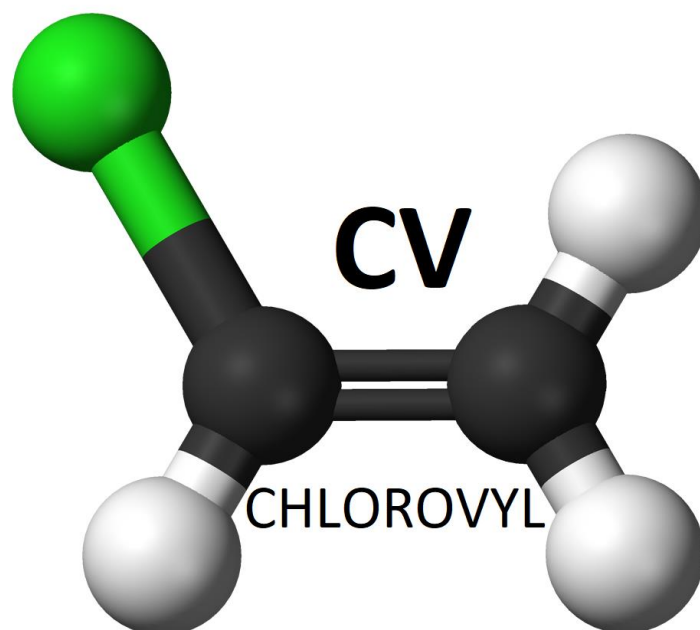


CHLOROXYL

PLANTA DE PRODUCCIÓ DE CLORUR DE VINIL

MANUAL DE CÀLCUL



PLANTA DE PRODUCCIÓ DE CLORUR DE VINIL

Universitat Autònoma de Barcelona
Treball fi de Grau
GRAU EN ENGINYERIA QUÍMICA

TUTOR:
BARTROLÍ, Albert

COMPONENTS:
MONJE MARTÍNEZ, Raúl
GUERRERO SODRIC, Oscar
GARCÍA GUIJARRO, Estefanía
FOLCH PARELLADA, Berta
Grup 11

LLOC I DATA:
13 de juny del 2018, Bellaterra

CAPÍTOL 11

MANUAL DE CÀLCUL

PLANTA DE PRODUCCIÓ DE CLORUR DE VINIL

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

INDEX

11	MÈTODE DE CÀLCUL.....	4
11.1	TANCS D'EMMAGATZEMATGE.....	4
11.1.1	STOCK	4
11.1.2	CUBETES	4
11.1.3	AÏLLAMENT DELS TANCS	5
11.1.4	INERTITZACIÓ	5
11.1.5	REFRIGERACIÓ DELS TANCS	6
11.1.6	BOCA D'HOME.....	6
11.1.7	CODI ASME	6
11.1.8	LÍMIT ELÀSTICS	7
11.1.9	FACTOR DE SOLDADURESE.....	7
11.1.10	GRUIX PER CORROSIÓ C1	7
11.1.11	FACTOR M	8
11.1.12	GRUIX DELS COS DEL TANC	9
11.1.13	GRUIX DEL CAPÇAL TORIESFÈRIC	9
11.1.14	PES DE L'EQUIP.....	10
11.1.15	ELECCIÓ DEL MATERIAL.....	10
11.1.16	EMMAGATZEMATGE DE CLORUR DE VINIL.....	11
11.1.17	EMMAGATZEMATGE DEL 1.2-DICLOROETÀ	14
11.2	REACTORS D'HIDROCLORACIÓ.....	18
11.2.1	INTRODUCCIÓ.....	18
11.2.2	MODEL CINÈTIC	18
11.2.3	EQUACIÓ DE DISSENY.....	20
11.2.4	ESTEQUIOMETRIA	20
11.2.5	CAIGUDA DE PRESSIÓ.....	22
11.2.6	DIMENSIONAT	23
11.2.7	REFRIGERACIÓ.....	23
11.3	COLUMNES DE SEPARACIÓ	32
11.3.1	DISSENY DE COLUMNES	32
11.4	BESCANVIADORS DE CALOR	52
11.4.1	DISSENY DE BESCANVIADORS	52
11.5	TANCS DE SEPARACIÓ	60
11.5.1	DISSENY DE TANCS	60



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

11.6	Canonades.....	63
11.6.1	Càlcul del diàmetre nominal	63
11.6.2	Càlcul del gruix d'aïllant	66
11.7	SERVEIS.....	66
11.7.1	AIGUA DESMINERALITZADA	67
11.7.2	AIGUA TORRES DE REFRIGERACIÓ I CALDERES DE VAPOR.....	67
11.7.3	ENERGIA, CONSUM ELÈCTRIC	68
11.8	BIBLIOGRAFIA.....	69



11 MÈTODE DE CÀLCUL

11.1 TANCS D'EMMAGATZEMATGE

11.1.1 STOCK

S'ha previst el retràs en la recollida del producte, així com augments de producció, fallades de seguretat, etc. Per tant s'ha decidit tenir espai suficient d'emmagatzematge per a 3 dies en el cas del clorur de vinil i de 7 per 1,2-dicloroetà.

11.1.2 CUBETES

Els recipients de superfície per a l'emmagatzematge de líquids inflamables i combustibles han de tenir una cubeta de retenció. Cada fila de recipients ha de tenir adjacent un carrer o via d'accés que permeti la intervenció de la brigada de lluita contra incendis.

La distància en projecció horitzontal entre la paret del recipient i la vorera interior inferior de la cubeta serà, com a mínim, d'un metre.

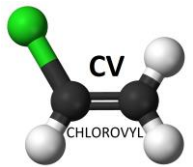
A més el fons de la cubeta tindrà una pendent de forma que tot el producte vessat escorri ràpidament cap a una zona de la cubeta el més allunyada possible de la projecció des recipients.

Per al dimensionament de les cubetes es segueix la normativa ITC-MIE-APQ1. Per començar es defineixen les distàncies entre els tancs i les parets dels tancs i les cubetes.

$$\text{Distància entre tancs} = \frac{D_{\text{tanc}}}{2} \quad (11.1.1)$$

S'ha considerat que la distància entre la paret del tanc i la cubeta és d'un metre.

Un cop determinades les distàncies entre els tancs, es calculen les dimensions de la cubeta amb les següents equacions.



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

$$A_{ocupada} = \frac{\pi}{4} \cdot N \cdot D_{tanc}^2 \quad (11.1.2)$$

$$L_{cubeta} = D_{tanc} \cdot \frac{N}{2} + D_{entre\ tancs} \cdot \left(\frac{N}{2} + 1\right) + 2 \cdot D_p \quad (11.1.3)$$

$$W_{cubeta} = 2 \cdot D_{tanc} + 2 \cdot D_p + D_{entre\ tancs} \quad (11.1.4)$$

$$A_{lliure} = L_{cubeta} \cdot W_{cubeta} - A_{ocupada} \quad (11.1.5)$$

$$h_{cubeta} = \frac{V_{tanc}}{A_{lliure}} \quad (11.1.6)$$

On:

$A_{ocupada}$ és l'àrea ocupada pels tancs (m^2).

N és el número de tancs.

L_{cubeta} és la longitud de la cubeta (m).

$D_{entre\ tancs}$ és la distància entre tancs (m).

D_p és la distància entre la paret del tanc i la cubeta (m).

W_{cubeta} és l'ampla de la cubeta (m).

A_{lliure} és l'àrea lliure de la cubeta (m^2).

H_{cubeta} és l'alçada de la cubeta (m).

11.1.3 AÏLLAMENT DELS TANCS

La temperatura a la qual es troba el tanc és molt important, atès que una variació de la temperatura pot duu a accidents. Per aquest motiu s'ha decidit aïllar els tancs d'emmagatzematge. El material utilitzat per aïllar és la llana de roca.

11.1.4 INERTITZACIÓ

Com que els líquids que es volen emmagatzemar a la planta són inflamables, és necessari inertitzar els tanc on s'emmagatzemen, tal i com indica la normativa vigent. Per a la inertització dels mateixos es farà servir nitrogen, proveït per uns tanc de nitrogen situats a l'àrea de serveis. Així com també es realitzarà un control amb per tal de mantenir els tancs inertitzats en tot moment durant el procés de fabricació del clorur de vinil.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

11.1.5 REFRIGERACIÓ DELS TANCS

Els tancs constaran d'un sistema de refrigeració que romandrà tancada normalment, aquesta es farà servir en casos excepcionals quan la temperatura dels mateixos estigui per sobre de la desitjada. Per tant, els tancs tindran una camisa.

11.1.6 BOCA D'HOME

Tot recipient ha de tenir una boca d'home pel manteniment d'aquest. En aquest cas, en els tancs de la planta és col·loquen boques d'home de 610 mm de diàmetre nominal. Les dimensions de les plaques de reforç i altres paràmetres venen tabulats pel codi API 650, aquets paràmetres és recullen en la taula 11.8.

Taula 11.1: Paràmetres per el disseny d'una boca d'home.

Boca d'home	
col·locat en el sostre	
Diàmetre nominal (mm)	610
Diàmetre interior del coll (mm)	610
Diàmetre exterior de tapa plana (mm)	762
Diàmetre circulo de barrenos (mm)	698
Nº de claus	20
diàmetre d'empaquetament interior (mm)	610
diàmetre d'empaquetament exterior (mm)	762
Diàmetre de forat en el sostre i placa de reforç (mm)	625
Diàmetre exterior en el sostre i placa de reforç (mm)	1168

11.1.7 CODI ASME

Per començar s'ha de determinar la pressió hidrostàtica, la de disseny i la d'operació.

La pressió hidrostàtica fa referència a la pressió que exerceix un pes d'un fluid en repòs.

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot H \quad (11.1.7)$$

On:

ρ és la densitat del fluid (kg/m^3).



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

g és la força de la gravetat (m/s^2).

H és l'alçada de la columna del líquid (m).

Pel que fa a la pressió d'operació és la pressió de treball de l'equip sempre que aquest treballi en condicions normals.

La pressió de disseny és el valor que s'ha d'utilitzar en les equacions per a la realització del càlcul de les parts constructives dels recipients sotmesos a pressió. La diferència entre aquesta i la d'operació és que a la primera se li afegeix un factor de seguretat. Aquesta es determina a partir de l'equació 11.6.8.

$$P = P_{op} + \Delta P + 0.15 \cdot (P_{op} + \Delta P) \quad (11.1.8)$$

Seguidament s'ha determinat tant la temperatura d'operació com la de disseny. Aquestes segueixen el mateix concepte que les pressions. Per tant, la d'operació farà referència a aquella a la que treballa un equip en condicions normals mentre que la de disseny és una corregida per motius de seguretat, i es calcula amb l'equació 11.6.9.

$$T = T_{op} \pm 15 \quad (11.1.9)$$

11.1.8 LÍMIT ELÀSTICS

Aquest, es el valor màxim al que pot ser sotmès un material que forma part d'un recipient a pressió en condicions normals d'operació. El valor varia segons la temperatura de treball i el material escollit.

11.1.9 FACTOR DE SOLDADURESE

Els equips acostumen a tenir diverses làmines unides per soldadura. Així doncs els factor de soldadures és el grau de confiabilitat que es pot tenir en aquestes. Aquest pot prendre diferents valors, essent 0.85 en el cas de considerar que el radiografiat és parcial i 1 si és total.

11.1.10 GRUIX PER CORROSIÓ C1

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CàLCUL

S'ha de preveure la corrosió, abracció mecànica o erosió que tot equip pot patir al llarg de la vida útil del mateix. Aquest valor oscil·la entre 1-6 mm. Aquest s'ha de multiplicar pels anys de vida útil de l'equip. És un valor que s'addiciona per poder resistir les càrregues a les que es troben sotmesos els equips.

11.1.11 FACTOR M

El factor M és un factor adimensional que s'aplica als capçals toricsfèric dels recipients, i aquest és la relació entre el radi esfèric interior (L) i el intern (r). Aquests és calculen a partir de les equacions 11.6.10.

$$L = D_e \quad (11.1.10)$$

$$r = 0.1 \cdot L \quad (11.1.11)$$

En aquest cas s'ha utilitzat una calculadora (calculadora de fons KLOPPER) per al càlcul del factor M. Obtenint els resultats següents.

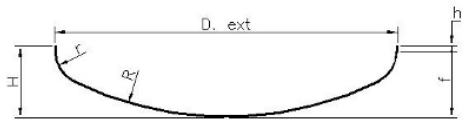
Calculadora de fondos KLOPPER	
Diametro exterior (mm)	4080
Espesor (mm)	0
	
fondo Toricsferico Tipo KLOPPER	
Diametro disco (mm)	4518
R (mm)	4080
r (mm)	408
h (mm) >=	0
f (mm)	789
H (mm)	789
V (sin h) (litros)	6791.7
Peso (h minima) (kg)	0
<input type="button" value="Calcular"/>	
HORFA SA no se responsabiliza de la precision de estas medidas.	

Figura 11.1. Calculadora HORFA SA.

El factor M es calcula a partir de la taula 11.2.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

Taula 11.2. Valors del factor M en funció de la relació L/r.

VALUES OF FACTOR "M"																	
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.5	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : L = D + 2t (see note 2 on facing page)																	

11.1.12 GRUIX DELS COS DEL TANC

Un cop calculats tots els paràmetres necessaris és pot calcular el gruix del cos del tanc. Per recipients cilíndrics s'ha d'aplicar l'equació 11.1.12.

$$t_{cos} = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} + C_1 \quad (11.1.12)$$

On:

t_{cos} és el gruix mínim del cilindre (in)

P és la pressió de disseny (psi)

R és el radi del tanc (in)

S és el límit elàstic del material (in)

E és el factor de soldadura

C_1 és la corrosió del material (in).

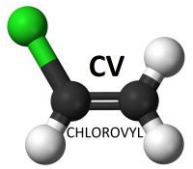
11.1.13 GRUIX DEL CAPÇAL TORIESFÈRIC

En les curvatures del fons torisfèric es perd certa part del gruix, per aquest motiu s'addiciona un 10% anomenat C_2 .

Pel càlcul del gruix necessari pel cos cilíndric en les condicions de treball s'utilitza l'equació 11.1.13.

$$t_{capçal} = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P} + C_1 + C_2 \quad (11.1.13)$$

On:



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

$t_{\text{capçal}}$ és el gruix mínim del capçal (in).

L és el radi de l'esfera que forma el capçal toriesfèric (in).

M és la constant que relaciona els radis del fons toriesfèric (in).

C_2 és la corrosió de tolerància a la fabricació (in).

11.1.14 PES DE L'EQUIP

Seguidament es calcula el pes de l'equip, aquest és la suma de tots els seus components, i variarà segons la densitat del material escollit pel seu disseny. A continuació s'exposen les equacions utilitzades per al seu càlcul.

Tanc buit

$$pes\ cilindre = V_{cilindre} \cdot \rho_{material} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_i^2) \cdot H_{cil} \cdot \rho_{material} \quad (11.1.14)$$

Pes del toriesfèric

$$V_{capçal\ superior} = 0.0809 \cdot (D_e^3 - D_i^3) \quad (11.1.15)$$

$$V_{capçal\ inferior} = 0.0809 \cdot (D_e^3 - D_i^3) \quad (11.1.16)$$

$$pes\ capçal = V_{capçal} \cdot \rho_{material} \quad (11.1.17)$$

Pes total del tanc

$$pes\ total = pes\ cilindre + pes\ capçal\ superior + pes\ capçal\ inferior \quad (11.1.18)$$

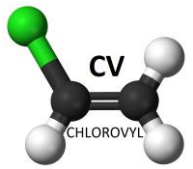
Pes del tanc omplert

$$pes\ total\ ple = pes\ total + V_{líquid} \cdot \rho_{líquid} \quad (11.1.19)$$

11.1.15 ELECCIÓ DEL MATERIAL

El material dels tancs d'emmagatzematge s'escolliran tenint en compte el seu us i quin cos té. Els criteris més importants en l'elecció d'un material són les propietats mecàniques, les físiques, la estabilitat a la corrosió i el reu del mateix.

Per tant, els recipients s'han construït amb un material adequat per a les condicions d'emmagatzematge i els producte emmagatzemat.



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

11.1.16 EMMAGATZEMATGE DE CLORUR DE VINIL

L'emmagatzematge del CV és realitzarà en tancs cilíndrics amb un fons inferior pla i un de superior toriesfèric, aquests seran construïts amb acer inoxidable 316L.

11.1.16.1 CAPACITAT D'EMMAGATZEMATGE

El clorur de vinil és el producte d'interès. Per dimensionar el tanc on s'emmagatzemarà, s'utilitzarà el cabal volumètric, estret del balanç de matèria. Aquest és de 2.57 m³/h.

Aquest suposa un cabal diari de 61.68 m³/dia. Primerament s'ha de veure quin és el volum de producte que es vol emmagatzemar, en aquest cas es preveurà un emmagatzematge de tres dies com a màxim, per tant el volum és el següent.

$$V_{CV,Stock} = 61.68 \frac{m^3}{dia} \cdot 3 \text{ dies} = 185.04 m^3$$

Per començar s'ha de distingir entre el volum total del tanc i el volum de treball, essent el primer la capacitat total del tanc i el segon és el volum que ocuparà el fluid que es vol emmagatzemar.

$$V_{Total} = V_{fons} + V_{treball} = 80 m^3 \quad (11.1.20)$$

$$V_{treball} = 64 m^3 \quad (11.1.21)$$

Com que el volum generat cada 3 dies és de 185.04 m³ s'ha decidit crear tancs de 80 m³ de capacitat, aquests es sobredimensionaran un 20%, per tant, la capacitat real dels tancs serà de 64 m³. Aquest sobredimensionant es realitza com a mesura preventiva.

Per l'emmagatzematge del CV durant 3 dies seran necessaris 3 tancs, però s'instal·larà un quart tanc per preveure errades de recollides.

Els camions cisternes tenen una capacitat de 25 m³, aquest s'ompliran completament. Per tant, si es preveu que tot el CV produït al dia surti haurien d'arribar 3 camions cisternes.

$$camions \text{ diaris} = \frac{61.68 \frac{m^3}{dia}}{25 \frac{m^3}{camió}} = 2.47 \approx 3 \text{ camions/dia}$$



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

11.1.16.2 CONDICIONS D'EMMAGATZEMATGE SEGONS LA NORMATIVA

Per a l'emmagatzematge del CV segons la normativa es tindran en compte les propietats següents:

Taula 11.3. Propietats del clorur de vinil.

T inflamabilitat (°C)	T ebullició (°C)
-78	-13

Així doncs segons la normativa ITC-MIE-APQ1 aquest és troba classificat "Grup A1", degut a que el punt d'inflamabilitat és inferior a 0°C. Els tancs no podran ser tanc atmosfèrics, atès que el punts d'ebullició del CV és massa baix.

Per evitar canvis i fluctuacions en el procés s'ha decidit que el volum mínim sigui per un dia de treball, per aquest motiu el volum del tanc serà de 80 m³, tal i com ja s'ha comentat.

11.1.16.3 DIMENSIONS

El tanc serà un recipient cilíndric en posició vertical amb un fons toriesfèric a l'extrem superior i una làmina en la inferior. El càlcul de les dimensions d'aquest es faran seguint el codi ASME explicat anteriorment.

11.1.16.4 CRITERIS DE DISSENY

A la taula 11.4 s'exposen els paràmetres necessaris per al càlcul de les dimensions del tanc d'emmagatzematge.

Taula 11.4. Dimensions del tanc d'emmagatzematge..

paràmetre	valor
V tanc (m ³)	80
D (m)	5.35
H cilindre (m)	8.02
H equip (m)	9.60
V ocupat (%)	97.47

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

11.1.16.5 DISSENY MECÀNIC

Com ja s'ha esmentat anteriorment s'ha utilitzat el codi ASME. La pressió i la temperatura d'operació seran 6.23 bar i 35 °C.

A la taula 11.5 es poden observar els paràmetres de disseny, mentre que a la taula 11.13 es mostren els resultats obtinguts.

Taula 11.5. Paràmetres de disseny.

paràmetre	valor
P disseny (atm)	7.88
T disseny (°C)	50
S (Psi)	15700
E (m)	0.85
Radi (m)	2.04
Radi fons (mm)	408
L (mm)	4080
M	1.54
L/R fons (m)	10
V cilindre (m ³)	80

Taula 11.6. Càlculs de l'espessor.

paràmetre	valor
t cilindre calcular (mm)	19.78
t cilindre arrodonit (mm)	20
t fons calculada (mm)	31.24
t fons arrodonida (mm)	32
V cilindre (m ³)	80
V fons (m ³)	6.79

11.1.16.6 PES EQUIPS

Seguidament es mostrarà el càlcul del pes dels tancs buit i en operació, utilitzant les equacions 11.1.14 de l'apartat 11.1.13. A la taula 11.7 es poden veure els resultats obtinguts.



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

Taula 11.7. Pes dels equips d'emmagatzematge.

paràmetre	valor
De (mm)	4080
Di (mm)	4040
Densitat acer (kg/m ³)	7960
densitat líquid (Kg/m ³)	900
V líquid (m ³)	64
M cilindre (Kg)	12292
M capçal (Kg)	341
M fons (Kg)	2059
M operació (Kg)	70576

11.1.16.7 CUBETES D'EMMAGATZEMATGE DEL CLORUR DE VINIL

Seguidament a la taula 11.8 es mostren els resultats del càlcul de la cubeta per a l'emmagatzematge del clorur de vinil.

Taula 11.8. Càlcul de la cubeta per emmagatzemar el CV.

paràmetre	valor
N	4
Distància entre tancs (m)	2.0
Àrea ocupada (m ²)	52.30
L cubeta (m)	16.28
W cubeta (Kg)	12.2
Àrea lliure (m ²)	146.32
h cubeta (m)	0.55

11.1.17 EMMAGATZEMATGE DEL 1.2-DICLOROETÀ

L'emmagatzematge del 1.2-dicloroetà és realitzarà en tancs cilíndrics amb un fons inferior pla i un de superior toriesfèric, aquests seran construïts amb acer inoxidable 316L.



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

11.1.17.1 CAPACITAT D'EMMAGATZEMATGE

El 1,2-dicloroetà és un subproducte que s'emmagatzemarà fins que vinguins els responsables de la seva gestió, que es realitzarà de forma externa. Per dimensionar el tanc on s'emmagatzemarà, s'utilitzarà el cabal volumètric, estret del balanç de matèria. Aquest és de 0.0034 m³/h. Seguint el mateix procediment que per al clorur de vinil s'han obtinguts les següents dades.

Taula 11.9. Càlcul de la capacitat d'emmagatzematge.

Paràmetre	valor
Volum stock (m ³)	0.57
V total (m ³)	3
V treball (m ³)	2.4

En aquest cas com que el cabal diari es tan petit s'ha decidit emmagatzemar el subproducte per un total de 7 dies, així doncs una vegada a la setmana vindrà un camió cisterna que se'l endurà cap a la gestió externa on serà tractat.

11.1.17.2 CONDICIONS D'EMMAGATZEMATGE SEGONS LA NORMATIVA

Per a l'emmagatzematge del CV segons la normativa es tindran en compte les propietats següents:

Taula 11.10. Propietats del 1,2-dicloroetà.

T inflamabilitat (°C)	T ebullició (°C)
13	83.5

Així doncs segons la normativa ITC-MIE-APQ1 aquest és troba classificat "Grup B1", degut a que el punt d'inflamabilitat és inferior a 38°C. S'ha decidit emmagatzemar aquest subproducte en tancs a pressió.

11.1.17.3 DIMENSIONS

El tanc serà un recipient cilíndric en posició vertical amb un fons toriesfèric a l'extrem superior i una làmina en la inferior. El càlcul de les dimensions d'aquest es faran seguint el codi ASME explicat anteriorment.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

11.1.17.4 CRITERIS DE DISSENY

A la taula 11.11 s'exposen els paràmetres necessaris per al càlcul de les dimensions del tanc d'emmagatzematge.

Taula 11.11. dimensions del tanc d'emmagatzematge.

paràmetre	valor
V tanc (m ³)	3
D (m)	1.37
H cilindre (m)	2.05
H equip (m)	2.58
V ocupat (%)	22

11.1.17.5 DISSENY MECÀNIC

Com ja s'ha esmentat anteriorment s'ha utilitzat el codi ASME. La pressió i la temperatura d'operació seran 1.15 bar i 59.8 °C.

A la taula 11.12 es poden observar els paràmetres de disseny, mentre que a la taula 11.13 es mostren els resultats obtinguts.

Taula 11.12. Paràmetres de disseny.

paràmetre	valor
P disseny (atm)	1.56
T disseny (°C)	74.8
S (Psi)	15700
E (m)	0.85
Radi (m)	0.68
Radi fons (mm)	136.6
L (mm)	1366
M	1.54
L/R fons (m)	10
V cilindre (m ³)	3

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

Taula 11.13. Càlculs de l'espessor.

paràmetre	valor
t cilindre calcular (mm)	3.17
t cilindre arrodonit (mm)	3
t fons calculada (mm)	4.12
t fons arrodonida (mm)	4
V cilindre (m ³)	3
V fons (m ³)	0.25

11.1.17.6 PES EQUIPS

Seguidament es mostrarà el càlcul del pes dels tancs buit i en operació, utilitzant les equacions 11.1.14 de l'apartat 11.1.13. A la taula 11.14 es poden veure els resultats obtinguts.

Taula 11.14. Pes dels equips.

paràmetre	valor
De (mm)	1366
Di (mm)	1360
Densitat acer (kg/m ³)	7960
densitat líquid (Kg/m ³)	1113.21
V líquid (m ³)	2.4
M cilindre (Kg)	221.56
M capçal (Kg)	5.11
M fons (Kg)	37.02
M operació (Kg)	2903

11.1.17.7 CUBETES D'EMMAGATZEMATGE DE L1,2-DICLOROETÀ

Seguidament a la taula 11.15 es mostren els resultats del càlcul de la cubeta per a l'emmagatzematge del clorur del 1,2-dicloroetà.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

Taula 11.15. Càlcul de la cubeta per l'emmagatzematge del subproducte.

paràmetre	valor
N	2
Distància entre tancs (m)	0.68
A ocupada (m ²)	2.93
L cubeta (m)	4.73
W cubeta (Kg)	5.42
A lliure (m ²)	22.69
h cubeta (m)	0.13

11.2 REACTORS D'HIDROCLORACIÓ

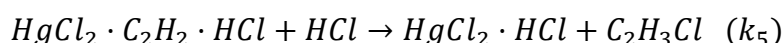
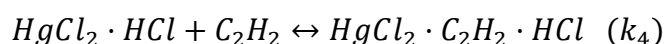
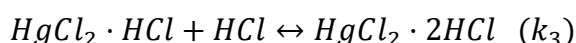
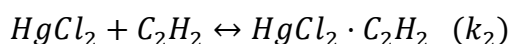
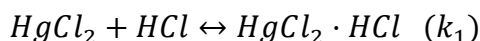
11.2.1 INTRODUCCIÓ

En aquest apartat es presenten els càlculs realitzats pel disseny del reactor catalític d'hydrocloració de l'acetilè, així com els diferents aspectes que s'ha tingut en compte alhora de dissenyar els reactors de la fàbrica.

La metodologia que s'ha seguit pel disseny dels reactors ha estat en primera instància, la resolució del sistema d'equacions diferencials ordinàries que s'obté en plantejar les equacions de disseny, lleis de velocitat i tots els paràmetres que els relacionen per a un únic reactor de llit fix, isoterm i en estat estacionari. Un cop s'obté la massa de catalitzador necessària i posteriorment el volum necessari del reactor, es realitza un procés iteratiu per determinar les dimensions òptimes del reactor (nombre de tubs, diàmetre, longitud...), garantint que tot el calor que es genera s'extreu del sistema, i simultàniament es calculen els requeriments tèrmics.

11.2.2 MODEL CINÈTIC

La reacció d'hydrocloració d'acetilè és descrita per un model cinètic que consta de quatre etapes d'equilibri i d'una etapa fortament irreversible tal i com es mostra a continuació:





CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

Aquestes etapes defineixen l'absorció de les molècules d'acetilè i clorur d'hidrogen sobre el carbó actiu, formant una sèrie d'intermedis que finalment desorcionen el producte d'interès.

Coneixent el mecanisme de la reacció es pot plantejar l'equació de velocitat de reacció en funció de les concentracions, o de les pressions parcials, i de les diferents constants cinètiques. En aquest cas però, s'ha buscat a la bibliografia una expressió de velocitat que té en compte la conversió de clorur de vinil per unitat de temps i unitat de massa de catalitzador. L'expressió és la següent:

$$\left[r = \frac{k_r K_{HCl} K_{C_2H_2} P_{HCl} P_{C_2H_2}}{(1 + K_{HCl} P_{HCl} + K_{VCM} P_{VCM})(1 + K_{C_2H_2} P_{C_2H_2})} \right] \quad (11.2.1)$$

Com es pot observar, l'expressió proposada té en compte la fracció de clorur de vinil que es recircula en el procés, disminuint el valor de velocitat quan aquesta fracció augmenta.

També cal esmentar que aquesta expressió no contempla la possible desactivació del catalitzador degut a que per a la temperatura d'operació del reactor, aquest valor pren valors menyspreable. La desactivació més significativa del catalitzador podria resultar de l'envelliment de les partícules amb el temps, i tenint en compte les dades bibliogràfiques s'ha decidit fer una regeneració del catalitzador a la meitat del temps de producció anual com es mostrarà més endavant.

Per una altra banda, les constants de l'equació de velocitat de reacció es poden escriure en funció de la temperatura, on E_i i x_i prenen els valors mostrats per un rang de temperatures d'entre 100°C-135°C com és el cas:

Taula 11.16: Expressions per al càlcul de les constants cinètiques en funció de la temperatura.

Constant	Expressió	x_i	E_i [kcal/mol]	Valor a 135°C
k_r (mol/(g·h))	$k_r = \exp\left(x_1 - \frac{E_1}{RT}\right)$	15.71	11.2	6.66
K_{HCl} (atm ⁻¹)	$K_{HCl} = \exp\left(x_2 + \frac{E_2}{RT}\right)$	-1.05	1.87	3.51
$K_{C_2H_2}$ (atm ⁻¹)	$K_{C_2H_2} = \exp\left(x_3 + \frac{E_3}{RT}\right)$	-1.63	0	0.20
K_{VCM} (atm ⁻¹)	$K_{VCM} = \exp\left(x_4 + \frac{E_4}{RT}\right)$	-2.7	3.2	3.48



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

11.2.3 EQUACIÓ DE DISSENY

Els reactors empacats són reactors tubulars plens de partícules de catalitzador per tant, la deducció de la forma diferencial de l'equació de disseny és anàloga a la que es realitza per el RCFP, amb la diferència que en el cas del reactor empacat la conversió depèn de la massa de catalitzador i no del volum.

Tot seguit es realitza un balanç de matèria en un diferencial de massa de catalitzador pel component clau (A), tenint en compte que la diferència entre l'entrada i la sortida és igual la diferència entre el que s'acumula i es genera:

$$E - S + G = A ;$$

$$F_{A(W)} - F_{A(W+\Delta W)} + r'_A \Delta W = \frac{dN_A}{dt}$$

Suposant estat estacionari:

$$F_{A(W)} - F_{A(W+\Delta W)} + r'_A \Delta W = 0$$

Dividint entre ΔW i fent el límit quan ΔW tendeix a zero.

$$\left[\frac{dF_A}{dW} = -r'_A \right] \quad (11.2.2)$$

Expressada en funció de la conversió:

$$\left[\frac{dX}{dW} = \frac{-r'_A}{F_{AE}} \right] \quad (11.2.3)$$

on

F_{AE} = Cabal molar d'entrada d'A [mol/h]

$-r'_A$ = Velocitat de desaparició d'A [mol/(Kg_{cat} · h)]

W = Massa de catalitzador [Kg]

X = Conversió respecte del component clau

11.2.4 ESTEQUIOMETRIA

Un cop s'ha definit la llei de velocitat i l'equació de disseny del reactor, és necessari trobar les expressions que relacionen la pressió parcial de cada component amb la conversió per tal de completar la definició del sistema.

La pressió parcial del component *i* és:

$$[P_i = y_i P] \quad (11.2.4)$$

La fracció molar del component *i* és:



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

$$\left[y_i = \frac{C_i}{C_{Total}} \right] \quad (11.2.5)$$

Per una altra banda, la concentració molar de l'espècie i és:

$$\left[C_i = C_{AE} \left(\frac{\frac{F_{iE}}{F_{AE}} - \frac{\nu_i}{\nu_A} X}{1 - \varepsilon X} \right) \left(\frac{P}{P_E} \right) \left(\frac{T_E}{T} \right) \right] \quad (11.2.6)$$

F_{iE} = Cabal molar d' i a l'entrada [mol/h]

ν_i = Coeficient estequiomètric d' i

C_{AE} = Concentració d'A a l'entrada [mol/L]

P = Pressió [atm]

P_E = Pressió d'entrada [atm]

T = Temperatura [K]

T_E = Temperatura d'entrada [K]

$$\varepsilon = y_{AE} \sum \frac{\nu_i}{\nu_A}$$

Exemple de càlcul per el clorur de vinil quan $X=0.96$

$$C_C = C_{AE} \left(\frac{\frac{F_{CE}}{F_{AE}} - \frac{\nu_C}{\nu_A} X}{1 - \varepsilon X} \right) \left(\frac{P(X = 0.96)}{P_E} \right) \left(\frac{T_E}{T} \right)$$

$$C_C = 2.74 \cdot 10^{-2} \text{ mol/L} \left(\frac{\frac{69.7 \frac{\text{mol}}{\text{h}}}{37843 \frac{\text{mol}}{\text{h}}} - \frac{1}{-1} 0.96}{1 - 0.49 \cdot 0.96} \right) \left(\frac{1.29 \text{ atm}}{1.38 \text{ atm}} \right) \left(\frac{303 \text{ K}}{408 \text{ K}} \right);$$

$$C_C = 3.45 \cdot 10^{-2} \text{ mol/L}$$

Exemple de càlcul per l'acetilè en condicions d'entrada

$$P_{AE} = y_{AE} \cdot P$$

$$y_{AE} = \frac{F_{AE}}{F_{AE} + F_{BE} + F_{CE} + F_{IE}} = \frac{F_{AE}}{F_{TE}} = \frac{(36707.7 + 1135.3) \text{ mol/h}}{77580.3 \text{ mol/h}} = 0.49$$



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

$$P_{AE} = 0.49 \cdot 1.38 \text{ atm} = 0.68 \text{ atm}$$

$$C_{AE} = \frac{P_{AE}}{R \cdot T_E} = \frac{0.68 \text{ atm}}{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 303 \text{ K}} = 2.74 \cdot 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

Com es pot veure la concentració no només depèn de la conversió sinó que també depèn de la pressió i de la temperatura degut a que és una reacció en fase gas.

11.2.5 CAIGUDA DE PRESSIÓ

Com s'ha vist, la pressió del sistema afecta a les concentracions molars de les diferents espècies i per tant s'ha d'estimar el seu valor a cada diferencial de massa de catalitzador. A priori, es pot dir que la pressió anirà descendint al llarg del reactor degut a que el fluid reactiu és frenat per les partícules de catalitzador i per les parets del tubs per on circula. La caiguda de pressió dependrà de diversos factors com són la porositat del llit, el tamany de partícula que forma el llit, entre d'altres.

L'expressió més emprada pel càlcul del perfil de pressió a través d'un llit empaquet de tipus porós és l'equació d'Ergun:

$$\left[\frac{dP}{dz} = \frac{-G}{\rho g_c D_p} \frac{1 - \theta}{\theta^3} \left(\frac{150 (1 - \theta) \mu}{D_p} + 1.75 G \right) \right] \quad (11.2.7)$$

Però aquesta expressió descriu el perfil de pressió al llarg de la longitud del reactor i com s'ha comentat, per a reactors empaquetats interessa més la massa de catalitzador. Tenint en compte que la massa de catalitzador és igual al volum d'aquest multiplicat per la seva densitat, és a dir:

$$[W = (1 - \theta) \cdot A_c \cdot z \cdot \rho_p] \quad (11.2.8)$$

A més a més, amb l'objectiu de simplificar l'equació (**), es defineixen dos paràmetres que depenen exclusivament de les propietats del llit i de les condicions d'entrada:

$$\left[\beta_o = \frac{G}{\rho g_c D_p} \frac{1 - \theta}{\theta^3} \left(\frac{150 (1 - \theta) \mu}{D_p} + 1.75 G \right) \right] \quad (11.2.9)$$

$$\left[\alpha = \frac{2 \beta_o}{A \rho_p (1 - \theta) P_E} \right] \quad (11.2.10)$$

on

G = Densitat de flux màssic [$\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]

g_c = Factor de conversió (Sistema mètric $g_c = 1$)

D_p = Diàmetre de les partícules que formen el llit [m]

θ = Porositat del llit [Volum de buit / Volum total del llit]

μ = Viscositat del gas [$\text{Kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

ρ = Densitat del gas [Kg/m³]

ρ_p = Densitat de les partícules que formen el llit [Kg/m³]

A = Àrea transversal del llit [m²]

Simplificant s'obté la següent expressió:

$$\left[\frac{dP}{dW} = \frac{-\alpha}{2} \left(\frac{T}{T_E} \right) \left(\frac{P_E^2}{P} \right) (1 - \varepsilon X) \right] \quad (11.2.11)$$

11.2.6 DIMENSIONAT

Un cop es resolten totes les equacions diferencials presentades es pot conèixer el perfil de conversió, velocitat i concentració en funció de la massa de catalitzador. Com que s'ha fixat una conversió d'acetilè del 96%, la massa que es precisa de clorur de mercuri és de 600 Kg. Aquests 600 Kg però, s'han de fixar al carbó actiu i suposant que la fracció massica de HgCl₃ en el suport és del 10%, es conclou que la massa total necessària és de 6000 Kg.

Un cop es disposa de la massa total necessària, coneixent les densitats de catalitzador i del suport, i fixant una porositat del 50% com s'ha pogut trobar bibliogràficament es pot calcular el volum del reactor:

$$\left[V = \frac{(M_{cat} \cdot \rho_{cat} + M_{suport} \cdot \rho_{suport})}{1 - \varepsilon} \right] \quad (11.2.12)$$

$$V = \frac{600Kg/5430 \frac{Kg}{m^3} + 5400Kg/500 \frac{Kg}{m^3}}{1 - 0.5} = 21.82 m^3$$

Però com es presentarà més endavant, construir un reactor de carcassa i tubs amb aquest volum comportaria unes dificultats tècniques massa importants i per tant s'ha decidit que el volum necessari es dividirà en tres reactors d'igual dimensió:

$$V_{reactor} = \frac{V}{3} = \frac{21.82 m^3}{3} = 7.28 m^3$$

Un cop es coneix el volum necessari de cada reactor, s'ha de trobar el número i la dimensió dels tubs que el formen, que serà funció del cabal de calor que s'ha de retirar.

11.2.7 REFRIGERACIÓ

El disseny dels requeriments tèrmics d'aquest tipus de reactor determinarà la longitud i diàmetre dels tubs, degut a que s'ha d'assegurar que el reactor disposa d'una àrea de bescanvi suficient per extreure l'energia generada com a conseqüència de la reacció. El disseny es portarà a terme utilitzant les pautes del mètode de Kern però tenint en compte que els tubs estan plens de partícules de catalitzador i en conseqüència, alguns valors típics es veuran afectats.



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

11.2.7.1 CALOR GENERAT

En primer lloc es calcula la calor que es genera a cada reactor, com el producte de l'entalpia de reacció i el cabal de clorur de vinil produït.

$$[Q = \Delta H_R(T) \cdot F_{VCM}] \quad (11.2.13)$$

on

$\Delta H_R(T)$ = Entalpia de reacció a la temperatura T [J/mol]

F_{vcm} = Cabal molar de clorur de vinil [mol/s]

Q = Cabal de calor [W]

L'entalpia de reacció a la temperatura d'operació és:

$$\left[\Delta H_R(T) = \Delta H_R(T_{ref}) + \int_{T_{ref}}^T \Delta C_p dT \right] \quad (11.2.14)$$

Per una altra banda, l'entalpia de reacció a la temperatura de referència és la suma de les entalpies de formació a la temperatura de referència de cada espècie que participa a la reacció, multiplicat pel seu coeficient estequiomètric:

$$\left[\Delta H_R(T_{ref}) = \Sigma (v_i \cdot H_i(T_{ref})) \right] \quad (11.2.15)$$

on

$H_i(T_{ref})$ = Entalpia de formació d'i [J/mol]

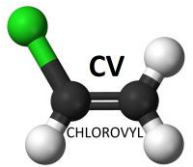
Bibliogràficament s'ha trobat les següents entalpies de formació per a una temperatura de 20°C i una pressió de 1 atm:

Taula 11.17: Entalpies de formació de les diferents espècies que participen a la reacció.

Espècie	H_i [J/mol]
Acetilè	227400
Clorur d'hidrogen	-92223
Clorur de vinil	22300

$$\Delta H_R(T_{ref}) = -227400 \frac{J}{mol} - \left(-92223 \frac{J}{mol} \right) + 22300 \frac{J}{mol} = -112877 \frac{J}{mol}$$

S'obté una entalpia de reacció, a 20°C i 1 atm, de -112.88 KJ per mol de clorur de vinil produït.



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

Un cop es disposa de l'entalpia de reacció a una temperatura de referència, s'ha de procedir a calcular les calors específiques per tal de trobar l'entalpia a la temperatura d'operació.

Les calors específiques també són dependents de la temperatura i per tant es necessita una expressió pel seu càlcul. Bibliogràficament s'ha trobat la següent expressió:

$$[C_p = C_{pA} + C_{pB} \cdot T + C_{pC} \cdot T^2 + C_{pD} \cdot T^3 + C_{pE} \cdot T^4 + C_{pF} \cdot T^5] \quad (11.2.16)$$

On els paràmetres C_{pA} , C_{pC} , C_{pD} , C_{pE} i C_{pF} depenen del tipus de compost:

Taula 11.18: Coeficients emprats pel càlcul de les calors específiques.

	Clorur d'hidrogen	Acetilè	Clorur de vinil
C_{pA}	6.93	8.57E-01	1.19
C_{pB}	8.51E-04	5.33E-02	4.99E-02
C_{pC}	-4.89E-06	-9.54E-05	-4.12E-05
C_{pD}	1.01E-08	9.74E-08	1.63E-08
C_{pE}	-7.08E-12	-5.03E-11	-1.88E-12
C_{pF}	1.69E-15	1.02E-14	0
C_p [J/(mol·K)]	6.97	12.03	15.77

Per una altra banda:

$$[\Delta C_p = \Sigma(v_i \cdot C_{pi})] \quad (11.2.17)$$

$$\Delta C_p = -1 \cdot 12.03 \frac{J}{mol \cdot K} - 1 \cdot 6.97 \frac{J}{mol \cdot K} + 1 \cdot 15.77 = -3.23 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Tornant a l'expressió (14):

$$\Delta H_R(135^\circ C) = \Delta H_R(20^\circ C) + \Delta C_p(135^\circ C - 20^\circ C)$$

$$\Delta H_R(135^\circ C) = -112880 \frac{J}{mol} - 3.23 \frac{J}{mol \cdot K} (408K - 293K) = -113249 \frac{J}{mol}$$

Per acabar, com que es coneix que el cabal molar de clorur de vinil que es produeix a cada reactor és de 12.25 Kmol/h, es pot concloure que la calor que es genera a l'interior del reactor és:

$$Q = -113249 \frac{J}{mol} \cdot 12247 \frac{mol}{h} = -1.39 \cdot 10^9 \frac{J}{h} = 3.85 \cdot 10^5 W$$

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CàLCUL

11.2.7.2 CABAL DE REFRIGERACIÓ

Aquest cabal de calor s'ha d'extreure de cada reactor per tal de que aquests operin de forma isoterma. Per fer-ho, s'ha decidit utilitzar aigua de refrigeració degut a que per les necessitats que es precisen és un recurs totalment vàlid.

Per tant, el cabal de refrigerant es calcula realitzant un balanç d'energia segons:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T ;$$

$$\left[m = \frac{Q}{C_p \cdot \Delta T} \right] \quad (11.2.18)$$

on m = Cabal màssic de refrigerant [Kg/s]

Suposant que el fluid refrigerant entrarà a una temperatura de 22°C i que patirà un salt tèrmic de 15°C com a màxim:

$$m = \frac{3.85 \cdot 10^5 W}{4180 \frac{J}{Kg \cdot ^\circ C} \cdot (37^\circ C - 22^\circ C)} = 6.14 \frac{Kg}{s} = 22116.35 \frac{Kg}{h}$$

Com que hi ha tres reactors el cabal màssic de refrigerant serà de 66349.05 Kg/h.

11.2.7.3 TIPUS DE CIRCULACIÓ

El fluid de reacció circularà per tubs i el líquid refrigerant per carcassa. La temperatura del fluid de reacció roman constant a un valor de 135°C i el fluid de procés augmenta la seva temperatura de 22°C a 37°C. El fet de que el fluid de reacció romangui constant provoca que l'increment de temperatura mitjà logarítmic no es vegi afectat pel tipus de circulació, però s'ha decidit alimentar el refrigerant en contracorrent ja que a efectes pràctics, un cop l'aliment entri al reactor haurà de variar la seva temperatura fins a arribar als 135°C i per tant en aquest punt no es necessitarà extreure calor.

L'increment de temperatures mitjà logarítmic és, llavors:

$$\left[\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \right] \quad (11.2.19)$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(135^\circ C - 37^\circ C) - (135^\circ C - 22^\circ C)}{\ln \left(\frac{(135^\circ C - 37^\circ C)}{(135^\circ C - 22^\circ C)} \right)} = 105.32^\circ C$$

També s'ha decidit que tant el número de passos per carcassa com els de tubs serà 1, per tal de facilitar el manteniment de l'equip alhora de realitzar regeneracions del catalitzador o possibles obstruccions d'aquest. Per tant, no s'ha de realitzar cap correcció de l'increment de temperatures mitjà logarítmic, és a dir, F pren un valor de 1.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

11.2.7.4 SELECCIÓ DEL BESCANVIADOR

11.2.7.4.1 NOMBRE DE TUBS

Utilitzant el mètode de Kern es suposa un coeficient global de calor U , obtingut de dades bibliogràfiques en funció dels fluids que circulen, per posteriorment calcular l'àrea total de bescanvi segons l'equació de velocitat de transferència de calor:

$$\left[A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{ml}} \right] \quad (11.2.20)$$

Coneixent l'àrea total de bescanvi, i escollint les característiques dels tubs, es podrà calcular el nombre d'aquests:

$$\left[N_{tub} = \frac{A}{A_{tub}} \right] \quad (11.2.21)$$

En aquest cas però, seguint aquest procediment es conclourà a un resultat erroni degut a que en aquest cas el volum del reactor ha estat prèviament calculat, i per tant el volum que ha d'ocupar la suma dels volums interns de cada tub està fixada també.

Per tant, s'ha fixat una longitud i diàmetre de tubs segons la bibliografia [2], i s'ha calculat el nombre de tubs com la divisió del volum total de reactor entre el volum intern d'un tub:

$$\left[N_{tub} = \frac{V_{reactor}}{V_{tub}} \right] \quad (11.2.22)$$

Posteriorment s'ha utilitzat l'equació [21] per calcular l'àrea total de bescanvi, i amb l'equació [20] s'ha calculat el coeficient global U i s'ha comprovat que estigués dins del rang típic segons la bibliografia (**). Aquest coeficient calculat representa el coeficient global de calor mínim que ha de tenir el sistema per poder retirar la calor que es genera amb l'àrea de la qual es disposa, i per tant sempre que aquest coeficient sigui superior al mínim, es podrà retirar tota la calor que es genera.

Exemple de càlcul:

El volum intern d'un tub d'acer inoxidable 316L, DN50, de 7 metres i Schedule 5S és:

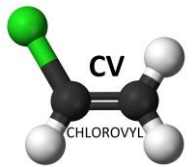
$$V_{tub} = \frac{\pi}{4} D_i^2 \cdot L = \frac{\pi}{4} (0.057m)^2 \cdot 7m = 0.0179m^3$$

El nombre de tubs és:

$$N_{tub} = \frac{V_{reactor}}{V_{tub}} = \frac{7.28 m^3}{0.0179m^3} = 407.22 \approx 408 \text{ tubs}$$

L'àrea de transferència de calor d'un tub és:

$$A_{tub} = \pi \cdot D_{ext} \cdot L = \pi \cdot 0.0603m \cdot 7m = 1.326m^2$$



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

La total:

$$A = A_{tub} \cdot N_{tub} = \frac{1.326m^2}{tub} \cdot 406 tubs = 540 m^2$$

Finalment es calcula el coeficient global de transmissió de calor:

$$U = \frac{q}{A \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{3.85 \cdot 10^5 W}{540 m^2 \cdot 105.32^\circ C} = 6.77 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

El valor de U es troba dins del rang típic segons la bibliografia [3]

11.2.7.4.2 DIÀMETRE DE FEIX DE TUBS I DE CARCASSA

Per calcular el diàmetre de carcassa s’ha de sumar el diàmetre de feix de tubs i l’espai que ha de quedar entre el feix i la paret de la carcassa. Aquest espai dependrà del tipus de carcassa, que en aquest cas s’ha escollit del tipus “Pull-through floating head”. L’espressió utilitzada ha estat:

$$\left[D_b = D_E \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{\frac{1}{n_1}} \right] \quad (11.2.23)$$

on

D_b = Diàmetre del feix de tubs en mm

D_E = Diàmetre exterior dels tubs [mm]

N_t = Cabal de calor [W]

n_1 i K_1 són funció del pitch escollit i del número de passos per tubs

Taula 11.19: Valors de n_1 i k_1 segons pitch i número de passos per tubs.

Pitch triangular $p_t = 1.25 D_E$					
Passos per tub	1	2	4	6	8
K_1	0.319	0.249	0.175	0.0743	0.0365
n_1	2.142	2.207	2.285	2.499	2.675
Pitch quadrat $p_t = 1.25 D_E$					
Passos per tub	1	2	4	6	8
K_1	0.215	0.156	0.158	0.0402	0.0331
n_1	2.207	2.291	2.263	2.617	2.643

En el cas que ocupa $n_1 = 2.142$ i $K_1 = 0.319$

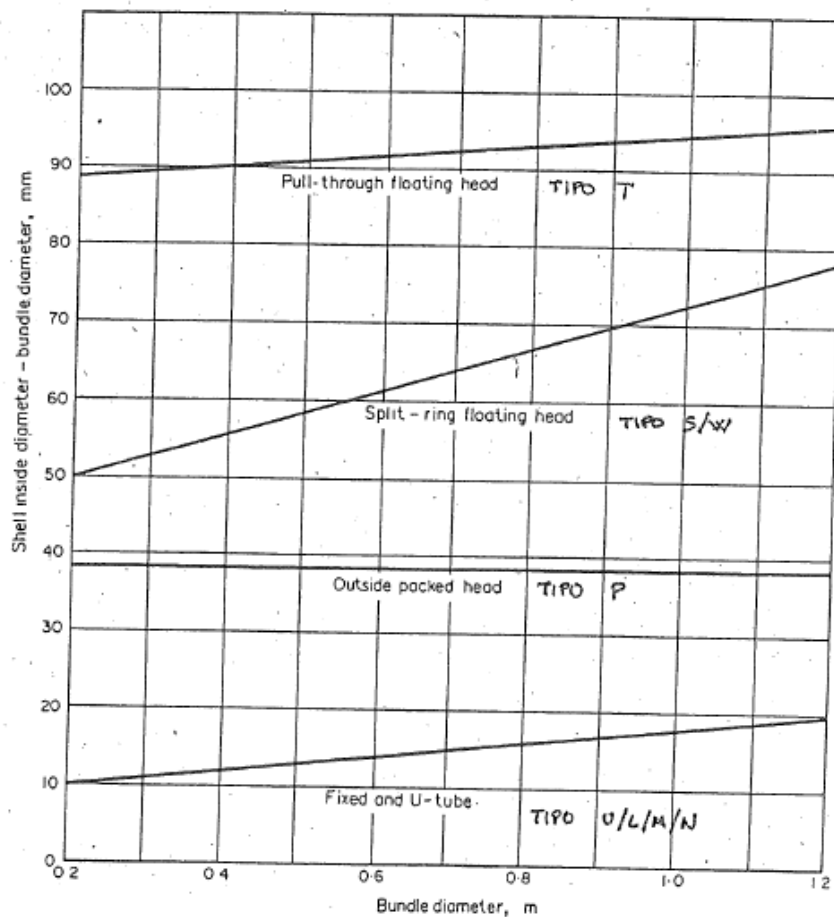
CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

Exemple de càlcul:

$$D_b = 60.3mm \cdot \left(\frac{408}{0.319}\right)^{\frac{1}{2.142}} = 1701 mm$$

Un cop es disposa del diàmetre de feix de tubs s'utilitza la següent figura per a determinar el diàmetre de la carcassa:

Taula 11.20: Diferència entre el diàmetre de carcassa i el de feix de tubs, en funció del diàmetre de feix de tubs.



S'obté un diàmetre de carcassa de 1801 mm, i per tant la relació longitud de tubs / diàmetre de carcassa pren un valor de 4.

11.2.7.4.3 VELOCITATS DE TUBS

Es calcula la velocitat de pas del fluid per tubs, tenint en compte que aquests estaran plens de partícules de catalitzador i per tant s'ha de tenir en compte l'espai que ocupen aquestes partícules:

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

$$\left[v_t = \frac{m_t}{\rho_t A_{pas1tub} N_{tp} (1 - \varepsilon)} \right] \quad (11.2.24)$$

on

m_t = Cabal màssic del fluid que circula per tubs [Kg/s]

$A_{pas1tub}$ = Àrea de pas del fluid per un sol tub

ρ_t = Densitat del fluid que circula per tubs [Kg/m³]

N_{tp} = Número de tubs per pas

Exemple de càlcul:

$$v_t = \frac{811.39 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{1h}{3600s}}{1.73 \frac{Kg}{m^3} \cdot \frac{\pi}{4} (0.057m)^2 \cdot 408 \cdot (1 - 0.5)} = 0.25 \text{ m/s}$$

Es compara amb els valors típics per a rectors de llit fix, de carcassa i tubs i es comprova que el valor està dins del rang típic.

11.2.7.4.4 DETERMINACIÓ DEL NÚMERO DE PANTALLES DEFLECTORES

Hi ha dos paràmetres que determinen les característiques geomètriques de les pantalles deflectores.

Per un banda està el baffle cut que és l'espai que queda entre la pantalla i la carcassa, per on passarà el fluid del costat de carcassa. S'expressa com un percentatge del diàmetre de carcassa, sent els valors òptims entre el 20 i el 25%. En aquest cas s'ha escollit un 25% del diàmetre de carcassa.

Per una altra banda està l'espaiat entre pantalles que oscil·la entre 0.2 i 1 vegades el diàmetre de carcassa. En aquest cas s'ha escollit un 20%.

Per últim, el número de pantalles deflectores es pot calcular com:

$$\left[N^{\circ} \text{ pantalles} = \frac{L}{l_B} - 1 \right] \quad (11.2.25)$$

on

L = Longitud de tubs [mm]

l_B = Espai entre pantalles [mm]

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

Exemple de càlcul:

$$N^{\circ} \text{ pantalles} = \frac{7000 \text{ mm}}{360.37} - 1 = 18.43 \approx 19 \text{ pantalles}$$

Un cop es disposa del número de pantalles i de la seva geometria, ja es pot procedir al càlcul de la velocitat del fluid que circula per la carcassa.

11.2.7.4.5 VELOCITAT DE CARCASSA

La forma de càlcul de la velocitat del fluid que circula per la carcassa és anàloga a la manera de calcular la velocitat de tubs, però s'ha de tenir en compte que l'àrea de circulació és diferent:

$$\left[v_s = \frac{M_s}{A_{ST} \cdot \rho_s} \right] \quad (11.2.26)$$

on

M_s = Cabal màssic [Kg/s]

A_{ST} = Àrea transversal de la carcassa [m²]

L'àrea transversal de la carcassa es pot calcular segons:

$$\left[A_{ST} = \frac{I_B \cdot D_s \cdot (\text{pitch} - D_E)}{\text{pitch} \cdot n_{ps}} \right] \quad (11.2.27)$$

on

n_{ps} = Número de passos per carcassa

pitch = 1.25 · D_E

Exemple de càlcul:

$$A_{ST} = \frac{0.36 \text{ m} \cdot 1.8 \text{ m} \cdot (1.25 \cdot 0.0603 \text{ m} - 0.0603 \text{ m})}{1.25 \cdot 0.0603 \text{ m} \cdot 1} = 0.65 \text{ m}^2$$

$$v_s = \frac{22116.35 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0.65 \text{ m}^2 \cdot 998.66} = 0.01 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

11.2.7.4.6 ALTRES COMPROVACIONS

L'últim pas que s'ha realitzat per al disseny dels reactors d'hydrocloració ha estat comprovar que les pèrdues de pressió són acceptables i també comprovar que el coeficient global de calor fos superior al anteriorment suposat. Per realitzar aquest procediment s'ha dut a terme una simulació amb Aspen Hysys per tal de trobar els valors



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

que s'han esmentat. En primer lloc s'ha definit la composició del fluid de procés i el de servei, així com les seves propietats. Per últim s'ha dissenyat un bescanviador amb generació de calor per tal de simular la reacció química. S'ha comprovat que la pèrdua de pressió pren un valor quasi menyspreable (Veure full d'especificacions reactors hidrocloració). Per últim, s'ha obtingut un coeficient global de transferència de calor de $10.17 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C})$, i per tant es pot afirmar que tota la calor que es generi dins del reactor es podrà retirar satisfactòriament.

11.3 COLUMNES DE SEPARACIÓ

11.3.1 DISSENY DE COLUMNES

Tenint en compte que les tres columnes s'han dissenyat seguint el mateix procés, es procedirà a explicar pas a pas el disseny de la primera columna i de les altres dos es comentaran les possibles diferències que hi puguin existir respecte a la primera columna a l'hora de dissenyar-la i s'afegiran els resultats obtinguts.

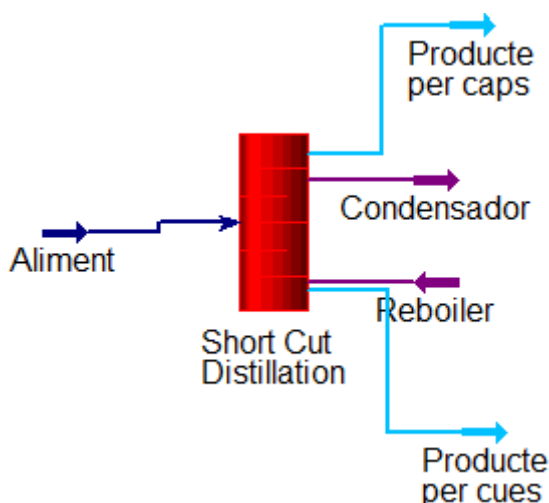
11.3.1.1 COLUMNA CD-201

El mètode per dissenyar aquesta i les següents columnes ha sigut el plantejat pel programa *Aspen HYSYS*. Primerament es fa un dimensionament aproximat a partir del model *Short Cut Distillation*. Seguidament, s'utilitza l'opció de *Distillation Column Sub-Flowsheet* per obtenir valors més concrets de temperatura i concentracions dels productes. El següent pas és el d'utilitzar l'apartat de *Equipment Design Tray Sizing-Main* per fer un disseny de la mida d'aquest equip. Finalment, l'últim pas és el de dissenyar tant els capçals com el gruix de la columna segons les condicions a les que estigui aquesta.

11.3.1.1.1 DIMENSIONAMENT APROXIMAT

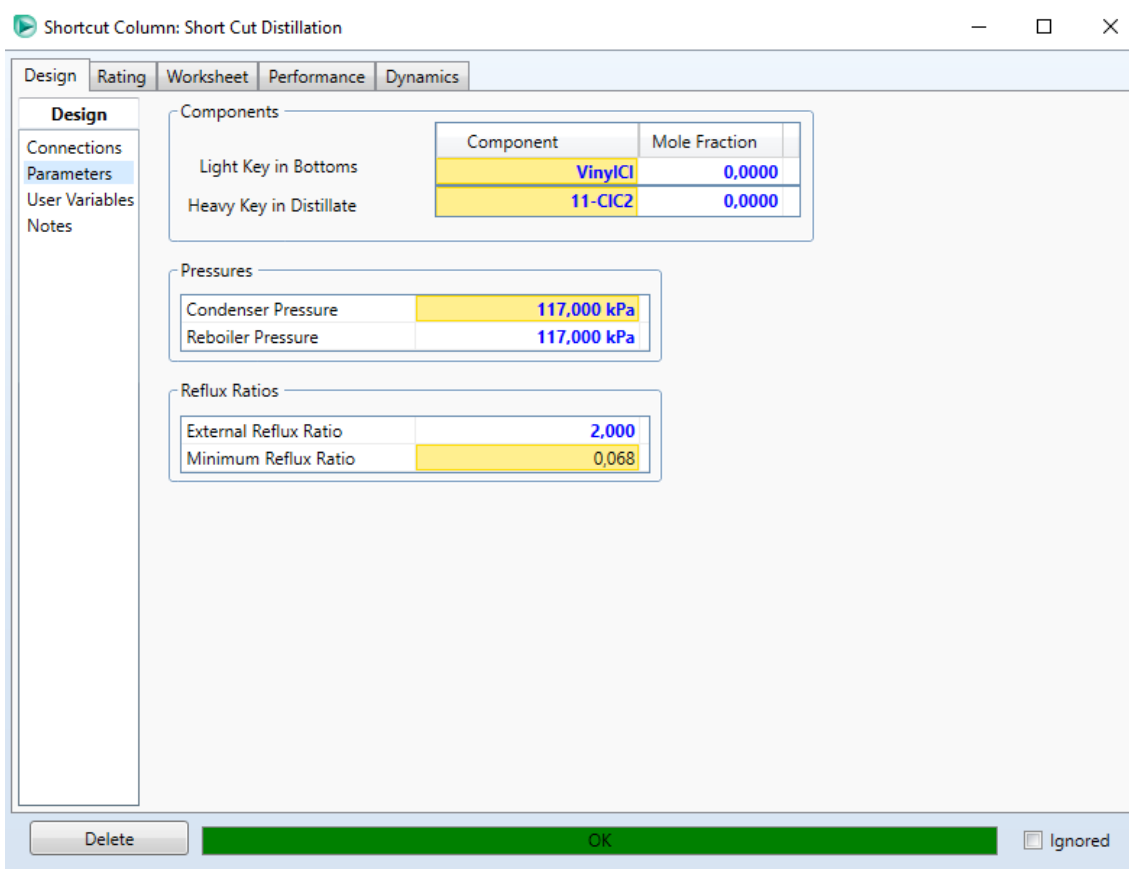
Com s'ha comentat en el apartat anterior, el primer pas a seguir en el disseny d'una columna de destil·lació mitjançant el programa *Aspen HYSYS* serà el de calcular les condicions del producte desitjat i les condicions de la columna per obtenir-lo. Això es pot fer fàcilment amb l'opció *Short Cut Distillation*.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL



Il·lustració 11.1: Connexions en un procés "Short Cut Distillation".

Per tal de poder fer aquest disseny, primerament s'haurà de preparar el programa indicant els corrents de matèria d'aliment i de productes i els corrents d'energia de condensador i reboiler. En aquest pas ja s'ha de conèixer tot lo referent a la línia de l'aliment (composició, temperatura, pressió, cabal...).



Il·lustració 11.2: Finestra on s'indiquen els valors necessaris pel disseny "Sort Cut Distillation".



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

El següent pas es indicar al programa la composició estimada del component clau volàtil (**Light Key**) que tindrà el producte obtingut per cues i la del component clau pesat (**Heavy Key**) que s'obindrà per caps, a més de les condicions de pressió al condensador i al reboiler i el valor de reflux extern tenint en compte el valor mínim de reflux per les condicions esmentades anteriorment.

Per tal de conèixer quin és l'ordre de volatilitat dels nostres components s'ha de comparar les volatilitats relatives de les substàncies en qüestió a partir de les volatilitats absolutes obtingudes pel programa HYSYS.

$$\alpha_{i,j} = \frac{K_i}{K_j} = \frac{y_i/x_i}{y_j/x_j} \quad (11.3.1)$$

On:

- $\alpha_{i,j}$ = Volatilitat relativa del component "i" respecte el component clau "j".
- K = Volatilitat absoluta.
- y = fracció molar en el vapor.
- x = fracció molar en el líquid.
- i, j = Component en qüestió i component clau, respectivament.

Taula 11.21: Volatilitats dels components del fluid de procés.

Substància	Volatilitat absoluta (K)	Volatilitat relativa (α)
Nitrogen	460.1	554.2
Acetilè	11.62	14.00
Clorur d'hidrogen	11.35	13.67
Clorur de vinil	0.8302	1.000
Nitrogen	0.04201	0.051

A l'hora d'escollir el valor de reflux extern, s'ha de tenir en compte que quant més alt es aquest, menys etapes d'equilibri seran necessàries per arribar a obtenir el producte desitjat, encara que per contrapartida s'augmenta el caudal intern de la columna i, com a conseqüència, la seva mida. Per tant, s'ha de tenir aquestes consideracions en compte a l'hora de decidir quin valor tindrà el reflux de la columna.



Shortcut Column: Short Cut Distillation

Design Rating Worksheet Performance Dynamics

Performance

Trays

Minimum Number of Trays	10,290
Actual Number of Trays	12,583
Optimal Feed Stage	0,684

Temperatures

Condenser [C]	-14,48
Reboiler [C]	61,67

Flows

Rectify Vapour [kgmole/h]	122,411
Rectify Liquid [kgmole/h]	81,608
Stripping Vapour [kgmole/h]	81,570
Stripping Liquid [kgmole/h]	81,608
Condenser Duty [kJ/h]	-1713827,159
Reboiler Duty [kJ/h]	1599882,399

Delete OK Ignored

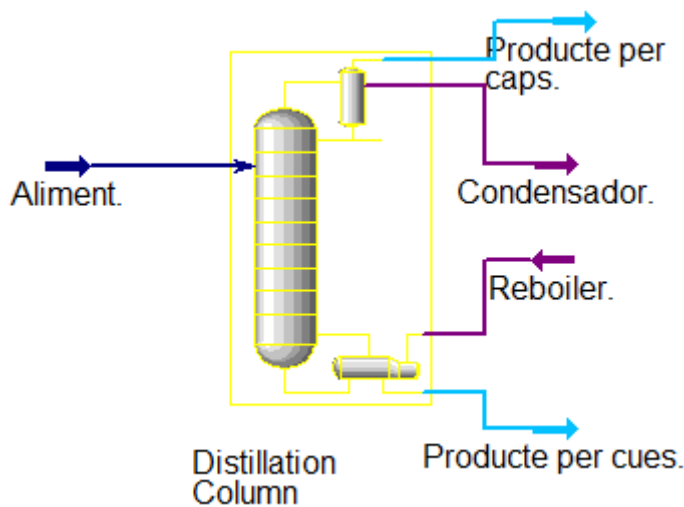
Il·lustració 11.3: Valors obtinguts del Short Cut Distillation pel disseny de la columna.

Fet això, el programa obté els resultats de número de plats mínims i actuals, plat òptim d'alimentació, temperatures de condensador i reboiler i cabals de recirculació. Obtinguts aquests valors, ja es pot anar al següent pas de disseny.

11.3.1.1.2 DIMENSIONAMENT GENERAL

En aquest apartat es procedirà a un disseny més acurat de la columna de destil·lació a partir del programa *Aspen HYSYS* i la seva instrucció *Distillation Columns Sub-Flowsheet*.

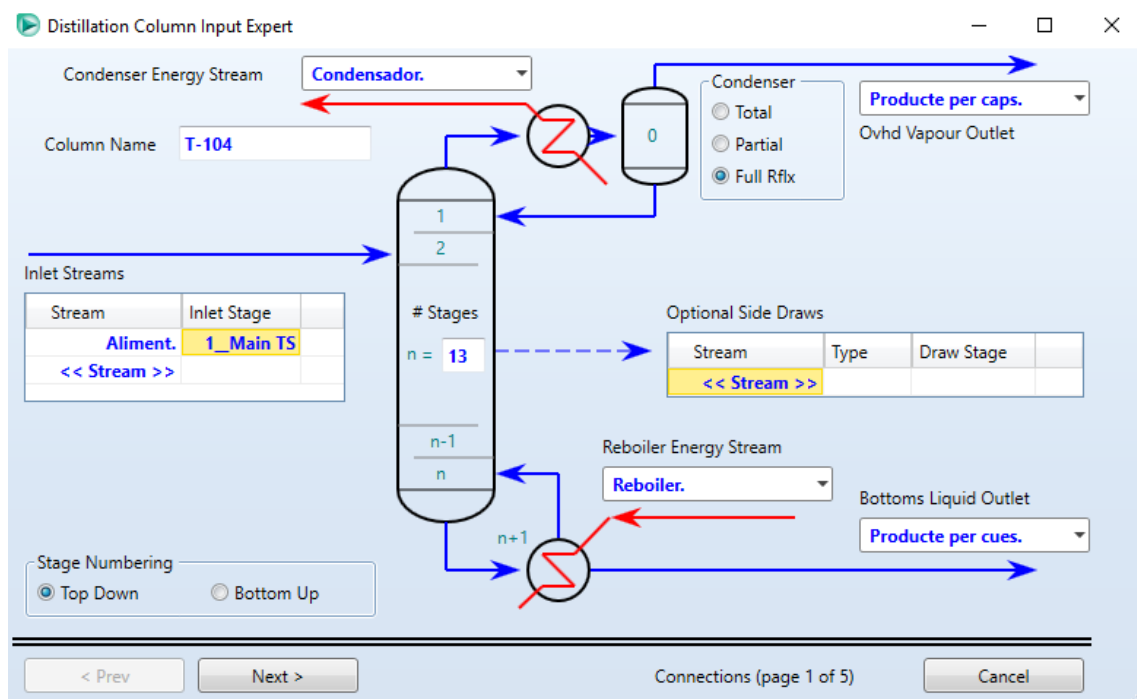
CAPÍTOL 11: MANUAL DE CàLCUL



Il·lustració 11.4: Connexions en un procés de "Distillation Column Sub-Flowsheet".

Igual que en el apartat anterior, primer s'haurà de preparar el programa indicant els corrents de matèria d'aliment i de productes i els corrents d'energia de condensador i reboiler, tot coneixent ja les característiques de l'aliment.

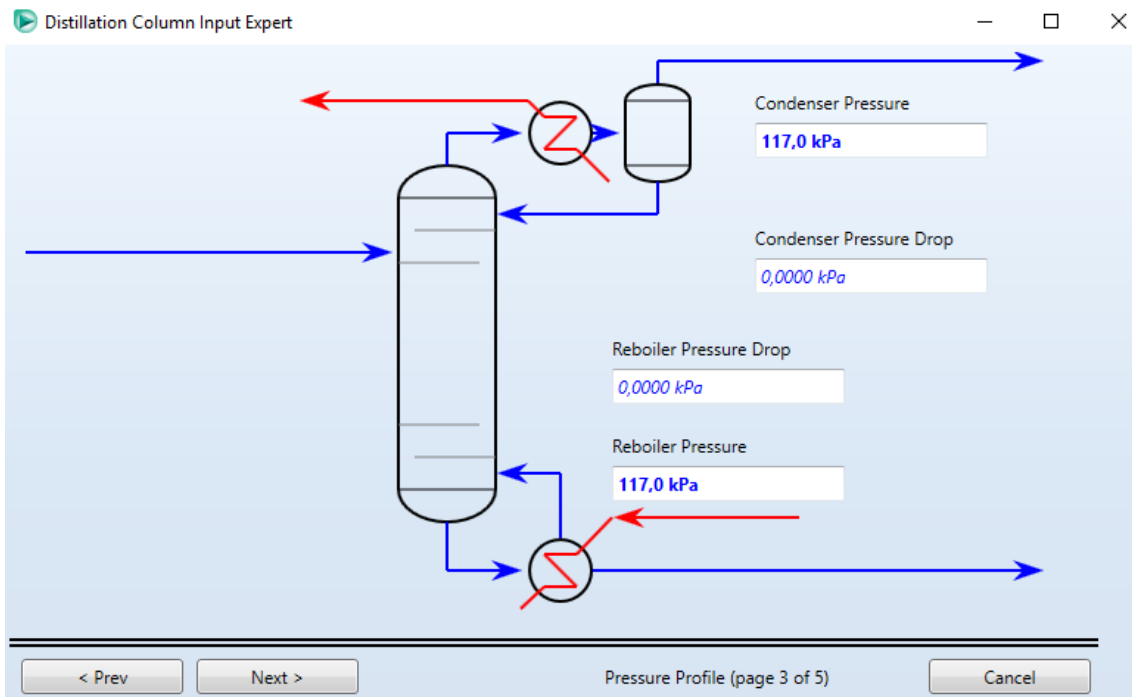
Després d'això, s'haurà de fer un seguit de cinc passos que el programa anirà indicant en ordre.



Il·lustració 11.5: Pàgina 1 de 5 per indicar els valors necessaris pel disseny de la columna de destil·lació.

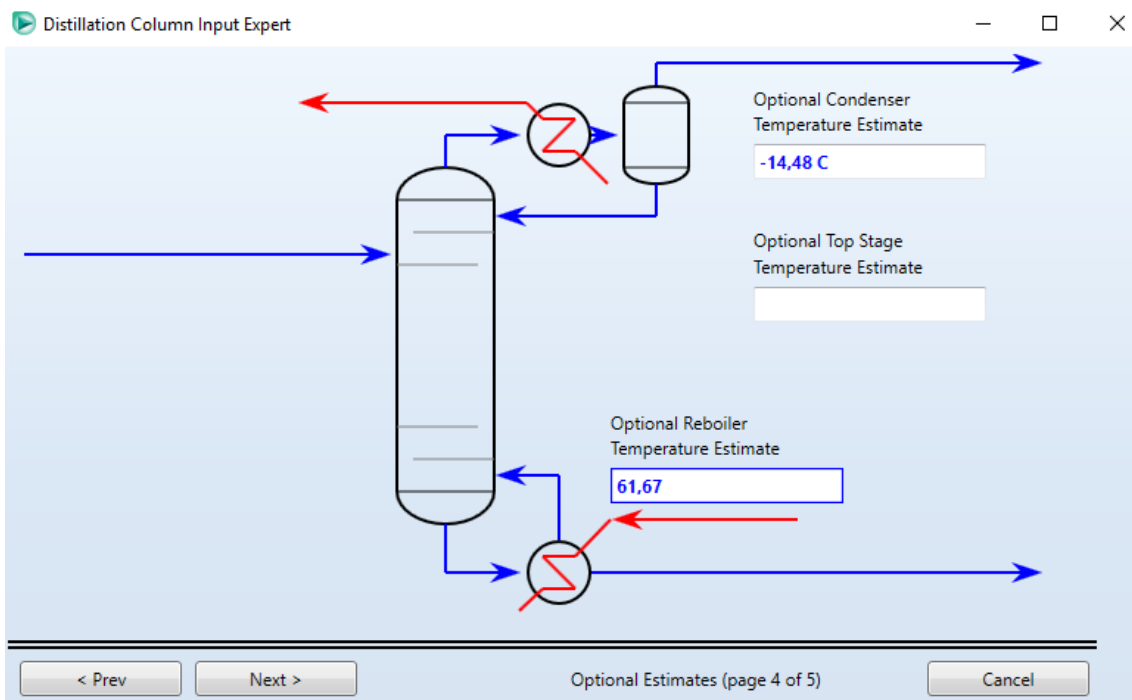
En el primer pas s'haurà d'indicar tots els fluxos de matèria i energia que entren i surten de la columna, així com el tipus de condensador, el plat d'aliment i el número de plats. Aquests dos últims s'hauran obtingut pel mètode *Short Cut*.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL



Il·lustració 11.6: Pàgina 3 de 5 per indicar els valors necessaris pel disseny de la columna de destil·lació.

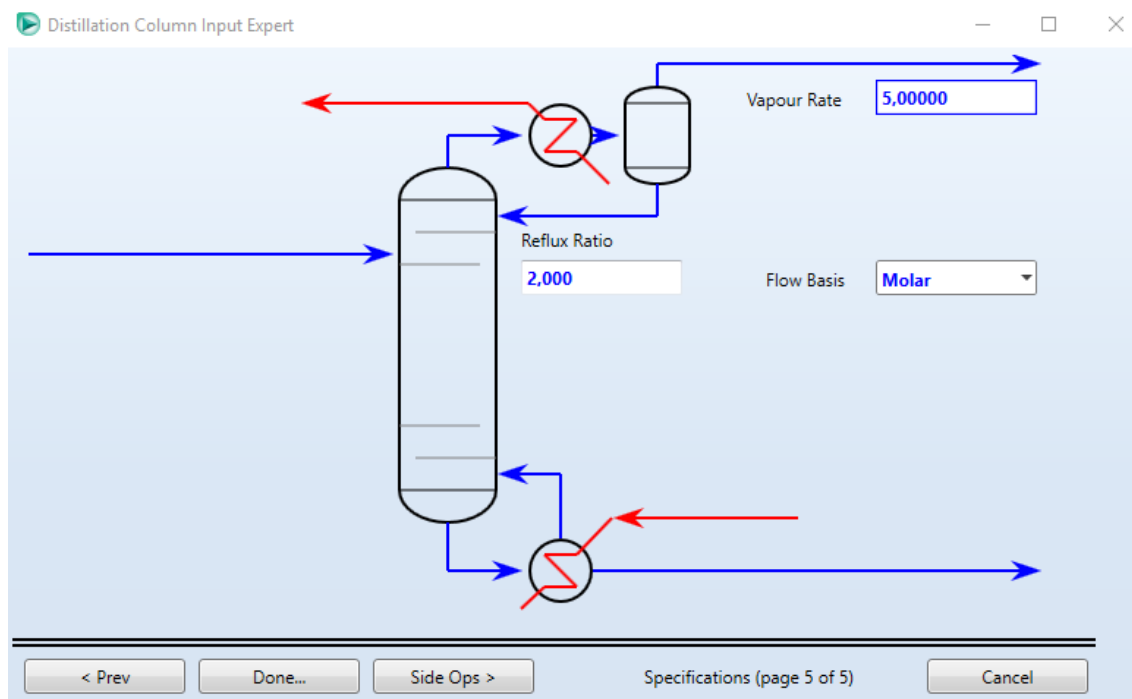
Deixant sense modificar la segona pàgina, es continua directament cap a la tercera. En aquesta s'haurà d'indicar les pressions tant del condensador com del reboiler. Aquestes pressions haurien de ser les mateixes a les indicades en el mètode de l'apartat anterior.



Il·lustració 11.7: Pàgina 4 de 5 per indicar els valors necessaris pel disseny de la columna de destil·lació.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

En la següent pàgina el programa demana que s'indiquin els valors de temperatura del condensador i del reboiler. Aquests valors s'hauran obtingut fent el mètode *Short Cut*. Finalitzat aquest pas, ja només quedaria omplir l'última pàgina.

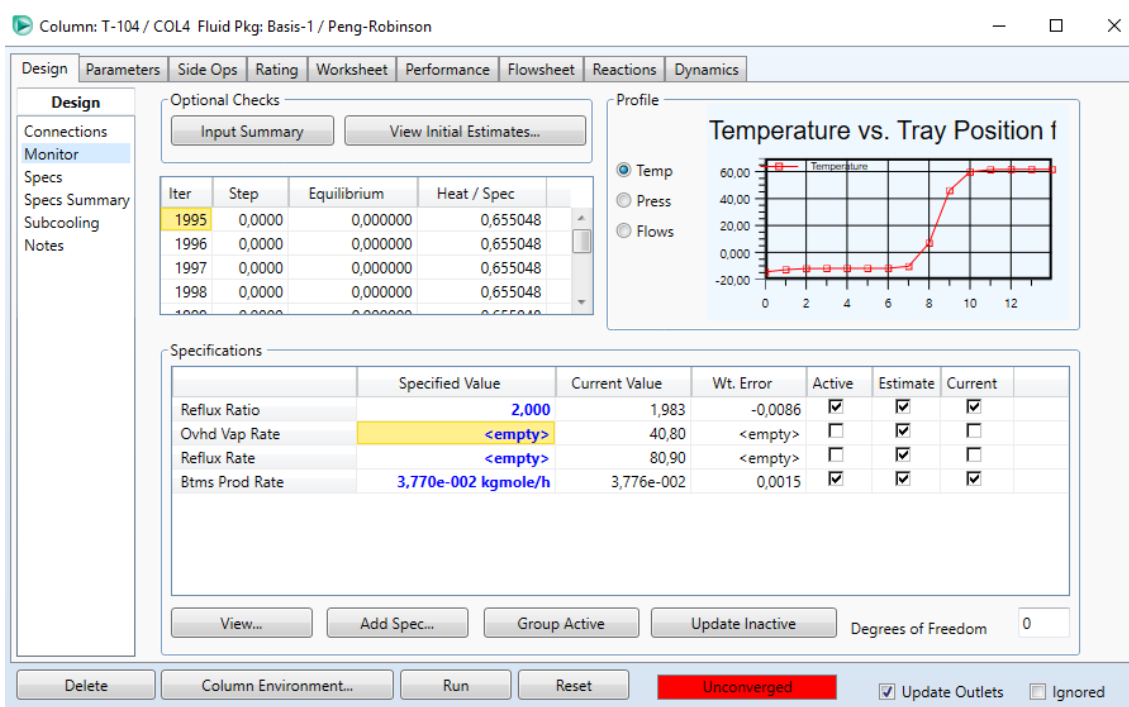


Il·lustració 11.8: Pàgina 5 de 5 per indicar els valors necessaris pel disseny de la columna de destil·lació.

En aquesta pàgina es demana tant el valor de reflux com el caudal de vapor obtingut del condensador. En aquesta columna l'objectiu es el d'extreure una quantitat concreta de subproducte per la part de cues, per lo que seria més interessant que fos aquest i no el caudal de caps el valor independent del sistema. És per això que arribats a aquest punt, s'indiqui un valor qualsevol en el caudal de vapor, ja que a continuació es modificarà. Entès això últim, ja es pot pulsar a la casella "Done" per finalitzar aquest procés.

A continuació, es procedeix a anar a l'apartat de "Monitor" per fer les modificacions pertinents.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL



Il·lustració 11.9: Apartat "Monitor" de la columna de destil·lació on s'indica refluxos i cabals de sortida de la columna.

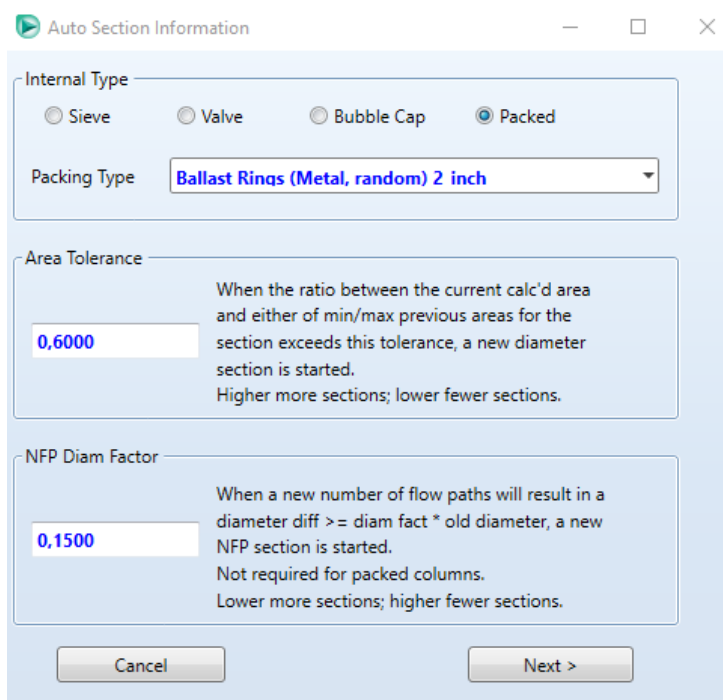
Com s'ha dit anteriorment, l'objectiu d'aquesta columna es extreure la major quantitat de 1,2-Dicloroetà de la mescla. Com es sap que l'aliment en te 3,78Kmol/h d'aquest, s'indica a la columna que el caudal molar de productes per cues ha de ser de 3,77kmol/h.

Amb això, el programa ja te calculats tots els balanços màssics i energètics que ocorren a la columna de destil·lació. El següent pas consistirà en dimensionar-la.

11.3.1.1.3 DISSENY DE L'EQUIP

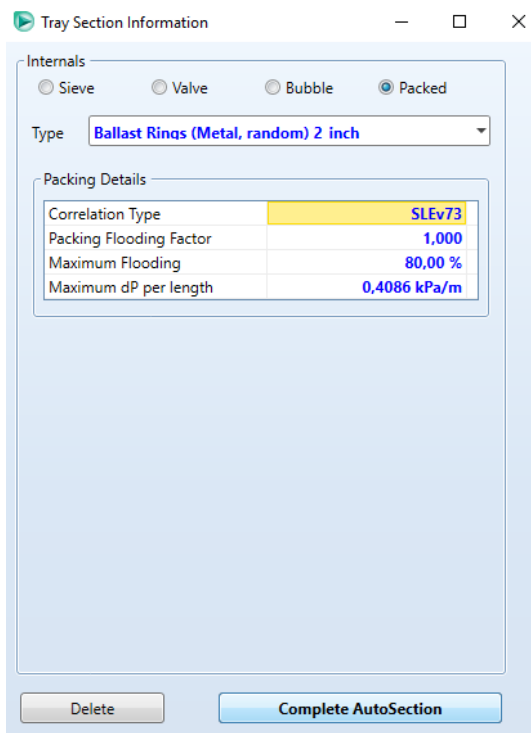
En aquest apartat es tractarà el dimensionament de la columna així com el seu tipus; de plats o de rebliment. El primer pas es entrar a l'apartat de *Equipment Design* del programa en qüestió i seleccionar l'equip que es vol dimensionar. Seguidament, es selecciona l'opció *Auto Section...* per començar amb el dimensionament.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL



Il·lustració 11.10: Indicacions del disseny d'una secció característica de la columna.

En aquesta pantalla s'haurà d'indicar quin tipus de columna es vol. Com s'ha dit anteriorment, s'escull del tipus amb rebliment, especificant així també quin tipus de material es vol utilitzar. Deixant com venen donades les opcions de *Area Tolerance* i *NFP Diam Factor*, es pressiona l'opció "Next>".



Il·lustració 11.11: Indicació més detallada del disseny d'una secció característica de la columna.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

En aquesta nova pantalla s'indiquen el tipus de correlació a utilitzar pel seu disseny, així com el factor d'inundació del reblliment, la màxima inundació i la màxima pèrdua de pressió per longitud. Deixant aquestes opcions sense manipular, es finalitza el dimensionament polsant l'opció de "Complete AutoSection".

		Section_1
Section Start		1 Main TS
Section End		13 Main TS
Internals		Packed
Section Diameter	(m)	0.7620
Max Flooding	(%)	49.89
X-Sectional Area	(m ²)	0.4560
Section Height	(m)	9.183
Section DeltaP	(kPa)	1.968
DP per Length	(kPa/m)	0.2143
Flood Gas Velocity	(m ³ /h-m ²)	9512
Flood Gas Velocity	(m/s)	2.642
Estimated # Pieces of Packing		25295
Estimated Mass of Packing	(kg)	1612.4
Estimated Packing Cost (US\$)		---
HETP	(m)	0.7064
HETP Correlation		Norton
Packing Correlation		SLEv73
Packing Type		Ballast Rings (Metal, random) 2_inch

Il·lustració 11.12: Valors obtinguts del programa "Aspen HYSYS" pel disseny de la columna CD-201.

Fet això, s'obtenen els valors necessaris per dimensionar la secció de la columna en qüestió. No obstant, encara queda per dimensionar els capçals així com el gruix d'aquest i de la columna, entre d'altres. Aquests valors es calcularan en el següent apartat.

11.3.1.1.4 DISSENY MECÀNIC

El disseny mecànic per construir la columna es basarà en les consideracions indicades al codi ASME per calderes i recipients de pressió (BPVC), mes concretament per la seva secció VIII-Divisió 1, la qual tracta regles per la construcció de recipients de pressió.

- **Material**

El primer pas serà el d'escollir quin tipus de material s'utilitzarà per construir la columna. Sabent que una de les substàncies presents al fluid de procés pot arribar a ser corrosiva sota certes condicions, es decideix utilitzar com a material l'acer inoxidable 316L, també anomenat SS 316L.

- **Pressió**

Per tal de calcular la pressió de disseny de la columna, s'utilitzarà dues equacions diferents i s'escollirà la del major valor.

$$P = \text{major}(1,1 \cdot P_0; P_0 + 196,13) [kPa] \quad (11.3.2)$$



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

On:

- P = Pressió de disseny
- P_0 = Pressió màxima d'operació normal de procés = 117kPa

$$P_1 = 1,1 \cdot 117 = 128,7kPa$$

$$P_2 = 117 + 196,13 = 313,2kPa$$

Per tant, i segons els valors obtinguts de pressió de disseny, la columna en qüestió es dissenyarà a una pressió de 313,2kPa.

- **Temperatura**

La temperatura de disseny s'escollirà d'una manera similar a la pressió de disseny. A partir de la temperatura més alta de la columna, s'aplicaran dues equacions i la de major temperatura serà la utilitzada.

$$T = \text{major}(T_{max} + 0.1 \cdot |T_{max}|; T_{max} + 15) [^{\circ}C] \quad (11.3.3)$$

On:

- T = Temperatura de disseny
- T_{max} = Temperatura màxima d'operació normal de procés = 61.67°C

$$T_1 = 61.67 + 0.1 \cdot |61.67| = 67.84^{\circ}C$$

$$T_2 = 61.67 + 15 = 76.67^{\circ}C$$

Per tant, la temperatura a la qual es dissenyarà la columna de destil·lació serà a 76.67°C.

- **Juntes**

Per tal d'escollir el tipus de junta, s'utilitza la norma UW-12 pertanyent al codi ASME. Dins d'aquesta norma, es decideix utilitzar pels càlculs els valors de la junta tipus 1, a la qual se li considera una eficiència de junta de 0.85.

- **Esforç del material**

Sabent que s'utilitzarà acer inoxidable, es busca l'esforç del material segons les restriccions de la taula facilitada.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES - ACERO INOXIDABLE													
P-No. 8 Grupo No. 1													
COMPOSICION NOMINAL, 18 Cr - 8 Ni	TABLA 1				TABLA 3								
	Cedencia min. 30 000 lb/pulg ²	Producto	No. de Espec.	Grado	Notas	Cedencia min. 30 000 lb/pulg ²	Producto	No. de Espec.	Grado	Notas			
	Tension min. 75 000 lb/pulg ²	Placa	SA-240	304	2 3	Cedencia min. 16 Cr - 12 Ni - 2Mo.	Placa	SA-240	316	2 3			
		Tubo s/c	SA-213	TP304	2		Placa	SA-240	317	2 3			
		Tubo s/c	SA-213	TP304H	—		Tubo s/c	SA-213	TP316	2			
		Tubo s/c	SA-312	TP304	2		Tubo s/c	SA-213	TP316H	—			
		Tubo s/c	SA-312	TP304H	—		Tubo s/c	SA-312	TP316	2			
		Tubo s/c	SA-376	TP304	2		Tubo s/c	SA-312	TP316H	—			
		Tubo s/c	SA-376	TP304H	—		Tubo s/c	SA-312	317	2			
		Tubo vaciado	SA-452	TP304H	—		Tubo s/c	SA-376	TP316	2			
COMPOSICION NOMINAL, 16 Cr - 12 Ni - 2Mo.	TABLA 2				TABLA 4								
	Cedencia 25 000	Producto	No. de Espec.	Grado	Notas	Cedencia 25 000	Producto	No. de Espec.	Grado	Notas			
	Tension 70 000	Placa	SA-240	304L	—	Tension 70 000	Placa	SA-240	316L	—			
		Tubo s/c	SA-213	TP304L	—		Tubo s/c	SA-213	TP316L	—			
		Tubo s/c	SA-312	TP304L	—		Tubo s/c	SA-312	TP316L	—			
		Forj.	SA-182	F304L	—		Forj.	SA-182	F316L	4			
		Barra	SA-479	304L	5		Barra	SA-479	316L	5			
VALORES MAXIMOS DE ESFUERZO PERMITIDO, 1 000 lb/pulg ²													
PARA TEMPERATURAS DEL METAL NO MAYORES DE, GRADOS F													
MATERIALES DE LA TABLA	-20-100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	NOTAS
1	18.8	17.8	16.6	16.2	15.9	15.9	15.9	15.9	15.5	15.2	14.9	14.7	1
18.8	15.7	14.1	12.9	12.1	11.4	11.2	11.1	10.8	10.6	10.4	10.2	10.2	
2	15.7	15.7	15.3	14.7	14.4	14.0	13.7	13.5	13.3	13.0	—	—	1
15.7	13.4	12.0	11.0	10.3	9.7	9.5	9.4	9.2	9.1	—	—	—	
3	18.8	18.8	18.4	18.1	18.0	17.0	16.7	16.3	16.1	15.9	15.7	15.5	1
18.8	16.2	14.6	13.4	12.5	11.8	11.6	11.3	11.2	11.0	10.9	10.8	10.8	
4	15.7	15.7	15.7	15.5	14.4	13.5	13.2	12.9	12.6	12.4	12.1	—	1
15.7	13.3	11.9	10.8	10.0	9.4	9.2	9.0	8.8	8.6	8.4	—	—	
MATERIALES DE LA TABLA	PARA TEMPERATURAS DEL METAL NO MAYORES DE, GRADOS F												
	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	
1	14.4	13.8	12.2	9.8	7.7	6.1	4.7	3.7	2.9	2.3	1.8	1.4	1
10.0	9.8	9.5	8.9	7.7	6.1	4.7	3.7	2.9	2.3	1.8	1.4	1.4	
3	15.4	15.3	14.5	12.4	9.8	7.4	5.5	4.1	3.1	2.3	1.7	1.3	1
10.7	10.6	10.5	10.3	9.3	7.4	5.5	4.1	3.1	2.3	1.7	1.2	1.2	

Il·lustració 11.13: Propietats de diferents materials fets d'acer inoxidable.

Per tant i a partir d'aquests valors, es considera un valor d'esforç del material de 15700 lb/pulg² = 1082,48 bar = 1,08·10⁸ Pa.

• **Gruix de la columna**

Per tal de calcular el gruix de la columna s'utilitza les equacions indicades per la codificació ASME.

A

CASCO CILINDRICO (COSTURA LONGIT.)¹

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$$

$$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$$

1. Generalmente rige el esfuerzo en la costura longitudinal. Ver página anterior.
2. Cuando el espesor de pared exceda de la mitad del radio interior o P exceda de 0.385 SE, se aplicarán las fórmulas dadas en el Apéndice del Código, 1-2.

Il·lustració 11.14: Guia pel disseny del gruix d'una columna de destil·lació.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C.A. \quad (11.3.4)$$

On:

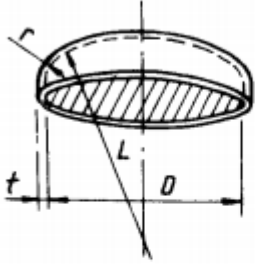
- t = gruix de la paret [m]
- P = Pressió de disseny [Pa]
- R = Radi interior [m]
- S = Esforç del material [Pa]
- E = Eficiència de la junta
- $C.A.$ = Marge de corrosió [m]

$$t = \frac{313200 \cdot 0.3810}{1,08 \cdot 10^8 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 313200} + 0.002 = 3,3 \cdot 10^{-3} m = 3,3 mm$$

Encara que aquesta equació serveixi per calcular el gruix de les entrades i sortides a la columna, al ser bastant restrictiu s'utilitza també pel càlcul del gruix de la columna. Obtingut aquest gruix, es procedirà a escollir i dissenyar el capçal.

• **Dimensions capçal**

Els capçals a utilitzar seran els típics per pressions baixes i mitges, els anomenats capçals toriesfèrics.

E		CABEZA ASME BRIDADA Y ALABEADA (CABEZA TORISFERICA)															
		Cuando $L/r = 16 \frac{2}{3}$															
		$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$							$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$								
		Cuando $Lr/$ menor de $16 \frac{2}{3}$															
		$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$							$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$								
		VALORES DEL FACTOR "M"															
L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
L/r	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	$16 \frac{2}{3}$	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* LA MAXIMA RAZON PERMITIDA ES: $L = D + 2t$ (véase la nota 2 de la página opuesta)																	

Il·lustració 11.15: Guia pel disseny d'un capçal toriesfèric.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

Considerant que el radi interior del capçal és igual al diàmetre intern de la columna i de que el radi interior de les curvatures és un 10% del radi interior del capçal per tal de que els càlculs posteriors siguin més fàcils de fer gràcies a aproximacions, primer es comprova el valor de M .

$$\frac{L}{r} = \frac{0.7620}{0.07620} = 10 \rightarrow M = 1,54$$

A partir d'aquest valor es pot aplicar la següent fórmula:

$$t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} \quad (11.3.5)$$

On:

- t = gruix de la paret [m]
- P = Pressió de disseny [Pa]
- L = Radi interior del capçal [m]
- M = Factor M
- S = Esforç del material [Pa]
- E = Eficiència de la junta

$$t = \frac{313200 \cdot 0,7620 \cdot 1,54}{2 \cdot 1,08 \cdot 10^8 \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 313200} = 2,00 \cdot 10^{-3} m = 2,00 mm$$

Com el valor del gruix es inferior al de la columna, es decideix utilitzar un mateix gruix per tot el conjunt, el qual serà de 6mm, per tal que hi hagi un marge de seguretat respecte els calculats.

11.3.1.1.5 ÚLTIMS CÀLCULS DE DISSENY

Definits tots els valors en l'apartat anterior, es finalitza el dimensionament de la columna fent uns últims càlculs per conèixer més característiques de la columna.

- **Diàmetres exteriors**

Coneguts ja els valors interns de la columna, es procedeix a fer el càlcul de les dimensions externes de la mateixa:

$$L_{ext,cap} = L + 2 \cdot t = 0,7620 + 2 \cdot 0,006 = 0,7740 m = 774 mm$$

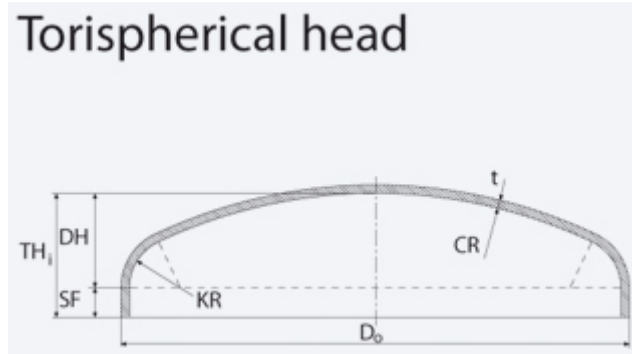
$$r_{ext,cap} = r + 2 \cdot t = 0,0762 + 2 \cdot 0,006 = 0,0882 m = 88,2 mm$$

$$D_{ext,col} = D_{int,col} + 2 \cdot t = 0.7620 + 2 \cdot 0.006 = 0.7740 m = 774 mm$$

- **Alçada dels capçals**

Per conèixer l'alçada dels capçal s'utilitzaran els càlculs indicats per l'empresa especialitzada en la seva construcció anomenada "KÖNIG+CO".

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL



Il·lustració 11.16: Mesures instructives pel càlcul de l'alçada equivalent a un capçal toriesfèric.

A partir d'aquests valors, es procedeix al seu càlcul:

$$KR = r = 0.07620m \quad ; \quad CR = L = 0.7620m$$

$$DH = 0,1935 \cdot D_0 - 0,455 \cdot t \quad (11.3.6)$$

$$DH = 0,1935 \cdot 0,7620 - 0,455 \cdot 0,006 = 0,145m$$

$$SF = 3,5 \cdot t \quad (11.3.7)$$

$$SF = 3,5 \cdot 0,006 = 0,021m$$

$$TH = DH + SF \quad (11.3.8)$$

$$TH = 0,145 + 0,021 = 0,166m$$

Per tant s'obté que l'alçada dels capçals es d'uns 0,166m.

- **Alçada de la columna**

Per fer aquest càlcul, serà necessari tant el valor de l'alçada de la columna com la del capçal:

$$h_T = h_{col} + 2 \cdot h_{cap} \quad (11.3.9)$$

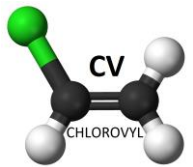
On:

- h_T = Alçada total de la columna (m)
- h_{col} = Alçada de la part cilíndrica de la columna (m)
- h_{cap} = Alçada dels capçals de la columna (m)

Per tant:

$$h_T = 9,183 + 2 \cdot 0,166 = 9,515m$$

- **Pes de la columna buida**



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

Per conèixer el pes de la columna buida, s'ha de calcular el pes de tot el volum de la columna. Aquest volum es divideix en dues parts; el del capçal i el del cilindre corresponent a la columna.

$$V_{cap} = 0,1 \cdot (L_{ext}^3 - L^3) + 0,1 \cdot (r_{ext}^3 - r^3) + \frac{\pi \cdot SF}{4} \cdot (D_{ext}^2 - D^2) \quad (11.3.10)$$

$$V_{cap} = 0,1 \cdot (0,774^3 - 0,762^3) + 0,1 \cdot (0,0882^3 - 0,0762^3) + \frac{\pi \cdot 0,021}{4} \cdot (0,774^2 - 0,762^2) = 2,45 \cdot 10^{-3} m^3$$

$$V_{col} = \frac{\pi \cdot h_{col}}{4} \cdot (D_{ext}^2 - D^2)$$

$$V_{col} = \frac{\pi \cdot 9,183}{4} \cdot (0,774^2 - 0,762^2) = 1,33 \cdot 10^{-1} m^3$$

Obtinguts aquests dos volums, es pot procedir al càlcul del volum de la paret de la columna:

$$V_{paret} = V_{col} + 2 \cdot V_{cap} \quad (11.3.11)$$

On:

- V_{paret} = Volum de la paret de la columna (m^3)
- V_{col} = Volum de la part cilíndrica de la columna (m^3)
- V_{cap} = Volum dels capçals de la columna (m^3)

$$V_{paret} = 0,133 + 2 \cdot 0,00245 = 0,139 m^3$$

Obtingut aquest volum, es procedeix al càlcul del seu pes tenint en compte que la densitat del material SS 316L es de $7960 \text{Kg}/m^3$ i de que per tenir en consideració els diferents elements del que estarà constituïda la part interior de la columna s'augmenta el volum calculat un 10%.

$$M_{col,buit} = 1,1 \cdot V_{paret} \cdot \rho_{SS 316L} \quad (11.3.12)$$

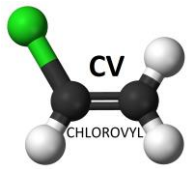
On:

- $M_{col,buit}$ = Pes de la columna buida (Kg)
- $\rho_{SS 316L}$ = Densitat de l'acer inoxidable 316L= $7960 \text{Kg}/m^3$

$$M_{col,buit} = 1,1 \cdot 0,139 \cdot 7960 = 1217 \text{Kg} = 1,217 \text{Tn}$$

Per tant, el pes de la columna buida seria aproximadament 1,217 Tn.

- **Pes de la columna plena d'aigua**



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

En aquest cas s'ha de tenir en consideració els volums interns de la columna, així com el pes de la columna en el moment d'estar buida.

$$V_{cap,int} = 0,1 \cdot L^3 + 0,1 \cdot r^3 + \frac{\pi \cdot SF}{4} \cdot D^2 \quad (11.3.13)$$

$$V_{cap,int} = 0,1 \cdot 0,762^3 + 0,1 \cdot 0,0762^3 + \frac{\pi \cdot 0,021}{4} \cdot 0,762^2 = 5,39 \cdot 10^{-2} m^3$$

$$V_{col,int} = \frac{\pi \cdot h_{col}}{4} \cdot D^2$$

$$V_{col,int} = \frac{\pi \cdot 9,183}{4} \cdot 0,762^2 = 4,18 m^3$$

Amb els volums interns es procedeix al càlcul del volum intern total de la columna:

$$V_{int} = V_{col,int} + 2 \cdot V_{cap,int} \quad (11.3.14)$$

On:

- V_{int} = Volum intern de la columna (m^3)
- $V_{col,int}$ = Volum intern de la part cilíndrica de la columna (m^3)
- $V_{cap,int}$ = Volum intern dels capçals de la columna (m^3)

$$V_{int} = 4,18 + 2 \cdot 0,0539 = 4,29 m^3$$

A partir d'aquest volum i la densitat de l'aigua (es considerarà que es de $1000 kg/m^3$) es pot calcular el pes de la columna omplerta d'aigua. No obstant, també s'ha de tenir en compte que hi ha un rebliment incorporat a la columna que té un pes especificat.

$$M_{col,aigua} = M_{col,buit} + M_{rebliment} + 1,1 \cdot V_{int} \cdot \rho_{aigua} \quad (11.3.15)$$

On:

- $M_{col,aigua}$ = Pes de la columna omplerta d'aigua (Kg)
- $M_{rebliment}$ = Pes del rebliment (Kg)
- ρ_{aigua} = Densitat de l'aigua = $1000 kg/m^3$

$$M_{col,aigua} = 1217 + 1612,4 + 1,1 \cdot 4,29 \cdot 1000 = 7548 Kg = 7,548 Tn$$

Per tant, el pes de la columna omplerta d'aigua seria aproximadament 7,548 Tn.

• Pes de la columna en operació

Per tal de calcular el pes de la columna en operació, cal tenir en compte, igual que amb l'aigua, que hi ha un rebliment incorporat a la columna que té un pes

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

especificat. No obstant, també es considerarà que tot el volum intern de la columna esta omplert del fluid del procés, per lo que serà necessari la densitat d'aquest.

$$M_{col,op} = M_{col,buit} + M_{rebliment} + 1,1 \cdot V_{int} \cdot \rho_{fluid\ de\ procés} \quad (11.3.16)$$

On:

- $M_{col,op}$ = Pes de la columna en operació (Kg)
- $\rho_{fluid\ de\ procés}$ = Densitat del fluid de procés = 1110Kg/m³

$$M_{col,op} = 1217 + 1612,4 + 1,1 \cdot 4,29 \cdot 1110 = 8067Kg = 8,067Tn$$

Per tant, el pes de la columna en plena operació seria aproximadament 8,067 Tn.

• Aïllament

Finalment, i després de fer tots els càlculs pertinents per dissenyar la columna, es decideix aïllar aquesta tant per controlar que la temperatura de treball al seu interior no es vegi afectada per possibles canvis tèrmics a l'exterior de la planta així com pel perill que pot suposar que qualsevol individu toqui l'equip en qüestió i pugui sofrir mals greus a causa de les temperatures altes o baixes a les que es treballa.

S'ha decidit per tots els casos que el material que s'utilitzarà per aïllar els equips es la llana de vidre, la qual té una conductivitat tèrmica de entre 0,03 a 0,05 W/m·°C (pels càlculs s'utilitzarà el valor de conductivitat més alt per ser més restrictius). L'equació que s'utilitzarà per fer el càlcul es la següent:

$$d = \frac{D}{2} \cdot \left[EXP \left(\frac{\lambda}{\lambda_{ref}} \cdot \ln \frac{D + 2 \cdot d_{ref}}{D} \right) - 1 \right] \quad (11.3.17)$$

On:

- d = Espessor mínim de l'aïllant (mm)
- D = Diàmetre extern de la columna (mm)
- λ = Conductivitat tèrmica de l'aïllant (W/(m·°C))
- λ_{ref} = Conductivitat tèrmica de referència = 0.04 W/(m·°C)
- d_{ref} = Espessor mínim de referència = 50mm

A partir de tot lo calculat anteriorment:

$$d = \frac{774}{2} \cdot \left[EXP \left(\frac{0.05}{0.04} \cdot \ln \frac{774 + 2 \cdot 50}{774} \right) - 1 \right] = 63.5mm$$

Per tal de sobredimensionar, s'escull un espessor de 70 mm. Fet això, es procedeix al càlcul del volum necessari d'aïllant segons el següent model.



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

$$V_{cap,aïll} = 0,1 \cdot ((L_{ext} + d)^3 - L_{ext}^3) + 0,1 \cdot ((r_{ext} + d)^3 - r_{ext}^3) + \frac{\pi \cdot SF}{4} \cdot (2 \cdot d \cdot D_{ext} + d^2) \quad (11.3.18)$$

$$V_{cap,aïll} = 0,1 \cdot ((0.774 + 0.07)^3 - 0.774^3) + 0,1 \cdot ((0.0882 + 0.07)^3 - 0.0882^3) + \frac{\pi \cdot 0.021}{4} \cdot (2 \cdot 0.07 \cdot 0.774 + 0.07^2) = 0.017m^3$$

$$V_{col,aïll} = \frac{\pi \cdot h_{col}}{4} \cdot (2 \cdot d \cdot D_{ext} + d^2) \quad (11.3.19)$$

$$V_{col,aïll} = \frac{\pi \cdot 9.183}{4} \cdot (2 \cdot 0.07 \cdot 0.774 + 0.07^2) = 0.82m^3$$

$$V_{tot,aïll} = V_{col,aïll} + 2 \cdot V_{cap,aïll} \quad (11.3.20)$$

$$V_{tot,aïll} = 0.82 + 2 \cdot 0.017 = 0.85m^3$$

Així que per poder aïllar la columna CD-201 serà necessari un volum de llana de roca de 0,85m³.

11.3.1.2 COLUMNA CD-301

La columna CD-301 s'utilitza amb l'objectiu de separar el producte desitjat, el clorur de vinil, de la resta de substàncies presents a la mescla. Treballa a unes condicions de 628kPa i un rang de temperatura de -40 a 40°C. Ja que segueix el mateix procediment de càlcul que la anterior columna i que les dades característiques es presentaran en la fulla d'especificacions corresponent a aquesta mateixa columna, en aquest apartat es mostraran directament els valors obtinguts dels mateixos càlculs que s'han fet a l'apartat de la columna CD-201 corresponents a la columna en qüestió.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

	Section_1
Section Start	1 Main TS
Section End	10 Main TS
Internals	Packed
Section Diameter (m)	0.4572
Max Flooding (%)	50.96
X-Sectional Area (m ²)	0.1642
Section Height (m)	3.949
Section DeltaP (kPa)	0.5077
DP per Length (kPa/m)	0.1286
Flood Gas Velocity (m ³ /h-m ²)	1904
Flood Gas Velocity (m/s)	0.5289
Estimated # Pieces of Packing	32158
Estimated Mass of Packing (kg)	311.2
Estimated Packing Cost (US\$)	--
HETP (m)	0.3949
HETP Correlation	Norton
Packing Correlation	SLEv73
Packing Type	Ballast Rings (Metal, random) 1_inch

Il·lustració 11.17: Valors obtinguts del programa "Aspen HYSYS" pel disseny de la columna CD-301.

Taula 11.22: Valors obtinguts del procés de disseny de la columna CD-301.

Dades de construcció	Valors
Material de construcció	SS 316L
Pressió de disseny	824,13 kPa
Temperatura de disseny	77.49 °C
Radi interior del capçal	0,4572 m
Gruix de la columna	12 mm
Alçada capçal	0,125 m
Alçada columna	4,199 m
Pes columna buida	653 Kg
Pes columna amb aigua	1713 Kg
Pes columna en operació	1643 Kg
Aïllament (Gruix/Volum)	70 mm / 0,24m ³

11.3.1.3 COLUMNA CD-401

Aquesta columna tracta el fluid de procés separat del producte a obtenir procedent de la columna CD-301. El seu objectiu es el de separar el nitrogen present a la mescla per que aquest no s'acumuli en el sistema a l'hora de recircular la matèria prima que no ha reaccionat en el reactor. Treballa a unes condicions de pressió de 978kPa i un rang de temperatura de -55 a -30°C. Igual que a l'apartat anterior, a continuació es mostraran directament els valors obtinguts de les dades calculades manualment en el procés de disseny.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

	Section_1	Section_2
Section Start	1 Main TS	7 Main TS
Section End	6 Main TS	10 Main TS
Internals	Packed	Packed
Section Diameter (m)	0.4572	0.4572
Max Flooding (%)	0.20	0.46
X-Sectional Area (m ²)	0.1642	0.1642
Section Height (m)	4.086	2.714
Section DeltaP (kPa)	0.7453	0.5139
DP per Length (kPa/m)	0.1824	0.1894
Flood Gas Velocity (m ³ /h-m ²)	3344	1211
Flood Gas Velocity (m/s)	0.9289	0.3363
Estimated # Pieces of Packing	4052	2691
Estimated Mass of Packing (kg)	258.2	171.5
Estimated Packing Cost (US\$)	---	---
HETP (m)	0.6810	0.6785
HETP Correlation	Norton	Norton
Packing Correlation	SLEv73	SLEv73
Packing Type	Ballast Rings (Metal, random) 2_inch	Ballast Rings (Metal, random) 2_inch

Il·lustració 11.18: Valors obtinguts del programa "Aspen HYSYS" pel disseny de la columna CD-401.

Taula 11.23: Valors obtinguts del procés de disseny de la columna CD-401.

Dades de construcció	Valors
Material de construcció	SS 316L
Pressió de disseny	1174 kPa
Temperatura de disseny	-18 °C
Radi interior del capçal	0,4572 m
Gruix de la columna	10 mm
Alçada capçal	0,119 m
Alçada columna	7,038 m
Pes columna buida	906 Kg
Pes columna amb aigua	2597 Kg
Pes columna en operació	2345 Kg
Aïllament	70 mm / 0,40m ³

11.4 BESCOANVIADORS DE CALOR

11.4.1 DISSENY DE BESCOANVIADORS

Per fer el disseny dels bescanviadors de calor, primerament es fa un càlcul bàsic del bescanvi de calor per poder conèixer el caudal mínim del fluid de servei. Seguidament, es decideix quin dels fluids anirà pel costat de tubs i quin pel de carcassa i, finalment, es dissenya el bescanviador a partir del programa *Aspen Exchanger Design and Rating*.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

11.4.1.1 CÀLCULS I CONSIDERACIONS INICIALS

En aquest primer apartat es mostraran uns càlculs molt bàsics per tal de conèixer quin és el caudal mínim necessari del fluid de servei per tal de poder fer el bescanvi. Primerament, però, s'ha de decidir quin fluid circularà per carcassa i quin per tubs segons les restriccions o consideracions següents:

- El fluid més corrosiu hauria de circular pel costat de tubs
- El fluid amb més possibilitats d'embrutar ha de circular pel costat de tubs, ja que és més fàcil de netejar.
- El fluid més calent s'acostuma a situar pel costat de tubs per qüestions de seguretat i eficiència.
- És millor situar el fluid més viscos pel costat de carcassa.

- **Balanç tèrmic**

$$Q_Q = M_S \cdot C_{pS} \cdot (t_2 - t_1) = m_t \cdot C_{pt} \cdot (T_1 - T_2) \quad (11.4.1)$$

- Subíndex S = Carcassa
- Subíndex t = Tub
- Subíndex 1 = Entrada
- Subíndex 2 = Sortida
- M,m = Cabal màssic (kg/s)
- C_p = Capacitat calorífica (J/kg°C)
- Q_Q = Calor bescanviat (W)
- T,t = temperatures del fluid calent i fred corresponentment (°C).

Utilitzant el bescanviador E-102 com exemple de càlcul:

$$Q_Q = M_S \cdot 4,435 \cdot ((-35) - (-60)) = 0,6764 \cdot 0,98 \cdot (135 - 40)$$

Tenint en compte que la temperatura de sortida del fluid de servei s'escull com una propera al canvi de fase però sense deixar que ocorri, s'obté, en aquest cas, que el caudal mínim de refrigerant (amoníac pel bescanviador E-102) és de 2044 Kg/h. Conegut aquest valor, es comença a dissenyar el bescanviador mitjançant el programa indicat anteriorment com "Aspen Exchanger Design and Rating".

11.4.1.2 PROCÉS DE DISSENY

Un dels primers passos a l'hora de dissenyar amb el programa esmentat és, com es mostra a la il·lustració següent, indicar quin tipus de TEMA s'escull pel bescanviador. En

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

els casos que es treballen en aquest treball, s’ha decidit utilitzar els BEM per tots els bescanviadors i condensadors i els BKU per els reboilers. A més a més, en aquest punt també s’ha de decidir quin fluid serà el que circuli per tubs i quin el que ho farà per carcassa. Finalment, a part de decidir quin tipus de pitch es vol (segons si serà necessari i sovint una neteja d’aquests), s’escull quin tipus de material s’utilitzarà pel disseny del bescanviador. En tots els cassos s’ha decidit fer-ho, així com també ho són gran part dels altres equips, de l’acer inoxidable anomenat “SS 316L”.

Calculation mode	Design (Sizing)		Most recent run	Previous run
Configuration				
TEMA type:	B -	E -	M	
Layout type:	New (optimum) layout			
Hotside:	Shell side			
Tube OD \ Pitch:	in	0,75	0,9375	\
Tube pattern:	30-Triangular			
Tubes in window:	Yes			
Baffle type:	Single segmental			
Baffle cut orientation:	Horizontal			
Exchanger material:	Carbon Steel			
Size				
Specify some sizes in design:	No			
Shell ID\OD	in			\
Tube length:	in			
Baffle pitch:	in			
Number of baffles:				
Number of tubes \ passes:				\
Shells in series\parallel:				\

Il·lustració 11.19: Apartat de configuració del disseny del bescanviador.

En el següent apartat s’han d’indicar els caudals de circulació de cada fluid així com la temperatura. El procés que es segueix normalment es indicar tant el caudal com la temperatura d’entrada i sortida del fluid de procés i després indicar del fluid de servei únicament la temperatura d’entrada i el caudal, sent aquest últim superior al caudal mínim calculat amb anterioritat. No s’indica la temperatura de sortida del fluid de servei ja que llavors s’estarien donant més dades de disseny de les necessàries i el programa donaria error. A més d’això, en aquest apartat també s’ha d’indicar la resistència a incrustacions de tots dos fluids segons les bases de dades cercades, així com la pressió d’entrada al bescanviador.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

	Hot Stream (1) Shell Side		Cold Stream (2) Tube Side	
	In	Out	In	Out
Fluid name	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Mass flow rate (total)	<input type="text"/> lb/h	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Temperature	<input type="text"/> F	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Vapor mass fraction	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Operating pressure (absolute)	<input type="text"/> psi	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Pressure at liquid surface in column	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Heat exchanged	<input type="text"/> BTU/h		<input type="text"/>	
Exchanger effectiveness	<input type="text"/>			
Adjust if over-specified	<input type="text"/> Heat load		<input type="text"/> Heat load	
Estimated pressure drop	<input type="text"/> psi	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Allowable pressure drop	<input type="text"/> psi	<input type="text"/> 0,06	<input type="text"/> 0,06	<input type="text"/>
Fouling resistance	<input type="text"/> ft ² *h*F/BTU	<input type="text"/> 0	<input type="text"/> 0	<input type="text"/>

Il·lustració 11.20: Dades generals del procés de bescanvi del bescanviador.

Finalitzades aquestes indicacions, el següent pas es introduir en el programa la composició dels fluids calents i freds als seus apartats corresponents a partir de la pròpia base de dades que el programa *Aspen Exchanger Design and Rating* proporciona, indicant així com convingui la seva fracció molar o màssica. A partir dels valors proporcionats i del rang de temperatures indicats el programa calcula les característiques i propietats que podria arribar a tenir aquest fluid.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

Physical property package B-JAC

Hot side composition specification Weight flowrate or %

#	Components	Composition	Component type
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			

Search Databank...
Delete Row

Il·lustració 11.21: Composició dels fluids calents i freds.

Get Properties

Override properties

Restore Defaults

Pivot Table

Temperature Points

Number 22

Temperatures Specify range

Range 392 104 F

Pressure Levels

Number 2

Add Set

Delete Set

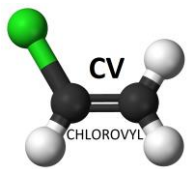
Pressures

145.04	psi
29.01	

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temperature	F											
Liquid density	lb/ft ³											
Liquid specific heat	BTU/(lb°F)											
Liquid viscosity	cp											
Liquid thermal cond.	BTU/(ft ² h°F)											
Liquid surface tension	lbf/ft											
Liquid molecular weight												
Specific enthalpy	BTU/lb											
Vapor mass fraction												
Vapor density	lb/ft ³											
Vapor specific heat	BTU/(lb°F)											
Vapor viscosity	cp											
Vapor thermal cond.	BTU/(ft ² h°F)											
Vapor molecular weight												
Liquid 2 mass fraction												
Liquid density	lb/ft ³											
Liquid 2 specific heat	BTU/(lb°F)											
Liquid 2 viscosity	cp											
Liquid 2 thermal cond.	BTU/(ft ² h°F)											
Liquid 2 surface tension	lbf/ft											

Il·lustració 11.22: Llistat on apareixen les propietats del fluid en qüestió.

Finalment, i si no ha sorgit cap problema a l'hora de calcular les dimensions del bescanviador, el programa proporciona una fulla com la següent on s'indiquen totes les característiques generals dels bescanviador



Heat Exchanger Specification Sheet										
1										
2										
3										
4										
5										
6	Size	457,2--1219,2	mm	Type	BEM	Hor	Connected in	1 parallel	1 series	
7	Surf/unit(eff.)	15,4	m ²	Shells/unit	1		Surf/shell (eff.)	15,4	m ²	
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT									
9	Fluid allocation			Shell Side			Tube Side			
10	Fluid name			Amoniaco			Fluid de procés			
11	Fluid quantity, Total		kg/s	2,7778			0,675			
12	Vapor (In/Out)		kg/s	0	0		0,675	0		
13	Liquid		kg/s	2,7778	2,7778		0	0,675		
14	Noncondensable		kg/s	0	0		0	0		
15										
16	Temperature (In/Out)		°C	-60	-37,79		92	-8,28		
17	Dew / Bubble point		°C	-28,73	-28,73		39,32	-0,47		
18	Density Vapor/Liquid		kg/m ³	/ 712,9	/ 687,87		13,56 /	/ 944,58		
19	Viscosity		mPa s	/ 0,3552	/ 0,2709		0,0139 /	/ 0,2346		
20	Molecular wt, Vap						59,57			
21	Molecular wt, NC									
22	Specific heat		kJ/(kg K)	/ 4,421	/ 4,461		1,041 /	/ 1,275		
23	Thermal conductivity		W/(m K)	/ 0,6277	/ 0,5958		0,0125 /	/ 0,1275		
24	Latent heat		kJ/kg				285,5	283,6		
25	Pressure (abs)		bar	1,3	1,26787		6,5	6,48109		
26	Velocity		m/s		0,33			3,99		
27	Pressure drop, allow./calc.		bar	0,25855	0,03213		0,25855	0,01891		
28	Fouling resistance (min)		m ² K/W		0,00018		0,00018	0,00021 Ao based		
29	Heat exchanged	273,9	kW				MTD corrected	80,56	°C	
30	Transfer rate, Service	221		Dirty 362,2		Clean 420,8			W/(m ² K)	
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL					Sketch				
32				Shell Side			Tube Side			
33	Design/vac/test pressure:g	bar	3,44738/	/		7,58424/	/			
34	Design temperature	°C	132,22			132,22				
35	Number passes per shell		1			4				
36	Corrosion allowance	mm	0			0				
37	Connections	In	mm	1	50,8/ -	1	76,2/ -			
38	Size/rating	Out		1	50,8/ -	1	19,05/ -			
39	Nominal	Intermediate		/ -		/ -				
40	Tube No.	200	OD 21,3	TksAvg 1,65	mm	Length 1219,2	mm	Pitch 26,62	mm	
41	Tube type	Plain	#/m	Material	SS 316L	Tube pattern	30			
42	Shell	SS 316L	ID 447,65	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) 26,95	H Spacing: c/c	133,35	mm		
47	Baffle-long	-	Seal type			Inlet	241,3	mm		
48	Supports-tube	U-bend	0	Type						
49	Bypass seal	-	Tube-tubesheet joint	Exp.	2 grv					
50	Expansion joint	-	Type	None						
51	RhoV2-Inlet nozzle	2309	Bundle entrance	107		Bundle exit	111	kg/(m 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 - refinerv service			
55	Weight/Shell	530,5	Filled with water	764,4		Bundle	294,1	kg		
56	Remarks									
57										
58										

Il·lustració 11.23: Especificacions obtingudes del programa de disseny del bescanviador E-301.



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

11.4.1.3 BESCANVIADOR E-101

Aquest bescanviador tracta l'aliment provinent d'una empresa externa per augmentar la seva temperatura de 5°C fins a 35°C per, després de mesclar-se amb la recirculació, entrar al reactor. El fluid a utilitzar per escalfar es l'aigua, amb un cabal de 7000 Kg/h que vindrà del procés de refredament del reactor a 37°C i sortirà d'aquest bescanviador a una temperatura de 34.38°C per, després, tornar a la basa. El fluid de procés circularà pels tubs.

11.4.1.4 BESCANVIADOR E-102

El bescanviador E-102 tractarà el fluid de procés obtingut del reactor que circula a 2435 Kg/h a una temperatura de 135°C per disminuir-la fins als 40°C. En aquest cas s'utilitza 3000 Kg/h d'amoníac la qual redueix la seva temperatura de -60°C fins a -42.97°C per fer la transferència de calor. El fluid de procés circularà pels tubs.

11.4.1.5 BESCANVIADOR E-103

En aquest bescanviador es tracta el fluid de procés que s'està recirculant i provinent de l'equip E-402 per augmentar la seva temperatura de -45°C fins a uns 36.15°C. Per fer-ho, s'utilitza 1000 Kg/h d'aigua com agent escalfador la qual disminuirà la seva temperatura d'uns 90°C fins als 87.55°C. El fluid de procés circularà pels tubs.

11.4.1.6 CONDENSADOR C-201

Aquest condensador tracta el vapor procedent de la columna CD-201 per condensar-lo parcialment. La quantitat de líquid (5083 Kg/h) es recircularà a la columna, mentre que la quantitat de vapor que no ha condensat (2430 Kg/h) continuarà el circuit del procés. Per fer possible aquesta condensació, s'utilitza 20000 Kg/h d'amoníac que reduirà la seva temperatura de -60°C fins a uns -36.23°C. El fluid de procés circularà pels tubs.

11.4.1.7 REBOILER K-201

L'objectiu d'aquest reboiler es el de tractar el líquid que surt de la columna per extreure el 1,2-Dicloroetà necessari en forma líquida i retornar la resta a la columna en forma de vapor. Per fer-ho, s'utilitza 20000 Kg/h d'aigua que ho escalfarà, baixant la seva temperatura de 90°C fins als 71.18°C. El fluid de procés circularà per la carcassa.

11.4.1.8 BESCANVIADOR E-301

El bescanviador E-301 tracta el fluid de procés provinent de l'equip C-201 més una compressió per tal de canviar-lo de fase vapor a fase líquida, disminuint així la seva temperatura de 92°C fins a uns -8.28°C. El servei utilitzat són 10000 Kg/h d'amoníac que augmentarà la seva temperatura de -60°C fins als -37.79°C. El fluid de procés circularà pels tubs.



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

11.4.1.9 BESCANVIADOR E-302

L'objectiu d'aquest bescanviador es preparar el producte final obtingut del reboiler K-301. Per fer-ho, ha de disminuir la temperatura d'aquest producte de 42°C fins a 35°C mitjançant 6000 Kg/h d'amoníac els quals es mantindran aproximadament a una temperatura constant de -60°C. El fluid de procés circularà pels tubs.

11.4.1.10 CONDENSADOR C-301

Tracta el cabal de vapor que surt de la columna CD-301 per condensar part d'aquest. 1341 Kg/h d'aquest fluid es retornaran a la columna en forma líquida mentre que 139 Kg/h marxaran en forma de vapor. 6000 Kg/h d'amoníac seran necessaris per fer aquest canvi de fase, reduint així la seva temperatura de -60°C fins a -38.72°C. El fluid de procés circularà pels tubs.

11.4.1.11 REBOILER K-301

L'objectiu d'aquest reboiler es el de tractar el líquid que surt de la columna per extreure el producte desitjat (Clorur de Vinil) en les condicions i caudals necessaris (2291 Kg/h) i retornar la resta a la columna en forma de vapor (2692 Kg/h). El fluid encarregat de fer aquest bescanvi de calor és l'aigua, que amb un cabal de 5000 Kg/h reduirà la seva temperatura de 90°C fins als 53.55°C. El fluid de procés circularà per la carcassa.

11.4.1.12 BESCANVIADOR E-401

Aquest bescanviador prepararà el fluid de procés provinent de l'equip C-301 i després d'actuar sobre ell un compressor per tal de ser introduït a la columna de destil·lació CD-401 amb una fracció en vapor de 0.1. Per aconseguir-ho, s'utilitzarà 5000 Kg/h d'amoníac que augmentaran la seva temperatura de -60°C fins als -57.3°C. El fluid de procés circularà pels tubs.

11.4.1.13 BESCANVIADOR E-402

El fluid a recircular provinent del reboiler K-401 passarà per un tractament inicial d'escalfament per que la seva descompressió no redueixi dràsticament la seva temperatura. En aquest equip, es portarà el fluid a escalfar de -33°C fins als 50.41°C. En aquest procés s'utilitza 500 Kg/h d'aigua per escalfar-ho, el qual reduirà la seva temperatura de 90°C fins als 58.8°C. El fluid de procés circularà pels tubs.

11.4.1.14 CONDENSADOR C-401

L'objectiu d'aquest condensador és el de tractar el vapor obtingut de la columna CD-401 per tal de que marxi el nitrogen del sistema en forma de vapor (7 Kg/h) i la resta retorni a la columna en forma líquida (14 Kg/h). Per fer aquests intercanvi es necessari la intervenció de 820 Kg/h de nitrogen el qual augmentarà la seva temperatura de -205°C a -200°C. El fluid de procés circularà pels tubs.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

11.4.1.15 REBOILER K-401

En el reboiler K-401 es tracta el líquid procedent de la columna CD-401 per tal d'obtenir un fluid exempt de nitrogen. Aquest equip retorna 26 Kg/h a la columna en forma de vapor i retira 133 Kg/h del bescanviador en forma líquida, la qual passarà per un procés de descompressió per després arribar a la columna E-103. En aquest cas s'utilitza 2000 Kg/h d'aigua per escalfar el fluid de procés, baixant la temperatura d'aquest de 90°C fins als 88.9°C. El fluid de procés circularà per la carcassa.

11.5 TANCS DE SEPARACIÓ

11.5.1 DISSENY DE TANCS

El mètode per dissenyar els tancs de separació ha sigut igual en tots tres casos. Primerament, s'ha calculat el volum de l'equip sota certes restriccions. Seguidament, es procedeix a un càlcul més acurat de les condicions de l'equip en qüestió. Finalment, es calcula unes últimes característiques del disseny del tanc. El procés de càlcul es descriurà en el primer tanc explicat, mostrant en els posteriors els valors calculats directament.

11.5.1.1 TANC T-201

11.5.1.1.1 DISSENY DE L'EQUIP

Per tal de fer el disseny del tanc de separació, s'han considerat una sèrie de restriccions:

- El temps de residència del líquid al tanc ha de ser de 10 minuts.
- El volum del líquid al tanc ha d'ocupar $\frac{1}{4}$ part del volum del tanc total.
- El diàmetre de la columna serà igual a l'alçada de la part cilíndrica de la columna.

A partir d'aquestes consideracions, es calcula el volum total de l'equip:

$$V_{liq} = \frac{1}{4} \cdot V_T = F \cdot t_R \quad (11.5.1)$$

On:

- V_{liq} = Volum del líquid al tanc (m^3).
- V_T = Volum total del tanc (m^3).
- F = Cabal del líquid (m^3/h).
- t_R = Temps de residència del líquid al tanc (h).

Per tant:

$$V_{liq} = 5,28 \cdot \frac{1}{6} = 0,88m^3$$

$$V_T = 4 \cdot 0,88 = 3,52m^3$$

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

A partir d'aquests valors, es procedeix a fer els càlculs mecànics de l'equip.

11.5.1.1.2 DISSENY MECÀNIC

En aquest apartat es seguirà el mateix procediment de càlcul que el mostrat a l'apartat 11.3.4.1.4 d'aquest document, ja que es tracta de igual manera d'un equip a pressió. Per tant, a continuació es mostrarà una taula amb els valors obtinguts del mateix procediment.

Taula 11.24: Dades del disseny mecànic del tanc T-201.

Dades de construcció	Valors
Material	SS 316L
Pressió de disseny	313,2 kPa
Temperatura de disseny	1 °C
Eficàcia de junta	0,85
Esforç del material	1,08·10 ⁸ Pa
Gruix de la columna	6 mm

El valor del gruix serà molt més restrictiu a la columna que al tanc, per lo que aquest gruix es mantindrà al tanc de separació.

A partir d'aquest valors, es procedeix a calcular les dimensions interiors del tanc de la següent manera:

$$V_{cil} = \frac{\pi}{4} \cdot D^3$$

$$V_T = V_{cil} + 2 \cdot V_{cap,int} \quad (11.5.2)$$

Sabent que el volum del capçal intern es calcula de la mateixa manera que a l'apartat 11.3.4.1.5, es pot trobar el valor del diàmetre:

$$V_T = \frac{\pi}{4} \cdot D^3 + 2 \cdot 0,1 \cdot D^3 + 0,1 \cdot (0,1 \cdot D)^3 + \frac{\pi \cdot SF}{4} \cdot D^2 \quad (11.5.3)$$

Com es pot veure, per calcular el valor del diàmetre es segueix un procés iteratiu fins poder obtenir, així, que el diàmetre de la columna serà de 1.51m

11.5.1.1.3 ÚLTIMS CÀLCULS DE DISSENY

Igual que a l'apartat anterior, els càlculs necessaris per obtenir els últims valors de disseny del tanc són els mateixos als de l'apartat 11.3.4.1.5 d'aquest mateix capítol, per lo que en aquest apartat es procedirà a mostrar els resultats directes.

Taula 11.25: Dades de disseny final del tanc T-201.

Dades de construcció	Valors
----------------------	--------

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CàLCUL

Longitud capçal	0,32 m
Longitud tanc	2,14 m
Pes tanc buit	540 Kg
Pes tanc amb aigua	4412 Kg
Pes tanc en operació	4272 Kg
Aïllament	70 mm / 0,37m ³

Cal tenir en compte, però, que aquest equip estarà dispostat de forma horitzontal, per lo que els càlculs d'alçada esmentats a l'apartat de la columna de destil·lació aquí faran referència a la longitud del tanc.

11.5.1.2 TANC T-301

A la següent taula es mostren els valors obtinguts de les característiques generals del tanc de separació T-301 segons els càlculs mostrats amb anterioritat.

Taula 11.26: Dades de disseny del tanc T-301.

Dades de construcció	Valors
Material	SS 316L
Pressió de disseny	824,13 kPa
Temperatura de disseny	-25 °C
Eficàcia de junta	0,85
Esforç del material	1,08·10 ⁸ Pa
Diàmetre del tanc	1,00 m
Gruix del tanc	12 mm
Longitud capçal	0,23 m
Longitud tanc	1,46 m
Pes tanc buit	493 Kg
Pes tanc amb aigua	1652 Kg
Pes tanc en operació	1479 Kg
Aïllament	70 mm / 0,18m ³

11.5.1.3 TANC T-401

A la taula següent es mostren els valors obtinguts mitjançant els càlculs explicats als apartats anteriors de les característiques generals del tanc de separació T-301.

Taula 11.27: Dades de disseny del tanc T-401.

Dades de construcció	Valors
Material	SS 316L
Pressió de disseny	1174 kPa

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

Temperatura de disseny	-125 °C
Eficàcia de junta	0,85
Esforç del material	1,08·10 ⁸ Pa
Diàmetre del tanc	0.197 m
Gruix del tanc	10 mm
Longitud capçal	0,069 m
Longitud tanc	0,334 m
Pes tanc buit	19,8 Kg
Pes tanc amb aigua	30,4 Kg
Pes tanc en operació	30,0 Kg
Aïllament	70 mm / 0,01m ³

11.6 Canonades

11.6.1 Càlcul del diàmetre nominal

Pel càlcul del diàmetre nominal s'ha de realitzar el següent procés iteratiu.

- Es suposa una velocitat típica pel fluid que circularà per la canonada segons la taula que es mostra a continuació:

Taula 11.28: Velocitats típiques per fluids circulant a través de canonades d'acer.

Type of Fluid	Type of Flow	Velocity	
		ft/s	m/s
Nonviscous liquid	Inlet to pump	2-3	0.6-0.9
	Process line or pump discharge	5-8	1.5-2.5
Viscous liquid	Inlet to pump	0.2-0.8	0.06-0.25
	Process line or pump discharge	0.5-2	0.15-0.6
Gas		30-120	9-36
Steam		30-75	9-23

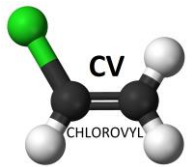
- Es calcula el diàmetre intern necessari a partir de la velocitat suposada i del cauda volumètric que hi circula:

$$\left[D_{int} = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot v}} \right] \quad (11.6.1)$$

on

Q = Cabal volumètric [m³/s]

v = Velocitat del fluid [m/s]



CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

- Un cop es disposa del diàmetre intern necessari que fa que la velocitat estigui dins del rang típic, s'ha d'escollir el diàmetre nominal mitjançant un catàleg per al material desitjat. En aquest pas també s'ha d'escollir el gruix de la canonada, que bàsicament és funció de la temperatura del fluid i de la pressió admissible del material. Els gruixos també estan normalitzats segons el que es coneix com "*Schedule*" o cel·la, i venen definits per la normativa ASME B36.19M. Degut a que les pressions de treball no han estat massa elevades, s'ha intentat estandarditzar les canonades de la planta utilitzant Schedule 40 per canonades superiors a DN20, i Schedule 10 per a canonades inferiors a DN20, ja que en tots els casos la pressió admissible de la canonada és molt més gran que la pressió d'operació.

Per determinar el gruix necessari s'ha utilitzat la següent taulas:

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

Taula 11.29: Pressions admissibles per l'acer inoxidable 316L.

Temperature (°C):				50	100	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525
Design Strength (MPa):				115	115	115	108	101	95	92	91	89	87	86	84	82	80	78
Size		Sch No	WT (mm)	Allowable Working Pressure (MPa)														
DN	NPS	mm																
10	¾	17.15 10S	1.65	21.1	21.1	21.1	19.9	18.6	17.5	16.9	16.7	16.4	16.0	15.8	15.4	15.1	14.7	14.3
		17.15 40S	2.31	30.7	30.7	30.7	28.9	27.0	25.4	24.6	24.3	23.8	23.2	23.0	22.4	21.9	21.4	20.8
		17.15 80S	3.20	44.9	44.9	44.9	42.1	39.4	37.1	35.9	35.5	34.7	34.0	33.6	32.8	32.0	31.2	30.4
15	¾	21.34 5S	1.65	16.7	16.7	16.7	15.7	14.7	13.8	13.4	13.2	12.9	12.6	12.5	12.2	11.9	11.6	11.3
		21.34 10S	2.11	21.8	21.8	20.5	19.1	18.0	17.4	17.2	16.9	16.5	16.3	15.9	15.5	15.2	14.8	
		21.34 40S	2.77	29.5	29.5	27.7	25.9	24.3	23.6	23.3	22.8	22.3	22.0	21.5	21.0	20.5	20.0	
		21.34 80S	3.73	41.5	41.5	41.5	39.0	36.5	34.3	33.2	32.9	32.1	31.4	31.1	30.3	29.6	28.9	28.2
20	¾	26.67 5S	1.65	13.2	13.2	13.2	12.4	11.6	10.9	10.5	10.4	10.2	10.0	9.8	9.6	9.4	9.2	8.9
		26.67 10S	2.11	17.1	17.1	17.1	16.1	15.0	14.1	13.7	13.5	13.2	12.9	12.8	12.5	12.2	11.9	11.6
		26.67 40S	2.87	23.9	23.9	23.9	22.5	21.0	19.8	19.1	18.9	18.5	18.1	17.9	17.5	17.0	16.6	16.2
		26.67 80S	3.91	33.8	33.8	33.8	31.8	29.7	28.0	27.1	26.8	26.2	25.6	25.3	24.7	24.1	23.5	23.0
25	1	33.40 5S	1.65	10.4	10.4	10.4	9.8	9.1	8.6	8.3	8.2	8.0	7.9	7.8	7.6	7.4	7.2	7.0
		33.40 10S	2.77	18.0	18.0	18.0	16.9	15.8	14.9	14.4	14.2	13.9	13.6	13.5	13.1	12.8	12.5	12.2
		33.40 40S	3.38	22.3	22.3	22.3	21.0	19.6	18.5	17.9	17.7	17.3	16.9	16.7	16.3	15.9	15.5	15.2
		33.40 80S	4.55	31.1	31.1	31.1	29.2	27.3	25.7	24.9	24.6	24.1	23.5	23.3	22.7	22.2	21.7	21.1
32	1½	42.16 5S	1.65	8.2	8.2	8.2	7.7	7.2	6.7	6.5	6.5	6.3	6.2	6.1	6.0	5.8	5.7	5.5
		42.16 10S	2.77	14.0	14.0	14.0	13.2	12.3	11.6	11.2	11.1	10.9	10.6	10.5	10.2	10.0	9.8	9.5
		42.16 40S	3.56	18.3	18.3	18.3	17.2	16.1	15.2	14.7	14.5	14.2	13.9	13.7	13.4	13.1	12.8	12.4
		42.16 80S	4.85	25.7	25.7	25.7	24.2	22.6	21.3	20.6	20.4	19.9	19.5	19.3	18.8	18.4	17.9	17.5
40	1½	48.26 5S	1.65	7.1	7.1	7.1	6.7	6.2	5.9	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	4.9	4.8
		48.26 10S	2.77	12.2	12.2	12.2	11.4	10.7	10.0	9.7	9.6	9.4	9.2	9.1	8.9	8.7	8.5	8.2
		48.26 40S	3.68	16.4	16.4	16.4	15.4	14.4	13.6	13.2	13.0	12.7	12.4	12.3	12.0	11.7	11.4	11.2
		48.26 80S	5.08	23.3	23.3	23.3	21.9	20.5	19.3	18.7	18.5	18.1	17.7	17.4	17.0	16.6	16.2	15.8
50	2	60.33 5S	1.65	5.6	5.6	5.6	5.3	5.0	4.7	4.5	4.5	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0	3.9	3.8
		60.33 10S	2.77	9.6	9.6	9.6	9.0	8.5	8.0	7.7	7.6	7.5	7.3	7.2	7.0	6.9	6.7	6.5
		60.33 40S	3.91	13.8	13.8	13.8	13.0	12.1	11.4	11.1	10.9	10.7	10.5	10.3	10.1	9.9	9.6	9.4
		60.33 80S	5.54	20.1	20.1	20.1	18.9	17.6	16.6	16.1	15.9	15.6	15.2	15.0	14.7	14.3	14.0	13.6
65	2½	73.03 5S	2.11	6.0	6.0	6.0	5.6	5.2	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.5	4.4	4.3	4.1	4.0
		73.03 10S	3.05	8.7	8.7	8.7	8.2	7.7	7.2	7.0	6.9	6.8	6.6	6.5	6.4	6.2	6.1	5.9
		73.03 40S	5.16	15.2	15.2	15.2	14.2	13.3	12.5	12.1	12.0	11.7	11.5	11.3	11.1	10.8	10.5	10.3
		73.03 80S	7.01	21.1	21.1	21.1	19.8	18.5	17.4	16.9	16.7	16.3	16.0	15.8	15.4	15.0	14.7	14.3
80	3	88.90 5S	2.11	4.9	4.9	4.9	4.6	4.3	4.0	3.9	3.8	3.7	3.6	3.6	3.5	3.4	3.3	3.3
		88.90 10S	3.05	7.1	7.1	7.1	6.7	6.3	5.9	5.7	5.6	5.5	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.8
		88.90 40S	5.49	13.1	13.1	13.1	12.3	11.5	10.9	10.5	10.4	10.2	9.9	9.8	9.6	9.4	9.1	8.9
		88.90 80S	7.62	18.6	18.6	18.6	17.5	16.4	15.4	14.9	14.8	14.4	14.1	13.9	13.6	13.3	13.0	12.6
90	3½	101.60 5S	2.11	4.3	4.3	4.3	4.0	3.7	3.5	3.4	3.4	3.3	3.2	3.2	3.1	3.0	3.0	2.9
		101.60 10S	3.05	6.2	6.2	6.2	5.8	5.4	5.1	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3	4.2
		101.60 40S	5.74	12.0	12.0	12.0	11.2	10.5	9.9	9.6	9.5	9.3	9.0	8.9	8.7	8.5	8.3	8.1
		101.60 80S	8.08	17.2	17.2	17.2	16.2	15.1	14.2	13.8	13.6	13.3	13.0	12.9	12.6	12.3	12.0	11.7
100	4	114.30 5S	2.11	3.8	3.8	3.8	3.5	3.3	3.1	3.0	3.0	2.9	2.9	2.8	2.8	2.7	2.6	2.6
		114.30 10S	3.05	5.5	5.5	5.5	5.2	4.8	4.5	4.4	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0	3.9	3.8	3.7
		114.30 40S	6.02	11.1	11.1	11.1	10.4	9.8	9.2	8.9	8.8	8.6	8.4	8.3	8.1	7.9	7.7	7.5
		114.30 80S	8.56	16.1	16.1	16.1	15.1	14.2	13.3	12.9	12.8	12.5	12.2	12.1	11.8	11.5	11.2	10.9
125	5	141.30 5S	2.77	4.0	4.0	4.0	3.8	3.5	3.3	3.2	3.2	3.1	3.0	3.0	2.9	2.9	2.8	2.7
		141.30 40S	6.55	9.7	9.7	9.7	9.1	8.5	8.0	7.8	7.7	7.5	7.4	7.3	7.1	6.9	6.8	6.6
		141.30 80S	9.53	14.4	14.4	14.4	13.5	12.7	11.9	11.5	11.4	11.2	10.9	10.8	10.5	10.3	10.0	9.8
150	6	168.28 5S	2.77	3.4	3.4	3.4	3.2	3.0	2.8	2.7	2.7	2.6	2.5	2.5	2.4	2.3	2.3	2.3
		168.28 10S	3.40	4.1	4.1	4.1	3.9	3.5	3.4	3.3	3.3	3.2	3.1	3.1	3.0	3.0	2.9	2.8
		168.28 40S	7.11	8.8	8.8	8.8	8.3	7.8	7.3	7.1	7.0	6.8	6.7	6.6	6.4	6.3	6.1	6.0
		168.28 80S	10.97	13.9	13.9	13.9	13.1	12.2	11.5	11.1	11.0	10.8	10.5	10.4	10.2	9.9	9.7	9.4
200	8	219.08 5S	2.77	2.6	2.6	2.6	2.4	2.3	2.1	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8	1.7
		219.08 10S	3.76	3.5	3.5	3.5	3.3	3.1	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.5	2.4	2.4
		219.08 40S	8.18	7.8	7.8	7.8	7.3	6.8	6.4	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8	5.7	5.5	5.4	5.3
		219.08 80S	12.70	12.3	12.3	12.3	11.5	10.8	10.2	9.8	9.7	9.5	9.3	9.2	9.0	8.8	8.5	8.3
250	10	273.05 5S	3.40	2.5	2.5	2.5	2.4	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8	1.7
		273.05 10S	4.19	3.1	3.1	3.1	2.9	2.7	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.1
		273.05 40S	9.27	7.0	7.0	7.0	6.6	6.2	5.8	5.6	5.6	5.4	5.3	5.3	5.1	5.0	4.9	4.8
		273.05 80S	12.70	9.8	9.8	9.8	9.2	8.6	8.1	7.8	7.7	7.6	7.4	7.3	7.1	7.0	6.8	6.6
300	12	323.85 5S	3.96	2.5	2.5	2.5	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8	1.7	1.7
		323.85 10S	4.78	3.0	3.0	3.0	2.8	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0
		323.85 40S	9.53	6.1	6.1	6.1	5.7	5.3	5.0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3	4.2	4.1
		323.85 80S	12.70	8.2	8.2	8.2	7.7	7.2	6.8	6.5	6.3	6.2	6.1	6.0	5.8	5.7	5.5	
350	14	355.60 5S	4.19	2.4	2.4	2.4	2.3	2.1	2.0	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7	1.6
		355.60 10S	4.78	2.7	2.7	2.7	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9
		355.60 40S	9.53	5.5	5.5	5.5	5.2	4.9	4.6	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0	3.9	3.8	3.7	
		355.60 80S	12.70	7.4	7.4	7.4	7.0	6.5	6.1									

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

- Per últim es torna a calcular la velocitat amb el nou diàmetre intern i es comprova que la velocitat segueixi dins del rang típic de velocitats

11.6.2 Càlcul del gruix d'aïllant

L'aïllament de canonades és de vital importància per garantir que el fluid arriba al seu destí a la temperatura desitjada, i també per garantir la seguretat d'instal·lacions i persones.

Totes les canonades per on circulen fluids amb una temperatura superior a 40°C i inferior a 5°C s'han d'aïllar per llei. Per fer-ho, s'ha utilitzat llana de roca per a temperatures elevades i espuma de poliuretà per temperatures baixes. El gruix emprat és funció de la temperatura del fluid i també del diàmetre de la canonada com es mostra a les següents taules:

Taula 11.30: Espessors necessaris del recobriment de llana de roca per l'aïllament de fluids calents [mm].

Diàmetre exterior sense aïllant [mm]	Temperatura 4-60 °C	Temperatura 66-100 °C	Temperatura 101-150 °C	Temperatura 151-200 °C
35	20	20	30	40
35-60	20	30	40	40
60-90	30	30	40	50
90-140	30	40	50	50
140	30	40	50	60

Taula 11.31: Espessors necessaris del recobriment d'espuma de poliuretà per l'aïllament de fluids freds [mm].

Diàmetre exterior sense aïllant [mm]	Temperatura (-30)-(-20) °C	Temperatura (-20)-(-10) °C	Temperatura (-10)-0 °C	Temperatura 0-5 °C
35	50	40	35	20
35-60	60	50	40	20
60-90	60	50	40	50
90-140	70	60	50	30
140	70	60	60	30

11.7 SERVEIS

Seguidament s'exposarà el càlcul per al dimensionament dels serveis de la planta. L'explicació de cada servei és troba al capítol 1. Especificacions del projecte, a l'apartat 1.5.1 Necessitats de servei a la planta.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

11.7.1 AIGUA DESMINERALITZADA

Per saber la quantitat d'aigua desmineralitzada que es necessita s'ha de tenir en compte el consum de tots els equips que la utilitzen. Com que aquest es tracta d'un circuit tancat no hi hauria d'haver pèrdues, tot i així és fa un sobredimensionament per assegurar que en tot moment la quantitat requerida és subministrada.

Taula 11.32. Càlcul del servei d'aigua desmineralitzada.

Equip	consum (m ³ /h)
E-101	7.23
E-103	1.03
K-201	20.66
K-301	5.16
E-402	0.52
K-401	2.07
R-101/102/103	68.53
Total	105.19
Total sobr.	110.45

Finalment es compra un descalcificador ULTRALINE HB2100 que preveu un consum de 114 m³/h.

11.7.2 AIGUA TORRES DE REFRIGERACIÓ I CALDERES DE VAPOR

Per al dimensionament de l'aigua de refrigeració i de les calderes de vapor s'utilitzarà l'equació 11.6.21, que permet obtenir la potència necessària per a duu a terme el bescanvi de calor desitjat.

$$Q = \text{cabal consumit} \cdot \text{diferència de temperatura} \cdot \text{capacitat calorífica} \quad (11.6.21)$$

Taula 11.33. Càlcul del servei d'aigua de refrigeració.

Equip	consum (m ³ /h)	Diferència de temperatura	Potència frigorífica (kW)
K-201	20.66	18.82	437.04
K-301	5.16	36.45	211.61
K-401	2.07	1.1	2.55
R-101/102/103	68.53	15	1155.58

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

Total	1807
Total sobredimensionat	1987

Com que la potència frigorífica total, sobredimensionant, és de 1987 kW s'ha decidit instal·lar el model EWK-C 1260/5. A la taula següent es pot observar quines són les seves característiques.

Taula 11.34. Model de torre de refrigeració escollit.

model	potència frigorífica (kW)	potencia elèctrica total (kW)
EWK-C	1109	19

Com que una sola columna no abastiria tota la demanda s'han instal·lat 3, dues d'elles estarien en funcionament continu i la tercera seria per possibles incidències en les altres dues.

Per al càlcul del consum de les calderes de vapor s'ha procedit de la mateixa manera que per a les torres de refrigeració. A continuació es poden observar els resultats obtinguts.

Taula 11.35. Càlcul del servei d'aigua d'escalfament.

Equip	consum (Kg/h)	Diferència de temperatura	Potència (kW)
E-101	7000	2.62	21.29
E-103	1000	2.45	2.84
E-402	500	31.2	18.11

En aquest cas en comptes d'escollir una caldera per la potència es fa per el cabal total, en aquest cas el cabal sobredimensionat és de 9350. s'ha escollit una caldera de la marca Vapormat SAACKE. Aquestes ofereixen una ampla gama de calderes convencionals des de 100 kg/h fins a 50000 Kg/h Per tal de garantir el bon funcionament del serveis es compraran dues.

11.7.3 ENERGIA, CONSUM ELÈCTRIC

11.7.3.1 ESTACIÓ TRANSFORMADORA

L'energia elèctrica consumida a la planta ve donada per els diferents equips de la planta de producció i per la zona on es troben les oficines. Per saber el consum en els diferents equips s'utilitza la potència dels mateixos, mentre que per les oficines es realitzarà una estimació, essent aquesta potència un 10% de la que es consumeix en planta. A més per evitar incidències un cop calculada la potencia final aquesta serà sobredimensionada un 10%.

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCUL

Taula 11.36. Equips consumidors d'energia elèctrica.

Equip en operació	Potència (kW)
Bombes	117.5
Compressors	15
Torres de Refrigeració	57
Chiller	325
Aire comprimit	15
calderes de vapor	24
Oficines	52.95
Total	606.45

L'estació transformadora serà de 758kVA, per tant s'ha escollit un equip comercial que proporciona 800 kVA.

11.7.3.2 GRUPS ELECTRÒGENS

El grup electrogen contemplarà els aparells informàtics, els aparells contra incendis que necessiten electricitat i les vàlvules pneumàtiques.

Així doncs aquests seran un 25% del consum total de la planta. Així doncs com a mínim els grups electrògens han de proporcionar 190kVA.

Per al dimensionament del dipòsit de gasoil necessari per l'abastiment del consum desitjat s'utilitza l'equació 11.6.22.

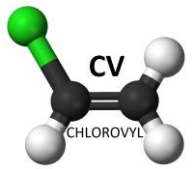
$$volum\ del\ diposit\ de\ consum = consum \cdot 24h\ kVA \quad (11.6.22)$$

És suposarà un consum de 40 l/h.

El consum final és de 960 L i per tant el dipòsit escollit és de 1000 L.

11.8 BIBLIOGRAFIA

- <http://159.90.80.55/tesis/000133381.pdf>
- <https://www.koenig-co.de/index.php?id=46>
- <https://es.scribd.com/doc/112630793/Ventajas-y-desventajas-entre-torres-de-destilacion-empacadas-y-torres-de-destilacion-con-platos>
- <http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reglamento/RDecreto-1027-2007-Consolidado-9092013.pdf>



- http://www.five.es/descargas/archivos/P1_portada.pdf
- Codi ASME (American Society on Mechanical Engineers), Secció VIII Divisió I