc = \frac{1,9}{2,5} = 76\ \%$$

Per tant, s'ha obtingut un tanc de 2,5 m³ al 76% d'ocupació per tal d'emmagatzemar de mesclar els corrents de líquid que surten dels reactors.

Un cop establert el volum del tanc s'han calculat les dimensions d'aquest, mitjançant una equació i una relació de H/D:

$$V_{tanc} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (13)$$

$$H/D = 1,5$$

Fent un sistema d'equacions s'han trobat els valors del diàmetre (D) i d'alçada del tanc (H)

- D = 1,5 m
- H = 2,25 m

El nivell del líquid serà la relació entre l'alçada calculada i el sobre dimensionament del tanc; per tant:

$$H_{liquid} = 2,25 \cdot 0,76 = 1,71\ m$$

Disseny del cos del tanc

Per calcular l'espessor del cos cilíndric del tanc s'ha emprat l'equació (16), i amb les restriccions esmentades, de la següent manera:

$$t_{cilindre} = \frac{64,81 \text{ psi} \cdot 0,75 \text{ mm}}{36260 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 64,81 \text{ psi}} + 2,5 = 4,08 \text{ mm}$$

- restriccions:

$$0,385 \cdot 36260 \cdot 0,85 > Pd \rightarrow 11866 > 64,81 \quad \text{SÍ}$$

$$\frac{750}{2} > t \rightarrow 375 > 4,08 \quad \text{SÍ}$$

Càlcul del fons toriesfèric

Pel càlcul del fons toriesfèric del tanc s'ha emprat l'equació (17), ajudats de les consideracions esmentades i de la figura (11,3). Aquest càlcul és el següent:

$$t_{fons} = \left(\frac{1,54 \cdot 64,81 \text{ psi} \cdot 59,06 \text{ inch}}{2 \cdot 36260 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 59,06 \text{ psi}} + 0,098 \text{ inch} \right) \cdot 1,1 = 0,213 \text{ inch}$$

Aquest valor es inferior al valor mínim d'espessor, que és de 0,625 polzades. Per tant, l'espessor del fons és de 0,625 polzades.

$$0,625 \text{ polzades} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ polzades}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 15,88 \text{ mm}$$

Altres paràmetres per dissenyar el fons

A continuació es mostren els valors de r, h1 i h2, tal i com s'han explicat anteriorment.

$$r = 0,1 \cdot 1,5 = 0,15 \text{ m}$$

$$h_1 = 0,05 \text{ m}$$

$$h_2 = 1,5 - \sqrt{(1,5 - 0,15)^2 - (0,75 - 0,15)^2} = 0,29 \text{ m}$$

Per tant, l'alçada total del capçal, emprant l'equació (18) del sostre és la següent:

$$H_{capçal \text{ total}} = 0,05 + 0,29 + 0,01588 = 0,357 \text{ m}$$

I, en conseqüència, l'alçada total del tanc es:

$$H_{total} = 2,25 + 2 \cdot 0,357 = 2,96 \text{ m}$$

Pes del tanc buit

Tal i com s'ha explicat a la introducció de l'apartat, s'ha calculat el pes pel cos cilíndric i pel fons toriesfèric.

Pes del cos cilíndric buit

Emprant l'equació (8), s'ha trobat el valor del pes del cos cilíndric buit per emmagatzemar el clor.

$$M_{cos} = (4,02 - 3,98) \cdot 7950 = 345 \text{ Kg}$$

Pes del fons toriesfèric buit

Emprant l'equació (19), s'ha calculat el pes del fons toriesfèric buit.

$$M_{fons} = (0,238 - 0,210) \cdot 7950 = 225 \text{ Kg}$$

Pes del tanc d'operació

Amb les equacions (20) i (12), s'ha calculat primer el pes del tanc buit i posteriorment, el pes del tanc ple de clor.

$$M_{buit} = 345 + 2 \cdot 225 = 570 \text{ Kg}$$

$$M_{tanc\ ple} = 570 \cdot (1,9 \cdot 963) = 2397 \text{ Kg}$$

11.1.14. Disseny del tanc pulmó de la columna (C-401)

Aquest tanc pulmó serveix per anar acumulant el condensat de la columna C-401, i separar el corrent que es recircula del que surt de la columna de destil·lació. Per fer-ho, s'ha partit del cabal que arriba al tanc provinent de la columna i s'ha establert un temps de residència de 1 min. El resultat ha estat el següent:

$$30209 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot 1 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{882,2 \text{ Kg}} = 0,57 \text{ m}^3$$

Càlcul pressió i temperatura de disseny

La temperatura i pressió d'operació que s'han estimat són les mateixes que els caps de la columna, 111°C i 240 kPa.

Amb aquestes consideracions, el valor de P_d es troba com el valor màxim entre les equacions (13) i (14).

$$P_d = 2,4 \cdot 1,1 = 2,64 \text{ bar} \cdot \frac{14,5 \text{ psi}}{1 \text{ bar}} = 38,29 \text{ psi}$$

$$P_d = 2,4 \text{ bar} \cdot \frac{14,5 \text{ psi}}{1 \text{ bar}} + 25 = 64,8 \text{ psi}$$

Per tant, la pressió de disseny $P_d = 64,8 \text{ psi} = 4,47 \text{ bar}$.

Pel que fa a la temperatura de disseny es troba emprant l'equació (15).

$$T_d = 111 + 15 = 126^\circ\text{C}$$

D'aquesta manera s'han establert els paràmetres inicials del disseny, recollits a la taula 11,3:

Taula 36. Paràmetres inicials del disseny del tanc de benzè.

T operació (°C)	111
P operació (bar)	2,4
P disseny (bar)	4,47
T disseny (°C)	126
Temps de residència (min)	1
Q (kg/h)	30209
V a emmagatzemar (m³)	0,57

Amb aquest volum, s'ha decidit sobre dimensionar el tanc un 20%, com a la resta dels tancs de la planta.

$$Volum \text{ tanc} = 0,57 \cdot 1,2 = 0,68 \text{ m}^3 \rightarrow 0,7 \text{ m}^3$$

$$\% d'ocupació \text{ del tanc} = \frac{0,57}{0,7} = 81,5 \%$$

Per tant, s'ha obtingut un tanc de $0,7 \text{ m}^3$ al 81,5% d'ocupació.

Un cop establert el volum del tanc s'han calculat les dimensions d'aquest, mitjançant una equació i una relació de H/D:

$$V_{tanc} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (13)$$

$$H/D = 1,5$$

Fent un sistema d'equacions s'han trobat els valors del diàmetre (D) i d'alçada del tanc (H)

- $D = 1 \text{ m}$
- $H = 1,5 \text{ m}$

El nivell del líquid serà la relació entre l'alçada calculada i el sobre dimensionament del tanc; per tant:

$$H_{liquid} = 1,5 \cdot 0,815 = 1,22 \text{ m}$$

Disseny del cos del tanc

Per calcular l'espessor del cos cilíndric del tanc s'ha emprat l'equació (16), i amb les restriccions esmentades, de la següent manera:

$$t_{cilindre} = \frac{64,81 \text{ psi} \cdot 0,5 \text{ mm}}{36260 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 64,81 \text{ psi}} + 2,5 = 3,55 \text{ mm}$$

- restriccions:

$$0,385 \cdot 36260 \cdot 0,85 > Pd \rightarrow 11866 > 64,81 \quad \text{SÍ}$$

$$\frac{500}{2} > t \rightarrow 250 > 4,08 \quad \text{SÍ}$$

Càlcul del fons toriesfèric

Pel càlcul del fons toriesfèric del tanc s'ha emprat l'equació (17), ajudats de les consideracions esmentades i de la figura (11,3). Aquest càlcul és el següent:

$$t_{fons} = \left(\frac{1,54 \cdot 64,81 \text{ psi} \cdot 39,37 \text{ inch}}{2 \cdot 36260 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 64,81 \text{ psi}} + 0,098 \text{ inch} \right) \cdot 1,1 = 0,178 \text{ inch}$$

Aquest valor es inferior al valor mínim d'espessor, que és de 0,625 polzades. Per tant, l'espessor del fons és de 0,625 polzades.

$$0,625 \text{ polzades} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ polzades}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 15,88 \text{ mm}$$

Altres paràmetres per dissenyar el fons

A continuació es mostren els valors de r, h1 i h2, tal i com s'han explicat anteriorment.

$$r = 0,1 \cdot 1 = 0,1 \text{ m}$$

$$h_1 = 0,05 \text{ m}$$

$$h_2 = 1 - \sqrt{(1 - 0,1)^2 - (0,5 - 0,1)^2} = 0,19 \text{ m}$$

Per tant, l'alçada total del capçal, emprant l'equació (18) del sostre és la següent:

$$H_{capçal\ total} = 0,05 + 0,19 + 0,01588 = 0,260\ m$$

I, en conseqüència, l'alçada total del tanc es:

$$H_{total} = 1,5 + 2 \cdot 0,260 = 2,02\ m$$

Pes del tanc buit

Tal i com s'ha explicat a la introducció de l'apartat, s'ha calculat el pes pel cos cilíndric i pel fons toriesfèric.

Pes del cos cilíndric buit

Emprant l'equació (8), s'ha trobat el valor del pes del cos cilíndric buit per emmagatzemar el clor.

$$M_{cos} = (1,195 - 1,178) \cdot 7950 = 134\ Kg$$

Pes del fons toriesfèric buit

Emprant l'equació (19), s'ha calculat el pes del fons toriesfèric buit.

$$M_{fons} = (0,082 - 0,068) \cdot 7950 = 108\ Kg$$

Pes del tanc d'operació

Amb les equacions (20) i (12), s'ha calculat primer el pes del tanc buit i posteriorment, el pes del tanc ple de clor.

$$M_{buit} = 134 + 2 \cdot 108 = 350\ Kg$$

$$M_{tanc\ ple} = 350 \cdot (0,57 \cdot 882,2) = 853\ Kg$$

11.1.15. Disseny del tanc pulmó de la columna (C-402)

Aquest tanc pulmó serveix per anar acumulant el condensat de la columna C-402, i separar el corrent que es recircula del que surt de la columna de destil·lació. Per fer-ho, s'ha partit del cabal que arriba al tanc provinent de la columna i s'ha establert un temps de residència de 1 min. El resultat ha estat el següent:

$$34947 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{1 h}{60 min} \cdot 1 min \cdot \frac{1 m^3}{1106 Kg} = 0,53 m^3$$

Càlcul pressió i temperatura de disseny

La temperatura i pressió d'operació que s'han estimat són les mateixes que els caps de la columna, 132°C i 101,3 kPa.

Amb aquestes consideracions, el valor de P_d es troba com el valor màxim entre les equacions (13) i (14).

$$P_d = 1,01 \cdot 1,1 = 1,12 bar \cdot \frac{14,5 psi}{1 bar} = 16,11 psi$$

$$P_d = 1,01 bar \cdot \frac{14,5 psi}{1 bar} + 25 = 44,65 psi$$

Per tant, la pressió de disseny $P_d = 44,65 psi = 3,08 bar$.

Pel que fa a la temperatura de disseny es troba emprant l'equació (15).

$$T_d = 132 + 15 = 147^\circ C$$

D'aquesta manera s'han establert els paràmetres inicials del disseny, recollits a la taula 11,3:

Taula 37. Paràmetres inicials del disseny del tanc de benzè.

T operació (°C)	132
P operació (bar)	1,01
P disseny (bar)	3,08
T disseny (°C)	147
Temps de residència (min)	1
Q (kg/h)	34947
V a emmagatzemar (m³)	0,53

Amb aquest volum, s'ha decidit sobre dimensionar el tanc un 20%, com a la resta dels tancs de la planta.

$$Volum tanc = 0,53 \cdot 1,2 = 0,63 m^3 \rightarrow 0,7 m^3$$

$$\% d'ocupació del tanc = \frac{0,53}{0,7} = 75\%$$

Per tant, s'ha obtingut un tanc de 0,7 m³ al 75% d'ocupació.

Un cop establert el volum del tanc s'han calculat les dimensions d'aquest, mitjançant una equació i una relació de H/D:

$$V_{tanc} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (13)$$

$$H/D = 1,5$$

Fent un sistema d'equacions s'han trobat els valors del diàmetre (D) i d'alçada del tanc (H)

- D = 1 m
- H = 1,5 m

El nivell del líquid serà la relació entre l'alçada calculada i el sobre dimensionament del tanc; per tant:

$$H_{líquid} = 1,5 \cdot 0,75 = 1,13 \text{ m}$$

Disseny del cos del tanc

Per calcular l'espessor del cos cilíndric del tanc s'ha emprat l'equació (16), i amb les restriccions esmentades, de la següent manera:

$$t_{cilindre} = \frac{44,65 \text{ psi} \cdot 0,5 \text{ mm}}{36260 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 44,65 \text{ psi}} + 2,5 = 3,22 \text{ mm}$$

- restriccions:

$$0,385 \cdot 36260 \cdot 0,85 > Pd \rightarrow 11866 > 44,65 \quad \text{Sí}$$

$$\frac{500}{2} > t \rightarrow 250 > 3,22 \quad \text{Sí}$$

Càlcul del fons toriesfèric

Pel càlcul del fons toriesfèric del tanc s'ha emprat l'equació (17), ajudats de les consideracions esmentades i de la figura (11,3). Aquest càlcul és el següent:

$$t_{fons} = \left(\frac{1,54 \cdot 44,65 \text{ psi} \cdot 39,37 \text{ inch}}{2 \cdot 36260 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 44,65 \text{ psi}} + 0,098 \text{ inch} \right) \cdot 1,1 = 0,157 \text{ inch}$$

Aquest valor es inferior al valor mínim d'espessor, que és de 0,625 polzades. Per tant, l'espessor del fons és de 0,625 polzades.

$$0,625 \text{ polzades} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ polzades}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 15,88 \text{ mm}$$

Altres paràmetres per dissenyar el fons

A continuació es mostren els valors de r , h_1 i h_2 , tal i com s'han explicat anteriorment.

$$r = 0,1 \cdot 1 = 0,1 \text{ m}$$

$$h_1 = 0,05 \text{ m}$$

$$h_2 = 1 - \sqrt{(1 - 0,1)^2 - (0,5 - 0,1)^2} = 0,19 \text{ m}$$

Per tant, l'alçada total del capçal, emprant l'equació (18) del sostre és la següent:

$$H_{\text{capçal total}} = 0,05 + 0,19 + 0,01588 = 0,260 \text{ m}$$

I, en conseqüència, l'alçada total del tanc es:

$$H_{\text{total}} = 1,5 + 2 \cdot 0,260 = 2,02 \text{ m}$$

Pes del tanc buit

Tal i com s'ha explicat a la introducció de l'apartat, s'ha calculat el pes pel cos cilíndric i pel fons toriesfèric.

Pes del cos cilíndric buit

Emprant l'equació (8), s'ha trobat el valor del pes del cos cilíndric buit per emmagatzemar el clor.

$$M_{\text{cos}} = (1,193 - 1,178) \cdot 7950 = 121 \text{ Kg}$$

Pes del fons toriesfèric buit

Emprant l'equació (19), s'ha calculat el pes del fons toriesfèric buit.

$$M_{\text{fons}} = (0,082 - 0,068) \cdot 7950 = 108 \text{ Kg}$$

Pes del tanc d'operació

Amb les equacions (20) i (12), s'ha calculat primer el pes del tanc buit i posteriorment, el pes del tanc ple de clor.

$$M_{buit} = 121 + 2 \cdot 108 = 337 \text{ Kg}$$

$$M_{tanc\ ple} = 3537 \cdot (0,53 \cdot 882,2) = 920 \text{ Kg}$$

11.1.16. Disseny del tanc pulmó de la columna d'absorció d'hcl

Quan l'àcid clorhídric surt de l'absorció és important fer un control de les seves propietats, concretament de la densitat, per saber que és a la concentració comercial (32%). És per això que s'ha fet un tanc pulmó per tal de controlar aquest fet i, així, assegurar que l'àcid que surt és el què ha de ser. Per fer-ho s'ha agafat el cabal que s'ha d'emmagatzemar, que es el que passa per aquest tanc pulmó i s'ha determinat un temps de residència de 1 min.

Els resultats obtinguts han estat els següents:

$$9306 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot 1 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1159 \text{ Kg}} = 0,14 \text{ m}^3$$

Càlcul pressió i temperatura de disseny

La temperatura i pressió d'operació que s'han estimat són les mateixes que a la sortida de l'absorbidor, 27,16°C i 130 kPa

Amb aquestes consideracions, el valor de P_d es troba com el valor màxim entre les equacions (13) i (14).

$$P_d = 1,3 \cdot 1,1 = 1,43 \text{ bar} \cdot \frac{14,5 \text{ psi}}{1 \text{ bar}} = 20,74 \text{ psi}$$

$$P_d = 1,3 \text{ bar} \cdot \frac{14,5 \text{ psi}}{1 \text{ bar}} + 25 = 48,85 \text{ psi}$$

Per tant, la pressió de disseny $P_d = 48,85 \text{ psi} = 3,37 \text{ bar}$.

Pel que fa a la temperatura de disseny es troba emprant l'equació (15).

$$T_d = 27,16 + 15 = 42,16^\circ\text{C}$$

D'aquesta manera s'han establert els paràmetres inicials del disseny, recollits a la taula 11,3:

Taula 38. Paràmetres inicials del disseny del tanc de benzè.

T operació (°C)	27,16
P operació (bar)	1,3
P disseny (bar)	3,37
T disseny (°C)	42,16
Temps de residència (min)	1
Q (kg/h)	9307
V a emmagatzemar (m³)	0,14

Amb aquest volum, s'ha decidit sobre dimensionar el tanc un 20%, com a la resta dels tancs de la planta.

$$Volum\ tanc = 0,14 \cdot 1,2 = 0,17\ m^3 \rightarrow 0,2\ m^3$$

$$\% d'ocupació\ del\ tanc = \frac{0,14}{0,2} = 70\ \%$$

Per tant, s'ha obtingut un tanc de 0,2 m³ al 70% d'ocupació.

Un cop establert el volum del tanc s'han calculat les dimensions d'aquest, mitjançant una equació i una relació de H/D:

$$V_{tanc} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (13)$$

$$H/D = 1,5$$

Fent un sistema d'equacions s'han trobat els valors del diàmetre (D) i d'alçada del tanc (H)

- D = 0,5 m
- H = 0,75 m

El nivell del líquid serà la relació entre l'alçada calculada i el sobre dimensionament del tanc; per tant:

$$H_{líquid} = 0,5 \cdot 0,7 = 0,53\ m$$

Disseny del cos del tanc

Per calcular l'espessor del cos cilíndric del tanc s'ha emprat l'equació (16), i amb les restriccions esmentades, de la següent manera:

$$t_{cilindre} = \frac{48,85 \text{ psi} \cdot 0,25 \text{ mm}}{36260 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 48,85 \text{ psi}} + 2,5 = 2,9 \text{ mm}$$

*restriccions:

$$0,385 \cdot 36260 \cdot 0,85 > Pd \rightarrow 11866 > 48,85 \quad \text{SÍ}$$

$$\frac{250}{2} > t \rightarrow 125 > 2,90 \quad \text{SÍ}$$

Càlcul del fons toriesfèric

Pel càlcul del fons toriesfèric del tanc s'ha emprat l'equació (17), ajudats de les consideracions esmentades i de la figura (11,3). Aquest càlcul és el següent:

$$t_{fons} = \left(\frac{1,54 \cdot 48,85 \text{ psi} \cdot 19,69 \text{ inch}}{2 \cdot 36260 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 48,85 \text{ psi}} + 0,098 \text{ inch} \right) \cdot 1,1 = 0,135 \text{ inch}$$

Aquest valor es inferior al valor mínim d'espessor, que és de 0,625 polzades. Per tant, l'espessor del fons és de 0,625 polzades.

$$0,625 \text{ polzades} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ polzades}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 15,88 \text{ mm}$$

Altres paràmetres per dissenyar el fons

A continuació es mostren els valors de r, h1 i h2, tal i com s'han explicat anteriorment.

$$r = 0,1 \cdot 0,5 = 0,05 \text{ m}$$

$$h_1 = 0,05 \text{ m}$$

$$h_2 = 0,5 - \sqrt{(0,5 - 0,05)^2 - (0,25 - 0,05)^2} = 0,10 \text{ m}$$

Per tant, l'alçada total del capçal, emprant l'equació (18) del sostre és la següent:

$$H_{capçal \text{ total}} = 0,05 + 0,10 + 0,01588 = 0,163 \text{ m}$$

I, en conseqüència, l'alçada total del tanc es:

$$H_{total} = 0,75 + 2 \cdot 0,163 = 1,08 \text{ m}$$

Pes del tanc buit

Tal i com s'ha explicat a la introducció de l'apartat, s'ha calculat el pes pel cos cilíndric i pel fons torisfèric.

Pes del cos cilíndric buit

Emprant l'equació (8), s'ha trobat el valor del pes del cos cilíndric buit per emmagatzemar el clor.

$$M_{cos} = (0,151 - 0,147) \cdot 7950 = 27 \text{ Kg}$$

Pes del fons torisfèric buit

Emprant l'equació (19), s'ha calculat el pes del fons torisfèric buit.

$$M_{fons} = (0,015 - 0,011) \cdot 7950 = 34 \text{ Kg}$$

Pes del tanc d'operació

Amb les equacions (20) i (12), s'ha calculat primer el pes del tanc buit i posteriorment, el pes del tanc ple de clor.

$$M_{buit} = 27 + 2 \cdot 34 = 94 \text{ Kg}$$

$$M_{tanc\ ple} = 94 \cdot (0,14 \cdot 1106) = 249 \text{ Kg}$$

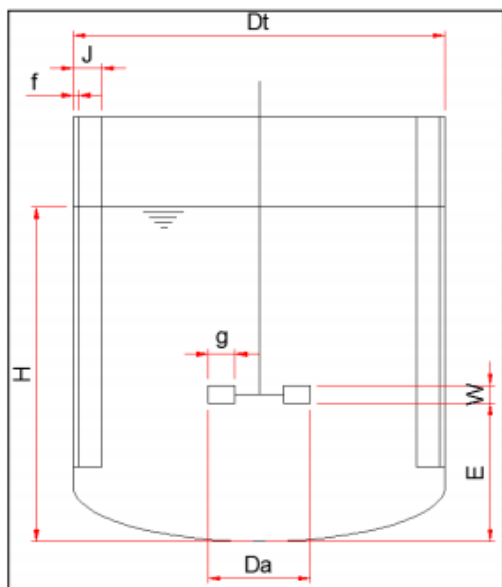
11.1.17. Disseny de mescladors

De la mateixa manera que els tancs pulmó, els mescladors s'han dissenyat per a què els corrents de varies procedències del procés s'adjuntessin i s'homogeneïtzin per evitar dificultats de transferència de matèria i/o de problemes mecànics com poden ser cavitacions de bombes i altres de diversa consideració. El disseny d'aquests mescladors, s'ha fet seguint les normes API 650 i ASME, ja explicades i utilitzades en el disseny dels tancs d'emmagatzematge.

11.1.17.1. Disseny dels agitadors dels mescladors

Pel disseny d'aquests agitador s'utilitzen les correlacions que és poden trobar al llibre "Ingeniería Bioquímica" [posar enllaç biografia]

S'escull un agitador de tipus pitch-bladed, ja que aquests tipus de pales no precisen de bafles de en l'interior del tanc si es col·loca descentrat, a demés proporciona una agitació tant axial com radial. A continuació es mostra una representació de com seria l'agitador.



$H / Dt=1$	$Da / Dt=0.33$	$E / Dt=0.33$
$W / Da= 0.2$	$g / Da=0.25$	$J / Dt=0.1$
$f / Dt=0.02$		

Figura 4. Representació de l'agitador dissenyat.

Un altre aspecte molt importat de un agitador es la potencia proporcionada per dur a terme una bona agitació de la mescla sense vòrtex. El càlcul d'aquesta potència es determina mitjançant les següents equacions:

$$Re = \frac{N \cdot D^2 \cdot \rho}{\mu} \quad (25)$$

On:

Re= numero de Reynolds

N= revolucions per segon del agitador.

D²= diàmetre de la pala del agitador (m²)

ρ= densitat del fluid (kg/m³)

μ= viscositat del fluid (P)

Altres aspectes en tenir en compte abans de calcular el nombre de Reynolds, és saber que la velocitats típiques de agitador escollit, aquestes van en el rang de 3-10 m/s. Per determinar les revolucions per segons, és calcula mitjançant la següent equació:

$$N = \frac{v_{típica}}{\pi \cdot D_{agitador}} \quad (26)$$

Per tant, dependent del equip, s'escollirà una velocitat que estigui dins del rang.

Un cop determinat el Reynolds i amb la següent gràfica es determina el nombre de potència de tipus pitch-bladed.

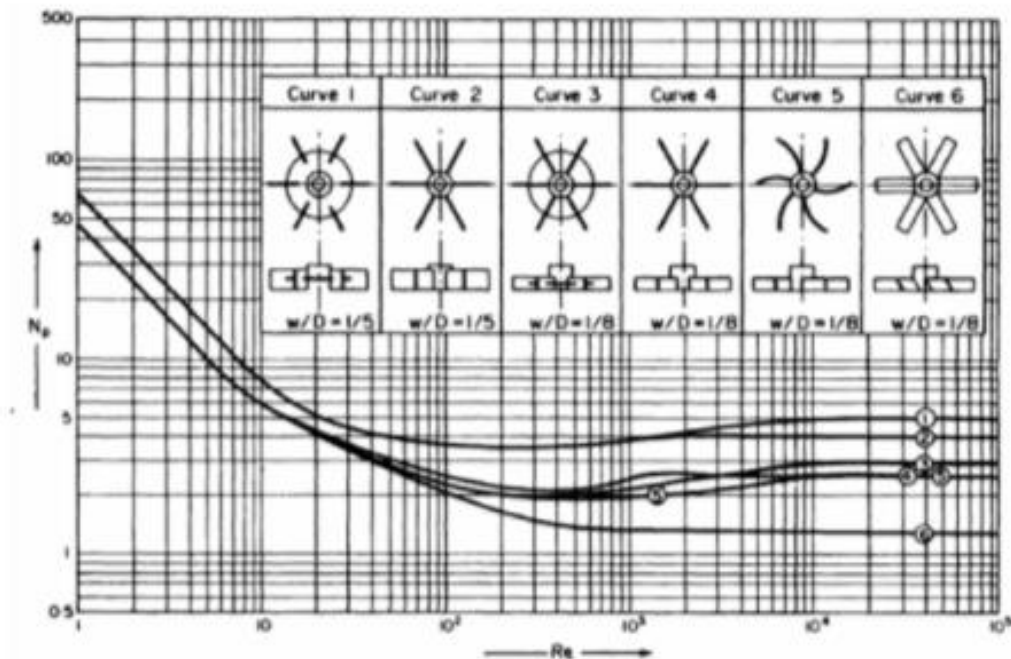


Figura 5. Valors de N_p per a cada valor del Reynolds

Seguidament amb el N_p és determina la potència:

$$P = N_p \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5 \quad (27)$$

On

P =potència del agitador (k W)

N_p = numero de potència.

11.1.18. Disseny del tanc mesclador de benzè i catalitzador

En aquest tanc pulmó, s'emmagatzema i s'homogeneïtzen 3 corrents; el benzè fresc, el benzè recirculat i el catalitzador (FeCl_3) que es dissol en el benzè. Per assegurar que es forma una mescla homogènia, s'ha decidit que el tanc tingui 10 min de temps de residència i s'ha calculat a partir del cabal que hi passa.

$$19130 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot 10 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{849,7 \text{ Kg}} = 3,75 \text{ m}^3$$

D'aquesta manera s'han establert els paràmetres inicials del disseny, recollits a la taula 11,3:

Taula 39. Paràmetres inicials del disseny del tanc de benzè.

Parámetros operación	
T operació (°C)	55
T diseny (°C)	70
P operació (bar)	1,01
P diseny (bar)	2,73
Temps de residència (min)	10
Q (kg/h)	19130
V (m³)	3,75

El següent pas ha estat dividir aquest volum per obtenir tancs més petits, adients a les consideracions. En el cas de la planta, s'ha decidit emmagatzemar la quantitat d'hidròxid de sodi amb 1 tanc amb un sobre dimensionament del 20%:

$$Volum \text{ tanc} = 3,75 \cdot 1,2 = 4,71 \text{ m}^3 \rightarrow 5 \text{ m}^3$$

$$\% d'ocupació \text{ del tanc} = \frac{3,75}{5} = 75 \%$$

Per tant, s'ha obtingut 1 tanc de 5 m³ al 75% d'ocupació.

Un cop establert el volum del tanc s'han calculat les dimensions d'aquest, mitjançant una equació i una relació de H/D:

$$V_{tanc} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (13)$$

$$H/D = 1,5$$

Fent un sistema d'equacions s'han trobat els valors del diàmetre (D) i d'alçada del tanc (H)

- D = 1,5 m
- H = 2,25 m

El nivell del líquid serà la relació entre l'alçada calculada i el sobre dimensionament del tanc; per tant:

$$H_{liquid} = 2,25 \cdot 0,75 = 1,69 \text{ m}$$

Càlcul de l'espessor del cos

L'espessor del cos s'ha calculat mitjançant les equacions (3) i (4). Aquests valors s'han comparat amb els de la taula 11,2 i s'ha escollit el més gran:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot 1,5 \cdot (2,25 - 0,3) \cdot 0,849}{155 \cdot 0,85} + 2,5 = 2,59 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4,9 \cdot 1,5 \cdot (2,25 - 0,3)}{140 \cdot 0,85} = 0,12 \text{ mm}$$

Valor de la taula 11,2 per a D < 15m → 5 mm

Per tant, l'espessor del cos del tanc és de 5 mm.

Càlcul del fons toriesfèric

Pel càlcul del fons toriesfèric del tanc s'ha emprat l'equació (17), ajudats de les consideracions esmentades i de la figura (11,3). Aquest càlcul és el següent:

$$t_{fons} = \left(\frac{1,54 \cdot 39,64 \text{ psi} \cdot 59,01 \text{ inch}}{2 \cdot 36260 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 39,64 \text{ psi}} + 0,098 \text{ inch} \right) \cdot 1,1 = 0,173 \text{ inch}$$

Aquest valor es inferior al valor mínim d'espessor, que és de 0,625 polzades. Per tant, l'espessor del fons és de 0,625 polzades.

$$0,625 \text{ polzades} \cdot \frac{1 \text{ m}}{39,37 \text{ polzades}} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 15,88 \text{ mm}$$

Altres paràmetres per dissenyar el fons

A continuació es mostren els valors de r, h1 i h2, tal i com s'han explicat anteriorment.

$$r = 0,1 \cdot 1,5 = 0,15 \text{ m}$$

$$h_1 = 0,05 \text{ m}$$

$$h_2 = 1,5 - \sqrt{(1,5 - 0,15)^2 - (0,75 - 0,15)^2} = 0,29 \text{ m}$$

Per tant, l'alçada total del capçal, emprant l'equació (18) del sostre és la següent:

$$H_{\text{capçal total}} = 0,05 + 0,29 + 0,01588 = 0,357 \text{ m}$$

I, en conseqüència, l'alçada total del tanc es:

$$H_{\text{total}} = 2,25 + 2 \cdot 0,357 = 2,96 \text{ m}$$

Pes del tanc buit

Tal i com s'ha explicat a la introducció de l'apartat, s'ha calculat el pes pel cos cilíndric i pel fons torièsfèric.

Pes del cos cilíndric buit

Emprant l'equació (8), s'ha trobat el valor del pes del cos cilíndric buit per emmagatzemar el clor.

$$M_{\text{cos}} = (4,03 - 3,98) \cdot 7950 = 423 \text{ Kg}$$

Pes del fons torièsfèric buit

Emprant l'equació (19), s'ha calculat el pes del fons torièsfèric buit.

$$M_{\text{fons}} = (0,238 - 0,210) \cdot 7950 = 225 \text{ Kg}$$

Pes del tanc d'operació

Amb les equacions (20) i (12), s'ha calculat primer el pes del tanc buit i posteriorment, el pes del tanc ple de clor.

$$M_{\text{buit}} = 423 + 2 \cdot 225 = 873 \text{ Kg}$$

$$M_{\text{tanc ple}} = 873 \cdot (3,8 \cdot 849) = 4062 \text{ Kg}$$

Disseny de l'agitador del mesclador

Emprant les consideracions i equacions (21), (22) i (23) i amb la figura (11,4) i (11,5) de l'apartat on s'explica el disseny de l'agitador per als tancs de mescla s'han assolit els següents paràmetres per al disseny i funcionament adequat d'aquest.

Taula 40. Paràmetres de longituds de l'agitador.

H (mm)	1690
Dt (mm)	1510
Da (mm)	498
E (mm)	498
g (mm)	125
W (mm)	100

Taula 41. Paràmetres de potència de l'agitador.

ρ (Kg/m³)	849,7
N (rev/s)	3,2
μ (P)	6,25E-03
Re	9,91E5
Np	1,4
P (KW)	1,2

11.1.19. Disseny tanc d'emmagatzematge del mesclador de naoh i aigua

En aquest mesclador, es mesclen i s'homogeneïtzen l'hidròxid de sodi i l'aigua per dur a terme l'extracció. Per assegurar que es forma una mescla homogènia, s'ha decidit que el tanc tingui 5 min de temps de residència i s'ha calculat a partir del cabal que hi passa.

$$22 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{1 h}{60 min} \cdot 5 min \cdot \frac{1 m^3}{849,7 Kg} = 1,83 m^3$$

D'aquesta manera s'han establert els paràmetres inicials del disseny, recollits a la taula 11,3:

Taula 42. Paràmetres inicials del disseny del tanc de benzè.

T operació (°C)	20
P operació (bar)	1,01
Temps de residència (min)	10
Q (kg/h)	22,000
V a emmagatzemar (m³)	2,2

El següent pas ha estat dividir aquest volum per obtenir tancs més petits, adients a les consideracions. En el cas de la planta, s'ha decidit emmagatzemar la quantitat d'hidròxid de sodi amb 1 tanc amb un sobre dimensionament del 20%:

$$Volum tanc = 1,83 \cdot 1,2 = 2,2 m^3 \rightarrow 2,5 m^3$$

$$\% d'ocupació del tanc = \frac{1,83}{2,5} = 73 \%$$

Per tant, s'ha obtingut 1 tanc de 2,5 m³ al 73% d'ocupació.

Un cop establert el volum del tanc s'han calculat les dimensions d'aquest, mitjançant una equació i una relació de H/D:

$$V_{tanc} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (13)$$

$$H/D = 1,5$$

Fent un sistema d'equacions s'han trobat els valors del diàmetre (D) i d'alçada del tanc (H)

- D = 1,3 m
- H = 1,95 m

El nivell del líquid serà la relació entre l'alçada calculada i el sobre dimensionament del tanc; per tant:

$$H_{liquid} = 1,95 \cdot 0,75 = 1,43 \text{ m}$$

Càlcul de l'espessor del cos

L'espessor del cos s'ha calculat mitjançant les equacions (3) i (4). Aquests valors s'han comparat amb els de la taula 11,2 i s'ha escollit el més gran:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot 1,3 \cdot (1,95 - 0,3) \cdot 0,849}{155 \cdot 0,85} + 2,5 = 2,5 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4,9 \cdot 1,3 \cdot (1,95 - 0,3)}{140 \cdot 0,85} = 0,08 \text{ mm}$$

Valor de la taula 11,2 per a D < 15m → 5 mm

Per tant, l'espessor del cos del tanc és de 5 mm.

Càlcul del fons torièsfèric

Pel càlcul del fons torièsfèric del tanc s'ha emprat l'equació (17), ajudats de les consideracions esmentades i de la figura (11,3). Aquest càlcul és el següent:

$$t_{fons} = \left(\frac{1,54 \cdot 14,65 \text{ psi} \cdot 51,18 \text{ inch}}{2 \cdot 36260 \text{ psi} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 14,65 \text{ psi}} + 0,098 \text{ inch} \right) \cdot 1,1 = 0,129 \text{ inch}$$

Aquest valor es inferior al valor mínim d'espessor, que és de 0,625 polzades. Per tant, l'espessor del fons és de 0,625 polzades.

$$0,625 \text{ polzades} \cdot \frac{1m}{39,37 \text{ polzades}} \cdot \frac{1000mm}{1m} = 15,88 \text{ mm}$$

Altres paràmetres per dissenyar el fons

A continuació es mostren els valors de r , h_1 i h_2 , tal i com s'han explicat anteriorment.

$$r = 0,1 \cdot 1,3 = 0,13 \text{ m}$$

$$h_1 = 0,05 \text{ m}$$

$$h_2 = 1,3 - \sqrt{(1,3 - 0,13)^2 - (0,65 - 0,13)^2} = 0,25 \text{ m}$$

Per tant, l'alçada total del capçal, emprant l'equació (18) del sostre és la següent:

$$H_{\text{capçal total}} = 0,05 + 0,25 + 0,01588 = 0,318 \text{ m}$$

I, en conseqüència, l'alçada total del tanc es:

$$H_{\text{total}} = 1,95 + 2 \cdot 0,318 = 2,58 \text{ m}$$

Pes del tanc buit

Tal i com s'ha explicat a la introducció de l'apartat, s'ha calculat el pes pel cos cilíndric i pel fons toriesfèric.

Pes del cos cilíndric buit

Emprant l'equació (8), s'ha trobat el valor del pes del cos cilíndric buit per emmagatzemar el clor.

$$M_{\text{cos}} = (2,33 - 2,30) \cdot 7950 = 244 \text{ Kg}$$

Pes del fons toriesfèric buit

Emprant l'equació (19), s'ha calculat el pes del fons toriesfèric buit.

$$M_{\text{fons}} = (0,189 - 0,178) \cdot 7950 = 90 \text{ Kg}$$

Pes del tanc d'operació

Amb les equacions (20) i (12), s'ha calculat primer el pes del tanc buit i posteriorment, el pes del tanc ple de clor.

$$M_{buit} = 244 + 2 \cdot 90 = 424 \text{ Kg}$$

$$M_{tanc\ ple} = 424 \cdot (1,83 \cdot 1000) = 2258 \text{ Kg}$$

Disseny de l'agitador del mesclador

Emprant les consideracions i equacions (21), (22) i (23) i amb la figura (11,4) i (11,5) de l'apartat on s'explica el disseny de l'agitador per als tancs de mescla s'han assolit els següents paràmetres per al disseny i funcionament adequat d'aquest.

Taula 43. Paràmetres de longituds de l'agitador.

H (mm)	1430
Dt (mm)	1950
Da (mm)	644
E (mm)	644
g (mm)	161
W (mm)	129

Taula 44. Paràmetres de potència de l'agitador.

ρ (Kg/m³)	1000
N (rev/s)	2,47
μ (P)	1,00E-03
Re	9,4E6
Np	5
P (KW)	2,3

11.1.20. Disseny tanc d'emmagatzematge de l'efluent residual

Després de l'absorció s'obté un efluent residual que conte benzè i HCl. Aquest efluent es gestiona de forma externa, tal i com s'esmenta a l'apartat de medi. Tot i així, abans d'enviar-ho a gestió externa s'ha d'anar emmagatzemant fins que es tingui una quantitat substancial.

El primer pas per a començar el disseny del tanc ha estat calcular la quantitat de producte a emmagatzemar, amb un stock de 3 dies, de la següent forma:

$$507,3 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{1 m^3}{890 Kg} \cdot \frac{24 h}{1 dia} \cdot 3 dies stock = 41,04 m^3$$

D'aquesta manera s'han establert els paràmetres inicials del disseny, recollits a la taula 11,3:

Taula 45. Paràmetres inicials del disseny del tanc del monoclorbenzè.

T operació (°C)	20
P operació (bar)	1,01
Temps de stock (dies)	3
Q (kg/h)	507,3
V a emmagatzemar (m³)	41,04

$$Volum tanc = 41,04 \cdot 1,2 = 49 m^3 \rightarrow 50 m^3$$

$$\% d'ocupació del tanc = \frac{41,04}{50} = 82,1 \%$$

Per tant, s'ha obtingut 1 tancs de 50 m³ al 81,6% d'ocupació per tal d'emmagatzemar tot el monoclorbenzè que es produeix.

Un cop establert el volum de cada tanc s'han calculat les dimensions d'aquest, mitjançant una equació i una relació de H/D:

$$V_{tanc} = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad (13)$$

$$H/D = 1,5$$

Fent un sistema d'equacions s'han trobat els valors del diàmetre (D) i d'alçada del tanc (H)

- D = 3,5 m
- H = 5,25 m

El nivell del líquid serà la relació entre l'alçada calculada i el sobre dimensionament del tanc; per tant:

$$H_{líquid} = 5,23 \cdot 0,821 = 4,29 m$$

Càlcul de l'espessor del cos

L'espessor del cos s'ha calculat mitjançant les equacions (3) i (4). Aquests valors s'han comparat amb els de la taula 11,2 i s'ha escollit el més gran:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot 3,5 \cdot (5,25 - 0,3) \cdot 0,89}{155 \cdot 0,85} + 2,5 = 3,07 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4,9 \cdot 3,5 \cdot (5,25 - 0,3)}{145 \cdot 0,85} = 0,69 \text{ mm}$$

Valor de la taula 11,2 per a $D < 15\text{m} \rightarrow 5 \text{ mm}$

Per tant, l'espessor del cos del tanc és de 5 mm.

Càlcul del sostre cònic del tanc

Per calcular les dimensions i l'espessor del sostre s'utilitzen varies correlacions de la norma API 650, amb els paràmetres inicials recollits a la taula següent:

Taula 46. Paràmetres del con.

R (m)	1,74
Θ (º)	15
Sin (Θ)	0,259
Cos (Θ)	0,966
K	1,806

Alçada del con equació (7): $H = 0,259 \cdot 1,806 = 0,467 \text{ m}$

Per calcular l'espessor del sostre s'ha emprat l'equació (5), tenint en compte que l'espessor mínim de disseny ha de ser 4,76 mm.

$$T_t = \frac{3500}{4800 \cdot 0,259} + 2,5 = 5,31 \text{ mm}$$

Per tant les especificacions del sostre del tanc de benzè són les recollides a la taula següent:

Taula 47. Especificacions del sostre cònic del tanc de monoclorbenzè.

Tt (mm)	5,31
Di (m)	3,5
De (m)	3,51
H (m)	0,467
Θ (º)	15

Càlcul del fons del tanc

Tal com s'ha explicat, l'espessor del fons ve donat pel gruix i per la tolerància de corrosió. Sabent que el mínim gruix de corrosió és de 6 mm i que la tolerància a la corrosió és de 2,5 mm i amb l'equació (1) s'ha obtingut el valor.

$$t = 6 + 2,5 = 8,5 \text{ mm}$$

L'altre paràmetre a tenir en compte del fons és el diàmetre. El seu valor s'ha obtingut emprant l'equació (2).

$$D_{fons} = 3,5 + 0,05 = 3,55 \text{ m}$$

Càlcul del pes del tanc buit

Emprant les equacions (8), (9) i (10) s'han obtingut els valors dels 3 pesos de les 3 parts del tanc.

Pes cos

$$M_{cos} = \left(\left(\frac{\pi}{4} \cdot 3,51^2 \cdot 5,23 \right) - \left(\frac{\pi}{4} \cdot 3,5^2 \cdot 5,23 \right) \right) \cdot 8690 = 2495 \text{ Kg}$$

Pes del sostre

$$M_{sostre} = \left(\left(\frac{\pi \cdot 1,76^2 \cdot 0,467}{3} \right) - \left(\frac{\pi \cdot 1,75^2 \cdot 0,467}{3} \right) \right) \cdot 8690 = 147 \text{ Kg}$$

Pes del fons

$$M_{fons} = (\pi \cdot 3,35 \cdot 0,085) \cdot 8690 = 731 \text{ Kg}$$

Pes d'operació del tanc

Pel càlcul d'operació del tanc s'han emprat les equacions (11) i (12) obtenint els següents valors.

$$M_{buit \text{ total}} = 2495 + 731 + 147 = 3373 \text{ Kg}$$

$$M_{tanc \text{ ple}} = 3373 + (41 \cdot 890) = 39898 \text{ Kg}$$

Càlcul de cubetes

Tal i com s'ha explicat a l'apartat 11,1,1,11, s'han calculat les dimensions de les cubetes i les distàncies entre els tancs. Com tenim 8 tanc de benzè s'ha establert fer 2 files de 4 tancs cadascuna. Per tant, seguint els càlculs esmentats s'han assolit els resultats següents:

Taula 48. Distàncies interiors de la cubeta.

Paret-tanc (m)	1
Tanc (m)	3,50

Taula 49. Paràmetres pel càlcul de les dimensions de la cubeta.

Vmax (m3)	50
S	70

Taula 50. Dimensions de la cubeta de benzè.

Amplada (m)	5,5
Llargada (m)	5,5
Alçada (m)	0,72

11.2. Reactors

11.2.1. Reactor de cloració

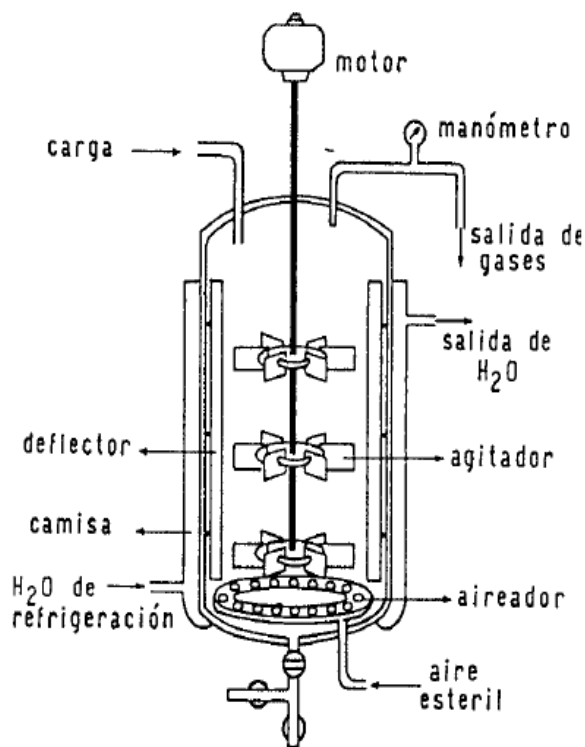


Figura 6. Exemple d'un reactor agitat amb bombolleig.

Aquest apartat es el que correspon al disseny funcional i mecànic del reactor de cloració. En el nostre cas es disposarà de dos reactors idèntics per a realitzar la cloració, de tal manera que, es desenvoluparan les tècniques de càlcul per a un sol reactor i a l'hora d'implementar-ho en el procés es realitzarà un segon reactor amb les mateixes característiques del primer. S'ha decidit que així fos, ja que ens ajudarà a l'hora de realitzar i concloure diversos càlculs, que amb un sol reactor esdevindrien més complicats, sobretot en el cas de la refrigeració.

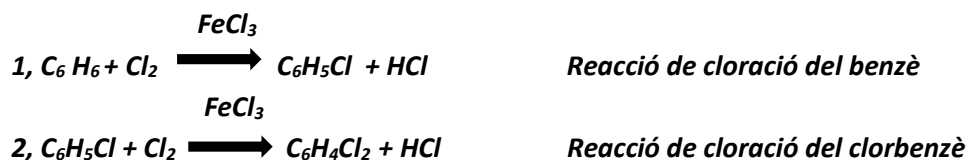
A partir d'aquest punt fins al final de l'apartat (11.2.1) , qualsevol resultat de disseny es referirà a un sol reactor com a divisió del total de reactors escollits.

Un cop es coneguda la reacció que es dona, la cinètica i l'entalpia de reacció es pot procedir a realitzar el disseny d'aquest

reactor.

Es tracta d'un reactor bifàsic on, per la part inferior es alimentat per Cl_2 en fase gas, i per una mescla de benzè (C_6H_6) i catalitzador (FeCl_3) en fase líquida, i per la part superior es realitzarà la extracció dels productes per sobreexidor. El tipus de reactor escollit ha sigut el més semblant a una columna de bombolleig amb agitació i refrigeració per mitja canya.

Les reaccions que es portaran a terme són les següents:



Les reaccions es produiran de forma controlada a 55°C i 2,4 atm amb un catalitzador sòlid que entrarà al reactor dissolt al 100% amb el nostre reactiu líquid, en aquest cas el benzè. Per tant, no caldrà realitzar la immobilització d'aquest a dins del reactor i es separarà posteriorment amb els equips requerits per a fer-ho. Tanmateix s'ha suposat que amb la proporció benzè/clor amb la que s'alimenta el reactor tot el clor que entra es solubilitza a la fase del benzè.

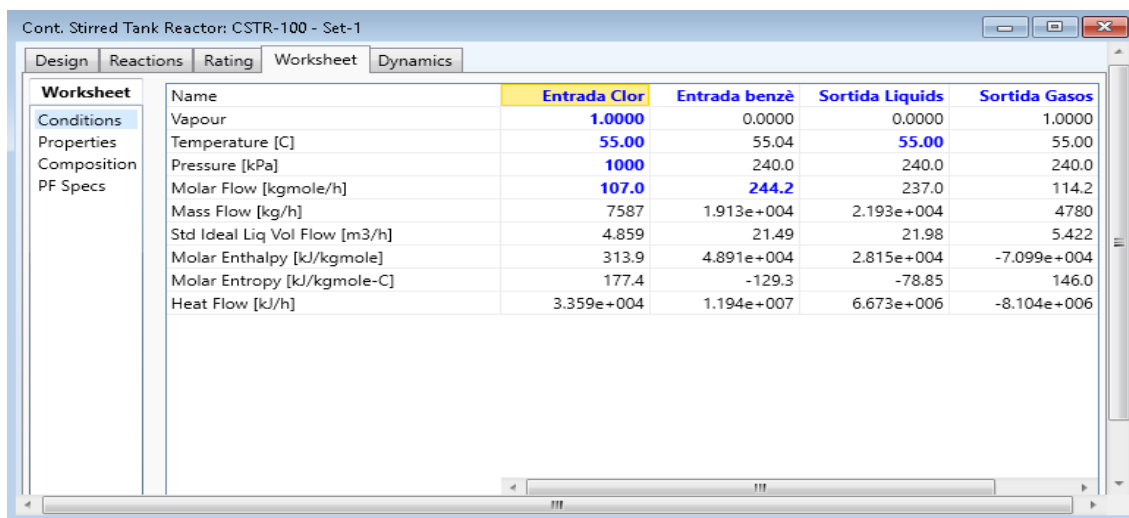
Per a determinar les principals característiques de disseny que resultaran del càlcul del paràmetres introductoris del nostre projecte, s'ha realitzat un primer model del reactor amb l'eina de simulació computacional *Aspen Hysys 8.0*. Aquesta eina ens ha permès trobar els paràmetres més rellevants de disseny, que més endavant ens permetran realitzar el disseny mecànic i funcional de forma més detallada.

A continuació es mostra la taula de dades utilitzades pel simulador que ens ha permès el disseny del nostre reactor:

Taula 51. Condicions i paràmetres introduïts al simulador.

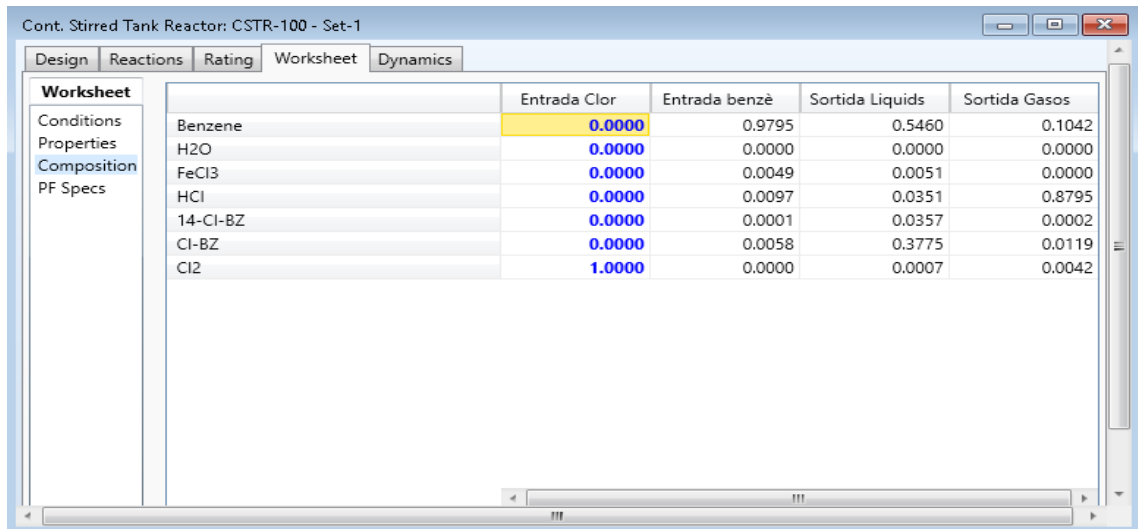
Pressió	2,4 atm	Solubilitat del clor en benzè	54,43 mol Cl ₂ / mol de benzè
Temperatura	328 °K	Composició d'entrada de benzè	0,97
Entalpia de reacció	-125,52 KJ/mol	Composició d'entrada de clor	1
Constant cinètica 1a reacció	8,84e-003 Kmol/m ³ ·s	Cabal molar d'entrada de benzè	244,2 Kmol/h
Constant cinètica 2a reacció	1,1050e-003 Kmol/m ³ ·s	Cabal molar d'entrada de clor	107 Kmol/h

Tanmateix a continuació es mostren les instantànies extretes del propi simulador on es poden veure els resultats obtinguts per a cada corrent i variable característica:



Worksheet	Name	Entrada Clor	Entrada benzè	Sortida Liquids	Sortida Gasos
Conditions	Vapour	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000
Properties	Temperature [C]	55.00	55.04	55.00	55.00
Composition	Pressure [kPa]	1000	240.0	240.0	240.0
PF Specs	Molar Flow [kgmole/h]	107.0	244.2	237.0	114.2
	Mass Flow [kg/h]	7587	1.913e+004	2.193e+004	4780
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	4.859	21.49	21.98	5.422
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	313.9	4.891e+004	2.815e+004	-7.099e+004
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	177.4	-129.3	-78.85	146.0
	Heat Flow [kJ/h]	3.359e+004	1.194e+007	6.673e+006	-8.104e+006

Figura 7. Corrents d'entrada i corrents de sortida calculats.



	Entrada Clor	Entrada benzè	Sortida Liquids	Sortida Gasos
Benzene	0.0000	0.9795	0.5460	0.1042
H2O	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
FeCl3	0.0000	0.0049	0.0051	0.0000
HCl	0.0000	0.0097	0.0351	0.8795
14-Cl-BZ	0.0000	0.0001	0.0357	0.0002
Cl-BZ	0.0000	0.0058	0.3775	0.0119
Cl2	1.0000	0.0000	0.0007	0.0042

Figura 8. Composicions d'entrada i sortida calculades.

Taula 52. Valors obtinguts per al disseny funcional del reactor.

Volum	45 m ³
Diàmetre	3 m
Alçada	6 m
Hold up de gas	0,2
Conversió (referida al clorbenzè)	0,37
Temps de residència	4,04 h

11.2.1.1. Disseny mecànic

Pel que es refereix al disseny mecànic del reactor, en primera instància s'ha d'escollir el material adequat per albergar els components i la reacció que tindrà lloc en aquest. En el nostre cas s'ha escollit el AISI 316L molt utilitzat a la indústria química i que suporta molt bé els components halogenats com el clor i clorbenzè amb una tolerància a la corrosió de 0,51 mm/any.

Per a la realització de tots els càlculs de gruixos del reactor, s'ha utilitzat el codi ASME.

Inicialment s'han realitzat tots els càlcul per a gruixos derivats de la pressió interna del cos del reactor segons la següent equació:

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C.A. = \frac{35,27 \cdot 118,11}{15700 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 35,27} + 0,4 = 0,71 \text{ inch}$$

On:

t és el gruix [inch]

P és la pressió de disseny [psi]

R és el radi intern [inch]

S és la tensió del material [psi]

E és el valor de l'eficiència

C.A. és la tolerància a la corrosió [inch]

A continuació es realitza el càlcul de gruix per a la pressió interna dels caps toriesfèrics segons l'equació següent:

$$t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} + C.A. = \frac{35,27 \cdot 118,11 \cdot 1,1}{2 \cdot 15700 \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 35,27} + 0,4 = 0,57 \text{ inch}$$

$$t_{total} = t + 0,1 \cdot t = 0,57 + 0,1 \cdot 0,57 = 0,63 \text{ inch}$$

On:

t és el gruix [inch]

P és la pressió de disseny [psi]

L és el radi intern del disc [inch]

M és un factor tabulat que depèn de L/r

S és la tensió del material [psi]

E és el valor de l'eficiència

C.A. és la tolerància a la corrosió [inch]

Seguidament es pot prosseguir al càlcul de les alçades dels caps toriesfèrics utilitzant les següents equacions:

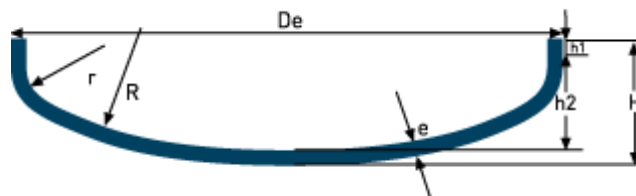


Figura 9. Acotacions capçal toriesfèric.

$$h_1 = 3,5 \cdot e = 3,5 \cdot 0,63 = 2,2 \text{ inch}$$

$$h_2 = 0,1935 \cdot De - 0,455 \cdot e = 0,1935 \cdot 118,11 - 0,455 \cdot 0,63 = 22,57 \text{ inch}$$

$$H = h_1 + h_2 + e = 2,2 + 22,57 + 0,63 = 25,4 \text{ inch}$$

On:

e és el gruix calculat anteriorment [inch]

De és el radi intern del disc [inch]

A continuació es procedeix a realitzar els càlculs dels gruixos del cos del reactor derivats però, de la pressió externa.

Pel que fa al cos cilíndric, es defineix un gruix a partir d'un mètode iteratiu on es suposa un gruix i a partir d'aquest es calcula la pressió. Si aquesta pressió es superior a la pressió externa es dona per bo el valor de gruix suposat. El càlcul iteratiu es realitza de la següent manera:

$$P = 14,7 \text{ psi}$$

$$t_{suposada} = 10 \text{ mm}$$

$$L' = D \cdot \frac{2}{3} \cdot H = 3000 + \frac{2}{3} \cdot 4700 = 6133,33 \text{ mm}$$

$$D_0 = D + 2 \cdot t_{suposada} = 3000 + 2 \cdot 10 = 3020 \text{ mm}$$

$$\frac{L'}{D_0} = 2,03$$

$$\frac{D_0}{t_{suposada}} = 302$$

Gràficament es troba:

$$A = 0,0003$$

$$B = 3500$$

$$Pa = \frac{4 \cdot B}{3 \cdot (D_0/t)} = \frac{4 \cdot 3500}{3 \cdot 302} = 15,45 \text{ psi}$$

Per tant, el gruix del cos cilíndric calculat per a la pressió externa serà de **10 mm**.

Per als caps toriesfèrics es calcula dos gruixos, el primer, calculat amb l'equació de la pressió interna (Eq.....) amb la diferència d'utilitzar com a pressió de disseny, 1,67 vegades la pressió externa; i el segon, es realitza de forma iterativa amb les següents equacions, utilitzant també com a pressió de disseny 1,67 vegades la pressió externa.

$$A = \frac{0,125}{D/t_{suposada}}$$

$$B \rightarrow \text{gràficament}$$

$$Pa = \frac{B}{D/t_{suposada}} \geq 1,67 \cdot P$$

En aquest cas, el gruix obtingut ha estat de **25,67 mm**.

Un cop obtinguts tots els gruixos, tant per a pressió interna com externa, es determina que els gruixos a utilitzar seran els obtinguts a partir del càlcul per a pressió interna (valors més grans), i per tant el cos cilíndric tindrà un gruix de **1,81 cm** i els caps toriesfèrics de **1,6 cm**.

El següent pas és calcular el pes del reactor, buit i ple. Primerament es calcula el pes del cilindre a partir de la densitat de l'AISI 316L, l'àrea i l'alçada, de la següent manera:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (3^2 - 2,96^2) = 0,18 \text{ m}^2$$

$$H = 4,72 \text{ m}$$

$$\rho_{316L} = 7960 \text{ kg/m}^3$$

$$Pes_{cilindre} = A \cdot H \cdot \rho = 0,18 \cdot 4,72 \cdot 7960 = 7034,79 \text{ kg}$$

Es calcula llavors el pes dels caps toriesfèrics de la següent manera:

$$V_{int} = 0,0809 \cdot L_{int}^3 = 0,0809 \cdot 2,96^3 = 2,09 \text{ m}^3$$

$$V_{ext} = 0,0809 \cdot L_{ext}^3 = 0,0809 \cdot 3^3 = 2,1 \text{ m}^3$$

$$V_{fons \text{ toriesfèric}} = V_{ext} - V_{int} = 2,1 - 2,09 = 0,09 \text{ m}^3$$

$$Pes_{fons \text{ toriesfèric}} = V_{fons \text{ toriesfèric}} \cdot \rho = 0,09 \cdot 7960 = 686,25 \text{ kg}$$

Ara ja es pot procedir a calcular el pes total del reactor buit.

$$Pes_{buit} = 7034,79 + 2 \cdot 686,25 = 8407,29 \text{ kg}$$

Pel que fa al pes que tindrà el reactor en operació, es a dir amb un 80% de volum de líquid es procedeix a calcular-ho de la següent forma:

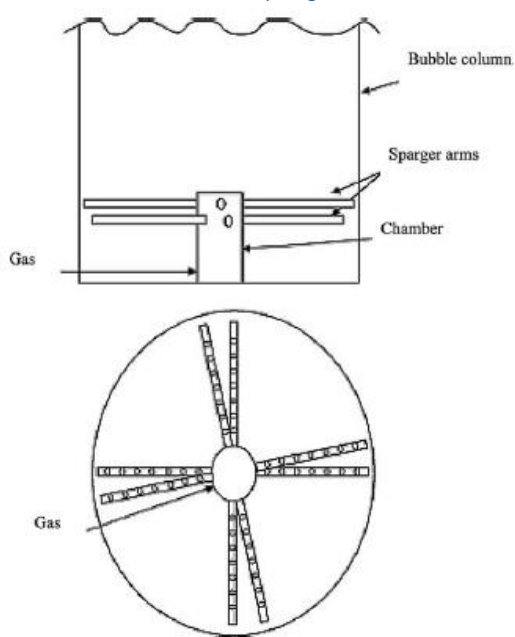
$$V_{reactor} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H_{cilindre} + 2 \cdot V_{int \text{ toriesfèric}} = \frac{\pi}{4} \cdot 3^2 \cdot 6 \cdot 0,099 = 44,5 \text{ m}^3$$

$$Pes_{ple} = V_{reactor} \cdot \rho_{líquid} + Pes_{buit} = 44,5 \cdot 878,6 + 8407,29 = 47513,41 \text{ kg}$$

Taula 53. Gruixos, alçades i pes final del reactor.

Gruix cos cilíndric	1,81 cm
Gruix caps toricsfèrics	1,6 cm
H	64,51 cm
h1	2,2 cm
h2	22,57 cm
Pes buit	8407 kg
Pes ple	47513,41 kg

11.2.1.2. Difusor o Sparger



Per l'entrada de gas, serà necessari disposar d'un difusor que permeti l'entrada de gas de manera uniforme i amb les característiques adequades que afavoriran la bona dispersió del gas i per tant la correcta realització de la reacció. En aquest aspecte s'han consultat els resultats obtinguts a l'article (A.V. Kulkarni, J.B. Joshi, 2011) on s'estudia les característiques de diferents tipus de difusors en funció de paràmetres com la pressió del reactor o la velocitat superficial del gas. A continuació es desenvoluparan els càlculs que s'han seguit per escollir el tipus de difusor a utilitzar així com les seves característiques de disseny:

Figura 10. Representació d'un difusor de roda.

Inicialment s'ha calculat la velocitat superficial del gas de la següent manera:

$$v_{gas_{sup}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_1 - P_2)}{\rho \cdot \left[\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1\right]}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (405200 - 243120)}{3,21 \cdot \left[\left(\frac{0,002}{1,3e-06}\right)^2 - 1\right]}} = 0,21 \text{ m/s}$$

On:

P_1 és la pressió d'entrada del gas al reactor [Pa]

P_2 és la pressió d'operació del reactor [Pa]

ρ és la densitat del gas [Kg/m³]

A_1 és l'àrea d'una canonada del difusor [m²]

A_2 és l'àrea d'un forat [m²]

Seguidament es troba la quantitat de forats totals necessaris per al difusor:

$$\text{Àrea total}_{forats} = \frac{Q}{v_{gas_{sup}}} = \frac{2,498}{997,32} = 0,0033 \text{ m}^2$$

$$Forats\ totals = \frac{\text{\AA}rea\ total_{forats}}{\text{\AA}rea\ forat} = \frac{0,0033}{1,3e-06} = 2547\ forats$$

On:

Q és el cabal volumètric del gas [m³/h]

V_{gas_{sup}} és la velocitat superficial del gas [m/h]

A continuació es mostra la taula amb les principals característiques funcionals i de disseny del difusor:

Taula 54. Característiques del difusor.

Pressió entrada gas	4 atm	Diàmetre dels forats	1,2 mm
Pressió operació reactor	2,4 atm	Diàmetre de la canonada	5 cm
Velocitat superficial	0,21 m/s	Distància entre forats/Diàmetre de forat	5
Velocitat crítica	14,10 m/s	Número de forats	2547
Tipus de difusor	Difusor tipus roda (<i>Wheel type sparger</i>)	Número de canonades	12
Diàmetre de la cambra	0,6 m	Número de seccions de la cambra	2
Alçada de la cambra	1 m	Mida mitjana de bombolla	12 mm

11.2.1.3. Refrigeració

En quant a la refrigeració, la reacció és molt exotèrmica i, per tant, hi haurà força problemes per a mantenir la temperatura del reactor a la temperatura d'operació. S'ha decidit utilitzar una refrigeració mitjançant una mitja canya amb aigua glicolada (30%) com a fluid refrigerant, assegurant així que es manté la temperatura desitjada de 55°C.

Inicialment, es calcula el calor de reacció total, que serà el cabal de calor que s'haurà de refrigerar:

$$q_{total} = \Delta H \cdot Q_{MCB} = -125 \frac{kJ}{mol} \cdot 43845,3 \frac{mol}{h} = -5,50e + 06 \frac{kJ}{h}$$

Seguidament es realitzen els càlculs corresponent per a l'obtenció del cabal d'aigua de refrigeració i de l'àrea de bescanvi per a la mitja canya, utilitzant un diàmetre intern de 0,1 m i una temperatura d'entrada de l'aigua glicolada de -10°C i una de sortida de 35°C:

$$A_{reactor} = \pi \cdot D_{reactor} \cdot H_{reactor} = \pi \cdot 3 \cdot 6 = 56,55\ m^2$$

$$\Delta T_{ML} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(328 - 263) - (328 - 308)}{\ln\left(\frac{328 - 263}{328 - 308}\right)} = 38,18\ K$$

$$U = 1706,41 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$A_{bescanvi} = -\frac{q_{total}}{U \cdot \Delta T_{ML}} = \frac{1528739,46\ W}{1706,41 \cdot 38,18} = 23,46\ m^2$$

Un cop s'ha comprovat que l'àrea de bescanvi és inferior a l'àrea del reactor i que per tant amb aquestes condicions hi ha suficient àrea per a refrigerar el reactor, es procedeix al càlcul del cabal necessari:

$$m = \frac{-q}{C_p \cdot \Delta T} = \frac{5,50e + 06 \frac{kJ}{h}}{3,729 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 45K} = 32796,77 \frac{kg}{h}$$

Es calcula llavors la longitud i el número de voltes al reactor de la següent manera:

$$\begin{aligned} Longitud &= \frac{A_{bescanvi}}{\pi \cdot D_{int}} = \frac{23,46 m^2}{\pi \cdot 0,1 m} = 74,7 m \\ Perímetre_{reactor} &= 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 1,5 = 9,42 m \\ N^o_{voltes} &= \frac{Longitud}{Perímetre_{reactor}} = \frac{74,7}{9,42} = 7,92 \approx 8 voltes \end{aligned}$$

Ara que s'ha trobat el número de voltes del reactor es necessari trobar la distància entre voltes, es realitza de la següent forma:

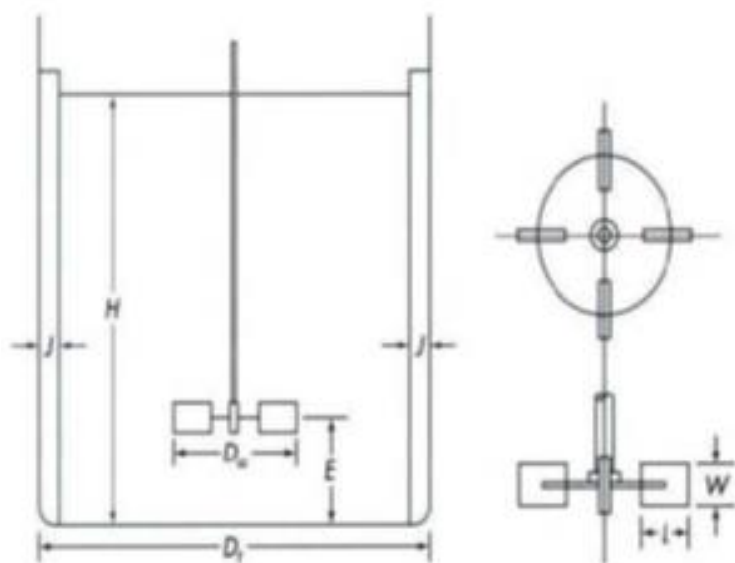
$$d = \frac{H - D_T \cdot N^o_{voltes}}{N^o_{voltes} - 1} = \frac{4,8 m - 0,1 m \cdot 8}{8 - 1} = 0,58 m \approx 60 cm$$

A continuació es mostren les principals característiques funcionals i de disseny de la mitja canya:

Taula 55. Característiques de la refrigeració.

Fluid refrigerant	Aigua-glicol 30%
Cabal de refrigerant	528 L/min
Longitud	74,7 m
Diàmetre intern	10 cm
Nº de voltes	8
Distància entre voltes	60 cm

11.2.1.4. Agitació



L'agitació del reactor es dissenya a partir de correlacions (F. Gòdia, J. López Santín, 2000). El material de disseny serà també AISI 316L i serà un agitador de turbinas Rushton amb 4 pales i dos nivells d'agitació per assegurar la correcta barreja de tots els components.

Inicialment, a partir del diàmetre del reactor, es calculen tots els paràmetres de dimensionament necessaris per a realitzar la correlació:

Figura 11. Anotacions dels paràmetres de disseny característics d'un agitador.

$$D_a = \frac{1}{3} \cdot D_{reactor} = \frac{1}{3} \cdot 3 = 1 \text{ m}$$

$$J = \frac{1}{12} \cdot D_{reactor} = \frac{1}{12} \cdot 3 = 0,25 \text{ m}$$

$$W = 0,2 \cdot D_a = 0,2 \cdot 1 = 0,2 \text{ m}$$

$$L = 0,25 \cdot D_a = 0,25 \cdot 1 = 0,25 \text{ m}$$

$$E = \frac{1}{6} \cdot D_{reactor} = \frac{1}{6} \cdot 3 = 0,5 \text{ m}$$

Seguidament es procedeix a calcular la potència de l'agitador. Es calcula a partir del número de potència. Aquest número es troba a partir de correlacions gràfiques segons el Reynolds i el tipus d'agitador ha utilitzar. Per a calcular el Reynolds es necessari conjuntament amb altres paràmetres, trobar el nombre de revolucions per segon i la velocitat del fluid que s'està agitant on, habitualment, s'utilitzen velocitats de entre 3 i 10 m/s. En aquest cas s'ha escollit una velocitat típica de 5 m/s i es procedirà a calcular el nombre de revolucions per segon en funció del diàmetre de l'agitador i el Reynolds corresponent:

$$N_i = \frac{v}{\pi \cdot D_a} = \frac{5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\pi \cdot 1 \text{ m}} = 1,59 \text{ rps}$$

$$Re = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} = \frac{1^2 \text{ m} \cdot 1,59 \text{ rps} \cdot 878,6 \text{ kg/m}^3}{0,00652 \text{ P}} = 2,14e + 06$$

Com es pot observar el Reynolds indica que estem a la zona de règim turbulent i per tant ja es pot determinar el nombre de potència utilitzant la figura següent:

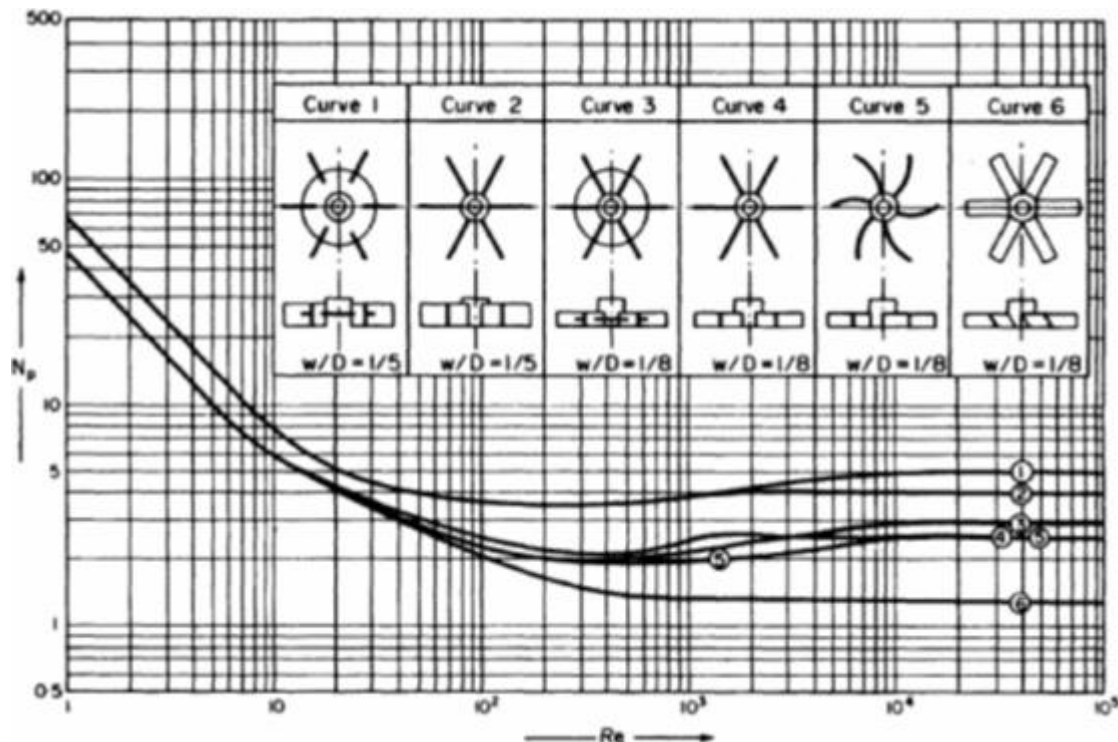


Figura 12. Correlació gràfica per determinar el nombre de potència en funció del tipus d'agitador i el Reynolds.

Amb els valors calculats anteriorment es llegeix el nombre de potència que en el nostre cas es de 4, Ara ja es pot calcular la potència de l'agitador a partir de la següent equació:

$$P = D_a^5 \cdot N^3 \cdot N_p \cdot \rho = 1^5 \text{ m} \cdot 1,59^3 \text{ rps} \cdot 4 \cdot 878,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 14168,01 \text{ W} = \mathbf{14.17 \text{ kW}}$$

11.2.1.5. Aïllament

El reactor treballa a 55°C i a dins es porta a terme una reacció exotèrmica com s'ha dit anteriorment. Per poder mantenir la temperatura del reactor s'utilitzarà un aïllant tèrmic que impedirà el bescanvi de calor per part del reactor i el sistema de refrigeració amb l'exterior, que tanmateix, permetrà evitar el contacte directe amb les parets del reactor i així evitar que es puguin produir cremades.

S'utilitzarà per tant aïllant de llana de roca, el qual serà subministrat per el fabricant ROCKWOOL S.A i tindrà les següents característiques:

Taula 56. Característiques de l'aïllant.

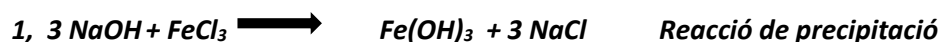
Material	Manta de llana de roca
Densitat	140 Kg/m ³
Conductivitat tèrmica	0,035 W/m·°K
Temperatura de servei	Fins 750 °C
Gruix	1,6 cm

11.2.2. Reactor de precipitació i neutralització

Aquest apartat es el que correspon al disseny funcional i mecànic del reactor de precipitació del $\text{Fe}(\text{OH})_3$ i de la neutralització del HCl , ambdues utilitzant NaOH 30%. En aquest reactor es produeix dues reaccions en fase líquida amb el principal objectiu de separar el catalitzador que ha ajudat a catalitzar les reaccions que s'han portat a terme a l'anterior reactor de cloració, però, donat que aquest corrent que transporta el catalitzador també conté traces de àcid clorhídric no es pot obviar la reacció de neutralització fortament exotèrmica que també hi tindrà lloc.

Un cop la reacció hagi finalitzat es portarà a terme una centrifugació i una decantació per gravetat que ajudaran a separar per complet el efluent inorgànic amb catalitzador del orgànic, que es recircularà al procés per a continuar amb el seu tractament.

Les reaccions que es porten a terme són les següents:



La reacció es porta a terme a un RCTA amb refrigeració de mitja canya a 55°C i 2,4 atm. La caracterització del volum s'ha fet a partir de balanços de matèria i relacions estequiomètriques de tal manera que s'ha assegurat una conversió del 99,9% per part de tots els reactius que intervenen.

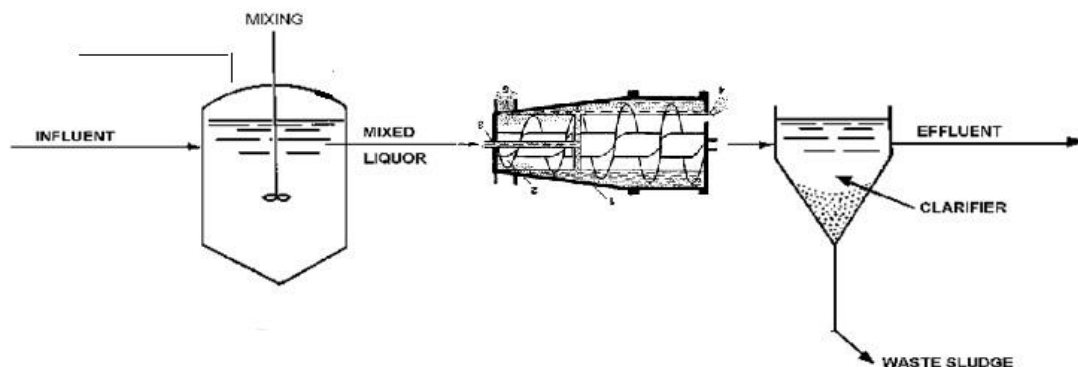


Figura 13. Representació del procés que es portarà a terme per a la separació del catalitzador.

A continuació es mostra una taula dels resultats obtinguts pel que fa al seu disseny funcional i els paràmetres de disseny utilitzats:

Taula 57. Paràmetres de disseny obtinguts.

Volum	22 m ³
Diàmetre	2,5 m
Alçada	4,5 m
Volum de líquid	17,6 m ³
Temps de residència	0,5 h

Taula 58. Cabals i composicions resultants per als corrents d'entrada i sortida.

Entrada	Component	Benzè	FeCl ₃	HCl	MCB	DCB	H ₂ O	NaOH	Total
	Cabals vol. (m ³ /h)	11,51	0,07	0,27	9,1	1,036	21,2	0,76	43,9
	Composicions vol. (%)	26	0,16	0,62	21	2,4	48,4	1,73	100
Sortida	Component	Benzè	MCB	DCB	Fe(OH) ₃	H ₂ O	NaCl		Total
	Cabals vol. (m ³ /h)	11,51	9,1	1,03	0,0305	21,65	0,32		43,6
	Composicions vol. (%)	26	21	2,3	0,07	49,6	0,73		1

11.2.2.1. Disseny mecànic

En quant al disseny dels gruixos del cos cilíndric i els caps toricsfèrics del reactor, s'ha seguit el mateix procediment que en el reactor de cloració, obtenint els següents gruixos, alçades i pes:

Taula 59. Característiques mecàniques que s'han obtingut per a la construcció del reactor.

Gruix cos cilíndric	1,35 cm
Gruix caps toricsfèrics	1,31 cm
H	29,51 cm
H1	4,61 cm
H2	23,58 cm
Pes buit	4910 Kg
Pes ple	25946 kg

11.2.2.2. Agitació

Pel que fa l'agitació s'ha seguit igualment el mateix procediment a partir de correlacions que s'ha realitzat per al reactor de cloració amb la diferència de que només caldrà un sol nivell d'agitació, obtenint els següents resultats:

Taula 60. Característiques de l'agitació.

Tipus d'agitador	Turbines Rushton
Diàmetre d'agitador	0,83 m
Velocitat del fluid	5 m/s
Revolucions per minut	114,6 rpm
Potència	11,16 KW

11.2.2.4. Refrigeració

En quant a la refrigeració, tal i com succeeix al reactor de cloració, es produeixen dues reaccions força exotèrmiques les quals caldrà controlar la seva temperatura per a que no sobrepassin la temperatura d'operació de 55°C. Per tal de poder realitzar-ho s'ha dissenyat de la mateixa manera que anteriorment, un sistema de refrigeració per mitja canya utilitzant com a refrigerant l'aigua glicolada de la qual ja en disposarem a la planta. A continuació es mostren els resultats obtinguts així com els paràmetres de disseny que han canviat respecte el reactor de cloració:

Taula 61. Característiques de la refrigeració.

Entalpia de reacció	-306,65 KJ/mol
Cabal de calor a refrigerar	-3,68e+06 KJ/h
Coefficient global de transmissió de calor	1710,48 W/m ² ·K
ΔT_{ml}	38,18
Cabal de refrigerant requerit	365,48 L/min
Diàmetre intern tub	0,1 m
Longitud	50 m
Nº de voltes al reactor	10
Distància entre voltes	40 cm

11.2.2.5. Aïllament

Tanmateix, pel que fa a l'aïllament del reactor s'ha decidit utilitzar llana de roca proveïda per ROCKWOOL S.A que permetrà aïllar tèrmicament el reactor com el sistema de refrigeració per evitar el bescanvi de calor amb el exterior així com possibles cremades per contacte dels operaris. A continuació es mostren les seves característiques, que seran idèntiques a les de l'anterior reactor:

Taula 62. Característiques de l'aïllant.

Material	Manta de llana de roca
Densitat	140 Kg/m ³
Conductivitat tèrmica	0,035 W/m·°K
Temperatura de servei	Fins 750 °C
Gruix	1,6 cm



Figura 14. Imatge real de l'aïllament adquirit.

11.3. Centrífuga



Un cop s'ha realitzat la reacció que es porta a terme en el reactor de precipitació i neutralització es necessari una centrifugació abans de passar per un decantador de gravetat. Això es degut a que el $\text{Fe}(\text{OH})_3$ que es forma per la descomposició del FeCl_3 es un compost químic el qual forma col·loides de difícil filtració i separació.

En el nostre cas utilitzarem una centrifuga continua horitzontal d'espiral la qual serà comprada a l'empresa Liaoyang Hongji Machinery Co. Ltd., i que ens assegurarà una bona separació inicial de l'efluent orgànic i l'inorgànic. A continuació es mostren les seves principals característiques:

Figura 15. Exemple de centrifuga en continu.

Taula 63. Característiques funcionals de la centrifugadora.

Model	LW500*2500
Diàmetre (m)	0,5
Velocitat tambor (rpm)	3800
Força G	2900
Capacitat (m ³ /h)	45
Potència (kW)	75
Pes (kg)	7200
Factor separació	4000
Cost \$	30000

11.4. Decantadors

11.4.1. Decantador d-301

Per acabar de separar completament el corrent d'orgànics dels inorgànics s'utilitzarà una decantació continua per gravetat. En aquest sentit s'ha seguit el manual de càlcul proporcionat al *Operaciones Unitarias En Ingeniería Química-Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriot-7ma Edición- Ed. McGrawHill* per poder determinar les principals característiques funcionals i de disseny del decantador requerit.

Primerament es calcula el temps requerit per a la separació que depèn de la diferència de densitats i la viscositat dels dos líquids amb el qual es podrà establir el seu volum:

$$t = \frac{100 \cdot \mu}{\rho_A - \rho_B} = \frac{100 \cdot 0,48}{1023,2 - 991,85} = 1,53 \text{ h}$$

On:

t és el temps de separació [h]

ρ_A, ρ_B són les densitats dels líquids A y B [kg/m^3]

μ és la viscositat de la fase continua [cP]

Conegut el cabal volumètric que ha de tractar el decantador es calcula el volum de líquid contingut en el mateix i es fixa el tant per cent de volum de líquid, en el nostre cas s'ha escollit un 95%.

$$V = \frac{2 \cdot t \cdot Q}{0,95} = \frac{2 \cdot 91,88 \cdot 44}{0,95} = 134,97 \text{ m}^3$$

La longitud del tanc ha de ésser de 5 vegades el seu diàmetre i la seva profunditat un 90% el seu diàmetre. De tal forma que s'han obtingut els següents resultats:

Taula 64. Característiques principals del decantador requerit.

Tipus de decantador	Decantador cilíndric continu per gravetat
Temps de separació	1,53 h
Volum	135 m ³
Longitud	16,53 m
Diàmetre	3,3 m
Profunditat	4,21 m

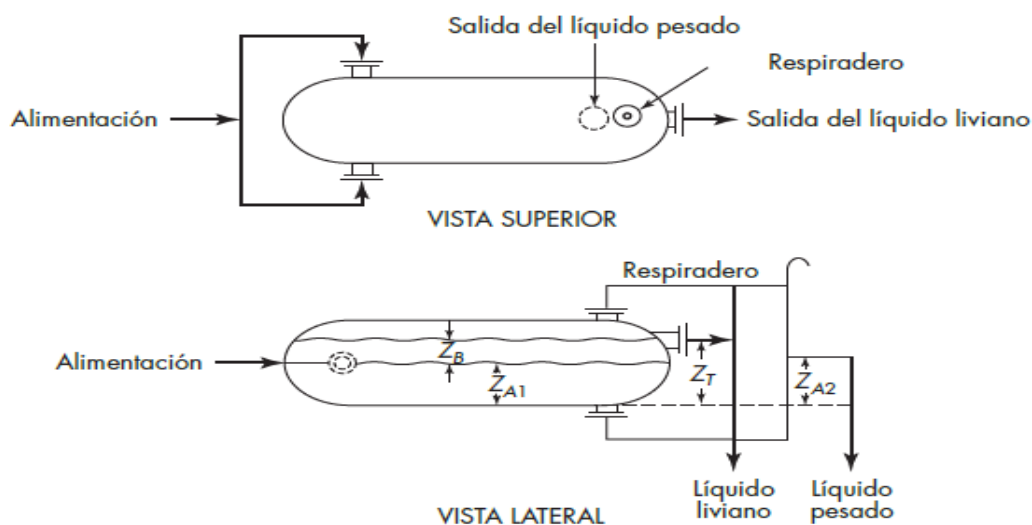


FIGURA 2.5
Decantador por gravedad continuo para líquidos no miscibles.

Figura 16. Representació del funcionament d'un decantador continu per gravetat.

11.4.2. Decantador D-601

De la torre d'absorció C-601 en surt un corrent que conté una mescla entre àcid clorhídric i benzè. Com que l'àcid clorhídric té un valor comercial com a subproducte, es decideix separar les dues fases (orgànica lleugera i aquosa pesada) utilitzant un decantador per gravetat.

Per dissenyar aquest decantador s'ha seguit el manual de càlcul proporcionat al *Operaciones Unitarias En Ingeniería Química-Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriot-7ma Edición-Ed. McGrawHill* per poder determinar les principals característiques funcionals i de disseny del decantador requerit.

El corrent d'entrada al corrent és el següent:

Taula 65. Característiques del corrent.

Cabal	9637,53 kg/h o 9,78 m ³ /h
Densitat	985,4 kg/m ³
Benzè	3,5 %wt
Aigua	65,9 %wt
HCl	30,6 %wt
Temperatura	27,16 °C

Primerament es calcula el temps requerit per a la separació que depèn de la diferència de densitats i la viscositat dels dos líquids amb el qual es podrà establir el seu volum:

$$t = \frac{100 \cdot \mu}{\rho_A - \rho_B} = \frac{100 \cdot 1,2}{1190 - 880} = 0,39 \text{ h}$$

On:

t és el temps de separació [h]

ρ_A, ρ_B són les densitats dels líquids A y B [kg/m^3]

μ és la viscositat de la fase continua [cP]

Conegut el cabal volumètric que ha de tractar el decantador es calcula el volum de líquid contingut en el mateix i es fixa el tant per cent de volum de líquid, en el nostre cas s'ha escollit un 95%.

$$V = \frac{2 \cdot t \cdot Q}{0.95} = \frac{2 \cdot 91,88 \cdot 0,163}{0,95} = 31,53 \text{ m}^3$$

La longitud del tanc ha de ésser de 5 vegades el seu diàmetre i la seva profunditat un 90% el seu diàmetre. De tal forma que s'han obtingut els següents resultats:

Taula 66. Característiques principals del decantador requerit.

Tipus de decantador	Decantador cilíndric continu per gravetat
Temps de separació	0,389 h
Volum	31,53 m ³
Longitud	10 m
Diàmetre	2 m
Profunditat	1,8 m

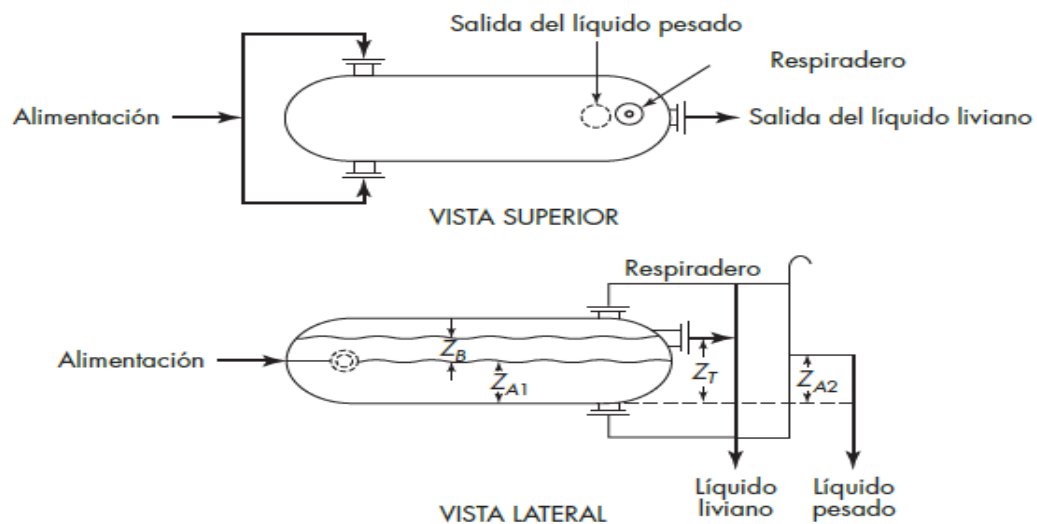


FIGURA 2.5

Decantador por gravedad continuo para líquidos no miscibles.

Figura 17. Representació del funcionament d'un decantador continu per gravetat

Amb aquest decantador s'obtiniran els següents corrents de sortida:

Taula 67. Característiques del corrent inferior.

Cabal	9130 kg/h 7,67 m³/h
Composició	32%wt HCl 68%wt H ₂ O
Densitat	1190 kg/m ³

Taula 68. Característiques del corrent superior.

Cabal	507,53 kg/h 0,57 m³/h
Composició	66,5%wt Benzè 28,1%wt H ₂ O 5,4%wt HCl
Densitat	890 kg/m ³

11.5. Columnes de destil·lació

Actualment a la indústria, les columnes de rectificació són un dels mètodes més usats en la separació de components d'una mescla. Aquest mètode es basa en la separació per punts d'ebullició dels components. Les columnes de rectificació poden ser de plats o de rebliment com les usades en el nostre cas.

Cal esmentar que ja que la planta treballa en continu, les columnes s'han dissenyat en estat estacionari.

Al llarg del procés per a la obtenció de monoclorbenzè s'han dut a terme dos destil·lacions contínues, la primera situada a l'àrea 400 usada per la recuperació del benzè que no ha reaccionat, i la segona situada també a l'àrea 400 destinada a la purificació del producte.

11.5.1. Disseny de les columnes

Per al disseny de les columnes s'ha utilitzat el simulador de processos Aspen Hysys 8.0 basat en el mètode rigorós. Prèviament però, s'ha fet una estimació de les condicions a les que ha de treballar la columna mitjançant un Short-Cut.

Utilitzant el Short-Cut s'ha obtingut una aproximació de les condicions de la columna a partir de les quals es pot procedir a realitzar el mètode rigorós. El Short-Cut s'ha dut a terme fixant els components clau lleuger (LK) i clau pesat (HK) entre altres paràmetres com la pressió de treball i una relació de reflux.

A partir de les dades obtingudes mitjançant el Short-Cut s'ha pogut dur a terme el càlcul i la simulació de les columnes pel mètode rigorós, que com ja s'ha esmentat anteriorment, és el mètode pel qual s'han dissenyat i d'on s'han obtingut els resultats usats pels posteriors càlculs a l'hora de dimensionar la columna.

A l'hora del disseny de les condicions d'operació de la columna s'ha buscat un equilibri entre l'obtenció de la puresa requerida i el cost energètic de la mateixa.

Tot seguit es mostren els resultats obtinguts d'ambdues columnes pel mètode rigorós:

Taula 69. Condicions d'operació de les columnes.

Columna	C-401	C-402
Temperatura d'entrada (°C)	90,000	120,100
Temperatura Condensador (°C)	111,100	132,200
Temperatura Reboiler (°C)	169,800	174,100
Pressió (kPa)	240,000	101,300
Relació de reflux	1,868	2,463
Nº etapes teòriques	16	16
Plat de l'aliment	8	8

Taula 70. Resultats de la columna C-401 obtinguts pel mètode rigorós.

Propietat	Aliment	Destil·lat	Residu
Fracció vapor	0.0000	0.0000	0.0000
Temperatura (°C)	90,0000	111,1000	169,9000
Pressió (kPa)	240,0000	240,0000	240,0000
Cabal molar (Kmol/h)	187,9000	106,5000	81,4700
Cabal màssic (Kg/h)	1,7730E+04	8,3180E+03	9,4140E+03
Entalpia molar (Kj/Kg)	4,0830E+04	6,1640E+04	3,2000E+04
Cabal de calor (Kj/h)	7,6740E+06	6,5630E+06	2,6070E+06
Composicions màssiques			
Benzè	0,4689	0,9994	0,0002
Monoclorbenzè	0,4721	0,0006	0,8887
Diclorbenzè	0,0590	0,0000	0,1111

Taula 71. Resultats de la columna C-402 obtinguts pel mètode rigorós.

Propietat	Aliment	Destil·lat	Residu
Fracció vapor	0,0000	0,0000	0,0000
Temperatura (°C)	120,1000	132,2000	174,1000
Pressió (kPa)	101,3000	101,3000	101,3000
Cabal molar (Kmol/h)	81,4700	74,4000	7,0700
Cabal màssic (Kg/h)	9,4140E+03	8,3750E+03	1,0390E+03
Entalpia molar (Kj/Kg)	2,2980E+04	2,8060E+04	2,6300E+03
Cabal de calor (Kj/h)	1,8720E+06	2,0870E+06	1,8600E+04
Composicions màssiques			
Benzè	0,0002	0,0002	0,0000
Monoclorbenzè	0,8887	0,9990	0,0003
Diclorbenzè	0,1111	0,0008	0,9997

11.5.2. Disseny intern de les columnes.

Un cop duta a terme la simulació de les columnes pel mètode rigorós, s'ha utilitzat l'eina "try sizing" del Aspen Hysys per a realitzar el disseny intern de les columnes.

Per a dur-lo a terme primer s'ha d'escollir el tipus de columna que es vol dissenyar, de plats o empacada, com també el material i mida del empacat.

Els resultats obtinguts per a ambdues columnes es presenten a continuació:

Taula 72. Resultats del Try Sizing per a les dues columnes C-401 i C-402.

	COLUMNA C-401	COLUMNA C-402
Tipus de columna	Empacada	Empacada
Tipus d'empacat	Jaeger TriPacks-Plastic 3&1_2_inch	Jaeger TriPacks-Plastic 2_inch
Correlació	Wallis	Wallis
Correlació HETP	Frank	Frank
Num. peces d'empacat	22028,0000	218717,0000
Massa d'empacat (kg)	675,8000	1109,5000
Cost d'empacat (US\$)	2222,2800	4437,9300
Diàmetre (m)	1,3720	1,5240
Àrea secció (m²)	1,4780	1,8240
Alçada (m)	8,7950	9,0780
Màxima innundació	74,2400	58,0900
ΔP (kPa)	3,4610	2,2760
ΔP/secció (kPa/m)	0,3934	0,2507
Velocitat del gas/m²	5003,0000	9543,0000
Velocitat del gas (m/s)	1,3900	2,6510
HETP (m)	0,5497	0,5674

El disseny intern d'una columna de destil·lació és molt important de cara a un bon funcionament i operació.

S'ha escollit utilitzar columnes empacades per diverses raons. Les columnes de reblliment són més econòmiques a llarg termini i solen presentar una menor pèrdua de càrrega que les de plats. També proporcionen una major eficiència en el contacte entre les dues fases.

Cal comentar que no es solen usar columnes empacades tant grans, ja que a major diàmetre, el líquid tendeix a anar cap a les parets. Per a tal d'evitar aquests problemes de distribució del líquid per l'interior de les columnes s'ha incorporat redistribuïdors de líquid a més d'altres components bàsics que s'exposaran a continuació.

11.5.3. Selecció del tipus de reblliment

La funció principal del reblliment és augmentar la superfície de contacte entre el vapor i el líquid i augmentar la turbulència. Cal esmentar que a mesura que augmenta la mida del reblliment, l'eficiència disminueix, degut a que augmenta la pèrdua de càrrega al llarg de la columna, per tant, s'ha d'anar en compte a l'hora de triar el reblliment a utilitzar.

Per a les nostres columnes s'ha obtingut un rebliment aleatori del tipus Jaeger-Trickpacks de plàstic de 3.5 polzades per a la columna C-401 i de 2 polzades per a la columna C-402. S'ha escollit aquest tipus de rebliment ja que equival als Pall Rings generalment usats a la indústria química per la seva rigidesa i resistència.

S'ha escollit el politetrafluoroetilè (PTFE, o tefló com a nom comercial) com a material del rebliment, ja que suporta les altes temperatures a les que treballen les columnes de destil·lació.



Figura 18. Rebliment de Jaeger-Trickpacks de 3.5 polzades.

11.5.4. Interns columnes

11.5.4.1. Distribuïdors de líquid

En una columna es necessita tenir una bona distribució del líquid per tal de que la separació es doni correctament i hi hagi la major superfície de contacte possible. És per això que s'instal·larà un distribuïdor de líquid a la part superior de la columna. El distribuïdor de líquid assegurarà una bona distribució d'aquest, evitant la tendència del líquid a fluir cap a les parets i obligant-lo a ocupar tota l'àrea superficial del rebliment al llarg de la columna.

S'ha escollit instal·lar un distribuïdor de líquid VEP de l'empresa Sulzer, utilitzat habitualment en columnes amb un diàmetre superior a 0,8 metres. Aquest tipus de distribuïdors són capaços de treballar amb grans quantitats de líquid i proporcionen una major àrea oberta pel flux de vapor.



Figura 19. Distribuïdor de líquid VEP de l'empresa Sulzer.

11.5.4.2. Redistribuidors de líquid

En columnes grans normalment no n'hi ha prou amb un distribuïdor de líquid, i per això s'instal·len redistribuidors al tenir un aliment de líquid intermig a les columnes de rebliment per tal d'assegurar-ne una bona distribució. Un altre dels seus usos és el de poder suportar el pes de la columna que té per sobre.

Per tant s'ha decidit col·locar un re distribuïdor Chimney tray collector SK de l'empresa Sulzer a totes dues columnes, a l'alçada de la columna per on entra l'aliment líquid. Aquest tipus de re distribuïdor s'utilitza generalment per a columnes amb gran diàmetre i gran cabal de líquid. A més aquest tipus de col·lector es pot personalitzar per satisfer les necessitats específiques de cada columna.



Figura 20. Redistribuidor de líquid Chimney tray collector SK de l'empresa Sulzer.

11.5.4.3. Suport del rebliment

La principal funció del suport del rebliment és la de suportar físicament el pes del rebliment, però també té altres funcions com la d'evitar la migració descendent de peces de rebliment i de proveir suficient àrea oberta amb l'objectiu de permetre un flux sense restriccions entre el líquid i el vapor. En aquest cas s'ha escollit instal·lar un suport al fons de cada columna. S'ha escollit un Support grids TE/TS de l'empresa Sulzer.

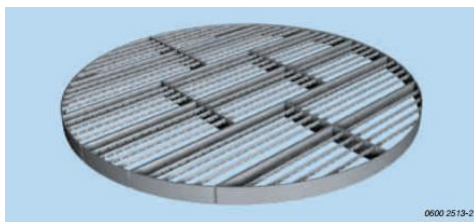


Figura 21. Suport de rebliment Support grids TE/TS de l'empresa Sulzer.

15.5.4.4. Entrada del líquid

Ja que es té un diàmetre considerable i l'aliment és 100% líquid en totes dues columnes de destil·lació, s'ha triat un injector de líquid LV(2) de l'empresa Sulzer, dissenyat específicament per a les condicions esmentades.

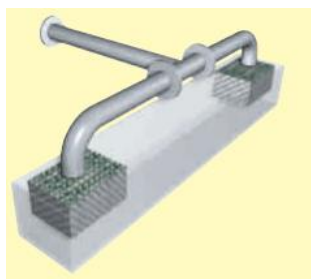


Figura 22. Entrada de líquid LV(2) de l'empresa Sulzer.

11.5.5. Disseny mecànic de les columnes.

Per al disseny mecànic de les columnes, primer s'ha escollit el material de construcció. S'ha decidit construir-les d'acer inoxidable 304L, s'ha escollit aquest enlloc del AISI 316L ja que no hi ha gaire perill de corrosió i es redueix el cost del material.

S'ha utilitzat el codi ASME per a la determinació del gruix del cilindre com també per al fons i cap toriesfèrics. El procediment i les equacions utilitzades es troben a l'apartat 11.1.6. del manual de càlcul. Tot seguit es mostren els resultats obtinguts:

Taula 73. Resultats per a la determinació del gruix del cilindre, cap i fons toriesfèrics de la columna C-401.

	Cilindre	Cap/Fons
P disseny (bar)	3,6994	3,6994
T disseny (°C)	184,4000	184,4000
S (bar)	1013,5297	1013,5297
E (bar)	0,8500	0,8500
C1 (m)	0,0020	0,0020
C2 (m)	0,0000	0,0015
t(m)	0,0049	0,0081
t arrodonit (mm)	5	9

Taula 74. Resultats per a la determinació del gruix del cilindre, cap i fons toriesfèrics de la columna C-402.

	Cilindre	Cap/Fons
P disseny (bar)	2,2905	2,2905
T disseny (°C)	189,1000	189,1000
S (bar)	1013,5297	1013,5297
E (bar)	0,8500	0,8500
C1 (m)	0,0020	0,0020
C2 (m)	0,0000	0,0000
t(m)	0,0040	0,0066
t arrodonit (mm)	5	7

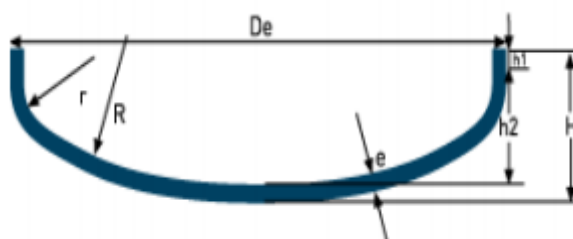
Les dades necessàries pel càlcul del cap i fons de les columnes C-401 i C-402 es presenten a continuació:

Taula 75. Valors pel càlcul del cap i fons toriesfèrics per a les columnes C-401 i C-402.

	Columna C-401	Columna C-402
L (m)	1,3819	1,5340
r (m)	0,1382	0,1534
L/r	10,0000	10,0000
M	1,5400	1,54000

11.5.6. Determinació de l'alçada de les columnes.

L'alçada de la columna és la suma de l'alçada del cos cilíndric i el cap i fons tori esfèrics, calculades seguint els següent procediment. Abans però, cal esmentar que s'ha sumat 1 metre a l'alçada del cilindre per a tenir en compte l'espai que ocuparan els sistemes de distribució de líquid, suport del reblliment, redistribuidors i altres elements incorporats a les columnes.



$$\text{Nomenclatura: } R = L; e = t$$

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

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

$$H_{fons} = H_{cap} = h_1 + h_2 + t$$

$$H_{columna} = H_{cilindre} + H_{fons} + H_{cap}$$

(28)

A continuació es mostren els resultats obtinguts:

Taula 76. Resultats obtinguts del càlcul de l'alçada de les columnes.

	Columna C-401	Columna C-402
h1 (mm)	17,5	17,5
h2 (mm)	263,777	293,644
H Fons/Cap (mm)	281,285	318,144
H columna (m)	10,3576	10,7143

11.5.7. Determinació del pes de les columnes.

Per a determinar el pes de les columnes, primer s'ha hagut de calcular el volum del cilindre i el cap i fons tori esfèrics. Cal esmentar que per al càlcul del pes de totes les columnes dissenyades s'ha considerat que totes elles estaven plenes del líquid en un 50%.

El procediment i equacions seguides per al càlcul estan descrites al apartat 11.1. del manual de càlcul.

Taula 77. Resultats pel volum dels elements constituents de les columnes C-401 i C-402.

Volum de material (m ³)		
	Columna C-401	Columna C-402
V tori esfèric	0,0046	0,0038
V cilindre	0,2099	0,1949
V total	0,2190	0,2025
Volum total (m ³)		
	Columna C-401	Columna C-402
V tori esfèric	0,2135	0,2958
V cilindre	14,693	18,7874
V total	15,120	19,3791

Taula 78. Determinació del pes de les columnes C-401 i C-402

	Columna C-401	Columna C-402
Densitat material (kg/m³)	7930,0000	7930,0000
Densitat líquid (kg/m³)	774,1000	1099,0000
Pes cilindre (Kg)	1664,3745	1545,7706
Pes cap/ fons (Kg)	36,1508	30,1136
Pes columna buida (Kg)	1736,6765	1605,9979
Pes rebliment (Kg)	675,8000	1109,5000
Pes líquid (Kg)	5766,6590	10510,2414
Pes total (Kg)	8179,1355	13225,7393

11.5.8. Gruix de l'aïllant

Per a aïllar tèrmicament les columnes de destil·lació i evitar cremades al entrar en contacte amb elles s'ha triat recobrir-les d'una manta de llana de roca de 100 Kg/m³, recoberta exteriorment per una capa d'alumini per evitar que la llana es faci malbé. Aquesta llana posseeix excel·lents propietats aïllants, soportant temperatures de fins a 750 °C.

Per tant s'ha estimat un gruix d'aïllant de 22 cm per a la columna C-401 i de 30 cm per a la columna C-402.



Figura 23. Llana de roca amb recobriments d'alumini.

11.6. Columnes d'absorció

11.6.1. Columna d'absorció C-501

Un dels principals equips a l'àrea 500 és la columna d'absorció d'orgànics. La seva funció és la de netejar d'orgànics el corrent gasós provinent del reactor mitjançant el corrent de benzè de recirculació com a agent absorbent. El corrent de benzè de recirculació és refredat prèviament fins a 15°C per a afavorir el rendiment de l'absorció.

11.6.1.1. Disseny funcional de la columna d'absorció C-501

La columna d'absorció C-501 s'ha dissenyat mitjançant l'eina de simulació Aspen Hysys 8.0. A continuació es presenten les condicions d'operació de la columna com també els cabals i composicions de tots els corrents que hi intervenen.

Taula 79. Cabals d'entrada i sortida de la columna d'absorció C-501.

	Entrada líquid	Entrada gas	Sortida gas	Sortida líquid
Fracció vapor	0,000	1,000	1,000	0,000
Temperatura (°C)	15,000	57,830	23,450	43,500
Pressió (kPa)	240,000	240,000	240,000	240,000
Cabal màssic (Kg/h)	8327,000	4167,000	3332,000	9162,000
Cabal volumètric (m³/h)	9,438	4,726	3,811	10,350
Entalpia molar (Kj/Kg)	4,740E+04	-7,010E+04	-8,356E+04	4,445E+04
Cabal de calor (Kj/h)	5,052E+06	-6,947E+06	-7,205E+06	5,310E+06

Taula 80. Composicions màssiques dels cabals d'entrada i sortida de la columna d'absorció C-501.

Composicions màssiques	Entrada líquid	Entrada gas	Sortida gas	Sortida líquid
Benzè	0,9994	0,2021	0,0990	0,9651
HCl	0,0000	0,7588	0,8913	0,0201
DCB	0,0000	0,0008	0,0000	0,0003
MCB	0,0006	0,0307	0,0000	0,0145
Cl2	0,0000	0,0077	0,0096	0,0000

11.6.1.2. Dimensionament de la columna.

Per al dimensionament de la columna s'ha dut a terme un "try sizing" amb l'Aspen Hysys, on s'ha triat el tipus d'empacat i s'ha obtingut les dades que es presentaran a continuació. Primer però, cal comentar que s'ha dissenyat la columna amb un sobredimensionament productiu d'un 20% per a poder tenir un bon rendiment i poder assolir possibles augments temporals en la producció.

Taula 81. Resultats del Try Sizing per la columna C-501.

Tipus de columna	Empacat
Tipus d'empacat	Jaeger TriPacks-Plastic 2_inch
Correlació	Wallis
Correlació HETP	Frank
Num. peces d'empacat	13292
Massa d'empacat (kg)	67,4
Cost d'empacat (US\$)	269,7
Diàmetre (m)	0,6096
Àrea secció (m²)	0,2919
Alçada (m)	3,448
Màxima innundació	67,68
ΔP (kPa)	1,035
ΔP/secció (kPa/m)	0,3001
Velocitat del gas/m²	6192
Velocitat del gas (m/s)	1,72
HETP (m)	0,431

11.6.1.2.1. Selecció del tipus de rebliment.

La selecció del rebliment és molt important ja que aquest té la funció d'augmentar la superfície de contacte entre el vapor i el líquid i augmentar la turbulència. Les columnes de rebliment presenten un major contacte entre vapor i líquid però augmenten una mica la pèrdua de càrrega.

Per a la columna C-501 s'ha optat per un rebliment aleatori del tipus Jaeger-Trickpacks de plàstic de 2 polzades. Com a material plàstic per al rebliment s'ha optat per el polipropilè, que ja és suficient per a suportar les temperatures moderades a les que treballa aquest equip.



Figura 24. Rebliment Jaeger-Trickpacks de 2 polzades.

11.6.1.2.2. Interns columna

Distribuïdors de líquid

Com ja s'ha comentat a l'apartat de les columnes de destil·lació, la distribució del líquid en una columna és vital per a una bona superfície de contacte. Per tant a la columna C-501 també s'instal·larà un distribuïdor de líquid per a evitar que el fluid tendeixi a anar cap a les parets disminuint l'àrea de contacte.

El distribuïdor de líquid escollit per a instal·lar a la columna C-501 ha sigut el Channel-type distributor with bottom holes VKG de l'empresa Sulzer. S'ha escollit aquest distribuïdor ja que s'ajusta perfectament a les nostres necessitats a la columna.

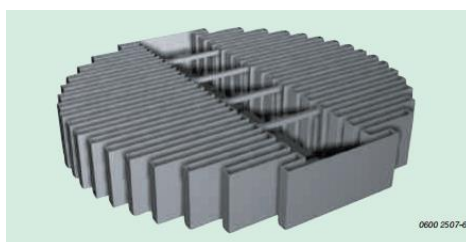


Figura 25. Distribuïdor de líquid Channel-type distributor with bottom holes VKG de l'empresa Sulzer.

Suport del rebliment.

S'ha escollit instal·lar un suport de rebliment a la part inferior de la columna per a suportar el pes del rebliment i evitar la migració descendent de peces de rebliment. També permet proveir suficient fàrea oberta amb l'objectiu de permetre un flux sense restriccions entre el líquid i el vapor. Per a la columna C-501 s'ha decidit instal·lar un suport anomenat "Retaining grid for random packings RPB" de l'empresa Sulzer, especial per a rebliments aleatoris.

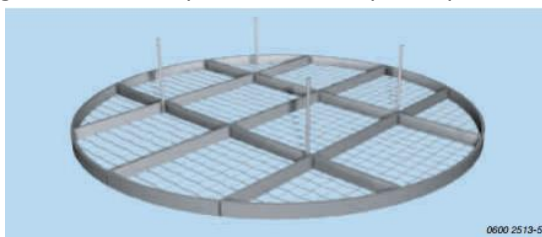


Figura 26. Suport de rebliment Retaining grid for random packings RPB de l'empresa Sulzer.

Entrada del líquid

Per a la columna C-501 s'ha triat un injector de líquid per a columnes de diàmetre petit. S'ha escollit el LV inlet de l'empresa Sulzer.



Figura 27. Entrada de líquid LV inlet de l'empresa Sulzer.

Entrada de gas

L'entrada del corrent de gas a la columna es farà mitjançant un injector de gas tipus GIV (vane inlet) de l'empresa Sulzer.



Figura 28. Entrada de gas tipus GIV (vane inlet) de l'empresa Sulzer.

11.6.1.3. Disseny mecànic de la columna d'absorció.

Per al disseny mecànic de la columna C-501 primer s'ha escollit el tipus de material de construcció. S'ha decidit construir-la d'AISI 316L amb un recobriments interior de tefló per a protegir l'equip de la possible corrosió al circular-hi clorur d'hidrogen.

S'ha utilitzat el codi ASME per a la determinació del gruix del cilindre i del cap i fons tori esfèrics. El procediment i equacions utilitzades es descriuen al apartat 11.1. del manual de càlcul. A continuació es mostren els resultats obtinguts:

Taula 82. Resultats del càlcul del gruix del cilindre, cap i fons tori esfèrics de la columna C-501.

	Cilindre	Cap/Fons
P disseny (bar)	3,1055	3,1055
T op. (°C)	57,7900	57,7900
S	1082,4773	1082,4773
E	0,8200	0,8200
C1 (m)	0,0020	0,0020
C2 (m)	0,0015	0,0015
t (m)	0,0031	0,0052
t arrodonit (mm)	4	6

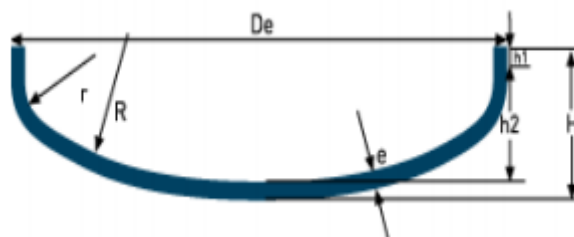
Les dades necessàries per al càlcul del cap i fons tori esfèrics de la columna es presenten a continuació:

Taula 83. Valors per al càlcul del cap i fons tori esfèrics de la columna C-501.

L (m)	0,6157
r (m)	0,0616
L/r	10
M	1,54

11.6.1.3. Determinació de l'alçada de la columna.

L'alçada de la columna és la suma de l'alçada del cos cilíndric i el cap i fons tori esfèrics, calculades seguint el següent procediment. Abans però, cal esmentar que s'ha sumat 1 metre a l'alçada del cilindre per a tenir en compte l'espai que ocuparan els sistemes de distribució de líquid, suport del reblliment i altres elements incorporats a les columnes.



$$\text{Nomenclatura: } R = L ; e = t$$

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

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

$$H_{fons} = H_{cap} = h_1 + h_2 + t$$

$$H_{columna} = H_{cilindre} + H_{fons} + H_{cap}$$

(28)

A continuació es mostren els resultats obtinguts:

Taula 84. Resultats obtinguts del càlcul de l'alçada de la columna C-501.

h1 (mm)	10,7402
h2 (mm)	116,7977
H fons (mm)	132,6973
H columna (m)	4,7134

11.6.1.4. Determinació del pes de la columna.

Per a determinar el pes de la columna, primer s'ha hagut de calcular el volum del cilindre i del cap i fons tori esfèrics. Per al càlcul del pes de la columna s'ha considerat que estava plena de líquid al 50% de capacitat.

El procediment i les equacions seguides per al càlcul estan descrites al apartat 11.1. del manual de càlcul.

Taula 85. Resultats del volum dels elements constituents de la columna C-501.

Volum de material (m ³)	
V tori esfèric	0,0006
V cilindre	0,0263
V total	0,0274
Volum total (m ³)	
V tori esfèric	0,0189
V cilindre	1,3245
V total	1,3623

Taula 86. Resultats del pes de la columna C-501.

Densitat material (kg/m ³)	7960,0000
Densitat líquid (kg/m ³)	888,3000
Pes cilindre (Kg)	209,1220
Pes Cap/ Fons (Kg)	4,4506
Pes columna buida (Kg)	218,0231
Pes rebliment (Kg)	67,4000
Pes líquid (Kg)	592,8791
Pes total (Kg)	878,3021

11.6.1.5. Gruix d'aïllant.

Per a aïllar tèrmicament les columnes de destil·lació i evitar cremades al entrar en contacte amb elles s'ha triat recobrir-les d'una manta de llana de roca de 100 Kg/m³, recoberta exteriorment per una capa d'alumini per evitar que la llana es faci malbé. Aquesta llana posseeix excel·lents propietats aïllants, soportant temperatures de fins a 750 °C.

Per tant s'ha estimat un gruix d'aïllant de 10 cm per a la columna d'absorció C-501.



Figura 29. Llana de roca amb recobriment d'alumini.

11.6.2. Columna d'absorció d'hcl

A continuació es presenta el manual de càlcul de l'equip principal de l'àrea 600. Es tracta de l'equip encarregat de fer l'absorció del corrent de gasos provinent de la columna C-601, convertint-lo en una dissolució al 32% d'àcid clorhídric en aigua. Una absorció d'aquestes característiques presenta bastants problemes, on el principal inconvenient és l'elevat calor de dissolució que té el HCl gas en l'aigua.

Per a aquest motiu s'ha decidit dissenyar un absorbidor de paret humida (falling film absorber) que consisteix en un bescanviador de carcassa i tubs que treballa de forma isotèrmica i connectat directament amb un scrubber empackat (tail scrubber).

El funcionament de l'equip és el següent: L'absorció es dona als tubs mentre que per la carcassa hi circula aigua de refrigeració. L'aigua d'aliment per a l'absorció entra al scrubber empackat on absorbeix el HCl que surt pels gasos de l'absorbidor, traient-ne una solució aquosa al 5% d'HCl que posteriorment entra al absorbidor circulant en co-corrent amb el gas d'aliment i acabant d'absorbir el HCl fins a treure'l al 32% en massa.

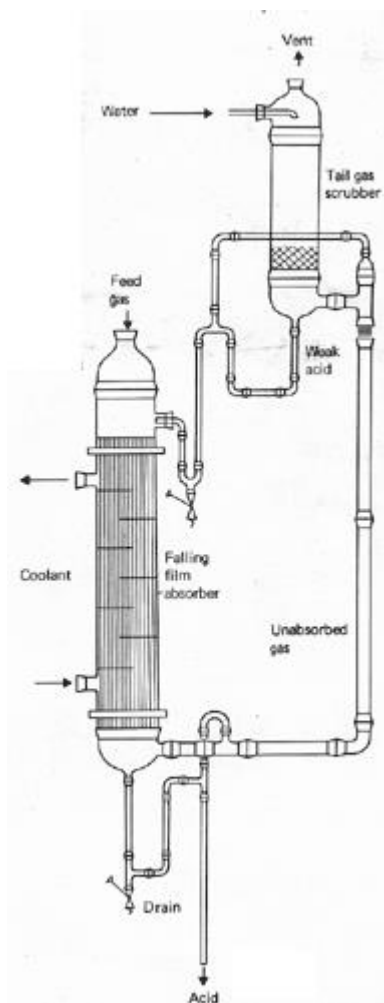


Figura 30. Exemple de columna d'absorció.

Aquest tipus de sistema està especialment recomanat per casos com el que tenim, amb una absorció molt exotèrmica. Un dels seus principals avantatges és que es pot absorbir pràcticament tot el HCl present al gas d'aliment, i també, que a nivell operacional, és el tipus d'absorbidor que presenta una menor pèrdua de càrrega en relació a la seva eficiència. Cal tenir present el material dels tubs del bescanviador, ja que haurà de resistir la corrosió de l'àcid clorhídric i a la vegada proporcionar una bona conductivitat tèrmica per afavorir el bescanvi de calor. Tenint en compte això, s'ha decidit que els tubs siguin de grafit.

11.6.2.1. Balanços de matèria

El cabal de gas a absorbir és de 3341 kg/h d'una mescla d'HCl, benzè i Cl₂, amb unes composicions de 89,14%, 9,9% i 0,96% respectivament. El corrent de gas entra a una temperatura de 15°C i es vol obtenir un corrent d'HCl al 32%, amb una prèvia absorció fins al 5% al tail scrubber operant a una pressió de 130kPa.

Amb aquests objectius ja es pot calcular el cabal de sortida i l'aigua necessària.

$$\begin{aligned} \text{Cabal d'HCl entrada} &= 3.341 \cdot 0,8914 = 2.978,167 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \\ \text{Cabal total de sortida (HCl al 32\%)} &= \frac{2.978,167}{0,32} = 9.302,7731 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \\ \text{Aigua d'aliment} &= 9.302,7731 - 2.978,167 = 6.328,606 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \\ \text{Cabal de sortida del tail scrubber (HCl al 5\%)} &= \frac{6.328,606}{0,95} = 6.661,69 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \end{aligned}$$

11.6.2.2. Temperatura d'operació i necessitats d'aigua de refrigeració

Abans de començar els càlculs de disseny de la columna cal establir una temperatura d'operació. Aquesta estarà determinada per la temperatura de sortida del cabal aquos del 5% d'HCl que surt del tail scrubber ja que aquest equip opera de forma adiabàtica. Aquest corrent entra al absorbidor de paret humida per a fer l'absorció fins al 32%.

$$\text{HCl absorbit al tail scrubber} = 6.661,69 - 6.328,606 = 333,084 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Havent calculat prèviament el calor de l'absorció que ha donat de 1992,877 kJ/kg:

$$\begin{aligned} \text{Calor generat al tail scrubber} &= 333,084 \frac{\text{kg HCl}}{\text{h}} \cdot 1.992,877 \frac{\text{kJ}}{\text{kg HCl}} \\ &= 663.796,4 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 184,3879 \text{ Kw} \end{aligned}$$

Donat que l'aigua d'aliment entrarà a 30°C ja es pot calcular el salt de temperatura que causarà aquest calor generat en l'aigua d'aliment realitzant un balanç d'energia:

$$663.796,4 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 6.661,69 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (T_{OP} - 30) \rightarrow T_{OP} = 53,78^\circ\text{C}$$

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

$$\begin{aligned} \text{Calor a retirar} &= (2.978,167 - 333,084) \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1.992,877 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 5,27 \cdot 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \\ &= 1.464,26 \text{ Kw} \end{aligned}$$

Refrigerant amb aigua amb un salt tèrmic suposat de 20 a 28°C s'obté el cabal d'aigua de refrigeració:

$$Q_{ref} = \frac{5,27 \cdot 10^6}{4,18 \cdot (28 - 20)} = 43,683 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 157.259,07 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Pel que es pot veure, les necessitats d'aigua de refrigeració són bastant elevades, fet que dona una idea de la magnitud de l'exotèrmia que presenta la dilució d'HCl en aigua.

11.6.2.3. Diàmetre intern i nombre de tubs.

En circulació co-corrent la columna s'inunda a velocitats de gas superiors als 18 m/s però per velocitats superiors als 15,2 m/s se'n veu afavorit el coeficient individual de transferència intern. Per tant s'ha decidit fer circular el gas a una velocitat de 16m/s.

Per al càlcul del nombre de tubs de l'equip primer s'ha de prendre algunes decisions com per exemple el diàmetre dels tubs. A diàmetre petit més nombre de tubs, per tant s'ha intentat trobar un punt intermig entre nombre de tubs i diàmetre dels mateixos.

S'ha decidit fixar un diàmetre de tubs inter $D_i=0.02$ m amb un gruix de 5 mm, per tant, un diàmetre extern $D_{ext}= 0.025$ m.

Abans de trobar el nombre de tubs però, cal saber el cabal volumètric de gas que hi circularà, que es troba a partir del cabal màssic i la densitat del corrent:

$$Q_v = \frac{3341}{2.119} = 1.576,6871 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Finalment es pot procedir a calcular el nombre de tubs necessaris:

$$Nt = \frac{Q_v}{V_g \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_i^2)} \rightarrow Nt = \frac{1.576,6871}{16 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0.02^2)} = 88 \text{ tubs}$$

11.6.2.4. Càlcul del coeficient global de transferència U.

Un cop determinades les necessitats de refrigeració i el nombre de tubs, cal assegurar que l'equip podrà intercanviar el calor generat, motiu pel qual es dissenya l'equip com si fos un bescanviador de calor. Primerament però, és necessari calcular el coeficient global U que es trobarà a partir de la següent expressió:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{od}} + \frac{d_o \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2 \cdot K_w} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{h_{id}} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{h_i} \quad (29)$$

On:

h_o = coeficient individual extern

h_{od} = aportació al coeficient extern per embrutiment

h_i = coeficient individual intern

h_{id} = aportació al coeficient intern per embrutiment

K_w = conductivitat tèrmica del grafit (150 W/m·K)

d_o = diàmetre extern (25 mm)

d_i = diàmetre intern (20 mm)

Tant per al coeficient d'embrutiment intern com extern s'ha agafat un valor de $h_{id}=h_{ed}= 5000$ W/m²·°C.

Càlcul de coeficient intern.

Per al càlcul del coeficient intern de bescanvi de calor en un absorbidor de paret humida és necessari tenir en compte que l'aigua on s'absorirà l'HCl gas circularà per la paret interna dels tubs. Per tant, el coeficient intern de bescanvi depèn del cabal de líquid per unitat perifèrica de tub (τ) que es calcula com:

$$\tau = \frac{Q_{ref}}{Nt \cdot \pi \cdot d_i} = \frac{157.259,07 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1 h}{3600s}}{88 \cdot \pi \cdot 0.02} = 0,3179 \frac{kg}{m \cdot s}$$

Un cop calculat el cabal de líquid per unitat perifèrica de tub ja es pot trobar el coeficient intern a partir de la correlació de McAdams, Drew i Bay:

$$h_i = 9136 \cdot \tau^{1/3} = 6.235,4877 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Càlcul del coeficient extern.

El coeficient extern es calcula mitjançant l'equació següent:

$$\frac{h_o \cdot d_{eq}}{K} = 0,36 \cdot Re^{0,55} \cdot Pr^{0,33} \quad (30)$$

On:

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

Re = Nombre de Reynolds de la carcassa

Pr = Nombre de Prandtl

d_o = diàmetre extern

Abans de dur a terme el càlcul del coeficient extern però, s'ha de calcular paràmetres com el nombre de Reynolds i de Prandtl, començant per el càlcul de la secció de pas del fluid.

Aquesta a la vegada depèn d'altres paràmetres com el Pitch que es calcula com:

$$P_t = d_o \cdot 1,25 = 25 \cdot 1,25 = 31,25 \text{ mm}$$

Seguidament es calcula el diàmetre que ocupen els tubs (D_b) que per un pitch triangular de 1-1 passos per tub i carcassa presenta unes constants de $K_1=0,319$ i $n_1=2,142$.

$$D_b = d_o \cdot \left(\frac{Nt}{K_1} \right)^{\frac{1}{n_1}} = 25 \cdot \left(\frac{88}{0,319} \right)^{\frac{1}{2,142}} = 344,655 \text{ mm}$$

Com que el diàmetre de carcassa ha de ser major que el D_b , s'ha escollit fixar un diàmetre de carcassa $D_s= 400$ mm.

Tot seguit i suposant un Baffle spacing de 300 mm ja es pot calcular la secció equivalent:

$$A_s = \frac{(P_t - d_o) \cdot B_s \cdot D_s}{P_t} = \frac{(31,25 - 25) \cdot 0,3 \cdot 0,4}{31,25} = 0,024 \text{ m}^2$$

Un cop calculada l'àrea de secció de pas del fluid es calcula el diàmetre equivalent i la velocitat de pas del fluid per la carcassa mitjançant les següents equacions:

$$d_{eq} = \frac{1,1}{d_o} \cdot (P_t^2 - 0,907 \cdot d_o^2) = \frac{1,1}{25} \cdot (31,25^2 - 0,907 \cdot 25^2) = 18,026 \text{ mm}$$

$$u_s = \frac{Q_{ref}}{\rho \cdot A_s} = \frac{43,683 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{994,032 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,024 \text{ m}^2} = 1,7456 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ara ja es pot procedir al càlcul del nombre de Reynolds i de Prandtl previs al càlcul de coeficient extern. Considerant viscositat constant a 0,8 cP, Cp= 4,18 J/kg·K i K=0,628 W/m·K es calculen de la següent manera:

$$Re = \frac{1,7456 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 994,032 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,018026 \text{ m}}{0,8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 39.098,86$$

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{K} = \frac{4,18 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}}{0,628} = 5,33$$

Finalment ja es pot calcular el coeficient extern aïllant-lo de l'equació 11.X.2.2:

$$h_o = 0,36 \cdot Re^{0,55} \cdot Pr^{0,33} \cdot \frac{K}{d_{eq}} = 0,36 \cdot 39.098,86^{0,55} \cdot 5,33^{0,33} \cdot \frac{0,628}{0,018026}$$

$$= 5.491,0488 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Càlcul del coeficient global U.

Un cop calculats tots els valors necessaris ja es pot usar l'equació 11.X.2.1. per al càlcul del coeficient global U del sistema:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{5.491,0488} + \frac{1}{5.000} + \frac{0,025 \cdot \ln\left(\frac{0,025}{0,02}\right)}{2 \cdot 150} + \frac{0,025}{0,02} \cdot \frac{1}{5.000} + \frac{0,025}{0,02} \cdot \frac{1}{6.235,4877}$$

$$\rightarrow U = 1.174,8461 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

11.6.2.5. Longitud de tubs segons la transferència de matèria.

Per al càlcul de la longitud dels tubs es dividirà l'absorbidor en 5 punts. L'objectiu de dividir l'absorbidor en 5 punts és el de calcular els canvis de temperatura entre els punts i el calor alliberat, a partir d'aquí es pot trobar la longitud necessària entre cada punt per tal d'aconseguir retirar el calor. Per tant, com ja s'ha dit, s'ha dividit l'absorbidor en 5 punts fixant

el % del HCl en el líquid a cadascun d'ells. A continuació es mostren les taules de valors dels 5 punts, com també les taules per a l'equació d'Antoine i d'entalpies de la solució.

Taula 87. Punts i concentracions d'HCl a l'absorbidor.

Punt	%HCl
1	32
2	26
3	20
4	12
5	5

Taula 88. Valors de l'equació d'Antoine per a diferents % d'HCl.

% màssic HCl	A	B
2	11,8037	4736
4	11,64	4471
6	11,2144	4202
8	11,0406	4042
10	10,9311	3908
12	10,79	3765
14	10,6954	3636
16	10,6261	3516
18	10,4957	3376
20	10,3833	3245
22	10,3172	3125
24	10,2185	2995
26	10,1303	2870
28	10,0115	2732
30	9,8763	2593
32	9,7523	2457
34	9,6061	2316
36	9,5262	2279

Taula 89. Entalpies de solució d'HCl en aigua.

Formula	Estat	Calor de formació a 298K, (Kj/mol HCl)	% màssic HCl
HCl. 75 H ₂ O	aq	-165,72	2,63
HCl. 50 H ₂ O	aq	-165,36	3,9
HCl. 40 H ₂ O	aq	-165,1	4,82
HCl. 30 H ₂ O	aq	-164,67	6,33
HCl. 25 H ₂ O	aq	-164,34	7,5
HCl. 20 H ₂ O	aq	-163,85	9,21
HCl. 15 H ₂ O	aq	-163,03	11,9
HCl. 10 H ₂ O	aq	-161,32	16,9

Formula	Estat	Calor de formació a 298K, (Kj/mol HCl)	% màssic HCl
HCl. 8 H ₂ O	aq	-160	20,2
HCl. 6 H ₂ O	aq	-157,68	25,3
HCl. 5 H ₂ O	aq	-155,77	28,9
HCl. 4 H ₂ O	aq	-152,92	33,6
HCl. 2 H ₂ O	aq	-140,96	50,3
HCl. H ₂ O	aq	-121,55	67
HCl	gas	-92,31	100

A partir d'aquí es duu a terme el càlcul de les temperatures a cada punt i de la longitud dels tubs entre punts. Per al càlcul es segueix el següent procés iteratiu:

- 1) Suposar una temperatura a la paret àcida T_{sup}
- 2) Calcular:
 - Pressió de vapor amb Antoine: $\log(P_{AL}^*) = A - \frac{B}{T}$
 - Pressió parcial del HCl: $P_{AG}^* = y_{HCl} \cdot P$
 - Pes molecular mitjà: $M_{av} = \sum(y_{HCl} \cdot PM_i)$
 - Flux màssic: $G_t = \frac{\text{cabal màssic HCl gas}}{\text{secció total}}$
 - Viscositat a la T° suposada. (entre 0.014 i 0.017 cP en el rang de temperatures de 20 a 100°C)
 - Coeficient de transferència de matèria: $K_G = \frac{1,654 \cdot 10^{-5}}{M_{av}^{1,75}} \cdot \left(\frac{d_i \cdot G_t}{\mu}\right)$
- 3) Càlcul del calor d'absorció.
 - Flux molar: $N_A = K_G \cdot PM_{HCl} \cdot (P_{AG}^* - P_{AL}^*)$
 - Calor d'absorció: $\Delta H_S = \Delta H_{f_{X\% HCl}} - \Delta H_{f_{HCl gas}}$
 - Calor d'absorció per unitat d'àrea: $q_1 = N_A \cdot \Delta H_S$
- 4) Càlcul de la temperatura de refrigeració mitjançant un balanç d'energia entre els punts, excepte per al cas dels punts 1 i 5 que ja la tenen fixada al ser els punts d'entrada i sortida de l'aigua de refrigeració. 20 i 28 °C respectivament.
 - $q = \text{calor a retirar} - \Delta H_S \cdot \text{cabal molar HCl absorbit entre el punt d'interès i el final}$
 - $q = Q_{ref} \cdot C_p \cdot (T_{ref \text{ punt } N} - T_{ref \text{ punt } N-1})$ Aïllar $T_{ref \text{ punt } N}$
- 5) Comprovació T_{sup}
 - $q_2 = U \cdot \Delta T = U \cdot (T_{sup} - T_{ref})$
 - $q_1 = q_2 \rightarrow T_{sup} = T \text{ del punt (en cas contrari tornar al primer pas)}$

6) Càlcul de l'àrea i longitud requerides entre punts N i N-1.

$$\begin{aligned} - \Delta T_{ml} &= \frac{(T_{\text{sup punt } N} - T_{\text{ref punt } N}) - (T_{\text{sup punt } N-1} - T_{\text{ref punt } N-1})}{\ln\left(\frac{(T_{\text{sup punt } N} - T_{\text{ref punt } N})}{(T_{\text{sup punt } N-1} - T_{\text{ref punt } N-1})}\right)} \\ - A &= \frac{q}{U \cdot \Delta T_{ml}} \\ - L &= \frac{A}{N_t \cdot \pi \cdot d_o} \end{aligned}$$

Repetint aquest procediment iteratiu per als 5 punts es pot construir la següent taula per al dimensionament de l'absorbidor:

Taula 90. Valors obtinguts seguint el mètode iteratiu.

PUNT	%HCL	Tº paret àcida (ºC)	Tº h2o refrigeració (ºC)	Calor alliberat entre punts (kW)	Àrea (m2)	L (m)
1	32	27,163	20,000			
2	26	49,782	21,699	296,164	16,463	2,382
3	20	68,473	23,326	283,756	6,720	0,972
4	12	89,355	25,343	351,737	5,541	0,802
5	5	99,109	28,000	464,275	5,855	0,847
TOTAL				1395,931	34,578	5,00

Per tal d'assegurar un bon funcionament i poder abastir d'una possible sobreproducció es sobredimensionarà l'equip, per tant la longitud serà de 6 m.

Cal tenir en compte el cabal de benzè inert en l'absorció que surtira pel líquid junt amb l'HCl. Per tant, al tenir en compte el benzè, la composició final de l'HCl és del 30.9%.

11.6.3. Absorbidor adiabàtic c-602.

Per a completar el sistema d'absorció de l'àcid clorhídric s'ha mirat un catàleg d'on s'ha escollit un absorbidor complementari per a fer l'absorció fins al 5%. Sabent que l'absorbidor ha de ser suficientment gran per a tractar un cabal de 6.661,69 kg/h s'ha buscat l'adequat a la següent taula de catàleg extreta de la pàgina web del proveïdor QVF d'absorbidors adiabàtics:

Taula 91. Catàleg d'absorbidors adiabàtics de QVF.

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

Seguint la taula, es necessitaria un absorbidor de DN650 per a tractar el nostre cabal. Tot i així no es necessària tanta alçada d'empacat, ja que en el nostre cas només s'ha d'absorbir fins a un 5% d'HCl, per tant s'ha estimat una alçada d'empacat de 1,5 m.

11.7. Disseny del separador vapor-líquid

11.7.1. Introducció

En aquest apartat es duu a terme el disseny del separador vapor-líquid F-501. Un separador vapor-líquid consisteix en un separador de fases, amb un aliment bifàsic que es separa en dos corrents, un de gas i un de líquid.

El seu objectiu és el de purificar més el corrent de benzè que es recircula al reactor treient-ne HCl. Junt amb el HCl també hi ha una petita part de benzè vaporitzat, per tant el corrent de gas que surt de la columna flash es recircula a la columna d'absorció d'orgànics (columna C-501) per a no perdre ni aquest benzè ni aquest HCl.

Taula 92. Condicions d'operació i composicions molars dels corrents d'entrada i sortida de la columna F-501.

Condicions d'operació			
	Aliment	Cues	Caps
Fracció de vapor	0,0339	0	1
Temperatura (°C)	39,28	39,28	39,28
Pressió (kPa)	101,3	101,3	101,3
Cabal molar (Kmol/h)	119,3	115,3	4,05
Cabal màssic (Kg/h)	9153	8966	187
Entalpia molar (Kj/Kmol)	4,45E+04	4,79E+04	-5,10E+04
Cabal de calor (Kj/h)	5,31E+06	5,52E+06	-2,07E+05
Composicions molars			
	Aliment	Cues	Caps
Benzè	0,9477	0,9728	0,2326
HCl	0,0423	0,0168	0,7671
MCB	0,0099	0,0102	0,0004
DCB	0,0002	0,0002	0

11.7.2. Disseny funcional i disseny mecànic

Els dissenys funcional i mecànic s'han fet mitjançant el simulador Aspen Hysys amb l'eina "Vessel sizing". Paral·lelament també s'ha portat a terme els càlculs necessaris per al disseny mecànic mitjançant el codi API 650 per al disseny de tancs a pressió atmosfèrica.

Taula 93. Comparació de resultats del disseny mecànic de la columna F-501.

	HYSYS	API 650
D (m)	0,9144	0,9144
L/D	4	4
Longitut total (m)	4,1148	4,12
Longitut cap/fons (m)	0,2286	0,229
Longitut cilindre (m)	3,6576	3,66
Tipus de capçal	elipsoidal	elipsoidal

	HYSYS	API 650
Gruix cos (mm)	5	6,35
Temps de residència (min)	5	5

11.8. Disseny de canonades

11.8.1. Diàmetre de la canonada

Per dissenyar les característiques de les canonades que formaran part del procés de BOPAC industries és necessari conèixer certs paràmetres de la línia que s'està estudiant:

- El cabal que passa per la canonada
- El tipus de fluid que circula
- La pressió d'operació i, en conseqüència, la temperatura de disseny de la canonada

Definint aquest ítems, es podrà dissenyar el tipus de canonada. Els més emprats a la indústria són el *schedule* 10s, 40s i 80s.

- *Schedule* 10s → pressions per sota de 10 bar, com els corrents d'orgànics
- *Schedule* 40s → fluids a alta temperatura, com pot ser oli tèrmic
- *Schedule* 80s → fluids a pressions elevades, com el clor líquid a 15 bar.

D'aquesta forma, a la següent taula, es presenten els valor dels diferents *schedule* en funció del diàmetre de la canonada:

Diámetro Nominal NPS	Diám. Ext.		Cédula 10						Cédula 40						Cédula 80					
			Grosor Pared		Presión Ing. Trab.		Peso Aprox.		Grosor Pared		Presión Ing. Trab.		Peso Aprox.		Grosor Pared		Presión Ing. Trab.		Peso Aprox.	
	pg	mm	pg	mm	PSI	kg/m	Lb/pie	kg/m	pg	mm	PSI	kg/m	Lb/pie	kg/m	pg	mm	PSI	kg/m	Lb/pie	kg/m
1/8	.405	10.29	.049	1.24	4270	300	.19	.28	.068	1.73	6170	434	.25	.37	0.095	2.41	9200	646	0.31	0.47
1/4	.540	13.72	.065	1.65	4240	298	.33	.49	.088	2.24	5970	420	.43	.63	0.119	3.02	8520	599	0.54	0.8
3/8	.675	17.15	.065	1.65	3320	233	.42	.63	.091	2.31	4810	338	.57	.85	0.126	3.2	7000	492	0.76	1.1
1/2	.840	21.34	.083	2.11	3420	240	.67	1.00	.109	2.77	4610	324	.85	1.27	0.147	3.73	6486	456	1.1	1.62
3/4	1.050	26.67	.083	2.11	2690	189	.86	1.28	.113	2.87	3750	264	1.13	1.69	0.154	3.91	5296	372	1.49	2.2
1	1.315	33.40	.109	2.77	2830	199	1.40	2.09	.133	3.38	3510	247	1.68	2.50	0.179	4.55	4689	342	2.19	3.24
1 1/4	1.660	42.16	.109	2.77	2210	155	1.81	2.69	.140	3.56	2880	202	2.27	3.39	0.191	4.85	4039	284	3.02	4.47
1 1/2	1.900	48.26	.109	2.77	1920	135	2.09	3.11	.145	3.68	2590	182	2.72	4.05	0.2	5.08	3664	258	3.67	5.41
2	2.375	60.33	.109	2.77	1520	107	2.64	3.93	.154	3.91	2180	153	3.65	5.45	0.218	5.54	3158	222	5.07	7.48
2 1/2	2.875	73.03	.120	3.05	1380	97	3.53	5.27	.206	5.16	2390	168	5.79	8.64	0.276	7.01	3312	233	7.73	11.41
3	3.500	88.90	.120	3.05	1120	79	4.33	6.46	.216	5.49	2070	146	7.58	11.30	0.3	7.62	2893	203	10.35	15.27
3 1/2	4.000	101.60	.120	3.05	980	69	4.97	7.42	.226	5.74	1890	133	9.11	13.58	0.318	8.08	2683	188	12.62	18.67
4	4.500	114.30	.120	3.05	867	61	5.61	8.37	.237	6.02	1750	123	10.79	16.09	0.337	8.56	2499	176	15.12	22.32
6	6.625	168.28	.134	3.4	655	46	9.29	13.85	.280	7.11	1395	98	18.97	28.28	0.432	10.97	2152	151	28.84	42.56
8	8.625	219.08	.148	3.76	555	39	13.40	19.98	.322	8.18	1227	86	28.55	42.57	0.5	12.7	1913	134	43.79	64.64
10	10.750	273.05	.165	4.19	495	35	18.70	27.88	.365	9.27	1113	78	40.48	60.36	0.5	12.7	1803	127	55.25	96.01

11.8.2. Velocitats típiques dels fluids

Lligat al cabal que passa per cada canonada, és important establir la velocitat a la que passa el fluid per tal de determinar les dimensions de les canonades. És per això, que s'han establert velocitats típiques depenen del tipus de fluid que circula per la canonada. Aquests valors queden determinats a la següent taula:

Taula 94. Velocitats típiques de fluids.

Tipus de fluid	Tipus de flux	Velocitat (m/s)
Líquid no viscos	Aspiració	0.3-0.9
	Impulsió	1.2-3
Líquid viscos	Aspiració	0.06-0.15
	Impulsió	0.15-0.6
Vapor d'aigua	-	9-20
Gas	-	9-30

De tal forma que les velocitats escollides a BOPAC industries han estat les recollides a la següent taula:

Taula 95. Velocitats escollides.

Tipus de fluid	Tipus de flux	Velocitat (m/s)
Líquid no viscos	Aspiració	0.75
	Impulsió	2
Líquid viscos	Aspiració	0.1
	Impulsió	0.4
Vapor d'aigua	-	20
Gas	-	10

11.8.3. Determinació del diàmetre de la canonada

Un cop coneguts els cabals de cada corrent i les velocitats típiques en funció del fluid que circula per cada corrent, es pot calcular el diàmetre de la canonada, emprant la següent equació:

$$v \text{ (m/s)} = \frac{Q \text{ (m}^3\text{/s)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{Q \text{ (m}^3\text{/s)}}{\frac{\pi}{4} D^2 \text{ (m}^2\text{)}} \rightarrow D \text{ (mm)} = 10^3 \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q \text{ (m}^3\text{/s)}}{v \text{ (m/s)}}} \quad (31)$$

Un cop calculat el diàmetre de la canonada, ja es pot anar a la taula del Schedule i, segons quin es decideixi utilitzar es poden calcular les característiques de la canonada.

Per comprovar que els resultat tenen veracitat, s'ha de calcular la velocitat amb les dades obtingudes a la taula del schedule, i veure si aquesta velocitat calculada està dins del rang de velocitats típiques.

11.8.4. Aïllament tèrmic

Un dels problemes que poden sorgir a l'hora de transportar fluids per les diverses canonades de la planta, són les variacions de les temperatures que poden sofrir. És per això que s'ha de dissenyar el tipus i les dimensions de l'aïllant tèrmic per a què les temperatures siguin estables i no variïn al llarg de la canonada.

D'aquesta manera, s'ha escollit escuma de poliuretà com a aïllant a totes les canonades de la planta que hagin de mantenir la seva temperatura per sota de la temperatura ambient. Els valors del diàmetre de les canonades en funció de la temperatura queden recollits a les següents taules:

ESPEJOR (mm)	TEMPERATURA (°C)								
DO (mm)	-70a-60	-60a-50	-50a-40	-40a-30	-30a-20	-20a-10	-10a0	0a10	10a25
<35	62,55	58	50,75	43,5	36,3	29,0	21,8	14,5	14,5
35-60	72,5	62,3	58,0	50,8	43,5	36,3	29,0	21,75	14,5
60-90	72,5	62,3	58,0	50,8	43,5	36,3	29,0	21,75	21,8
90-140	79,75	72,5	65,25	58,0	50,8	43,5	36,25	29,0	21,8
>140	79,75	72,5	65,25	58,0	50,8	43,5	36,25	29,0	21,8

Tabla 98. Espesores de poliuretano para zonas externas

ESPEJOR (mm)	TEMPERATURA (°C)								
DO (mm)	-70a-60	-60a-50	-50a-40	-40a-30	-30a-20	-20a-10	-10a0	0a10	10a25
<35	82,3	78	70,8	63,5	56,3	49	41,8	34,5	34,5
35-60	92,5	85,3	78,0	70,8	63,5	56,3	49,0	41,8	34,5
60-90	92,5	85,3	78,0	70,8	63,5	56,3	49,0	41,8	41,8
90-140	99,8	92,5	82,3	78,0	70,8	63,5	56,3	49,0	41,8
>140	99,8	92,5	82,3	78,0	70,8	63,5	56,3	49,0	41,8

D'altra banda, les canonades que s'han de mantenir a temperatures per sobre de la temperatura ambient, s'han aïllat mitjançant llana de roca. De la mateixa manera que amb el poliuretà, els valors dels diàmetres en funció de la temperatura queden recollides a continuació:

ESPEJOR (mm)	TEMPERATURA (°C)			
DO (mm)	40 a 65	65 a 100	100 a 150	150 a 200
<35	20	20	30	40
35-60	20	30	40	40
60-90	30	30	40	50
90-140	30	40	50	50
>140	30	40	50	60

ESPEJOR (mm)	TEMPERATURA (°C)			
DO (mm)	40 a 65	65 a 100	100 a 150	150 a 200
<35	30	30	40	50
35-60	30	40	50	50
60-90	40	40	50	60
90-140	40	50	60	60
>140	40	50	60	70

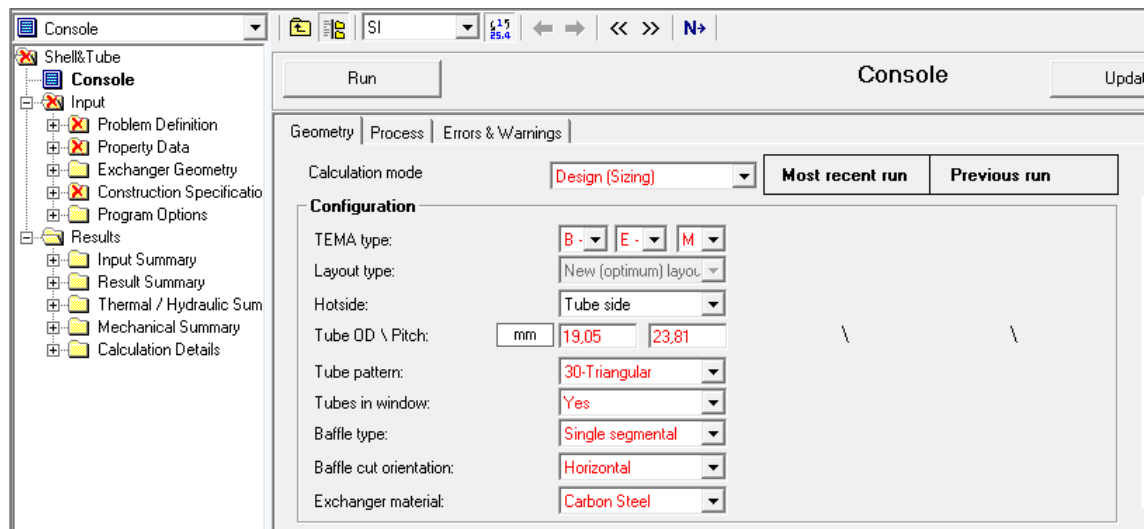
11.9. Disseny de bescanviadors de calor.

El disseny dels bescanviadors de calor de la planta s'ha dut a terme mitjançant el programa de simulació *Aspen Exchanger Design and Rating User Interface*. El programa conté el codi TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association) i el codi ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), fets que permeten un disseny rigorós de l'equip.

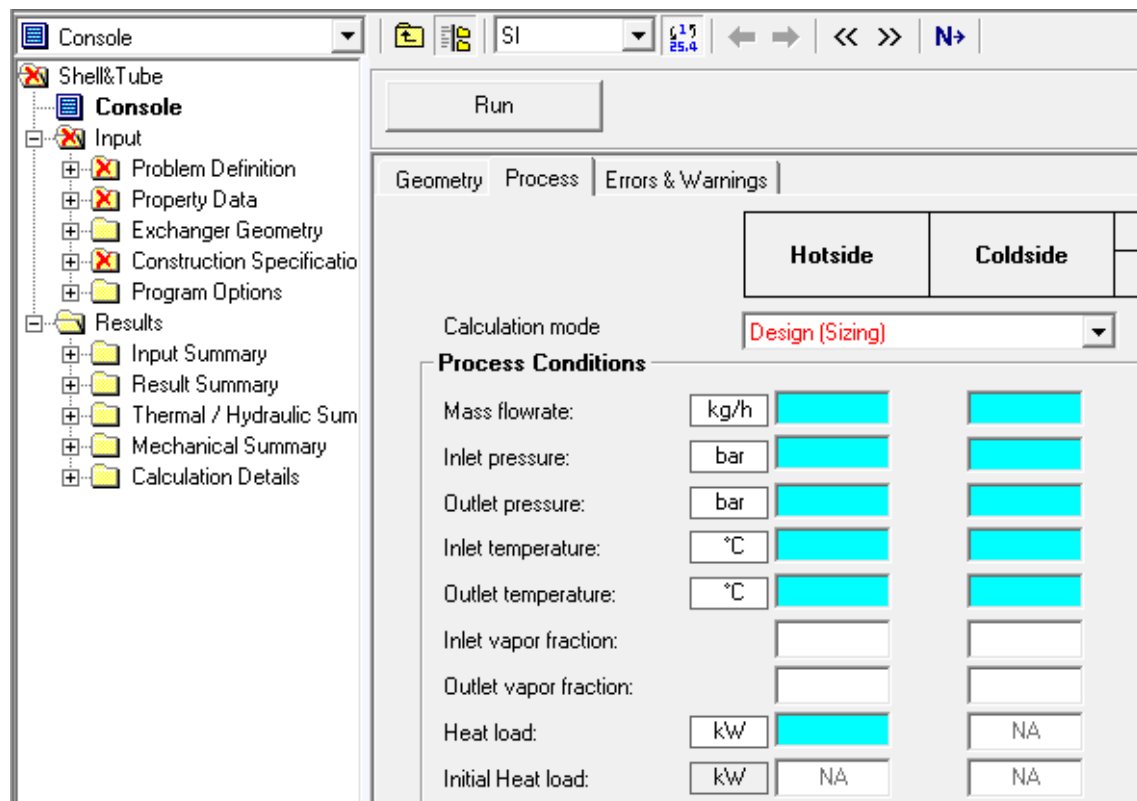
11.9.1. Disseny dels bescanviadors

Depen del fluid que circuli per cada part del bescanviador, el rendiment d'aquest pot variar. A continuació es presenten els aspectes que s'ha tingut en compte i que condicionen el disseny de l'equip.

- Els fluids amb vapors incondensables circularan pels tubs de manera que aquests s'arrosseguin amb el cabal i no s'acumulin.
- Els fluids a alta pressió o corrosius circularan per tubs degut a que es poden netejar amb més facilitat.
- Els fluids a altes temperatures es faran circular per tubs, així només es necessita tenir una temperatura alta de disseny en els tubs i no en la carcassa reduint el cost del bescanviador.



A continuació s'ha d'introduir al programa els fluids que circularan per cada part del bescanviador. També ens demanarà el programa que especifiquem els cabals que hi ha de circular, les temperatures d'entrada i sortida i la pressió de treball.



El programa també permet especificar altres paràmetres del bescanviador com el material de construcció que es vol usar per a cada part del mateix. També ens permet decidir el número de passos per carcassa i tub. Tenint totes aquestes variables en compte es pot fer córrer el programa i que ens doni els resultats obtinguts per al bescanviador.

El programa facilita una gran quantitat de dades del bescanviador com a resultats a la iteració. Principalment són resultats de les dimensions de l'equip, condicions d'entrada i sortida dels fluids i cost del bescanviador.

TEMA Sheet

Shell&Tube

Console

Input

Problem Definition

Property Data

Exchanger Geometry

Construction Specification

Program Options

Results

Input Summary

Result Summary

Warnings & Message

Optimization Path

Recap of Designs

TEMA Sheet

Overall Summary

Thermal / Hydraulic Sum

Mechanical Summary

Calculation Details

6	Size	203.2 - 1219.2	mm	Type	BEM	Hor	Connected in	1 parallel	1 series
7	Surf./unit (eff.)	2.2	m ²	Shells/unit	1		Surf./shell (eff.)	2.2	m ²
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT								
9	Fluid allocation	Shell Side			Tube Side				
10	Fluid name								
11	Fluid quantity, Total	4,928			0,0831				
12	Vapor (In/Out)	kg/s			0	0	0,0831	0	
13	Liquid	kg/s			4,928	4,928	0	0,0831	
14	Noncondensable	kg/s			0	0	0	0	
15									
16	Temperature (In/Out)	°C			55	77.5	135,12	133.36	
17	Dew / Bubble point	°C					135,12	135.12	
18	Density Vapor/Liquid	kg/m ³			/ 957.44	/ 932.66	1.6	/ 931.7	
19	Viscosity	mPa.s			/ 0.4682	/ 0.3682	0.0137	/ 0.2187	
20	Molecular wt. Vap						18.01		
21	Molecular wt. NC								
22	Specific heat	kJ/(kg.K)			/ 1.591	/ 1.642	2.177	/ 4.221	
23	Thermal conductivity	W/(m.K)			/ 0.1304	/ 0.1262	0.0283	/ 0.6908	
24	Latent heat	kJ/kg					2172.2	2174.2	
25	Pressure (abs)	bar			2.55	2.50553	3	2.91242	
26	Velocity	m/s				0.85		29.47	
27	Pressure drop, allow./calc.	bar			0.49987	0.04447	0.25855	0.08758	
28	Fouling resistance (min)	m ² .K/W			0		0	0 Ao based	
29	Heat exchanged	kW			179.2		MTD corrected	67.3 °C	
30	Transfer rate, Service	1216.6			Dirty	1715.5	Clean	1715.5 W/(m ² .K)	
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL								
32				Shell Side				Tube Side	
33	Design/vac/test pressure:g	bar			1,44738/	/	3,44738/	/	
34	Design temperature	°C			115.56		171.11		
35	Number passes per shell				1		4		
36	Corrosion allowance	mm			3.18		0		
37	Connections	In			mm	1 76.2/ -	1 31.75/ -		
38	Size/rating	Out				1 76.2/ -	1 12.7/ -		
39	Nominal	Intermediate				/ -	/ -		
40	Tube No.	3111	OD	19.5	Tube No.	124	Length	1219.2	mm Pitch 24.38 mm

Un cop feta una primera iteració, s'ha de mirar que les velocitats per tubs i per carcassa estiguin dins del rang de velocitats típiques. És un dels trets més importants a l'hora d'acceptar com a definitiu el disseny del bescanviador, junt amb el seu cost i la relació $L_{TUB}/D_{CARCASSA}$.

A continuació es mostra una taula amb el rang de les velocitats típiques per tubs i per carcassa segons l'estat físic del fluid:

Taula 96. Velocitats típiques de fluids per bescanviadors.

LÍQUID PER TUB

Líquid de procés	1-2 m/s
Aigua de torre	1,5-2,5 m/s

LÍQUID PER CARCASSA

0,3-1 m/s

GASOS I VAPORS

Buit	50-70 m/s
Pressió atmosfèrica	10-30 m/s
Alta pressió	5-10 m/s

11.10 Disseny de compressors

Els compressors de la planta seran de tipus centrífug i de cargol. Un compressor és un dispositiu mecànic accionat per un motor elèctric. L'energia elèctrica és transformada en energia mecànica la qual impulsa el fluid a una determinada velocitat i pressió. Cal destacar que l'energia que es transforma es cinètica en arribar al fluid. Com a conseqüència de produir-se un canvi important en la pressió del gas, també es produeix un canvi en la temperatura i densitat del vapor o gas a comprimir.

A continuació es detallen els càlculs realitzats per determinar la potència necessària que tindrà el compressor. Per dur a terme la realització d'aquests càlculs s'ha tingut en compte el cabal, temperatura i canvi de pressió.

11.10.1 Número d'etapes

Primer de tot, s'ha de determinar el número d'etapes que tindrà el compressor, en funció de la relació de compressió d'aquest. Una relació de compressió adequada va des de 2.5 a 5.

$$r = \frac{P_n}{P_o} \quad (32)$$

On

r és la relació de compressió

P_n és la pressió d'impulsió (bar)

P_o és la pressió d'aspiració (bar)

Mitjançant l'equació 32 anterior i reduint-la a una relació que es trobi dins del rang, es determina el número d'etapes mitjançant la següent equació:

$$R = 2.5 = \sqrt[N]{\frac{P_n}{P_o}} \quad (33)$$

On

R és la relació de compressió per etapa

N és el número d'etapes

P_n és la pressió d'impulsió (bar)

P_o és la pressió d'aspiració (bar)

Seguidament, es determina la potència que necessita el compressor mitjançant les següents equacions:

$$w = N \cdot \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{ZRT}{PM} \cdot \left(\left(\frac{P_n}{P_o} \right)^{\frac{\gamma-1}{N\gamma}} - 1 \right) \quad (34)$$

On

N és el número d'etapes

Pn és la pressió d'impulsió (bar)

Po és la pressió d'aspiració (bar)

$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ és la relació adiabàtica

Z és el factor de compressibilitat

R és la constant dels gasos

PM és el pes molecular

Seguidament es determina la potència

$$W = w \cdot m \quad (35)$$

On

m és el cabal màssic (kg/h)

W és la potència (W)

Per últim, tenint en compte el rendiment del compressor, es determina la potència real:

$$P_{real} = \frac{W}{\eta} \quad (36)$$

On

η és el rendiment del compressor

Preal és la potència real (W)

11.11 Bombes

11.11.1 Selecció de bombes

Pel disseny i selecció d'una bomba és necessari calcular la potència que ha de subministrar aquesta per a transportar el fluid des de un punt de la planta fins el punt on es requereix i a la pressió requerida.

Per calcular la potència de la bomba s'ha de realitzar un balanç d'energia mecànica des de el punt inicial fins el punt final, mitjançant la següent equació:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \left(\frac{v_2^2}{\alpha} - \frac{v_1^2}{\alpha} \right) = \hat{w} - e_v \quad (37)$$

On

ΔP és la diferència de pressió entre els dos punts de la línia estudiada.

ρ és la densitat del fluid (kg/m³)

g és l'acceleració de la gravetat (m/s²)

z_1 i z_2 és l'altura del líquid en el dos punts estudiats (m)

v_1 i v_2 és la velocitat del punt inicial i final (m/s), aquestes es consideren constants, per tant

$$\Delta v = (v_2 - v_1) = 0$$

α és el factor de correcció de l'energia cinètica. Per Reynolds menors que 2100 el factor és igual a 0.5 i per Reynolds superiors a 2100 és igual a 1

$\hat{w}$ és el treball per unitat de massa (J/kg)

E_v són les pèrdues de treball per fricció (J/kg)

Pel que fa a les pèrdues de càrrega que es produeixen en trams rectes per la fricció dels fluids amb les parts de les canonades i la turbulència d'aquestes, i en trams com accidents o accessoris que dificulten el recorregut del fluid, s'han calculat mitjançant la següent equació:

$$e_v = (e_v)_r + (e_v)_{acc} \quad (38)$$

On pel càlcul dels trams rectes, es determinen a partir de la següent equació:

$$(e_v)_r = 4f \frac{v^2 L}{2 D} \quad (39)$$

On

L és la longitud de la canonada del tram recte (m)

D és el diàmetre intern de la canonada (m)

v és la velocitat a la que circula el fluid per l'interior de la canonada (m/s)

f és el factor de fricció de Fanning. Aquest factor es determina mitjançant l'abac de Moody. Per dur a terme aquest càlcul és necessari establir la rugositat relativa del material i el número de Reynolds.

Per determinar la rugositat relativa (ϵ/D), es calcula dividint la rugositat absoluta, que depèn del material utilitzat a la canonada, i el diàmetre intern d'aquesta.

Seguidament es calcula el número adimensional de Reynolds a partir de la següent equació:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (40)$$

On

ρ és la densitat del fluid (kg/m^3)

v = velocitat del fluid que circula per l'interior de la canonada (m/s)

D = diàmetre intern de la canonada (m)

μ = viscositat del fluid ($\text{kg/m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Un cop determinat el número de Reynolds, la rugositat relativa, i mitjançant el gràfic de Moody (figura 10) es determina el coeficient de fricció $4f$.

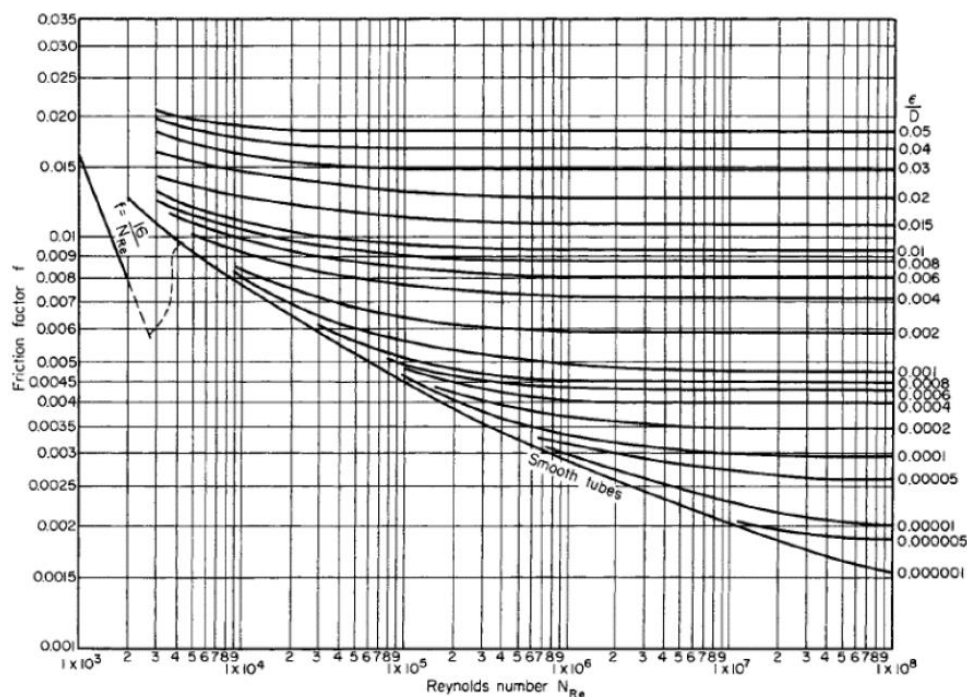


Figura 31. Factors de fricció de Fanning en funció del número de Reynolds i la rugositat relativa.

Un cop obtingut el coeficient de fricció $4f$, es determinen les pèrdues de càrrega per trams rectes.

Pel que fa a la determinació de les pèrdues de càrrega per accidents es calculen mitjançant la següent equació:

$$(e_v)_{acc} = K \cdot \frac{v^2}{2} \quad (41)$$

On

K és el factor de pèrdues per fricció que és un paràmetre que depèn dels diferents accessoris instal·lats al llarg de la planta. El valor d'aquest paràmetre en funció de l'accessori es pot trobar a partir de la figura 11

VALORS DE K PER A ACCIDENTS $e_v = K \frac{V^2}{2}$

ACCIDENT	K
Entrada/sortida circuit	
Entrada encanonesa	0,78
Entrada cantells vius	0,50
Entrada arrodonida	0,04
Sortida encanonesa	1,00
Sortida cantells vius	1,00
Sortida arrodonida	1,00
Colzes/ Unions	
Colze de 45° standard	0,35
Colze de 45° gran curvatura	0,20
Colze de 90° standard	0,75
Colze de 90° gran curvatura	0,45
Colze de 90° petita curvatura	1,3
Corba de 180°	1,5
T standard ús com a colze	1,0
T standard amb bifurcació tancada	0,4
T standard amb divisió de cabal	1,0 (a)
Unió rosca	0,04
Maneguet d'unió	0,04
Vàlvula comporta	
oberta	0,17
¾ oberta	0,90
½ oberta	4,5
¼ oberta	24,0
Vàlvula de diafragma	
oberta	2,3

¾ oberta	4,3
¼ oberta	21,0
Vàlvula de selecció	
oberta	9,0
¾ oberta	13,0
½ oberta	36,0
¼ oberta	112,0
Vàlvula angular oberta	2,0
Vàlvula de retenció (oberta)	
de chamera (frontissa)	2,0
de bola	70,0
de disc	10,0
Cabalímetres mecànics	
de disc	7,0
de pistó	15,0
rotatori	10,0
de turbina	6,0
Canvi de diàmetre	
estretament	** (b)
eixamplament	** (b)

$\left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right)^2$ essent D_1 el diàmetre del tub petit i D_2 el diàmetre del tub gran.

- (a) A l'equació utilitzar com a velocitat la del corrent principal
(b) A l'equació utilitzar com a velocitat la del tub petit

Figura 32. Valors de K segons l'accessori o vàlvula.

11.11.2 Càlcul de la potència de la bomba

La determinació de la potència de cada bomba es calcula fent el producte del valor del treball $\hat{w}$, obtingut a partir de l'equació 42 i el cabal màssic de la canonada. Aquest càlcul es realitza a partir de la següent equació:

$$P_{teòrica} = \hat{w} \cdot Q \quad (42)$$

On

$P_{teòrica}$ és la potència teòrica de la bomba (W)

$\hat{w}$ és el treball per unitat de massa (J/kg)

Q és el cabal màssic del fluid que ha d'impulsar la bomba (kg/s)

S'ha de tenir en compte que no tota l'energia subministrada per la bomba s'utilitza per a impulsar el fluid, ja que part d'aquesta energia es disipa en forma de calor. Per tant, se suposa que totes les bombes tinguin un rendiment global, obtenint així la potència real a la que ha de operar. Per tant la potència real es calcula mitjançant la següent equació:

$$P_{real} = \frac{P_{teòrica}}{\eta} = \frac{P_{teòrica}}{0.70} \quad (43)$$

En el nostre cas s'ha determinat que els rendiments globals per totes les bombes són del 75%.

11.12. Bibliografia

1. API Standard 650, Welded Tanks for Oil Storage. 20^a Edició. Març del 2013.
 2. ASME, Boiler and Pressure Vessel Code. 1 de Juliol del 2010. Vol. VIII.
 3. Don W. Green, Robert H. Perry. Perry's Chemical Engineering Handbook. 8^a Edició. s.l. : McGraw-Hill, 2008.
 4. Richardson, Coulson and. Coulson & Richardson's Chemical Engineering. 5^a Edició. s.l. : Butterworth-Heinemann, 31 de Desembre del 1996. Vol. Volum 1.
 5. API Standard 2000, Venting Atmospheric and Low-Pressure Storage. 5^a Edició. Abril del 1998.
 6. Branan, Carl. The Rules of Thumb for Chemical Engineers. [ed.] Elsevier. 4t. p. 88-104, 143- 152.
 7. Don't Gamble with physical properties for simulations. Carlson, Eric C. Octubre / 1996, Chemical Engineering Progress, p. 35-46.
 8. Kister, Henry Z. Distillation Design. [ed.] McGraw-Hill. 1992. p. 106-126, 136-140, 259-362.
 9. Trambouze, Pierre i Euzen, Jean-Paul. Chemical reactors: from design to operation. Paris : Editions TECHNIP, 2004.
 10. Deckwer, Wolf-Dieter. Bubble column reactors. Chichester : John Wiley and Sons , 1992. p. 96.
 11. Bubble Size, Interfacial Area and Liquid-Phase Mass Transfer Coefficient in Bubble Columns. Akita, Kiyomi i Yoshida, Fumitake. 1974, Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, Vol. 13, p. 84-91.
 12. Design of sieve plate spargers for bubble column: role of weeping. Thorat, B.N, Kulkarni, A.V i Joshi, J.B. 8, Chemical Engineering & Technology, Vol. 28, p. 815-828.
- PLANTA DE
13. Design and selection of sparger for bubble column reactor. Part II: Optimum sparger type and design. Kulkarni, Arnand V. i Joshi, Jyeshtaraj B. s.l. : Elsevier, 2011, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 89, p. 1792-1985.
 14. Design and selection of sparger for bubble column reactor. Part I: Performance of different spargers. Kulkarni, Arnand V. i Joshi, Jyeshtaraj B. s.l. : Elsevier, 2011, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 89, p. 1972-1985.
 15. Fogler, H. Scott. Elementos de ingeniería de las reacciones químicas. 4^a Edición. Naucalpan de Juárez : Pearson Educación, 2008.

16. Blanketing, Chemical Tank. Parker Hannifin Corp. [En línia] <http://www.parker.com>.
17. Raschig-Jaeger Technologies. Jaeger Tripacks Catalogues. 2012.
18. Calorcol SA. Estimación de aislantes de Lana mineral de roca. [En línia] 2008.
www.calorcol.com.
19. Brittish Petroleum. Handbook of Chemical Engineering Calculations. 1981.
20. (F. Gòdia, J. López Santín, 2000).Ingenieria Bioquímica Editorial: Sintesis Editorial (2000).
21. *Operaciones Unitarias En Ingeniería Química*-Warren L. McCabe, Julian C.Smith, Peter Harriot-7ma Edición- Ed. McGrawHill
22. <https://www.sulzer.com/es?languageswitch=true>