



PLANTA DE PRODUCCIÓ D'ÒXID D'ETILÈ

Treball de fi de grau d'Enginyeria Química



Tommy Cassanello Andrea Grande Braven Pitargue
Ariadna Ramos Alexandre Ros Mònica Vidal



CAPÍTOL X

MANUAL DE CÀLCULS

Treball de fi de grau d'Enginyeria Química



Tommy Cassanello Andrea Grande Braven Pitargue
Ariadna Ramos Alexandre Ros Mònica Vidal

Índex

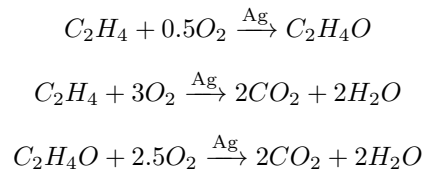
1 Reactor	1
1.1 Cinètica	1
1.2 Forma d'operació	3
1.3 Tipus de reactor	3
1.4 Càlcul del volum del reactor	4
1.5 Selecció del paquet termodinàmic i introducció de la cinètica	4
1.6 Dades del reactor	7
1.7 Balanç d'energia	7
1.8 Sistema de refrigeració	8
1.9 Tipus de circulació	9
1.10 Dimensionament	11
1.11 Càlcul teòric del coeficient de convenció del costat dels tubs (h_t)	15
1.12 Càlcul teòric del coeficient individual de transmissió de calor del costat de la carcassa (h_s)	18
1.13 Càlcul del coeficient global de transferència de calor a partir dels coeficients individuals	21
1.14 Càlcul del volum total del reactor	23
2 Columnes d'absorció	24
2.1 Disseny rigorós dels paràmetres teòrics de la columna	24
2.2 Disseny mecànic de l'equip	28
2.2.1 Columna d'absorció de l'òxid d'etilè (AC-201-2)	37
2.2.2 Columna d'absorció de CO ₂	39
3 Columnes de destil·lació	41

3.1	Disseny rigorós dels paràmetres teòrics de la columna	41
3.2	Disseny mecànic de l'equip	45
3.2.1	Columna de destil·lació (DC-201-3)	46
3.2.2	Columna de destil·lació (DC-202-3)	48
3.2.3	Columna de destil·lació (DC-201-4)	51
4	Columna <i>flash</i>	54
5	Bescanviadors de calor	57
6	Tancs d'emmagatzematge d'òxid d'etilè	66
6.1	Volum	66
6.2	Pressió	66
6.3	Temperatura	67
6.4	Límit elàstic	67
6.5	Factor de soldadura	68
6.6	Nombre i volum de tancs	68
6.7	Diàmetre i alçada dels tancs	68
6.8	Recalculer el volum dels tancs	69
6.9	Gruix del cos i del capçal	69
6.10	Factor M	70
6.11	Diàmetre extern	70
6.12	Alçada del capçal	70
6.13	Alçada dels tancs	71
6.14	Pes dels tancs	71
6.15	Venteig	72

6.16 Taula de resultats	73
7 Compressors	75
8 Bombes	76
9 Canonades	81
9.1 Càlcul del diàmetre de les canonades	81
9.2 Aïllament de les canonades	82
Bibliografia	84

1 Reactor

Per a la producció d'òxid d'etilè, a partir d'etilè i oxigen, es produeixen tres reaccions. La primera reacció correspon a la producció d'òxid d'etilè, la segona a la combustió d'etilè i la tercera a la combustió de l'òxid d'etilè.



En aquest cas, degut al rang de temperatura de treball, l'última reacció és menyspreable. A més, es treballa amb conversions entre 8 i 20% d'etilè per reduir la combustió de l'òxid d'etilè. No obstant això, la selectivitat de la reacció d'interès es troba al voltant del 90%.

Pel fet que la reacció és altament exotèrmica, és necessari retirar la calor produïda per a mantenir la reacció dins dels marges establerts. Per això s'ha dissenyat un sistema d'intercanvi de calor que és capaç de retirar la calor generada.

1.1 Cinètica

La selectivitat per aquest tipus de reacció es calcula segons l'equació 1:

$$S = \frac{k_1}{k_1 + k_2} \quad (1)$$

On:

S: selectivitat.

k_2 : constant cinètica de la formació de l'òxid d'etilè.

k_1 : constant cinètica de la combustió de l'etilè.

La catàlisi consisteix en partícules petites de plata disperses en α -Al₂O₃. L'àrea superficial del catalitzador ajudarà a determinar la temperatura de l'operació. Existeixen diversos articles que estudien la cinètica de l'oxidació d'etilè per a la producció d'òxid d'etilè [1] [2]. A més, diversos models cinètics es poden ajustar

a aquest tipus de reacció, com els mecanismes Rideal-Eley o Langmuir-Hinshelwood. Aquests mecanismes poden tenir en compte diverses condicions de l'oxidació de l'òxid d'etilè, com la reacció heterogènia catalítica, inhibicions que es poden donar durant el procés, o bé l'envelliment del catalitzador.

Per al càlcul de les cinètiques, s'ha emprat el model Langmuir-Hinshelwood [3], utilitzat especialment per a cinètiques heterogènies. La cinètica que s'ha triat per al desenvolupament d'aquest projecte [4], es basa en el càlcul de les diferents cinètiques que variaran en funció de les concentracions i temperatura dins del reactor. Per representar la velocitat de les dues reaccions presents en el reactor (veure equacions 2 i 3):

$$r(1) = \frac{k_1 P_O P_E}{1 + k_3 P_O + k_4 P_E} \quad (2)$$

$$r(2) = \frac{k_2 P_O P_E}{1 + k_3 P_O + k_4 P_E} \quad (3)$$

On:

$r(1)$ i $r(2)$: cinètiques de les reaccions de formació de l'òxid d'etilè i d'oxidació de l'etilè [$mol\ h^{-1}\ g - cat^{-1}$].

P_O i P_E : pressions parcials de l'oxigen i etilè respectivament [atm].

k_1 , k_2 , k_3 i k_4 : constants cinètiques calculades en base de la llei de Arrhenius (veure equacions 4, 5, 6 i 7).

$$k_1 = 13.53 e^{\frac{-8087}{RT}} \quad (4)$$

$$k_2 = 2253 e^{\frac{-13559}{RT}} \quad (5)$$

$$k_3 = 0.0004507 e^{\frac{7378}{RT}} \quad (6)$$

$$k_4 = 0.005133 e^{\frac{7897}{RT}} \quad (7)$$

On:

R: constant dels gasos ideals. [$cal\ mol^{-1}\ K^{-1}$].

T: temperatura a la que es realitza la reacció [K].

k_1 i k_2 en [$mol\ h^{-1}\ g - cat^{-1}\ atm^{-2}$].

k_3 i k_4 en [atm^{-1}].

En aquestes cinètiques no es té en compte la inhibició per producte, ja que d'aquesta manera, es simplifica la resolució matemàtica de la reacció. Tot i així, en el disseny del procés s'aconsegueix treballar a concentracions baixes de producte, per compensar el fet de no tenir-les en compte.

1.2 Forma d'operació

En el disseny de la planta s'han dissenyat dos reactors que operen de manera paral·lela. Cadascun d'ells treballa a una temperatura de 240°C i una pressió de 20 atm. S'ha decidit utilitzar aquestes condicions per facilitar la retirada de calor de la reacció, la qual cosa és un punt clau en el disseny del reactor. A més de tenir una conversió d'etilè a òxid d'etilè propera al 10%, afavoreix la producció de la primera reacció i controla la segona reacció, que combustiona els reactius.

1.3 Tipus de reactor

Per a les reaccions heterogènies i en continu es poden utilitzar dos tipus de reactors, de tanc agitat o de flux pistó. Pel fet que la reacció de producció de l'òxid d'etilè és altament exotèrmica, s'utilitza un reactor de flux pistó multitubular (**Figura 1**), de manera que es facilita la retirada de la calor produïda a la reacció.

En el reactor és necessària la presència del catalitzador, aquest estarà en estat sòlid i els reactius en estat gasós. Per això el reactor serà denominat a partir d'ara com un reactor multitubular de llit empacat, on el volum total de reactor estarà comprès pel volum del catalitzador i el volum buit del reactor.

Cal tenir en compte que per la carcassa hi circularà una quantitat determinada d'aigua que actuarà com a refrigerant, per la qual cosa el volum total de l'equip serà molt major al volum necessari on es duu a terme la reacció.

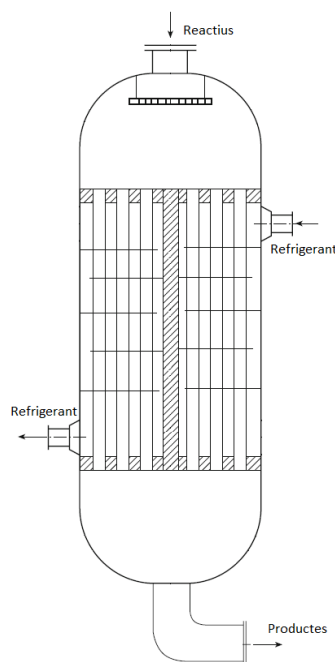


Figura 1: Esquema d'un reactor multitubular de llit empacat.

1.4 Càlcul del volum del reactor

Pel disseny i dimensionament del reactor, s'ha utilitzat l'eina de simulació Aspen HYSYS. S'ha escollit un reactor multitubular on els reactius circulen per l'interior dels tubs i el líquid refrigerant per la carcassa.

1.5 Selecció del paquet termodinàmic i introducció de la cinètica

El primer pas per a poder realitzar la simulació és escollir quins productes estaran presents en el procés. En segon lloc, és necessari triar un paquet termodinàmic, per a això es tindran en compte les substàncies químiques que circularan pel reactor i el tipus d'operació que s'hi realitza.

Al simulador Aspen HYSYS existeix una eina que ajuda a determinar el paquet termodinàmic que més s'ajusta, com s'observa a la **Figura 2**.

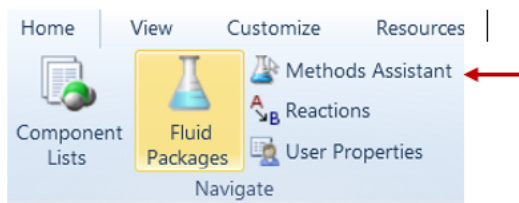


Figura 2: Eina per triar el paquet termodinàmic.

Es pot triar per tipus de processos a realitzar, o bé pel tipus de substàncies. En aquest cas, s'ha triat "Specify process type", veure **Figura 3**, en específic, el procés químic, **Figura 4**.

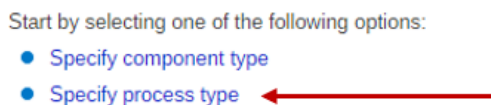


Figura 3: Elecció del tipus de procés o component.

Process type

Select the type of process or application:

- Chemical
- Electrolyte
- Environmental



Figura 4: Selecció de procés químic.

Després s'ha triat l'opció per a processos que es duguin a terme a més de 10 bars veure **Figura 5**.

At high pressures (>10 bars), use an equation of state method, such as BWRS, GCEOS, Glycol Package, Kabadi-Danner, Lee-Kesler-Plocker, MBWR, Peng-Robinson, PR-Twu, PRSV, Sour SRK, Sour PR, SRK, SRK-Twu, or Zudkevitch-Joffe.

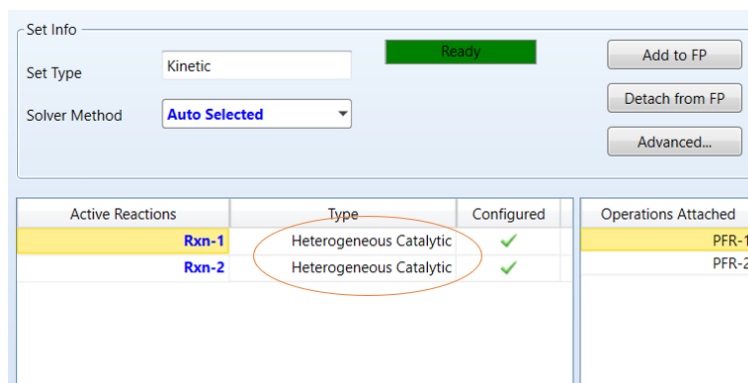
Figura 5: Elecció de processos a més de 10 bars.

Pel que s'ha triat el paquet termodinàmic SRK, que és apte per a processos a més de 10 bars. També seria recomanable el paquet Peng-Robinson.

A continuació, s'indiquen els passos seguits per a introduir la cinètica dins del programa Aspen Hysys una vegada ja escollit al paquet termodinàmic.

Per a això és necessari estar dins de l'apartat de propietats, entrar al de reaccions, i en l'apartat de "Set", col·locar les reaccions del sistema, en aquest cas s'afegeixen les cinètiques 2 i la 3. Per cada cinètica és necessari afegir 3 constants cinètiques, que depenen de la temperatura. Per la primera cinètica, és necessari afegir les constants cinètiques 4, 6 i 7 i per la segona, les 5, 6 i 7.

A l'hora de crear una reacció, és necessari indicar que es tractarà d'una reacció heterogènia, veure **Figura 6**.



Active Reactions	Type	Configured	Operations Attached
Rxn-1	Heterogeneous Catalytic	✓	PFR-1
Rxn-2	Heterogeneous Catalytic	✓	PFR-2

Figura 6: Elecció del tipus de cinètica.

Dins de cada reacció, és necessari col·locar els coeficients estequiòmètrics de cada reacció, a més de les unitats de la cinètica i de les unitats de les concentracions, en aquest cas de les pressions parcials dels compostos que intervenen, això es pot observar a la **Figura 7**.

Stoichiometry

Component	Mole Wt.	Stoich Coeff
Ethylene	28,054	-1,000
Oxygen	32,000	-0,500
C2Oxide	44,054	1,000
Add Comp		

Coeficients estequiometrics

Basis

Basis	Partial Pres
Base Component	Oxygen
Rxn Phase	VapourPhase
Min. Temperature	-273,1 C
Max Temperature	3000 C

Basis Units: atm

Rate Units: kgmole/m3-h

Balance Error: 0,00000

Reaction Heat (25 C): -2,1e+05 kJ/kgmole

Unitats de la cinètica i de les pressions parcials de cada compost que intervenen

Figura 7: Unitats de la cinètica i estequiometria.

A la pestanya de "reaction rate", la qual es pot observar a la **Figura 8**, es col·loquen les constants cinètiques, per a això s'ha d'indicar el factor preexponencial i l'energia d'activació de cada constant cinètica (veure 4, 5, 6 i 7) segons correspongui a cada reacció (veure 2 i 3). Les unitats de l'energia d'activació es poden canviar, però les corresponents al factor preexponencial hauran de coincidir amb les de la cinètica triada. A més a més, és necessari indicar els exponents de cada pressió parcial que intervé a la cinètica, tant en el numerador com en el denominador (veure 2 i 3).

Stoichiometry Reaction Rate

Exponents de les pressions parcials que intervenen en la cinètica

Components	Forward Order	Reverse Order
Ethylene	1,000	<empty>
Oxygen	1,000	<empty>
C2Oxide	<empty>	<empty>
<empty>	<empty>	<empty>

Constant cinètica del numerador i denominador amb els valors de l'A i E corresponents

Numerator

Forward Reaction

A	5,4120e+03
E	33836
B	<empty>

Reverse Reaction

A'	<empty>
E'	<empty>
B'	<empty>

Denominator

A	E [kJ/kgmole]	Ethylene	Oxy
4,5070e-004	30870	0,00000	
5,1330e-003	33041	1,0000	
<empty>	<empty>	<empty>	

Denominator Exponent: 1

Delete Row

Figura 8: Constants cinètiques.

1.6 Dades del reactor

Els paràmetres triats pel reactor i pel catalitzador es poden observar a la **Taula 1**.

Taula 1: Dades del reactor i del catalitzador.

Grandària de partícula [mm]	5
Densitat del sòlid [kg/m³]	800
Volum llit [m³]	19.48
Longitud [m]	6
Diàmetre de tubs [mm]	31.75
Nombre de tubs	4100
Fracció buida	0.50
Volum buit [m³]	9.74

Els cabals que entren i surten de cada reactor s'observen a la **Taula 2**, cal tenir en compte que al treballar en paral·lel, cada reactor ha de produir la meitat de la producció total.

Taula 2: Cabals d'entrada i sortida de cada reactor.

Compost	Entrada [kmol/h]	Sortida [kmol/h]
Aigua	11	58
Òxid d'etilè	0	182
Etilè	1515	1309
Diòxid de carboni	0	47
Oxígen	419	257
Nitrogen	3832	3832

Amb aquestes dades de reactor i la cinètica, s'ha obtingut una conversió del 10.87% de la primera reacció i una conversió del 5.63% per a la segona reacció, totes dues respecte a l'etilè.

1.7 Balanç d'energia

Una vegada dissenyat el reactor, és necessari comprovar si l'àrea de l'equip és suficient per a retirar l'energia produïda de la reacció i poder controlar-la. El líquid refrigerant utilitzat serà l'aigua, ja que, en produir-se un canvi de fase de líquid a gas, absorbirà una major quantitat d'energia. A més, es podrà utilitzar el vapor produït per a altres aplicacions dins de la planta com a la producció d'energia.

El mètode utilitzat per dissenyar la carcassa és el mètode de Kern [5]. Per calcular l'energia produïda en les reaccions, és necessari conèixer les entalpies de les reaccions que es duen a terme dins del reactor. Segons la bibliografia [6], per calcular-la, és necessari tenir en compte que degut a les diferents entalpies produïdes en les reaccions d'oxidació parcial i total. La calor total produïda dependrà de la selectivitat de la reacció segons l'equació 8:

$$47250 - (434 \cdot S) = \Delta H_r \quad (8)$$

On:

S: selectivitat.

ΔH_r : entalpia de la reacció [kJ/kg d'etilè].

Per a calcular la selectivitat, s'ha tingut en compte l'equació 1, que dona un valor de 90.75%, la qual cosa significa que l'entalpia de reacció global serà de 7864 kJ/kg d'etilè o bé, 220 kJ/mol.

Per calcular la calor, s'utilitza l'equació 9.

$$Q_g = F_r \cdot \Delta H_r \quad (9)$$

On:

Q_g : energia produïda a la reacció [kJ/h].

F_r : cabal d'etilè consumit a la reacció [kg/h d'etilè].

ΔH_r : entalpia de la reacció [kJ/kg d'etilè].

La calor despesa o energia produïda a la reacció (Q_g) té un valor de $4.54 \cdot 10^7 \text{ kJ/h}$.

1.8 Sistema de refrigeració

Un cop coneguda l'energia produïda a la reacció, s'ha de calcular el cabal necessari de refrigerant per a retirar tota aquesta energia, a part de l'àrea d'intercanvi. Pel fet que el reactor es mantindrà a una temperatura de 240°C, aquesta serà la temperatura de l'interior dels tubs. Per al sistema de refrigeració, utilitzarem aigua a 25°C i 1 atm.

Degut a que l'aigua canviarà de fase, cal tenir en compte els valors del calor específic en estat líquid i en estat gasós. També cal considerar el calor latent de canvi de fase i els diferents increments de temperatura que es produiran en les diferents fases. Aquestes dades termodinàmiques de l'aigua es troben en el banc de dades del NIST (National Institute of Standards and Technology) [7]. Per calcular el cabal de refrigerant, s'utilitza l'equació 10.

$$Q_g = m \cdot C_{p_l} \cdot \Delta T_l + m \cdot \lambda + m \cdot C_{p_v} \cdot \Delta T_v \quad (10)$$

On:

Q_g : energia produïda a la reacció [kJ/h].

m : cabal de refrigerant [kg/h].

ΔT_l i ΔT_v : increment de temperatura que es produeix en el fluid refrigerant en estat líquid i gasós respectivament [°C].

C_{p_l} : calor específica del fluid refrigerant en estat líquid [kJ/kg°C].

C_{p_v} : calor específica del fluid refrigerant en estat gasós [kJ/kg°C].

λ : calor latent del fluid refrigerant [kJ/kg].

Per fer ús de l'equació 10, és necessari determinar l'augment de temperatura del fluid refrigerant. S'ha decidit que per aquest cas, el fluid refrigerant tindrà un increment de 125 °C, 75°C per a la fase líquida (ΔT_l) i 50°C per a la fase gasosa (ΔT_v). El calor específic de l'aigua en estat líquid (C_{p_l}) té un valor mitjà de 4.20 kJ/kg°C, i la calor específic de l'aigua en estat gasós (C_{p_v}) té un valor mitjà de 2.14 kJ/kg°C. Respecte al canvi de temperatura, λ té valor de 2264 kJ/kg. Aquestes dades es troben al banc de dades del NIST [7]. Amb l'equació 10, s'obté que el cabal refrigerant és de 16893 kg/h, o aproximadament, uns 17 m³/h.

1.9 Tipus de circulació

El tipus de circulació triat és el de contracorrent, de manera que el perfil de temperatures correspondria al de la **Figura 9**. És necessari aclarir que es tracta d'una aproximació ja que en canviar la calor específica de l'aigua a causa del seu canvi d'estat, i al propi canvi d'estat, el perfil no serà exactament el mateix.

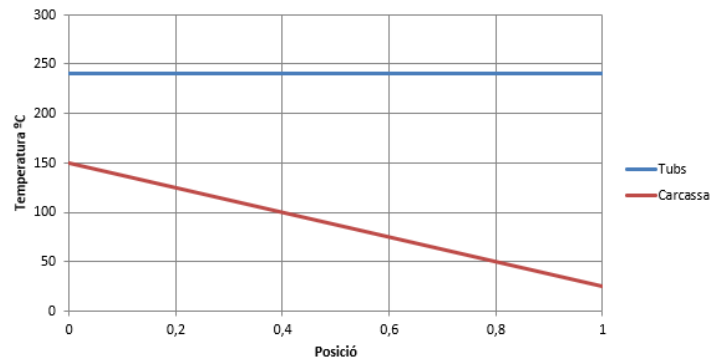


Figura 9: Perfils de temperatures del reactor i del refrigerant.

Per a fer ús del mètode de Kern [5], es realitza un procés iteratiu de forma que es suposa un coeficient global de transferència de calor U . S'ha obtingut un valor final de $35\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{k}$.

A més, és necessari calcular l'increment de temperatura i la seva mitjana logarítmica utilitzant l'equació 11.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_r - T_e) - (T_r - T_s)}{\ln\left(\frac{T_r - T_e}{T_r - T_s}\right)} \quad (11)$$

On:

ΔT_{ml} : temperatura mitjana logarítmica [°C].

T_e : temperatura del líquid refrigerant de l'entrada [°C].

T_s : temperatura del líquid refrigerant de la sortida [°C].

T_r : temperatura al reactor [°C].

Amb l'equació 11, s'obté $\Delta T_{ml} = 143.541^\circ\text{C}$.

Per a calcular l'àrea de transferència necessària de calor s'utilitza l'equació 12.

$$A = \frac{Q_g}{U \cdot \Delta T_{ml}} \quad (12)$$

On:

A : àrea total d'intercanvi [m^2].

Q_g : energia produïda a la reacció [kJ/h].

ΔT_{ml} : temperatura mitjana logarítmica [°C].

U : coeficient global de transferència de calor [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{k}$].

Amb l'equació 12, s'obté un valor al final de la iteració de 2744m^2 .

Una vegada coneguda l'àrea total d'intercanvi (A), és necessari comprovar si l'àrea del reactor dissenyat en programa de simulació Aspen HYSYS és suficient per a poder transferir tota l'energia produïda a la reacció. Per això es calcula l'àrea d'un tub amb l'equació 13, amb la mateixa longitud i el mateix diàmetre que al programa Aspen HYSYS, i suposant un gruix de 2 mm s'obté el diàmetre extern (D_{extern}). El número resultant de l'equació 13 no ha de ser major a 4100 tubs. Si ho fos, es suposaria que l'àrea de bescanvi del reactor no es suficient per intercanviar la calor.

$$A_{\text{tub}} = \pi \cdot D_{\text{extern}} \cdot L_{\text{tub}} \quad (13)$$

On:

A_{tub} : àrea que té un tub per la part externa [m^2].

D_{extern} : diàmetre que té un tub per la part externa [m].

L_{tub} : és la longitud que té un tub [m].

Després, per calcular el nombre de tubs s'ha de dividir l'àrea total (A) calculada a l'equació 12 per l'àrea d'un tub (A_{tub}) calculada a l'equació 13, com es pot veure en l'equació 14.

$$n_{\text{tubs}} = \frac{A}{A_{\text{tub}}} \quad (14)$$

On:

A_{tub} : àrea que té un tub per la part externa [m^2].

A : àrea total de intercanvi [m^2].

n_{tubs} : quantitat de tubs necessària per poder realitzar l'intercanvi de calor.

Amb aquestes equacions es pot comprovar que amb una $U = 32\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{k}$ i un $\Delta T_{\text{ml}} = 144$ el nombre de tubs necessaris no superen als del reactor dissenyat en el programa Aspen HYSYS, (veure **Taula 1**). Amb l'equació 14, s'obté el nombre de tubs necessaris per a garantir l'intercanvi de calor.

1.10 Dimensionament

Una vegada ja calculat el nombre de tubs del reactor i comprovat que són suficients per a realitzar l'intercanvi de calor generat a la reacció, és necessari dimensionar l'equip de manera que es tria una disposició triangular dels tubs.

A més, per poder calcular el *pitch*, és necessari conèixer el diàmetre extern dels tubs, tenint com a referència el diàmetre intern dels mateixos a la **Taula 1**. S'obté que el diàmetre intern es $D_{\text{int}} = 31.75\text{mm}$. Pel diàmetre extern, es recomana que el gruix sigui de 2mm, de forma que el diàmetre extern serà de $D_{\text{ext}} = 35.75\text{mm}$. El càlcul del *pitch* es realitza amb l'equació 15.

$$Pitch = 1.25 \cdot D_{\text{ext}} \quad (15)$$

On:

D_{extern} : diàmetre que té un tub per la part externa [mm].

Pitch determina la distribució dels tubs i és la distància entre els centres de dos tubs consecutius [mm].

Amb l'equació 15, s'obté que el *pitch* té valor de 44.69 mm. Es calcula el diàmetre de tot el feix de tubs (D_b) que formen al reactor utilitzant l'equació 16.

$$D_b = D_{\text{extern}} \cdot \left(\frac{n_{\text{tubs}}}{K_1}\right)^{\frac{1}{n_1}} \quad (16)$$

On:

D_{extern} : diàmetre que té un tub per la part externa [mm].

n_{tubs} : quantitat de tubs que hi ha al reactor.

Als valors de K_1 i n_1 es troben tabulats a la **Taula 3**.

Taula 3: valors de K_1 i n_1 per pitch triangular.

Passos per tub	1
K_1	0.319
n_1	2.142

És necessari triar un capçal del tipus BEM segons la classificació TEMA [8]. Una vegada triat al tipus, i determinat el diàmetre del feix dels tubs, s'utilitza la **Figura 10** per calcular l'espai entre el feix de tubs i la carcassa ($D_s - D_b$).

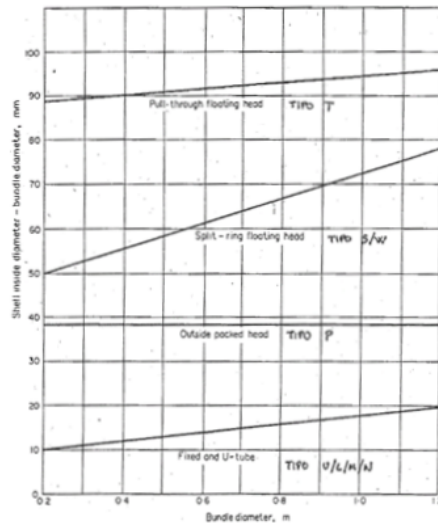


Figura 10: Càlcul de l'espai entre el feix de tubs i la carcassa.

Amb l'equació 17 i seleccionant una carcassa del tipus T a la **Figura 10**, s'obté uns valors de $D_b = 2.96\text{m}$ i $D_s = 3.07\text{m}$

La relació entre la longitud i el diàmetre (L/D) d'aquest tipus de reactor es sol trobar entre els 1.5 i 6, en aquest cas s'obté una relació de 1.95. També es pot calcular el número de pantalles deflectores necessàries pel reactor ja que aquestes afavoriran la transferència de calor.

$$N_{pantalles} = \left(\frac{L}{l_b}\right) - 1 \quad (17)$$

On:

$N_{pantalles}$: número de pantalles deflectores en el reactor.

L : longitud del reactor [m].

l_b : espaiat entre pantalles. Aquest valor es calcula en funció del diàmetre de la carcassa, tenint un rang òptim de $(0.3 - 0.5) \cdot D_s$.

S'obté un valor de 3 pantalles. Per últim es determina les característiques geomètriques d'aquestes pantalles, al denominat *buffle cut*, que és l'espai entre la pantalla i la carcassa. Els valors òptims solen ser entre $(0.20 - 0.25) \cdot D_s$.

A continuació es mostra la **Taula 4** amb tots els resultats.

Taula 4: Resultats de les dimensions del reactor.

Q_g	$4.5 \cdot 10^7$ kJ/h
m	16893 kg/h
ΔT_{ml}	143.4 °C
U suposada	$32 \text{W/m}^2 \cdot \text{k}$
A	2744m^2
n_{tubs} necessaris	4074
n_{tubs} reactor	4100
D_{int}	31.75mm
Gruix dels tubs	2mm
Pitch	44.69mm
D_b	2.96m
D_s	3.07m
$N_{\text{pantalles}}$	3
<i>baffle cut</i>	0.77m

1.11 Càlcul teòric del coeficient de convenció del costat dels tubs (h_t)

Per poder determinar el coeficient de transferència de calor és necessari calcular els coeficients individuals i els factors d'embrutiment. Primer es calcula el coeficient de convenció del costat dels tubs (h_t), per fer això és necessari calcular una sèrie d'apartats del reactor:

- L'àrea de pas per un tub (veure equació 18).

$$A_{pas1tub} = D_{int}^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad (18)$$

On:

$A_{pas1tub}$: àrea de pas d'un tub [m^2].

D_{int} : diàmetre intern d'un tub [m].

- Es calcula l'àrea de pas de tot els tubs (veure l'equació 19).

$$A_{pas} = N_t \cdot \frac{A_{pas1tub}}{n_{pt}} \quad (19)$$

On:

A_{pas} : àrea de pas de tots els tubs [m^2].

$A_{pas1tub}$: àrea de pas d'un tub [m^2].

N_t : número de tubs que hi ha al reactor.

n_{pt} : número de passos de tubs que hi ha al reactor.

- El diàmetre equivalent (D_{eq}) és igual al diàmetre intern (D_{int}).
- El cabal màssic per unitat d'àrea o densitat de flux màssic que es calcula segons l'equació 20.

$$G_{tub} = \frac{m_t}{A_{pas}} \quad (20)$$

On:

A_{pas} : àrea de pas de tots els tubs [m^2].

G_{tub} : cabal màssic per unitat d'àrea [$kg/m^2 \cdot s$].

m_t : cabal màssic del reactor que passa pels tubs [kg/h].

- El Reynolds es calcula amb l'equació 21.

$$Re_{tub} = \frac{D_{int} G_{tub}}{\mu} \quad (21)$$

On:

G_{tub} : cabal màssic per unitat d' àrea [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$].

Re_t : número Reynolds als tubs del reactor.

D_{int} : diàmetre intern de un tub [m].

μ : viscositat del fluid [kg/ms].

- El número Prandtl és calcula amb l'equació 22.

$$Pr_{tub} = \frac{C_p \mu}{k} \quad (22)$$

On:

Pr_{tub} : número Prandtl.

C_p : calor específica mitjana dels compostos [$\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$].

μ : viscositat del fluid [kg/ms].

k : conductivitat tèrmica del fluid [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$].

- El factor de transferència de calor es calcula amb l'equació 23.

$$J_h = 0.027 Re_t^{-0.2} \quad (23)$$

On:

J_h : factor de transferència de calor .

Re_t : número Reynolds als tubs del reactor.

A la **Taula 5** es pot observar als resultats dels càlculs per poder obtenir el coeficient de convenció del costat dels tubs (h_t).

Taula 5: Resultats dels càlculs necessaris per obtenir h_t .

$A_{pas1tub}$	$7.92 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
A_{pas}	3.25 m^2
D_{eq}	$3.18 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
G_{tub}	$13.99 \text{ kg/m}^2\text{s}$
m_t	$1.63 \cdot 10^5 \text{ kg/h}$
μ	$2.40 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$
Re_t	$1.85 \cdot 10^4$
Pr_{tub}	3.12
C_p	$5.45 \cdot 10^3 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
k	$4.20 \cdot 10^{-2} \text{ W/m}^\circ\text{C}$
J_h	$3.78 \cdot 10^{-3}$

Per calcular el valor del coeficient de convenció del costat dels tubs (h_t), s'utilitza l'equació 24. Per a calcular aquest valor s'ha suposat que la viscositat del fluid és homogènia en tot el tub, per la qual cosa $\mu = \mu_w$.

$$h_t = J_h Re_t Pr_{tub}^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \left(\frac{k}{D_{int}} \right) \quad (24)$$

On:

J_h : factor de transferència de calor.

Re_t : número de Reynolds als tubs del reactor.

Pr_{tub} : número de Prandtl .

μ : viscositat del fluid [kg/ms].

μ_w : viscositat del fluid a la paret [kg/ms].

k : conductivitat tèrmica del fluid [W/m°C].

D_{int} : diàmetre intern d'un tub [m].

h_t : coeficient de convenció del costat dels tubs [W/m²°C].

S'obté un valor del coeficient de convenció del costat dels tubs de 135W/m²°C.

1.12 Càlcul teòric del coeficient individual de transmissió de calor del costat de la carcassa (h_s)

Per a calcular el coeficient individual de transmissió de calor del costat de la carcassa (h_s) cal calcular els següents paràmetres:

- Càlcul de l'àrea transversal de la carcassa amb l'equació 25.

$$A_{ST} = \frac{l_b D_s(\text{pitch} - D_{ext})}{\text{pitch} n_{ps}} \quad (25)$$

On:

A_{ST} : àrea transversal de la carcassa [m^2].

l_b : espaiat entre pantalles [m].

D_s : diàmetre de la carcassa [m].

pitch: distància entre els centres de dos tubs consecutius [m].

D_{ext} : diàmetre extern dels tubs del reactor [m].

- Càlcul del cabal màssic per unitat d'àrea amb l'equació 26.

$$G_S = \frac{M_S}{A_{ST}} \quad (26)$$

On:

A_{ST} : àrea transversal de la carcassa [m^2].

G_S : cabal màssic per unitat d'àrea [kg/m^2s].

M_S : cabal de fluid refrigerant [kg/s].

- Càlcul de la velocitat del fluid de carcassa amb l'equació 27.

$$V_S = \frac{M_S}{A_{ST}\rho} \quad (27)$$

On:

A_{ST} : àrea transversal de la carcassa [m^2].

V_S : velocitat del fluid de carcassa [m/s].

M_S : cabal de fluid refrigerant [kg/s].

ρ : densitat mitjana del fluid de refrigeració [kg/m^3].

- Càlcul del diàmetre equivalent de carcassa amb l'equació 28.

$$Ds_{eq} = (pitch^2 - 0.917 D_{ext}^2) \frac{1.10}{D_{ext}} \quad (28)$$

On:

Ds_{eq} : diàmetre equivalent per la carcassa [m].

pitch: distància entre els centres de dos tubs consecutius [m].

D_{ext} : diàmetre extern dels tubs [m].

- El Reynolds es calcula amb l'equació 29.

$$Re_s = \frac{Ds_{eq} G_s}{\mu_s} \quad (29)$$

On:

G_s : cabal màssic per unitat d' àrea [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$].

Re_s : número Reynolds a la carcassa del reactor.

Ds_{eq} : diàmetre equivalent per la carcassa [m].

μ_s : viscositat del fluid de la carcassa [kg/ms].

- El número Prandtl es calcula amb l'equació 30.

$$Pr_s = \frac{Cp_s \mu_s}{k_s} \quad (30)$$

On:

Pr_s : número Prandtl.

Cp_s : calor específica mitjana del fluid de la carcassa [$\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$].

μ_s : viscositat del fluid de la carcassa [kg/ms].

k_s : conductivitat tèrmica del fluid de la carcassa [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$].

- El valor de j_h s'obté de la lectura de la gràfica de la **Figura 11**, on es representa j_h respecte al Re_s en funció del *baffle cut*.

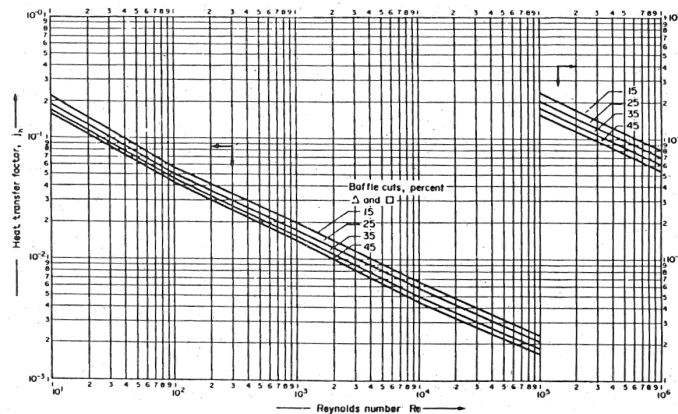


Figura 11: Factor de transferència de calor de la carcassa.

A la **Taula 6** es pot observar als resultats dels càlculs per poder obtenir el coeficient de convenció del costat de la carcassa (h_s).

Taula 6: Resultats dels càlculs necessaris per obtenir h_s .

A_{ST}	0.94m ²
G_S	4.99kg/m ² s
V_S	35.61m/s
D_{Seq}	2.54E - 02m
Re_s	280
μ_s	4.52E - 04kg/ms
Pr_s	4.48
C_{p_s}	3170J/kg°C
k_s	0.32W/m°C
j_h	0.03

Per calcular el valor del coeficient de convenció del costat de la carcassa (h_s), s'utilitza l'equació 31. Per calcular aquest valor s'ha suposat que la viscositat del fluid és homogènia en tota la secció de la carcassa, per la qual cosa $\mu_s = \mu_{s-w}$.

$$h_s = j_h Re_s Pr_s^{0.33} \left(\frac{\mu_s}{\mu_{s-w}} \right)^{0.14} \left(\frac{k_s}{D_{Seq}} \right) \quad (31)$$

On:

j_h : factor de transferència de calor.

Re_s : número Reynolds a la carcassa del reactor.

Pr_s : número Prandtl .

μ_s : viscositat del fluid [kg/ms].

μ_{s-w} : viscositat del fluid a la paret [kg/ms].

k_s : conductivitat tèrmica del fluid [W/m°C].

D_{seq} : diàmetre intern d'un tub [m].

h_s : coeficient de convenció del costat dels tubs [W/m²°C].

S'obté un valor del coeficient de convenció del costat de la carcassa (h_s) de 283W/m²°C.

1.13 Càlcul del coeficient global de transferència de calor a partir dels coeficients individuals

El coeficient global de transferència de calor es calcula amb l'equació 32.

$$\frac{1}{U_G} = \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_R} + \frac{D_{ext} \ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{int}}\right)}{2 k_{acer}} + \frac{D_{ext}}{D_{int} R_t} + \frac{D_{ext}}{D_{int} h_t} \quad (32)$$

On:

U_G : coeficient global de transferència de calor [W/m²°C].

h_s : coeficient de convenció del costat de la carcassa [W/m²°C].

h_t : coeficient de convenció del costat dels tubs [W/m²°C].

h_R : factors d'embrutiment a la carcassa [W/m²°C].

D_{ext} : diàmetre extern dels tubs [m].

D_{int} : diàmetre intern dels tubs [m].

k_{acer} : conductivitat tèrmica de l'acer [W/m°C].

R_t : coeficient d'embrutament per incrustacions als tubs [W/m²°C].

El valor de k_{acer} ve determinat pel tipus de material triat pels tubs. En aquest cas s'ha triat un valor típic de 16.3W/m²°C. Els valors de h_R i R_t són factors d'embrutiment i els seus valors típics es poden trobar a la **Figura 12**.

Amb els valors de la **Taula 7** s'ha obtingut un resultat de $U = 80\text{W/m}^2\text{°C}$. Si es repeteixen els càlculs amb aquest valor de U , es necessitaria un reactor amb 1400 tubs amb les dimensions ja nombrades.

És observable que existeix una diferència, aproximadament, del 130% entre el valor estimat i el real del coeficient global de transferència de calor ($U_{real} = 80\text{W/m}^2\text{°C}$ i $U_{sup} = 35\text{W/m}^2\text{°C}$), mentre que el valor òptim en casos de bescanviadors és del 15%. No obstant això, al tractar-se d'un reactor on es produeix una reacció exotèrmica, és altament important el control de la temperatura. Per aquest motiu es portarà a terme un sobredimensionat més gran del 15%.

El reactor ha estat dissenyat per a condicions d'operació òptimes.- No obstant això, en cas de envellir-se o embrutar-se el catalitzador, el rendiment del reactor disminueix. Per tal de minimitzar aquest problema i continuar produint la quantitat demandada, és necessari augmentar la temperatura de la reacció fins a 280°C. Conseqüentment, es produirà una major quantitat d'energia que posteriorment haurà de ser retirada. No és aconsellable dur a terme la reacció a més de 300°C, ja que a una temperatura superior a aquesta es produeix la combustió de l'òxid d'etilè. Un cop s'arriba a aquestes temperatures, és necessari canviar el catalitzador.

Tenint en compte que es tracta d'un reactor que produeix energia i que ha de ser capaç de treballar a major temperatura de la dissenyada per moments puntuals, s'ha triat un valor del coeficient global de transferència de calor de $U = 35\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$, valor obtingut al disseny simulat en Aspen HYSYS amb 4100 tubs. A més, els reactors que hi ha a la indústria tenen una quantitat de tubs semblant a la calculada pel simulador amb una producció semblant.

Fluid	Coefficient ($\text{W}/\text{m}^2 \text{°C}$)
River water	3000–12,000
Sea water	1000–3000
Cooling water (towers)	3000–6000
Towns water (soft)	3000–5000
Towns water (hard)	1000–2000
Steam condensate	1500–5000
Steam (oil free)	4000–10,000
Steam (oil traces)	2000–5000
Refrigerated brine	3000–5000
Air and industrial gases	5000–10,000
Flue gases	2000–5000
Organic vapours	5000
Organic liquids	5000
Light hydrocarbons	5000
Heavy hydrocarbons	2000
Boiling organics	2500
Condensing organics	5000
Heat transfer fluids	5000
Aqueous salt solutions	3000–5000

Figura 12: Factors d'embrutiment.

Taula 7: Resultats dels càlculs necessaris per obtenir el coeficient global de transferència de calor de forma teòrica U_G .

h_s	$283\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$.
h_t	$135\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$.
h_R	$4000\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$.
k_{acer}	$16.3\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$.
R_t	$4000\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$.
D_{int}	$3.18 \cdot 10^{-2} \text{ m}$.
D_{ext}	$3.58 \cdot 10^{-2} \text{ m}$.

1.14 Càlcul del volum total del reactor

El volum total que ocupa l'equip es calcula tenint en compte que aquest consta del cos i de les tapes toriesfèriques, les quals, són utilitzades en equips a altes pressions [9]. El volum total que ocupa el reactor es calcula amb les equacions 33, 34 i 35.

$$V_{cos} = \pi \cdot \frac{D_{cos}^2}{4} \cdot L_{cos} \quad (33)$$

$$V_{tapa} = 0.1 \cdot D_{int}^3 \quad (34)$$

$$V_{reactor} = V_{cos} + (2 \cdot V_{tapa}) \quad (35)$$

On:

V_{cos} : volum del cos amb forma de cilindre [m³].

D_{cos} : diàmetre del cos amb forma de cilindre [m].

L_{cos} : longitud del cos amb forma de cilindre [m].

V_{tapa} : volum de la tapa amb forma toriesfèrica [m³].

D_{int} : diàmetre intern de la tapa amb forma toriesfèrica, sense tenir en compte al gruix en [m].

$V_{reactor}$: volum que ocupa tot el reactor [m³].

A continuació, s'adjunta la **Taula 8** amb les dades i resultats obtinguts del càlcul del volum que ocupa el reactor segons al programa Aspen Exchanger. Els resultats es poden observar en les fitxes d'especificacions de l'apartat d'equips.

Taula 8: Dades i resultats per al càlcul del volum total per un reactor.

D_{cos} [mm]	3696
L_{cos} [mm]	8139
D_{int} [mm]	3633
V_{cos} [m ³]	87.42
V_{tapa} [m ³]	4.80
$V_{reactor}$ [m ³]	97.02

2 Columnes d'absorció

En el cas de la producció de l'òxid d'etilè, es troben dues columnes d'absorció i tres columnes de destil·lació. Per a realitzar el dimensionament d'aquestes, s'ha realitzat un disseny general, a partir del programa Aspen HYSYS i un disseny més rigorós a partir de la norma ASME per a recipients de pressió (ASME VIII - Divisió 2) [10].

Per tant, en aquest apartat s'explicarà el procés que s'ha seguit per a realitzar el disseny general de les dues columnes d'absorció i el disseny mecànic, que serveix per al disseny rigorós de les cinc columnes del procés.

2.1 Disseny rigorós dels paràmetres teòrics de la columna

Per a realitzar el disseny de la columna d'absorció de l'òxid d'etilè amb aigua, es procedeix amb el disseny aproximat mitjançant el programa Aspen HYSYS. A partir d'aquest, es podran obtenir les primeres dades del disseny, com per exemple el diàmetre intern de la columna i l'alçada de la part cilíndrica d'aquesta.

Primerament, s'haurà d'indicar els corrents de matèria d'entrada i de sortida a la columna d'absorció. A la **Figura 13** es pot observar quins són aquests corrents.

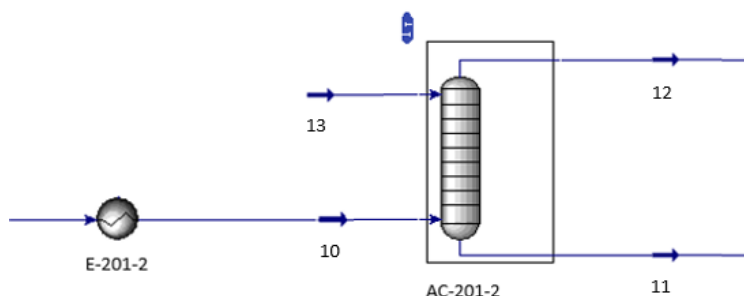


Figura 13: Corrents d'entrada i sortida a la columna d'absorció (AC-201-2).

S'hauran d'introduir els valors dels corrents de matèria de l'aliment i el corrent d'energia dintre de la columna, seguint els passos que demana el programa. A la **Figura 14**, s'observa la primera pantalla on es troben els corrents d'entrada i sortida i es determina que el número d'etapes de la columna és 10 i la pressió és de 1500 kPa.

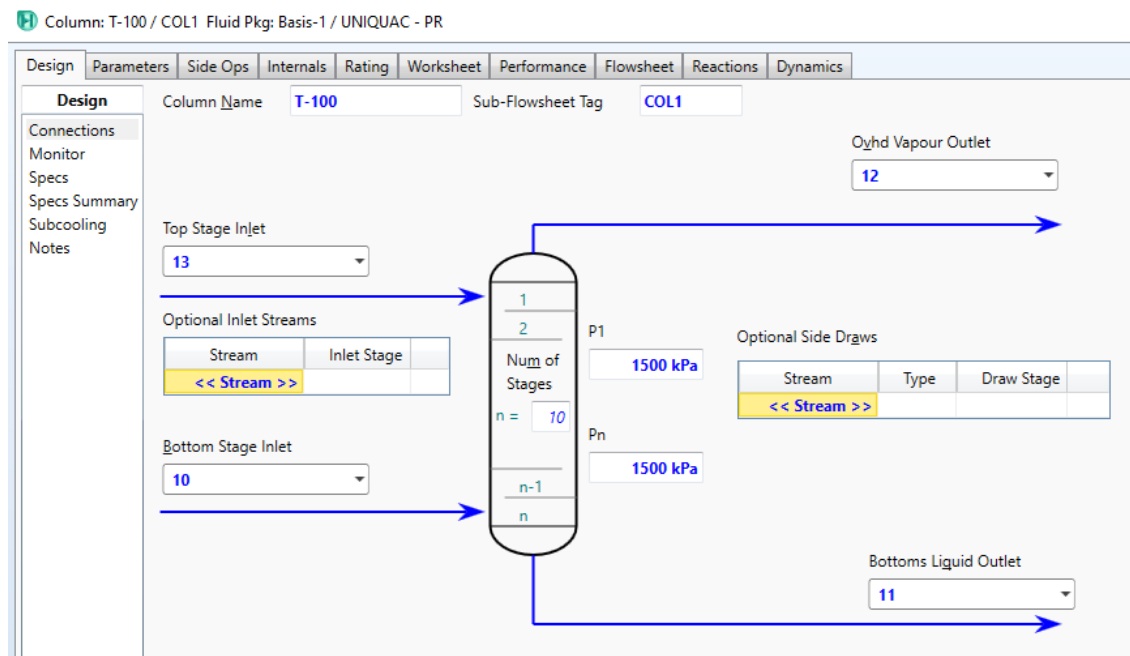


Figura 14: Pantalla del "Design" del programa Aspen HYSYS.

Per determinar com evolucionen la temperatura i la pressió al llarg de les diferents etapes de la columna, el programa genera a l'apartat "Design" dos gràfics que relacionen aquestes dues condicions en funció del plat. Aquests gràfics, es troben representats a la **Figura 15** i **Figura 16**.

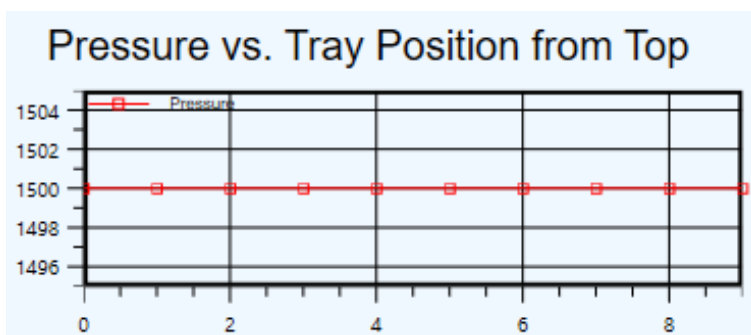


Figura 15: Representació de la pressió [kPa] en funció de la posició del plat.

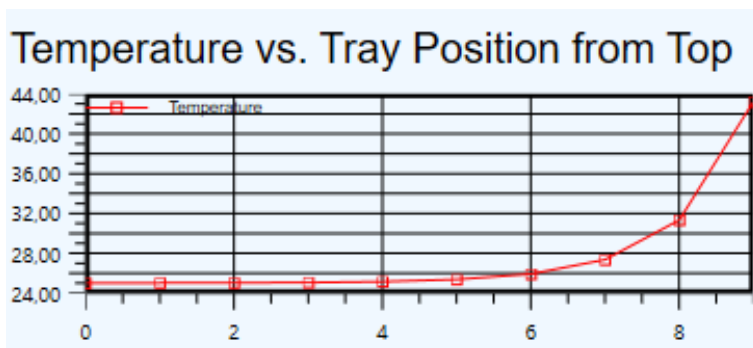


Figura 16: Representació de la temperatura [°C].

En aquest cas, la pressió a la columna d'absorció és constant i la temperatura varia en funció del plat, augmentant a mesura que augmenta el número de plat. La temperatura màxima és de 44 °C i la mínima és de 25 °C.

A més a més del gràfic de la temperatura, a l'apartat de "Parameters" representat a la **Figura 17**, es pot observar quines són les condicions de temperatura, pressió, cabal de líquid i cabal de gas per a cadascun dels plats.

Column: T-100 / COL1 Fluid Pkg: Basis-1 / UNIQUAC - PR

Steady State Profiles					
	Stage	Pressure [kPa]	Temp [C]	Optional Estimates	
				Net Liquid [kgmole/h]	Net Vapour [kgmole/h]
1__Main Tower	0	1500	25,01	3,001e+004	1,092e+004
2__Main Tower	1	1500	25,02	3,001e+004	1,092e+004
3__Main Tower	2	1500	25,03	3,001e+004	1,093e+004
4__Main Tower	3	1500	25,07	3,001e+004	1,093e+004
5__Main Tower	4	1500	25,15	3,001e+004	1,093e+004
6__Main Tower	5	1500	25,37	3,002e+004	1,093e+004
7__Main Tower	6	1500	25,93	3,005e+004	1,094e+004
8__Main Tower	7	1500	27,36	3,012e+004	1,097e+004
9__Main Tower	8	1500	31,34	3,029e+004	1,104e+004
10__Main Tower	9	1500	43,24	3,046e+004	1,120e+004

Figura 17: Pantalla "Parameters" del programa HYSYS.

A les **Figures 18 i 19** es pot observar l'apartat "Performance" del programa HYSYS. En aquest apartat, es troben les composicions dels cabals d'entrada i sortida de la columna.

Els corrents que entren a la columna són el corrent d'entrada de gas (10) i el corrent d'aigua (13). El corrent de gas, està compost per tots els productes de la reacció, restes dels reactius i el reactiu inert.

Side Ops	Internals	Rating	Worksheet	Performance	Flow
Feeds					
		13'		10	
Flow Rate (kgmole/h)		3,000000e+04		1,137778e+04	
H2O		1,0000		0,0103	
C2Oxide		0,0000		0,0320	
Ethylene		0,0000		0,2303	
CO2		0,0000		0,0084	
Oxygen		0,0000		0,0452	
Nitrogen		0,0000		0,6738	

Figura 18: Pantalla "Parameters" del programa HYSYS.

Els corrents de sortida són el corrent de gas (12) i el corrent líquid (11). En el corrent de líquid hi ha aigua i òxid d'etilè que s'ha absorbit a la columna i en el corrent gasos hi han tots aquells compostos que aniran a l'àrea de tractament de diòxid de carboni.

	12	11
Flow Rate (kgmole/h)	1,091796e+04	3,045981e+04
H2O	0,0025	0,9879
C2Oxide	0,0000	0,0120
Ethylene	0,2400	0,0000
CO2	0,0086	0,0000
Oxygen	0,0471	0,0000
Nitrogen	0,7019	0,0001

Figura 19: Composició dels corrents de sortida.

Per últim, és necessari determinar l'alçada, el diàmetre i el tipus de rebliment de la columna per continuar amb el disseny mecànic. Per fer-ho s'utilitza l'apartat "Internals" del programa HYSYS. S'estableix que el tipus de la columna sigui "Packed" i el tipus de rebliment "Pall". A partir d'aquí, es realitza una iteració amb els valors del diàmetre i l'alçada entre plats de la columna, fins que la hidràulica provocada pels "Internals" de la columna convergeixin de forma correcta. Això es pot observar a la **Figura 20**.

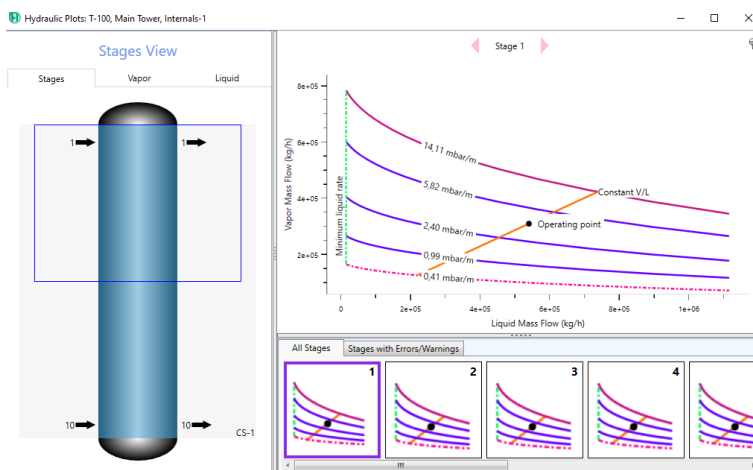


Figura 20: Pantalla "Stages View" del programa HYSYS.

Després de realitzar la iteració, s'obtenen els valors del diàmetre intern i l'alçada de la part cilíndrica de la columna, en aquest cas 4 i 11 metres, respectivament. A la Figura 21, es troba representada la pantalla on es troben aquests paràmetres.

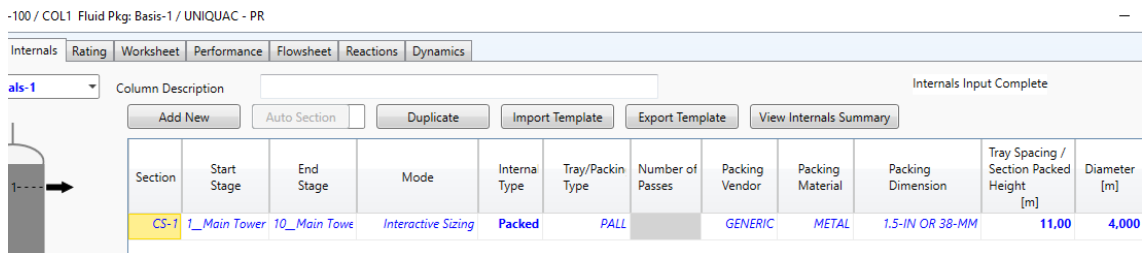


Figura 21: Pantalla "Internals" del programa HYSYS.

2.2 Disseny mecànic de l'equip

En aquest apartat es troba explicat el procediment pel disseny mecànic que s'ha seguit per a les 5 columnes del procés, tant columnes d'absorció com flash i destil·lació. Per fer-ho s'ha utilitzat la normativa ASME per a tancs de pressió que es troba a la secció VIII-Divisió 1 [10].

1. Elecció del material

El primer pas és decidir el tipus de material que s'utilitzarà per a construir la columna. En aquest cas el material utilitzat és l'acer inoxidable 316 L, ja que al treballar amb òxid d'etilè és important que el material sigui resistent a la corrosió.

2. Càlcul de la pressió de disseny

Per a poder calcular la pressió de disseny de la columna, s'han utilitzat les equacions 36 i 37. La pressió de disseny serà la pressió més elevada de les que s'han calculat, ja que d'aquesta manera es sobredimensiona la columna.

$$P_1 = 1.1 \cdot P_o \quad (36)$$

$$P_2 = P_o + 196.13 \quad (37)$$

On:

P_o : pressió màxima d'operació normal del procés [kPa].

P_1 : pressió de disseny [kPa].

P_2 : pressió de disseny [kPa].

3. Càlcul temperatura de disseny

Per a calcular la temperatura de disseny s'utilitzarà un mètode similar al càlcul de la pressió de disseny. A continuació, es troben les equacions 38 i 39, a partir d'aquestes és determinarà el valor més alt. Aquest valor serà el que correspondrà amb la temperatura de disseny.

$$T_1 = T_o + 0.1 \cdot T_o \quad (38)$$

$$T_2 = T_o + 15 \quad (39)$$

On:

T_o : temperatura màxima d'operació normal del procés [°C].

T_1 : temperatura de disseny [°C].

T_2 : temperatura de disseny [°C].

4. Elecció del tipus de junta

L'elecció del tipus de junta s'ha realitzat a partir de la norma UW-12 de la normativa ASME de la secció VIII-Divisió 1. La junta escollida és del tipus 1 i té una eficiència de 0.85.

5. Determinació de l'esforç del material

L'esforç del material utilitzat, en aquest cas acer inoxidable, s'ha determinat a partir de la referència bibliogràfica [11].

6. Determinació del gruix de la paret de la columna

Per calcular el gruix de la part de la part cilíndrica de la columna, s'ha utilitzat l'equació 40. A la **Figura 22**, es pot observar la guia que s'ha seguit per determinar el disseny del gruix de la paret.

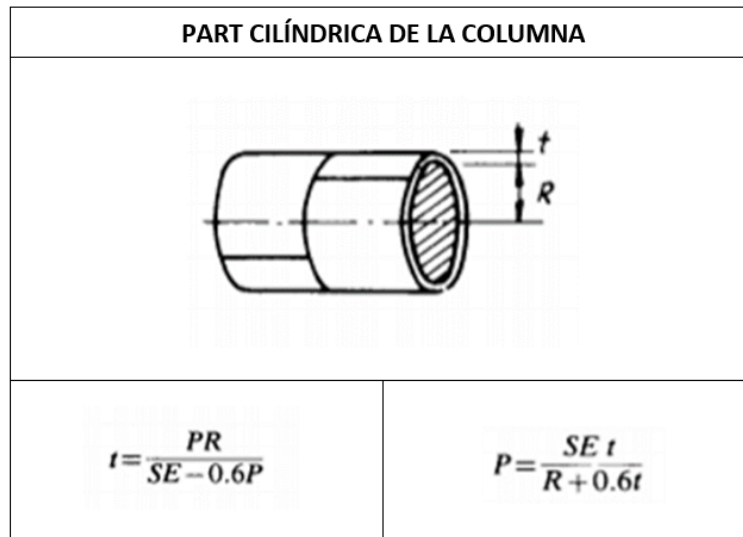


Figura 22: Guia utilitzada en el càlcul del gruix de la part cilíndrica de la columna [10].

Per tant, l'equació utilitzada ha estat l'equació 40.

$$t_c = \frac{P \cdot r_i}{E_s \cdot E - 0.6 \cdot P} + CA \quad (40)$$

On:

t_c : gruix de la paret de la columna [m].

P: pressió de disseny [Pa].

r_i : radi interior de la columna [m].

E_s : esforç tallant de l'acer inoxidable [Pa].

E: eficiència de la junta.

CA: marge de corrosió [m].

7. Determinació de les dimensions del capçal

A continuació, es procedeix a escollir i dissenyar els capçals de la columna. S'ha escollit que els capçals de la columna tinguin una forma toriesfèrica. Per dissenyar-los s'han seguit les equacions establertes a la **Figura 23**.

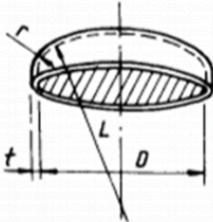
CAPÇAL ASME TORIESFERIC	
	
Quan: $L/r = 16 \frac{2}{3}$	
$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$
Quan: $L/r = \text{menor de } 16 \frac{2}{3}$	
$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$

Figura 23: Guia pel disseny d'un capçal toriesfèric [10].

A l'equació 41, es determina la relació entre el radi intern del capçal i el radi interior de curvatures.

$$\frac{L}{r} \tag{41}$$

On:

L: radi intern del capçal [m].

r: radi interior de les curvatures [m] (10% L).

Al determinar el valor de L/r es pot determinar el factor M, a partir de la taula representada a la Figura 24.

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	16.5	*
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	
* LA MAXIMA RAZON PERMITIDA ES: $L = D + 2t$ (véase la nota 2 de la página opuesta)																	

Figura 24: Taula per a la determinació del factor M [10].

A partir d'aquest valor, s'ha utilitzat l'equació 42 per a calcular el gruix de la part cilíndrica de la columna.

$$t_p = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot E_s \cdot E - 0.2 \cdot P} \quad (42)$$

On:

t_p : gruix de la paret del capçal [m].

P: pressió de disseny [Pa].

L: radi intern del capçal [m].

M: factor M.

E_s : esforç tallant de l'acer inoxidable [Pa].

E: eficiència de la junta.

8. Determinació dels diàmetres exteriors

Al determinar els principals aspectes del disseny de la columna, es calculen els diàmetres exteriors a partir de les equacions 43, 44 i 45.

$$L_e = L + 2 \cdot t_p \quad (43)$$

$$r_e = r + 2 \cdot t_p \quad (44)$$

$$D_e = D_o + 2 \cdot t_c \quad (45)$$

On:

L_e : radi exterior del capçal [m].

L: radi intern del capçal [m].

t_p : gruix de la paret del capçal [m].

r_e : radi exterior de curvatures [m].

r: radi intern de les curvatures [m].

D_e : diàmetre exterior de la columna [m].

D_o : diàmetre intern de la columna [m].

t_c : gruix de la paret del capçal [m].

9. Determinació de l'alçada dels capçals

Per a determinar l'alçada dels capçals, s'ha utilitzat una nova nomenclatura establerta a la **Figura 25**.

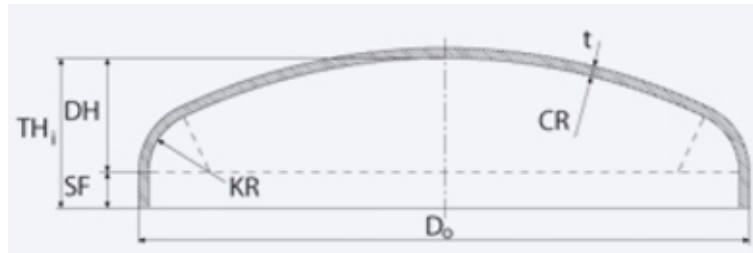


Figura 25: Estructura referent al Tipus A [10].

Per a determinar l'alçada dels capçals, primer s'ha de determinar les distàncies SF i DH a partir de les equacions 46 i 47.

$$DH = 0.1935 \cdot D_o - 0.455 \cdot t_p \quad (46)$$

$$SF = 3.5 \cdot t_p \quad (47)$$

Per tant, el valor de l'alçada del capçal es calcularà a partir de la suma dels valors calculats DH i SF, veure l'equació 48.

$$TH = DH + SF \quad (48)$$

On:

TH: alçada total del capçal [m].

D_o : diàmetre intern de la columna [m].

t_p : gruix de la paret del capçal [m].

10. Determinació de l'alçada total de la columna

L'alçada de la columna total, es calcula a partir de l'equació 49.

$$h_t = h_c + 2 \cdot TH \quad (49)$$

On:

h_t : alçada total de la columna [m].

h_c : alçada de la part cilíndrica de la columna [m].

TH: Alçada total del capçal [m].

11. Determinació del pes de la columna buida

La columna es divideix en tres parts: els capçals i la part cilíndrica que conforma el cos de la columna. Per a calcular el pes de la columna buida cal determinar el volum de les parts d'aquesta. A continuació es troben les equacions per a determinar els volums del capçal (veure l'equació 50), i de la part cilíndrica de la columna (veure l'equació 51):

$$V_p = 0.1 \cdot (L_e^3 - L^3) + 0.1 \cdot (r_e^3 - r^3) + \frac{\pi \cdot SF}{4} \cdot (L_e^2 - L^2) \quad (50)$$

$$V_c = \frac{\pi \cdot h_c}{4} \cdot (D_e^2 - D_o^2) \quad (51)$$

Obtinguts aquests dos volums, es calcula el volum de la paret de la columna, veure l'equació 52:

$$V_e = V_c + 2 \cdot V_p \quad (52)$$

Després de determinar aquests volums, el pes de la columna buida es calcula a partir de l'equació 53. En aquesta equació, s'ha de tindre en compte la densitat del acer inoxidable SS 316L.

$$Mb = 1.1 \cdot V_e \cdot \rho_s \quad (53)$$

On:

V_p : volum dels capçals de la columna [m³].

L_e : radi extern del capçal [m].

L : Radi del capçal [m].

r_e : radi extern de la curvatura dels capçals [m].

r : radi extern de la curvatura dels capçals [m].

SF : distància fins la curvatura del capçal [m].

V_c : volum de la part cilíndrica de la columna [m³].

h_c : alçada de la part cilíndrica de la columna [m³].

D_e : diàmetre extern de la columna [m³].

D_o : diàmetre intern de la columna [m³].

V_e : volum de la paret de la columna [m³].

M_b : pes de la columna buida [kg].

ρ_s : densitat de l'acer inoxidable [kg/m³].

12. Determinació del pes de la columna plena d'aigua

Per a la determinació del pes de la columna plena d'aigua, s'han de tindre en compte els volums interns de la columna (veure l'equació 54), i el pes d'aquesta quan està buida (veure l'equació 55).

$$VI_p = 0.1 \cdot L^3 + 0.1 \cdot r^3 + \frac{\pi \cdot SF}{4} \cdot L^2 \quad (54)$$

$$VI_c = \frac{\pi \cdot h_c}{4} \cdot D_o^2 \quad (55)$$

El volum intern total de la columna, es calcula a partir de la suma dels valors interns, veure l'equació 56.

$$VI_t = VI_c + 2 \cdot VI_p \quad (56)$$

Amb el valor del volum intern de la columna, el valor de la densitat de l'aigua i la massa de rebliment que hi ha en aquesta es pot calcular el pes de la columna plena, tal i com s'expressa a l'equació 57.

$$Mp = Mb + Mr + 1.1 \cdot VI_t \cdot \rho_a \quad (57)$$

La massa de rebliment s'ha determinat a partir de la següent equació, veure l'equació 58:

$$Mr = (VI_c \cdot (1 - F_b)) \cdot \rho_r \quad (58)$$

On:

VI_p : volum intern dels capçals de la columna [m^3].

L : radi del capçal [m].

r : radi extern de la curvatura dels capçals [m].

SF : distància fins la curvatura del capçal [m].

VI_c : volum intern de la columna [m^3].

h_c : alçada de la part cilíndrica de la columna [m].

D_o : diàmetre intern de la columna [m].

VI_t : volum intern total de la columna [m^3].

Mp : pes de la columna plena [kg].

Mb : pes de la columna buida [kg].

Mr : pes del rebliment [kg].

ρ_a : densitat de l'aigua [kg/m^3].

ρ_r : densitat del rebliment [kg/m^3].

F_b : fracció de buit a la columna.

13. Determinació de l'aïllament

Per últim, es necessari calcular el volum total de l'aïllant, ja que al afegir aïllant a la columna es pot conservar la temperatura de treball sense que hi puguin afectar els canvis de temperatura a l'ambient. A més a més, d'aquesta manera es poden evitar possibles consums d'energia innecessaris.

Com aïllant s'utilitzarà llana mineral com el que s'utilitza per aïllar les canonades del procés. L'equació 59 és la utilitzada per determinar l'espessor mínim de l'aïllant.

$$d_a = \frac{D_e}{2} \cdot \left[\exp \frac{\lambda}{\lambda_r} \cdot \ln \frac{D_e + 2 \cdot d_r}{D_e} - 1 \right] \quad (59)$$

Per poder determinar el volum del capçal aïllat i el volum de la part cilíndrica de la columna, s'han utilitzat les equacions 60 i 61, respectivament.

$$VA_p = 0.1 \cdot ((L_e + d_c)^3 - L_e^3) + 0.1 \cdot ((r_e + d_c)^3 - r_e^3) + \frac{\pi \cdot SF}{4} \cdot (2 \cdot d_c \cdot D_e + d_c^2) \quad (60)$$

$$VA_c = \frac{\pi \cdot h_c}{4} \cdot (2 \cdot d_c \cdot D_e + d_c^2) \quad (61)$$

Per tant, el volum total de l'aïllant és calcula amb l'equació 62:

$$VA_t = VA_c + 2 \cdot VA_p \quad (62)$$

On:

d_a : espessor mínim de l'aïllant [m].

D_e : diàmetre extern de la columna [m].

λ : conductivitat tèrmica de l'aïllant [W/m°C].

λ_r : conductivitat tèrmica de referència de l'aïllant [W/m°C].

d_r : espessor mínim de referència [m].

VA_p : volum del capçal aïllant [m³].

L_e : radi exterior del capçal [m].

d_e : espessor escollit (sobredimensionat) [m].

r_e : radi exterior curvatures [m].

SF: distància fins la curvatura del capçal [m].

VA_c : volum part cilíndrica de la columna [m³].

h_c : alçada part cilíndrica de la columna.

VA_t : volum de l'aïllant total [m³].

2.2.1 Columna d'absorció de l'òxid d'etilè (AC-201-2)

En aquest apartat es troben recollides les dades obtingudes a partir dels disseny rigorós i mecànic de la columna AC-201-2. Aquestes dades es troben en el full d'especificacions de l'equip per a facilitar el seu posterior disseny. A les **Taules 9 i 10** s'observa les dades bibliogràfiques i les obtingudes a partir del programa informàtic Aspen HYSYS.

Taula 9: Dades obtingudes bibliogràficament.

Eficiència (junta de tipus 1)	E	0.85
Esforç tallant (acer inoxidable) [Pa]	E_t	483000000
Marge de corrosió [m]	CA	0.002
Densitat acer inoxidable 316 L [Kg/m ³]	ρ_s	8000
Densitat aigua [Kg/m ³]	ρ_a	1000
Fracció de buit a la columna [%]	F_b	0.96
Densitat del rebliment (25mm) [Kg/m ³]	ρ_r	310
Conductivitat tèrmica de l'aïllant [W/m°C]	λ	0.05
Conductivitat tèrmica de referència [W/m°C]	ρ_r	0.04
Espessor mínim de referència [mm]	d_r	50
Espessor mínim de referència [m]	d_r	0.05

Taula 10: Dades obtingudes a partir de la simulació en HYSYS.

Pressió màxima d'operació normal del procés [kPa]	P_o	1500
Temperatura màxima d'operació normal del procés [°C]	T_o	43
Alçada de la part cilíndrica de la columna [m]	h_c	11
Diàmetre intern de la columna [m]	D_o	4

Taula 11: Dades calculades a partir de la normativa ASME (Part I).

1. Elecció material		
Acer inoxidable 316L		
2. Càlcul de la pressió de disseny		
Pressió mínima [kPa]	P_1	1650
Pressió màxima [kPa]	P_2	1696
Pressió de disseny [kPa]	P	1696
3. Càlcul temperatura de disseny		
Temperatura mínima [°C]	T_1	48
Temperatura màxima [°C]	T_2	58
Temperatura de disseny [°C]	T	58
4. Elecció del tipus de junta:		
Eficiència (junta tipus 1)	E	0.85
5. Determinació de l'esforç del material:		
Esforç tallant (acer inoxidable) [Pa]	E_s	$4.83 \cdot 10^8$
6. Determinació del gruix de la paret de la columna:		
Radi interior de la columna [m]	r_i	2
Gruix de la paret [m]	t_c	0.01
Gruix de la paret columna [mm]	t_c	10.28
7. Determinació de les dimensions del capçal:		
Radi intern del capçal [m]	L / CR	4
Radi interior de les curvatures [m]	r / KR	0.4
L/r	L/r	10
Determinació del factor "M"	M	1.54
Gruix de la paret del capçal [m]	t_p	0.01
Gruix de la paret del capçal [mm]	t_p	12.73
8. Determinació dels diàmetres exteriors:		
Radi exterior del capçal [m]	L_e	4.0
Radi exterior curvatures [m]	r_e	0.4
Diàmetre exterior columna [m]	D_e	4.0
9. Determinació de l'alçada dels capçals:		
DH [m]	DH	0.8
SF [m]	SF	0.05
Alçada dels capçals [m]	TH	0.8
10. Determinació de l'alçada de la columna:		
Alçada de la columna [m]	h_t	12.6

Taula 12: Dades calculades a partir de la normativa ASME (Part II).

11. Determinació del pes de la columna buida:		
Volum dels capçals de la columna [m ³]	V _p	0.1
Volum de la part cilíndrica de la columna [m ³]	V _c	1.6
Volum de la paret de la columna [m ³]	V _e	1.9
Pes de la columna buida [Kg]	M _b	16683
12. Determinació del pes de la columna plena d'aigua:		
Massa de rebliment [Kg]	M _r	1907
Volum intern dels capçals de la columna [m ³]	VI _p	7.1
Volum intern de la part cilíndrica de la columna [m ³]	VI _c	139.7
Volum intern de la columna [m ³]	VI _t	153.8
Pes de la columna plena d'aigua [Kg]	M _p	187768
13. Determinació del aïllament:		
Espessor mínim de l'aïllant [m]	d _a	0.1
Espessor mínim de l'aïllant [mm]	d _a	62.69
Espessor escollit (sobredimensionat) [m]	d _e	0.1
Volum capçal aïllat [m ³]	VA _p	0.4
Volum part cilíndrica de la columna [m ³]	VA _c	4.4
Volum de l'aïllant total [m ³]	VA _t	5.1

2.2.2 Columna d'absorció de CO₂

En aquest apartat es troben recollides les dades obtingudes a partir dels disseny rigorós i mecànic de la columna AC-201-4, (veure **Taula 13**). Aquestes dades es troben en el full d'especificacions de l'equip per a facilitar el seu posterior disseny.

Taula 13: Dades obtingudes a partir de la simulació en HYSYS.

Pressió màxima d'operació normal del procés [kPa]	P _o	5000
Temperatura màxima d'operació normal del procés [°C]	T _o	53
Alçada de la part cilíndrica de la columna [m]	h _c	10
Diàmetre intern de la columna [m]	D _o	3

Taula 14: Dades calculades a partir de la normativa ASME (Part I).

1. Elecció material		
Acer inoxidable 316L		
2. Càlcul de la pressió de disseny		
Pressió màxima [kPa]	P_1	5500
Pressió mínima [kPa]	P_2	5196
Pressió de disseny [kPa]	P	5500
3. Càlcul temperatura de disseny		
Temperatura mínima [°C]	T_1	58
Temperatura màxima [°C]	T_2	68
Temperatura de disseny [°C]	T	68
4. Elecció del tipus de junta:		
Eficiència (junta tipus 1)	E	0.85
5. Determinació de l'esforç del material:		
Esforç tallant (acer inoxidable) [Pa]	E_s	$4.83 \cdot 10^8$
6. Determinació del gruix de la paret de la columna:		
Radi interior de la columna [m]	r_i	1.75
Gruix de la paret [m]	t_c	0.03
Gruix de la paret columna [mm]	t_c	25.63
7. Determinació de les dimensions del capçal:		
Radi intern del capçal [m]	L / CR	3
Radi interior de les curvatures [m]	r / KR	0.3
L/r	L/r	10
Determinació del factor "M"	M	1.54
Gruix de la paret del capçal [m]	t_p	0.03
Gruix de la paret del capçal [mm]	t_p	30.99
8. Determinació dels diàmetres exteriors:		
Radi exterior del capçal [m]	L_e	3.1
Radi exterior curvatures [m]	r_e	0.4
Diàmetre exterior columna [m]	D_e	3.1
9. Determinació de l'alçada dels capçals:		
DH [m]	DH	0.6
SF [m]	SF	0.1
Alçada dels capçals [m]	TH	0.7
10. Determinació de l'alçada de la columna:		
Alçada de la columna [m]	h_t	11.3

Taula 15: Dades calculades a partir de la normativa ASME (Part II).

11. Determinació del pes de la columna buida:		
Volum dels capçals de la columna [m ³]	V _p	0.2
Volum de la part cilíndrica de la columna [m ³]	V _c	2.8
Volum de la paret de la columna [m ³]	V _e	3.2
Pes de la columna buida [Kg]	M _b	27844
12. Determinació del pes de la columna plena d'aigua:		
Massa de rebliment [Kg]	M _r	997
Volum intern dels capçals de la columna [m ³]	VI _p	3.6
Volum intern de la part cilíndrica de la columna [m ³]	VI _c	73.1
Volum intern de la columna [m ³]	VI _t	80.4
Pes de la columna plena d'aigua [Kg]	M _p	117276
13. Determinació del aïllament:		
Espessor mínim de l'aïllant [m]	d _a	0.1
Espessor mínim de l'aïllant [mm]	d _a	62.75
Espessor escollit (sobredimensionat) [m]	d _e	0.1
Volum capçal aïllat [m ³]	VA _p	0.3
Volum part cilíndrica de la columna [m ³]	VA _c	3.1
Volum de l'aïllant total [m ³]	VA _t	3.6

3 Columnes de destil·lació

Al procés de producció d'òxid d'etilè d'aquesta planta hi apareixen tres columnes de destil·lació, dos a la zona de purificació i una a la zona d'eliminació del diòxid de carboni. Per realitzar el dimensionament d'aquests equips s'ha emprat l'eina informàtica Aspen HYSYS.

En aquest apartat del manual s'especificarà com es dissenya una de les tres columnes de destil·lació, en concret la DC-201-3, les altres dues segueixen el mateix procediment.

3.1 Disseny rigorós dels paràmetres teòrics de la columna

Per al correcte disseny de les columnes, primer s'han de definir els corrents d'entrada i sortida que hi haurà a l'equip que es vol dissenyar, aquests es poden veure a la **Figura 26**.

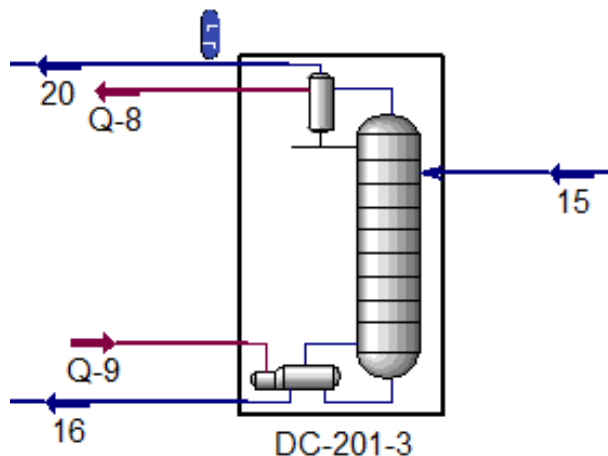


Figura 26: Corrents d'entrada i sortida a la columna de destil·lació (DC-201-3).

A les **Figures 27 i 28** s'observen les composicions molars de cadascun dels corrents que apareixen a la **Figura 26** i el cabal molar expressat en [kmol/h].

Feeds	
	15
Flow Rate (kgmole/h)	3,046057e+04
H2O	0,9878
C2Oxide	0,0120
Ethylene	0,0000
CO2	0,0000
Oxygen	0,0000
Nitrogen	0,0001

Figura 27: Pantalla "Parameters" del programa HYSYS. Composició corrents. (DC-201-3).

Products		
	20	16
Flow Rate (kgmole/h)	371,5035	3,008907e+04
H2O	0,0020	1,0000
C2Oxide	0,9831	0,0000
Ethylene	0,0018	0,0000
CO2	0,0040	0,0000
Oxygen	0,0010	0,0000
Nitrogen	0,0081	0,0000

Figura 28: Pantalla "Parameters" del programa HYSYS. Composició corrents. (DC-201-3).

El següent pas consisteix en introduir els corrents, tant de matèria com d'energia, al mateix equip mitjançant l'eina "Design" que ofereix el programa. També s'haurà de seleccionar el tipus d'operació que realitza el condensador de la columna de destil·lació. En aquest cas opera en *full reflux*, el que implica que tot el producte que s'extreu és en forma gasosa i tot el líquid és recirculat dins la columna, per així obtenir una major puresa en el producte. A la **Figura 29** s'observa tot l'esmentat, també es pot veure la pressió d'operació (101.3 kPa), l'etapa d'introducció de l'aliment i el nombre d'etapes de la columna (10) tot i que se l'hi haurà de sumar el condensador i el *reboiler* fent un total de 12 etapes.

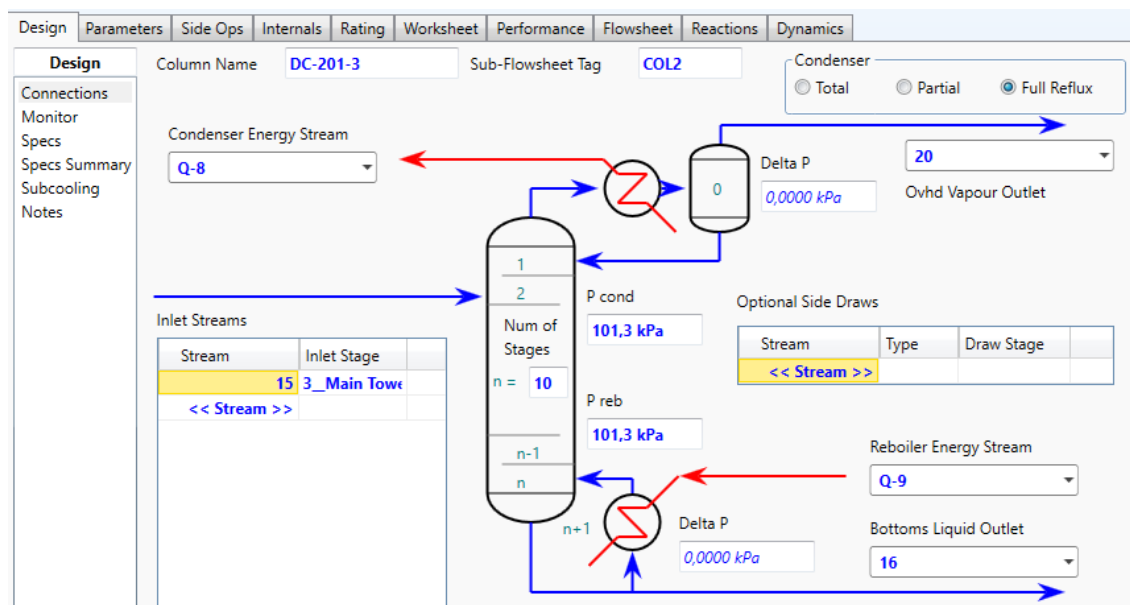


Figura 29: Pantalla "Design" del programa Aspen HYSYS (DC-201-3).

El programa ens permet veure de forma gràfica, l'evolució tant de la temperatura com de la pressió a les diferents etapes de la columna. Aquests gràfics es poden obtenir a la secció de "Parameters" dins del programa i es troben representats a la **Figura 31** i **Figura 30**.

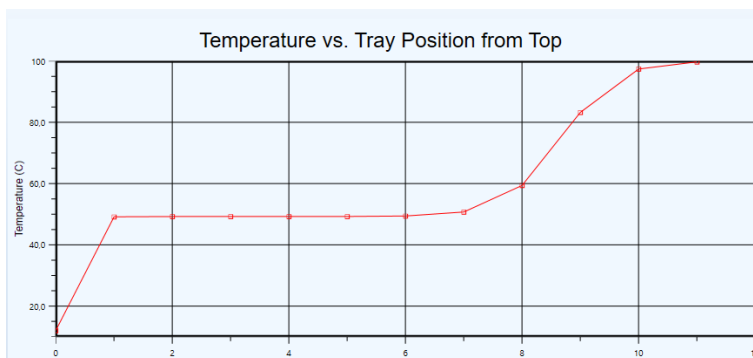


Figura 30: Representació de la temperatura [°C] en les diferents etapes de la columna (DC-201-3).

S'observa com la temperatura va disminuint a mesura que el vapor provinent del *reboiler* avança per la columna en sentit ascendent, és a dir, des del plat més inferior (número 10) fins al superior. Això és lògic per què el vapor intercanvia energia amb l'altre fluid que és menys calent i que circula en sentit contrari.

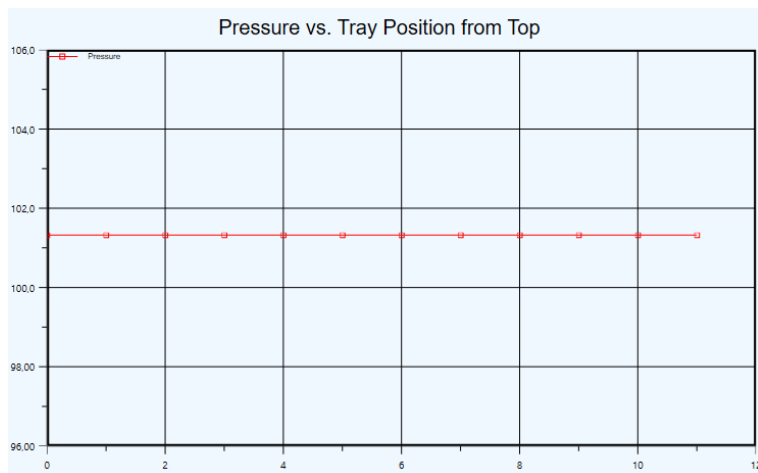


Figura 31: Representació de la pressió [kPa] (DC-201-3).

La pressió és constant, mantenint-se en el valor de 101.3 kPa en tot el llarg de la columna.

El programa també aporta altres dades d'interès com el cabal de líquid i de vapor que hi ha a cadascun dels plats, tal i com s'observa a la **Figura 32**.

Steady State Profiles					
		Optional Estimates			
	Stage	Pressure [kPa]	Temp [C]	Net Liquid [kgmole/h]	Net Vapour [kgmole/h]
Condenser	0	101,3	11,74	743,0	371,5
1_Main Tower	1	101,3	46,51	3,156e+004	1114
2_Main Tower	2	101,3	46,57	3,156e+004	1467
3_Main Tower	3	101,3	46,57	3,156e+004	1473
4_Main Tower	4	101,3	46,57	3,156e+004	1473
5_Main Tower	5	101,3	46,59	3,156e+004	1474
6_Main Tower	6	101,3	46,74	3,157e+004	1474
7_Main Tower	7	101,3	48,04	3,160e+004	1477
8_Main Tower	8	101,3	57,20	3,192e+004	1507
9_Main Tower	9	101,3	82,80	3,314e+004	1828
10_Main Tower	10	101,3	97,49	3,395e+004	3053
Reboiler	11	101,3	99,76	3,009e+004	3864

Figura 32: Pantalla completa de "Parameters" amb els cabals de líquid/vapor (DC-201-3).

Per finalitzar amb el disseny, es determina els “internals” de la columna, això és pot veure a la **Figura 33**, aquí es definirà el tipus de rebliment, el material i el diàmetre d'aquest, etc. També es defineix l'alçada de l'empacat que condicionarà l'alçada i el diàmetre de la columna. Un cop es defineixen aquests paràmetres es podrà comprovar la hidràulica de la columna. Per aquesta columna, s'opta per un empacat de tipus “PALL”, de metall, amb una dimensió de 25 mm i amb una secció empacada de 9 metres. El diàmetre de la columna és de 3 metres, per tant, la relació alçada/diàmetre es troba dins del reglament, ja que és major de 3.


Section	Start Stage	End Stage	Mode	Internal Type	Tray/Packing Type	Number of Passes	Packing Vendor	Packing Material	Packing Dimension	Tray Spacing / Section Packed Height [m]	Diameter [m]	Details
CS-1	1_Main Tower	10_Main Tow	Interactive Sizing	Packed	PALL		GENERIC	METAL	1-IN OR 25-MM	9,000	3,000	View 

Figura 33: Pantalla “Internals” del programa HYSYS (DC-201-3).

Amb la **Figura 34** es comprova que la hidràulica és bona i possible, que no hi hagi cap problema a cap etapa, si es mira el gràfic que aporta la pròpia **Figura 34** es pot veure que el “operating point” es troba dins de la zona desitjable. Amb això es pot donar el disseny de la columna com a correcte.

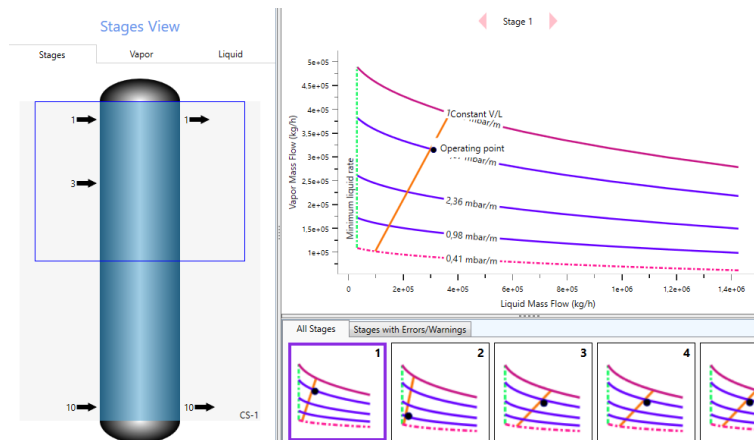


Figura 34: Pantalla “View hydraulic plots” del programa HYSYS (DC-201-3).

3.2 Disseny mecànic de l'equip

En aquest apartat es presenten els resultats del disseny mecànic per a totes tres columnes de destil·lació. El procediment que es segueix és el mateix que es realitza per a les torres d'absorció, tal i com s'explica a l'apartat del disseny mecànic de l'equip.

3.2.1 Columna de destil·lació (DC-201-3)

A continuació, a les **Taules 16, 17, 18, 19** es mostren els resultats dels càlculs per la columna DC-201-3.

Taula 16: Dades obtingudes bibliogràficament.

Eficiència (junta de tipus 1)	E	0.85
Esforç tallant (acer inoxidable) [Pa]	E_t	483000000
Marge de corrosió [m]	CA	0.002
Densitat acer inoxidable 316 L [Kg/m ³]	ρ_s	8000
Densitat aigua [Kg/m ³]	ρ_a	1000
Fracció de buit a la columna [%]	F_b	0.96
Densitat del rebliment (25mm) [Kg/m ³]	ρ_r	310
Conductivitat tèrmica de l'aïllant [W/m°C]	λ	0.05
Conductivitat tèrmica de referència [W/m°C]	ρ_r	0.04
Espessor mínim de referència [mm]	d_r	50
Espessor mínim de referència [m]	d_r	0.05

Taula 17: Dades obtingudes a partir de la simulació al HYSYS.

Pressió màxima d'operació normal del procés [kPa]	P_o	101.3
Temperatura màxima d'operació normal del procés [°C]	T_o	100
Alçada de la part cilíndrica de la columna [m]	h_c	9
Diàmetre intern de la columna [m]	D_o	3

Taula 18: Dades calculades a partir de la normativa ASME (Part I).

1. Elecció material		
Acer inoxidable 316L		
2. Càlcul de la pressió de disseny		
Pressió mínima [kPa]	P_1	111.43
Pressió màxima [kPa]	P_2	297.43
Pressió de disseny [kPa]	P	297.43
3. Càlcul temperatura de disseny		
Temperatura mínima [°C]	T_1	110
Temperatura màxima [°C]	T_2	115
Temperatura de disseny [°C]	T	115
4. Elecció del tipus de junta:		
Eficiència (junta tipus 1)	E	0.85
5. Determinació de l'esforç del material:		
Esforç tallant (acer inoxidable) [Pa]	E_s	$4.83 \cdot 10^8$
6. Determinació del gruix de la paret de la columna:		
Radi interior de la columna [m]	r_i	1.5
Gruix de la paret [m]	t_c	0.003
Gruix de la paret columna [mm]	t_c	3.09
7. Determinació de les dimensions del capçal:		
Radi intern del capçal [m]	L / CR	3
Radi interior de les curvatures [m]	r / KR	0.3
L/r	L/r	10
Determinació del factor "M"	M	1.54
Gruix de la paret del capçal [m]	t_p	0.0017
Gruix de la paret del capçal [mm]	t_p	1.7
8. Determinació dels diàmetres exteriors:		
Radi exterior del capçal [m]	L_e	3.003
Radi exterior curvatures [m]	r_e	0.303
Diàmetre exterior columna [m]	D_e	3.006
9. Determinació de l'alçada dels capçals:		
DH [m]	DH	0.58
SF [m]	SF	0.0059
Alçada dels capçals [m]	TH	0.59
10. Determinació de l'alçada de la columna:		
Alçada de la columna [m]	h_t	10.17

Taula 19: Dades calculades a partir de la normativa ASME (Part II).

11. Determinació del pes de la columna buida:		
Volum dels capçals de la columna [m ³]	V _p	0.0093
Volum de la part cilíndrica de la columna [m ³]	V _c	0.30
Volum de la paret de la columna [m ³]	V _e	0.31
Pes de la columna buida [Kg]	M _b	2771
12. Determinació del pes de la columna plena d'aigua:		
Massa de rebliment [Kg]	M _r	788.85
Volum intern dels capçals de la columna [m ³]	VI _p	2.74
Volum intern de la part cilíndrica de la columna [m ³]	VI _c	63.6
Volum intern de la columna [m ³]	VI _t	69,1
Pes de la columna plena d'aigua [Kg]	M _p	79576
13. Determinació del aïllament:		
Espessor mínim de l'aïllant [m]	d _a	0.0628
Espessor mínim de l'aïllant [mm]	d _a	62.8
Espessor escollit (sobredimensionat) [m]	d _e	0.064
Volum capçal aïllat [m ³]	VA _p	0.18
Volum part cilíndrica de la columna [m ³]	VA _c	2.78
Volum de l'aïllant total [m ³]	VA _t	3.1

3.2.2 Columna de destil·lació (DC-202-3)

A continuació, a les **Taules 20, 21, 22, 23** es mostren els resultats dels càlculs per la columna DC-202-3.

Taula 20: Dades obtingudes bibliogràficament.

Eficiència (junta de tipus 1)	E	0.85
Esforç tallant (acer inoxidable) [Pa]	E _t	483000000
Marge de corrosió [m]	CA	0.002
Densitat acer inoxidable 316 L [Kg/m ³]	ρ _s	8000
Densitat aigua [Kg/m ³]	ρ _a	1000
Fracció de buit a la columna [%]	F _b	0.96
Densitat del rebliment (25mm) [Kg/m ³]	ρ _r	310
Conductivitat tèrmica de l'aïllant [W/m°C]	λ	0.05
Conductivitat tèrmica de referència [W/m°C]	ρ _r	0.04
Espessor mínim de referència [mm]	d _r	50
Espessor mínim de referència [m]	d _r	0.05

Taula 21: Dades obtingudes a partir de la simulació al HYSYS.

Pressió màxima d'operació normal del procés [kPa]	P_o	101.3
Temperatura màxima d'operació normal del procés [°C]	T_o	10
Alçada de la part cilíndrica de la columna [m]	h_c	4.5
Diàmetre intern de la columna [m]	D_o	1.5

Taula 22: Dades calculades a partir de la normativa ASME (Part I).

1. Elecció material		
Acer inoxidable 316L		
2. Càlcul de la pressió de disseny		
Pressió mínima [kPa]	P_1	111.4
Pressió màxima [kPa]	P_2	297.4
Pressió de disseny [kPa]	P	1696
3. Càlcul temperatura de disseny		
Temperatura mínima [°C]	T_1	12
Temperatura màxima [°C]	T_2	25
Temperatura de disseny [°C]	T	25
4. Elecció del tipus de junta:		
Eficiència (junta tipus 1)	E	0.85
5. Determinació de l'esforç del material:		
Esforç tallant (acer inoxidable) [Pa]	E_s	$4.83 \cdot 10^8$
6. Determinació del gruix de la paret de la columna:		
Radi interior de la columna [m]	r_i	0.75
Gruix de la paret [m]	t_c	0.0025
Gruix de la paret columna [mm]	t_c	2.5
7. Determinació de les dimensions del capçal:		
Radi intern del capçal [m]	L / CR	1.5
Radi interior de les curvatures [m]	r / KR	0.15
L/r	L/r	10
Determinació del factor "M"	M	1.54
Gruix de la paret del capçal [m]	t_p	0.00083
Gruix de la paret del capçal [mm]	t_p	0.83
8. Determinació dels diàmetres exteriors:		
Radi exterior del capçal [m]	L_e	1.5
Radi exterior curvatures [m]	r_e	0.15
Diàmetre exterior columna [m]	D_e	1.5
9. Determinació de l'alçada dels capçals:		
DH [m]	DH	0.29
SF [m]	SF	0.0029
Alçada dels capçals [m]	TH	0.29
10. Determinació de l'alçada de la columna:		
Alçada de la columna [m]	h_t	5.09

Taula 23: Dades calculades a partir de la normativa ASME (Part II).

11. Determinació del pes de la columna buida:		
Volum dels capçals de la columna [m ³]	V _p	0.0011
Volum de la part cilíndrica de la columna [m ³]	V _c	0.061
Volum de la paret de la columna [m ³]	V _e	0.063
Pes de la columna buida [Kg]	M _b	558
12. Determinació del pes de la columna plena d'aigua:		
Massa de rebliment [Kg]	M _r	98.83
Volum intern dels capçals de la columna [m ³]	VI _p	0.34
Volum intern de la part cilíndrica de la columna [m ³]	VI _c	7.97
Volum intern de la columna [m ³]	VI _t	8.66
Pes de la columna plena d'aigua [Kg]	M _p	10181
13. Determinació del aïllament:		
Espessor mínim de l'aïllant [m]	d _a	0.063
Espessor mínim de l'aïllant [mm]	d _a	63
Espessor escollit (sobredimensionat) [m]	d _e	0.064
Volum capçal aïllat [m ³]	VA _p	0.048
Volum part cilíndrica de la columna [m ³]	VA _c	0.69
Volum de l'aïllant total [m ³]	VA _t	0.79

3.2.3 Columna de destil·lació (DC-201-4)

A continuació, a les **Taules 24, 25, 26, 27** es mostren els resultats dels càlculs per la columna DC-201-4.

Taula 24: Dades obtingudes bibliogràficament.

Eficiència (junta de tipus 1)	E	0.85
Esforç tallant (acer inoxidable) [Pa]	E _t	483000000
Marge de corrosió [m]	CA	0.002
Densitat acer inoxidable 316 L [Kg/m ³]	ρ _s	8000
Densitat aigua [Kg/m ³]	ρ _a	1000
Fracció de buit a la columna [%]	F _b	0.96
Densitat del rebliment (25mm) [Kg/m ³]	ρ _r	310
Conductivitat tèrmica de l'aïllant [W/m°C]	λ	0.05
Conductivitat tèrmica de referència [W/m°C]	ρ _r	0.04
Espessor mínim de referència [mm]	d _r	50
Espessor mínim de referència [m]	d _r	0.05

Taula 25: Dades obtingudes a partir de la simulació al HYSYS.

Pressió màxima d'operació normal del procés [kPa]	P_o	110
Temperatura màxima d'operació normal del procés [°C]	T_o	104.3
Alçada de la part cilíndrica de la columna [m]	h_c	5.5
Diàmetre intern de la columna [m]	D_o	2

Taula 26: Dades calculades a partir de la normativa ASME (Part I).

1. Elecció material		
Acer inoxidable 316L		
2. Càlcul de la pressió de disseny		
Pressió mínima [kPa]	P_1	121
Pressió màxima [kPa]	P_2	306.13
Pressió de disseny [kPa]	P	1696
3. Càlcul temperatura de disseny		
Temperatura mínima [°C]	T_1	114.7
Temperatura màxima [°C]	T_2	119.3
Temperatura de disseny [°C]	T	119.3
4. Elecció del tipus de junta:		
Eficiència (junta tipus 1)	E	0.85
5. Determinació de l'esforç del material:		
Esforç tallant (acer inoxidable) [Pa]	E_s	$4.83 \cdot 10^8$
6. Determinació del gruix de la paret de la columna:		
Radi interior de la columna [m]	r_i	1
Gruix de la paret [m]	t_c	0.0027
Gruix de la paret columna [mm]	t_c	2.7
7. Determinació de les dimensions del capçal:		
Radi intern del capçal [m]	L / CR	2
Radi interior de les curvatures [m]	r / KR	0.2
L/r	L/r	10
Determinació del factor "M"	M	1.54
Gruix de la paret del capçal [m]	t_p	0.00115
Gruix de la paret del capçal [mm]	t_p	1.15
8. Determinació dels diàmetres exteriors:		
Radi exterior del capçal [m]	L_e	2.002
Radi exterior curvatures [m]	r_e	0.202
Diàmetre exterior columna [m]	D_e	2.005
9. Determinació de l'alçada dels capçals:		
DH [m]	DH	0.39
SF [m]	SF	0.004
Alçada dels capçals [m]	TH	0.39
10. Determinació de l'alçada de la columna:		
Alçada de la columna [m]	h_t	6.28

Taula 27: Dades calculades a partir de la normativa ASME (Part II).

11. Determinació del pes de la columna buida:		
Volum dels capçals de la columna [m ³]	V _p	0.0029
Volum de la part cilíndrica de la columna [m ³]	V _c	0.11
Volum de la paret de la columna [m ³]	V _e	0.11
Pes de la columna buida [Kg]	M _b	1005
12. Determinació del pes de la columna plena d'aigua:		
Massa de rebliment [Kg]	M _r	214.3
Volum intern dels capçals de la columna [m ³]	VI _p	0.81
Volum intern de la part cilíndrica de la columna [m ³]	VI _c	17.28
Volum intern de la columna [m ³]	VI _t	18.91
Pes de la columna plena d'aigua [Kg]	M _p	22015
13. Determinació del aïllament:		
Espessor mínim de l'aïllant [m]	d _a	0.063
Espessor mínim de l'aïllant [mm]	d _a	63
Espessor escollit (sobredimensionat) [m]	d _e	0.064
Volum capçal aïllat [m ³]	VA _p	0.084
Volum part cilíndrica de la columna [m ³]	VA _c	1.13
Volum de l'aïllant total [m ³]	VA _t	1.29

4 Columna *flash*

La funció d'una columna *flash* és separar un corrent líquid d'un corrent vapor, que es forma per la diferència de pressió entre el líquid i l'interior del tanc. El disseny de la columna utilitzada a la planta s'ha realitzat amb l'Aspen HYSYS. Aquest programa té les eines necessàries per un disseny econòmic i òptim i segueix el codi ASME (*American Society of Mechanical Engineers*).

Per dissenyar la columna, s'entra a la icona de la columna de la pantalla fent doble clic amb el botó esquerre del ratolí (**Figura 35**).

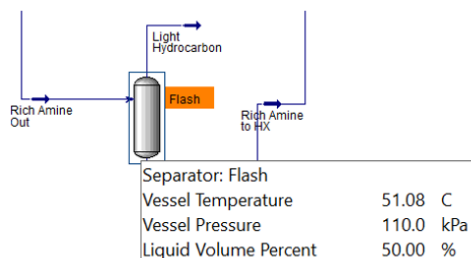


Figura 35: Icona de la columna flash del HYSYS.

Quan s'entra a la columna, s'obre una pantalla amb les diferents característiques d'aquesta, com s'observa a la **Figura 36**. Per dimensionar la columna, s'obre la pestanya "Rating" i s'utilitza la opció de "Quick Size" amb la qual el programa ofereix les dimensions òptimes de la columna. En aquest cas s'han arrodonit manualment les dimensions, que es poden observar a la **Taula 28**.

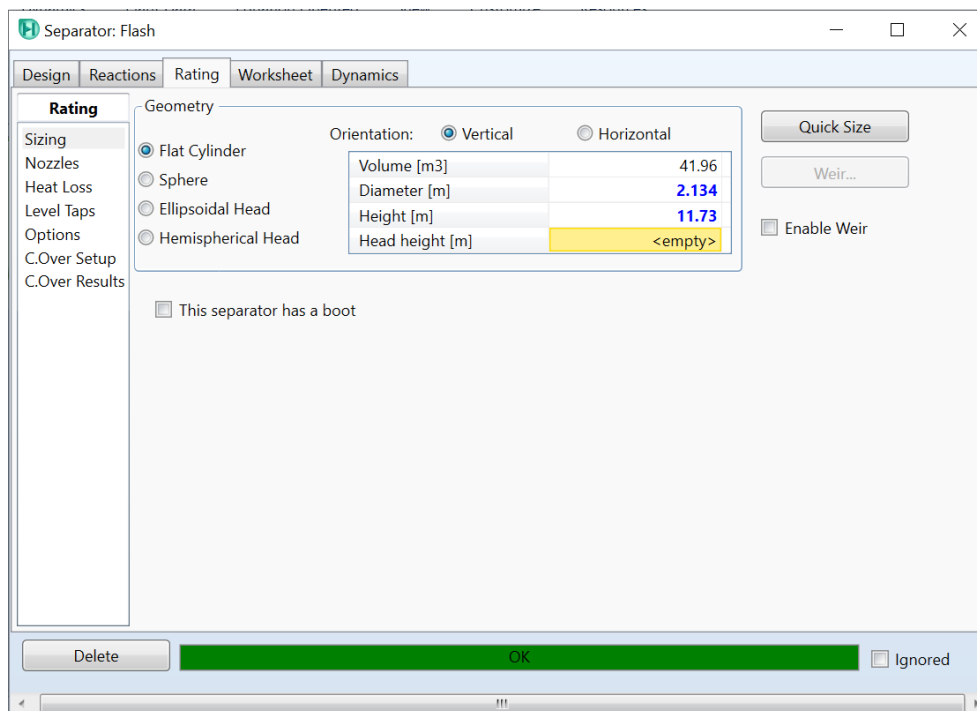


Figura 36: Pantalla de les dimensions de la columna *flash* calculades pel HYSYS.

Taula 28: Dimensions de la columna *flash*.

	HYSYS
Volum (m³)	45.62
Diàmetre (m)	2.20
Alçada (m)	12.00

Amb les dades del HYSYS i amb els mateixos càlculs que s'han realitzat en les columnes d'absorció i destil·lació, s'han definit els paràmetres que es troben a les **Taules 29 i 30** i que també es troben al full d'especificacions de l'equip.

Taula 29: Característiques de la columna *flash* seguint la normativa ASME (Part I).

1. Elecció material		
Acer inoxidable 316L		
2. Càlcul de la pressió de disseny		
Pressió mínima [kPa]	P_1	5086
Pressió màxima [kPa]	P_2	5379
Pressió de disseny [kPa]	P	5379
3. Càlcul temperatura de disseny		
Temperatura mínima [°C]	T_1	48
Temperatura màxima [°C]	T_2	58
Temperatura de disseny [°C]	T	58
4. Elecció del tipus de junta:		
Eficiència (junta tipus 1)	E	0.85
5. Determinació de l'esforç del material:		
Esforç tallant (acer inoxidable) [Pa]	E_s	$4.83 \cdot 10^8$
6. Determinació del gruix de la paret de la columna:		
Radi interior de la columna [m]	r_i	1.08
Gruix de la paret [m]	t_c	0.02
Gruix de la paret columna [mm]	t_c	15.48
7. Determinació de les dimensions del capçal:		
Radi intern del capçal [m]	L / CR	2.16
Radi interior de les curvatures [m]	r / KR	0.216
L/r	L/r	10
Determinació del factor "M"	M	1.54
Gruix de la paret del capçal [m]	t_p	0.02
Gruix de la paret del capçal [mm]	t_p	20.63
8. Determinació dels diàmetres exteriors:		
Radi exterior del capçal [m]	L_e	2.2
Radi exterior curvatures [m]	r_e	0.3
Diàmetre exterior columna [m]	D_e	2.2
9. Determinació de l'alçada dels capçals:		
DH [m]	DH	0.4
SF [m]	SF	0.1
Alçada dels capçals [m]	TH	0.5
10. Determinació de l'alçada de la columna:		
Alçada de la columna [m]	h_t	12.0

Taula 30: Característiques de la columna flash seguint la normativa ASME (Part II).

11. Determinació del pes de la columna buida:		
Volum dels capçals de la columna [m ³]	V _p	0.1
Volum de la part cilíndrica de la columna [m ³]	V _c	1.3
Volum de la paret de la columna [m ³]	V _e	1.4
Pes de la columna buida [Kg]	M _b	12351
12. Determinació del pes de la columna plena d'aigua:		
Massa de rebliment [Kg]	M _r	16
Volum intern dels capçals de la columna [m ³]	VI _p	1.3
Volum intern de la part cilíndrica de la columna [m ³]	VI _c	41.6
Volum intern de la columna [m ³]	VI _t	44.2
Pes de la columna plena d'aigua [Kg]	M _p	61041
13. Determinació del aïllament:		
Espessor mínim de l'aïllant [m]	d _a	0.1
Espessor mínim de l'aïllant [mm]	d _a	62.85
Espessor escollit (sobredimensionat) [m]	d _e	0.1
Volum capçal aïllat [m ³]	VA _p	0.2
Volum part cilíndrica de la columna [m ³]	VA _c	2.4
Volum de l'aïllant total [m ³]	VA _t	2.7

5 Bescanviadors de calor

Per refredar, escalfar, evaporar o condensar els diferents corrents que circulen pel procés s'utilitzen bescanviadors de calor.

Els bescanviadors de calor que s'utilitzen a la planta són bescanviadors de carcassa i tubs, i s'han dissenyat utilitzant com a eina l'Aspen Exchanger Design and Rating V10. Aquest programa té les eines necessàries per un disseny econòmic i òptim, i segueix el codi ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) [10] i el codi TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturers Association*) [8]. A més a més, el programa utilitzat sempre proporciona el disseny més òptim, tot i que és possible que aquest mateix disseny no compleixi el paràmetres i aspectes més importants que s'han de tenir en compte per al disseny d'aquests equips.

Abans de començar a dissenyar els bescanviadors, s'explicaran els paràmetres i aspectes més importants que s'han de tenir en compte.

1. Tipus de bescanviador

El tipus de bescanviador que s'utilitzen a la planta son els de carcassa i tubs, de tipus BEM.

2. Circulació de fluid per carcassa o per tubs.

En general, el fluid que circula pels tubs, és el més corrosiu, el que es troba a major temperatura i a major pressió, el més net i el que té més cabal volumètric. El fluid que circula per carcassa és el més viscos.

3. Distribució dels tubs.

La distribució dels tubs segueix tres esquemes típics (triangular, quadrat i romboïdal) com es mostra a la **Figura 37**.

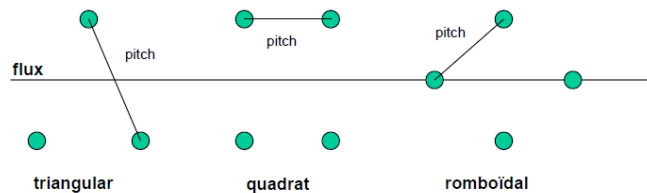


Figura 37: Distribució dels tubs (*pitch*) [12].

El terme *pitch* es defineix com la distància entre els centres de dos tubs consecutius. El *pitch* triangular i romboïdal proporciona altes velocitats de transferència de calor, però en canvi, la pèrdua de pressió és alta comparada amb el *pitch* quadrat. El *pitch* quadrat s'utilitza quan és necessita una neteja mecànica pel costat de carcassa.

El *pitch* recomanat és de 1.25 vegades el diàmetre extern del tub i el valor mínim d'un *pitch* quadrat amb requeriments de neteja és de 6.4 mm.

4. Velocitats típiques de circulació

Un altre aspecte important que s'ha de tenir en compte és la velocitat del fluid. Les velocitats típiques depenent del tipus de fluid i per on circula aquest, són les següents:

- Líquid per tub:
 - Líquid de procés: 1 – 2 m/s, màxim 4 m/s si es vol evitar l'embrutiment.
 - Aigua: 1.5 – 2.5 m/s.
- Líquid per carcassa: 0.3 – 1 m/s.
- Vapors: depèn de la pressió d'operació i de la densitat del gas. En el següent rang, els valors més baixos corresponen als vapors de pes molecular més alt.
 - Buit: 50 – 70 m/s
 - Pressió atmosfèrica: 10 – 30 m/s
 - Alta pressió: 5 – 10 m/s

5. Característiques de la carcassa

Segons la normativa TEMA, existeixen diverses configuracions de carcassa que es mostren a la **Taula 31**.

Taula 31: Diverses configuracions TEMA.

Tipus de capçal estacionari
A (canal i funda desmuntable)
B (capó, coberta integral)
C (canal integral amb placa de tubs i funda extraïble)
N (canal integral amb placa de tubs i funda extraïble)
D (Tancament especial a alta pressió)
Tipus de closca
E (carcassa d'un sol pas)
F (carcassa de dos passos amb <i>baffles</i> longitudinals)
G (flux segmentat)
H (flux dividit doble)
J (flux dividit)
K (<i>reboiler</i> de tipus bullidor)
X (flux creuat)
Tipus de capçal posterior
L (placa de tubs fixa com el cap estacionari 'A')
M (placa de tubs fix com el cap estacionari 'B')
N (placa de tubs fix com el cap estacionari 'C')
P (cap de capçal flotant embalat)
S (capçal flotant amb dispositiu de suport (anell dividit))
T (capçal de tipus " <i>pull through</i> ")
U (feix de tubs de tipus U)
W (tub flotant empaquetat amb anell de llanterna)

El diàmetre del feix de tubs és major per *pitch* quadrats que triangulars i a l'augmentar el número de passos per tub.

El pas per carcassa més utilitzat és el simple. Generalment, s'utilitzen dos passos per carcassa quan la diferència de temperatures entre la carcassa i el tub no sigui adequada utilitzant un únic pas. Les carcasses de flux dividit (*divided flow*) i de flux segmentat (*Split flow*) s'usen per reduir la pèrdua de pressió (normalment aquest factor influeix més que la transferència de calor com a factor de disseny).

 6. Pantalles deflectores (*baffles*) i separació entre elles.

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

- (a) L'altura lliure de la pantalla (*baffle cut*) és l'espai que queda entre la pantalla i la carcassa, per on passarà el fluid del costat de la carcassa. S'expressa com un percentatge que oscil·la entre el 15 i el 45% del diàmetre de carcassa, estant compresos els valors òptims entre el 20 i el 25%.

- (b) L'espaiat entre pantalles. Oscil·la entre 0.2 i 1 vegades el diàmetre de carcassa, essent el rang òptim entre 0.3 i 0.5 vegades el diàmetre de carcassa.

Els valors obtinguts per aquests paràmetres afectaran la velocitat de circulació del fluid per la carcassa, com es veurà més endavant.

7. Coeficient d'embrutiment (*Fouling coefficient*)

El valor del coeficient d'embrutiment canvia segons el fluid que s'utilitza. Aquest embrutiment interior i exterior dels tubs dels bescanviadors oposen una resistència a la transmissió de calor i per això és un factor important que s'ha de tenir en compte.

Els coeficients d'embrutiment dels diferents fluids que intervenen en el procés es mostren a la **Taula 32**.

Taula 32: Coeficient d'embrutiment dels diferents fluids.

Fluid	Coeficient d'embrutiment ($m^2 \cdot K/W$)
Aigua	0.00018
Oxigen	0.00018
Etilè	0.00053
Nitrogen	0.00088
Barreja orgànica	0.00053
DTRM-A	0.00018
DTRM-J	0.00018

8. Pèrdues de pressió

Les pèrdues de pressió són principalment degudes a pèrdues per fricció, contraccions i expansions.

Es consideren els següents límits per les pèrdues de pressió:

1. Líquids

- $\mu < 1$ cp, $\Delta P < 35$ kN /m²
- $1 \text{ cp} < \mu < 10$ cp, $\Delta P < 5 - 70$ kN /m²

2. Gasos i vapors

- buit elevat: 0.4 – 0.8 kN /m²
- buit mitjà: 0.1 pressió absoluta
- 1 a 2 bar: 0.5 pressió manomètrica
- > 10 bar: 0.1 pressió manomètrica

Tenint en compte els paràmetres explicats a dalt, per dissenyar un bescanviador de calor amb l'eina d'Aspen HYSYS es segueixen els passos següents:

1. Especificar els paràmetres dels corrents

Per començar a dissenyar, primer s'han d'especificar els corrents amb els quals es treballa. S'entra a la pestanya "Input" i després a la subpestanya "Property Data". Un cop dins, es troben quatre opcions en cascada, com es pot observar a la **Figura 38**, composició i propietats del corrent calent i composició i propietats del corrent fred.

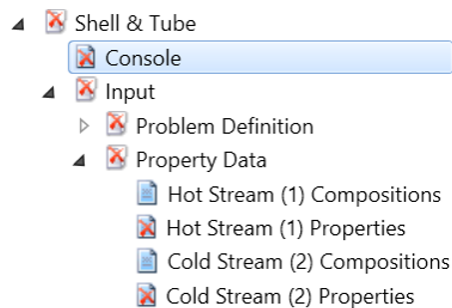


Figura 38: Pantalla de la subpestanya "Property Data" del HYSYS.

Accedint a les composicions (del corrent calent o del corrent fred), s'obre una pantalla com la que es mostra a continuació a la **Figura 39**.

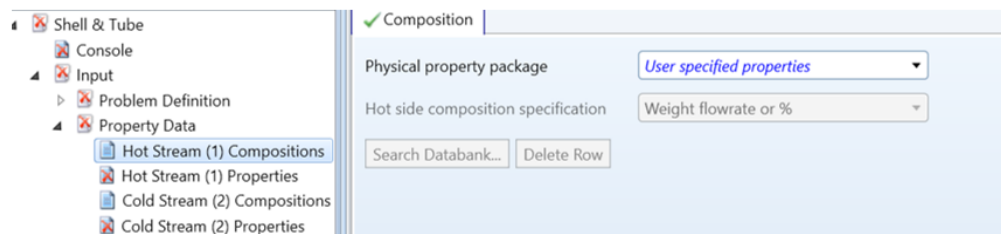


Figura 39: Pantalla de composicions del corrent escollit del HYSYS.

Es tria el *Physical Property Package: BJAC* i s'obre una taula a la pantalla amb tres columnes, una de components, una de composició i una de tipus de component (**Figura 40**).

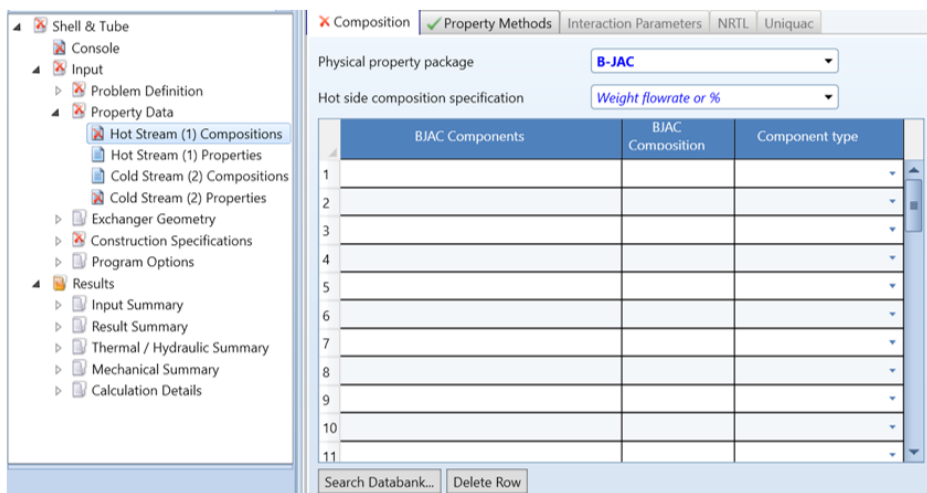


Figura 40: Pantalla amb la taula de composicions del corrent escollit del HYSYS.

Per escollir els components amb els quals es vol treballar, es clica l'opció "Search Databank" i es busca el component a partir del seu nom, fórmula química o pes molecular (**Figura 41**) i es pot afegir a la taula esmentada anteriorment.

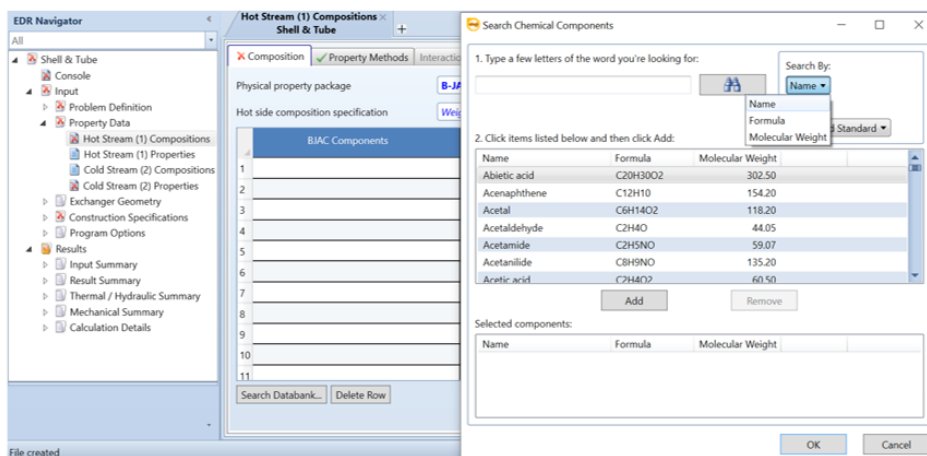
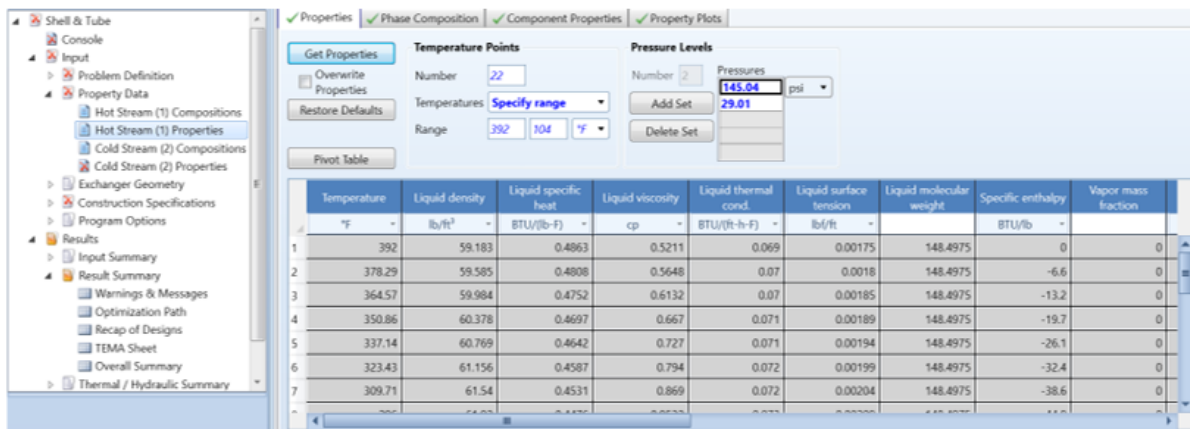


Figura 41: Banc de dades dels components.

Un cop escollits els diferents components del corrent, s'han d'especificar les composicions de cadascun i de quin tipus són, si són condensables o no condensables.

Un cop especificades les composicions dels corrents, ja es pot accedir a la opció de propietats de cada corrent. En aquesta secció es troben les dades (propietats, fase de composició, propietat de component i *plots*) amb les quals el programa dissenya el bescanviador/condensador (**Figura 42**).



	Temperature	Liquid density	Liquid specific heat	Liquid viscosity	Liquid thermal cond.	Liquid surface tension	Liquid molecular weight	Specific enthalpy	Vapor mass fraction
	°F	lb/ft ³	BTU/(lb-F)	cp	BTU/(ft-h-F)	lb/ft		BTU/lb	
1	392	59.183	0.4863	0.5211	0.069	0.00175	148.4975	0	0
2	378.29	59.585	0.4808	0.5648	0.07	0.0018	148.4975	-6.6	0
3	364.57	59.984	0.4752	0.6132	0.07	0.00185	148.4975	-13.2	0
4	350.86	60.378	0.4697	0.667	0.071	0.00189	148.4975	-19.7	0
5	337.14	60.769	0.4642	0.727	0.071	0.00194	148.4975	-26.1	0
6	323.43	61.156	0.4587	0.794	0.072	0.00199	148.4975	-32.4	0
7	309.71	61.54	0.4531	0.869	0.072	0.00204	148.4975	-38.6	0

Figura 42: Dades dins de la opció "Propietats de corrent".

2. Definir el problema

Amb els corrents definits, ja es pot definir el problema. Dins de la pestanya "Problem Definition" es troben tres opcions en cascada (Figura 43), "Headings/Remarks" (capçaleres/comentaris), "Application Options" (opció d'aplicacions) i "Process Data" (dades del procés).

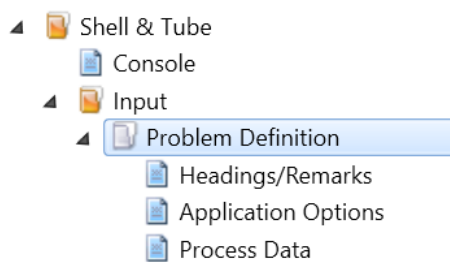


Figura 43: Pantalla de les opcions en cascada dins de la pestanya "Problem Definition" del HYSYS.

S'entra a la opció "Process Data" i es defineixen les característiques més importants pel disseny del bescanviador (Figura 44), com per exemple, la temperatura dels dos fluids amb la que es treballa, els cabals d'aquests, etc.

	Hot Stream (1) Shell Side		Cold Stream (2) Tube Side	
	In	Out	In	Out
Fluid name	V1->V1'		21->21''	
Mass flow rate	kg/s	46.1111	7.1587	
Temperature	°C	190	40.73	100
Vapor mass fraction		0	1	1
Pressure (absolute)	bar	5	4	50
Pressure at liquid surface in column				
Heat exchanged	kW			
Exchanger effectiveness				
Adjust if over-specified		Outlet temperature	Outlet temperature	
Estimated pressure drop	bar	7	7	
Allowable pressure drop	bar	1	1	
Fouling resistance	m ² -K/W	0.00018	0.00053	

Figura 44: Dades dintre de la opció Propietats de corrent.

3. Tria del tipus de bescanviador

Amb els dos passos realitzats, ara es tria el tipus de bescanviador. A l'apartat de Console, s'estableixen unes característiques bàsiques a la geometria del bescanviador com s'observa a la **Figura 45**. En aquest cas, tots el bescanviadors que s'utilitzen a la planta són de tipus BEM, ja que aquest disseny és el més econòmic i a més a més el de tipus B és el que més s'utilitza a la indústria química [13].

El material amb el que estan fets tots els bescanviadors és d'acer inoxidable (SS 316), encara que també es podria fer amb acer al carboni ja que els dos són els que s'utilitzen més a la producció de l'òxid d'etilè.

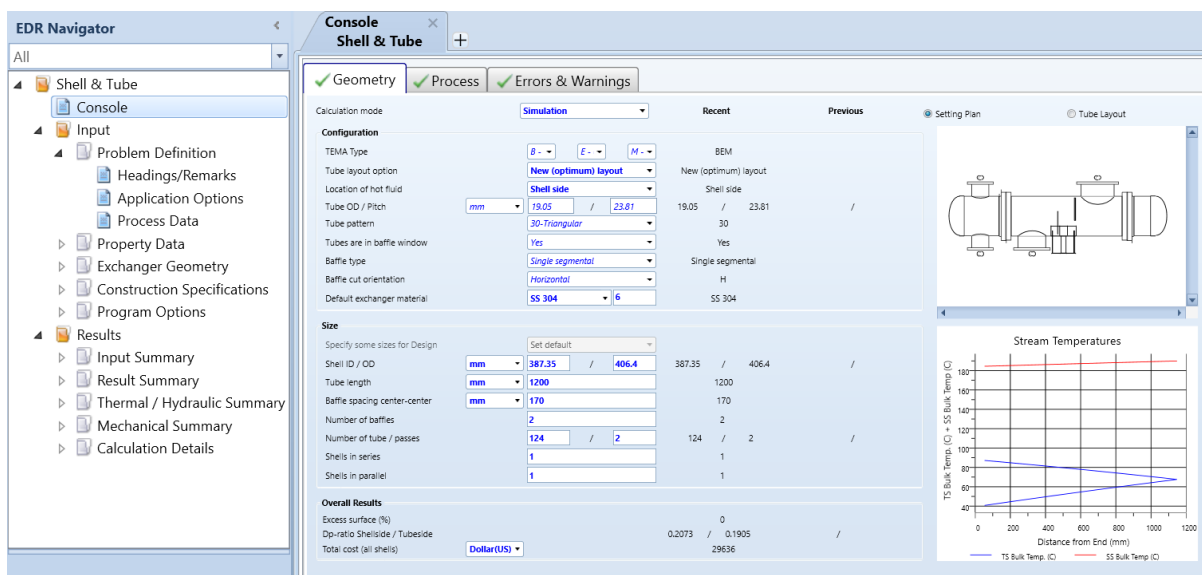


Figura 45: Pantalla de les característiques a la pestanya "Propietats de corrent" del HYSYS.

4. Resultats

Finalment, una vegada introduïdes les característiques necessàries, el programa s'encarrega de buscar el disseny més òptim de cada bescanviador. Després de fer els càlculs, els resultats es troben a la carpeta "Result Summary" (Figura 46).

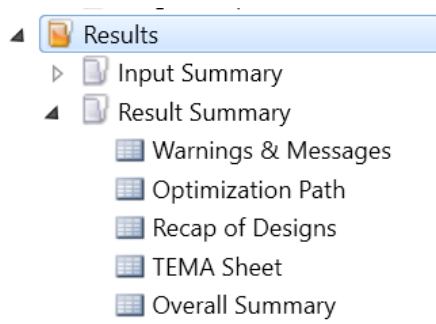


Figura 46: Pantalla de la pestanya "Results" del HYSYS.

6 Tancs d'emmagatzematge d'òxid d'etilè

Els tancs d'emmagatzematge d'òxid d'etilè s'han dissenyat segons la normativa ASME [10], ja que aquest s'emmagatzema a pressió superior a l'atmosfèrica. També s'ha seguit la normativa ITC MIE APQ-2 [14], la qual fa especial referència a l'emmagatzematge d'òxid d'etilè.

6.1 Volum

Per calcular el volum útil d'emmagatzematge cal determinar els kg d'òxid d'etilè produïts al dia i els dies de *Stock*, tal com està mostrat a l'equació 63. La planta produeix 120000 Tones d'òxid d'etilè a l'any. Tenint en compte que la planta està oberta 320 dies l'any, es produiran 375000 kg d'òxid d'etilè al dia. El *Stock* d'òxid d'etilè de la planta serà de 3 dies.

$$V = \frac{m \cdot S}{\rho} \quad (63)$$

on:

V: volum útil d'òxid d'etilè [m³].

m: òxid d'etilè produït al dia [kg].

S: dies de *Stock*

ρ : densitat de l'òxid d'etilè a la temperatura i pressió d'emmagatzematge [kg/m³].

L'equació 64 mostra com calcular el volum de disseny, el qual s'ha sobredimensionat per qüestions de seguretat.

$$V_d = V \cdot 1.15 \quad (64)$$

on:

V: volum útil d'òxid d'etilè [m³]

6.2 Pressió

La pressió de disseny tal com indica el seu nom, es fa servir per a dissenyar l'equip. És sempre superior a la pressió d'operació perquè l'equip pugui resistir pressions lleugerament superiors a la d'operació, és a dir, s'aplica per a sobredimensionar l'equip per qüestions de seguretat. Tal i com s'ha explicat a l'apartat d'equips la pressió d'operació dels tancs d'emmagatzematge és de 4 bars. L'equació 65 mostra com calcular la pressió de disseny.

$$P_d = (P_t + \Delta P) \cdot 1.15 \quad (65)$$

on:

ΔP : pressió hidrostàtica [bar].

P_t : pressió d'operació [bar].

La pressió hidrostàtica és la pressió que ve donada pel pes del fluid en repòs. Es calcula amb l'equació 66.

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h \quad (66)$$

on:

ρ : densitat de l'òxid d'etilè a la temperatura i pressió d'emmagatzematge [kg/m^3].

g : gravetat [m/s^2].

h : alçada de columna de líquid [m].

6.3 Temperatura

La temperatura de disseny també s'aplica per a sobredimensionar l'equip per qüestions de seguretat. Tal i com s'ha explicat a l'apartat d'equips la temperatura d'operació dels tancs d'emmagatzematge és de 20 °C. L'equació 67 mostra com calcular la temperatura de disseny.

$$T_d = T_t + 20 \quad (67)$$

on:

T_t : temperatura d'operació [°C]

6.4 Límit elàstic

El material escollit per a la construcció dels tancs és l'acer inoxidable 316. Per a procedir amb el disseny del tanc és necessari conèixer el límit elàstic, el qual és la tensió màxima que un material elàstic pot suportar sense que pateixi deformacions permanents. Aquest varia segons el material i depèn de la temperatura a la qual està sotmès.

El límit elàstic de l'acer inoxidable 316 a 20 °C és 20 ksi (1378.95 bar), aquest ha estat extret de la guia ASME, concretament de la Secció II [10].

6.5 Factor de soldadura

El factor de soldadura permet tenir en compte el possible error que pugui venir donat pel límit elàstic. S'ha considerat un valor de 0.85.

6.6 Nombre i volum de tancs

Per calcular el volum d'òxid d'etilè que contindrà cada tanc s'ha de dividir el volum de disseny entre el nombre de tancs, tal com es mostra a l'equació 68.

$$V_t = \frac{V_d}{n} \quad (68)$$

on:

V_d : volum de disseny d'òxid d'etilè [m³].

n : nombre de tancs.

6.7 Diàmetre i alçada dels tancs

El diàmetre i l'alçada dels tancs es calcula mitjançant les equacions 69 i 70, respectivament.

$$D_t = \sqrt[3]{\frac{V_t}{\pi/4 \cdot 1.5}} \quad (69)$$

$$\frac{H_t}{R_t} = 1.5 \quad (70)$$

on:

V_t : volum del tanc [m³].

H_t : alçada del cilindre del tanc [m].

D_t : diàmetre intern del tanc [m].

R_t : radi del tanc [m].

6.8 Recalculer el volum dels tancs

Un cop calculats el diàmetre i l'alçada del cilindre del tanc, s'ha d'arrodonir els valors i tornar a calcular el volum dels tancs amb l'equació 71.

$$V_t = \frac{\pi}{4} \cdot D_t^2 \cdot H_t \quad (71)$$

on:

D_t : diàmetre intern del tanc [m].

H_t : alçada del cilindre del tanc [m].

6.9 Gruix del cos i del capçal

L'equació 72 mostra com calcular el gruix del cilindre i l'equació 73 mostra com calcular el gruix del capçal.

$$t = \frac{P_d \cdot R_t}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_d} + C \quad (72)$$

$$t_c = \frac{P_d \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_d} + C \quad (73)$$

on:

P_d : pressió de disseny [bar].

S : límit elàstic [bar].

M : factor M.

E : factor de soldadura.

L : bombament del capçal, equival al diàmetre intern del tanc [mm].

R_t : radi intern del tanc [mm].

C : factor de corrosió [mm].

El factor de corrosió ha de prendre un valor entre 1 i 6 mm, s'ha pres un valor de 2 mm.

Per al càlcul del gruix del capçal és necessari conèixer el valor que pren el Factor M, al següent apartat es mostra com obtenir-lo.

6.10 Factor M

El factor M s'obté mitjançant l'equació 74. Aquesta depèn dels paràmetres, L i r, els quals, varien en funció del tipus de fons escollit. En aquest cas, el fons triat és un fons Klopper proporcionat per l'empresa Fondeyur [15], conseqüentment, les equacions 75 i 76 han estat proporcionades per l'empresa en qüestió.

$$M = 1/4 \cdot (3 + \sqrt{L/r}) \quad (74)$$

$$L = D_t \quad (75)$$

$$r = 0,1 \cdot L \quad (76)$$

on:

D_t : diàmetre intern del tanc [m].

6.11 Diàmetre extern

L'equació 77 mostra com calcular el diàmetre extern del tanc. Cal tenir en compte que per a calcular el diàmetre extern del tanc, es suma al diàmetre intern el gruix més gran d'entre els dos obtinguts a l'apartat de gruix del cos i del capçal.

$$D = D_t + t_c \cdot 2 \quad (77)$$

on:

D_t : diàmetre intern del tanc [mm].

t_c : gruix del capçal.

6.12 Alçada del capçal

Les equacions 78, 79 i 80 mostren com calcular l'alçada del capçal. Com s'ha especificat prèviament, el capçal triat és de tipus Klopper de l'empresa Fondeyur. Les equacions han estat proporcionades per l'empresa.

$$H_c = h_1 + h_2 + t_c \quad (78)$$

$$h_1 = 3.5 \cdot t_c \quad (79)$$

$$h_2 = 0.1935 \cdot D_t - 0.455 \cdot t_c \quad (80)$$

on:

H_c : alçada total del capçal [mm].

h_1 : pestanya, part recta del capçal [mm].

h_2 : fletxa [mm].

D_t : diàmetre intern del tanc [mm].

t_c : gruix del capçal [mm].

6.13 Alçada dels tancs

L'equació 81 mostra com calcular l'alçada total del tanc d'emmagatzematge.

$$H = H_t + H_c \cdot 2 \quad (81)$$

on:

H_t : alçada del cilindre [m].

H_c : alçada del capçal [m].

6.14 Pes dels tancs

El pes del tanc ve determinat per la suma del pes del líquid i del pes de la carcassa, tal com mostra l'equació 82.

$$M = M_t + M_l \quad (82)$$

on:

M_t : massa de la carcassa [kg].

M_l : massa del líquid [kg].

En primer lloc s'ha de calcular el pes de la carcassa, el qual depèn del pes del cilindre i del pes dels capçals tal com mostra l'equació 83.

$$M_t = M_A + M_B \cdot 2 \quad (83)$$

on:

M_A : massa del cilindre [kg].

M_B : massa del capçal [kg].

Les equacions 84 i 85, mostren com calcular el pes del cilindre i al pes del capçal, respectivament. L'equació del pes del capçal ha estat proporcionada per l'empresa Fondeyur.

$$M_A = H_t \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D - D_t) \cdot \rho_t \quad (84)$$

$$M_B = 0.1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D - D_t) \cdot \rho_t \quad (85)$$

on:

H_t : alçada del cilindre [m].

D_t : diàmetre intern del tanc [m].

D : diàmetre extern del tanc [m].

ρ_t : densitat de l'acer inoxidable 316 a 20 °C. [kg/m³]. S'ha pres un valor de 8000 kg/m³ [16].

En segon lloc s'ha de calcular la massa del líquid mitjançant l'equació 86.

$$M_l = V_t \cdot \rho \quad (86)$$

on:

V_t : volum d'òxid d'etilè a cada tanc [m³].

ρ : densitat de l'òxid d'etilè a la temperatura i pressió d'emmagatzematge [kg/m³].

6.15 Venteig

Per calcular la capacitat de venteig cal aplicar l'equació 87.

$$C_v = \frac{Q}{L} \quad (87)$$

on:

C_v : capacitat de venteig [kg/h].

Q : calor rebuda pel recipient [kJ/h]

L : calor latent de vaporització de l'òxid d'etilè [kJ/kg].

La capacitat de venteig depèn de la calor rebuda pel recipient, la qual es calcula amb l'equació 88.

$$Q = 139.7 \cdot F \cdot A^{0.82} \cdot 1000 \quad (88)$$

on:

A: superfície humida [m²].

F: factor sense dimensions, en aquest cas es pren el valor de 0.5 degut a que és un drenatge allunyat o cubeta separada i superfície humida superior a 20 m².

La calor rebuda depèn de l'àrea de venteig, la qual es calcula amb l'equació 89.

$$A = 2 \cdot \pi \cdot H \quad (89)$$

on:

H: alçada total del tanc [m].

6.16 Taula de resultats

A les **Taules 33 i 34** es recullen els resultats corresponents al disseny dels tancs d'emmagatzematge d'òxid d'etilè.

Taula 33: Dades calculades a partir de la normativa ASME (Part I).

1. Volum		
Òxid d'etilè produït al dia [kg]	m	385872
Dies de Stock	S	3
Densitat de l'òxid d'etilè [kg/m ³]	ρ	871.4
Volum útil [m ³]	V	1328
Volum de disseny [m ³]	V _d	1528
2. Pressió		
Pressió de disseny [bar]	P _d	5.50
Pressió d'operació [bar]	P _t	4
Pressió hidrostàtica [bar]	ΔP	0.7686
Alçada de la columna de líquid [m]	h	9
gravetat [m/s ²]	g	9.8
3. Temperatura		
Temperatura de disseny [°C]	T _d	40
Temperatura d'operació [°C]	T _t	20
4. Constants del material		
Límit elàstic [ksi]	S	20
Factor de soldadura	E	0.85
5. Nombre i volum dels tancs		
Volum del tanc [m ³]	V _t	255
Nombre de tancs	n	6
6. Diàmetre i alçada dels tancs		
Diàmetre intern del tanc [m]	D _t	6
Alçada del cilindre del tanc [m]	H _t	9
7. Recalcul volum tancs		
Volum del tanc [m ³]	V _t	254.5
8. Gruix del cos i del capçal		
Factor de corrosió [mm]	C	2
Gruix del cilindre [mm]	t	16.08
Gruix del capçal [mm]	t _c	24

Taula 34: Dades calculades a partir de la normativa ASME (Part II).

9. Factor M		
Constant per al càlcul	r	0.6
Bombament del capçal [mm]	L	6000
Factor M	M	6000
10. Diàmetre extern		
Diàmetre extern del tanc [m]	D	6.05
11. Alçada del capçal		
Pestanya [mm]	h_1	84
Fletxa [mm]	h_2	1150
Alçada total del capçal [m]	H_c	1.26
12. Alçada del tanc		
Alçada del tanc [m]	H	11.52
13. Pes dels tancs		
Massa del cilindre [kg]	M_A	32702
Massa del capçal [kg]	M_B	4180
Massa de la carcassa [kg]	M_t	41063
Massa del líquid [kg]	M_l	192936
Massa d'operació [kg]	M	234000
Densitat de l'acer inoxidable [kg/m ³]	ρ_t	8000
14. Venteig		
Factor sense dimensions	F	0.5
Calor rebuda pel recipient [kJ/h]	Q	2338548
Calor latent de vaporització [kJ/kg]	L	536.0
Àrea de venteig [m ²]	A	72.36
Capacitat de venteig [kg/h]	C_v	4363

7 Compressors

Tots els compressors s'utilitzen per augmentar la pressió del gas, menys un, que s'utilitza per disminuir-la, tal com s'ha explicat en l'apartat de canonades, vàlvules i accessoris. S'ha utilitzat el programa Aspen HYSYS per determinar la potència dels compressors en kW, així com altres característiques específiques com l'eficàcia.

8 Bombes

En el disseny de les bombes, es calcula la potència real necessària per desplaçar un fluid des d'un punt fins a un altre punt de la planta. Es comença amb el balanç d'energia mecànica (Equació de Bernouilli, 90) entre aquests dos punts.

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} + g \cdot (z_1 - z_2) + \frac{1}{2 \cdot \alpha} \cdot (v_2^2 - v_1^2) = w - e_v \quad (90)$$

on:

P_i : pressió en el punt i [Pa].

ρ : densitat del fluid, que romandrà constant [kg/m³].

g : Acceleració de la gravetat (9.81 m/s²).

z_i : elevació en el punt i [m].

α : terme que depèn del tipus de flux que es produeixi. És igual a $\frac{1}{2}$ si el flux és laminar ($Re < 2100$) i a 1 si el flux és turbulent ($Re > 2100$).

v_i : velocitat mitjà del fluid en el punt i [m/s].

w : treball realitzat per la bomba [J/kg].

e_v : pèrdua total d'energia mecànica per fricció [m²/s²].

Per poder fer el càlcul de la potència real s'ha de calcular, per últim, les pèrdues d'energia mecànica per fricció (e_v). Aquest valor és la suma entre les pèrdues en el tram d'aspiració i les pèrdues en el tram d'impulsió, i cada tram és la suma de les pèrdues en el tram recte i en el tram dels accidents (colze, vàlvula, etc.). L'equació és la que es mostra a continuació (equació 91).

$$e_v = e_{v,asp} + e_{v,exp} = (e_{v,tramrecteasp} + e_{v,tramaccidentsasp}) + (e_{v,tramrecteexp} + e_{v,tramaccidentsexp}) \quad (91)$$

on:

e_v : pèrdua de càrrega en el tram d'aspiració o impulsió [J/kg].

$e_{v,tramrecte}$: pèrdua en el tram recte [m²/s²].

$e_{v,tramaccidents}$: pèrdua en el tram accidents [m²/s²].

$e_{v,tramrecteasp}$: pèrdua en el tram recte en el tram d'aspiració [m²/s²].

$e_{v,tramaccidentsasp}$: pèrdua en el tram accidents en el tram d'aspiració [m²/s²].

$e_{v,tramrecteexp}$: pèrdua en el tram recte en el tram d'expulsió [m²/s²].

$e_{v,tramaccidentsexp}$: pèrdua en el tram accidents en el tram d'expulsió [m²/s²].

Primer es calcula les pèrdues del tram recte amb l'equació 92:

$$e_{v, \text{tramrecte}} = 4 \cdot f \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \frac{L}{D} \quad (92)$$

on:

f: factor de fricció.

v: velocitat del fluid [m/s].

L: longitud de la canonada [m].

D: diàmetre de la canonada [m].

El valor i el càlcul del factor de fricció f varia en funció del tipus de flux. Per un Reynolds menor de 2100, el regim és laminar i el factor de fricció es calcula de la següent manera: $16/Re$. Quan el valor de Reynolds és major de 2100, el regim és turbulent i llavors el factor de fricció es troba utilitzant l'abac de Moody (**Figura 47**) amb el número de Reynolds (que es calcula amb l'equació 93) i la rugositat relativa del material (que es calcula amb l'equació 94).

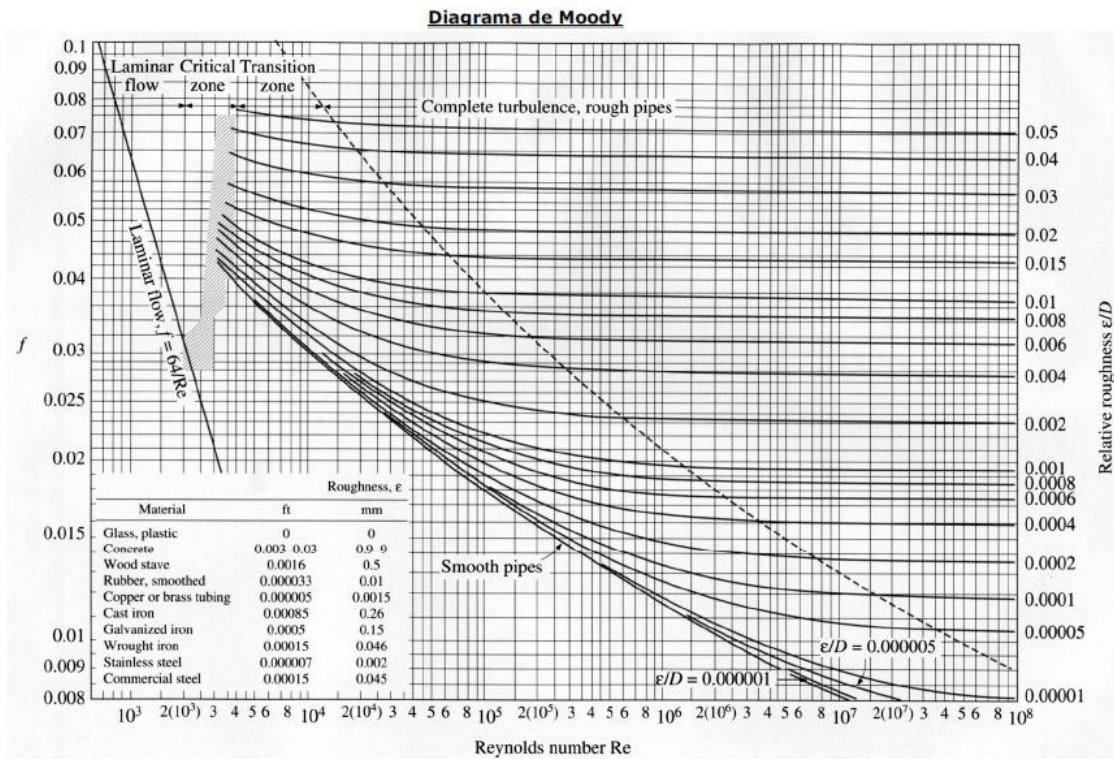


Figura 47: Abac de Moody [17].

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (93)$$

on:

ρ : densitat del fluid.

v : velocitat del fluid [m/s].

D : diàmetre de la canonada [m].

μ : viscositat del fluid.

$$e_{v, \text{tramaccidents}} = \frac{\epsilon}{D} \quad (94)$$

on:

ϵ : porositat del material amb el que esta fet la canonada [m]. Es troba a la **Figura 47**.

D : diàmetre de la canonada [m].

Amb la part de tram recte calculat, conseqüentment es calcula la part de tram d'accidents amb la següent equació (95) i consultant la **Figura 48**:

$$e_{v, \text{tramaccidents}} = \sum K \cdot \frac{v^2}{2} \quad (95)$$

on:

K : coeficient dels diferents accidents.

v : velocitat del fluid [m/s].

ACCIDENT	K	ACCIDENT	K
Entrada/sortida circuit		Vàlvula de diafragma	
Entrada encanonada	0,78	oberta	2,3
Entrada cantells vius	0,50	¾ oberta	2,6
Entrada arrodonida	0,04	½ oberta	4,3
Sortida encanonada	1,00	¼ oberta	21,0
Sortida cantells vius	1,00	Vàlvula de seient	
Sortida arrodonida	1,00	oberta	9,0
Colzes/ Unions		¾ oberta	13,0
Colze de 45° standard	0,35	½ oberta	36,0
Colze de 45° gran curvatura	0,20	¼ oberta	112,0
Colze de 90° standard	0,75	Vàlvula angular oberta	2,0
Colze de 90° gran curvatura	0,45	Vàlvula de bola	
Colze de 90° petita curvatura	1,3	oberta	0,05
Corba de 180°	1,5	20°	1,56
T standard ús com a colze	1,0	40°	17,3
T standard amb bifurcació tancada	0,4	60°	206,0
T standard amb divisió de cabal	1,0 (a)	Vàlvula de papallona	
Unió roscada	0,04	oberta	0,24
Maneguet d'unió	0,04	20°	1,54
Vàlvula comporta		40°	10,8
oberta	0,17	60°	118,0
¾ oberta	0,90	Vàlvula de retenció (oberta)	
½ oberta	4,5	de frontissa (columpio, chamera)	2,0
¼ oberta	24,0	de bola	70,0
Cabalímetres mecànics		de disc	10,0
de disc	7,0	Canvi de diàmetre	
de pistó	15,0	Estretament/	** (b)
rotatori	10,0	Eixamplament	** (b)

Figura 48: Coeficient K dels diferents accidents que hi pot haver en un tram de canonada.

Amb els valors de les pèrdues de càrrega calculats i amb l'equació de Bernouilli (equació 90) amb la w aïllada, es calcula el treball que realitza la bomba amb la següent equació (96):

$$w = \frac{P_1 - P_2}{\rho} + g \cdot (z_1 - z_2) + \frac{1}{2 \cdot \alpha} \cdot (v_2^2 - v_1^2) + e_v \quad (96)$$

Per calcular la potència teòrica de la bomba, s'utilitza la w trobada amb l'equació anterior i s'utilitza a l'equació 97.

$$W_{teorica} = w \cdot \rho \cdot Q \quad (97)$$

on:

w : treball realitzat per la bomba [J/kg].

Q : cabal volumètric [m^3/s].

ρ : densitat del fluid, que romandrà constant [kg/m^3].

Finalment per calcular la potència real, s'utilitza l'equació 98.

$$W_{real} = \frac{W_{teorica}}{\eta} \quad (98)$$

on:

$W_{teorica}$: potència teòrica de la bomba [J/s].

η : rendiment de la bomba, que es considera que és d'un 75%.

Les càrregues d'impulsió i d'expulsió s'han calculat amb el valor de les pèrdues d'energia mecànica per fricció en el tram d'aspiració i d'expulsió (**Figura 49**) de cada bomba amb l'ús de l'equació 99.

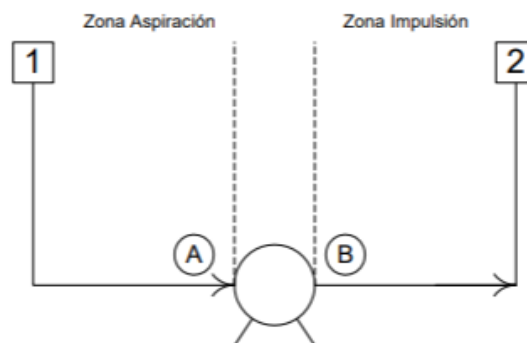


Figura 49: La zona d'aspiració i d'expulsió de cada bomba.

$$h_{total} = (z_2 - z_1) + \frac{1}{g} \cdot \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho} \cdot \frac{v_2^2 - v_1^2}{2\alpha} + e_{total} \right) \quad (99)$$

9 Canonades

9.1 Càlcul del diàmetre de les canonades

Per calcular el diàmetre de les canonades, en primer lloc s'ha determinat la velocitat del fluid que circula per cadascuna d'elles. Les velocitats han estat triades a partir de les velocitats típiques per a líquids i gasos, aquestes es troben a la **Figura 50**.

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

Figura 50: Rangs representatius de velocitats a canonades d'acer.

Per als gasos s'ha emprat un valor de 22 m/s, per als líquids un valor de 2 m/s i per als corrents de vapor d'aigua 15 m/s. Per als corrents que es troben en estat líquid i gas s'ha emprat un valor mitjà.

Un cop escollides les velocitats per a cadascun dels corrents, es procedeix a calcular el diàmetre de les canonades. Per a realitzar aquest càlcul s'ha emprat l'equació 100.

$$v = \frac{F}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2} \quad (100)$$

on:

v: velocitat del fluid que circula per la canonada [m/s].

F: cabal volumètric del fluid que circula per la canonada [m³/s].

D: diàmetre intern de la canonada [m].

S'ha aïllat el diàmetre i s'han substituït els valors de cabal i velocitat de la canonada en qüestió. A continuació, a partir del diàmetre intern obtingut, s'ha escollit el diàmetre nominal emprant el catàleg de l'empresa Hastinik [18]. La **Figura 51** mostra la taula emprada.

Diàmetre nominal		Diàmetre ext. mm	Espesor mm												
DN	Pulg.		0,80	1	1,2	1,6	2	2,5	2,6	3	3,2	3,6	4	5	6
		Peso en kg/m													
10	3/8"	17,2	0,329	0,406	0,481	0,625	0,761	0,920	0,951	1,067					
15	1/2"	21,3	0,411	0,508	0,604	0,789	0,967	1,177	1,217	1,375					
20	3/4"	26,9	0,523	0,649	0,772	1,014	1,247	1,527	1,582	1,795					
25	1"	33,7	0,659	0,819	0,977	1,286	1,588	1,953	2,025	2,306	2,444				
32	1 1/4"	42,4		1,037	1,238	1,536	2,023	2,498	2,591	2,960	3,141	3,498	3,846		
40	1 1/2"	48,3		1,184	1,415	1,758	2,319	2,867	2,975	3,403	3,614	4,029	4,437		
50	2"	60,3		1,485	1,776	2,209	2,920	3,618	3,757	4,304	4,575	5,111	5,639	6,924	
65	2 1/2"	76,1		1,881	2,251	2,802	3,711	4,607	4,785	5,491	5,841	6,535	7,222	8,902	
80	3"	88,9			2,635	3,283	3,498	5,409	5,618	6,453	6,867	7,689	8,504	10,504	
90	3 1/2"	101,6				3,760	4,006	4,988	6,445	7,407	7,885	8,834	9,776	12,094	
100	4"	114,3				4,237	4,515	5,624	7,272	8,361	8,902	9,979	11,048	13,684	16,271
125	5"	139,7				5,533	6,896	8,589	8,926	10,269	10,937	12,269	13,592	16,864	20,087
150	6"	168,3				6,679	8,328	10,379	10,788	12,417	13,229	14,847	16,456	20,445	24,384
200	8"	219,1					10,872	13,559	14,095	16,233	17,300	19,426	21,544	26,805	32,016
250	10"	273					13,572	16,933	17,604	20,282	21,619	24,285	26,943	33,554	40,114
300	12"	323,9					16,121	20,120	20,918	24,106	25,697	28,873	32,041	39,926	47,761
350	14"	355,6					17,708	22,104	22,982	26,487	28,237	31,731	35,216	43,895	52,524
400	16"	406,4					20,252	25,284	26,289	30,303	32,308	36,310	40,304	50,255	60,156
450	18"	457,2					22,759	28,462	29,594	34,000	36,320	40,82	45,320	56,612	67,784
500	20"	508					25,338	31,642	32,901	37,933	40,446	45,465	50,477	62,971	75,416
600	24"	609,6								45,565	48,586	54,623	60,635	75,691	90,679
700	28"	711,2											70,828	88,411	105,942
800	32"	812,8											81,004	101,136	121,206
900	36"	914,4											91,180	113,850	136,470
1000	40"	1016											101,335	126,597	151,733

Figura 51: Diametres nominals de les canonades d'acer inoxidable.

9.2 Aïllament de les canonades

Tal i com s'explica al capítol de canonades, vàlvules i accessoris, les canonades de la planta estan recobertes amb un aïllament tèrmic de llana mineral. S'ha determinat el gruix de l'aïllament de cada canonada en funció de la temperatura i del diàmetre nominal. S'ha emprat el catàleg d'aïllament de canonades amb llana mineral de l'empresa Isover, concretament la taula mostrada a la **Figura 52**.

Tuberías		°C Temperatura del fluido <=										
Diámetro nominal		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	500
Di (")	Di (mm)	Espesor de aislamiento (mm)*										
1	34	40	50	60	80	100	120	120	140	160	200	200
1 1/2	48	50	60	80	80	100	120	140	160	180	200	220
2	60	50	60	80	100	100	120	140	160	190	210	220
2 1/2	73	60	80	100	100	110	130	140	170	190	210	230
3	89	60	80	100	110	110	130	150	180	200	220	240
4	114	80	80	110	110	120	140	160	180	210	240	250
6	168	80	80	110	120	130	150	170	190	230	260	280
8	219	80	100	120	130	130	160	180	200	240	270	290
10	273	100	100	120	130	140	170	190	210	250	290	310
12	324	100	100	120	130	140	170	200	220	260	300	320
14	356	120	120	130	140	140	180	200	230	260	300	320
16	407	120	120	130	140	150	180	200	230	270	310	330
18	457	120	120	130	140	150	180	210	240	280	320	340
20	508	120	120	130	140	150	190	210	240	280	320	350
22	559	120	130	140	150	150	190	220	250	290	330	350
24	609	130	140	140	150	150	190	220	250	290	330	360

Figura 52: Aïllament tèrmic amb llana mineral. Gruix mínim recomanat.

Bibliografia

- [1] *Andreas Peschel, Florian Karst, Hannsjörg Freund, Kai Sundmacher - Analysis and optimal design of an ethylene oxide reactor.*
- [2] *M. R. Rahimpour, M. Shayanmehr, and M. Nazari - Modeling and Simulation of an Industrial Ethylene Oxide (EO) Reactor Using Artificial Neural Networks (ANN).*
- [3] *K. Vasanth Kumar, K. Porkodi, F. Rocha., Langmuir-Hinshelwood kinetics- A theoretical study.*
- [4] *L. Petrov, A. Eliyas, D. Shopov - A kinetic model of steady state ethylene epoxidation over a supported silver catalyst, Appl. Catal. 18 (1985) 87-103.*
- [5] Donald Q. Kern. *Procesos de Transferencia de Calor.* McGraw Hill Book Company, INC., 1983.
- [6] S. Rebsdatt i D. Mayer. *Ethylene Oxide, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.* English. Wiley Online Library, 2000.
- [7] *National Institute of Standards and Technology.* <https://www.nist.gov/>. Visitat 07-05-2020. 2020.
- [8] Inc. TEMA. *Standards of the tubular exchangers manufacturers association, 8th edition.* 1999.
- [9] Rogelio González Pérez. *Criogenia: Cálculo de equipos. Recipientes a presión.* 1989.
- [10] ASME. *BPVC Section VIII-Rules for Construction of Pressure Vessels Division 1.* 2019.
- [11] *Información sobre el acero inoxidable.* <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-316.html>. Visitat 25-04-2020. 2020.
- [12] Escola d'Enginyeria de la UAB. *Apunts d'Enginyeria Química.* 2020.
- [13] *Selecting the proper TEMA Type Heat Exchanger.* <https://www.thermalproducts.com/information-and-resources/item/1995-selecting-the-proper-tema-type-heat-exchanger>. Visitat 30-05-2020. 2016.
- [14] *ITC MIE APQ-2: « Almacenamiento de óxido de etileno ».* <http://www.apici.es/wp-download/legislacion/ITCMIEAPQ2.pdf>. Visitat 27-05-2020.
- [15] *Fondeyur, Fondos para depósitos.* <https://fondeyur.com>. Visitat 11-05-2020. 2020.
- [16] *Alloy wire international, Stainless Steel 316.* <https://www.alloywire.es/products/stainless-steel-316/>. Visitat 25-03-2020. 2020.
- [17] *Diagrama de Moody.* <https://fisica.laguia2000.com/complementos-matematicos/diagrama-de-moody>. Visitat 26-05-2020. 2011.
- [18] *Aceros inoxidables y aleaciones especiales Catálogo general.* http://www.grupohastinik.com/wp-content/uploads/2018/06/Catalogo_Hastinik_General-02-15.pdf. Visitat 10-05-2020. 2020.