

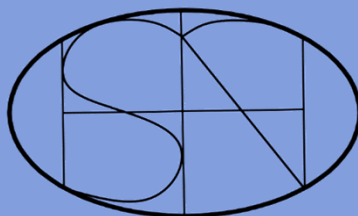
PLANTA DE PRODUCCIÓ DE RESINA EPOXY

TREBALL DE FI DE GRAU
GRAU EN ENGINYERIA QUÍMICA



Noelia Cabana González
Sara Justo Salvador
Cristina López García
Helena Prats Fabregat
Daniel Rebolledo Herмосilla
Joan Sambró Olivella

Tutor: Josep Anton Torà



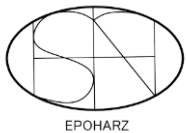
PLANTA DE PRODUCCIÓ DE RESINA EPOXY

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCULS



Noelia Cabana González
Sara Justo Salvador
Cristina López García
Helena Prats Fabregat
Daniel Rebolledo Hermosilla
Joan Sambró Olivella

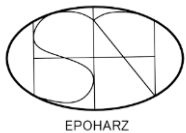
Tutor: Josep Anton Torà



EPOHARZ

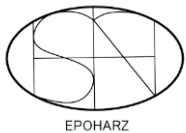
ÍNDEX

11. Manual de càlculs	5
11.1. Introducció.....	5
11.2 Càlculs preliminars	6
11.2.1 Estequiometria	6
11.2.2 Balanç de matèria.....	7
11.3 Disseny dels reactors	14
11.3.1 Balanç de matèria.....	14
11.3.2 Disseny constructiu dels reactors.....	18
11.3.2.1 Disseny de la carcassa: virola.....	19
11.3.3.2 Disseny de fons i capçal: Klopper.....	22
11.3.3 Pes dels reactors.....	24
11.3.4 Calor de reacció i refrigeració.....	25
11.3.5 Disseny de pantalles deflectores	29
11.3.6 Disseny de mitja canya	29
11.3.7 Aïllament	31
11.3.8 Boca d'home	32
11.3.9 Agitador	33
11.4 Disseny dels tancs d'emmagatzematge	35
11.4.1 Tanc d'emmagatzematge d'epiclorhidrina	36
11.4.1.1 Volum emmagatzemat i volum de cada tanc	36
11.4.1.2 Diàmetre intern i altura del tanc	37
11.4.1.3 Pressió de disseny.....	37
11.4.1.4 Temperatura de disseny.....	38



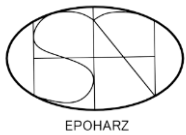
EPOHARZ

11.4.1.5	Espessor del tanc	39
11.4.1.6	Volum de l'equip.....	43
11.4.1.7	Pes de l'equip	44
11.4.1.8	Venteig	44
11.4.1.9	Cubetes de retenció	46
11.4.1.10	Taula resum de resultats	49
11.4.2	Tanc d'emmagatzematge de MIBK	50
11.4.3	Tanc d'emmagatzematge de NaOH 18%.....	51
11.4.4	Tanc d'emmagatzematge d'ECH recuperada	52
11.4.5	Tanc d'emmagatzematge de DCP	53
11.4.6	Tanc d'emmagatzematge de MIBK recuperat	54
11.4.7	Tanc d'emmagatzematge de la resina epoxy	55
11.5	Disseny dels tancs agitats	56
11.5.1	Tanc agitat TA-1002	56
11.5.1.1	Volum emmagatzemat i volum de cada tanc	56
11.5.1.2	Diàmetre intern i altura del tanc	57
11.5.1.3	Pressió de disseny.....	58
11.5.1.4	Temperatura de disseny	59
11.5.1.5	Espessor del tanc	59
11.5.1.6	Volum de l'equip.....	63
11.5.1.7	Pes de l'equip	64
11.5.1.8	Venteig	64
11.5.1.9	Disseny de l'agitador.....	66
11.5.1.10	Taula resum de resultats	69



EPOHARZ

11.5.2 Tanc agitat TA-1001	70
11.5.3 Tanc agitat TA-1003	71
11.5.4 Tanc agitat TA-1101	72
11.6 Disseny dels tancs pulmó	74
11.6.1 Tanc pulmó TP-1001	74
11.6.1.1 Volum emmagatzemat i volum de cada tanc	74
11.6.1.2 Diàmetre intern i altura del tanc	75
11.6.1.3 Pressió de disseny	75
11.6.1.4 Temperatura de disseny	76
11.6.1.5 Espessor del tanc	77
11.6.1.6 Volum de l'equip	81
11.6.1.7 Pes de l'equip	82
11.6.1.8 Venteig	82
11.6.1.9 Taula resum de resultats	84
11.6.2 Tanc pulmó TP-1101	85
11.6.3 Tanc pulmó TP-1102	86
11.6.4 Tanc pulmó TP-1201	87
11.6.5 Tanc pulmó TP-1202	88
11.6.6 Tanc pulmó TP-1203	89
11.7 Disseny dels bescanviadors de calor	90
11.8 Disseny dels evaporadors	97
11.9 Columna de rectificació	105
11.9.1 Consideracions pel disseny	105
11.9.2 Disseny amb Aspen HYSYS	108



11.9.3 Disseny mecànic.....	113
11.9.3.1 Pressió de disseny.....	113
11.9.2.2 Temperatura de disseny.....	114
11.9.3.3 Espessor de la columna	115
11.9.3.4 Volum de l'equip.....	119
11.9.3.5 Pes de l'equip	119
11.9.3.6 Aïllament.....	120
11.9.3.7 Taula resum de resultats	120
11.10 Osmosi inversa	122
11.11 Atomitzador	125
11.12 Serveis de planta.....	127
11.12.1 Aigua de la planta	127
11.12.1.1 Desionitzador	127
11.12.2 Gas natural	128
11.12.3 Chillers.....	129
11.12.4 Calderes	130
11.12.5 Torre de refrigeració	134
11.12.7 Consum elèctric	135
11.12.8 Grup electrogen.....	137
11.13 Canonades i bombes	139
11.13.1 Càlcul dels diàmetres de les canonades	139
11.13.2 Càlcul del SCHEDULE de les canonades	140
11.13.3 Càlcul de les pèrdues per fricció i de la pressió que ha de subministrar la bomba.....	142
11.14 Bibliografia.....	149

11. Manual de càlculs

11.1. Introducció

En aquest capítol es mostra la guia dels diferents càlculs realitzats per al disseny dels diversos equips que conformen i operen a la planta EPOHARZ, a més, també es pot trobar la guia del dimensionament de les canonades.

L'objectiu d'aquest capítol, per tant, és poder mostrar pas a pas i de forma seqüencial els càlculs realitzats. Primerament, i abans d'entrar en detall en el disseny dels equips, s'estudia l'estequiometria per tal de poder entendre el balanç de matèria. Una vegada definits aquest valor, es podrà passar a calcular els equips de servei de total la planta de producció.

Com a informació addicional i complementaria, cal recalcar, que l'objectiu productiu de la planta EPOHARZ és aconseguir 12.000Tn/any de producte tot seguint un procés en discontinu. El producte final és la resina epoxy líquida (LER), que s'obtindrà mitjançant la reacció de Bisfenol-A i Epiclorhidrina, a més s'utilitzarà el solvent MIBK per a una millor separació.

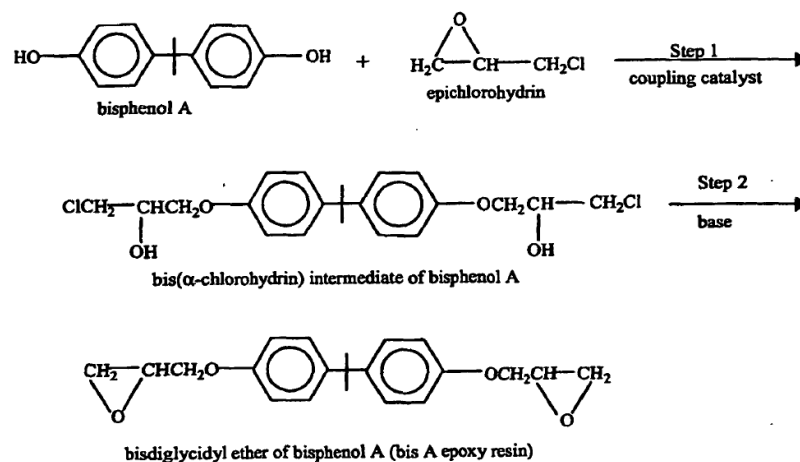
11.2 Càlculs preliminars

11.2.1 Estequiometria

La resina epoxy líquida (LER), com bé s'ha comentat a l'apartat d'Especificacions del projecte, és el producte de reacció de la Epiclorhidrina (ECH) i el Bisfenol-A (BPA). Aquest tipus de resines epoxy líquides obtingudes a partir de Bisfenol-A i Epiclorhidrina son preparades en una seqüència de reacció de dos passos. El primer pas és l'acoblament catalitzat per una base del Bisfenol-A i la Epiclorhidrina per formar un intermedi tipus clorhidrina. El segon pas és la deshidrohalogenació del intermedi tipus clorhidrina a partir d'una quantitat estequiomètrica de base, permetent d'aquesta manera, la formació del BADGE. Segons el tipus de catalitzador emprat en la reacció l'obtenció de la resina es pot catalogar el procés d'obtenció en diversos grups.

A la planta EPOHARZ s'ha optat per utilitzar com a catalitzador una sal quaternària d'amoni com ve a ser el Clorur de benzil-trimetil-amoni (BTMAC) que és un catalitzador d'acoblament de transferència de fase. Per tant el mètode emprat és el procés amb catalitzador de transferència de fase. En aquest procés, la reacció d'acoblament i la reacció de deshidrocloració es duen a terme per separat, ja que el BTMAC no és una sal suficientment forta per produir la deshidrocloració. Per tant, un cop produïda la reacció d'acoblament, s'afegeix hidròxid de sodi perquè es pugui iniciar la deshidrocloració i d'aquesta manera, obtenir la resina epoxy líquida.

A continuació es mostra un esquema de la reacció:



Com es pot veure en l'esquema anterior, la molècula de Bisfenol-A (BPA) és "atacada" per les dues bandes per l'Epiclorhidrina (ECH) fet que fa que l'estequiometria de la reacció d'acoblament sigui la següent:



El mateix passa en el següent pas de la reacció. El BACH, producte format en la reacció d'acoblament, és "atacat" també pels dos costats de la molècula per l'hidròxid de sodi. Per tant, l'estequiometria de la reacció de deshidrocloració és:



11.2.2 Balanç de matèria

Per dur a terme el balanç de matèria del procés s'ha agafat com a punt de partida la informació proporcionada per la patent US4582892¹.

L'exemple 1 de la patent diu que dins del primer reactor, s'afegeix una mescla de ECH, BTMAC (en una solució aquosa al 60% en pes) i BPA en una relació molar de 9,85:0,013:1. Gràcies a aquesta informació es pot conèixer la quantitat inicial de cada un dels reactius que entra en el primer reactor per dur a terme la reacció d'acoblament.

Per saber exactament la quantitat d'aigua i de catalitzador utilitzada s'ha utilitzat la Equació 1 per passar del percentatge màssic que diu la patent a una fracció molar per poder-lo relacionar amb la relació molar que també menciona la patent:

Equació 1

$$\text{Fracció molar de BTMAC} = \frac{\frac{X_{BTMAC}}{PM_{BTMAC}}}{\frac{X_{BTMAC}}{PM_{BTMAC}} + \frac{X_{H_2O}}{PM_{H_2O}}}$$

On:

- X_{BTMAC} fa referència a la fracció màssica de BTMAC.
- PM_{BTMAC} fa referència al pes màssic del BTMAC.
- X_{H_2O} fa referència a la fracció màssica d'aigua.
- PM_{H_2O} fa referència al pes màssic de l'aigua.

Un cop obtinguda la fracció molar de BTMAC, si aquesta es multiplica pel nombre de mols que s'addicionen de la solució aquosa de BTMAC, s'obté el nombre de mols de BTMAC:

Equació 2

$$\text{Mols BTMAC} = \text{Mols totals} \cdot \text{Fracció molar de BTMAC}$$

Per saber aleshores el nombre de mols d'aigua es pot conèixer a partir de l'Equació 3:

Equació 3

$$\text{Mols } H_2O = \text{Mols totals} \cdot (1 - \text{Fracció molar de BTMAC})$$

La patent també menciona que la conversió en el primer reactor és del 98,2% i que la ECH s'addiciona en excés. Per tant, el reactiu limitant en la reacció que es produeix en el primer reactor serà el BPA. Coneixent el nombre de mols a l'entrada, el reactiu limitant, el grau de conversió i els coeficients estequiòmètrics ja es pot calcular el nombre de mols de cada una de les substàncies a la sortida del reactor 1 mitjançant l'Equació 4:

Equació 4

$$N_j = N_{j0} - \frac{\nu_j}{\nu_k} \cdot N_{k0} \cdot X_k$$

On:

- N_j és el nombre de mols a la sortida del component j.
- N_{j0} és el nombre de mols a l'entrada del component j.
- ν_j és el coeficient estequiomètric del component j.
- ν_k és el coeficient estequiomètric del reactiu limitant.
- N_{k0} és el nombre de mols a l'entrada del reactiu limitant.
- X_k és el grau de conversió referit al component clau (limitant).

A l'apartat 11.2.1 d'aquest mateix capítol ja s'ha fet menció de l'estequiometria de les reaccions que es duen a terme. Tot i així, a la següent taula queden agrupats els coeficients estequiòmètrics de cada un dels components que intervenen a la reacció d'acoblament que es duu a terme en el reactor 1:

Taula 1: Coeficients estequiomètrics dels components implicats en la reacció d'acoblament.

Component	Coefficient estequiomètric
BPA	-1
ECH	-2
BACH	1

A la mateixa patent es menciona que en aquesta reacció d'acoblament es forma també el subproducte 1,3-dicloro-2-propanol (DCP) però no indica en quina proporció. A l'exemple 1 de la patent US9469720B2² diu que un cop duta a terme la reacció, un 15% de la mescla final es tracta de 1,3-dicloro-2-propanol. Amb aquesta informació ja podem conèixer la quantitat de DCP a la sortida del primer reactor.

A la pàgina 2001 del llibre Perry's Chemical Engineers' Handbook³ hi ha una taula on s'indica els temps de residència de diferents reactors químics industrials. En una de les files de la taula apareix la reacció que es duu a terme en el primer reactor on diu que el seu temps de residència es troba entre 0,25-4 hores. La empresa EPOHARZ ha escollit un temps de residència de 2 hores, valor que es troba dins de l'interval que proporciona el llibre.

Un cop duta a terme la reacció, es fa un rentat per separar el BTMAC i l'aigua abans d'afegir la mescla restant a l'evaporador per poder separar el DCP i la ECH en excés de la resta de la mescla. La patent US4582892¹ menciona que els rangs recomanats de mescla orgànica a aigua son de 4:1 a aproximadament 15:1 en pes. L'empresa EPOHARZ ha escollit una relació de mescla orgànica a aigua de 8:1, valor que es troba dins del rang recomanat. Per saber la quantitat d'aigua utilitzada en el rentat s'ha fet servir la següent equació:

Equació 5

$$g \text{ mescla orgànica sortida reactor } 1 \cdot \frac{1 g \text{ aigua rentat}}{8 g \text{ mescla orgànica}} = g \text{ aigua rentat}$$

Com que les decantacions no son el 100% exactes, s'ha suposat que un 5% d'aigua del rentat es quedarà retinguda a la fase orgànica. Això no és un problema, ja que tota la fase orgànica entra posteriorment a un evaporador que treballa a 115 °C i 20 mmHg, per tant tota l'aigua que hagi pogut quedar del rentat, s'evaporarà juntament amb la ECH i el DCP.

La mescla que conté ara només una mica de BPA que no ha reaccionat i BACH (producte de la primera reacció) és dissolta en MIBK fins obtenir una solució al 40% en pes. Per tant se sap que:

Equació 6

$$0,4 = \frac{g \text{ BPA} + g \text{ BACH}}{g \text{ BPA} + g \text{ BACH} + g \text{ MIBK}}$$

Com que es coneixen els grams de BPA i de BACH, es poden obtenir els grams de MIBK necessaris per tenir una solució al 40% en pes.

La reacció de deshidrocloració es duu a terme en dos reactors discontinu sagitats consecutius a 80 °C. Pel primer d'aquests dos reactors, la patent diu que s'addicionen 60 grams d'una solució aquosa al 18% de NaOH per cada 200 g de solució. Pel segon reactor la patent diu que en comptes d'addicionar 60 grams de la solució aquosa de NaOH, se n'afegeixen 45. La patent també comenta els temps de residència de cada un dels dos reactors però no dona cap grau de conversió com ho donava en el primer reactor del procés.

No obstant, s'ha trobat un article científic⁴ on apareixen dades cinètiques per poder calcular el grau de conversió dels reactors on es duen a terme les reaccions de deshidrocloració.

L'article presenta la següent equació:

Equació 7

$$k_{app} \cdot \tau = \frac{X}{C_0(1 - X)}$$

On:

Equació 8

$$k_{app} = \frac{6,87 \cdot 10^4}{1,15 \cdot C_{H_2O} + 0,14} \cdot e^{-\frac{41850 \pm 1000}{RT}}$$

On:

- k_{app} és la constant cinètica de la reacció en [L/(mol·s)].
- C_{H_2O} és la concentració d'aigua inicial dins del reactor en [mol/s].
- R és la constant dels gasos ideals en [J/(mol·K)].
- T és la temperatura en [K].
- τ és el temps de residència en [s].
- X és el grau de conversió.
- C_0 és la concentració de NaOH inicial dins del reactor en [mol/L].

Aïllant el grau de conversió de l'Equació 7 s'obté l'Equació 9:

Equació 9

$$X = \frac{k_{app} \cdot \tau \cdot C_0}{1 + k_{app} \cdot \tau \cdot C_0}$$

Aleshores, substituint tots els valors coneguts acabem obtenint les següents conversions recollides en les següents taules:

Taula 2: Valors per obtenir la conversió en el reactor 2

Reactor 2		X ₂
k _{app} (L/(mol·s))	0,004	0,931
Temps (s)	3600	
C ₀ (mol/L)	0,947	
R (J/(mol·K))	8,314	
T (K)	353	
C _{H₂O} (mol/L)	9,583	

Taula 3: Valors per obtenir la conversió en el reactor 3

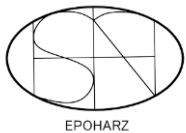
Reactor 3		X ₃
k _{app} (L/(mol·s))	0,005	0,926
Temps (s)	3600	
C ₀ (mol/L)	0,676	
R (J/(mol·K))	8,314	
T (K)	353	
C _{H₂O} (mol/L)	7,392	

Un cop coneguts els valors del grau de conversió per als dos reactors, utilitzant l'Equació 4 i seguint el mateix procediment que en el primer reactor del procés, es poden obtenir el nombre de mols a la sortida de cada un dels reactors. Cal mencionar que en el primer reactor on es produeix la deshidrocloració, el reactiu limitant és el NaOH. En canvi en el segon d'aquests reactors, com que ja ha reaccionat molt bona part de BACH, aquest es trobarà en menor quantitat estequiomètrica i per tant esdevindrà el reactiu limitant. A la Taula 4 queden agrupats els coeficients estequiomètrics de cada un dels components que intervenen a les reaccions de deshidrocloració que es duen a terme en el reactor 2 i en el reactor 3:

Taula 4: Coeficients estequiomètrics dels components implicats en la reacció de deshidrocloració

Component	Coefficient estequiomètric
BACH	-1
NaOH	-2
BADGE	1
H ₂ O	2
NaCl	2

Un cop dutes a terme les dues reaccions de deshidrocloració, es fa un altre rentat on també s'ha utilitzat una relació 8:1 com en el primer rentat de mescla orgànica i aigua. Aleshores utilitzant de nou l'Equació 5 però ara tenint en compte que s'han d'utilitzar els grams de



EPOHARZ

mescla orgànica a la sortida del 3r reactor i no del 1er, es pot obtenir la quantitat necessària d'aigua per dur a terme el rentat.

Per aquest rentat també s'ha suposat que un 5% d'aigua del rentat es quedarà retinguda a la fase orgànica. Però passa el mateix que en el primer rentat. Tota la fase orgànica entra posteriorment a un evaporador que treballa també a 115 °C i 20 mmHg, per tant tota l'aigua que hagi pogut quedar del rentat, s'evaporarà juntament amb el MIBK.

11.3 Disseny dels reactors

El procés d'elaboració de resina epoxy líquida (BADGE) consta de 3 reactors en discontinu i perfectament agitats. El primer (RE-1001) cal un volum d'entorn als 17 m^3 , treballa a pressió atmosfèrica i a 55°C de temperatura i el temps de reacció per assolir la conversió desitjada de 98,2% , segons les dades extretes de la patent. El segon (RE-1101) i tercer (RE-1102) reactor tenen un volum d'uns 30 m^3 i treballen a pressió atmosfèrica i a 80°C de temperatura. En aquest cas el temps de reacció és d'1 hora i les conversions son de 93% i 92,5 % del reactor 2 i del 3, respectivament. Al tercer reactor, s'ha decidit aquest temps de reacció i no de 30 minuts com deia la patent per així augmentar la conversió i acabar obtenint un producte amb una major pureza. En aquesta part del capítol es desenvoluparan els càlculs i les dades necessàries pel dimensionament d'aquests tres reactor.

11.3.1 Balanç de matèria

Una vegada obtinguts els valors dels paràmetres cinètiques ja es poden calcular els balanços de matèria per a cada un dels reactors i conèixer així els volums d'aquest. Tenint en compte que es realitzaran 6 lots diaris, l'objectiu és fer-ne 7,00 Tn/lot, aconseguint una producció diària de 42,02 Tn/dia, produint més quantitat per si existeix algun possible error al lot. Produint aquesta quantitat al dia s'aconseguiria assolir l'objectiu principal de la empresa de produir 12.000Tn/any de BADGE.

Per aconseguir que la primera reacció sigui favorable, és necessari que la epichloridrina (ECH) entri en excés respecte el Bisfenol- A (BPA), a més per a una millor homogeneïtzació i una millor solubilitat, ja que l'ECH entra en estat sòlid ha sigut necessari la utilització d'un catalitzador. El catalitzador escollit ha sigut el clorur-benziltrimetilamoni (BTMAC) diluït en aigua i el reactor escollit serà perfectament agitat. Per tant, per dur a terme cada lot, és necessari alimentar el reactor amb 23,46 Tn. La composició d'aquest reactius a l'entrada del reactor serà de: 20% de BPA, 79,95% d'ECH, 0,03% de BTMAC i 0,02 % de H_2O .

Realitzats els balanços, a la següent taula s'exposen la quantitat necessària d'entrada per a produir cadascun dels lots:

Taula 5: volum i quantitats dels competents a l'entrada del primer reactor (RE-1001)

Volum total (m³)	20,34
Bisfenol-A (Kg)	4.699,18
Epiclorhidrina (Kg)	18.759,06
BTMAC (Kg)	6,31
Aigua (Kg)	2,66

Seguidament, es presenta el volum total a final de reacció amb les quantitats de cadascun dels components quan s'ha assolit el 98,2% de la conversió:

Taula 6: volum i quantitats dels competents a la sortida del primer reactor (RE-1001)

Volum total (m³)	84,59
Bisfenol-A (Kg)	12.765,87
Epiclorhidrina (Kg)	8.062,66
BTMAC (Kg)	6,31
Aigua (Kg)	4,21
Bis (α- clorhidrina) (kg)	8.353,96
1,3- dicloro-2-propanol (kg)	3.140,90

Per poder entrar al reactor 2 (RE-1101)) s'ha fet passar per uns rentats i un evaporador amb l'objectiu d'extreure part de la EPC no reaccionant i tot el BTMAC. En aquest moment és molt necessari l'ús d'un segon catalitzador que és el metil isobutil cetona (MIBK) i afegir hidròxid sodi per tal de poder començar a produir BADGE. Com al reactor anterior, en aquest també s'exposaran en les taules pertinents el volum total i les quantitats de cadascun dels component tant en la entrada com en la sortida de reacció.

Taula 7: volum i quantitats dels competents a l'entrada del segon reactor (RE-1101)

Volum total (m³)	30,05
Bisfenol-A (Kg)	84,59
Aigua (Kg)	5.189,71
Bis (α- clorhidrina) (kg)	8.353,96
Metil isobutil cetona (kg)	12.657,82
Hidròxid de sodi (kg)	1.139,20

Seguidament, es presenta el volum total a final de reacció amb les quantitats de cadascun dels components quan s'ha assolit el 93% de la conversió:

Taula 8: volum i quantitats dels competents a la sortida del segon reactor (RE-1101)

Volum total (m³)	30,59
Bisfenol-A (Kg)	84,59
Aigua (Kg)	5.667,38
Bis (α- clorhidrina) (kg)	2.874,69
Metil isobutil cetona (kg)	12.657,82
Hidròxid de sodi (kg)	78,69
Clorur de sodi (kg)	1.549,60
BADGE (kg)	4.512,95

Abans d'entrar al reactor 3 (RE-1102) tal com s'indica al procés, és passarà la mescla per un decantador per tal d'eliminar gran part de l'hidròxid sòdic i del clorur de sodi. En aquest moment, se li torna a afegir MIBK en solució amb hidròxid sodi. Com al reactor anterior, en aquest també s'exposaran en les taules pertinents el volum total i les quantitats de cadascun dels component tant en la entrada com en la sortida de reacció.

Taula 9: volum i quantitats dels competents a l'entrada del tercer reactor (RE-1102)

Volum total (m³)	27,68
Bisfenol-A (Kg)	84,59
Aigua (Kg)	3.743,17
Bis (α- clorhidrina) (kg)	2.874,69
Metil isobutil cetona (kg)	12.657,82
Hidròxid de sodi (kg)	760,26
Clorur de sodi (kg)	15,50
BADGE (kg)	4.512,95

Seguidament, es presenta el volum total a final de reacció amb les quantitats de cadascun dels components quan s'ha assolit 21 92,5% de la conversió:

Taula 10: volum i quantitats dels competents a la sortida del tercer reactor (RE-1102)

Volum total (m³)	27,96
Bisfenol-A (Kg)	84,59
Aigua (Kg)	3.975,11
Bis (α- clorhidrina) (kg)	214,16
Metil isobutil cetona (kg)	12.657,82
Hidròxid de sodi (kg)	245,31
Clorur de sodi (kg)	767,92
BADGE (kg)	6.704,26

11.3.2 Disseny constructiu dels reactors

El volum dels reactors es calcula en funció de les condicions normals d'operació. En el capítol present s'exposaran les característiques dels diferents reactors que operen la planta.

Es decideix treballar amb un reactor de tanc agitat en condicions discontinues per afavorir la homogeneïtzació. Es per aquest motiu que la relació utilitzada pel disseny de l'alçada del reactor és:

Equació 10

$$L = 2 \cdot D$$

On:

- L correspon a l'alçada del reactor.
- D al diàmetre màxim de l'equip.

Tot això, tenint en compte els volums a tractar dins del reactor i en base als requeriments de transferència de calor i al temps d'operació, es calculen les dimensions de diàmetre i alçada bàsics dels reactors. A més tots els càlculs seran sobredimensionats un 30%.

A més, les dimensions s'ajustaran a les condicions estàndard de disseny de l'acer que són 0,5 o 1 o 1,5 o 2 m, i es considerarà que el reactor serà format per una virola i un capçal i un fons lleugerament bombat. A les següents taules es mostres ens valors de la primera aproximació juntament amb les dimensions considerades estàndards.

Taula 11: dimensions del primer reactor (RE-1001)

	Primera aproximació	Dimensions estàndard
Diàmetre (m)	2,01	2
Longitud (m)	4,03	4

Taula 12: dimensions del segon reactor (RE-1101)

	Primera aproximació	Dimensions estàndard
Diàmetre (m)	2,43	2,5
Longitud (m)	4,83	5

Taula 13: dimensions del tercer reactor (RE-1102)

	Primera aproximació	Dimensions estàndard
Diàmetre (m)	2,36	2,5
Longitud (m)	4,72	5

Pel que fa el material, s'ha decidit utilitzar acer inoxidable 316L gràcies a la gran resistència a la corrosió que presenta. Encara que no existeixin components corrosius dins del procés, s'ha escollit perquè presenta també resistència a les possibles picadures que puguin sorgir amb les solucions que continguin ions clorur⁵.

11.3.2.1 Disseny de la carcassa: virola

En aquesta part es procedeix a dissenyar tota la carcassa del reactor juntament amb el seu espessor tenint en compte la corrosió que pot causar les substàncies que estiguin en contacte amb el material. Com la planta consta de 3 reactors amb diferents proporcions, s'exposaran les equacions utilitzades pel càlcul, un exemple de càlcul, que correspondrà al primer reactor, i finalment una taula resum de l'apartat on es mostraran els resultats obtinguts.

Primerament, s'han de determinar els paràmetres d'operació i disseny, és a dir, pressió i temperatura. La temperatura d'operació del primer reactor és de 55°C i la del segon i tercer és de 80°C. A partir d'aquesta temperatura i utilitzant l'expressió obtinguda consultant la bibliografia⁶, és calcularà la temperatura de disseny:

Equació 11

$$T_{disseny}(F) = T_{operació}(F) \cdot \left(1 + \frac{A}{100}\right) + B$$

On:

- A i B són paràmetres que depenen de la temperatura.

En el cas del primer reactor els valors utilitzats són -100 i 250 respectivament. Si es substitueixen dins l'equació s'acaba obtenint:

$$T_{disseny} = 131K \cdot \left(1 + \frac{-100}{100}\right) + 250 = 250F$$

$$250 F \approx 121,11 \text{ } ^\circ C$$

Amb la pressió passa exactament el mateix, en aquest cas tots treballen a pressió atmosfèrica, no obstant es sobredimensiona un 50%, obtenint així una pressió de 1,5 atm. L'equació pel càlcul de la pressió de disseny també es troba a la mateixa font bibliogràfica:

Equació 12

$$P_{disseny}(psi) = P_{operació}(psi) \cdot \left(1 + \frac{A}{100}\right) + B$$

On :

- A i B són paràmetres que depenen de la temperatura.

En el cas del primer reactor els valors utilitzats són -100 i 50 respectivament. Si es substitueixen dins l'equació s'acaba obtenint:

$$P_{disseny} = 22,05 \text{ } psi \cdot \left(1 + \frac{-100}{100}\right) + 50 = 1102,5 \text{ } psi$$

$$1102,5 \text{ } psi \approx 75 \text{ } atm$$

Seguidament es procedeix al càlcul del espessor del cos del reactor tot acomplint la normativa ASME⁷, l'expressió és referia a les exigències per poder suportar les tensions tangencials:

Equació 13

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P}$$

On:

- P és la pressió de disseny (psi).
- R és el radi intern (in).
- S és la tensió màxima admissible del material.
- E és l'eficiència de la junta de soldadura, normalment per metalls pren el valor de 0'85.

Substituint els valors:

$$t = \frac{1102,5 \cdot 3,96}{2,8 \cdot 10^4 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 1102,5} = 1,89 \cdot 10^{-1} in$$

$$1,89 \cdot 10^{-1} in \approx 4,80 mm$$

Es calcula també quin seria el gruix per la tensió longitudinal. El valor que sigui superior dels dos serà el gruix que s'escollirà per utilitzar en el disseny de la virola.

Equació 14

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E \cdot 2 + 0,4 \cdot P}$$

$$t = \frac{1102,5 \cdot 3,96}{2,8 \cdot 10^4 \cdot 0,85 \cdot 2 + 0,4 \cdot 1102,5} = 1,56 \cdot 10^{-1} in$$

$$1,56 \cdot 10^{-1} in \approx 4,03 mm$$

Com és superior el valor obtingut del espessor per la tensió tangencial, s'escull el valor de 4,80 mm. A aquets 4,8 mm s'afegeixen espessors de seguretat. Tenint en compte la velocitat per corrosió que és de $1,1 \cdot 10^{-2}$ mm/any⁸, la vida útil que rondarà els 20 anys o els defectes de construcció que serà un 10% del gruix calculat.

Per tant, afegint aquest espessors de seguretat i sobredimensionar un 50%, el gruix de treball serà de 9 mm.

11.3.3.2 Disseny de fons i capçal: Klopper

Les geometries escollides tant per als capçals com per al fons dels tres reactors són tipus Klopper. Que son capçals que per a pressions moderades i si existeix restriccions d'espai tenen una forma menys bombada fent que l'alçada sigui inferior.

Per saber l'espessor s'utilitzarà la següent expressió per fons Klopper:

Equació 15

$$t = \frac{0,885 \cdot P \cdot D}{S \cdot E \cdot 2 - 0,1 \cdot P}$$

$$t = \frac{0,885 \cdot 1102,5 \cdot 7,93}{2,8 \cdot 10^4 \cdot 0,85 - 0,1 \cdot 1102,5} = 9,23 \cdot 10^{-2} in$$

$$9,23 \cdot 10^{-2} in \approx 2,34 mm$$

El gruix de primera aproximació és de 2,34 mm que si apliquem les mateixes restriccions aquest ascendeix a 4,20 mm. No obstant, per facilitar el disseny s'ha optat per escollir l'espessor major entre la virola i els capçals, per tant per aquest primer reactor, el gruix serà de 9 mm.

Una vegada sabut el valor del gruix s'ha fet ús de la calculadora de fons Klopper segons DIN 28011 de la empresa HOLFASA⁹ per tal de conèixer les dimensions. Es considera que el fons tipo Klopper té la següent forma :

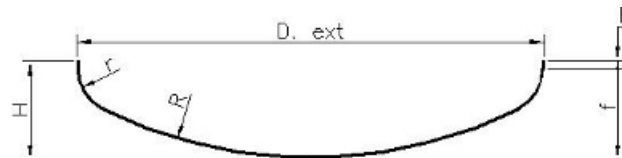


Figura 1: fons tipus Klopper

Per tant, amb ajuda de la calculadora, aquest valors els següents valors que s'indiquen a la següent taula juntament amb els altres dos reactors.

Finalment s'exposa la taula resum de totes les característiques constructives dels reactors:

Taula 14: taula resum

	Reactor 1 (RE-1001)	Reactor 2 (RE-1101)	Reactor 3 (RE-1102)
	Característiques general		
Diàmetre (mm)	2000	3000	3000
Alçada (mm)	4500	5500	5500
Volum (m3)	16	33	31
	Virola		
Material	316 L	316 L	316 L
Temperatura d'operació (°C)	55	80	80
Temperatura de disseny (°C)	121,11	121,11	121,11
Pressió d'operació (atm)	1,5	1,5	1,5
Pressió de disseny (atm)	75	75	75
Gruix (mm)	9	18	17,5
	Capçal i fons		
Material	316 L	316 L	316 L
Diàmetre extern (mm)	2014	3000	3000
Gruix (mm)	9	18	17,5
R (mm)	2014	2500	2500
250r (mm)	201,4	250	250
Alçada H (mm)	423	550	553
Volum (L)	797	1501,8	1499
Pes (kg)	271	885	889

11.3.3 Pes dels reactors

En aquest apartat es realitzen els càlculs per al reactor buit i pel reactor ja en operació.

En el càlcul del pes de la virola:

Equació 16

$$V_{int} = L \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{int}^2 = 14,02 \text{ m}^3$$

$$V_{ext} = L \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{ext}^2 = 14,14 \text{ m}^3$$

On s'obté una diferència del 0,8%.

En els capçals el volum és de 648 L.

Per tant, el volum total és:

$$V = V_{virola} + 2 \cdot V_{capçal} = 115,07 \text{ L} + 2 \cdot 648 \text{ L} = 1412,63 \text{ L}$$

I si es calcula el pes total buit del reactor:

Equació 17

$$Pes \text{ buit (kg)} = V \cdot \rho$$

On:

- V és el volum útil del reactor (m^3).
- ρ és la densitat del material (7800 kg/m^3).

$$Pes \text{ buit (kg)} = 11.018,50 \text{ kg}$$

Si el que es vol conèixer el volum d'operació, s'utilitzarà l'eina Hysys per trobar el valor de la viscositat de la mescla al reactor.

Equació 18

$$Pes \text{ operació (kg)} = Pes \text{ buit} + V \cdot \rho$$

$$Pes\ operació\ (kg) = 11.018,5 + 17 \cdot 893,11 = 30.287,62\ kg$$

A la taula següent es mostren els pesos en buit i els d'operació dels tres reactors:

Taula 15: taula resum dels pesos dels reactors

	Reactor 1 (RE-1001)	Reactor 2 (RE-1101)	Reactor 3 (RE-1102)
Pes buit(mm)	11.018,50	34.345	33.021,14
Pes operació (kg)	30.287,62	61.046,74	56.948,86

11.3.4 Calor de reacció i refrigeració

Per dur a terme el càlcul de la calor de reacció s'han utilitzat el valor de les entalpies de formació proporcionades pel programa Hysys. Els valors de les entalpies es troben a la següent taula:

Taula 16: taula recull d'entalpies de formació

	ΔH_f (kJ/kmol)
Bisfenol	$-2,45 \cdot 10^5$
Epiclorhidrina	$-2,50 \cdot 10^5$
BTMAC	$-3,39 \cdot 10^5$
Aigua	$-2,42 \cdot 10^5$
Alfa bis	$-7,55 \cdot 10^5$
1,3-dicloro-2-propanol	$-2,36 \cdot 10^5$
Metil isobutil cetona	$-2,84 \cdot 10^5$
Hidròxid de sodi	$-4,26 \cdot 10^5$
Clorur de sodi	$-7,35 \cdot 10^5$
BADGE	$-6,22 \cdot 10^5$

A partir d'aquí el calor de reacció es calcula:

Equació 19

$$Q = \text{mols generats} \cdot \Delta H - \text{mols consumits} \cdot \Delta H$$

Utilitzant aquest equació, pel reactor 1 (RE-1001) donaria una calor de $9,74 \cdot 10^4$ kJ, que si es te en compte que aquesta primera reacció es dona en 2 hores:

$$\text{temps} = 2 \text{ h} = 7200 \text{ s}$$

$$Q = \frac{9,74 \cdot 10^4 \text{ kJ}}{7200 \text{ s}} = 13'59 \text{ kW}$$

Veient aquest resultat, es pot considerar que la reacció que es dona a aquest primer reactor és endotèrmica i caldrà escalfar el reactor perquè es doni correctament.

Una vegada conegut la calor de reacció es procedeix a calcular el coeficient global de transmissió de calor, on s'utilitza els factor d'embrutiment típics de l'aigua ($5565 \text{ W/m}^2\text{°C}$) i el coeficient individual de la mescla i aigua refrigerant.

Equació 20

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x}{k_m} + \frac{1}{h_e}$$

On:

- U és el coeficient global de transferència. ($\text{W/m}^2\text{h}\cdot\text{°C}$)
- Δx és el gruix de la paret. (m)
- h són els coeficients d'embrutiment. ($\text{W/m}^2\text{°C}$)
- k_m és la conductivitat tèrmica del material. ($\text{kcal/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$)

Tenint en compte que el gruix del primer reactor és de 9 mm, substituint tot els valor, el coeficient global de transferència és de $45,26 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$.

Amb l'objectiu de calcular el cabal que es necessita per escalfar el reactor, serà necessari primerament calcular l'increment de temperatura mitjana logarítmica utilitzant la següent equació:

Equació 21

$$\Delta T_{ml} = \frac{T_s - T_e}{\ln\left(\frac{T_r - T_e}{T_r - T_{es}}\right)}$$

On:

- T_e és la temperatura d'entrada del refrigerant.
- T_s és la temperatura de sortida del refrigerant.
- T_r és la temperatura d'operació.

En aquest cas s'ha decidit utilitzar com substància escalfant el vapor d'aigua, ja que es tracta d'una reacció endotèrmica. Per aquest motiu el vapor entrarà a una temperatura de 140 °C i sortirà a 90 °C, i la reacció es donarà a 50 °C.

$$\Delta T_{ml} = \frac{90 - 140}{\ln\left(\frac{55 - 140}{140 - 90}\right)} = 56,35$$

Una vegada obtinguts aquest primers valors, és pot calcular l'àrea de bescanvi necessària.

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}$$

On:

- U és el coeficient global de transferència de calor ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$).
- Q és la calor generada (kcal/h).
- A és l'àrea d'intercanvi (m^2).
- ΔT_{ml} és la temperatura mitjana logarítmica.

Substituint els valors, l'àrea necessària d'intercanvi per aquest primer reactor és de 5'33 m^2 .

El següent pas i últim es calcular el cabal de refrigeració o escalfament necessari per mantenir constant la temperatura dins del reactor.

$$Q = W \cdot Cp \cdot \Delta T$$

On:

- Q és la calor generada (kcal/h).
- ΔT és la diferencia de temperatures ($^{\circ}\text{C}$).
- C_p és la calor específica del vapor (kcal/kg $\cdot^{\circ}\text{C}$)
- W cabal màssic de vapor (kg/h).

El calor específic del vapor és de 512'1 kcal/kg $^{\circ}\text{C}$. I substituint les dades, el calor necessari per escalfar el reactor és de 22'86 kg/h i per aconseguir-ho serà convenient l'ús d'una caldera.

A la següent taula es mostren els valors per als tres reactors dels càlculs fets anteriorment:

Taula 17: taula resum del calor de reacció i refrigeració

	Reactor 1 (RE-1001)	Reactor 2 (RE-1101)	Reactor 3 (RE-1102)
Calor (kW)	13,59	-251,4	-141,5
Tipus de reacció	Endotèrmica	Exotèrmica	Exotèrmica
U (W/m ² ·h· $^{\circ}\text{C}$)	45,26	45,18	45,18
Escalfador/refrigerant	Vapor	50% etilenglicol en aigua	50% etilenglicol en aigua
T entrada ($^{\circ}\text{C}$)	140	-14	-14
T sortida ($^{\circ}\text{C}$)	90	-5	-5
Àrea necessària (m ²)	5,33	60,29	34,85
Cabal refrigerant (kg/h)	22,86	18.297,81	15.455

Tenint en compte que l'àrea necessària per al segon reactor és molt gran, s'utilitzaran pantalles deflectores per a tenir una millor refrigeració.

11.3.5 Disseny de pantalles deflectores

Per al segon reactor són necessàries pantalles deflectores, per tant, en aquest apartat es dimensionaran. Aquestes pantalles consisteixen en tubs o pantalles buides sostingudes en les parets internes del reactor i tenen dos funcions, la primera trencar el vòrtex que es pugui formar per l'agitació i la segona millorar la refrigeració interna.

A continuació es determinaran el número de pantalles i la separació entre elles.

- El espaiat entre pantalles òptim és entre 0,3 i 0,5 vegades el diàmetre de carcassa. Per aquest motiu s'ha escollit el valor de 0,4.

Equació 22

$$l_B = 0,4 \cdot D = 1,2 \text{ m}$$

- El baffle cut, és l'espaiat que existeix entre pantalla i carcassa. El rang òptim és entre 20 i el 25% del diàmetre intern. És per aquest motiu que s'ha escollit 22,5%.

Equació 23

$$\text{baffle cut} = 0,225 \cdot D = 0,75 \text{ m}$$

Amb aquest valors obtingut, és calculen el nombre de pantalles deflectores:

Equació 24

$$N = \frac{L}{l_B} - 1 = 3,6 \approx 4 \text{ pantalles}$$

L'alçada d'aquest serà la totalitat del cos cilíndric i la amplada serà de 250 mm.

11.3.6 Disseny de mitja canya

En aquest apartat es calcularà el nombre de voltes necessari per tal de refrigerar o escalfar els reactors del procés. Es suposa que la velocitat normal del refrigerant/escalfador és de 1,22 m/s, a partir d'aquí és pot calcular l'àrea de la mitja canya.

Equació 25

$$S = \frac{W}{v}$$

On:

- W és el cabal del refrigerant /Escalfador (m^3/s)
- V és la velocitat de circulació (m/s).
- S és la secció hidràulica(m^2)

$$S = \frac{6,35 \cdot 10^{-6}}{1,22} = 5,23 \cdot 10^{-6} m^2$$

Una vegada sabuda l'àrea de pas és passa a calcular el diàmetre intern de la mitja canya.

Equació 26

$$D_i = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S}{\pi}} = 3,64 \text{ cm}$$

Una vegada coneguda l'àrea requerida i el diàmetre intern de la mitja canya es calcula la longitud necessària:

Equació 27

$$L = \frac{A}{D_i}$$

On:

- L és la longitud de la mitja canya (m)
- Di és el diàmetre intern (m)
- A és l'àrea d'intercanvi (m^2)

Si es sap la longitud, ja es pot saber quin és el nombre de voltes necessàries.

Equació 28

$$N = \frac{L}{\pi \cdot D_e}$$

On:

- L és la longitud de la mitja canya (m)
- De és el diàmetre exterior del reactor (m)
- N el nombre de voltes necessari.

Les dades de les necessitats de la mitja canya es troben en la següent taula:

Taula 18: taula resum del disseny de la mitja canya

	Reactor 1 (RE-1001)	Reactor 2 (RE-1101)	Reactor 3 (RE-1102)
Cabal refrigerant (kg/h)	22,86	18.297,81	15.455
Superfície d'intercanvi (m ²)	27,84	44,15	41,63
Diàmetre intern (cm)	3,64	10,30	9,42
Longitud (m)	146,38	585,35	368,17
Nombre de voltes	23	70	45

11.3.7 Aïllament

Els reactors de la companyia Epoharz treballen a una temperatura constata de 55 i 80°C. Per tant, és molt important que la temperatura dins del reactor no experimenti alteracions que puguin comportar un error en la reacció que es dona a terme.

No només és important que no hi hagi una alteració en la reacció sinó també cal que la seguretat dels treballadors sigui l'adient, per aquest motiu l'aïllament és un element clau en el disseny del reactor.

El material escollit és la llana de roca del proveïdor Rockwool¹⁰, que és un subministrador d'aïllants tèrmics. A més, també afegir un aïllant és una bona opció per evitar la contaminació acústica que pugui sorgir. La llana escollida pels tres reactors és la Rockwool-133, les característiques són les següents:

Taula 19: característiques de la llana de roca Rockwool-133

Rockwool 133	
Tipus	Filtre de llana de roca
Densitat (kg/m ³)	37
Temperatura màxima de treball (°C)	250
Revestiment	alumini
Gruix (mm)	1300

11.3.8 Boca d'home

Per dur a terme les tasques de manteniment es disposarà d'una boca d'home que doni accés als operaris quan la producció estigui parada.

A cadascun dels reactors s'instal·larà la boca d'home als seus respectiu capçals. Seran dissenyats sense frontissa i amb dos manetes de 600 mm de diàmetre i podrà suportar pressions fins a casi 10 atmosferes.

Per poder arribar a aquesta boca s'instal·larà com a extra unes escales envoltant tot el cos cilíndric, les quals han de ser metàl·liques i els esglaons serà de reixa i material antilliscant.

A més, no només servirà com a manteniment, sinó que serà la boca d'entrada del BPA com a reactiu en el primer reactor, ja que entra en forma sòlida. Entrarà BPA sòlid que serà transportat al reactor amb big-bags, una vegada tota la quantitat necessària es segellarà l'entrada a la perfecció i es començarà a entrar els reactius líquids ja calents.

11.3.9 Agitador

Un dels elements més important és l'agitador, ja que es necessita que la mescla estigui perfectament agitada i homogènia. En primera instància s'utilitzaran les correlacions d'aspecte típiques per dissenyar i determinar les dimensions de les turbines¹¹.

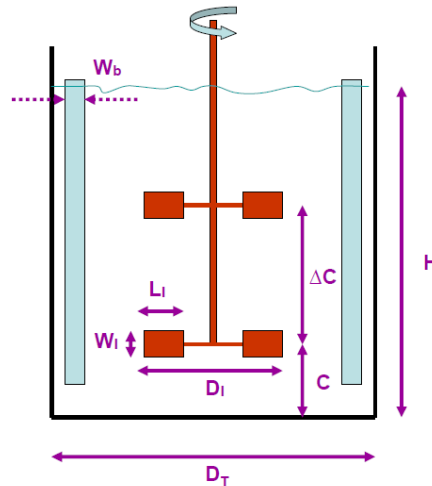


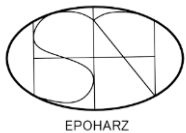
Figura 2: nomenclatura del tanc i l'agitador

Les correlacions utilitzades són les següents:

Taula 20: taula de correlacions de disseny de turbines

$\frac{D_I}{D_T} = 0,3$	$\frac{C}{D_T} = 0,35$
$\frac{\Delta C}{D_T} = 0,5$	$\frac{L_I}{D_T} = 0,25$
$\frac{W_I}{D_T} = 0,2$	

Aquestes correlacions seran utilitzades pels agitadors del primer i segon reactor. Una vegada calculades aquestes mesures i tenint en compte que la mescla té certa viscositat, utilitzar el model d'agitador de la sèrie VPS3 de la empresa FLUIDMIX¹². Aquest constarà de dos turbines amb 3 aspes tipus S cadascuna. Com es treballa amb substàncies amb alt grau de inflamabilitat aquest agitador consta d'un motor ATEX i dissenyat amb material AISI 316L.



EPOHARZ

En el cas del tercer reactor és necessari un agitador que abasti tota la virola degut a la alta viscositat que conte la mescla final. El model escollit és un agitador tipus àncora VTRR de la mateixa empresa FLUIDMIX¹³. És caracteritza per ser un tipus d'agitador que s'adapta al tanc i arrastra tot el que pugui quedar enganxat a la virola, inclòs se li podria afegir un sistema de rascadors si fos necessari. En aquest cas també consta d'un motor ATEX i el material utilitzat és el AISI 316L.

11.4 Disseny dels tancs d'emmagatzematge

Les zones d'emmagatzematge de la instal·lacions de la planta van dirigides a la conservació de reactius i productes. En el procés de producció de la resina epoxy, hi ha tres reactius emmagatzemats en tancs els quals són l'epiclorhidrina (ECH), el metil isobutil cetona (MIBK) i el NaOH al 18%, i pel que fa als productes emmagatzemats son l'ECH recuperada, el 1,3-dicloro-2-propanol (DCP), el MIBK recuperat i la resina epoxy final.

Per al disseny i càlcul dels tancs d'emmagatzematge de la planta s'ha seguit punt a punt totes les consideracions del codi API 650¹⁷ degut a que dins de l'abast d'aquest codi es troben inclosos aquells tancs en els quals s'emmagatzemen fluids líquids dissenyats per suportar una pressió d'operació atmosfèrica.

A més a més, és imprescindible seguir el reglament d'emmagatzematge de productes químics (APQ) ja comentats en el Capítol 5: Seguretat i higiene. Concretament, degut a que els reactius i productes a emmagatzemar són inflamables i combustibles i tòxics, s'ha de complir la normativa ITC-MIE-APQ-1¹⁴, que determina l'emmagatzematge de líquids inflamables i combustibles i en addició s'ha de complir la normativa ITC-MIE-APQ-7¹⁵, que determina d'emmagatzematge de líquids tòxics.

Segons l'article 4 de la normativa APQ-1, l'EPH i el MIBK pertanyen a la Classe B degut a que són productes el punt d'inflamació dels quals és inferior a 55 °C i no estan compresos a la classe A. Com ambdós tenen un punt d'inflamació inferior a 38°C, es trobarien dins de la Subclasse B1. Amb referència al DCP i la resina epoxy final, es trobarien a la classe C ja que són productes el punt d'inflamació dels quals està comprès entre 55°C i 100°C.

S'utilitzarà el disseny del tanc d'emmagatzematge d'ECH com a exemple de càlcul. S'ha seguit el mateix procediment per al disseny de tots els tancs.

11.4.1 Tanc d'emmagatzematge d'epiclorhidrina

Els tancs d'ECH són equips cilíndrics que operen a pressió atmosfèrica i 20°C. Aquests no compten amb agitació.

11.4.1.1 Volum emmagatzemat i volum de cada tanc

L'ECH és alimentada al procés amb una puresa del 100%, per tant, es realitza un càlcul previ de la quantitat d'ECH que es gastarà en tres dies.

$$V_{ECH} = 15,82 \frac{m^3}{lot} \cdot 6 \frac{lots}{dia} \cdot 3 dies = 284,7 m^3 ECH$$

Aquests 284,7 m³, corresponen a l'EPH total que es necessita pel procés productiu. S'ha de tenir en compte que una part d'aquesta EPH es recupera, per tant, per saber la quantitat d'ECH nova que requereix Epoharz, es fan els següents càlculs.

$$10,66 \frac{m^3 ECH_R}{1 lot} \cdot \frac{6 lots}{1 dia} \cdot 3 dies = 191,81 m^3 ECH_R$$

$$284,7 m^3 ECH - 191,81 m^3 ECH_R = 92,9 m^3 ECH_N$$

On:

- ECH_R = ECH recuperada.
- ECH_N = ECH nova.

Per tant, per tenir reserva per tres dies s'han d'emmagatzemar 92,9 m³ d'ECH nova. S'utilitzaran 3 tancs pel seu emmagatzematge i per qüestions de seguretat, s'aplica un sobredimensionament del 20% al volum. Aleshores, el volum total que han de poder contenir tots els tancs és el següent.

$$V_{ECH_N} = \frac{92,9 m^3}{3 tancs} \cdot 1,2 = 37,16 m^3$$

El volum del tanc d'ECH és de 37,16 m³.

11.4.1.2 Diàmetre intern i altura del tanc

Un cop conegut el volum total del tanc, es procedeix a calcular l'altura i el diàmetre intern de cada tanc. La forma de cada tanc és de configuració cilíndrica amb dos capçals als seus extrems. S'escull una relació altura/diàmetre (H/D) d'1,5 respecte al cilindre.

Equació 29

$$V_{ECHN} = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot D_I^2$$

On:

- V_{ECH} = volum del tanc (m^3).
- H = altura del tanc (m).
- D_I = diàmetre intern del tanc (m).

Amb el que s'obté la següent formula per calcular el diàmetre del tanc.

Equació 30

$$D_I = \sqrt[3]{\frac{V_{ECHN} \cdot 4}{1,5 \cdot \pi}}$$

$$D_I = \sqrt[3]{\frac{37,16 \cdot 4}{1,5 \cdot \pi}} = 3,159 \text{ m}$$

$$H = 1,5 \cdot 3,159 = 4,74 \text{ m}$$

El diàmetre intern del tanc d'ECH és de 3,159 m i l'altura de 4,74 m.

11.4.1.3 Pressió de disseny

La pressió de disseny és calculada mitjançant la suma de la pressió d'operació i la pressió hidrostàtica per saber la pressió total que pot suportar el tanc.

Equació 31

$$P_d = 1,15 \cdot (P_{op} + P_h)$$

On:

- P_d = pressió de disseny (atm).
- P_{op} = pressió d'operació (atm).
- P_h = pressió hidrostàtica (atm).

La pressió hidrostàtica és la pressió que ve donada pels pes del fluid en repòs. En aquest cas s'ha realitzat un sobredimensionament del 15% per a que el tanc tingui la resistència suficient.

Equació 32

$$P_h = \rho_{ECH} \cdot g \cdot H$$

On:

- ρ_{ECH} = densitat de l'epiclorhidrina (kg/m^3).
- g = força de la gravetat (m/s^2).
- H = altura del tanc (m).

$$P_h = \rho_{ECH} \cdot g \cdot H = 1186 \cdot 9,8 \cdot 4,74 = 55084,4 \text{ Pa} = 0,54 \text{ atm}$$

$$P_d = 1,15 \cdot (P_{op} + P_h) = 1,15 \cdot (1 + 0,54) = 1,78 \text{ atm}$$

La pressió de disseny del tanc d'ECH és de 1,78 atm.

11.4.1.4 Temperatura de disseny

La temperatura de disseny es calcula tenint en compte que l'emmagatzematge es realitza a 20°C. De la mateixa manera que es sobredimensiona l'equip a efectes de pressió, es realitza el mateix a efectes de temperatura. La temperatura d'operació és la temperatura a la que estarà el tanc d'emmagatzematge, és a dir, la temperatura d'operació del tanc. Per tant, la temperatura de disseny serà superior a la temperatura d'operació.

Equació 33

$$T_d = T_{op} + 15^\circ\text{C}$$

On:

- T_d = temperatura de disseny (°C).
- T_{op} = temperatura d'operació (°C).

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

La temperatura de disseny del tanc d'ECH és de 35°C.

11.4.1.5 Espessor del tanc

Per al càlcul de l'espessor del tanc, s'ha utilitzat el formulari del codi ASME Section VIII Division 1¹⁶.

Per l'espessor del cos cilíndric es calcula mitjançant l'esforç tangencial que exerceix el fluid sobre la paret del tanc.

Equació 34

$$t_c = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P}$$

On:

- t_c = espessor tanc (mm).
- P = pressió interna de disseny (atm).
- R = radi intern (mm).
- S = tensió màxima admissible (atm).
- E = factor de soldadura.

El límit elàstic S , és la tensió màxima a la que es pot sotmetre el material sense possibles deformacions permanents. Aquest és diferent per cada material, en aquest cas cal utilitzar acer inoxidable 316L, en el codi ASME¹⁶ la tensió màxima per aquest material és de 1136,37 atm.

El factor E de soldadura permet tenir en compte el possible error que pugui contenir el límit elàstic, és a dir, dimensiona el tanc en termes de tensió per assegurar que aquest no es deformi. En aquest cas, el valor és de 0,85.

$$t_c = \frac{1,78 \text{ atm} \cdot 1580 \text{ mm}}{1136,37 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 1,78} = 2,9 \text{ mm}$$

Es sobredimensiona el valor de l'espessor del cilindre en un 50%.

$$t_c = 2,9 \cdot 1,5 = 4,36 \text{ mm}$$

Per calcular l'espessor del capçal, primer s'ha d'escollir el tipus. En aquest cas, s'ha escollit un capçal torisfèric. A la següent figura es mostren les dimensions d'aquest capçal segons l'ASME¹⁶.

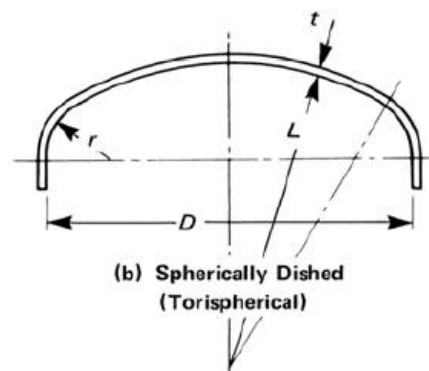


Figura 3: Espessor del capçal torisfèric

La fórmula per calcular l'espessor del capçal és la següent.

$$t_t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P}$$

On:

- t_t = espessor del capçal del tanc (mm).
- P= pressió interna de disseny (atm).
- L= radi de la corona (mm).
- M= factor característic.
- S= tensió màxima admissible (atm).
- E= factor de soldadura.

Amb la taula UG-37 de l'ASME¹⁶, es pot calcular el radi de la corona, tenint en compte que K_1 és igual a 0,9.

Taula 21: Valor de la K_1

$D/2h$	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
K_1	1.36	1.27	1.18	1.08	0.99	0.90	0.81	0.73	0.65	0.57	0.50

GENERAL NOTES:
 (a) Equivalent spherical radius = $K_1 D$; $D/2h$ = axis ratio.
 (b) For definitions, see 1-4(b).
 (c) Interpolation permitted for intermediate values.

Equació 35

$$L = 0,9 \cdot D$$

Equació 36

$$r = 0,085 \cdot L$$

$$L = 0,9 \cdot D = 0,9 \cdot 3159 = 2843,6 \text{ mm}$$

$$r = 0,085 \cdot 2843,6 = 241,7 \text{ mm}$$

Un cop calculat el radi de la corona i el radi intern de la curvatura dels costats, es calcula la relació L/r per a poder trobar el factor característic M .

$$\frac{L}{r} = \frac{2843,6}{241,7} = 11,76$$

Per al trobar el factor característic M , s'utilitza la taula 1-4.2 de l'ASME¹⁶. La relació L/r de 11,76 no es troba a la taula, per tant, tal i com s'indica a la taula, s'agafa el valor més pròxim, en aquest cas, 12.

Taula 22: Valors del factor M

L/r	1.0	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22
L/r	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0
M	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50
L/r	9.5	10.00	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16 $\frac{2}{3}$ [Note (1)]
M	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77

GENERAL NOTE: Use nearest value of L/r ; interpolation unnecessary.

NOTE:
(1) Maximum ratio allowed by UG-32(i) when L equals the outside diameter of the skirt of the head.

Per una relació L/r de 12, el valor del factor M correspon a 1,62.

$$t_t = \frac{1,78 \text{ atm} \cdot 2843,6 \text{ mm} \cdot 1,62}{2 \cdot 1136,37 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 1,78 \text{ atm}} = 4,23 \text{ mm}$$

Es sobredimensiona el valor de l'espessor del capçal en un 50%.

$$t_t = 4,23 \cdot 1,5 = 6,35 \text{ mm}$$

L'espessor del cilindre del tanc d'ECH és de 4,36 mm i l'espessor del capçal del tanc d'ECH és de 6,35 mm. L'espessor de l'equip serà el valor més elevat entre l'espessor del cilindre i del capçal. En aquest cas l'espessor de l'equip és 6,35 mm.

Com el fons i el capçal del cilindre són toriesfèrics es calcula les seves variables segons el model Klover.

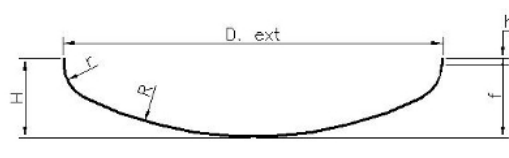
Equació 37

$$D_E = D_I + 2 \cdot t_c$$

$$D_E = 3159 \text{ mm} + 2 \cdot 4,36 \text{ mm} = 3165,4 \text{ mm}$$

Un cop obtinguts el valor del diàmetre extern i de l'espessor, s'utilitza la calculadora per dimensionar un fons toriesfèric tipus Klover segons el DIN-2011. de l'empresa HORFASA⁹.

Taula 23: Calculadora de fons Klopper

Calculadora de fondos KLOPPER		
Diametro exterior (mm)	3165.4	
Espesor (mm)	6.35	
 <p>fondo Torisferico Tipo KLOPPER</p>		
Diametro disco (mm)	3549	<input type="button" value="Calcular"/>
R (mm)	3165.4	
r (mm)	316.54	
h (mm) >=	22.224999999	
f (mm)	610	
H (mm)	639	
V (sin h) (litros)	3133.6	
Peso (h minima) (kg)	503	
<small>HORFASA no se responsabiliza de la precision de estas medidas.</small>		

Per tant, el volum del fons Klopper és de 3133,6 L, és a dir, 3,13 m³.

11.4.1.6 Volum de l'equip

Per poder calcular el volum total de l'equip calculem volum el pes del cilindre.

Equació 38

$$V_{equip} = V_{cil} + V_{cap} + V_{fons}$$

Equació 39

$$V_{cil} = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot D_I^2$$

$$V_{cil} = \frac{\pi}{4} \cdot 4,74 \cdot 3,159^2 = 37,16 \text{ m}^3$$

$$V_{equip} = 37,16 + (2 \cdot 3,13) = 43,43 \text{ m}^3$$

11.4.1.7 Pes de l'equip

Per calcular la massa de l'equip buit caldrà calcular la massa del cilindre i del fons i capçal toriesfèric.

$$M_{cil} = \pi \cdot H \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot \rho_{material}$$

$$M_{cil} = \pi \cdot 4,74 \cdot (3,165^2 - 3,159^2) \cdot 8030 = 4396 \text{ Kg}$$

Seguidament es calcula el pes del capçal mitjançant el volum d'una semiesfera. El pes del capçal i del fons seran el mateix.

$$M_{cap} = \frac{2}{3} \pi \cdot (D_{ext}^3 - D_{int}^3) \cdot \rho_{material}$$

$$M_{cap} = \frac{2}{3} \pi \cdot (3,165^3 - 3,159^3) \cdot 8030 = 2933,3 \text{ Kg}$$

$$M_{equip} = M_{cil} + 2 \cdot M_{cap}$$

$$M_{equip} = 4396 + 2 \cdot 2933,3 \text{ Kg} = 10262,6 \text{ Kg}$$

Per calcular la massa d'operació caldrà sumar la càrrega del tanc:

$$M_{op} = M_{equip} + (V_{fluid} \cdot \rho_{fluid})$$

$$M_{op} = 10262,6 + (37,16 \cdot 1186) = 54333 \text{ Kg}$$

11.4.1.8 Venteig

Segons la normativa ITC-MIE-APQ-1, hi ha dos sistemes de venteig, el normal i el d'emergència.

El normal fa referència a que tot recipient d'emmagatzematge ha de disposar de sistemes de ventilació per prevenir-ne la deformació com a conseqüència d'ompliments, buidatges o canvis de temperatura ambient.

Tindran com a mínim una mida igual a la major de les canonades de omplert o buidat i en cap cas inferiors a 35 mm de diàmetre interior.

El d'emergència fa al·lusió a que tot recipient d'emmagatzematge de superfície tindrà alguna forma constructiva o dispositiu que permeti alleujar l'excés de pressió interna causat per un foc exterior.

Equació 40

$$Cv = \frac{Q}{\lambda}$$

Equació 41

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

Equació 42

$$A = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot H$$

On:

- Cv = capacitat de ventilació (kg/h).
- Q = calor rebuda pel recipient (kJ/h).
- λ = calor latent de vaporització de la substància (kJ/kg).
- F = factor de reducció, en aquest cas és 0,5 degut a que la superfície humida és superior a 20 m².¹⁸
- A = superfície humida (m²).
- R = radi del tanc (m).
- H = altura del tanc (m).

$$A = 2 \cdot \pi \cdot 1,58 \cdot 4,74 = 47 \text{ m}^2$$

$$Q = 139,7 \cdot 0,5 \cdot 47^{0,82} \cdot 10^3 = 1642902 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$Cv = \frac{1642902}{1164,01} = 1411,4 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

11.4.1.9 Cubetes de retenció

Les cubetes de retenció són cavitats destinades a retenir els productes continguts en els elements d'emmagatzematge en cas d'abocament o fuga.

Els recipients de superfície per a emmagatzemaments de líquids inflamables i combustibles han de disposar d'una cubeta de retenció.

A totes les cubetes els recipients no han d'estar disposats en més de dues files. Cal que cada fila de recipients tingui un carrer o via d'accés adjacent que permeti la intervenció de la brigada de lluita contra incendis.

Segons la ITC-MIE-APQ-1, la distància en projecció horitzontal entre la paret del recipient i la vora interior inferior de la cubeta serà, com a mínim, d'1 metre, però segons la ITC-MIE-APQ-7 aquesta distància ha de ser d'1,5 metres, per tant s'han de seguir les pautes de la més restrictiva. La distància mínima entre els tancs d'una mateixa cubeta ha de ser d'un metre per a garantir un bon accés a aquests. A Epoharz s'ha decidit escollir una distància d'1,5 metres entre la paret del recipient i la vora interior inferior de la cubeta, i una distància entre tancs d'1 metre pels tancs d'ECH. A més a més s'ha de tenir en compte que les parets de la cubeta han de tenir una alçada màxima d'1,8 metres, respecte al nivell interior, per aconseguir una bona ventilació.

El volum de la cubeta ha de complir que aquest sigui superior al 100% del volum del tanc més gran i al 10% del volum de tots els tancs.

El fons de la cubeta tindrà un pendent de manera que tot el producte vessat escorri ràpidament cap a una zona de la cubeta el més allunyada possible de la projecció dels recipients, de les canonades i dels òrgans de comandament de la xarxa d'incendis.

Equació 43

$$A_{ocupada} = \frac{\pi}{4} \cdot N \cdot D_E^2$$

Equació 44

$$L_c = \frac{N}{2} \cdot D_E + \left(\frac{N}{2} - 1\right) \cdot d_t + 2 \cdot d_p$$

Equació 45

$$W_c = 2 \cdot D_E + 2 \cdot d_t$$

Equació 46

$$A_{lliure} = L_c \cdot W_c - A_{ocupada}$$

Equació 47

$$H_c = \frac{V_{ECHN}}{A_{lliure}}$$

Equació 48

$$V_c = L_c \cdot W_c \cdot H_c$$

On:

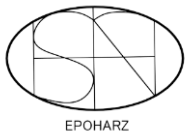
- $A_{ocupada}$ = àrea ocupada pels tancs (m^2).
- N = nombre de tancs.
- D_E = diàmetre extern dels tancs (m).
- L_c = longitud de la cubeta (m).
- d_t = distància entre els tancs (m).
- d_p = distància entre la paret del tanc i la cubeta (m).
- W_c = amplada de la cubeta (m).
- A_{lliure} = àrea lliure de la cubeta (m^2).
- H_c = Alçada de la cubeta (m).
- V = volum del tanc (m^3).
- V_c = volum cubeta (m^3).

$$A_{ocupada} = \frac{\pi}{4} \cdot 3 \cdot 3,165^2 = 23,6 \text{ m}^2$$

$$L_c = \frac{3}{2} \cdot 3,165 + \left(\frac{3}{2} - 1\right) \cdot 1 + 2 \cdot 1,5 = 8,25 \text{ m}$$

$$W_c = 2 \cdot 3,165 + 2 \cdot 1 = 9,83 \text{ m}$$

$$A_{lliure} = 8,25 \cdot 9,83 - 23,6 = 57,5 \text{ m}^2$$



$$H_c = \frac{37,16}{57,5} = 0,65 \text{ m}$$

$$V_c = 8,25 \cdot 9,83 \cdot 0,65 = 52,42 \text{ m}^3$$

La cubeta de retenció dels tancs d'ECH té una longitud de 8,25 m, una amplada de 9,83 m i una alçada de 0,65 m.

Comprovem que es compleixi que el volum de la sigui superior al 100% del volum del tanc més gran i al 10% del volum de tots els tancs.

$$V_c > V_t = V_{ECH_N} + (V_{ECH_N} \cdot N \cdot 0,1)$$

$$V_t = 37,16 + (37,16 \cdot 3 \cdot 0,1) = 48,3 \text{ m}^3$$

Per tant, es compleix que $V_c = 52,42 \text{ m}^3 > V_t = 48,3 \text{ m}^3$.

11.4.1.10 Taula resum de resultats

Taula 24: Disseny dels tancs TE-1601, TE-1602 i TE-1603

MATERIAL		ESPESSOR	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Espressor del cilindre	4,36 mm
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	K1	0,9
Factor de soldadura (E)	0,85	L/r	12
TEMPERATURA		M	1,62
Temperatura d'operació	20 °C	Espressor del capçal	6,35 mm
Temperatura de disseny	35 °C	DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
PRESSIÓ		Alçada del fons	0,639 m
Pressió d'operació	1 atm	Radi de la curvatura	0,317 m
Pressió hidrostàtica	0,54 atm	Diàmetre de la tapa	3,55 m
Pressió de disseny	1,78 atm	Volum del fons	3,13 m ³
TANC		Espressor	6,35 mm
Estoc	3 dies	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
Numero de tancs	3	Superfície humida	47 m ²
Volum per tanc	37,16 m ³	Calor rebuda pel recipient	1642902 kJ/h
Diàmetre intern	3,159 m	Calor latent	1164,01 kJ/kg
Diàmetre extern	3,165 m	Capacitat de ventilació	1441,4 kg/h
Alçada	4,74 m	DISTÀNCIA ENTRE INSTAL·LACIONS	
VOLUM DE L'EQUIP		Distància entre els tancs	1 m
Volum cilindre	37,16 m ³	Distància entre la paret del tanc i la cubeta	1,5 m
Volum capçal	3,13 m ³	CUBETES DE RETENCIÓ	
Volum equip	43,43 m ³	Àrea ocupada	23,6 m ²
PES DE L'EQUIP		Longitud cubeta	8,25 m
Pes del cilindre	4396 kg	Amplada cubeta	9,83 m
Pes del capçal	2933,3 kg	Àrea lliure	57,5 m ²
Pes equip	10262,6 kg	Alçada cubeta	0,65 m
Pes d'operació	54333 kg	Volum cubeta	52,42 m ²

11.4.2 Tanc d'emmagatzematge de MIBK

Els tancs de MIBK són equips cilíndrics que operen a pressió atmosfèrica i 20°C. Hi ha dos tancs i aquests no compten amb agitació. S'ha seguit el mateix procediment del punt 1.1 pel seu disseny. A continuació es mostra una taula resum amb els resultats obtinguts.

Taula 25: Disseny dels tancs TE-1604 i TE-1605

MATERIAL		ESPESSOR	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Espessor del cilindre	7,56 mm
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	K1	0,9
Factor de soldadura (E)	0,85	L/r	12
TEMPERATURA		M	1,62
Temperatura d'operació	20 °C	Espessor del capçal	11 mm
Temperatura de disseny	35 °C	DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
PRESSIÓ		Alçada del fons	1,013 m
Pressió d'operació	1 atm	Radi de la curvatura	0,526 m
Pressió hidrostàtica	0,61 atm	Diàmetre de la tapa	5,9 m
Pressió de disseny	1,85 atm	Volum del fons	14,37 m ³
TANC		Espessor	11 mm
Estoc	3 dies	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
Numero de tancs	2	Superfície humida	43,46 m ²
Volum per tanc	170,45 m ³	Calor rebuda pel recipient	3777963,25 kJ/h
Diàmetre intern	5,249 m	Calor latent	2835,5 kJ/kg
Diàmetre extern	5,259 m	Capacitat de ventilació	1332,4 kg/h
Alçada	7,87 m	DISTÀNCIA ENTRE INSTAL·LACIONS	
VOLUM DE L'EQUIP		Distància entre els tancs	2,75 m
Volum cilindre	170,45 m ³	Distància entre la paret del tanc i la cubeta	2,5 m
Volum capçal	14,37 m ³	CUBETES DE RETENCIÓ	
Volum equip	199,2 m ³	Àrea ocupada	43,46 m ²
PES DE L'EQUIP		Longitud cubeta	10,26 m
Pes del cilindre	21044,6 kg	Amplada cubeta	18,5 m
Pes del capçal	14043,2 kg	Àrea lliure	146,55 m ²
Pes equip	49131 kg	Alçada cubeta	1,16 m
Pes d'operació	185835,5 kg	Volum cubeta	221 m ²

11.4.3 Tanc d'emmagatzematge de NaOH 18%

El tanc de NaOH al 18% és un equip cilíndric que opera a pressió atmosfèrica i 20°C. Hi ha un tanc i aquest no compta amb agitació. S'ha seguit el mateix procediment del punt 1.1 pel disseny del tanc i posteriorment es mostrarà el disseny de l'agitador. A continuació es mostra una taula resum amb els resultats obtinguts.

Taula 26: Disseny del tanc TE-1606

MATERIAL		ESPESSOR	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Espessor del cilindre	3,38 mm
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	K1	0,9
Factor de soldadura (E)	0,85	L/r	12
TEMPERATURA		M	1,62
Temperatura d'operació	20 °C	Espessor del capçal	4,92 mm
Temperatura de disseny	35 °C	DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
PRESSIÓ		Alçada del fons	0,529 m
Pressió d'operació	1 atm	Radi de la curvatura	0,263 m
Pressió hidrostàtica	0,44 atm	Diàmetre de la tapa	2,9 m
Pressió de disseny	1,7 atm	Volum del fons	1,8 m ³
TANC		Espessor	4,92 mm
Estoc	3 dies	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
Numero de tancs	1	Superfície humida	32,5 m ²
Volum per tanc	21,3 m ³	Calor rebuda pel recipient	1213373,4 kJ/h
Diàmetre intern	2,626 m	Calor latent	167,36 kJ/kg
Diàmetre extern	2,63 m	Capacitat de ventilació	7250 kg/h
Alçada	3,94 m	DISTÀNCIA ENTRE INSTAL·LACIONS	
VOLUM DE L'EQUIP		Distància entre els tancs	-
Volum cilindre	21,3 m ³	Distància entre la paret del tanc i la cubeta	1,5 m
Volum capçal	1,55 m ³	CUBETES DE RETENCIÓ	
Volum equip	24,4 m ³	Àrea ocupada	5,44 m ²
PES DE L'EQUIP		Longitud cubeta	4,31 m
Pes del cilindre	2354,1 kg	Amplada cubeta	6,76 m
Pes del capçal	1570,7 kg	Àrea lliure	23,74 m ²
Pes equip	5495,6 kg	Alçada cubeta	0,9 m
Pes d'operació	30102,4 kg	Volum cubeta	26,2 m ²

11.4.4 Tanc d'emmagatzematge d'ECH recuperada

El tanc de ECH és un equip cilíndric que opera a pressió atmosfèrica i 20°C. Hi ha un tanc i aquest no compta amb agitació. S'ha seguit el mateix procediment del punt 1.1 pel seu disseny. A continuació es mostra una taula resum amb els resultats obtinguts.

Taula 27: Disseny del tanc TE-1409

MATERIAL		ESPESSOR	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Espessor del cilindre	6,1 mm
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	K1	0,9
Factor de soldadura (E)	0,85	L/r	12
TEMPERATURA		M	1,62
Temperatura d'operació	20 °C	Espessor del capçal	8,9 mm
Temperatura de disseny	35 °C	DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
PRESSIÓ		Alçada del fons	0,816 m
Pressió d'operació	1 atm	Radi de la curvatura	0,403 m
Pressió hidrostàtica	0,69 atm	Diàmetre de la tapa	4,5 m
Pressió de disseny	1,95 atm	Volum del fons	6,5 m ³
TANC		Espessor	8,9 mm
Estoc	1 dia	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
Numero de tancs	1	Superfície humida	76,3 m ²
Volum per tanc	76,7 m ³	Calor rebuda pel recipient	2441980 kJ/h
Diàmetre intern	4,02 m	Calor latent	1164 kJ/kg
Diàmetre extern	4,03 m	Capacitat de ventilació	2097,9 kg/h
Alçada	6 m	DISTÀNCIA ENTRE INSTAL·LACIONS	
VOLUM DE L'EQUIP		Distància entre els tancs	-
Volum cilindre	76,3 m ³	Distància entre la paret del tanc i la cubeta	2,5 m
Volum capçal	6,5 m ³	CUBETES DE RETENCIÓ	
Volum equip	89,7 m ³	Àrea ocupada	12,8 m ²
PES DE L'EQUIP		Longitud cubeta	7,02 m
Pes del cilindre	9952,5 kg	Amplada cubeta	10,56 m
Pes del capçal	6641,7 kg	Àrea lliure	61,3 m ²
Pes equip	23235,8 kg	Alçada cubeta	1,25 m
Pes d'operació	114230,9 kg	Volum cubeta	92,7 m ²

11.4.5 Tanc d'emmagatzematge de DCP

El tanc de DCP és un equip cilíndric que opera a pressió atmosfèrica i 20°C. Hi ha un tanc i aquest no compta amb agitació. S'ha seguit el mateix procediment del punt 1.1 pel seu disseny. A continuació es mostra una taula resum amb els resultats obtinguts.

Taula 28: Disseny del tanc TE-1410

MATERIAL		ESPESSOR	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Espessor del cilindre	5,26 mm
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	K1	0,9
Factor de soldadura (E)	0,85	L/r	12
TEMPERATURA		M	1,62
Temperatura d'operació	20 °C	Espessor del capçal	7,66 mm
Temperatura de disseny	35 °C	DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
PRESSIÓ		Alçada del fons	0,708 m
Pressió d'operació	1 atm	Radi de la curvatura	0,350 m
Pressió hidrostàtica	0,68 atm	Diàmetre de la tapa	3,93 m
Pressió de disseny	1,94 atm	Volum del fons	4,23 m ³
TANC		Espessor	7,66 mm
Estoc	3 dies	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
Numero de tancs	1	Superfície humida	57,5 m ²
Volum per tanc	50,2 m ³	Calor rebuda pel recipient	1936916 kJ/h
Diàmetre intern	3,493 m	Calor latent	1825,6 kJ/kg
Diàmetre extern	3,50 m	Capacitat de ventilació	1061 kg/h
Alçada	5,24 m	DISTÀNCIA ENTRE INSTAL·LACIONS	
VOLUM DE L'EQUIP		Distància entre els tancs	-
Volum cilindre	50,2 m ³	Distància entre la paret del tanc i la cubeta	2 m
Volum capçal	4,23 m ³	CUBETES DE RETENCIÓ	
Volum equip	58,7 m ³	Àrea ocupada	20,9 m ²
PES DE L'EQUIP		Longitud cubeta	5,75 m
Pes del cilindre	6484,7 kg	Amplada cubeta	9 m
Pes del capçal	4327,5 kg	Àrea lliure	42,1 m ²
Pes equip	15139,7 kg	Alçada cubeta	1,2 m
Pes d'operació	82983,04 kg	Volum cubeta	61,7 m ²

11.4.6 Tanc d'emmagatzematge de MIBK recuperat

Els tancs de MIBK són equips cilíndrics que operen a pressió atmosfèrica i 20°C. Hi ha dos tancs i aquests no compten amb agitació. S'ha seguit el mateix procediment del punt 1.1 pel seu disseny. A continuació es mostra una taula resum amb els resultats obtinguts.

Taula 29: Disseny dels tancs TE-1407 i TE-1408

MATERIAL		ESPESSOR	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Espessor del cilindre	4,63 mm
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	K1	0,9
Factor de soldadura (E)	0,85	L/r	12
TEMPERATURA		M	1,62
Temperatura d'operació	20 °C	Espessor del capçal	6,75 mm
Temperatura de disseny	35 °C	DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
PRESSIÓ		Alçada del fons	0,732 m
Pressió d'operació	1 atm	Radi de la curvatura	0,365 m
Pressió hidrostàtica	0,42 atm	Diàmetre de la tapa	4,1 m
Pressió de disseny	1,64 atm	Volum del fons	4,8 m ³
TANC		Espessor	6,75 mm
Estoc	1 dia	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
Numero de tancs	2	Superfície humida	62,4 m ²
Volum per tanc	56,8 m ³	Calor rebuda pel recipient	2072198,9 kJ/h
Diàmetre intern	3,64 m	Calor latent	2835,5 kJ/kg
Diàmetre extern	3,65 m	Capacitat de ventilació	730,8 kg/h
Alçada	5,46 m	DISTÀNCIA ENTRE INSTAL·LACIONS	
VOLUM DE L'EQUIP		Distància entre els tancs	1 m
Volum cilindre	56,8 m ³	Distància entre la paret del tanc i la cubeta	1,5 m
Volum capçal	4,8 m ³	CUBETES DE RETENCIÓ	
Volum equip	66,4 m ³	Àrea ocupada	20,9 m ²
PES DE L'EQUIP		Longitud cubeta	6,65 m
Pes del cilindre	6197,7 kg	Amplada cubeta	10,8 m
Pes del capçal	4135,3 kg	Àrea lliure	50,8 m ²
Pes equip	14468,2 kg	Alçada cubeta	1,12 m
Pes d'operació	60036,4 kg	Volum cubeta	80,1 m ²

11.4.7 Tanc d'emmagatzematge de la resina epoxy

Els tancs de resina epoxy són equips cilíndrics que operen a pressió atmosfèrica i 20°C. Hi ha sis tancs i aquests no compten amb agitació. S'ha seguit el mateix procediment del punt 1.1 pel seu disseny. A continuació es mostra una taula resum amb els resultats obtinguts.

Taula 30: Disseny dels tancs TE-1401, TE-1402, TE-1403, TE-1404, TE-1405 i TE-1406

MATERIAL		ESPESSOR	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Espessor del cilindre	3,42 mm
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	K1	0,9
Factor de soldadura (E)	0,85	L/r	12
TEMPERATURA		M	1,62
Temperatura d'operació	20 °C	Espessor del capçal	4,99 mm
Temperatura de disseny	35 °C	DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
PRESSIÓ		Alçada del fons	0,536 m
Pressió d'operació	1 atm	Radi de la curvatura	0,267 m
Pressió hidrostàtica	0,44 atm	Diàmetre de la tapa	2,99 m
Pressió de disseny	1,65 atm	Volum del fons	1,88 m ³
TANC		Espessor	4,99 mm
Estoc	3 dies	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
Numero de tancs	6	Superfície humida	33,5 m ²
Volum per tanc	22,3 m ³	Calor rebuda pel recipient	1242775,9 kJ/h
Diàmetre intern	2,665 m	Calor latent	1826 kJ/kg
Diàmetre extern	2,669 m	Capacitat de ventilació	680,6 kg/h
Alçada	4 m	DISTÀNCIA ENTRE INSTAL·LACIONS	
VOLUM DE L'EQUIP		Distància entre els tancs	1 m
Volum cilindre	22,3 m ³	Distància entre la paret del tanc i la cubeta	1,5 m
Volum capçal	1,88 m ³	CUBETES DE RETENCIÓ	
Volum equip	26 m ³	Àrea ocupada	33,6 m ²
PES DE L'EQUIP		Longitud cubeta	13 m
Pes del cilindre	2455,8 kg	Amplada cubeta	8,84 m
Pes del capçal	1638,6 kg	Àrea lliure	81,4 m ²
Pes equip	5733 kg	Alçada cubeta	0,33 m
Pes d'operació	30943,8 kg	Volum cubeta	37,8 m ²

11.5 Disseny dels tancs agitats

Els tancs agitats són una part necessària del procés tant per processar reactius com per poder operar en continu els evaporadors i la columna. Aquests tancs disposen d'agitadors degut a la gran importància de mantenir els corrents de reactius i producte uniformes i homogenis. Es disposen de quatre tancs agitats els quals es dissenyen a partir de tancs d'emmagatzematge estàndard afegint l'agitació mecànica.

El primer tanc agitat és primordial per a poder crear la mescla pertinent de BTMAC i aigua i així obtenir una concentració necessària pel procés de BTMAC del 60%. El segon mesclador es troba a la sortida del primer reactor per a homogeneïtzar la mescla que entrarà en continu al primer evaporador. El tercer recipient serveix per alimentar en continu la columna on es separen l'ECH i DCP. Finalment, el quart tanc agitat es troba a la sortida del tercer reactor i aquest alimenta en continu l'últim evaporador on s'obtindrà el producte final, és a dir la resina epoxy.

Tots els mescladors que intervenen al procés segueixen un disseny constructiu basat en el codi ASME¹⁶, el codi API 650 i les normatives ITC-MIE-APQ-1¹⁴ i ITC-MIE-APQ-7¹⁵.

S'utilitzarà el disseny del tanc agitat TA-1002 com a exemple de càlcul. S'ha seguit el mateix procediment per al disseny de tots els tancs.

11.5.1 Tanc agitat TA-1002

11.5.1.1 Volum emmagatzemat i volum de cada tanc

El corrent de sortida del RE-1001 que es vol fer entrar a l'evaporador EV-1001, conté BPA, ECH, H₂O, BACH i DCP. Es dissenya un tanc per a que es pugui acumular el volum d'un lot. Aquest volum correspon a 20,1 m³.

Per qüestions de seguretat, s'aplica un sobredimensionament del 20% al volum. Aleshores, el volum total que ha de poder contenir al tanc és el següent.

$$V = \frac{20,1 \text{ m}^3}{1 \text{ tanc}} \cdot 1,2 = 24,12 \text{ m}^3$$

El volum del tanc és de 24,12 m³.

11.5.1.2 Diàmetre intern i altura del tanc

Un cop conegut el volum total del tanc, es procedeix a calcular l'altura i el diàmetre intern de cada tanc. La forma de cada tanc és de configuració cilíndrica amb dos capçals als seus extrems. S'escull una relació altura/diàmetre (H/D) d'1,5 respecte al cilindre.

Equació 49

$$V_{ECHN} = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot D_I^2$$

On:

- V = volum del tanc (m³).
- H = altura del tanc (m).
- D_I = diàmetre intern del tanc (m).

Amb el que s'obté la següent formula per calcular el diàmetre del tanc.

Equació 50

$$D_I = \sqrt[3]{\frac{V \cdot 4}{1,5 \cdot \pi}}$$

$$D_I = \sqrt[3]{\frac{24,12 \cdot 4}{1,5 \cdot \pi}} = 2,736 \text{ m}$$

$$H = 1,5 \cdot 2,736 = 4,1 \text{ m}$$

El diàmetre intern del tanc és de 2,736 m i l'altura de 4,1 m.

11.5.1.3 Pressió de disseny

La pressió de disseny és calculada mitjançant la suma de la pressió d'operació i la pressió hidrostàtica per saber la pressió total que pot suportar el tanc.

Equació 51

$$P_d = 1,15 \cdot (P_{op} + P_h)$$

On:

- P_d = pressió de disseny (atm).
- P_{op} = pressió d'operació (atm).
- P_h = pressió hidrostàtica (atm).

La pressió hidrostàtica és la pressió que ve donada pels pes del fluid en repòs. En aquest cas s'ha realitzat un sobredimensionament del 15% per a que el tanc tingui la resistència suficient.

Equació 52

$$P_h = \rho_{ECH} \cdot g \cdot H$$

On:

- ρ_{ECH} = densitat de l'epiclorhidrina (kg/m^3).
- g = força de la gravetat (m/s^2).
- H = altura del tanc (m).

$$P_h = \rho_{ECH} \cdot g \cdot H = 1186 \cdot 9,8 \cdot 4,1 = 46362,2 \text{ Pa} = 0,46 \text{ atm}$$

$$P_d = 1,15 \cdot (P_{op} + P_h) = 1,15 \cdot (1 + 0,46) = 1,68 \text{ atm}$$

La pressió de disseny del tanc d'ECH és de 1,68 atm.

11.5.1.4 Temperatura de disseny

La temperatura de disseny es calcula tenint en compte que l'emmagatzematge es realitza a 20°C. De la mateixa manera que es sobredimensiona l'equip a efectes de pressió, es realitza el mateix a efectes de temperatura. La temperatura d'operació és la temperatura a la que estarà el tanc d'emmagatzematge, és a dir, la temperatura d'operació del tanc. Per tant, la temperatura de disseny serà superior a la temperatura d'operació.

Equació 53

$$T_d = T_{op} + 15^{\circ}C$$

On:

- T_d = temperatura de disseny (°C).
- T_{op} = temperatura d'operació (°C).

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

La temperatura de disseny del tanc d'ECH és de 35°C.

11.5.1.5 Espessor del tanc

Per al càlcul de l'espessor del tanc, s'ha utilitzat el formulari del codi ASME Section VIII Division 1¹⁶.

Per l'espessor del cos cilíndric es calcula mitjançant l'esforç tangencial que exerceix el fluid sobre la paret del tanc.

Equació 54

$$t_c = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P}$$

On:

- t_c = espessor tanc (mm).
- P = pressió interna de disseny (atm).

- R= radi intern (mm).
- S= tensió màxima admissible (atm).
- E= factor de soldadura.

El límit elàstic S, és la tensió màxima a la que es pot sotmetre el material sense possibles deformacions permanents. Aquest és diferent per cada material, en aquest cas cal utilitzar acer inoxidable 316L, en el codi ASME¹⁶ la tensió màxima per aquest material és de 1136,37 atm.

El factor E de soldadura permet tenir en compte el possible error que pugui contenir el límit elàstic, és a dir, dimensiona el tanc en termes de tensió per assegurar que aquest no es deformi. En aquest cas, el valor és de 0,85.

$$t_c = \frac{1,68 \text{ atm} \cdot 1367,9 \text{ mm}}{1367,9 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 1,68} = 2,38 \text{ mm}$$

Es sobredimensiona el valor de l'espessor del cilindre en un 50%.

$$t_c = 2,38 \cdot 1,5 = 3,57 \text{ mm}$$

Per calcular l'espessor del capçal, primer s'ha d'escollir el tipus. En aquest cas, s'ha escollit un capçal toriesfèric. A la següent figura es mostren les dimensions d'aquest capçal segons l'ASME¹⁶.

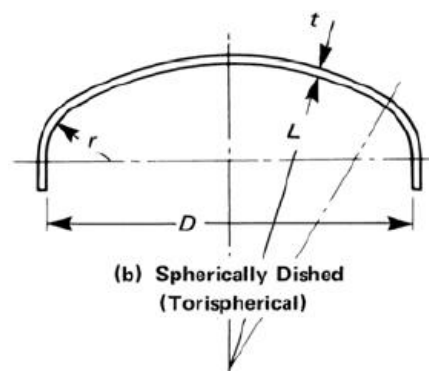


Figura 4: Espessor del capçal torisfèric

La fórmula per calcular l'espessor del capçal és la següent.

$$t_t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P}$$

On:

- t_t = espessor del capçal del tanc (mm).
- P = pressió interna de disseny (atm).
- L = radi de la corona (mm).
- M = factor característic.
- S = tensió màxima admissible (atm).
- E = factor de soldadura.

Amb la taula UG-37 de l'ASME¹⁶, es pot calcular el radi de la corona, tenint en compte que K_1 és igual a 0,9.

Taula 31: Valor de la K_1

$D/2h$	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
K_1	1.36	1.27	1.18	1.08	0.99	0.90	0.81	0.73	0.65	0.57	0.50

GENERAL NOTES:
 (a) Equivalent spherical radius = $K_1 D$; $D/2h$ = axis ratio.
 (b) For definitions, see 1-4(b).
 (c) Interpolation permitted for intermediate values.

Equació 55

$$L = 0,9 \cdot D$$

Equació 56

$$r = 0,085 \cdot L$$

$$L = 0,9 \cdot D = 0,9 \cdot 2735,8 = 2462,25 \text{ mm}$$

$$r = 0,085 \cdot 2462,25 = 209,3 \text{ mm}$$

Un cop calculat el radi de la corona i el radi intern de la curvatura dels costats, es calcula la relació L/r per a poder trobar el factor característic M .

$$\frac{L}{r} = \frac{2462,25}{209,3} = 11,76$$

Per al trobar el factor característic M , s'utilitza la taula 1-4.2 de l'ASME¹⁶

. La relació L/r de 11,76 no es troba a la taula, per tant, tal i com s'indica a la taula, s'agafa el valor més pròxim, en aquest cas, 12.

Taula 32: Valors del factor M

L/r	1.0	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22
L/r	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0
M	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50
L/r	9.5	10.00	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16 $\frac{2}{3}$ [Note (1)]
M	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77

GENERAL NOTE: Use nearest value of L/r; interpolation unnecessary.

NOTE:
(1) Maximum ratio allowed by UG-32(i) when L equals the outside diameter of the skirt of the head.

Per una relació L/r de 12, el valor del factor M correspon a 1,62.

$$t_t = \frac{1,68 \text{ atm} \cdot 2462,25 \text{ mm} \cdot 1,62}{2 \cdot 1136,37 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 1,68 \text{ atm}} = 3,46 \text{ mm}$$

Es sobredimensiona el valor de l'espessor del capçal en un 50%.

$$t_t = 3,46 \cdot 1,5 = 5,2 \text{ mm}$$

L'espessor del cilindre del tanc és de 3,57 mm i l'espessor del capçal del tanc és de 5,19 mm. L'espessor de l'equip serà el valor més elevat entre l'espessor del cilindre i del capçal. En aquest cas l'espessor de l'equip és 5,2 mm.

Com el fons i el capçal del cilindre són toriesfèrics es calcula les seves variables segons el model Klopper.

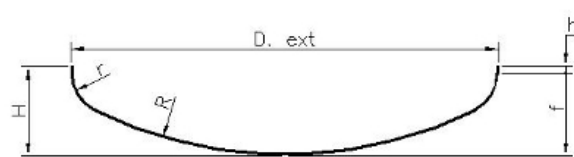
Equació 57

$$D_E = D_I + 2 \cdot t_c$$

$$D_E = 2735,8 \text{ mm} + 2 \cdot 5,2 \text{ mm} = 2740,6 \text{ mm}$$

Un cop obtinguts el valor del diàmetre extern i de l'espessor, s'utilitza la calculadora per dimensionar un fons toriesfèric tipus Klopper segons el DIN-2011. de l'empresa HOFASA⁹.

Taula 33: Calculadora de fons Klopper

Calculadora de fondos KLOPPER		
Diametro exterior (mm)	2740.6	
Espesor (mm)	5.19	
 <p>fondo Toriesferico Tipo KLOPPER</p>		
Diametro disco (mm)	3071	<input type="button" value="Calcular"/>
R (mm)	2740.6	
r (mm)	274.06	
h (mm) >=	18.165000000	
f (mm)	528	
H (mm)	551	
V (sin h) (litros)	2035.1	
Peso (h minima) (kg)	308	
HORFASA no se responsabiliza de la precision de estas medidas.		

Per tant, el volum del fons Klopper és de 2035,1 L, és a dir, 2,04 m³.

11.5.1.6 Volum de l'equip

Per poder calcular el volum total de l'equip calculem volum el pes del cilindre.

Equació 58

$$V_{equip} = V_{cil} + V_{cap} + V_{fons}$$

Equació 59

$$V_{cil} = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot D_I^2$$

$$V_{cil} = \frac{\pi}{4} \cdot 4,1 \cdot 2,735^2 = 24,12 \text{ m}^3$$

$$V_{equip} = 24,12 + (2 \cdot 1,8) = 27,73 \text{ m}^3$$

11.5.1.7 Pes de l'equip

Per calcular la massa de l'equip buit caldrà calcular la massa del cilindre i del fons i capçal toriesfèric.

$$M_{cil} = \pi \cdot H \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot \rho_{material}$$

$$M_{cil} = \pi \cdot 4,1 \cdot (2,74^2 - 2,735^2) \cdot 8030 = 2700,9 \text{ Kg}$$

Seguidament es calcula el pes del capçal mitjançant el volum d'una semiesfera. El pes del capçal i del fons seran el mateix.

$$M_{cap} = \frac{2}{3} \pi \cdot (D_{ext}^3 - D_{int}^3) \cdot \rho_{material}$$

$$M_{cap} = \frac{2}{3} \pi \cdot (2,74^3 - 2,735^3) \cdot 8030 = 1802,2 \text{ Kg}$$

$$M_{equip} = M_{cil} + 2 \cdot M_{cap}$$

$$M_{equip} = 2700,9 + 2 \cdot 1802,2 \text{ Kg} = 6305,3 \text{ Kg}$$

Per calcular la massa d'operació caldrà sumar la càrrega del tanc:

$$M_{op} = M_{equip} + (V_{fluid} \cdot \rho_{fluid})$$

$$M_{op} = 6305,3 + (24,12 \cdot 1161,6) = 34327,6 \text{ Kg}$$

11.5.1.8 Venteig

Segons la normativa ITC-MIE-APQ-1¹⁴, hi ha dos sistemes de venteig, el normal i el d'emergència.

El normal fa referència a que tot recipient d'emmagatzematge ha de disposar de sistemes de ventilació per prevenir-ne la deformació com a conseqüència d'ompliments, buidatges o canvis de temperatura ambient.

Tindran com a mínim una mida igual a la major de les canonades de omplert o buidat i en cap cas inferiors a 35 mm de diàmetre interior.

El d'emergència fa al·lusió a que tot recipient d'emmagatzematge de superfície tindrà alguna forma constructiva o dispositiu que permeti alleujar l'excés de pressió interna causat per un foc exterior.

Equació 60

$$Cv = \frac{Q}{\lambda}$$

Equació 61

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

Equació 62

$$A = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot H$$

On:

- Cv = capacitat de ventilació (kg/h).
- Q = calor rebuda pel recipient (kJ/h).
- λ = calor latent de vaporització de la substància (kJ/kg).
- F = factor de reducció, en aquest cas és 0,5 degut a que la superfície humida és superior a 20 m².¹⁸
- A = superfície humida (m²).
- R = radi del tanc (m).
- H = altura del tanc (m).

$$A = 2 \cdot \pi \cdot 1,37 \cdot 4,1 = 35,3 \text{ m}^2$$

$$Q = 139,7 \cdot 0,5 \cdot 35,3^{0,82} \cdot 10^3 = 1297328,6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$Cv = \frac{1297328,6}{1630,3} = 795,75 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

11.5.1.9 Disseny de l'agitador

Pel disseny de l'agitador, primerament es fan els càlculs dels requeriments físics d'aquest, segons les correlacions estàndards que tenen per objectiu l'excel·lència operacional:

$$Da = E = \frac{Di}{3} = \frac{2,735}{3} = 0,91 \text{ m}$$

$$J = \frac{Di}{12} = \frac{2,735}{12} = 0,23 \text{ m}$$

$$W = \frac{Di}{5} = \frac{2,735}{5} = 0,55 \text{ m}$$

$$f = 0,1 \cdot Di = 0,1 \cdot 2,735 = 0,273 \text{ m}$$

$$L = \frac{Da}{4} = \frac{0,91}{4} = 0,223 \text{ m}$$

$$Ha = H + W - E = 4,1 + 0,55 - 0,91 = 3,74 \text{ m}$$

On:

- Da= diàmetre de la turbina de l'agitador (m).
- E= distància al fons del tanc (m).
- Di= diàmetre intern del tanc (m).
- J= amplada del deflector (m).
- W= amplada de les pales (m).
- f = espai entre els deflectors i les parets del tanc (m).
- L= alçada de les pales (m).
- Ha= alçada de l'agitador (m).
- H= alçada del tanc (m).

Per realitzar el disseny de la potència de l'agitador i del número de Reynolds, primerament s'ha de calcular la velocitat angular que necessita aquest agitador. Això s'obté de la següent equació:

$$\left(\frac{N \cdot Da^2 \cdot \mu}{\sigma \cdot Di} \right) \cdot \left(\frac{\rho \cdot \sigma^3}{g \cdot \mu^4} \right)^{0,25} = 2 \cdot \left(\frac{H}{Di} \right)^{0,5}$$

On:

- N = velocitat angular de l'agitador (rps).
- ρ = densitat de la mescla (kg/m^3).
- μ = viscositat de la mescla ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).
- σ = constant entre 0,2 i 0,7 (es pren un valor de 0,3 per tots els casos).
- g = gravetat estàndard (m/s^2).

$$\left(\frac{N \cdot 0,91^2 \cdot 0,062}{0,3 \cdot 2,735} \right) \cdot \left(\frac{1161,6 \cdot 0,3^3}{9,81 \cdot 0,062^4} \right)^{0,25} = 2 \cdot \left(\frac{4,1}{2,735} \right)^{0,5}$$

Aïllant, es troba que el valor del paràmetre N correspon a 1,814 rps.

$$Re = \frac{N \cdot Da^2 \cdot \rho}{\mu} = \frac{1,814 \cdot 0,91^2 \cdot 1161,6}{0,062} = 28140,2$$

A partir del valor obtingut de Reynolds i escollint un agitador de 6 pales planes, amb l'ajuda de la figura 2, es troba que el número de potència és 4 i s'utilitzarà per calcular la potència de l'agitador.

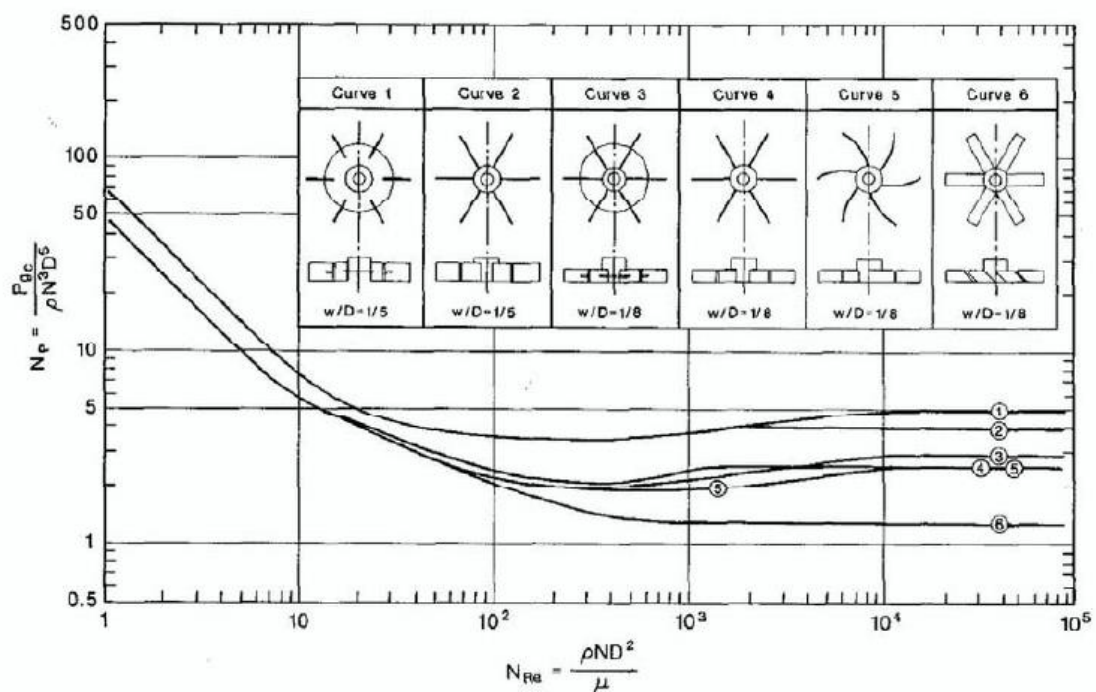
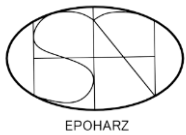


Figura 5

$$P = N_p \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D_a^5$$



EPOHARZ

On:

P = potència de l'agitador (W)

N_p = número de potència

$$P = 4 \cdot 1161,6 \cdot 1,814^3 \cdot 0,91^5 = 17493,1 \text{ W}$$

Per últim, un cop coneguda la potència, es calcula la potència consumida, utilitzant un rendiment del motor del 80%.

$$P_{consumida} = \frac{P}{\eta} = \frac{17,49 \text{ kW}}{0,8} = 21,87 \text{ kW}$$

11.5.1.10 Taula resum de resultats

Taula 34: Disseny del tanc TA-1002

MATERIAL		PES DE L'EQUIP	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Pes del cilindre	2701 kg
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	Pes del capçal	1802,2 kg
Factor de soldadura (E)	0,85	Pes equip	6305,3 kg
TEMPERATURA		Pes d'operació	34327,6 kg
Temperatura d'operació	20 °C	ESPESSOR	
Temperatura de disseny	35 °C	Espessor del cilindre	3,57 mm
PRESSIÓ		K1	0,9
Pressió d'operació	1 atm	L/r	12
Pressió hidrostàtica	0,46 atm	M	1,62
Pressió de disseny	1,68 atm	Espessor del capçal	5,2 mm
TANC		DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
Estoc	1 lot	Alçada del fons	0,551 m
Numero de tancs	1	Radi de la curvatura	0,274 m
Volum per tanc	24,12 m ³	Diàmetre de la tapa	3,07 m
Diàmetre intern	2,735 m	Volum del fons	2,03 m ³
Diàmetre extern	2,74 m	Espessor	5,2 mm
Alçada	4,1 m	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
VOLUM DE L'EQUIP		Superfície humida	35,3 m ²
Volum cilindre	24,12 m ³	Calor rebuda pel recipient	1297328,6 kJ/h
Volum capçal	2,03 m ³	Calor latent	1630,3 kJ/h
Volum equip	28,2 m ³	Capacitat de ventilació	795,75 kg/h
AGITACIÓ			
Diàmetre de la turbina	0,91 m	Alçada de les pales	0,223 m
Distància al fons del tanc	0,91 m	Alçada de l'agitador	3,74 m
Amplada del deflector	0,23 m	Velocitat angular	1,814 rps
Amplada de les pales	0,55 m	Potència de l'agitador	17,49 kW
Espai entre els deflectors i les parets del tanc	0,273 m	Potència consumida	21,87 kW

11.5.2 Tanc agitat TA-1001

El tanc de TA-1001 és un equip cilíndric que opera a pressió atmosfèrica i 20°C conté BTMAC i H₂O. Hi ha un tanc i aquest compta amb agitació. L'agitador és un element principal en aquest recipient ja que assegura la homogeneïtzació de la mescla. S'escull una agitació amb agitadors de 6 pales planes i sense bafles. S'ha seguit el mateix procediment del punt 2.1 pel disseny del tanc i de l'agitador. A continuació es mostra una taula resum amb els resultats obtinguts.

Taula 35: Disseny del tanc TA-1001

MATERIAL		PES DE L'EQUIP	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Pes del cilindre	43,5 kg
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	Pes del capçal	29 kg
Factor de soldadura (E)	0,85	Pes equip	101,5 kg
TEMPERATURA		Pes d'operació	628,7 kg
Temperatura d'operació	20 °C	ESPESSOR	
Temperatura de disseny	35 °C	Esessor del cilindre	0,75 mm
PRESSIÓ		K1	0,9
Pressió d'operació	1 atm	L/r	12
Pressió hidrostàtica	0,11 atm	M	1,62
Pressió de disseny	1,28 atm	Esessor del capçal	1,1 mm
TANC		DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
Estoc	7 dies	Alçada del fons	0,151 m
Numero de tancs	1	Radi de la curvatura	0,076 m
Volum per tanc	0,51 m ³	Diàmetre de la tapa	0,846 m
Diàmetre intern	0,756 m	Volum del fons	0,043 m ³
Diàmetre extern	0,757 m	Esessor	1,1 mm
Alçada	1,13 m	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
VOLUM DE L'EQUIP		Superfície humida	2,7 m ²
Volum cilindre	0,51 m ³	Calor rebuda pel recipient	315070,3 kJ/h
Volum capçal	0,043 m ³	Calor latent	2260,9 kJ/h
Volum equip	0,60 m ³	Capacitat de ventilació	139,6 kg/h
AGITACIÓ			
Diàmetre de la turbina	0,25 m	Alçada de les pales	0,063 m
Distància al fons del tanc	0,25 m	Alçada de l'agitador	1,03 m

AGITACIÓ			
Amplada del deflector	0,063 m	Velocitat angular	6,83 rps
Amplada de les pales	0,15 m	Potència de l'agitador	1,34 kW
Espai entre els deflectors i les parets del tanc	0,076 m	Potència consumida	1,68 kW

11.5.3 Tanc agitat TA-1003

El tanc de TA-1003 és un equip cilíndric que opera a pressió atmosfèrica i 20°C conté ECH, DCP i H₂O. Hi ha un tanc i aquest compta amb agitació. L'agitador és un element principal en aquest recipient ja que assegura la homogeneïtzació de la mescla. S'escull una agitació amb agitadors de 6 pales planes i sense bafles. S'ha seguit el mateix procediment del punt 2.1 pel disseny del tanc i de l'agitador. A continuació es mostra una taula resum amb els resultats obtinguts.

Taula 36: Disseny del tanc TA-1003

MATERIAL		PES DE L'EQUIP	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Pes del cilindre	1712,95 kg
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	Pes del capçal	1142,9 kg
Factor de soldadura (E)	0,85	Pes equip	3998,8 kg
TEMPERATURA		Pes d'operació	22721,9 kg
Temperatura d'operació	20 °C	ESPESSOR	
Temperatura de disseny	35 °C	Espessor del cilindre	2,99 mm
PRESSIÓ		K1	0,9
Pressió d'operació	1 atm	L/r	12
Pressió hidrostàtica	0,4 atm	M	1,62
Pressió de disseny	1,62 atm	Espessor del capçal	4,36 mm
TANC		DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
Estoc	1 lot	Alçada del fons	0,479 m
Numero de tancs	1	Radi de la curvatura	0,238 m
Volum per tanc	13,24 m ³	Diàmetre de la tapa	2,67 m
Diàmetre intern	2,38 m	Volum del fons	1,341 m ³
Diàmetre extern	2,384 m	Espessor	4,36 mm
Alçada	3,57 m		

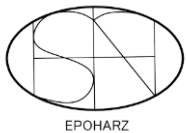
VOLUM DE L'EQUIP		DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
		Superfície humida	26,7 m ²
Volum cilindre	15,89 m ³	Calor rebuda pel recipient	1032566 kJ/h
Volum capçal	1,341 m ³	Calor latent	1750,1 kJ/h
Volum equip	18,57 m ³	Capacitat de ventilació	590 kg/h
AGITACIÓ			
Diàmetre de la turbina	0,79 m	Alçada de les pales	0,2 m
Distància al fons del tanc	0,79 m	Alçada de l'agitador	3,25 m
Amplada del deflector	0,20 m	Velocitat angular	2,18 rps
Amplada de les pales	0,48 m	Potència de l'agitador	26,9 kW
Espai entre els deflectors i les parets del tanc	0,24 m	Potència consumida	33,6 kW

11.5.4 Tanc agitat TA-1101

El tanc de TA-1101 és un equip cilíndric que opera a pressió atmosfèrica i 20°C, conté BPA, BACH, H₂O, MIBK i BADGE. Hi ha un tanc i aquest compta amb agitació. L'agitador és un element principal en aquest recipient ja que assegura la homogeneïtzació de la mescla. S'escull una agitació amb agitadors de 6 pales planes i sense bafles. S'ha seguit el mateix procediment del punt 2.1 pel disseny del tanc i de l'agitador. A continuació es mostra una taula resum amb els resultats obtinguts.

Taula 37: Disseny del tanc TA-1101

MATERIAL		PES DE L'EQUIP	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Pes del cilindre	2876,3 kg
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	Pes del capçal	1919,2 kg
Factor de soldadura (E)	0,85	Pes equip	6714,6 kg
TEMPERATURA		Pes d'operació	34273,2 kg
Temperatura d'operació	20 °C	ESPESSOR	
Temperatura de disseny	35 °C	Espessor del cilindre	3,59 mm
PRESSIÓ		K1	0,9
Pressió d'operació	1 atm	L/r	12
Pressió hidrostàtica	0,43 atm	M	1,62
Pressió de disseny	1,64 atm	Espessor del capçal	5,24 mm



EPOHARZ

TANC		DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
Estoc	1 lot	Alçada del fons	0,567 m
Numero de tancs	1	Radi de la curvatura	0,281 m
Volum per tanc	26,3 m ³	Diàmetre de la tapa	3,16 m
Diàmetre intern	2,815 m	Volum del fons	2,22 m ³
Diàmetre extern	2,819 m	Espessor	5,24 mm
Alçada	4,22 m	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
VOLUM DE L'EQUIP		Superfície humida	37,3 m ²
Volum cilindre	26,3 m ³	Calor rebuda pel recipient	1359520,9 kJ/h
Volum capçal	2,22 m ³	Calor latent	536 kJ/h
Volum equip	30,7 m ³	Capacitat de ventilació	2536,4 kg/h
AGITACIÓ			
Diàmetre de la turbina	0,94 m	Alçada de les pales	0,23 m
Distància al fons del tanc	0,94 m	Alçada de l'agitador	3,84 m
Amplada del deflector	0,23 m	Velocitat angular	1,04 rps
Amplada de les pales	0,56 m	Potència de l'agitador	3,43 kW
Espai entre els deflectors i les parets del tanc	0,28 m	Potència consumida	4,29 kW

11.6 Disseny dels tancs pulmó

Els tancs pulmó són una part necessària del procés per a poder recollir els productes produïts al llarg del procés productiu i poder-los distribuir des d'aquí a altres equips o tancs d'emmagatzematge. Es disposen de sis tancs pulmó els quals es dissenyen a partir de tancs d'emmagatzematge estàndard i com es troben dins de les àrees de producció, no és necessari dissenyar les cubetes.

El primer tanc pulmó és primordial per a poder crear operar el primer evaporador en continu. El segon i tercer tanc es troben a la sortida segon evaporador i recullen el MIBK recuperat i la resina epoxy final. El quart recipient serveix recollir l'ECH recuperada. Finalment, el cinquè i sisè tanc recullen les aigües amb catalitzador i salmorra respectivament, i serveixen per alimentar en continu la osmosi inversa.

Tots els tancs pulmó que intervenen al procés segueixen un disseny constructiu basat en el codi ASME¹⁶, el codi API 650¹⁷ i les normatives ITC-MIE-APQ-1¹⁴ i ITC-MIE-APQ-7¹⁵.

S'utilitzarà el disseny del tanc pulmó TP-1001 com a exemple de càlcul. S'ha seguit el mateix procediment per al disseny de tots els tancs.

11.6.1 Tanc pulmó TP-1001

11.6.1.1 Volum emmagatzemat i volum de cada tanc

El tanc TP-1001, serveix per emmagatzemar el la mescla de BPA i BACH que surt del BC-1003. Aquest tanc pulmó servirà per omplir el reactor RE-1101. Es dissenya un tanc per a que es pugui acumular el volum d'un lot. Aquest volum correspon a 6,87 m³.

Per qüestions de seguretat, s'aplica un sobredimensionament del 20% al volum. Aleshores, el volum total que ha de poder contenir al tanc és el següent.

$$V = \frac{6,87 \text{ m}^3}{1 \text{ tanc}} \cdot 1,2 = 8,24 \text{ m}^3$$

El volum del tanc és de 24,12 m³.

11.6.1.2 Diàmetre intern i altura del tanc

Un cop conegut el volum total del tanc, es procedeix a calcular l'altura i el diàmetre intern de cada tanc. La forma de cada tanc és de configuració cilíndrica amb dos capçals als seus extrems. S'escull una relació altura/diàmetre (H/D) d'1,5 respecte al cilindre.

Equació 63

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot D_I^2$$

On:

- V = volum del tanc (m^3).
- H = altura del tanc (m).
- D_I = diàmetre intern del tanc (m).

Amb el que s'obté la següent fórmula per calcular el diàmetre del tanc.

Equació 64

$$D_I = \sqrt[3]{\frac{V \cdot 4}{1,5 \cdot \pi}}$$

$$D_I = \sqrt[3]{\frac{8,24 \cdot 4}{1,5 \cdot \pi}} = 1,912 \text{ m}$$

$$H = 1,5 \cdot 1,912 = 2,87 \text{ m}$$

El diàmetre intern del tanc és de 1,912 m i l'altura de 2,87 m.

11.6.1.3 Pressió de disseny

La pressió de disseny és calculada mitjançant la suma de la pressió d'operació i la pressió hidrostàtica per saber la pressió total que pot suportar el tanc.

Equació 65

$$P_d = 1,15 \cdot (P_{op} + P_h)$$

On:

- P_d = pressió de disseny (atm).
- P_{op} = pressió d'operació (atm).
- P_h = pressió hidrostàtica (atm).

La pressió hidrostàtica és la pressió que ve donada pels pes del fluid en repòs. En aquest cas s'ha realitzat un sobredimensionament del 15% per a que el tanc tingui la resistència suficient.

Equació 66

$$P_h = \rho_{mescla} \cdot g \cdot H$$

On:

- ρ_{mescla} = densitat de la mescla (kg/m^3).
- g = força de la gravetat (m/s^2).
- H = altura del tanc (m).

$$P_h = \rho_{mescla} \cdot g \cdot H = 1110,7 \cdot 9,8 \cdot 2,87 = 31225,1 \text{ Pa} = 0,31 \text{ atm}$$

$$P_d = 1,15 \cdot (P_{op} + P_h) = 1,15 \cdot (1 + 0,31) = 1,5 \text{ atm}$$

La pressió de disseny del tanc d'ECH és de 1,5 atm.

11.6.1.4 Temperatura de disseny

La temperatura de disseny es calcula tenint en compte que l'emmagatzematge es realitza a 20°C. De la mateixa manera que es sobredimensiona l'equip a efectes de pressió, es realitza el mateix a efectes de temperatura. La temperatura d'operació és la temperatura a la que estarà el tanc d'emmagatzematge, és a dir, la temperatura d'operació del tanc. Per tant, la temperatura de disseny serà superior a la temperatura d'operació.

Equació 67

$$T_d = T_{op} + 15^{\circ}C$$

On:

- T_d = temperatura de disseny ($^{\circ}C$).
- T_{op} = temperatura d'operació ($^{\circ}C$).

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

La temperatura de disseny del tanc és de $35^{\circ}C$.

11.6.1.5 Espessor del tanc

Per al càlcul de l'espessor del tanc, s'ha utilitzat el formulari del codi ASME Section VIII Division 1¹⁶.

Per l'espessor del cos cilíndric es calcula mitjançant l'esforç tangencial que exerceix el fluid sobre la paret del tanc.

Equació 68

$$t_c = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P}$$

On:

- t_c = espessor tanc (mm).
- P = pressió interna de disseny (atm).
- R = radi intern (mm).
- S = tensió màxima admissible (atm).
- E = factor de soldadura.

El límit elàstic S , és la tensió màxima a la que es pot sotmetre el material sense possibles deformacions permanents. Aquest és diferent per cada material, en aquest cas cal utilitzar acer inoxidable 316L, en el codi ASME¹⁶ la tensió màxima per aquest material és de 1136,37 atm.

El factor E de soldadura permet tenir en compte el possible error que pugui contenir el límit elàstic, és a dir, dimensiona el tanc en termes de tensió per assegurar que aquest no es deformi. En aquest cas, el valor és de 0,85.

$$t_c = \frac{1,5 \text{ atm} \cdot 956,2 \text{ mm}}{1367,9 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 1,5 \text{ atm}} = 2,49 \text{ mm}$$

Es sobredimensiona el valor de l'espessor del cilindre en un 50%.

$$t_c = 1,49 \cdot 1,5 = 2,24 \text{ mm}$$

Per calcular l'espessor del capçal, primer s'ha d'escollir el tipus. En aquest cas, s'ha escollit un capçal torisfèric. A la següent figura es mostren les dimensions d'aquest capçal segons l'ASME¹⁶.

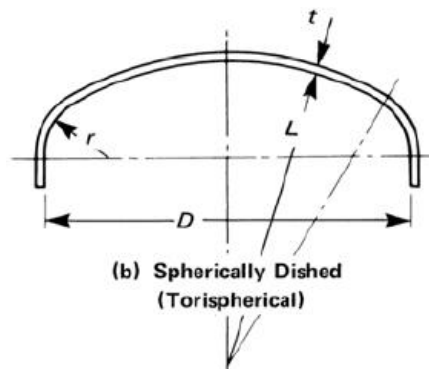


Figura 6: Espessor del capçal torisfèric

La fórmula per calcular l'espessor del capçal és la següent.

$$t_t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P}$$

On:

- t_t = espessor del capçal del tanc (mm).
- P= pressió interna de disseny (atm).
- L= radi de la corona (mm).
- M= factor característic.
- S= tensió màxima admissible (atm).
- E= factor de soldadura.

Amb la taula UG-37 de l'ASME¹⁶, es pot calcular el radi de la corona, tenint en compte que K_1 és igual a 0,9.

Taula 38: Valor de la K_1

$D/2h$	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
K_1	1.36	1.27	1.18	1.08	0.99	0.90	0.81	0.73	0.65	0.57	0.50

GENERAL NOTES:
 (a) Equivalent spherical radius = $K_1 D$; $D/2h$ = axis ratio.
 (b) For definitions, see 1-4(b).
 (c) Interpolation permitted for intermediate values.

Equació 69

$$L = 0,9 \cdot D$$

Equació 70

$$r = 0,085 \cdot L$$

$$L = 0,9 \cdot D = 0,9 \cdot 1912,4 = 1721,1 \text{ mm}$$

$$r = 0,085 \cdot 1721,1 = 146,3 \text{ mm}$$

Un cop calculat el radi de la corona i el radi intern de la curvatura dels costats, es calcula la relació L/r per a poder trobar el factor característic M .

$$\frac{L}{r} = \frac{1721,1}{146,3} = 11,76$$

Per al trobar el factor característic M , s'utilitza la taula 1-4.2 de l'ASME¹⁶. La relació L/r de 11,76 no es troba a la taula, per tant, tal i com s'indica a la taula, s'agafa el valor més pròxim, en aquest cas, 12.

Taula 39: Valors del factor M

L/r	1.0	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22
L/r	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0
M	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50
L/r	9.5	10.00	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16 $\frac{2}{3}$ [Note (1)]
M	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77

GENERAL NOTE: Use nearest value of L/r ; interpolation unnecessary.

NOTE:
(1) Maximum ratio allowed by UG-32(i) when L equals the outside diameter of the skirt of the head.

Per una relació L/r de 12, el valor del factor M correspon a 1,62.

$$t_t = \frac{1,5 \text{ atm} \cdot 1721,1 \text{ mm} \cdot 1,62}{2 \cdot 1136,37 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 1,5 \text{ atm}} = 2,17 \text{ mm}$$

Es sobredimensiona el valor de l'espessor del capçal en un 50%.

$$t_t = 2,17 \cdot 1,5 = 3,26 \text{ mm}$$

L'espessor del cilindre del tanc és de 2,24 mm i l'espessor del capçal del tanc és de 3,26 mm. L'espessor de l'equip serà el valor més elevat entre l'espessor del cilindre i del capçal. En aquest cas l'espessor de l'equip és 3,26 mm.

Com el fons i el capçal del cilindre són toriesfèrics es calcula les seves variables segons el model Klover.

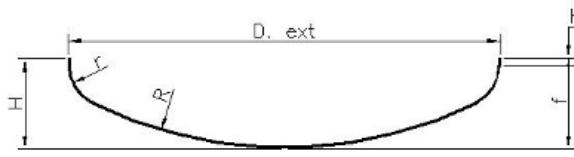
Equació 71

$$D_E = D_I + 2 \cdot t_c$$

$$D_E = 1912,4 \text{ mm} + 2 \cdot 3,26 \text{ mm} = 1915,4 \text{ mm}$$

Un cop obtinguts el valor del diàmetre extern i de l'espessor, s'utilitza la calculadora per dimensionar un fons toriesfèric tipus Klover segons el DIN-2011. de l'empresa HORFASA⁹.

Taula 40: Calculadora de fons Klopper

Calculadora de fondos KLOPPER		
Diametro exterior (mm)	1915.4	
Espesor (mm)	3.26	
 <p>fondo Toriesferico Tipo KLOPPER</p>		
Diametro disco (mm)	2143	<input type="button" value="Calcular"/>
R (mm)	1915.4	
r (mm)	191.54000000	
h (mm) >=	11.41	
f (mm)	369	
H (mm)	384	
V (sin h) (litros)	695.6	
Peso (h minima) (kg)	94	
<small>HORFASA no se responsabiliza de la precision de estas medidas.</small>		

Per tant, el volum del fons Klopper és de 695,6 L, és a dir, 0,696 m³.

11.6.1.6 Volum de l'equip

Per poder calcular el volum total de l'equip calculem volum el pes del cilindre.

Equació 72

$$V_{equip} = V_{cil} + V_{cap} + V_{fons}$$

Equació 73

$$V_{cil} = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot D_I^2$$

$$V_{cil} = \frac{\pi}{4} \cdot 2,87 \cdot 1,912^2 = 8,24 \text{ m}^3$$

$$V_{equip} = 8,24 + (2 \cdot 0,696) = 9,63 \text{ m}^3$$

11.6.1.7 Pes de l'equip

Per calcular la massa de l'equip buit caldrà calcular la massa del cilindre i del fons i capçal toriesfèric.

$$M_{cil} = \pi \cdot H \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot \rho_{material}$$

$$M_{cil} = \pi \cdot 2,87 \cdot (1,915^2 - 1,912^2) \cdot 8030 = 825,8 \text{ Kg}$$

Seguidament es calcula el pes del capçal mitjançant el volum d'una semiesfera. El pes del capçal i del fons seran el mateix.

$$M_{cap} = \frac{2}{3} \pi \cdot (D_{ext}^3 - D_{int}^3) \cdot \rho_{material}$$

$$M_{cap} = \frac{2}{3} \pi \cdot (1,915^3 - 1,912^3) \cdot 8030 = 551 \text{ Kg}$$

$$M_{equip} = M_{cil} + 2 \cdot M_{cap}$$

$$M_{equip} = 825,8 + 2 \cdot 551 \text{ Kg} = 1927,7 \text{ Kg}$$

Per calcular la massa d'operació caldrà sumar la càrrega del tanc:

$$M_{op} = M_{equip} + (V_{fluid} \cdot \rho_{fluid})$$

$$M_{op} = 1927,7 + (8,24 \cdot 1110,7) = 11079,7 \text{ Kg}$$

11.6.1.8 Venteig

Segons la normativa ITC-MIE-APQ-1, hi ha dos sistemes de venteig, el normal i el d'emergència.

El normal fa referència a que tot recipient d'emmagatzematge ha de disposar de sistemes de ventilació per prevenir-ne la deformació com a conseqüència d'ompliments, buidatges o canvis de temperatura ambient.

Tindran com a mínim una mida igual a la major de les canonades de omplert o buidat i en cap cas inferiors a 35 mm de diàmetre interior.

El d'emergència fa al·lusió a que tot recipient d'emmagatzematge de superfície tindrà alguna forma constructiva o dispositiu que permeti alleujar l'excés de pressió interna causat per un foc exterior.

Equació 74

$$Cv = \frac{Q}{\lambda}$$

Equació 75

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

Equació 76

$$A = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot H$$

On:

- Cv = capacitat de ventilació (kg/h).
- Q = calor rebuda pel recipient (kJ/h).
- λ = calor latent de vaporització de la substància (kJ/kg).
- F = factor de reducció, en aquest cas és 1 degut a que la superfície humida és inferior a 20 m².¹⁸
- A = superfície humida (m²).
- R = radi del tanc (m).
- H = altura del tanc (m).

$$A = 2 \cdot \pi \cdot 0,96 \cdot 2,87 = 17,23 \text{ m}^2$$

$$Q = 139,7 \cdot 1 \cdot 17,23^{0,82} \cdot 10^3 = 721117,4 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$Cv = \frac{721117,4}{1450,6} = 497,13 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

11.6.1.9 Taula resum de resultats

Taula 41: Disseny del tanc TP-1001

MATERIAL		PES DE L'EQUIP	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Pes del cilindre	825,8 kg
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	Pes del capçal	551 kg
Factor de soldadura (E)	0,85	Pes equip	1927,7 kg
TEMPERATURA		Pes d'operació	11079,7 kg
Temperatura d'operació	20 °C	ESPESSOR	
Temperatura de disseny	35 °C	Espessor del cilindre	2,24 mm
PRESSIÓ		K1	0,9
Pressió d'operació	1 atm	L/r	12
Pressió hidrostàtica	0,31 atm	M	1,62
Pressió de disseny	1,5 atm	Espessor del capçal	3,26 mm
TANC		DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
Estoc	1 lot	Alçada del fons	0,384 m
Numero de tancs	1	Radi de la curvatura	0,192 m
Volum per tanc	8,24 m ³	Diàmetre de la tapa	2,14 m
Diàmetre intern	1,912 m	Volum del fons	0,696 m ³
Diàmetre extern	1,915 m	Espessor	3,26 mm
Alçada	2,87 m	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
VOLUM DE L'EQUIP		Superfície humida	17,23 m ²
Volum cilindre	8,24 m ³	Calor rebuda pel recipient	721117,4 kJ/h
Volum capçal	0,696 m ³	Calor latent	1450,6 kJ/h
Volum equip	9,63 m ³	Capacitat de ventilació	497,13 kg/h

11.6.2 Tanc pulmó TP-1101

El tanc de TP-1101 és un equip cilíndric que opera a pressió atmosfèrica i 20°C, conté H₂O i MIBK. Hi ha un tanc i aquest no compta amb agitació. S'ha seguit el mateix procediment del punt 3.1 pel disseny del tanc. A continuació es mostra una taula resum amb els resultats obtinguts.

Taula 42: Disseny del tanc TP-1101

MATERIAL		PES DE L'EQUIP	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Pes del cilindre	1939,45 kg
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	Pes del capçal	1294 kg
Factor de soldadura ϵ	0,85	Pes equip	4527,4 kg
TEMPERATURA		Pes d'operació	21438,5 kg
Temperatura d'operació	20 °C	ESPESSOR	
Temperatura de disseny	35 °C	Espessor del cilindre	3 mm
PRESSIÓ		K1	0,9
Pressió d'operació	1 atm	L/r	12
Pressió hidrostàtica	0,33 atm	M	1,62
Pressió de disseny	1,52 atm	Espessor del capçal	4,37 mm
TANC		DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
Estoc	1 lot	Alçada del fons	0,509 m
Numero de tancs	1	Radi de la curvatura	0,192 m
Volum per tanc	19,1 m ³	Diàmetre de la tapa	2,14 m
Diàmetre intern	2,531 m	Volum del fons	0,696 m ³
Diàmetre extern	2,535 m	Espessor	3,26 mm
Alçada	1,8 m	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
VOLUM DE L'EQUIP		Superfície humida	30,2 m ²
Volum cilindre	19,1 m ³	Calor rebuda pel recipient	1141982,1 kJ/h
Volum capçal	1,61 m ³	Calor latent	2548,2 kJ/h
Volum equip	22,33 m ³	Capacitat de ventilació	448,2 kg/h

11.6.3 Tanc pulmó TP-1102

El tanc de TP-1102 és un equip cilíndric que opera a pressió atmosfèrica i 20°C, conté BPA, BACH i BADGE. Hi ha un tanc i aquest no compta amb agitació. S'ha seguit el mateix procediment del punt 3.1 pel disseny del tanc. A continuació es mostra una taula resum amb els resultats obtinguts.

Taula 43: Disseny del tanc TP-1102

MATERIAL		PES DE L'EQUIP	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Pes del cilindre	8715,7 kg
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	Pes del capçal	477,5 kg
Factor de soldadura ϵ	0,85	Pes equip	1670,6 kg
TEMPERATURA		Pes d'operació	9795,9 kg
Temperatura d'operació	20 °C	ESPESSOR	
Temperatura de disseny	35 °C	Espessor del cilindre	2,12 mm
PRESSIÓ		K1	0,9
Pressió d'operació	1 atm	L/r	12
Pressió hidrostàtica	0,31 atm	M	1,62
Pressió de disseny	1,5 atm	Espessor del capçal	3,1 mm
TANC		DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
Estoc	1 lot	Alçada del fons	0,367 m
Numero de tancs	1	Radi de la curvatura	0,183 m
Volum per tanc	7,19 m ³	Diàmetre de la tapa	2,05 m
Diàmetre intern	1,827 m	Volum del fons	0,607 m ³
Diàmetre extern	1,830 m	Espessor	3,1 mm
Alçada	2,74 m	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
VOLUM DE L'EQUIP		Superfície humida	15,73 m ²
Volum cilindre	719 m ³	Calor rebuda pel recipient	1338440,7 kJ/h
Volum capçal	0,607 m ³	Calor latent	1575,7 kJ/h
Volum equip	8,4 m ³	Capacitat de ventilació	849,4 kg/h

11.6.4 Tanc pulmó TP-1201

El tanc de TP-1201 és un equip cilíndric que opera a pressió atmosfèrica i 20°C, conté ECH i H₂O. Hi ha un tanc i aquest no compta amb agitació. S'ha seguit el mateix procediment del punt 3.1 pel disseny del tanc. A continuació es mostra una taula resum amb els resultats obtinguts.

Taula 44: Disseny del tanc TP-1201

MATERIAL		PES DE L'EQUIP	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Pes del cilindre	1344 kg
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	Pes del capçal	897 kg
Factor de soldadura ϵ	0,85	Pes equip	3137,5 kg
TEMPERATURA		Pes d'operació	17301,2 kg
Temperatura d'operació	20 °C	ESPESSOR	
Temperatura de disseny	35 °C	Espessor del cilindre	2,67 mm
PRESSIÓ		K1	0,9
Pressió d'operació	1 atm	L/r	12
Pressió hidrostàtica	0,35 atm	M	1,62
Pressió de disseny	1,55 atm	Espessor del capçal	3,92 mm
TANC		DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
Estoc	1 lot	Alçada del fons	0,447 m
Numero de tancs	1	Radi de la curvatura	0,223 m
Volum per tanc	12,97 m ³	Diàmetre de la tapa	2,49 m
Diàmetre intern	2,225 m	Volum del fons	1,095 m ³
Diàmetre extern	1,228 m	Espessor	3,92 mm
Alçada	3,33 m	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
VOLUM DE L'EQUIP		Superfície humida	23,3 m ²
Volum cilindre	12,97 m ³	Calor rebuda pel recipient	924116,9 kJ/h
Volum capçal	1,095 m ³	Calor latent	1712,4 kJ/h
Volum equip	15,15 m ³	Capacitat de ventilació	539,6 kg/h

11.6.5 Tanc pulmó TP-1202

El tanc de TP-1202 és un equip cilíndric que opera a pressió atmosfèrica i 20°C, conté BTMAC i H₂O. Hi ha un tanc i aquest no compta amb agitació. S'ha seguit el mateix procediment del punt 3.1 pel disseny del tanc. A continuació es mostra una taula resum amb els resultats obtinguts.

Taula 45: Disseny del tanc TP-1202

MATERIAL		PES DE L'EQUIP	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Pes del cilindre	324,4 kg
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	Pes del capçal	216,4 kg
Factor de soldadura ϵ	0,85	Pes equip	757,3 kg
TEMPERATURA		Pes d'operació	4360,5 kg
Temperatura d'operació	20 °C	ESPESSOR	
Temperatura de disseny	35 °C	Espessor del cilindre	1,56 mm
PRESSIÓ		K1	0,9
Pressió d'operació	1 atm	L/r	12
Pressió hidrostàtica	0,22 atm	M	1,62
Pressió de disseny	1,4 atm	Espessor del capçal	2,27 mm
TANC		DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
Estoc	1 lot	Alçada del fons	0,287 m
Numero de tancs	1	Radi de la curvatura	0,144 m
Volum per tanc	3,48 m ³	Diàmetre de la tapa	1,61 m
Diàmetre intern	1,435 m	Volum del fons	0,294 m ³
Diàmetre extern	1,437 m	Espessor	2,27 mm
Alçada	2,15 m	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
VOLUM DE L'EQUIP		Superfície humida	9,71 m ²
Volum cilindre	3,48 m ³	Calor rebuda pel recipient	901007,4 kJ/h
Volum capçal	0,294 m ³	Calor latent	2260,9 kJ/h
Volum equip	4,1 m ³	Capacitat de ventilació	389,5 kg/h

11.6.6 Tanc pulmó TP-1203

El tanc de TP-1202 és un equip cilíndric que opera a pressió atmosfèrica i 20°C, conté H₂O, NaOH i NaCl. Hi ha un tanc i aquest no compta amb agitació. S'ha seguit el mateix procediment del punt 3.1 pel disseny del tanc. A continuació es mostra una taula resum amb els resultats obtinguts.

Taula 46: Disseny del tanc TP-1203

MATERIAL		PES DE L'EQUIP	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Pes del cilindre	1493 kg
Límit elàstic (S)	1136,37 atm	Pes del capçal	996,3 kg
Factor de soldadura (E)	0,85	Pes equip	3485,6 kg
TEMPERATURA		Pes d'operació	25475,7 kg
Temperatura d'operació	20 °C	ESPESSOR	
Temperatura de disseny	35 °C	Espessor del cilindre	3,07 mm
PRESSIÓ		K1	0,9
Pressió d'operació	1 atm	L/r	12
Pressió hidrostàtica	0,56 atm	M	1,62
Pressió de disseny	1,8 atm	Espessor del capçal	4,47 mm
TANC		DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
Estoc	1 lot	Alçada del fons	0,444 m
Numero de tancs	1	Radi de la curvatura	0,220 m
Volum per tanc	12,48 m ³	Diàmetre de la tapa	2,45 m
Diàmetre intern	2,195 m	Volum del fons	1,05 m ³
Diàmetre extern	2,200 m	Espessor	4,47 mm
Alçada	3,29 m	DISSENY DE LA VENTILACIÓ	
VOLUM DE L'EQUIP		Superfície humida	22,7 m ²
Volum cilindre	12,5 m ³	Calor rebuda pel recipient	904668,7 kJ/h
Volum capçal	1,05 m ³	Calor latent	2260,9 kJ/h
Volum equip	14,6 m ³	Capacitat de ventilació	400,1 kg/h

11.7 Disseny dels bescanviadors de calor

Els bescanviadors de calor són dispositius dissenyats per a transferir calor entre dos fluids, aquesta transferència de calor pot servir tant per escalfar com per refredar el fluid que es triï. S'ha escollit utilitzar bescanviadors de carcassa i tubs. En ells la separació entre els fluids és sempre la paret d'un tub cilíndric, per l'interior del qual circula un d'ells, mentre l'altre ho fa per l'exterior. Dels diversos tipus de bescanviadors de calor és el més utilitzat en les plantes químiques i refineries en general perquè: proporciona fluxos de calor elevats en comparació amb la seva relació peso/volum, és relativament fàcil de construir, fàcil de netejar i de reparar, és versàtil.

Per dissenyar-los es requereix un simulador com és Aspen Exchanger Design & Rating V10, conegut com a HYSYS, de la casa comercial AspenTech. Aquest simulador permet definir els cabals, composicions, temperatures, pressions, etc. Que requereix el procés, i és capaç de dissenyar un bescanviador òptim per a aquestes condicions.

Les consideracions per a la construcció dels intercanviadors de calor segueixen les normes TEMA. Per al tipus de capçal frontal s'ha escollit la lletra B, que correspon a un coberta integral. La carcassa escollida ha sigut la d'un pas, es a dir la lletra E. Finalment, pel capçal posterior s'ha escollit la lletra M, que és un tub estacionari.

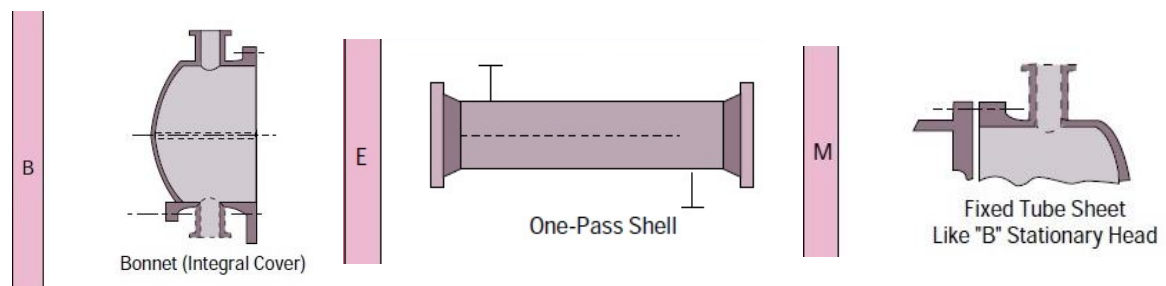


Figura 7: TEMA del bescanviador¹⁹

Aquest tipus de TEMA és el disseny més senzill i es construeix sense juntes empaquetades o empaquetades al costat de la carcassa. La làmina de tubs està soldada a la carcassa i els caps es cargolen a la làmina de tubs. Aquesta categoria TEMA, és el disseny TEMA de menor cost per peu quadrat de superfície de transferència de calor.

Les seves característiques són:

- Menys costós que els dissenys de paquets extraïbles.
- Proporciona la màxima quantitat de superfície per a una carcassa i un diàmetre de tub determinats.
- Proporciona passades de tubs individuals i múltiples per assegurar la velocitat adequada.
- Pot ser intercanviable amb altres fabricants de les mateixes limitacions de tipus TEMA.
- El costat de la carcassa només es pot netejar mitjançant mètodes químics.
- Cap disposició que permeti una dilatació tèrmica diferencial ha d'utilitzar una junta de dilatació al costat de la carcassa.

Exemple de disseny del bescanviador BC-1003

En aquest apartat es mostra un exemple de disseny d'un dels bescanviadors amb l'Aspen HYSYS V10, en particular es farà la demostració amb el BC-1003.

Primerament es defineixen els corrents d'entrada i sortida. En aquest bescanviador, l'aigua correspon al fluid refrigerant i circula pels tubs, mentre que el fluid de procés circula per la carcassa. A la figura 1 es pot observar la distribució.

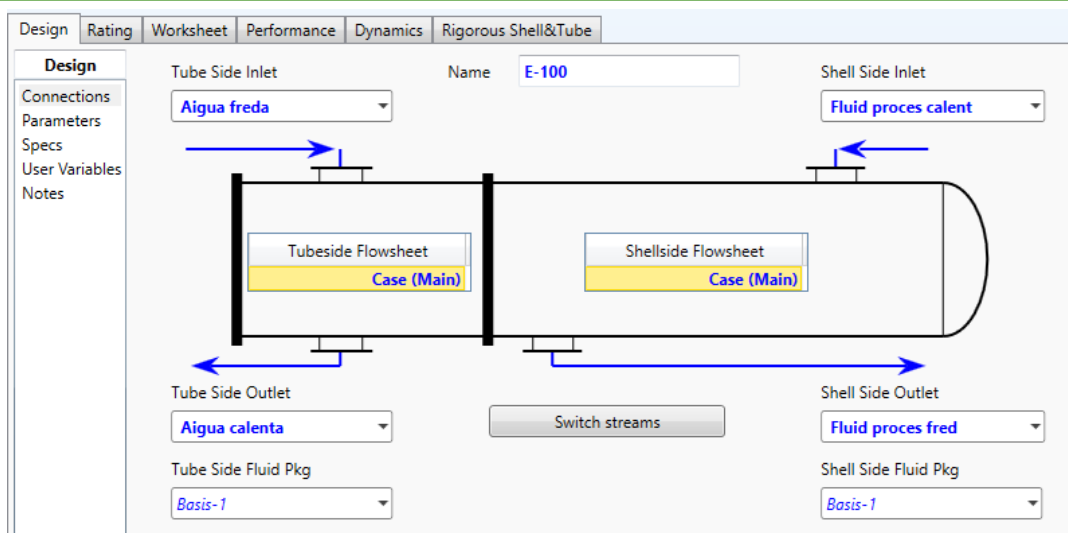


Figura 8: Simulador ASPEN HYSYS – Distribució dels corrents del BC-1003

Seguidament, obrint la pestanya de “worksheet”, es poden definir els cabals d’entrada, la temperatura, la pressió i les composicions. Aquestes condicions es poden observar a les figures 2 i 3. El programa calcula les altres composicions.

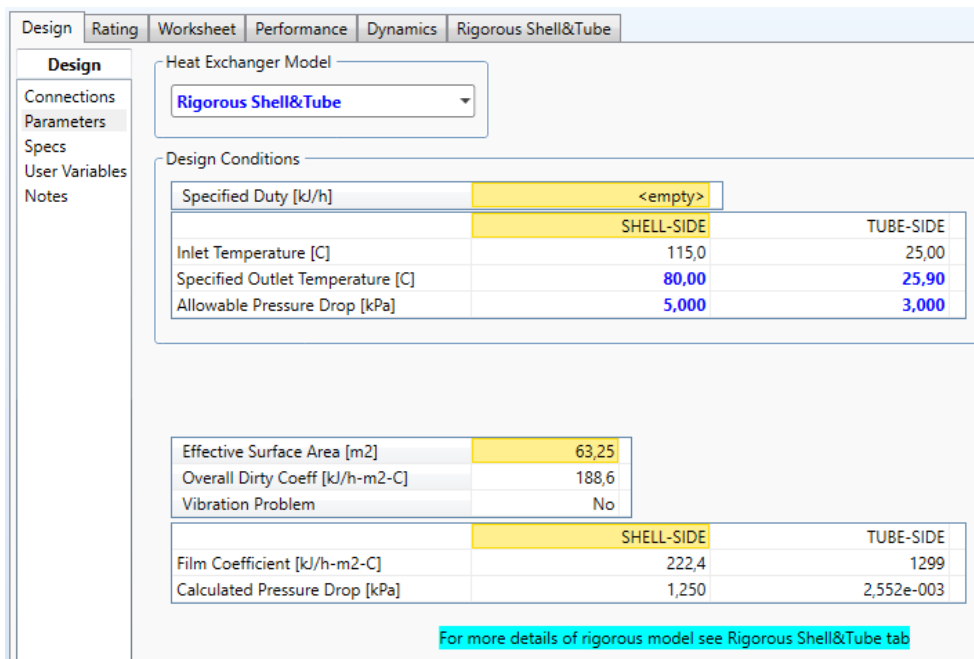
Worksheet	Performance	Dynamics	Rigorous Shell&Tube				
Name				Aigua freda	Aigua calenta	Fluid proces calen	Fluid proces fred
Vapour				0,0000	0,0965	0,0000	0,0000
Temperature [C]				25,00	99,78	115,0	80,01
Pressure [kPa]				101,3	101,3	101,3	100,1
Molar Flow [kgmole/h]				10,55	10,55	5,127	5,127
Mass Flow [kg/h]				190,0	190,0	2110	2110
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]				0,1904	0,1904	1,714	1,714
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]				-2,856e+005	-2,762e+005	-8,538e+005	-8,732e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]				55,43	82,34	-880,4	-932,6
Heat Flow [kJ/h]				-3,012e+006	-2,913e+006	-4,378e+006	-4,477e+006

Figura 9: Simulador ASPEN HYSYS – Condicions de temperatura, pressió i cabal

Worksheet	Performance	Dynamics	Rigorous Shell&Tube		
	Aigua freda	Aigua calenta	Fluid proces calen	Fluid proces fred	
H2O	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000	
Epichlohydrn	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
BisPhenol	0,0000	0,0000	0,0100	0,0100	
BACH*	0,0000	0,0000	0,9900	0,9900	
DCP*	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	

Figura 10: Simulador ASPEN HYSYS – Composicions

Tot seguit, s’escull el model de bescanviador de calor “Rigorous Shell&Tube” i es marca la temperatura de sortida i la caiguda de pressió acceptable.



The screenshot shows the Aspen HYSYS Design Environment interface. The 'Design' tab is active, and the 'Rigorous Shell&Tube' model is selected. The 'Design Conditions' section is expanded, showing the following parameters:

Parameter	Value	Shell-Side	Tube-Side
Specified Duty [kJ/h]	<empty>		
Inlet Temperature [C]	115,0		25,00
Specified Outlet Temperature [C]	80,00		25,90
Allowable Pressure Drop [kPa]	5,000		3,000

Below this, the 'Effective Surface Area [m2]' is 63,25, and the 'Overall Dirty Coeff [kJ/h-m2-C]' is 188,6. The 'Vibration Problem' is set to 'No'. A second table shows calculated coefficients:

Parameter	Shell-Side	Tube-Side
Film Coefficient [kJ/h-m2-C]	222,4	1299
Calculated Pressure Drop [kPa]	1,250	2,552e-003

A note at the bottom states: "For more details of rigorous model see Rigorous Shell&Tube tab".

Figura 11: Simulador ASPEN HYSYS – Model

Si s’obra la pestanya “Rigorous Shell&Tube”, i es fa click sobre “View EDR Browser...”, s’obrirà una pestanya amb tots els detalls del bescanviador. Aquí es pot escollir el TEMA, el pitch, el tipus de baffles, l’orientació i el material. A EPOHARZ el tema escollit és el BEM, el pitch triangular, els baffles de segmentària única, d’orientació horitzontal i el material tipus AISI-316L.

Configuration	
TEMA Type	B - ▾ E - ▾ M - ▾
Tube layout option	New (optimum) layout ▾
Location of hot fluid	Shell side ▾
Tube OD / Pitch	mm ▾ 19,05 / 23,81
Tube pattern	30-Triangular ▾
Tubes are in baffle window	Yes ▾
Baffle type	Single segmental ▾
Baffle cut orientation	Horizontal ▾
Default exchanger material	SS 316L ▾ 9

Figura 12: Simulador ASPEN HYSYS – Configuració

Un cop definits tots els paràmetres, el programa ja pot prosseguir amb la simulació. Dins la carpeta de “Results Summary”, al “TEMA Sheet”, es troben totes les especificacions del bescanviador.

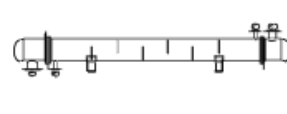
Heat Exchanger Specification Sheet									
1	Company:								
2	Location:								
3	Service of Unit:				Our Reference:				
4	Item No.:				Your Reference:				
5	Date:			Rev No.:			Job No.:		
6	Size :		438 - 4050 mm		Type:	BEM Horizontal		Connected in: 1 parallel 1 series	
7	Surf/unit(eff.)		63,2 m ²		Shells/unit		1		Surf/shell(eff.) 63,2 m ²
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT								
9	Fluid allocation			Shell Side			Tube Side		
10	Fluid name			Fluid proces calent-> Fluid proces fred			Aigua freda-> Aigua calenta		
11	Fluid quantity, Total			kg/s			0,586		
12	Vapor (In/Out)			kg/s			0 0		
13	Liquid			kg/s			0,586 0,586		
14	Noncondensable			kg/s			0 0		
15									
16	Temperature (In/Out)			°C			115 80,01 25 99,78		
17	Bubble / Dew point			°C			/ / 99,78 / 99,78 99,78 / 99,78		
18	Density Vapor/Liquid			kg/m ³			/ 1163,1 / 1187,15 / 1007,34 / 0,59 / 948,07		
19	Viscosity			cp			/ 85,5978 / 700,611 / 0,8904 0,0121 / 0,2796		
20	Molecular wt, Vap						18,02		
21	Molecular wt, NC								
22	Specific heat			kJ/(kg-K)			/ 1,41 / 1,276 / 4,043 1,907 / 4,109		
23	Thermal conductivity			W/(m-K)			/ 0,1265 / 0,1314 / 0,611 0,024 / 0,6806		
24	Latent heat			kJ/kg			2263,5 2263,5		
25	Pressure (abs)			kPa			101,325 100,075 101,325 101,322		
26	Velocity (Mean/Max)			m/s			0,01 / 0,02 0,08 / 0,17		
27	Pressure drop, allow./calc.			kPa			5 1,25 3 0,003		
28	Fouling resistance (min)			m ² -K/W			0 0 0 Ao based		
29	Heat exchanged			kW			27,5 MTD (corrected) 8,31 °C		
30	Transfer rate, Service			52,4			Dirty 52,4 Clean 52,4 W/(m ² -K)		
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL					Sketch			
32				Shell Side		Tube Side			
33	Design/Vacuum/test pressure			kPa		300 / /			
34	Design temperature			°C		150 65			
35	Number passes per shell					1 1			
36	Corrosion allowance			mm		0 0			
37	Connections			In mm		1 52,5 / - 1 202,72 / -			
38	Size/Rating			Out mm		1 52,5 / - 1 154,05 / -			
39	ID			Intermediate		/ - / -			
40	Tube #: 266 OD: 19,05 Tks. Average 1,65 mm Length: 4050 mm Pitch: 23,81 mm Tube pattern: 30								
41	Tube type: Plain Insert: None Fin#: #/m Material: SS 316L								
42	Shell SS 316L			ID 438,15 OD 457,2 mm		Shell cover -			
43	Channel or bonnet SS 316L						Channel cover -		
44	Tubesheet-stationary SS 316L						Tubesheet-floating -		
45	Floating head cover -						Impingement protection None		
46	Baffle-cross SS 316L			Type Single segmental		Cut(%d) 40,59		H. Spacing: c/c 485 mm	
47	Baffle-long -			Seal Type				Inlet 773,98 mm	
48	Supports-tube U-bend			0		Type			
49	Bypass seal			Tube-tubesheet joint		Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')			
50	Expansion joint -			Type None					
51	RhoV2-Inlet nozzle 63			Bundle entrance 0		Bundle exit 0		kg/(m-s ²)	
52	Gaskets - Shell side -			Tube side		Flat Metal Jacket Fibe			
53	Floating head -								
54	Code requirements ASME Code Sec VIII Div 1			TEMA class R - refinery service					
55	Weight/Shell 1538 Filled with water 2149,7			Bundle 897,5		kg			
56	Remarks								
57									
58									

Figura 13: Simulador ASPEN HYSYS – Full d'especificacions

Finalment, dins de “Mechanical Summary”, si es dirigeix cap a “Setting Plan & Tubesheet Layout”, s’obindrà una representació del bescanviador amb les seves mides i la distribució dels tubs. Al Capítol 2: Manual de càlculs, es troben els fulls d’especificacions dels altres bescanviadors, on s’ha seguit el mateix procediment.

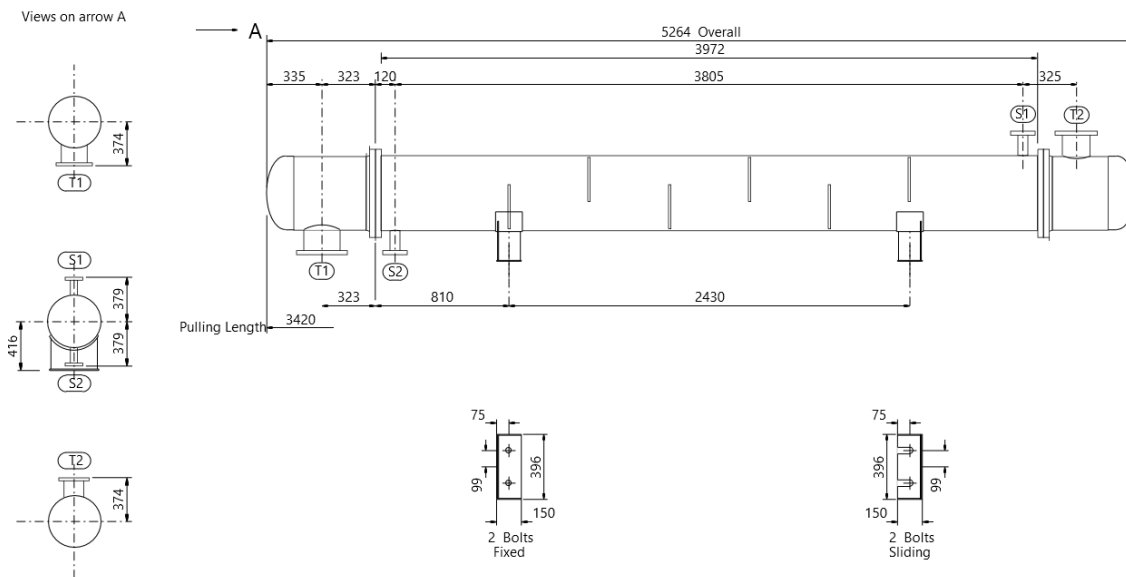


Figura 14: Simulador ASPEN HYSYS – Mida del bescanviador

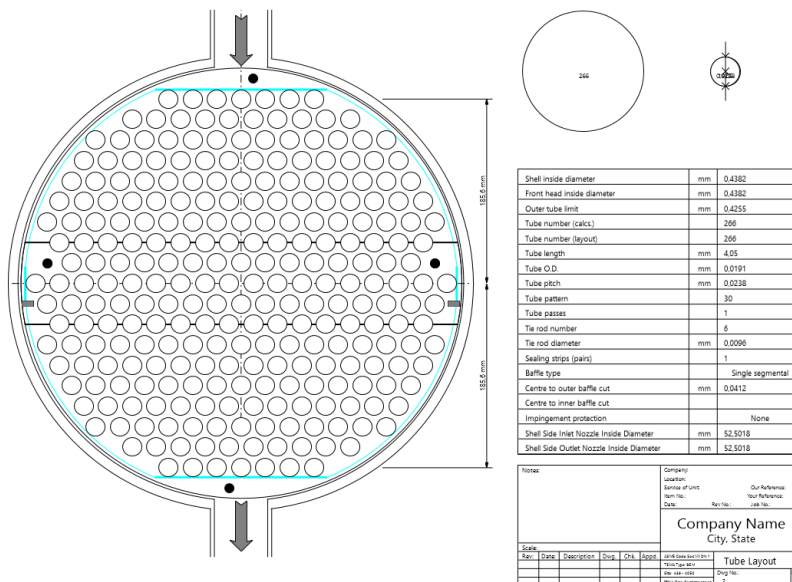


Figura 15: Simulador ASPEN HYSYS – Distribució dels tubs

11.8 Disseny dels evaporadors

Els evaporadors utilitzats són de pel·lícula descendent. Aquests evaporadors són un tipus específic d'intercanviadors de calor verticals.

En el cas específic de l'evaporador de pel·lícula descendent, el fluid tèrmic circula pel costat de la carcassa de l'intercanviador de calor. El fluid de procés passa a través dels tubs de l'evaporador. L'energia es transfereix del fluid tèrmic al producte, i una part del producte es vaporitza.

El líquid de procés es bombeja a la part superior de l'evaporador que cau i es distribueix uniformement a través de tots els tubs d'escalfament del bescanviador de calor. És molt important que el líquid estigui ben distribuït perquè flueixi uniformement per les parets interiors de cada tub. Aquesta pel·lícula de líquid que descendeix a través dels tubs es coneix com una "pel·lícula en caiguda" i és on aquest intercanviador de calor en particular deriva el seu nom. A la figura 1 es mostra un esquema de l'evaporador.

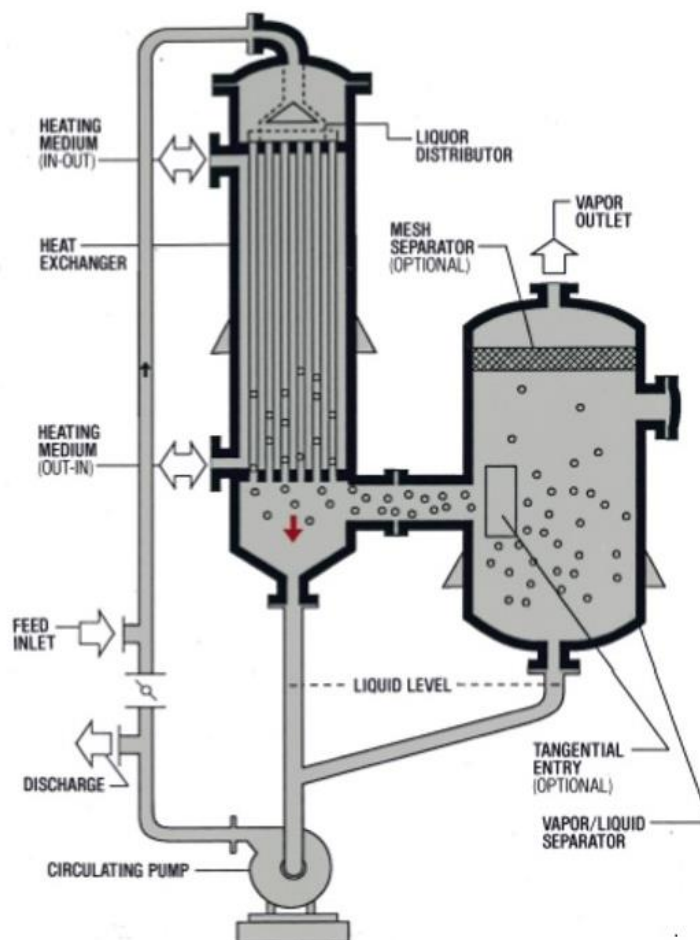


Figura 16: Dibuix de l'evaporador de pel·lícula descendent

El fluid que circula per la carcassa de l'evaporador, i per tant, aporta la calor al sistema, és l'oli tèrmic i la mescla produïda dels reactors, circula pels tubs.

Aquests evaporadors treballaran a una pressió de 20 mmHg i a una temperatura de 115°C. Es treballa a condicions de buit per tal de poder evaporar a una temperatura inferior a 120°C, degut a que a una temperatura superior, es formen intermedis no desitjats.

Com aquests evaporadors són un tipus específic d'intercanviadors de calor verticals, primerament es dissenya un intercanviador amb Aspen Exchanger Design & Rating V10, conegut com a HYSYS, de la casa comercial AspenTech. Aquest simulador permet definir els cabals, composicions, temperatures, pressions, etc. Que requereix el procés, i és capaç de dissenyar un bescanviador òptim per a aquestes condicions.

Les consideracions per a la construcció dels intercanviadors de calor segueixen les normes TEMA. A l'igual que pels bescanviadors de calor, el TEMA escollit és el BEM.

Com els evaporadors funcionen a 115°C i 20 mmHg, el fluid calefactor és l'oli tèrmic. L'oli tèrmic utilitzat és el Therminol 55, ja que té unes característiques que assegurin un calor de procés uniforme, un bon funcionament a temperatures elevades i no és corrosiu.

Exemple de disseny de l'evaporador EV-1001

En aquest apartat es mostra un exemple de disseny d'un dels evaporadors amb l'Aspen HYSYS V10, en particular es farà la demostració amb el EV-1001.

Primerament es defineixen els corrents d'entrada i sortida. En aquest bescanviador, l'oli tèrmic correspon al fluid calefactor i circula per la carcassa, mentre que el fluid de procés circula pels tubs. A la figura 1 es pot observar la distribució.

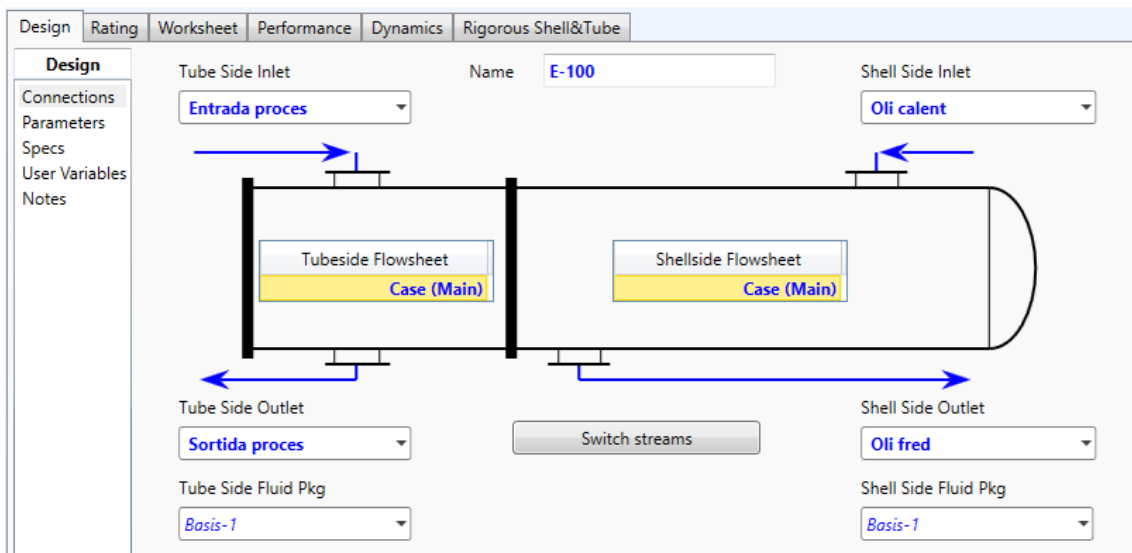


Figura 17: Simulador ASPEN HYSYS – Distribució dels corrents del BC-1003

Seguidament, obrint la pestanya de “worksheet”, es poden definir els cabals d’entrada, la temperatura, la pressió i les composicions. Aquestes condicions es poden observar a les figures 2 i 3. El programa calcula les altres composicions.

	Worksheet	Performance	Dynamics	Rigorous Shell&Tube
Name		Entrada proces	Sortida proces	Oli calent Oli fred
Vapour		0,1593	0,8911	1,0000 0,0000
Temperature [C]		25,00	115,0	270,0 86,84
Pressure [kPa]		2,666	1,083	2,666 1,183
Molar Flow [kgmole/h]		47,84	47,84	8,038 8,038
Mass Flow [kg/h]		6123	6123	2572 2572
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]		5,025	5,025	3,695 3,695
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]		-2,458e+005	-2,025e+005	-3,875e+005 -6,457e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]		-205,0	-61,85	2209 1655
Heat Flow [kJ/h]		-1,176e+007	-9,686e+006	-3,115e+006 -5,190e+006

Figura 18: Simulador ASPEN HYSYS – Condicions de temperatura, pressió i cabal

Worksheet	Performance	Dynamics	Rigorous Shell&Tube			
			Entrada proces	Sortida proces	Oli calent	Oli fred
H2O			0,0443	0,0443	0,0000	0,0000
Epichlohydrn			0,7210	0,7210	0,0000	0,0000
BisPhenol			0,0019	0,0019	0,0000	0,0000
BACH*			0,1056	0,1056	0,0000	0,0000
DCP*			0,1272	0,1272	0,0000	0,0000
Therminol 55*			0,0000	0,0000	1,0000	1,0000

Figura 19: Simulador ASPEN HYSYS – Composicions

Tot seguit, s’escull el model de bescanviador de calor “Rigorous Shell&Tube” i es marca la temperatura de sortida i la caiguda de pressió acceptable.

Design	Rating	Worksheet	Performance	Dynamics	Rigorous Shell&Tube
Design					
Connections					
Parameters					
Specs					
User Variables					
Notes					
Heat Exchanger Model					
Rigorous Shell&Tube					
Design Conditions					
Specified Duty [kJ/h]		<empty>			
		SHELL-SIDE		TUBE-SIDE	
Inlet Temperature [C]		270,0		25,00	
Specified Outlet Temperature [C]		<empty>		115,0	
Allowable Pressure Drop [kPa]		0,3000		0,5000	

Figura 20: Simulador ASPEN HYSYS – Model

Si s’obra la pestanya “Rigorous Shell&Tube”, i es fa click sobre “View EDR Browser...”, s’obrirà una pestanya amb tots els detalls del bescanviador. Aquí es pot escollir el TEMA, el pitch, el tipus de baffles, l’orientació i el material. A EPOHARZ el tema escollit és el BEM, el pitch triangular, els baffles de segmentària única, d’orientació vertical i el material tipus AISI-316L.

Configuration			
TEMA Type	B -	E -	M -
Tube layout option	New (optimum) layout		
Location of hot fluid	Shell side		
Tube OD / Pitch	mm	19,05	/ 23,81
Tube pattern	30-Triangular		
Tubes are in baffle window	Yes		
Baffle type	Single segmental		
Baffle cut orientation	Vertical		
Default exchanger material	SS 316L	9	

Figura 21: Simulador ASPEN HYSYS – Configuració

Un cop definits tots els paràmetres, el programa ja pot prosseguir amb la simulació. Dins la carpeta de “Results Summary”, al “TEMA Sheet”, es troben totes les especificacions del bescanviador.

Heat Exchanger Specification Sheet									
1	Company:								
2	Location:								
3	Service of Unit:				Our Reference:				
4	Item No.:				Your Reference:				
5	Date:		Rev No.:		Job No.:				
6	Size :		600 - 1200 mm		Type:		BEM Horizontal		Connected in: 1 parallel 1 series
7	Surf/unit(eff.)		33,8 m ²		Shells/unit		1		Surf/shell(eff.) 33,8 m ²
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT								
9	Fluid allocation			Shell Side			Tube Side		
10	Fluid name			Oli calent-> Oli fred			Entrada proces-> Sortida proces		
11	Fluid quantity, Total			kg/s			0,7144		
12	Vapor (In/Out)			kg/s			0,7144 0 0,1549 1,1127		
13	Liquid			kg/s			0 0,7144 1,546 0,5881		
14	Noncondensable			kg/s			0 0 0 0		
15									
16	Temperature (In/Out)			°C			270 86,84 25 120,46		
17	Bubble / Dew point			°C			235,02 / 235,02 215,26 / 215,26 14 / 344,85 0,12 / 320,74		
18	Density Vapor/Liquid			kg/m ³			0,19 / / 647,09 0,08 / 1223,35 0,03 / 1157,92		
19	Viscosity			cp			0,0057 / / 1,2514 0,0073 / 9,6317 0,0092 / 63,7378		
20	Molecular wt, Vap						320 73,19 94		
21	Molecular wt, NC								
22	Specific heat			kJ/(kg-K)			2,976 / / 2,63 0,953 / 1,287 1,096 / 1,435		
23	Thermal conductivity			W/(m-K)			0,0262 / / 0,1191 0,0106 / 0,1355 0,0149 / 0,1252		
24	Latent heat			kJ/kg			272,8 273,8 512,4 361,4		
25	Pressure (abs)			kPa			2,666 1,183 2,666 1,083		
26	Velocity (Mean/Max)			m/s			49,69 / 128,44 37,75 / 361,99		
27	Pressure drop, allow./calc.			kPa			0,3 30,788 0,5 13,555		
28	Fouling resistance (min)			m ² -K/W			0 0 0 Ao based		
29	Heat exchanged		576,4 kW		MTD (corrected)		138,6 °C		
30	Transfer rate, Service		122,9		Dirty		122,5		Clean 122,5 W/(m ² -K)
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL						Sketch		
32				Shell Side		Tube Side			
33	Design/Vacuum/test pressure			kPa		300 / / 300 / /			
34	Design temperature			°C		305 150			
35	Number passes per shell					1 1			
36	Corrosion allowance			mm		0 0			
37	Connections		In mm		1 154,05 / -		1 26,64 / -		
38	Size/Rating		Out		1 102,26 / -		1 254,51 / -		
39	ID		Intermediate		/ -		/ -		
40	Tube #: 507		OD: 19,05		Tks. Average 1,65 mm		Length: 1,2 m		Pitch: 23,81 mm Tube pattern: 30
41	Tube type: Plain		Insert: None		Fin#: #/m		Material: SS 316L		
42	Shell SS 316L		ID 0,6		OD 0,62		m Shell cover -		
43	Channel or bonnet SS 316L						Channel cover -		
44	Tubesheet-stationary SS 316L						Tubesheet-floating -		
45	Floating head cover -						Impingement protection None		
46	Baffle-cross SS 316L		Type		Single segmental		Cut(%d) 15,63		Ve Spacing: c/c 0,12 m
47	Baffle-long -		Seal Type				Inlet		257,47 mm
48	Supports-tube U-bend		0				Type		
49	Bypass seal				Tube-tubesheet joint		Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')		
50	Expansion joint -				Type		None		
51	RhoV2-Inlet nozzle 7754		Bundle entrance		8564		Bundle exit		3 kg/(m-s ²)
52	Gaskets - Shell side -				Tube side		Flat Metal Jacket Fibe		
53	Floating head -								
54	Code requirements		ASME Code Sec VIII Div 1		TEMA class		R - refinery service		
55	Weight/Shell		1090,6		Filled with water		1522,9		Bundle 622,3 kg
56	Remarks								
57									
58									

Figura 22: Simulador ASPEN HYSYS – Full d'especificacions

Finalment, dins de “Mechanical Summary”, si es dirigeix cap a “Setting Plan & Tubesheet Layout”, s’obindrà una representació del bescanviador amb les seves mides i la distribució dels tubs. Al Capítol 2: Manual de càlculs, es troben els fulls d’especificacions dels altres bescanviadors, on s’ha seguit el mateix procediment.

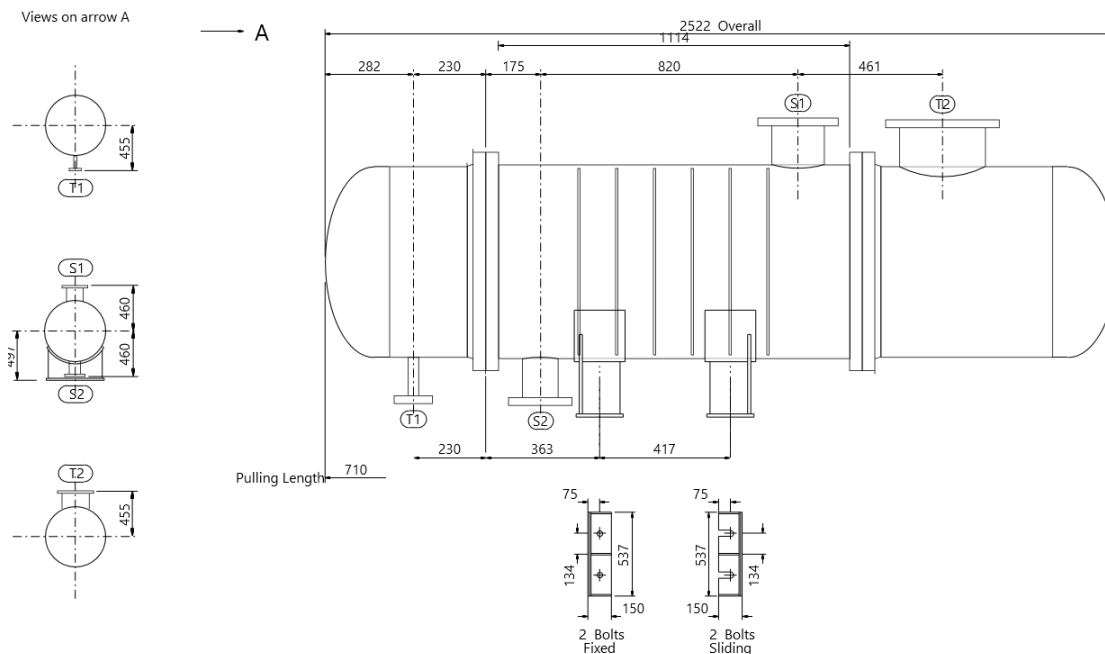


Figura 23: Simulador ASPEN HYSYS – Mida del bescanviador

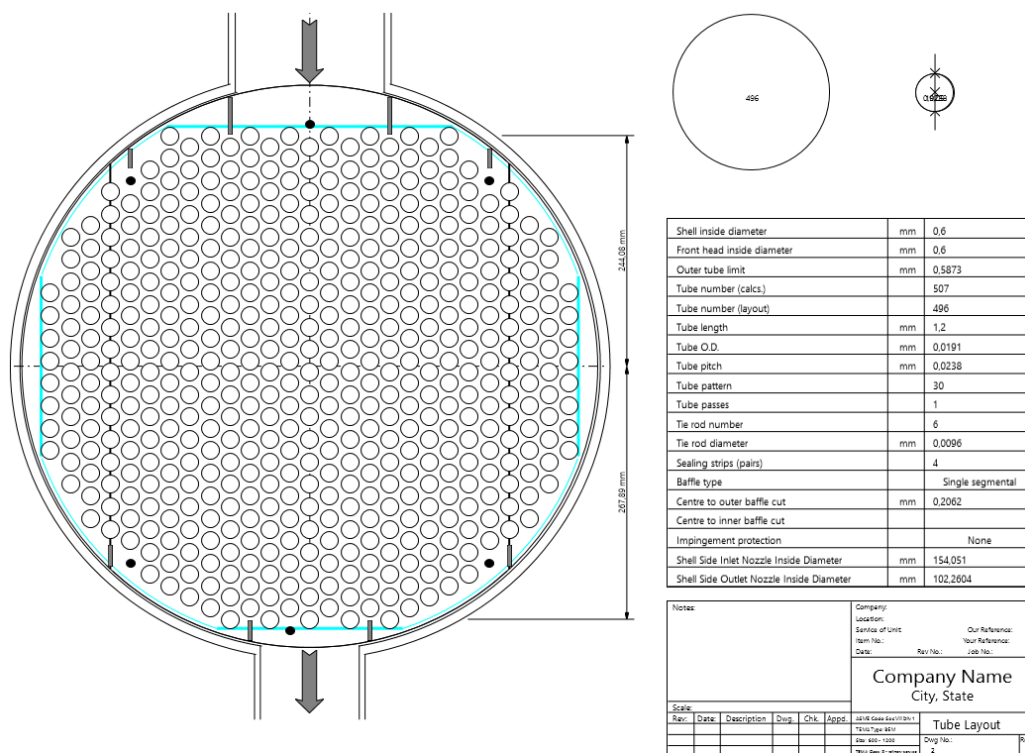


Figura 24: Simulador ASPEN HYSYS – Distribució dels tubs

Un cop dissenyat la primera part de l'evaporador, és a dir, el bescanviador, també amb l'Aspen HYSYS, es dissenya un separador per tal de conèixer les composicions de sortida de vapor i líquid de l'evaporador, així com els corrents pertinents. A continuació es mostra una taula resum amb els resultats obtinguts.

Taula 47: Cabals màssics EV-1001

Cabals màssics (kg/h)		
Entrada	Vapor	Líquid
6124,4	4014,8	2109,6

Taula 48: Fraccions molars EV-1001

	Fraccions molars HYSYS		
	Entrada	Líquid	Vapor
BPA	0,0019	0,018	0
ECH	0,7210	0	0,8079
BTMAC	0,0000	0	0
H2O	0,0442	0	0,0495
BACH	0,1056	0,982	0
DCP	0,1272	0	0,1426

11.9 Columna de rectificació

La columna de rectificació està dissenyada per a la separació de mesclures líquides, els components de les quals tenen diferents punts d'ebullició. Dins la columna hi ha plats que s'utilitzen per millorar la separació dels components. A la part inferior hi ha un reboiler el qual proporciona la vaporització necessària per al procés de rectificació, i a la part superior hi ha un condensador per refredar i condensar el vapor que surt per la part superior de la columna. Finalment hi ha un tambor de reflux per mantenir el vapor condensat des de la part superior de la columna de manera que el líquid (reflux) es pugui reciclar de nou a la columna.

A EPOHARZ s'utilitza la columna de rectificació per separar l'ECH i DCP, d'aquesta manera es pot reutilitzar l'ECH pel procés de producció de la resina epoxi i el DCP es pot valoritzar i vendre com a subproducte.

Per dissenyar-la es requereix un simulador com és Aspen Exchanger Design & Rating V10, conegut com a HYSYS, de la casa comercial AspenTech.

11.9.1 Consideracions pel disseny

La primera consideració a tenir en compte és escollir entre una columna de plats i una de rebliment o empacada.

Una columna amb plats és un recipient a pressió cilíndric vertical on el vapor i el líquid, que flueixen a contracorrent, es posen en contacte amb els plats o plaques que proporcionen un contacte íntim del líquid amb el vapor per afavorir la ràpida transferència de massa. Un exemple del funcionament dels plats es mostra a la figura 1. El líquid flueix per cada plat, per sobre d'un presa de sortida, i en un baixador, que agafa el líquid per gravetat a la safata de sota. El gas flueix cap amunt a través de les obertures de cada plat, fent bombolles pel líquid de la safata produint una escuma.

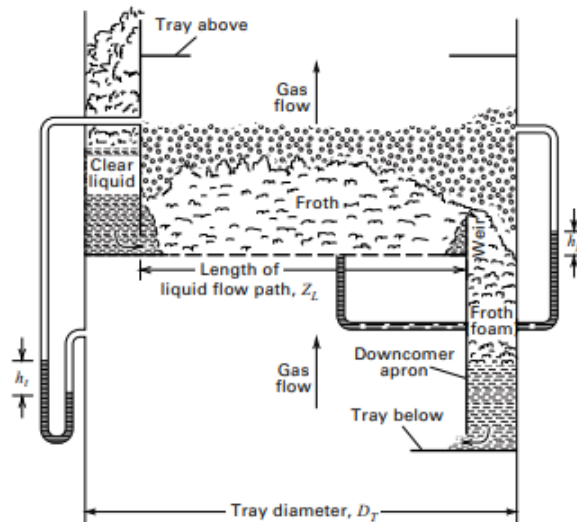


Figura 25: Detalls d'una columna de plats

A més a més, hi ha diferents tipus d'obertures dels plats per deixar passar el vapor. A la taula 1, els tipus de plats es comparen en funció del cost, caiguda de pressió, eficiència de transferència de massa, capacitat de vapor i flexibilitat dels tipus de plats convencionals. La flexibilitat d'operació ve donada en termes de ràtio d'activació (proporció de la màxima a mínima capacitat de flux de vapor).

Taula 49: Comparació del tipus de plats

	Sieve Trays	Valve Trays	Bubble-Cap Trays
Relative cost	1.0	1.2	2.0
Pressure drop	Lowest	Intermediate	Highest
Efficiency	Lowest	Highest	Highest
Vapor capacity	Highest	Highest	Lowest
Typical turndown ratio	2	4	5

A causa del seu baix cost, les safates de garbell són preferents, tret que es requereixi flexibilitat en el rendiment, aleshores les els plats de vàlvules són els millors. Els plats amb tapa de bombolles, son predominants en instal·lacions anteriors a 1950, ara s'especifiquen poques vegades, però es poden preferir quan s'ha de controlar la retenció de líquids per proporcionar temps de residència per a una reacció química o quan s'ha de

prevenir que una petita fracció de líquid caigui fins al plat inferior a través de les perforacions del plat.

Pel que fa a la columna amb rebliment, tal i com s'observa de forma esquemàtica a la figura 2, és una columna vertical i cilíndrica que conté una o més seccions de rebliment sobre a les superfícies on el líquid flueix de manera descendent com una pel·lícula a rebliment i parets, o com gotes entre els elements de rebliment. L'aliment de gas entra per la part inferior i passa per un distribuïdor de vapor, i flueix cap a dalt a través del rebliment mullat, aleshores pren contacte amb el líquid i arriba a la part superior. El líquid entra per la part superior a un distribuïdor de líquid, flueix cap avall a través del rebliment i es recull a la part inferior de la columna. A la figura 2 també es poden veure seccions que contenen rebliment a l'atzar i rebliment estructurat. Cada secció amb rebliment es troba entre un plat de suport, que aguanta el rebliment, i un limitador de llit, que impedeix el moviment del rebliment. Un redistribuïdor de líquid assegura una distribució uniforme del líquid a través de l'àrea de secció transversal de la columna a mesura que entra la secció amb rebliment. Si l'alçada de rebliment entre els redistribuïdors és superior a 6 m, el líquid podria dirigir-se cap a baix a prop de la paret, on la resistència és mínima, mentre el gas puja pel centre de la columna. Aquest fet redueix el contacte entre líquid i vapor i augmenta l'alçada equivalent a un plat teòric.

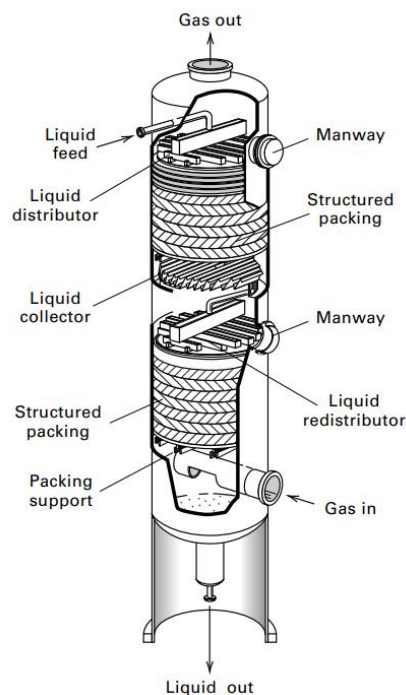


Figura 26: Detalls interns d'una columna de rebliment

El rebliment a l'atzar és preferent quan el diàmetre de la columna és menor a 0,61 m i l'alçada amb rebliment inferior a 6,1 m. Les columnes amb rebliment son favorables per fluids corrosius, fluids que produeixen moltes escumes, operacions al buit o caigudes de pressió altes i serveis que es beneficien si hi ha retenció de líquid a la columna. En cas contrari, l'ús de columnes de plats és millor degut a que es poden dissenyar de manera més fiable. Per tant, a EPOHARZ s'utilitzarà una columna de plats per les raons exposades, ja que el diàmetre de la columna és superior a 0,61 m, no es treballen amb fluids corrosius i no s'opera al buit ni hi ha caigudes de pressió, a més de que és una opció més favorable econòmicament i té un cost de manteniment i neteja menor degut a la facilitat d'extreure els plats.

A la taula 1, s'observen les composicions del corrent d'entrada a la columna, l'objectiu d'aquesta és separar el DCP de l'ECH per a poder reutilitzar la ECH al procés productiu.

Taula 50: composició del corrent d'entrada de la columna CR-1201

Component	Fracció molar
ECH	0,808
H2O	0,049
DCP	0,143

11.9.2 Disseny amb Aspen HYSYS

A partir d'una aproximació pel mètode Shortcut es procedeix a realitzar el mètode rigorós de la columna de rectificació CR-1201. Per a la simulació en Aspen HYSYS del mètode esmentat cal poder definir el cabal d'entrada d'alimentació a partir del balanç de matèria realitzat, la composició, la temperatura, la pressió, el plat d'entrada. També, cal tenir en compte si és un condensador total o parcial. Pel disseny d'aquesta columna, s'ha decidit simular el disseny amb condensador total. Finalment, dos factors importants per tenir en compte són la relació de reflux (reflux ratio) i el cabal de destil·lat.

Sabent que l'objectiu principal és obtenir un corrent d'ECH lliure de DCP, es realitzen varies simulacions per a assolir aquest requeriment.

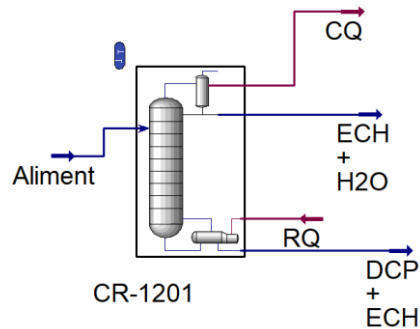


Figura 27: Esquema de la columna CR-1201 amb Aspen HYSYS

A la figura 4 es poden observar les condicions inicials d'operació de la columna, sabent que treballa a pressió atmosfèrica i a reflux total al condensador, el que implica que tot el producte que s'extreu és en forma gasosa i tot el líquid és recirculat dins la columna, per així obtenir una major puresa en el producte.

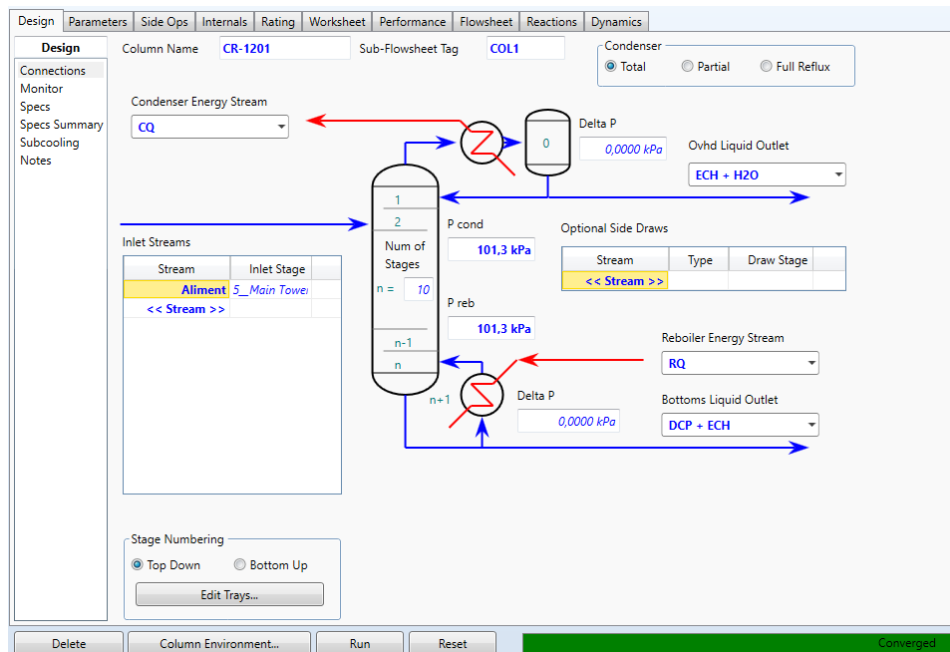


Figura 28: Condicions d'operació de la columna CR-1201

A la figura 5, s'observa la variació de la temperatura al llarg de la columna. La temperatura al reboiler és la més alta, mentre que al condensador es troba la temperatura més baixa. El qual és lògic ja que l'ECH té un punt de vaporització més baix que el DCP, per tant, la ECH es recull als caps, on es troba el condensador.

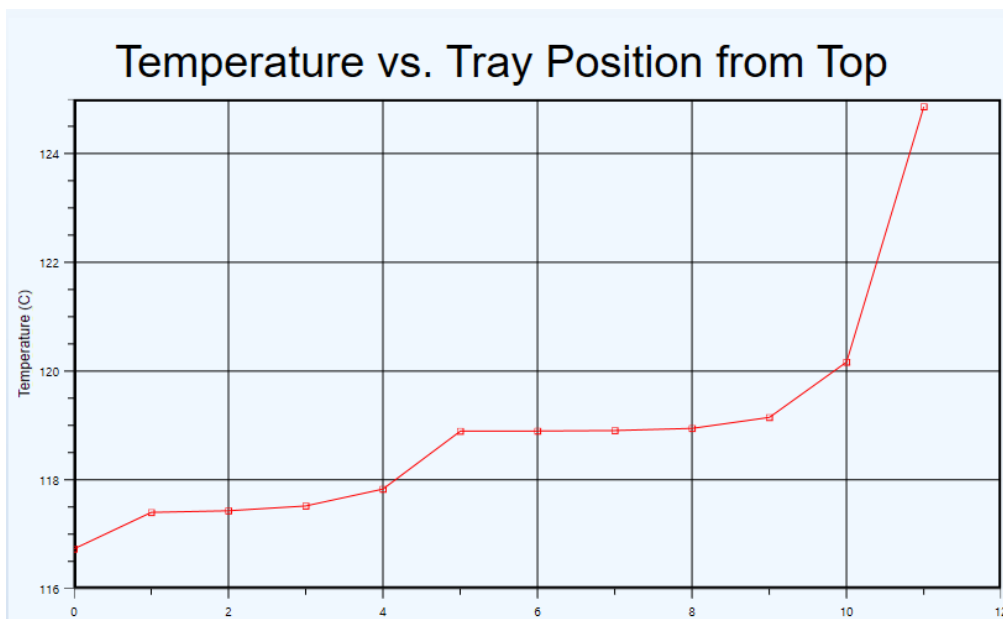


Figura 29: Representació de la temperatura (°C) al llarg de la columna CR-1201

Tot seguit, a la figura 6 es visualitza com la pressió es manté constant a 101,3 kPa al llarg de la columna.

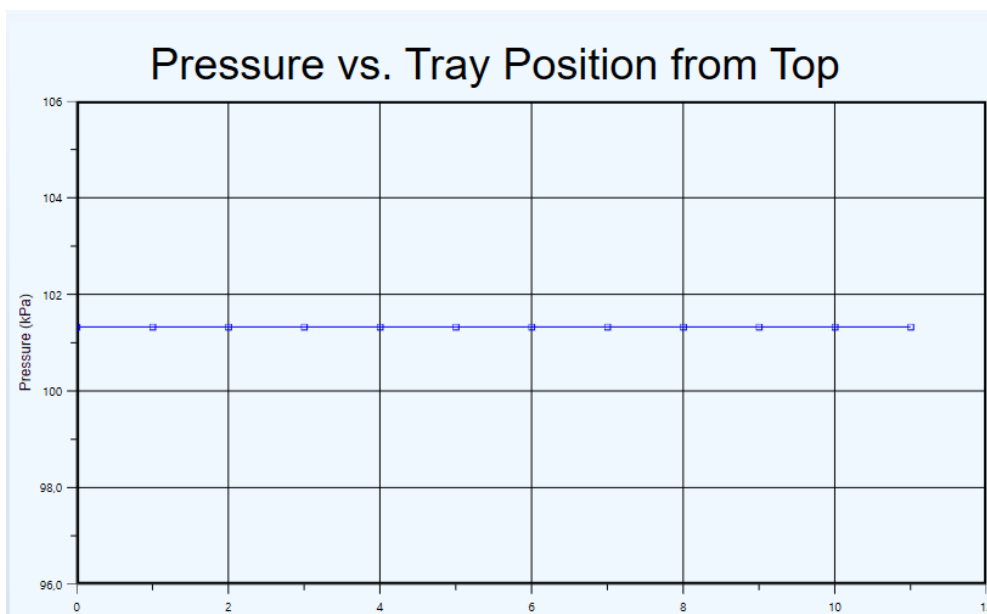
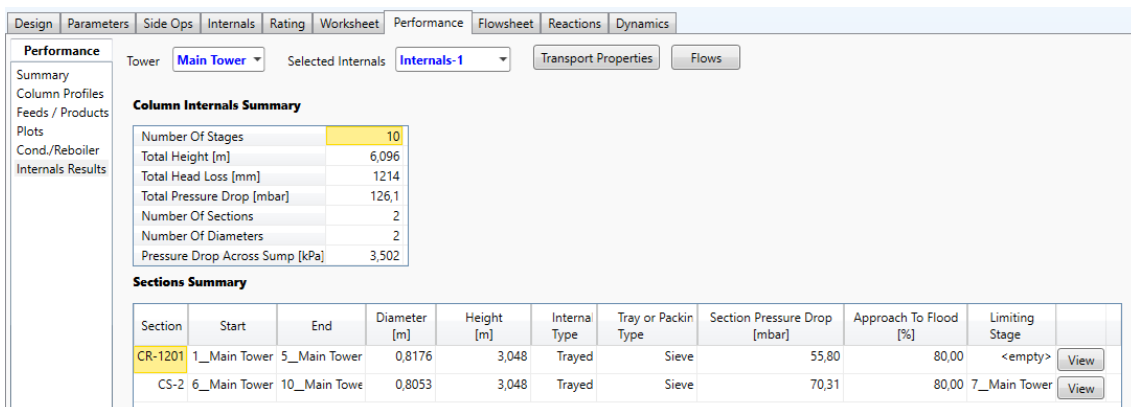


Figura 30: Representació de la pressió (kPa) al llarg de la columna CR-1201

Si ens dirigim a la pestanya de “Internals”, amb les especificacions donades, el mateix programa ens detalla el disseny dels plats, el diàmetre, alçada de la columna i els espais entre els plats, etc. Degut a l’explicació del punt 1.1, s’escull el tipus de plat de grabell o “Sieve” ja que tenen una construcció senzilla y un cost inferior.

A la figura 7 s’observa com l’alçada de la columna son 6,096 m i que la distància entre plats no varia en les seccions.



Column Internals Summary

Number Of Stages	10
Total Height [m]	6,096
Total Head Loss [mm]	1214
Total Pressure Drop [mbar]	126,1
Number Of Sections	2
Number Of Diameters	2
Pressure Drop Across Sump [kPa]	3,502

Sections Summary

Section	Start	End	Diameter [m]	Height [m]	Internal Type	Tray or Packin Type	Section Pressure Drop [mbar]	Approach To Flood [%]	Limiting Stage	
CR-1201	1_Main Tower	5_Main Tower	0,8176	3,048	Trayed	Sieve	55,80	80,00	<empty>	View
CS-2	6_Main Tower	10_Main Tower	0,8053	3,048	Trayed	Sieve	70,31	80,00	7_Main Tower	View

Figura 31: Disseny mecànic de la columna CR-1201

A les figures 8 i 9 es visualitzen les geometries de les seccions. Des del plat 1 al 5, hi ha un pas per plat, mentre que del plat 6 al 10, es poden posar 3 passos per plat. Posant 3 passos per plat, es millora la utilització de l’àrea de la torre pel flux descendent. Proporcionant suficient àrea i volum per al despreniment de gas-liquid a la part superior de la baixada, estrenyent-se gradualment a mesura que el gas es desprèn, minimitzant la pèrdua d’àrea de bombolleig al peu de la baixada.

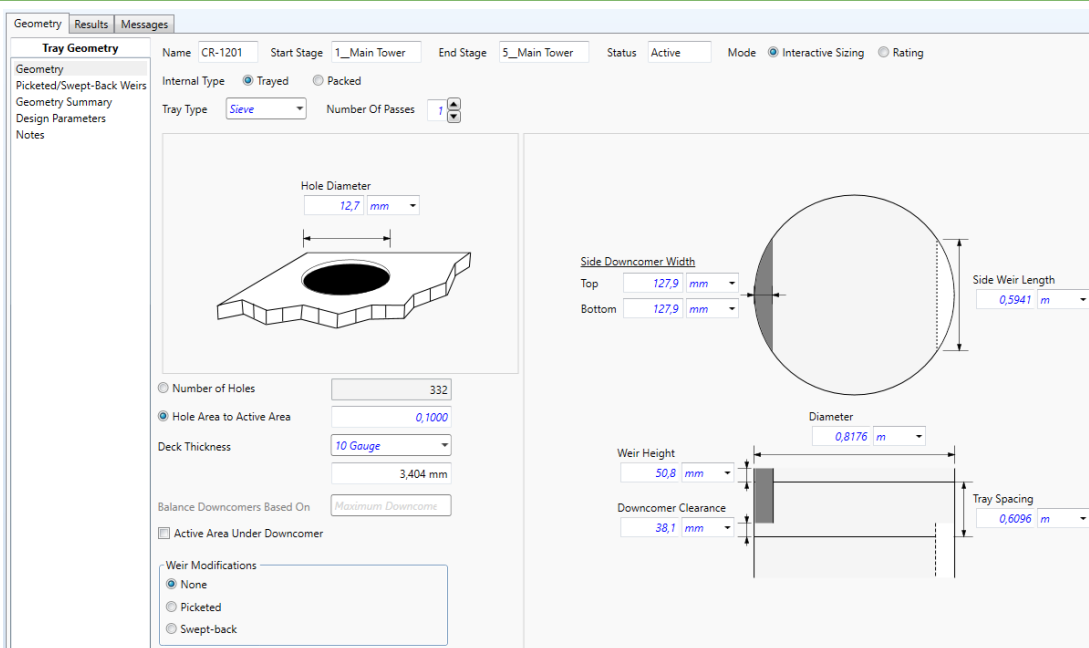


Figura 32: Característiques geomètriques del plat 1 al 5 de la columna CR-1201

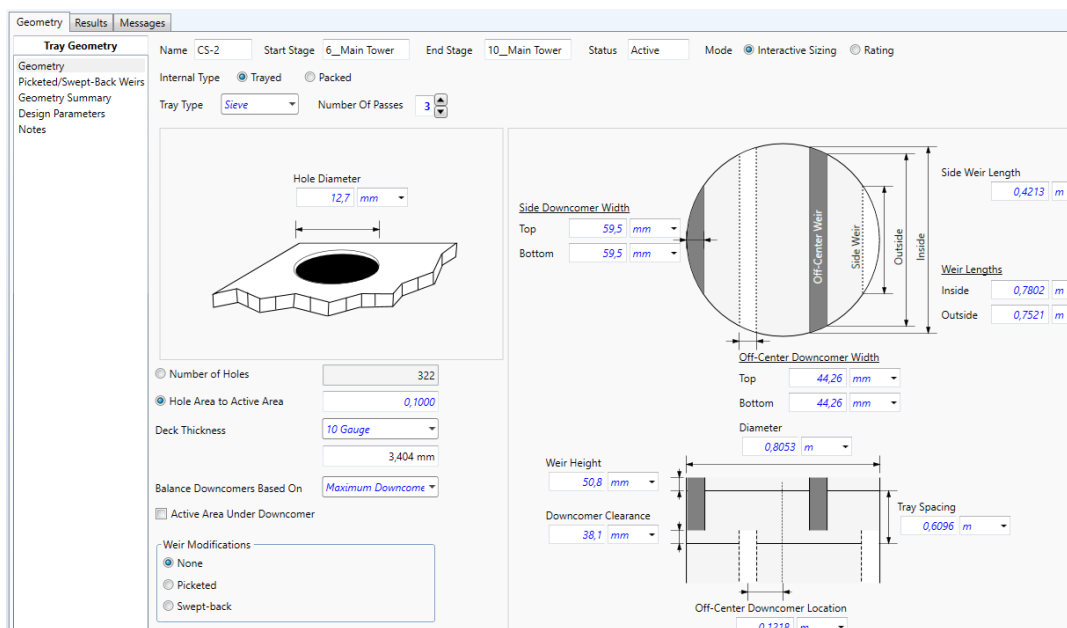


Figura 33: Característiques geomètriques del plat 6 al 10 de la columna CR-1201

A continuació es mostra una taula resum dels resultats obtingut de la simulació amb Aspen HYSYS.

Taula 51: Disseny amb HYSYS de la columna CR-1201

	ENTRADA	CAPS	CUES
Temperatura (°C)	60,6	116,7	124,9
Pressió (kPa)	101,3	101,3	101,3
Cabal molar (kmol/h)	42,69	36,26	6,43
Cabal màssic (kg/h)	4014,75	3197,61	817,14
Densitat (kg/m ³)	1154	1051	1099
FRACCIONS MOLARS			
ECH	0,808	0,942	0,054
H ₂ O	0,049	0,058	0
DCP	0,143	0	0,946
GEOMETRIA			
Seccions	Plats 1-5	Plats 6-10	
Tipus de plat	Sieve		
Passos per plat	1	3	
Número d'orificis	325	315	
Diàmetre dels orificis (mm)	12,7	12,7	
Alçada safata (mm)	50,8	50,8	
Distància entre plats (m)	0,6096	0,6096	
Diàmetre (m)	0,8094	0,7971	
Alçada secció (m)	3,05	3,05	
Alçada columna (m)	6,1		
Diàmetre columna (m)	1,5		

11.9.3 Disseny mecànic

11.9.3.1 Pressió de disseny

La pressió de disseny és calculada mitjançant la suma de la pressió d'operació i la pressió hidrostàtica per saber la pressió total que pot suportar la columna.

Equació 77

$$P_d = 1,15 \cdot (P_{op} + P_h)$$

On:

- P_d = pressió de disseny (atm).
- P_{op} = pressió d'operació (atm).
- P_h = pressió hidrostàtica (atm).

La pressió hidrostàtica és la pressió que ve donada pels pes del fluid en repòs. En aquest cas s'ha realitzat un sobredimensionament del 15% per a que el tanc tingui la resistència suficient.

Equació 78

$$P_h = \rho_{mescla} \cdot g \cdot H$$

On:

- ρ_{mescla} = densitat de la mescla (kg/m^3).
- g = força de la gravetat (m/s^2).
- H = altura del tanc (m).

$$P_h = \rho_{mescla} \cdot g \cdot H = 1154 \cdot 9,8 \cdot 6,1 = 68940,9 \text{ Pa} = 0,68 \text{ atm}$$

$$P_d = 1,15 \cdot (P_{op} + P_h) = 1,15 \cdot (1 + 0,69) = 1,93 \text{ atm}$$

La pressió de disseny de la columna és de 1,93 atm.

11.9.2.2 Temperatura de disseny

La temperatura de disseny es calcula tenint en compte les temperatures inferior i superior a les que segons l'Aspen HYSYS arriba la columna. De la mateixa manera que es sobredimensiona l'equip a efectes de pressió, es realitza el mateix a efectes de temperatura. Per tant, la temperatura de disseny serà superior a la temperatura d'operació.

Equació 79

$$T_{d,inf} = T_{op,inf} + 15^\circ\text{C}$$

Equació 80

$$T_{d,sup} = T_{op,sup} + 15^\circ\text{C}$$

On:

- $T_{d,inf}$ = temperatura de disseny inferior ($^\circ\text{C}$).
- $T_{d,sup}$ = temperatura de disseny superior ($^\circ\text{C}$).
- T_{op} = temperatura d'operació ($^\circ\text{C}$).

$$T_{d,inf} = 60,6 + 15^{\circ}C = 75,6^{\circ}C$$

$$T_{d,sup} = 124,9 + 15^{\circ}C = 139,9^{\circ}C$$

11.9.3.3 Espessor de la columna

Per al càlcul de l'espessor de la columna, s'ha utilitzat el formulari del codi ASME Section VIII Division 1¹⁶.

Per l'espessor del cos cilíndric es calcula mitjançant l'esforç tangencial que exerceix el fluid sobre la paret del recipient.

Equació 81

$$t_c = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P}$$

On:

- t_c = espessor cilindre (mm).
- P= pressió interna de disseny (atm).
- R= radi intern (mm).
- S= tensió màxima admissible (atm).
- E= factor de soldadura.

El límit elàstic S, és la tensió màxima a la que es pot sotmetre el material sense possibles deformacions permanents. Aquest és diferent per cada material, en aquest cas cal utilitzar acer inoxidable 316L, en el codi ASME la tensió màxima per aquest material és de 1136,37 atm.

El factor E de soldadura permet tenir en compte el possible error que pugui contenir el límit elàstic, és a dir, dimensiona el tanc en termes de tensió per assegurar que aquest no es deformi. En aquest cas, el valor és de 0,85.

$$t_c = \frac{1,93 \text{ atm} \cdot 750 \text{ mm}}{1367,9 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 1,93 \text{ atm}} = 1,5 \text{ mm}$$

Es sobredimensiona el valor de l'espessor del cilindre en un 50%.

$$t_c = 1,5 \cdot 1,5 = 2,25 \text{ mm}$$

Per calcular l'espessor del capçal, primer s'ha d'escollir el tipus. En aquest cas, s'ha escollit un capçal toriesfèric. A la següent figura es mostren les dimensions d'aquest capçal segons l'ASME.

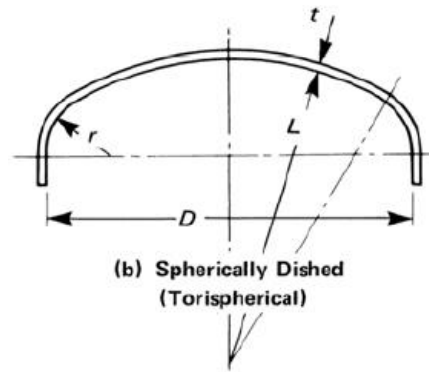


Figura 34: Espessor del capçal torisfèric

La fórmula per calcular l'espessor del capçal és la següent.

$$t_t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P}$$

On:

- t_t = espessor del capçal de la columna (mm).
- P = pressió interna de disseny (atm).
- L = radi de la corona (mm).
- M = factor característic.
- S = tensió màxima admissible (atm).
- E = factor de soldadura.

Amb la taula UG-37 de l'ASME, es pot calcular el radi de la corona, tenint en compte que K_1 és igual a 0,9.

Taula 52: Valor de la K_1

$D/2h$	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0
K_1	1.36	1.27	1.18	1.08	0.99	0.90	0.81	0.73	0.65	0.57	0.50

GENERAL NOTES:
 (a) Equivalent spherical radius = $K_1 D$; $D/2h$ = axis ratio.
 (b) For definitions, see 1-4(b).
 (c) Interpolation permitted for intermediate values.

Equació 82

$$L = 0,9 \cdot D$$

Equació 83

$$r = 0,085 \cdot L$$

$$L = 0,9 \cdot D = 0,9 \cdot 1500 = 1350 \text{ mm}$$

$$r = 0,085 \cdot 1350 = 114,75 \text{ mm}$$

Un cop calculat el radi de la corona i el radi intern de la curvatura dels costats, es calcula la relació L/r per a poder trobar el factor característic M .

$$\frac{L}{r} = \frac{1350}{114,75} = 11,76$$

Per al trobar el factor característic M , s'utilitza la taula 1-4.2 de l'ASME. La relació L/r de 11,76 no es troba a la taula, per tant, tal i com s'indica a la taula, s'agafa el valor més pròxim, en aquest cas, 12.

Taula 53: Valors del factor M

L/r	1.0	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22
L/r	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0
M	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50
L/r	9.5	10.00	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	$16\frac{2}{3}$ [Note (1)]
M	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77

GENERAL NOTE: Use nearest value of L/r ; interpolation unnecessary.
 NOTE:
 (1) Maximum ratio allowed by UG-32(j) when L equals the outside diameter of the skirt of the head.

Per una relació L/r de 12, el valor del factor M correspon a 1,62.

$$t_t = \frac{1,93 \text{ atm} \cdot 1350 \text{ mm} \cdot 1,62}{2 \cdot 1136,37 \text{ atm} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 1,93 \text{ atm}} = 2,19 \text{ mm}$$

Es sobredimensiona el valor de l'espessor del capçal en un 50%.

$$t_t = 2,19 \cdot 1,5 = 3,28 \text{ mm}$$

L'espessor del cilindre de la columna és de 2,25 mm i l'espessor del capçal de la columna és de 3,28 mm. L'espessor de l'equip serà el valor més elevat entre l'espessor del cilindre i del capçal. En aquest cas l'espessor de l'equip és 3,28 mm.

Com el fons i el capçal del cilindre són toriesfèrics es calcula les seves variables segons el model Kloppe.

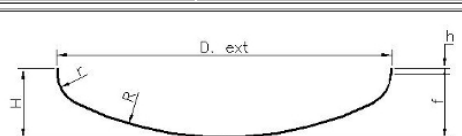
Equació 84

$$D_E = D_I + 2 \cdot t_c$$

$$D_E = 1912,4 \text{ mm} + 2 \cdot 3,26 \text{ mm} = 1915,4 \text{ mm}$$

Un cop obtinguts el valor del diàmetre extern i de l'espessor, s'utilitza la calculadora per dimensionar un fons toriesfèric tipus Kloppe segons el DIN-2011. de l'empresa HORFASA⁹.

Taula 54: Calculadora de fons Kloppe

Calculadora de fondos KLOPPER	
Diametro exterior (mm)	1503.00458
Espesor (mm)	3.28222882
 <p>fondo Toriesferico Tipo KLOPPER</p>	
Diametro disco (mm)	1687
R (mm)	1503.0046
r (mm)	150.30046000
h (mm) >=	11.4877
f (mm)	289
H (mm)	304
V (sin h) (litros)	335.1
Peso (h minima) (kg)	59
<input type="button" value="Calcular"/>	
<small>HORFASA no se responsabiliza de la precision de estas medidas.</small>	

Per tant, el volum del fons Kloppe és de 335,1 L, és a dir, 0,34 m³.

11.9.3.4 Volum de l'equip

Per poder calcular el volum total de l'equip calculem el volum del cilindre, del capçal i del fons.

Equació 85

$$V_{equip} = V_{cil} + V_{cap} + V_{fons}$$

Equació 86

$$V_{cil} = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot D_I^2$$

$$V_{cil} = \frac{\pi}{4} \cdot 6,1 \cdot 1,5^2 = 10,77 \text{ m}^3$$

$$V_{equip} = 10,77 + (2 \cdot 0,34) = 11,44 \text{ m}^3$$

11.9.3.5 Pes de l'equip

Per calcular la massa de l'equip buit caldrà calcular la massa del cilindre i del fons i capçal torièsfèric.

Equació 87

$$M_{cil} = \pi \cdot H \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot \rho_{material}$$

$$M_{cil} = \pi \cdot 6 \cdot (1,503^2 - 1,5^2) \cdot 8030 = 1387,56 \text{ Kg}$$

Seguidament es calcula el pes del capçal mitjançant el volum d'una semiesfera. El pes del capçal i del fons seran el mateix.

Equació 88

$$M_{cap} = \frac{2}{3} \pi \cdot (D_{ext}^3 - D_{int}^3) \cdot \rho_{material}$$

$$M_{cap} = \frac{2}{3} \pi \cdot (1,503^3 - 1,5^3) \cdot 8030 = 341,77 \text{ Kg}$$

Equació 89

$$M_{equip} = M_{cil} + 2 \cdot M_{cap}$$

$$M_{equip} = 1387,56 + 2 \cdot 341,77 \text{ Kg} = 2071,1 \text{ Kg}$$

Per calcular la massa d'operació caldrà sumar la càrrega del tanc:

Equació 90

$$M_{op} = M_{equip} + (V_{fluid} \cdot \rho_{fluid})$$

$$M_{op} = 2071,1 + (13,24 \cdot 1154) = 14502,6 \text{ Kg}$$

11.9.3.6 Aïllament

Degut a que la columna treballa a temperatures elevades i per prevenir la pèrdua de calor i millorar l'eficiència, s'afegeix una capa d'aïllament. El material que es fa servir de manera més comú és la llana de roca, el qual es un material amb una estructura fibrosa multidireccional que el permet retenir l'aire al seu interior, evitant que s'escapi la calor.

Equació 91

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_E}\right)^{1/4}} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{124,9 - 60,6}{15,03}\right)^{1/4}} = 27,93 \text{ cm}$$

11.9.3.7 Taula resum de resultats

Taula 55: Disseny columna CR-1201

MATERIAL		COLUMNA	
Tipus	Acer inoxidable 316L	Estoc	1 lot
Límit elàstic (S) (atm)	1136,37 a	Numero de columnes	1
Factor de soldadura (E)	0,85	Volum (m ³)	13,24
TEMPERATURA		Diàmetre intern	1,5
Temperatura de disseny inferior (°C)	75,6	Diàmetre extern	1,503
Temperatura de disseny superior (°C)	139,9		

PRESSIÓ		ESPESSOR	
		Espessor del cilindre	2,23 mm
Pressió d'operació	1 atm	K1	0,9
Pressió hidrostàtica	0,68 atm	L/r	12
Pressió de disseny	1,93 atm	M	1,62
VOLUM DE L'EQUIP		Espessor del capçal	3,28 mm
Volum cilindre	10,77 m ³	DIMENSIONS FONTS KOPPLER	
Volum capçal	0,34 m ³	Alçada del fons	0,304 m
Volum equip	11,44 m ³	Radi de la curvatura	0,150 m
PES DE L'EQUIP		Diàmetre de la tapa	1,687 m
Pes del cilindre	1387,56 kg	Volum del fons	0,34 m ³
Pes del capçal	341,77 kg	Espessor	3,28 mm
Pes equip	2071,1 kg	DISSENY DE L'ÀLLAMENT	
Pes d'operació	14502,6 kg	Gruix (cm)	5,79

11.10 Osmosi inversa

Els equips d'osmosi inversa, contenen una membrana semi-permeable i serveixen per eliminar ions, molècules i partícules més grans que l'aigua. A EPOHARZ s'utilitzarà un equip d'osmosis inversa per a concentrar els corrents de salmorra que surten dels reactors RE-1101 i RE-1102 per així facilitar l'assecat posterior a l'atomitzador.

L'osmosi inversa funciona utilitzant una bomba d'alta pressió per incrementar la pressió del corrent de sal i forçar a l'aigua a creuar la membrana semi-permeable, aconseguit així deixar enrere fins a un 99% de les sals dissoltes. La quantitat de pressió requerida depèn de la concentració de sals al corrent d'entrada. Contra més concentrat, més pressió es necessita.

L'aigua dessalada s'anomena aigua permeada. L'aigua del corrent que conté la concentració elevada de sals i que no passa per la membrana s'anomena el concentrat.

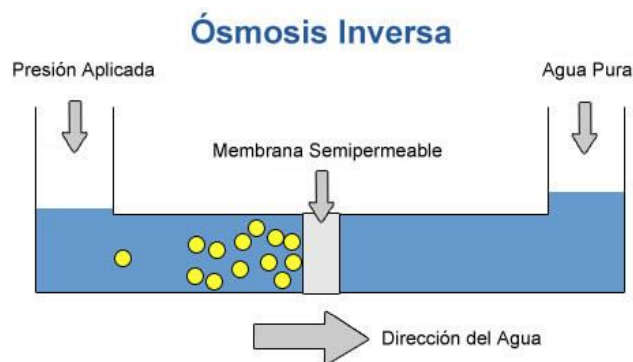


Figura 35: Esquema osmosis inversa

Primerament, es marquen unes característiques de disseny que són primordials per a poder escollir l'equip que les satisfaci. A continuació es mostren els pesos màssics dels corrents de salmorra que surten de les decantacions dels reactors RE-1101 i RE-1102 així com el total de la suma d'aquests i amb la densitat de cada compost, es calcula el volum de cada component i el total.

Taula 56: Característiques d'entrada a l'equip OI-1201

Abreviació	RE-1101	RE-1102	SUMA	
	Pes màssic (kg)	Pes màssic (kg)	Pes màssic (kg)	Volum (L)
H ₂ O	5384,01	4935,4	10319,4	10340,1
NaOH	77,9	426,1	540,04	236,6
NaCl	1534,1	1951,6	3485,7	1613,8
Total	6996,02	7313,14	14309,2	12190,5

Estudiant el diagrama de Gantt del procés, es considera que l'osmosi inversa ha de trigar un màxim de 5h per a poder operar-la en continu amb els lots consecutius. Per tant, dividint el pes màssic i el volum totals entre les cinc hores, s'obté el cabal màssic i volumètric que ha de tenir l'equip. El cabal màssic correspon a 2861,8 kg/h i el cabal volumètric a 2438,1 L/h.

A EPOHARZ s'ha decidit comprar l'equip d'osmosi inversa a l'empresa IDEAGUA. Estudiant el catàleg, l'equip que compleix la condició del cabal és l'OI3180²⁰. Tot seguit es mostra una imatge i una taula amb les especificacions d'aquest equip.

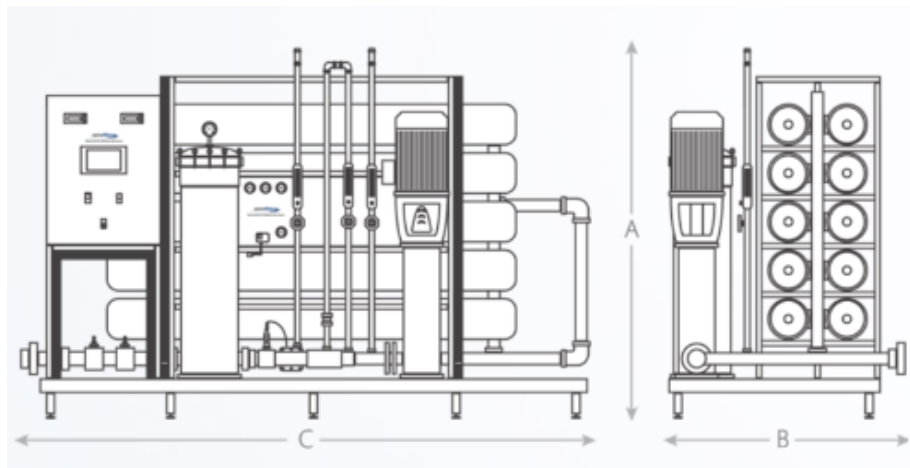


Figura 36: Esquema de l'equip d'osmosi inversa

Taula 57: Dades tècniques de l'equip d'osmosis inversa

Producció (L/h)	2500 L/h
Potència elèctrica (kW)	4,5 kW
Mida de la membrana (mm)	3x80x4
Portamembranes	PRFV/GRP 3x(80x40)-1E
Dimensions (A) (mm)	1850
Dimensions (B) (mm)	1000
Dimensions (C) (mm)	2750
Nombre de membranes	3
Temperatura de l'aigua	25°C
Percentatge d'eliminació de sals	Fins al 99,6%
Pressió dinàmica mínima d'entrada (bar)	2,5
Alimentació del quadre elèctric i bomba	400V/50Hz
Alimentació elèctrica	230V/50Hz
Pressió de treball (bar)	Entre 6 i 14
Preu (€)	23087

Finalment, les composicions del corrent de concentrat, suposant que es pot concentrar fins a un 95%, son les següents.

Taula 58: Composicions sortida Osmosis Inversa

Abreviació	Sortida OI (kmol)	Sortida OI (kg)	Sortida OI (L)	Fracció molar
H ₂ O	2,86	51,6	53,3	0,04
NaOH	11,97	478,8	358,1	0,17
NaCl	56,66	3311,4	3068,01	0,79
Total	71,5	3841,9	3479,4	1

Per tant, el cabal de sortida del corrent concentrat és de 695,9 L/h. Aquest correspondrà amb el cabal d'entrada a l'atomitzador.

11.11 Atomitzador

L'atomitzador o "spray dryer" és l'equip que s'utilitzarà per a assecat el NaOH i NaCl provinents de la salmorra, i on prèviament s'ha concentrat el corrent a l'equip d'osmosi inversa. Es concentra el corrent per així tenir una quantitat inferior d'aigua a evaporar.

El principi de treball de l'atomitzador és l'assecat per polvorització a un corrent d'aire calent que deshidrata. Per a descriure el procés. S'utilitza la figura 3 com a referència.

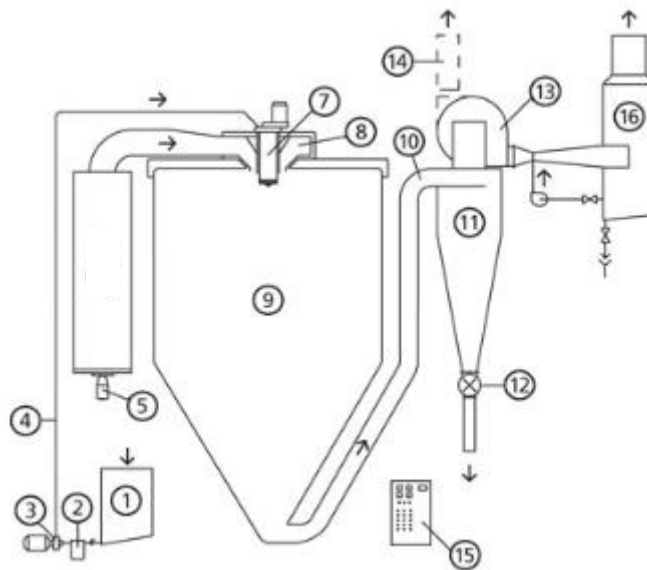


Figura 37: Esquema de l'atomitzador

El producte líquid es troba al tanc d'alimentació (1). A través d'un filtre de producte (2), és impulsat per la bomba (3) i pel conjunt de canonades i accessoris (4) fins a l'atomitzador (7). La resistència (5) proveeix la temperatura necessària pel corrent d'aire calent, que forçat pel ventilador (13), circula a través del dispersor (8) distribuint-se uniformement a voltant del disc de l'atomitzador (7), del qual flueix líquid polvoritzat. Quan aquest últim xoca amb l'aire calent l'assecat es produeix de forma gairebé instantània degut a la mida de la gota. El producte sòlid cau en forma de pols a l'interior de la càmera d'assecat (9), sent aspirat pel ventilador (13), és transportat per la canonada d'interconnexió (10) fins al cicló (11) que és l'encarregat de separar el pols de l'aire i extraure'l com a producte acabat. Aquest últim surt per una vàlvula rotativa (12) pel seu embassament. L'aire separat escaparà a l'exterior mitjançant una xemeneia (14) emportant-se amb ell un percentatge molt petit de pols. Per salvar aquesta pèrdua, hi ha

un sistema de rentat de gasos (16) que permet recuperar el producte per tornar-lo a utilitzar.

De la sortida de l'osmosi inversa, hi ha 3479,4 L de corrent concentrat a assecar, si es vol que aquest corrent s'assequi en 5h, el cabal a tractar serà de 695,9 L/h.

A EPOHARZ s'ha decidit comprar l'atomitzador a l'empresa GALAXIE. Estudiant el catàleg, l'equip que compleix la condició del cabal és el model 3530²¹. Tenint en compte que s'escull un equip amb una capacitat d'evaporació d'aigua de 800 L/h, per tant, el cabal provinent de l'osmosi inversa envers de trigar 5 hores, trigarà 4,35 hores. Tot seguit es mostra una taula amb les especificacions d'aquest equip.

Taula 59: Especificacions Atomitzador

Aire d'assecat (°C)		Evaporació d'aigua (L/h)	Consum elèctric (Kw)	Amplada x profunditat x alçada (m)
Entrada	Sortida			
550	100	800	648	6x6x8,5

11.12 Serveis de planta

11.12.1 Aigua de la planta

Per determinar l'aigua requerida a la planta, es té en compte l'aigua utilitzada al procés, els bescanviadors que en necessitin per refrigerar i els diversos sistemes de refrigeració, el consum humà i el reg. L'aigua consumida pel personal de la planta serà d'uns 100 L/dia amb una jornada de 8 h diàries per a un nombre de 82 treballadors de la planta. Respecte a l'aigua de reg, es considera que es consumiran 7 L/dia.

A continuació, es mostren els cabals d'aigua consumits i el consum total i anual per a una producció de 300 dies.

Taula 60: Consum d'aigua

Pèrdues	Cabal (kg/h) 1 dia	Cabal (kg/h) 300 dies	Cabal (m ³ /h) 300 dies
Procés	14.861,6	4.458.472,5	4.467,4
Torre de refrigeració	174.368,9	52.310.664	52.415,5
Chiller	100.748	30.224.400	30.285,0
Consum humà	8.200	2.460.000	2.464,9
Reg	7	2.100	2,104
Purga de la caldera de vapor	44,46	13.338,6	13,36
TOTAL	298.029,9	89.408.975,1	89.588,2

Si la planta treballa 24h al dia durant 300 dies a l'any, el cabal total d'aigua consumida és de 2.151.558,5 m³/any.

11.12.1.1 Desionitzador

L'aigua de procés així com l'aigua utilitzada als equips de refrigeració, ha de ser aigua desionitzada. Per tant, sumant aquests cabals s'obté que es necessita un cabal de 291 m³/h per abastir totes les necessitats de la planta.

S'escull un desionitzador de catàleg, de la marca CULLIGAN el model 80/80 NRC²². Aquest equip té la característica que és automàtic i de llit mix (és a dir, amb resines

catiòniques i aniòniques barrejades en una única columna) és capaç d'eliminar casi per complert la salinitat de l'aigua.

El model escollit té un cabal de servei de 40 m³/h, per tant, es necessitaran 8 equips iguals per abastir els 291 m³/h d'aigua desionitzada que requereix la planta.



Figura 38: Desionitzador CULLIGAN 80/80 NRC

11.12.2 Gas natural

És necessari un subministrament de gas natural com a combustible per la caldera de vapor i la caldera d'oli tèrmic, la potència de la caldera de vapor és de 39,4 kW i la de la caldera d'oli tèrmic de 226,3 kW i les dues operen 24 hores al dia.

Taula 61: Consum de gas natural

Potència (kW)	Consum diari (kWh)	Cost (€/kWh) ²³	Cost diari (€)	Cost anual (€)
265,72	6.377,28	0,068	433,66	130.096,5

11.12.3 Chillers

Els chillers són equips que serveixen per refredar per sota de la temperatura de l'aigua de les torres. A EPOHARZ es necessita un chiller per a que refredi l'aigua de les torres de 25 °C a -14 °C. Per tant, per arribar a aquesta temperatura tant baixa, s'haurà d'afegir etilenglicol per a que no es congeli l'aigua. A la taula 1 es mostren els cabals d'aigua que necessiten els reactors RE-1101 i RE-1102 i el bescanviador de calor BC-1101.

Taula 62: Paràmetres dels equips que requereixen chiller

Equip	Cabal aigua (kg/h)	Cabal aigua (kg/s)	T _{entrada} (°C)
RE-1101	18.297	5,083	-14
RE-1102	15.455	4,293	-14
BC-1101	66.996	18,61	-14
TOTAL	100.748	27,99	

Utilitzant el cabal d'aigua total dels equips de 27,99 kg/s, es calcula la potència útil del chiller.

Equació 92

$$P_u = m_t \cdot C_p \cdot \Delta T$$

On:

- P_u = potència útil (kW).
- m_t = cabal total del chiller $\left(\frac{kJ}{s}\right)$.
- C_p = calor específic de l'aigua-etilenglicol 50% $\left(\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}\right)$.

$$P_u = 27,99 \cdot 3,298 \cdot (-5 - (-14)) = 830,6 \text{ kW}$$

Suposant que el rendiment del chiller serà del 80%, la potència real de l'equip serà:

Equació 93

$$P_r = \frac{P_u}{\eta}$$

On:

- P_r = potència real (kW).
- η = rendiment.

$$P_r = \frac{830,6}{0,8} = 1.038,2 \text{ kW}$$

Per tant, el chiller ha de tenir una potència de 1.038,2 kW. Es selecciona el proveïdor Carrier, en particular s'escull el model 30XBE-1100²⁴ degut a que per una banda permet obtenir aigua amb etilenglicol fins a -15°C i per una altra, pot proporcionar una potència de 1143 kW la qual es suficient pel CH-1901.



Figura 39: Chiller Carrier 30XBE

11.12.4 Calderes

Per a la planta d'EPOHARZ és necessària una caldera de vapor per a subministrar calor al reactor RE-1001 i al bescanviador de calor BC-1101.

Taula 63: Paràmetres dels equips que requereixen caldera de vapor

Equip	Cabal vapor (kg/h)	Cabal vapor (kg/s)	Tentrada (°C)	Tsortida (°C)
RE-1001	23,5	0,007	140	90
BC-1101	2.199,6	0,611	140	98,28
TOTAL	2.223,1	0,618		

Tot seguit, es calcula la potència útil de la caldera de vapor.

Equació 94

$$P_u = m_t \cdot \Delta h$$

On:

- P_u = potència útil (kW).
- m_t = cabal total de la caldera $\left(\frac{kJ}{s}\right)$.
- Δh = diferència d'entalpies $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

$$P_u = 0,618 \cdot (1627 - 1576) = 31,5 \text{ kW}$$

Suposant que el rendiment de la caldera serà del 80%, la potència real de l'equip serà:

Equació 95

$$P_r = \frac{P_u}{\eta}$$

On:

- P_r = potència real (kW).
- η = rendiment.

$$P_r = \frac{31,5}{0,8} = 39,4 \text{ kW}$$

Respecte les pèrdues del vapor d'aigua per la purga es calcula suposant que es perd un 2% del cabal total. Per tant, les pèrdues són 44,46 kg/s.

Per tant, la caldera de vapor ha de tenir una potència de 39,4 kW. Es selecciona el proveïdor Attsu, en particular s'escull el model H-B²⁵ degut a que per una banda permet assolir una producció de vapor de 2.500 kg/h, el que seria suficient pels equips i pot proporcionar una potència superior a la necessària per la caldera CA-1801.



Figura 40: Caldera de vapor Attsu, model H-B

A part de la caldera de vapor, és necessària una caldera d'oli tèrmic per a subministrar calor als evaporadors EV-1001 i EV-1101.

Taula 64: Paràmetres dels equips que requereixen caldera d'oli

Equip	Cabal vapor (kg/h)	Cabal vapor (kg/s)	T _{entrada} (°C)	T _{sortida} (°C)
EV-1001	2.510	0,70	270	82,2
EV-1101	3.300	0,92	270	99,8
TOTAL	2.223,1	1,62		

Tot seguit, es calcula la potència útil de la caldera d'oli.

Equació 96

$$P_u = m_t \cdot \Delta h$$

On:

- P_u = potència útil (kW).
- m_t = cabal total de la caldera $\left(\frac{kJ}{s}\right)$.
- Δh = diferència d'entalpies $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

$$P_u = 1,62 \cdot (323,8 - 211,6) = 181,1 \text{ kW}$$

Suposant que el rendiment de la caldera serà del 80%, la potència real de l'equip serà:

Equació 97

$$P_r = \frac{P_u}{\eta}$$

On:

- P_r = potència real (kW).
- η = rendiment.

$$P_r = \frac{181,1}{0,8} = 226,3 \text{ kW}$$

Per tant, la caldera d'oli ha de tenir una potència de 226,3 kW. Es selecciona el proveïdor Attsu, en particular s'escull el model FT-200²⁶ degut a que pot proporcionar la potència necessària per la caldera CA-1802.



Figura 41: Caldera d'oli tèrmic Attsu, model FT-200

11.12.5 Torre de refrigeració

Les torres de refrigeració tenen la finalitat de refredar l'aigua a temperatura ambient. A EPOHARZ s'utilitzarà aquesta aigua per a la refrigeració als bescanviadors de calor. Primer de tot, es determina el cabal d'aigua a refrigerar.

Taula 65: Paràmetres dels equips que requereixen torre de refrigeració

Equip	Cabal vapor (kg/h)	Cabal vapor (kg/s)	T _{sortida aigua} (°C)
BC-1002	60.012	16,67	30,6
BC-1003	92,88	0,0258	99,78
BC-1102	69.984	19,44	26,47
BC-1201	14.400	4	41,51
BC-1202	29.880	8,3	35,32
TOTAL	174.368,88	48,43	

Tot seguit, es calcula la potència útil de la torre de refrigeració.

Equació 98

$$P_u = m_t \cdot C_p \cdot \Delta T$$

On:

- P_u = potència útil (kW).
- m_t = cabal total de la torre de refrigeració $\left(\frac{kJ}{s}\right)$.
- C_p = calor específic de l'aigua $\left(\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}\right)$.

$$P_u = 48,44 \cdot 4,18 \cdot (46,7 - 25) = 4400,7 \text{ kW}$$

Suposant que el rendiment de la torre de refrigeració serà del 80%, la potència real de l'equip serà:

Equació 99

$$P_r = \frac{P_u}{\eta}$$

On:

- P_r = potència real (kW).
- η = rendiment.

$$P_r = \frac{4400,7}{0,8} = 5.501 \text{ kW}$$

Per tant, la torre de refrigeració ha de tenir una potència de 5.501 kW. Es selecciona el proveïdor EWK, en particular s'escull el model EWB 3600²⁷ degut a que pot proporcionar una potència de 5.756 kW la qual es suficient per la TR-1901.



Figura 42: Torre de refrigeració EWK, model EWB 3460

11.12.7 Consum elèctric

En aquest apartat es calcula la potència elèctrica necessària pel funcionament dels equips de la planta que requereixen electricitat. Cal destacar que la potència de les oficines i edificis s'ha suposat que consumeixen un 10% de la potència de tota la planta.

Taula 66: Potència i consum dels equips

Equip	P (kW)	Nº d'equips	Funcionant al mateix temps (kW)	Hores d'ús al dia	Consum diari (kWh)	Consum anual (kWh)
CH-1901	1038,2	1	1	24	24.917,2	7.475.166
CA-1801	39,34	1	1	24	944,82	283.445
CA-1802	226,35	1	1	24	5.432,4	1.629.705
TR-1901	5.500,9	1	1	24	132.021	39.606.356
AT-1201	4	1	1	24	96	28.800
OI-1201	4,5	1	1	24	108	32.400
DI-1901	0,05	8	8	24	9,6	2.880
Ag-TA-1001	1,68	1	1	24	40,32	12.096
Ag-TA-1002	21,9	1	1	24	525,6	157.680
Ag-TA-1003	33,6	1	1	24	806,4	241.920
Ag-TA-1101	4,29	1	1	24	103,0	30.888
Ag-RE-1001	45	1	1	24	1.080	324.000
Ag-RE-1101	45	1	1	24	1.080	324.000
Ag-RE-1102	45	1	1	24	1.080	324.000
CP-101/102	5,5	2	1	24	132	39.600
CP-103/104	0,5	2	1	24	12	3.600
CP-105/106	4	2	1	24	96	28.800
CP-111/112	5,5	2	1	24	132	39.600
CP-113/114	5,5	2	1	24	132	39.600
CP-115/116	0,5	2	1	24	12	3.600
CP-117/118	4	2	1	24	96	28.800
CP-119/120	0,5	2	1	24	12	3.600
CP-121/22	0,5	2	1	24	12	3.600
CP-123/124	4	2	1	24	96	28.800
CP-125/126	0,3	2	1	24	7,2	2.160
CP-127/128	0,3	2	1	24	7,2	2.160
CP-129/130	0,5	2	1	24	12	3.600
CP-141/142	4	2	1	4,5	18	5.400
CP-143/144	4,8	2	1	24	115,2	34.560
CP-145/146	11	2	1	24	264	79.200
CP-147/148	13	2	1	0,35	4,55	1.365
CP-161/162	2,2	2	1	1	2,2	660
CP-163/164	15	2	1	1,15	17,25	5.175
CP-165/166	2,2	2	1	1	2,2	660
CP-167/168	11	2	1	3,5	38,5	11.550
CP-169/170	7,5	2	1	0,3	2,25	675
CP-171/172	2,2	2	1	1	2,2	660
GVD-101	12	1	1	24	288	86.400
GVD-111	12	1	1	24	288	86.400
Oficines i edificis	713,8	-	-	24	17.132,0	5.139.601,8
Consum total	7.852,2	-	7.852,6	-	187.177	56.153.164

S'escull la tarifa 6.1 TD de l'empresa Roams que és específica per potències superior a 150.000 kW i la tensió es troba entre 1kW i 30 kW.

Taula 67: Cost de l'electricitat

P (kW)	Consum anual (kWh)	Cost (€/kWh)	Cost fix (€/kWh)	Cost anual (€)
7.852,6	56.153.164	0,0970	0,1072	5.446.857

11.12.8 Grup electrogen

En aquest apartat es calcula la potència elèctrica necessària pel funcionament dels equips de la planta que requereixen electricitat en el cas que es necessités la utilització d'un generador degut a fallada de la xarxa elèctrica.

Taula 68: Potència dels equips

Equip	Potència (kW)	Equip	Potència (kW)
CH-1901	1.038,2	CP-117 i CP-118	4
CA-1801	39,34	CP-119 i CP-120	0,5
CA-1802	226,35	CP-121 i CP-122	0,5
TR-1901	5.500,9	CP-123 i CP-124	4
AT-1201	4	CP-125 i CP-126	0,3
OI-1201	4,5	CP-127 i CP-128	0,3
DI-1901	0,4	CP-129 i CP-130	0,5
Agitador TA-1001	1,68	CP-141 i CP-142	4
Agitador TA-1002	21,9	CP-143 i CP-144	4,8
Agitador TA-1003	33,6	CP-145 i CP-146	11
Agitador TA-1101	4,29	CP-147 i CP-148	13
Agitador RE-1001	45	CP-161 i CP-162	2,2
Agitador RE-1101	45	CP-163 i CP-164	15
Agitador RE-1102	45	CP-165 i CP-166	2,2
CP-101 i CP-102	5,5	CP-167 i CP-168	11
CP-103 i CP-104	0,5	CP-169 i CP-170	7,5
CP-105 i CP-106	4	CP-171 i CP-172	2,2
CP-111 i CP-112	5,5	GVD-101	12
CP-113 i CP-114	5,5	GVD-111	12
CP-115 i CP-116	0,5	Oficines i edificis	713,8
POTÈNCIA TOTAL (kW)		7.852,6	

Tot seguit es calcula la potència aparent que haurà de tenir el generador escollit per abastir la planta. Es suposa que el factor de potència és de 0,9 kW/kVA.

$$P_{ap} = \frac{P_{total}}{f_{potencia}}$$

On:

- P_{total} = potència total (kW).
- $f_{potencia}$ = factor de potència (kW/kVA).

$$P_{ap} = \frac{7852,6}{0,9} = 8725 \text{ kVA}$$

Aleshores, la potència que ha de poder donar el generador per abastir la planta en cas de que hagués un problema en la xarxa elèctrica és de 8725 kVA. S'escull un generador de catàleg, de la marca CAT, el model CG260-16²⁸. Aquest equip s'alimenta amb gas natural i pot proporcionar una potència elèctrica de 4500 kVA, per tant, s'hauran de comprar dos equips idèntics per tal d'obtenir la potència necessària.

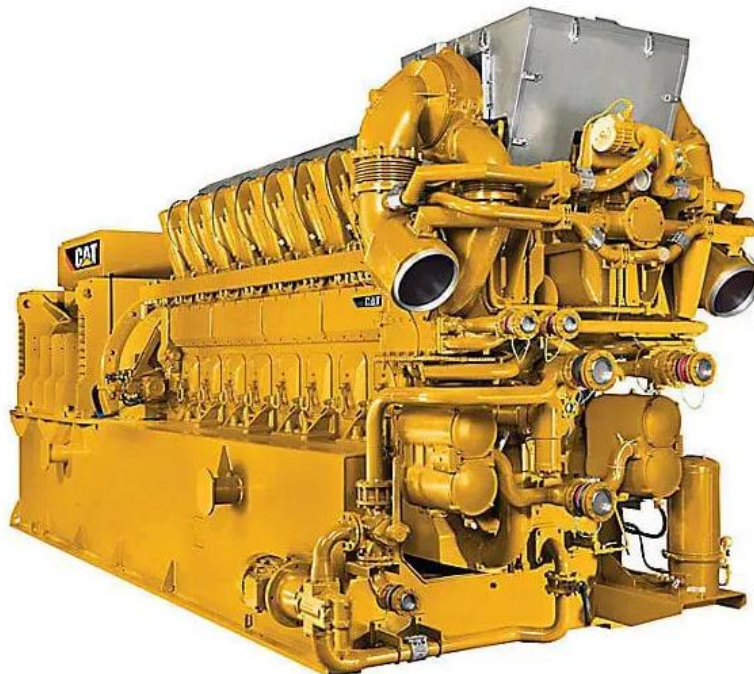


Figura 43: Generador CAT, model CG260-16

11.13 Canonades i bombes

1.13.1 Càlcul dels diàmetres de les canonades

Per seleccionar els diferents diàmetres de les canonades de la planta d'EPOHARZ s'ha seguit el següent procediment:

Es sap que la velocitat que circula per una canonada es pot calcular com el quocient entre el cabal que circula per aquesta i l'àrea de la secció de pas tal i com es mostra a l'Equació 100:

Equació 100

$$v = \frac{Q_L}{A_s}$$

On:

- v és la velocitat del fluid que circula per la canonada en [m/s].
- Q_L és el cabal volumètric en [m³/s].
- A_s és l'àrea de la secció de pas en [m²].

Al mateix temps es sap que l'àrea d'una canonada de secció circular es pot relacionar amb el diàmetre d'aquesta tal i com s'observa a l'Equació 101:

Equació 101

$$A_s = \frac{\pi}{4} \cdot D_s^2$$

On:

- A_s és l'àrea de la secció de pas en [m²].
- D_s és el diàmetre de la secció en [m].

Combinant l'Equació 100 i l'Equació 101 s'obté aquesta nova equació on es pot calcular la velocitat del fluid a partir del cabal volumètric i del diàmetre de la secció de la canonada:

Equació 102

$$v = \frac{Q_L}{\frac{\pi}{4} \cdot D_s^2}$$

Per tant, com que es coneix el cabal volumètric que circula per cada canonada, s'ha seguit un procediment iteratiu per conèixer el diàmetre de cada una de les canonades. S'ha suposat un cert diàmetre i amb aquest s'ha calculat la velocitat. Si aquesta velocitat es troba dins del rang de velocitats típiques de circulació de fluids per canonades, s'ha donat per bo el valor del diàmetre suposat. Si per altra banda el valor de la velocitat no es troba dins de les velocitats típiques de circulació s'ha suposat un altre diàmetre i així fins obtenir un diàmetre que permeti que el fluid circuli a una velocitat que es trobi dins de les típiques.

Un cop obtingut el valor del diàmetre s'ha de tenir en compte que les canonades són fabricades en uns diàmetres concrets coneguts amb el nom de diàmetres nominals (DN).

11.13.2 Càlcul del SCHEDULE de les canonades

EL SCHEDULE d'una canonada vindria a ser el gruix d'aquesta. Aquest gruix és el que permetrà que les canonades resisteixin la pressió interna del fluid que hi circula per elles. Per calcular el SCHEDULE els càlculs s'han fet basant-se amb el manual de càlcul del catàleg d'Aalco. Aquest manual de càlcul proporciona la següent equació:

Equació 103

$$t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot S \cdot E}$$

On:

- t és el gruix per contribució de la pressió i del diàmetre en [mm].
- P és la pressió dins de la canonada en [atm].
- D és el diàmetre de la canonada en [mm].
- S és el factor de resistència a la tensió que pren un valor de 1136,37 atm.
- E és el factor de qualitat el qual pren un valor de 1.

També cal tenir en compte la contribució al gruix del material pel qual està format la canonada. Per poder-la tenir en compte s'ha utilitzat l'Equació 104:

Equació 104

$$t_{tot} = t + C$$

On:

- t_{tot} és el gruix tenint en compte totes les contribucions en [mm].
- T és el gruix per contribució de la pressió i del diàmetre [mm].
- C és la resistència a la corrosió en [mm/any]. Aquest valor s'ha de multiplicar pel nombre d'anys que estigui en funcionament la planta industrial per obtenir el valor en [mm] i poder-lo relacionar amb les altres contribucions al gruix de la canonada. Aquest valor per canonades d'acer inoxidable pren un valor de 2 mm.

Un cop s'han tingut en compte totes les contribucions al gruix es selecciona el SCHEDULE de la canonada en funció també del diàmetre nominal. A la Taula 69 es mostren els diferents SCHEDULE pels diversos DN.

Taula 69: SCHEDULE en funció del DN de la canonada.

Nominal Pipe Size	OD		Schedule 5S ¹			Schedule 10S ¹			Schedule 40S			Schedule 80S		
	in	mm	in	mm	kg/m	in	mm	kg/m	in	mm	kg/m	in	mm	kg/m
1/8	0.405	10.3	-	-	-	0.049	1.24	0.28	0.068	1.73	0.37	0.095	2.41	0.47
1/4	0.540	13.7	-	-	-	0.065	1.65	0.49	0.088	2.24	0.63	0.119	3.02	0.80
3/8	0.675	17.1	-	-	-	0.065	1.65	0.63	0.091	2.31	0.84	0.126	3.20	1.10
1/2	0.840	21.3	0.065	1.65	0.80	0.083	2.11	1.00	0.109	2.77	1.27	0.147	3.73	1.62
3/4	1.050	26.7	0.065	1.65	1.03	0.083	2.11	1.28	0.113	2.87	1.69	0.154	3.91	2.20
1	1.315	33.4	0.065	1.65	1.30	0.109	2.77	2.09	0.133	3.38	2.50	0.179	4.55	3.24
1 1/4	1.660	42.2	0.065	1.65	1.65	0.109	2.77	2.70	0.140	3.56	3.39	0.191	4.85	4.47
1 1/2	1.900	48.3	0.065	1.65	1.91	0.109	2.77	3.11	0.145	3.68	4.05	0.200	5.08	5.41
2	2.375	60.3	0.065	1.65	2.40	0.109	2.77	3.93	0.154	3.91	5.44	0.218	5.54	7.48
2 1/2	2.875	73.0	0.083	2.11	3.69	0.120	3.05	5.26	0.203	5.16	8.63	0.276	7.01	11.41
3	3.500	88.9	0.083	2.11	4.51	0.120	3.05	6.45	0.216	5.49	11.29	0.300	7.62	15.27
3 1/2	4.000	101.6	0.083	2.11	5.18	0.120	3.05	7.40	0.226	5.74	13.57	0.318	8.08	18.63
4	4.500	114.3	0.083	2.11	5.84	0.120	3.05	8.36	0.237	6.02	16.07	0.337	8.56	22.32
5	5.563	141.3	0.109	2.77	9.47	0.134	3.40	11.57	0.258	6.55	21.77	0.375	9.53	30.97
6	6.625	168.3	0.109	2.77	11.32	0.134	3.40	13.84	0.280	7.11	28.26	0.432	10.97	42.56
8	8.625	219.1	0.109	2.77	14.79	0.148	3.76	19.96	0.322	8.18	42.55	0.500	12.70	64.64
10	10.750	273.1	0.134	3.40	22.63	0.165	4.19	27.78	0.365	9.27	60.31	0.500 ²	12.70 ²	96.01 ²
12	12.750	323.9	0.156	3.96	31.25	0.180	4.57	36.00	0.375 ²	9.53 ²	73.88 ²	0.500 ²	12.70 ²	132.08 ²
14	14.000	355.6	0.156	3.96	34.36	0.188 ²	4.78 ²	41.30 ²	-	-	-	-	-	-
16	16.000	406.4	0.165	4.19	41.56	0.188 ²	4.78 ²	47.29 ²	-	-	-	-	-	-
18	18.000	457	0.165	4.19	46.81	0.188 ²	4.78 ²	53.26 ²	-	-	-	-	-	-
20	20.000	508	0.188	4.78	59.25	0.218 ²	5.54 ²	68.61 ²	-	-	-	-	-	-
22	22.000	559	0.188	4.78	65.24	0.218 ²	5.54 ²	75.53 ²	-	-	-	-	-	-
24	24.000	610	0.218	5.54	82.47	0.250	6.35	94.45	-	-	-	-	-	-
30	30.000	762	0.250	6.35	118.31	0.312	7.92	147.36	-	-	-	-	-	-

11.13.3 Càlcul de les pèrdues per fricció i de la pressió que ha de subministrar la bomba

Per tal de seleccionar les bombes corresponents s'ha tingut en compte principalment la pressió necessària que haurà de ser capaç de subministrar la bomba per tal de que el fluid arribi a la zona corresponent tenint en compte les pèrdues per fregament i l'alçada que s'hagi de superar per a cada tram.

A continuació es mostra a l'Equació 105 el balanç d'energia mecànica que permetrà calcular la pressió a la sortida de la bomba per tal de que el fluid arribi a la zona corresponent:

Equació 105

$$\frac{\Delta P}{\rho} + g \cdot \Delta z + \frac{1}{2} \frac{\Delta v^2}{\alpha} = \hat{w} - e_v$$

On:

- ΔP és la diferència de pressió entre l'inici i el final del tram en [Pa].
- ρ és la densitat del fluid que circula per la canonada en [kg/m³].
- g és la constant de gravetat de la Terra que pren un valor de 9,81 m/s².
- Δz és la diferència d'alçada entre l'inici i final del tram en [m].
- α és el factor de correcció de Reynolds per la velocitat que pren un valor de 1 per règim turbulent i 0,5 per règim laminar).
- v és la diferència de velocitat entre l'inici i el final del tram en [m/s].
- \hat{w} és l'energia subministrada en aquell tram per unitat de massa en [J/kg].
- e_v són les pèrdues per fricció que experimenta el tram en [m²/s²].

Les pèrdues de fricció en una canonada es calculen com:

Equació 106

$$e_v = e_{v \text{ recte}} + e_{v \text{ acc}}$$

On:

- e_v són les pèrdues de fregament totals del tram en [m²/s²].
- $e_{v \text{ recte}}$ són les pèrdues de fregament del tram recte en [m²/s²].
- $e_{v \text{ acc}}$ són les pèrdues de fregament dels accidents dins del tram en [m²/s²].

Les pèrdues de fregament del tram recte es calculen com:

Equació 107

$$e_{v \text{ recte}} = f \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \frac{L}{D}$$

On:

- f és el factor de Moody.
- v és la velocitat de circulació en [m/s].
- L és la longitud del tram en [m].
- D és el diàmetre del tram en [m].

El factor de Moody es calcula a partir de l'àbac de Moody (Figura 44) coneixent el Reynolds i la rugositat relativa (quocient entre la rugositat del material de la canonada i el seu diàmetre).

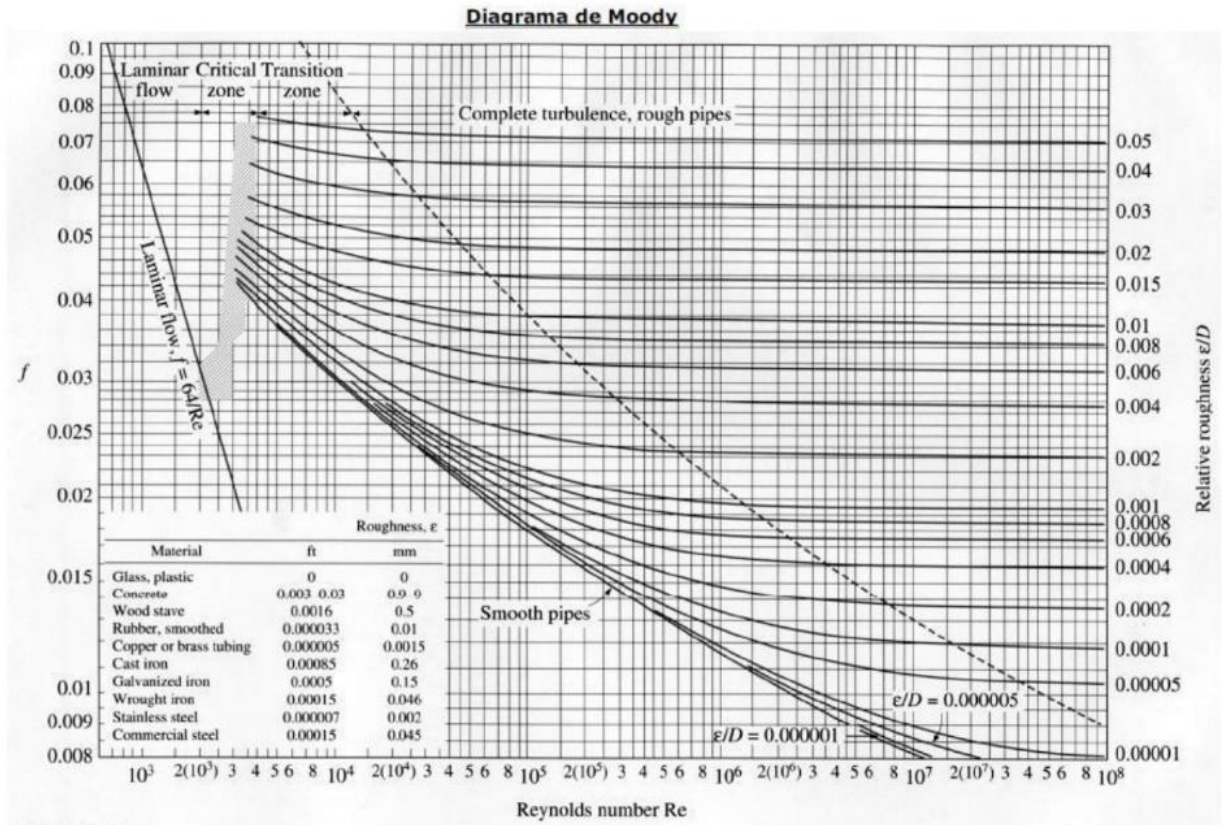


Figura 44: Diagrama de Moody.

Les pèrdues de fregament dels accidents es calculen a partir de la següent equació:

Equació 108

$$e_{v \text{ acc}} = K \cdot \frac{v^2}{2}$$

On:

- K és la suma de les k de tots els accidents presents en el tram.
- v és la velocitat de circulació en [m/s].

A continuació es mostren el valor de les K per cada un dels tipus d'accidents:

ACCIDENT	K
Vàlvula de seient	
oberta	9,0
$\frac{3}{4}$ oberta	13,0
$\frac{1}{2}$ oberta	36,0
$\frac{1}{4}$ oberta	112,0
Vàlvula angular oberta	2,0
Vàlvula de retenció (oberta)	
de charnera (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)

Figura 45 (A). Coeficient K per diversos accidents.

ACCIDENT	K
Entrada/sortida circuit	
Entrada encanonada	0,78
Entrada cantells vius	0,50
Entrada arrodonida	0,04
Sortida encanonada	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 roscada	0,04
Maneguet d'unió	0,04
Vàlvula comporta	
oberta	0,17
$\frac{3}{4}$ oberta	0,90
$\frac{1}{2}$ oberta	4,5
$\frac{1}{4}$ oberta	24,0
Vàlvula de diafragma	
oberta	2,3
$\frac{3}{4}$ oberta	2,6
$\frac{1}{2}$ oberta	4,3
$\frac{1}{4}$ oberta	21,0

Figura 45 (B). Coeficient K per diversos accidents.

Un cop calculades les pèrdues de fregament i posteriorment l'increment de pressió en el tram d'impulsió de la bomba es calcula \hat{w} . Aïllant aquesta incògnita de l'Equació 105 s'obté la següent equació:

Equació 109

$$\hat{w} = \frac{\Delta P}{\rho} + g \cdot \Delta z + \frac{1}{2} \frac{\Delta v^2}{\alpha} + e_v$$

Aleshores per tal d'obtenir la potència de la bomba es multiplica \hat{w} pel cabal màssic que circula pel tram en concret tal i com es pot apreciar a l'Equació 110:

Equació 110

$$W = \hat{w} \cdot Q_m$$

On:

- W és el treball teòric realitzat per la bomba en [W].
- \hat{w} és l'energia subministrada en aquell tram per unitat de massa en [J/kg].
- Q_m és el cabal màssic que ha d'impulsar la bomba en [kg/s].

El valor obtingut amb l'Equació 110 és el treball teòric. Aquest valor s'ha de dividir pel rendiment de la bomba per obtenir el treball real d'aquesta:

Equació 111

$$W_r = \frac{W}{\eta}$$

On:

- W_r és el treball real realitzat per la bomba en [W].
- W és el treball teòric realitzat per la bomba en [J/kg].
- η és el rendiment de la bomba.

A continuació es mostra un exemple de com s'ha calculat la pressió que ha de subministrar les bombes CP-169 i CP-170 per enviar el MIBK que es troba en els tancs d'emmagatzematge cap al reactor RE-1101.

Primerament es el Reynolds i la rugositat relativa per poder conèixer el coeficient f a partir de l'àbac de Moody:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{802 \cdot 1,56 \cdot 0,08}{0,00059} = 1,70 \cdot 10^5$$

On:

- Re és el número de Reynolds.
- ρ és la densitat en $[\text{kg}/\text{m}^3]$.
- v és la velocitat a la que circula el fluid en $[\text{m}/\text{s}]$.
- D és el diàmetre de la canonada en $[\text{m}]$
- μ és la viscositat en $[\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})]$.

$$\text{Rugositat relativa} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,002}{0,08} = 0,025$$

Amb aquests dos paràmetres i observant l'àbac de Moody s'obté que f pren un valor de 0,055.

Per tant les pèrdues de fregament en el tram recte seran:

$$e_{v \text{ recte}} = f \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \frac{L}{D} = 0,055 \cdot \frac{1,56^2}{2} \cdot \frac{163}{0,08} = 0,0136 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Les pèrdues de fregament per accidents seran:

$$e_{v \text{ acc}} = K \cdot \frac{v^2}{2} = 202 \cdot \frac{1,56^2}{2} = 246,32 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Per tant les pèrdues totals seran:

$$e_v = e_{v \text{ recte}} + e_{v \text{ acc}} = 0,0136 + 246,34 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Aleshores aïllant l'increment de pressió de l'Equació 106 s'obté:

$$\Delta P = g \cdot \left(\hat{w} - e_v - g \cdot \Delta z - \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta v^2}{\alpha} \right) = 9,81 \cdot \left(0 - 246,34 - 9,81 \cdot 7 - \frac{1}{2} \cdot \frac{0^2}{1} \right)$$

$$\Delta P = -252638,293 \frac{kg}{m \cdot s^2}$$

Aleshores coneixent l'increment de pressió ja es pot conèixer la pressió just a la sortida de la bomba, és a dir, la pressió que ha d'aportar la bomba:

$$\Delta P = P_2 - P_1 ; P_1 = P_2 - \Delta P = 101325 - (-252638,293)$$

$$\Delta P = 353963,293 \frac{kg}{m \cdot s^2} = 3,493 atm$$

Per calcular el treball de la bomba s'utilitza aquesta equació:

$$\hat{w} = \frac{\Delta P}{\rho} + g \cdot \Delta z + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta v^2}{\alpha} + e_v = \frac{252638,293}{802} + 9,81 \cdot 7 + \frac{1}{2} \cdot \frac{0^2}{1} + 246,34$$

$$\hat{w} = 630,02 \frac{J}{kg}$$

Multiplicant aquest valor pel cabal màssic s'obté el treball teòric de la bomba:

$$W = \hat{w} \cdot Q_m = 630,02 \cdot 7.033 = 4430,38 W = 4,43 kW$$

Finalment, per obtenir el treball real de la bomba es divideix aquest valor pel rendiment obtenint així el següent resultat:

$$W_r = \frac{W}{\eta} = \frac{4,43}{0,85} = 5,212 kW$$

11.14 Bibliografia

[1] Feng-chih Chang; Michael L. Heather; Robert P. Shirtum, Freeport; Robert L. Hearn, Jr. (1986). Process for the preparation of epoxy resins. Estats Units.

[2] Atias, Jesus A.; Carlberg, Philip J.; Dixit, Ravindra S.; Drake, Robert M.; Tirtowidjojo, Dan; West, David H.; Worley, William G.; Young, Thomas C. (2016). Epoxy resin production. Estats Units.

[3] Robert H. Perry; Don W. Green. (1997). Perry's Chemical Engineers' Handbook (7^a ed.). McGraw-Hill Education.

[4] M. N. Makhin; M. S. Klebanov. (2020). Reaction Kinetics of Dehydrochlorination of the Chlorohydrin Esters of Bisphenol A. Kinetics and Catalysis, Vol. 61 (No. 2), pp. 238-241. DOI: 10.1134/S0023158420020081

[5] NKS, Aceros inoxidables 316 y 316L.

<https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/aceros-inoxidables-316/>

[6] Universidad de las Américas (2012, abril). Temperatura y presión de diseño.

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lpro/esquivel_e_jr/capitulo3.pdf

[7] INSST, Recipiente a presión Simple.

<https://www.insst.es/-/recipiente-a-presion-simple>

[8] William D., Callister, Jr. (2016). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales (2^a ed.). Editorial Reverté, S.A..

[9] UTILITIES - HORFASA - Boilermaking and sheet metal fabrication in iron and stainless steel.

<http://www.horfasa.com/utilidades.php?lang=en&ide=41&card=3>

[10] Rockwool Firesafe insulations, Aislamiento de equipos Industriales. Catálogo. <catalogo-soluciones-de-aislamiento-obra-nueva-y-rehabilitacion.pdf> (rockwool.com)

[11] MG Newell, Mixer Placement and more.

<https://www.mgnewell.com/wp-content/uploads/2016/10/Mixer-Placement-and-More.pdf>

[12] FluidMix®, agitador industrial Serie VPS, catalogo.

<https://www.agitadoresfluidmix.com/agitador-industrial-vps/>

[13] FluidMix®, agitador industrial Serie VTRR, catalogo.

<https://www.agitadoresfluidmix.com/agitador-industrial-vtrr/>

[14] ITC MIE-APQ 1: «Almacenamiento de líquidos inflamables y combustibles»

<https://www.apici.es/wp-download/legislacion/ITCMIEAPQ1.pdf>

[15] ITC MIE-APQ 7: «Almacenamiento de líquidos tóxicos»

<https://www.apici.es/wp-download/legislacion/ITCMIEAPQ7.pdf>

[16] The American Society of MEchanical Engineers. (1 juliol 2019). VIII Rules for construction of pressure vessels, Division 1

[17] CÓDIGO API 650 Y 653: Diseño Montaje y Construcción de Tanques Soldados de acero

https://www.academia.edu/32769624/API_650_EN_ESPANOL_pdf

[18] BOE, núm 112, Real decreto 379/2001. (10 maig 20021). Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias MIE APQ-1, MIE APQ-2, MIE APQ-3, MIE APQ-4, MIE APQ-5, MIE APQ-6 y MIE APQ-7.

<https://www.boe.es/boe/dias/2001/05/10/pdfs/A16838-16929.pdf>

[19] Mihir's. Selection of Shell & Tube Heat Exchangers – TEMA Types, Comparisons & Usage Applications-

<https://chemicalprocessengineering.com/heat-exchangers-tema-types-comparisons-usage-applications/>

[20] Ideagua. Equipo de Ósmosis inversa industrial 2500 litros/hora OI3180.

<https://ideagua.com/equipo-de-osmosis-inversa-industrial-2500-litros-hora-oi3180/equipos-industriales/osmosis-industrial/industrial/7881/1474.html>

[21] Galaxie. Proceso de Secado Spray.

http://www.galaxie.com.ar/productos_proceso.php

[22] Culligan. Deionizadores.

https://www.culligan.es/wp-content/uploads/CP052010_Desionizadores-y-desmineralizacion.pdf

[23] Roams. (Juny 2022). Tarifa 3.4 de gas natural. ¿Qué es y quién debe acogerse?

<https://energia.roams.es/gas/tarifa/3-4/>

[24] Carrier. AquaForce® - Enfriadora de tornillo condensada por aire de velocidad fija 30XBE / 30XBP.

<https://www.carrier.com/commercial/es/es/soluciones/enfriadoras/enfriadoras-aire-agua/30xbe-30xpb/>

[25] Attsu. Calderas de vapor / Modelo H.

<https://www.attsu.com/uploads/files/producto/attsu-hh-fabricantes-caldera-de-vapor/generador-de-vapor/catalogo-h-espanol.pdf>

[26] Attsu. Calderas de aceite térmico / Modelo FT.

<https://www.attsu.com/uploads/files/producto/attsu-ft-vertical-caldera-de-aceite-termico/catalogo-ft-espanol.pdf>

[27] EWK. Torres de refrigeración, circuito abierto - EWB

<https://www.ewk.eu/descargas/brochures/ewb-brochure-es.pdf>

[28] CAT. Grupos electógenos de gas. CG260-16.

https://www.cat.com/es_ES/products/new/power-systems/electric-power/gas-generator-sets/15969826.html#

