

EBENZ S.L



# PLANTA DE PRODUCCIÓ D'ETILBENZÈ

PROJECTE DE FI  
DE GRAU  
Enginyeria Química



**UAB**  
Universitat Autònoma  
de Barcelona

Arnau Andrés Molina  
Gemma Calero Casadesús  
Alex Castañé Portales  
Alvaro Chacón García  
Hanane Ghaddari  
Ilias Hamido Mohamed

Tutor: Josep Anton Torà  
Juny 2023



E BENZ S.L



# PLANTA DE PRODUCCIÓ D'ETILBENZÈ

PROJECTE DE FI  
DE GRAU  
Enginyeria Química



CAPÍTOL 11

MANUAL DE  
CÀLCULS



**UAB**  
Universitat Autònoma  
de Barcelona



## Taula de Continguts

<b>11</b>	<b>Manual de Càlculs .....</b>	<b>3</b>
<b>11.1</b>	<b>Tancs d'Emmagatzematge.....</b>	<b>3</b>
11.1.1	Consideracions de disseny .....	3
11.1.2	Característiques del codi de disseny API 650 .....	3
11.1.3	Tancs d'emmagatzematge de benzè .....	8
11.1.4	Tanc d'emmagatzematge d'etilbenzè .....	10
<b>11.2</b>	<b>Tancs pulmó .....</b>	<b>13</b>
11.2.1	Tanc pulmó TP-200 .....	13
11.2.2	Tanc pulmó TP-401 .....	21
11.2.3	Tanc pulmó TP-402 .....	22
11.2.4	Tanc pulmó TP-403 .....	23
<b>11.3</b>	<b>Mescladors.....</b>	<b>24</b>
11.3.1	Mesclador M-200 .....	24
11.3.2	Mesclador M-500 .....	29
<b>11.4</b>	<b>Reactors d'alquilació.....</b>	<b>30</b>
11.4.1	Reactor d'alquilació R-301.....	31
11.4.2	Reactor d'alquilació R-302.....	47
11.4.3	Reactor d'alquilació R-303.....	47
11.4.4	Reactor de Transalquilació R-500 .....	48
<b>11.5</b>	<b>Columnes de destil·lació.....</b>	<b>49</b>
11.5.1	Columna separació gasos CD-401.....	49
11.5.2	Columna separació benzè CD-402 .....	50
11.5.3	Columna separació etilbenzè CD-403 .....	70
<b>11.6</b>	<b>Bescanviadors de calor .....</b>	<b>71</b>
11.6.1	Introducció i consideracions .....	71
11.6.2	Mètode de Kern .....	76
11.6.3	Bescanviador E-301.....	79
11.6.4	Bescanviador E-302.....	85
11.6.5	Bescanviador E-401.....	85
11.6.6	Bescanviador E-402.....	86
11.6.7	Bescanviador E-500.....	87
11.6.8	Condensador C-401 .....	87
11.6.9	Condensador C-402 .....	88

---

11.6.10	Condensador C-403 .....	89
11.6.11	Reboiler RB-401 .....	89
11.6.12	Reboiler RB-402 .....	90
11.6.13	Reboiler RB-403 .....	91
<b>11.7</b>	<b>Serveis de planta .....</b>	<b>91</b>
11.7.1	Torre de refrigeració.....	91
11.7.2	Caldera.....	92
11.7.3	Aire comprimit .....	92
11.7.4	Nitrogen .....	93
11.7.5	Estació transformadora .....	93
11.7.6	Consum elèctric .....	94
11.7.7	Oli Tèrmic.....	94
<b>11.8</b>	<b>Disseny de canonades .....</b>	<b>95</b>
11.8.1	Exemple de càlcul de disseny de canonades .....	99
11.8.2	Aïllament tèrmic de canonades.....	100
<b>11.9</b>	<b>Disseny de bombes .....</b>	<b>103</b>
11.9.1	Exemple de càlcul de disseny de bombes.....	109
<b>11.10</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>112</b>

## 11 Manual de Càlculs

### 11.1 Tancs d'Emmagatzematge

#### 11.1.1 Consideracions de disseny

En aquest apartat es porta a cap l'explicació dels càlculs realitzats per tal de dissenyar tots els tancs d'emmagatzematge que es necessiten en la planta de producció d'etilbenzè.

Per realitzar el disseny tant físic com mecànic dels tancs d'emmagatzematge s'ha realitzat mitjançant el codi de disseny API 650 <sup>[1]</sup> (American Petroleum Institute, 1988), ja que aquestes substàncies seran emmagatzemades a pressió atmosfèrica.

[1]

Els productes a emmagatzemar són el benzè, el qual és un reactiu, i l'etilbenzè, el qual és el nostre producte d'interès.

Per tal de realitzar els càlculs, s'han utilitzat uns paràmetres en funció del material utilitzat, els quals es mostren a la Taula 1.

*Taula 11.1. Paràmetres pel disseny dels tancs d'emmagatzematge. <sup>[2]</sup>*

Material	Sd (MPa)	St (MPa)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	CA (mm)	E
AISI 316L	145	155	7950	2,5	0,85

#### 11.1.2 Característiques del codi de disseny API 650

A continuació es detallen els passos que s'han seguit per tal de dissenyar els tancs a pressió atmosfèrica seguint el codi de disseny API 650 <sup>[1]</sup>.

##### Disseny del fons:

Per al disseny dels tancs s'ha escollit dimensionar el fons pla, els quals solen ser utilitzats en tancs on la pressió no es massa elevada. La restricció per tal d'utilitzar aquest tipus de fons es que la resistència permissibile del sòl sigui de com a mínim 1,465 kg/cm<sup>2</sup>. El terreny de la nostra parcel·la disposa d'una resistència del terreny de 2kg/cm<sup>2</sup> a 1,5 m de profunditat, per tant, és vàlid la utilització d'aquest tipus de fons per als tancs. <sup>[1]</sup>

*Taula 11.2. Gruix mínim del fons (mm)*

Espessor mínim cos (mm)	Esforç calculat per hidrostàtica en el primer anell del cos (kg/cm <sup>2</sup> )			
	< 1989	< 2109	< 2320	< 2530
t < 19,05	6,35	6,35	7,14	8,73
19,05 < 25,4	6,35	7,14	9,52	11,11
25,4 < 31,75	6,35	8,73	11,91	14,28
31,75 < 38,10	7,93	11,11	14,28	17,46
38,10 < 44,45	8,73	12,7	15,87	19,05

En quant a les plaques, s'utilitzen plaques les quals tenen un gruix de corrosió nominal mínim de 6,35 mm, sense tenir en compte qualsevol corrosió permissiblement especificada.

Per tant, el gruix de corrosió serà l'espessor menys la tolerància a la corrosió del material, tal com s'indica en l'Equació 1:

$$CT = t - CA \quad \text{Equació 11.1}$$

On:

CT: Gruix de corrosió (mm)

t: Espessor del fons (mm)

CA: Tolerància a la corrosió del material (mm)

El diàmetre exterior del fons ha de ser superior al diàmetre del cos del tanc, com a mínim ha de tenir 50 mm més. <sup>[1]</sup>

$$D_{fons} = D_{e,tanc} + 0,05 \text{ m} \quad \text{Equació 11.2}$$

On:

$D_{fons}$ : Diàmetre la fons inferior (m)

$D_{e,tanc}$ : Diàmetre del tanc (m)

### Disseny del cos:

L'espessor del cos s'ha realitzat mitjançant el mètode d'un peu (1-Foot Method), el qual es pot servir per a diàmetres menors de 61 m. Amb aquest mètode es calcula l'espessor requerit del cos del tanc per condicions de disseny i de prova hidrostàtica. La prova hidrostàtica dona informació de l'espessor del tanc en el cas que aquest estigues omplert amb aigua en comptes de amb la substància a emmagatzemar. L'espessor mínim requerit del cos serà el valor més grans entre els calculats per condicions de disseny o prova hidrostàtica. Les dues equacions utilitzades son les següents:

$$t_d = \frac{4,9D(H-0,3)G}{S_d \cdot E} + CA \quad \text{Equació 11.3}$$

$$t_t = \frac{4,9D(H-0,3)G}{S_t \cdot E} \quad \text{Equació 11.4}$$

On:

$t_d$ : Espessor en condicions de disseny (mm)

$t_t$ : Espessor en prova hidrostàtica (mm)

D: Diàmetre nominal del tanc (m)

H: Nivell del líquid de disseny (m)

G: Gravetat específica de disseny del líquid a emmagatzemar

$S_d$ : Tensió admissible en condicions de disseny (MPa)

$S_t$ : Tensió admissible en prova hidrostàtica (MPa)

CA: Tolerància a la corrosió (mm)

E: Valor de examinació radiogràfica de les juntes



L'espessor mínim que ha de tenir el cos del tanc està directament relacionat amb el diàmetre nominal del tanc com es mostra en la Taula 3. <sup>[1]</sup>

*Taula 11.3. Relació diàmetre nominal i espessor mínim*

Diàmetre nominal del tanc (m)	Espessor mínim del cos (mm)
< 15,24	4,76
15,24 < 36,576	6,35
36,576 < 60,96	7,93
> 60,96	9,52

Com els tancs que han de dissenyar no superen un diàmetre nominal del tanc de 15,24 m, l'espessor mínim del cos serà de 4,76 mm.

### Disseny del sostre

Els tanc d'emmagatzematge a dissenyar constaran de sostre tipus fix i seran cònics i auto suportats. Aquests sostres solen estar dissenyats i calculats per tancs que no superin un diàmetre d'uns 18,288 m, sent recomanable dissenyar-los en tancs com un diàmetre inferior a 12,192 m. Indiferentment de la seva forma o mètode de suport utilitzat, els sostres son dissenyats per suportar una càrrega viva de com a mínim 1,76 kg/cm<sup>2</sup> a més de la càrrega morta ocasionada pel mateix tanc. Les plaques utilitzades en el sostre han de tenir com a mínim un gruix nominal de 4,76mm. <sup>[1]</sup>

Aquest tipus de sostre han de tenir un angle entre 9,5 i 37 graus. Així que es considera un valor de 15 graus respecte l'horitzontal. El gruix del sostre vindrà calculat per la següent equació: <sup>[1]</sup>

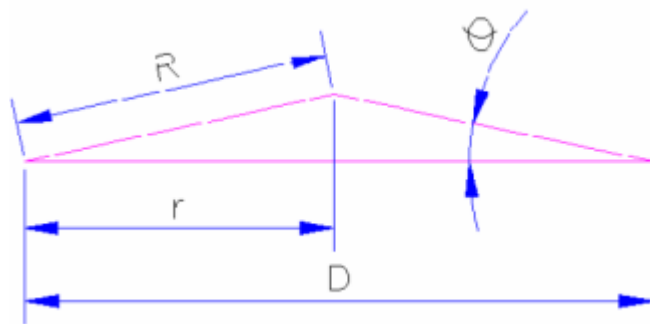
$$T_t = \frac{D}{4800 \sin \theta} + CA \quad \text{Equació 11.5}$$

On:

Tt: Espessor mínim requerit (cm)

D: Diàmetre del tanc (cm)

$\theta$  : Angle respecte a la horitzontal (°)



*Figura 11.1. Característiques d'un sostre cònic*

### Pes dels tancs buits

El càlcul del pes dels equips es basa en l'estimació del volum que ocupa el material del qual està fabricat, que juntament amb la densitat d'aquet material, permetrà determinar el pes dels diferents equips. Per raons de seguretat, a tots els equips se'ls hi aplica un factor de seguretat d'entre un 10-20%, en aquest cas s'escull un valor d'un 15%. Aquest factor de seguretat cobreix el pes dels possibles complements que porten els equips, com podrien ser les vàlvules o altres connexions.

El pes dels tancs s'ha calculat per parts, primer s'ha calculat el pes del cos, després el pes del capçal cònic i finalment el pes del fons inferior.

### Volum del cos

La gran majoria dels tancs a pressió atmosfèrica son de forma cilíndrica, per tant aplicant la fórmula del volum d'un cilindre i multiplicant aquest per la densitat del material s'obté la següent formula:

$$V_{cos} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_i^2) \cdot H \quad \text{Equació 11.6}$$

On:

$V_{cos}$ : Volum del cos ( $m^3$ )

$\rho$ : Densitat material del tanc ( $kg/m^3$ )

$D_e$ : Diàmetre exterior del tanc (m)

$D_i$ : Diàmetre interior del tanc (m)

$H$ : Alçada del tanc (m)

### Volum del capçal cònic

El capçal és cònic, per tant, aplicant la fórmula del volum d'un con i multiplicant aquest per la densitat del material s'obté:

$$V_{con} = \frac{\pi}{3} \cdot (r_e^2 - r_i^2) \cdot H_{con} \quad \text{Equació 11.7}$$

On:

$V_{con}$ : Volum del con ( $m^3$ )

$\rho$ : Densitat material del tanc ( $kg/m^3$ )

$r_e$ : Radi exterior del capçal cònic (m)

$r_i$ : Radi interior del capçal cònic (m)

$H_{con}$ : Alçada del con (m)

### Volum del fons inferior

El fons inferior és cilíndric, per tant, aplicant la fórmula del volum un cilindre i multiplicant aquets per la densitat del material s'obté:

$$V_{fons} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{fons}^2 \cdot t \quad \text{Equació 11.8}$$

On:

$V_{\text{fons}}$ : Volum del fons inferior ( $\text{m}^3$ )

$\rho$ : Densitat material del tanc ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$D_{\text{fons}}$ : Diàmetre del fons inferior (m)

$t$ : Gruix del fons inferior (m)

Per tant, el pes total del tanc buit és:

$$M_{\text{total buit}} = (V_{\text{cos}} + V_{\text{con}} + V_{\text{fons}}) \cdot \rho_{\text{acer}} \quad \text{Equació 11.9}$$

### Pes del tanc ple d'aigua

#### Volum del cos

La gran majoria dels tancs a pressió atmosfèrica son de forma cilíndrica, per tant aplicant la fórmula del volum d'un cilindre i multiplicant aquest per la densitat del material s'obté la següent formula:

$$V_{\text{cos}} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_i^2) \cdot H \quad \text{Equació 11.10}$$

#### Volum del capçal cònic

El capçal és cònic, per tant, aplicant la fórmula del volum d'un con i multiplicant aquest per la densitat del material s'obté:

$$V_{\text{con}} = \frac{\pi}{3} \cdot (r_i^2) \cdot H_{\text{con}} \quad \text{Equació 11.11}$$

#### Volum del fons inferior

El fons inferior és cilíndric, per tant, aplicant la fórmula del volum un cilindre i multiplicant aquets per la densitat del material s'obté:

$$V_{\text{fons}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{fons}}^2 \cdot t \quad \text{Equació 11.12}$$

Per tant, el pes total del tanc buit és:

$$M_{\text{total aigua}} = (V_{\text{cos}} + V_{\text{con}} + V_{\text{fons}}) \cdot \rho_{\text{aigua}} \quad \text{Equació 11.13}$$

### Pes del tanc ple

$$M_{\text{total ple}} = M_{\text{total buit}} + V_{\text{líquid}} \cdot \rho_{\text{líquid}} \quad \text{Equació 11.14}$$

### 11.1.3 Tancs d'emmagatzematge de benzè

El primer pas abans de determinar els valors del gruix i pes dels tancs, és determinar quants dies de reserva de benzè es vol emmagatzema a la planta. En aquest cas s'ha considerat que lo més adient es tenir una reserva de 3 dies, així en cas de que sorgeixin qualsevol problema logístic, no tindriem un dèficit de benzè i la planta podria continuar produint.

La necessitat de benzè fresc que es necessiten en el procés és de 405,85 kmol/h.

$$405,85 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \cdot 78,11 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} = 760822,64 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$760822,64 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{876 \text{ kg}} \cdot 3 \text{ dies} = 2605,55 \text{ m}^3$$

El volum dels tancs d'emmagatzematge de benzè es consideren tancs de 430m<sup>3</sup>, els quals el seu nivell d'operació estarà en el 85%, gràcies al factor de seguretat aplicat, el quals és del 15%.

$$\frac{2605,55 \text{ m}^3}{7 \text{ tancs}} = 372,22 \text{ m}^3$$

$$372,22 \text{ m}^3 \cdot 1,15 = 430 \text{ m}^3$$

Un cop decidit el volum, es procedeix a determinar el diàmetre i l'alçada del tancs a partir d'aquest.

La relació típicament utilitzada entre l'altura i el diàmetre sol ser de 1,5 per tancs a pressió atmosfèrica. Tenint en compte aquesta relació i el volum del tanc de 430 m<sup>3</sup>, s'obté:

$$D = 7,146 \text{ m i } H = 10,72 \text{ m}$$

Gràcies al factor de seguretat del 15%, el nivell del líquid serà un 85%.

$$\text{Nivell de líquid} = \frac{372,22 \text{ m}^3}{430 \text{ m}^3} \cdot 10,72 = 9,28 \text{ m}$$

#### Càlcul de l'espessor del cos

Per calcular l'espessor del cos del tanc de benzè s'ha realitzat mitjançant les Equacions 3 i 4.

$$t_d = \frac{4,9 \cdot 7,146 \text{ m} (10,72 \text{ m} - 0,3) \cdot 0,876}{145 \text{ MPa} \cdot 0,85} + 2,5 \text{ mm} = 5,09 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4,9 \cdot 7,146 \text{ m} (10,72 \text{ m} - 0,3) \cdot 0,876}{155 \text{ MPa} \cdot 0,85} = 2,43 \text{ mm}$$

Una vegada calculat l'espessor en condicions d'operació i de prova hidrostàtica, s'agafa el valor més elevat, que en aquest cas és l'espessor en condicions d'operació amb 5,09 mm i es procedeix a calcular el diàmetre extern del cos.

$$D_{ext} = D_{int} + 2 \cdot t_d \quad \text{Equació 11.15}$$

$$D_{ext} = 7,146 + 2 \cdot 0,00509 = 7,156 \text{ m}$$

### Càlcul sostre cònic auto suportat

Aquest espessor es calcula mitjançant l'Equació 5. L'angle que s'ha escollit és 15 graus respecte l'horitzontal.

$$T_t = \frac{714,6 \text{ cm}}{4800 \sin 15} + 0,25 \text{ cm} = 0,825 \text{ cm} = 8,25 \text{ mm}$$

*Taula 11.4. Especificacions sostre cònic*

<b>Tt (mm)</b>	8,25
<b>r (m)</b>	3,578
<b>R (m)</b>	3,70
<b>H (cm)</b>	95,74
<b>Di (m)</b>	7,146
<b>De (m)</b>	7,156
<b><math>\theta</math> (graus)</b>	15

### Càlcul del fons inferior

Com s'ha comentat anteriorment, el fons inferior no pot tenir un gruix per sota de 6,35 mm, per tant, sabent la tolerància a la corrosió de l'acer inoxidable 316L, el qual és 2,5 mm, es pot calcular l'espessor del fons inferior segons l'Equació 1.

$$t = CT + CA = 6,35 \text{ mm} + 2,5 \text{ mm} = 8,85 \text{ mm}$$

El diàmetre del fons inferior es calcula segons l'Equació 2.

$$D_{fons} = 7,156 \text{ m} + 0,05 \text{ m} = 7,21 \text{ m}$$

### Alçada total del tanc

L'alçada total del tanc ve donada per la suma del capçal, el cos i el fons del tanc.

$$H_{total} = 0,9574 + 10,72 + 0,00885 = 11,686 \text{ m}$$

### Pes del tanc buit

El pes del tanc s'ha calculat per parts, mitjançant les equacions 6, 7, 8, 9 i 10:

Volum del cos:

$$V_{cos} = \frac{\pi}{4} \cdot (7,156^2 \text{ m} - 7,146^2 \text{ m}) \cdot 10,72 \text{ m} = 1,20 \text{ m}^3$$

**Volum del capçal cònic**

$$V_{con} = \frac{\pi}{3} \cdot (3,578^2 m - 3,573^2 m) \cdot 0,9574 m = 0,0358 m^3$$

**Volum del fons inferior**

$$V_{fons} = \frac{\pi}{4} \cdot 7,21^2 m \cdot \frac{8,85 mm}{1000} = 0,361 m^3$$

**Pes total de tanc buit**

$$M_{total} = (1,20 + 0,0358 + 0,361) \cdot 7950 kg/m^3 = 12.694,56 kg$$

**Pes total del tanc ple**

$$M_{total ple} = 12.694,56 kg + \left( 372,22 m^3 \cdot 876 \frac{kg}{m^3} \right) = 338.759,28 kg$$

**11.1.4 Tanc d'emmagatzematge d'etilbenzè**

El primer pas abans de determinar els valors del gruix i pes dels tancs, és determinar quants dies pot estar l'etilbenzè emmagatzemat a la planta. En aquest cas s'ha considerat que lo més adient es tenir espai per 3 dies, així en cas de que sorgeixin qualsevol problema logístic, no tindriem etilbenzè el qual no se sap on emmagatzemar fins la seva sortida de planta.

La producció d'etilbenzè en aquest procés és de 405,79 kmol/h.

$$405,79 \frac{kmol}{h} \cdot 106,167 \frac{kg}{kmol} \cdot 24 \frac{h}{d} = 1.033.956,17 \frac{kg}{d}$$

$$1.033.956,17 \frac{kg}{d} \cdot \frac{1 m^3}{866 kg} \cdot 3 dies = 3581,83 m^3$$

El volum dels tancs d'emmagatzematge de benzè es consideren tancs de 460 m<sup>3</sup>, els quals el seu nivell d'operació estarà en el 85%, gràcies al factor de seguretat aplicat, el quals és del 15%.

$$\frac{3581,83 m^3}{9 tancs} = 398 m^3$$

$$398 \cdot 1,15 = 460 m^3$$

Un cop decidit el volum, es procedeix a determinar el diàmetre i l'alçada del tancs a partir d'aquest.

La relació típicament utilitzada entre l'altura i el diàmetre sol ser de 1,5 per tancs a pressió atmosfèrica. Tenint en compte aquesta relació i el volum del tanc de 460 m<sup>3</sup>, s'obté:

$$D = 7,31 \text{ m i } H = 10,97 \text{ m}$$

Gràcies al factor de seguretat del 15%, el nivell del líquid serà un 85%.

$$\text{Nivell de líquid} = \frac{398 \text{ m}^3}{460 \text{ m}^3} \cdot 10,97 = 9,50 \text{ m}$$

### Càlcul de l'espessor del cos

Per calcular l'espessor del cos del tanc de benzè s'ha realitzat mitjançant les equacions 3 i 4.

$$t_d = \frac{4,9 \cdot 7,31 \text{ m} (10,97 \text{ m} - 0,3) \cdot 0,866}{145 \text{ MPa} \cdot 0,85} + 2,5 \text{ mm} = 5,18 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4,9 \cdot 7,31 \text{ m} (10,97 \text{ m} - 0,3) \cdot 0,866}{155 \text{ MPa} \cdot 0,85} = 2,51 \text{ mm}$$

Una vegada calculat l'espessor en condicions d'operació i de prova hidrostàtica, s'agafa el valor més elevat, que en aquest cas és l'espessor en condicions d'operació amb 5,18 mm i es procedeix a calcular el diàmetre extern.

$$D_{ext} = D_{int} + 2 \cdot t_d \quad \text{Equació 11.15}$$

$$D_{ext} = 7,31 + 2 \cdot 0,00518 = 7,32 \text{ m}$$

### Càlcul sostre cònic auto suportat

Aquest espessor es calcula mitjançant l'Equació 5. L'angle que s'ha escollit és 15 graus respecte l'horitzontal.

$$T_t = \frac{731,0 \text{ cm}}{4800 \sin 15} + 0,25 \text{ cm} = 0,838 \text{ cm} = 8,38 \text{ mm}$$

*Taula 11.5. Especificacions sostre cònic*

<b>Tt (mm)</b>	8,38
<b>r (m)</b>	3,655
<b>R (m)</b>	3,784
<b>H (cm)</b>	97,94
<b>Di (m)</b>	7,31
<b>De (m)</b>	7,32
<b>θ (graus)</b>	15

### Càlcul del fons inferior

Com s'ha comentat anteriorment, el fons inferior no pot tenir un gruix per sota de 6,35 mm, per tant, sabent la tolerància a la corrosió de l'acer inoxidable 316L, el qual és 2,5 mm, es pot calcular l'espessor del fons inferior segons l'Equació 1.

$$t = CT + CA = 6,35 \text{ mm} + 2,5 \text{ mm} = 8,85 \text{ mm}$$

El diàmetre del fons inferior es calcula segons l'Equació 2.

$$D_{fons} = 7,32 \text{ m} + 0,05 \text{ m} = 7,37 \text{ m}$$

### Alçada total del tanc

L'alçada total del tanc ve donada per la suma del capçal, el cos i el fons del tanc.

$$H_{total} = 0,9794 + 10,97 + 0,00885 = 11,958 \text{ m}$$

### Pes del tanc buit

El pes del tanc s'ha calculat per parts, mitjançant les equacions 6, 7, 8 i 9:

### Volum del cos

$$V_{cos} = \frac{\pi}{4} \cdot (7,32^2 \text{ m} - 7,31^2 \text{ m}) \cdot 10,97 \text{ m} = 1,26 \text{ m}^3$$

### Volum del capçal cònic

$$V_{con} = \frac{\pi}{3} \cdot (3,66^2 \text{ m} - 3,655^2 \text{ m}) \cdot 0,9794 \text{ m} = 0,0375 \text{ m}^3$$

### Volum del fons inferior

$$V_{fons} = \frac{\pi}{4} \cdot 7,37^2 \text{ m} \cdot \frac{8,85 \text{ mm}}{1000} = 3,775 \text{ m}^3$$

### Pes total de tanc buit

$$M_{total} = (1,26 + 0,0375 + 3,775) \text{ m}^3 \cdot 7950 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 40.326,375 \text{ kg}$$

### Pes total del tanc ple

$$M_{total\ ple} = 40.326,375 \text{ kg} + \left(398 \text{ m}^3 \cdot 866 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) = 384.994,375 \text{ kg}$$



## 11.2 Tancs pulmó

La funció d'aquest tipus de tancs és mantenir la concentració de la mescla durant un cert temps determinat, anomenat temps de residència, amb l'objectiu de garantir un continu subministra de substància.

### 11.2.1 Tanc pulmó TP-200

El tanc pulmó TP-200 te la funció d'assegurar i mantenir el flux constant d'entrada de benzè i etilè al procés.

Per determinar el volum d'aquest tanc pulmó, es parteix del cabal total d'entrada que es te, el qual és la suma de benzè fres i recirculat i de l'etilè, que ascendeix a 3630 m<sup>3</sup>/h, la pressió d'operació que és 2000 kPa, la temperatura d'operació que és de 436,10 °C i la densitat de la mescla que és 28,00 kg/m<sup>3</sup>.

Tot seguit, es determina el temps de residència que tindrà la mescla segons les propietats dels component. En aquest cas s'ha determinat que el temps de residència per aquest tanc pulmó sigui de 2 minuts (0,033h).

Una vegada es te determinat el cabal d'entrada i el temps de residència, es pot calcular el volum necessari del tanc, aplicant-li un factor de sobredimensionament d'un 15%.

$$V_{mescla} = Q \cdot tr \quad \text{Equació 11.16}$$

$$V_{tanc} = V_{mescla} \cdot 1,15 \quad \text{Equació 11.17}$$

On:

$V_{mescla}$ : Volum de la mescla (m<sup>3</sup>)

$V_{tanc}$ : Volum de tanc (m<sup>3</sup>)

$Q$ : Cabal volumètric de la mescla (m<sup>3</sup>/h)

$Tr$ : Temps de residència en el tanc (h)

$$V_{mescla} = 3630 \cdot 0,033 = 121,00 \text{ m}^3$$

$$V_{tanc} = 121,00 \cdot 1,15 = 139,15 \text{ m}^3$$

Amb el volum del tanc pulmó definit, es procedeix dimensionar-lo.

Tenint en compte la que la relació desitjada d'alçada i diàmetre és de 1,5, i l'equació del volum del tanc, es pot calcular tant l'alçada com el diàmetre del tanc:

$$H = 1,5 \cdot D \quad \text{Equació 11.18}$$

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot D^2 \quad \text{Equació 11.19}$$

Combinant l'Equació 18 i 19 anteriors s'obté l'Equació 20:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V}{1,5 \cdot \pi}} \quad \text{Equació 11.20}$$

On:

V: Volum del tanc ( $m^3$ )

H: Alçada del tanc (m)

D: Diàmetre del tanc (m)

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 139,15}{1,5 \cdot \pi}} = 4,906 \text{ m}$$

$$H = 1,5 \cdot 4,906 = 7,36 \text{ m}$$

### Disseny mecànic

El disseny mecànic del tanc pulmó TP-200 realitzat mitjançant el codi ASEM Boiler and Pressure Vessel Code. Volume VIII, Division 1 [3]. En aquest codi es troba reflexat el procediment el qual s'ha de seguir per tal de realitzar el dimensionament mecànic d'un tanc.

### Material

Tenint en compte les propietats dels fluids a tractar s'ha decidit utilitzar l'acer inoxidable 316 L, també anomenat SS 316 L.

### Pressió de disseny

Per tal de poder calcular la pressió de disseny del tanc pulmó s'utilitzen les equacions 21 i 22. La pressió de disseny escollida serà la més elevada de les calculades donat que d'aquesta manera es sobredimensiona la columna per no tenir majors problemes.

$$P_1 = 1,1 \cdot P_o \quad \text{Equació 11.21}$$

$$P_2 = P_o + 196,13 \quad \text{Equació 11.22}$$

On:

$P_o$ : Pressió màxima d'operació normal de procés (kPa)

$P_1$ : Pressió de disseny (kPa)

$P_2$ : Pressió de disseny (kPa)

La pressió màxima d'operació normal de procés en aquesta columna és 2000 kPa.

$$P_1 = 1,1 \cdot 2000 = 2200 \text{ kPa}$$

$$P_2 = 2000 + 196,13 = 2196,13 \text{ kPa}$$

Per tant, segons els valor obtinguts, el tanc pulmó es dissenyarà per a una pressió de 2200 kPa.

### Temperatura de disseny

La temperatura de disseny serà calculada d'una manera similar a la pressió de disseny. A partir de les Equacions 23 i 24 s'escollirà el valor més elevat i aquest serà la temperatura de disseny.

$$T_1 = T_o + 0,1 \cdot T_o \quad \text{Equació 11.23}$$

$$T_2 = T_o + 15 \quad \text{Equació 11.24}$$

On:

$T_o$ : Temperatura màxima d'operació normal de procés (°C)

$T_1$ : Temperatura de disseny (°C)

$T_2$ : Temperatura de disseny (°C)

$$T_1 = 436,1 + 0,1 \cdot 436,1 = 479,71 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 436,1 + 15 = 451,10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Per tant, segons els valors obtingut, el tanc pulmó es dissenyarà a una temperatura de 479,71 °C.

### Juntes

Per tal d'escollir el tipus de junta a utilitza, s'empra la norma UW-12 pertanyent al codi ASME de la secció VIII-Divisió 1. En aquest cas s'ha decidit utilitza per a la realització dels càlculs el valor de la junta tipus 1, la quals te una eficiència de junta de 0,85.

### Esforç del material

L'esforç s'ha determinat mitjançant el material utilitzat, que en aquest cas el l'acer inoxidable segons les restriccions de la Figura 2 <sup>[3]</sup>.

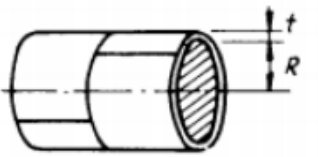
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES IN TENSION FOR HIGH-ALLOY STEEL (CAUTION: See UW-12 for vessels constructed under part UW)														
Specification		Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temp., °F, Not Exceeding												
Number	Grade	-20 to 100	200	300	400	500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

Figura 11.2. Esforç dels materials

Per tant i a partir de la Figura 2, es considera un valor d'esforç del material de  $15.700 \text{ Ib/pulg}^2 = 1082,48 \text{ bar} = 1,08 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ .

### Gruix del tanc pulmó

Per tal de realitzar el càlcul del gruix de la part cilíndrica del tanc pulmó s'utilitza les equacions indicades per la codificació ASME [3].

	<b>CASCO CILINDRICO (COSTURA LONGIT.)<sup>1</sup></b>	
	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Generalmente rige el esfuerzo en la costura longitudinal. Ver página anterior.</li> <li>2. Cuando el espesor de pared exceda de la mitad del radio interior o P exceda de 0.385 SE, se aplicarán las fórmulas dadas en el Apéndice del Código, 1-2.</li> </ol>		

*Figura 11.3. Guia pel disseny del gruix del tanc pulmó*

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C.A. \quad \text{Equació 11.25}$$

On:

t: Gruix de la paret del tanc pulmó (m)

P: Pressió de disseny (Pa)

R: Radi interior del tanc pulmó (m)

S: Esforç del material (Pa)

E: Eficiència de la junta

C.A.: Marge de corrosió (m)

$$t = \frac{2200000 \cdot 2,453}{1,08 \cdot 10^8 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 2200000} + 0,0025 = 0,062 \text{ m} = 62,15 \text{ mm}$$

L'espessor del tanc pulmó serà de 62,15 mm.

### Dimensionament del capçal

El capçal que s'ha escollit és el de tipus toriesfèrics, els quals son típics per a pressions baixes i mitges.

E	CABEZA ASME BRIDADA Y ALABEADA (CABEZA TORISFERICA)	
	Cuando $L/r = 16 \frac{2}{3}$	
	$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$
	Cuando $L/r$ menor de $16 \frac{2}{3}$	
$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$	

Figura 11.4. Guia pel disseny d'un capçal toriesfèric

Per tal de saber quina equació s'ha d'utilitzar, s'ha de calcular la relació entre el radi intern del capçal, el qual es igual al diàmetre intern de la torre i el radi interior de curvatures, el qual es un 10% del radi intern del capçal.

$$\frac{L}{r} \quad \text{Equació 11.26}$$

On:

L: Radi intern del capçal (m)

r: Radi interior de les curvatures (m)

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 11.5. Determinació del factor M

$$\frac{L}{r} = \frac{4,906}{0,322} = 15,08 \rightarrow M = 1,72$$

Una vegada obtingut el valor M, es procedeix a calcular el gruix del capçal mitjançant l'equació 27.

$$t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} \quad \text{Equació 11.27}$$

On:

t: Gruix de la paret (m)

P: Pressió de disseny (Pa)

L: Radi interior del capçal (m)

M: Factor M

S: Esforç del material (Pa)  
 E: Eficiència de la junta

$$t = \frac{2200000 \cdot 0,322 \cdot 1,72}{2 \cdot 1,08 \cdot 10^8 \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 2200000} = 0,091 \text{ m} = 90,757 \text{ mm}$$

L'espessor del capçal serà de 90,757 mm.

### Diàmetre exterior

Una vegada calculats els gruixos del tanc, es procedeix a fer el càlcul del diàmetre exterior del tanc per tal de poder calcular el capçal toriesfèric tipus klopper..

$$D_{ext \text{ tanc}} = D_{int \text{ tanc}} + 2 \cdot t_c \quad \text{Equació 11.28}$$

On:

$D_{ext \text{ tanc}}$ : Diàmetre extern del tanc pulmó (m)

$D_{int \text{ tanc}}$ : Diàmetre intern del tanc pulmó (m)

$t_c$ : Gruix del tanc pulmo (m)

$$D_{ext \text{ tanc}} = 4,906 + 2 \cdot 0,062 = 5,031 \text{ m}$$

### Dimensions dels capçals

Per determinar les dimensions del capçal son necessaris saber el diàmetre exterior i l'espessor d'aquest. En aquest cas el diàmetre exterior és de 5,031 m i l'espessor és de 90,757 mm.

Un cop obtinguts es procedeix a realitzar el càlcul dels paràmetres mitjançant una calculadora de fons tipus toriesfèric .

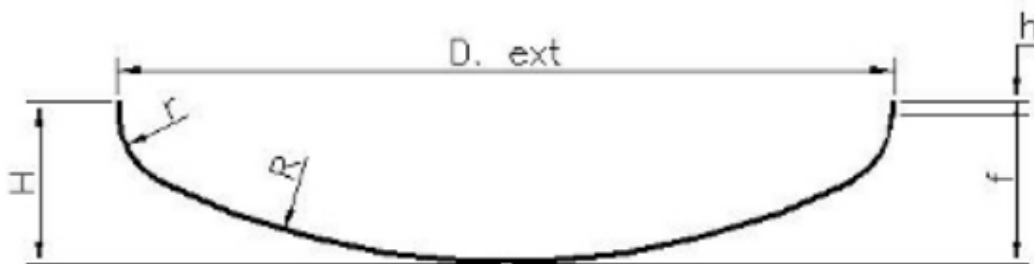


Figura 11.6. Dimensions capçal tipus toriesfèric <sup>[4]</sup>

A la Taula 6 es mostren els valors obtinguts del capçal toriesfèric.

Taula 11.6. Dimensions del capçal toriesfèric

<b>D ext (m)</b>	5,031
<b>Espessor (mm)</b>	90,757
<b>R (m)</b>	5,031
<b>r (m)</b>	0,503
<b>h (m)</b>	0,318
<b>f (m)</b>	0,932
<b>H (m)</b>	1,34

### Alçada total del tanc pulmó

Per calcular l'alçada total del tanc pulmó es necessari haver calculat prèviament tant el valor de l'alçada del tanc pulmó com la del capçal. Amb aquests valors es s'obté l'Equació 29.

$$h_t = h_c + 2 \cdot H \quad \text{Equació 11.29}$$

On:

ht: Alçada total del tanc pulmó (m)

hc: Alçada de la part cilíndrica del tanc pulmó (m)

TH: Alçada total del capçal (m)

$$h_t = 7,36 + 2 \cdot 1,34 = 10,04 \text{ m}$$

### Pes de la columna buida

El tanc pulmó es divideix en tres parts els quals son el capçal interior i el superior, els quals son iguals, i la part cilíndrica que conforma el cos del tanc pulmó. Per realitzar el càlcul del pes del tanc pulmó, cal determinar el volum dels capçals amb l'Equació 30 i la part cilíndrica amb l'Equació 31.

$$V_{cap} = 0,1 \cdot (R_{ext\ cap}^3 - R^3) + 0,1 \cdot (r_{ext\ cap}^3 - r^3) + \frac{\pi \cdot h}{4} \cdot (D_{ext\ tanc}^2 - D_{int\ tanc}^2)$$

Equació 30

$$V_{tanc} = \frac{\pi \cdot h_c}{4} \cdot (D_{ext\ tanc}^2 - D_{int\ tanc}^2) \quad \text{Equació 11.31}$$

Una vegada obtinguts els volums dels capçals i de la part cilíndrica del tanc pulmó, l'alçada total es calcular mitjançant l'Equació 32.

$$V_{paret} = V_{tanc} + 2 \cdot V_{cap} \quad \text{Equació 11.32}$$

Obtingut el volum total del tanc pulmó, es procedeix a calcular el seu pes tenint en compte que la densitat del material SS 316 L és de 7950 kg/m<sup>3</sup>.

$$M_{tanc\ buit} = V_{paret} \cdot \rho_{acer} \quad \text{Equació 11.33}$$

On:

$V_{cap}$ : Volum dels capçals del tanc pulmó ( $m^3$ )

$R_{ext\ cap}$ : Radi extern del capçal (m)

R: Radi del capçal (m)

$r_{ext\ cap}$ : Radi extern de la curvatura dels capçals (m)

r: Radi de la curvatura dels capçals (m)

h: Distància fins la curvatura del capçal (m)

$V_{tanc}$ : Volum de la part cilíndrica del tanc pulmó ( $m^3$ )

$h_c$ : Alçada de la part cilíndrica del tanc pulmó (m)

$D_{ext\ tanc}$ : Diàmetre extern del tanc pulmó (m)

$D_{int\ tanc}$ : Diàmetre intern del tanc pulmó (m)

$V_{apret}$ : Volum de les parets del tanc pulmó ( $m^3$ )

$M_{tanc\ buit}$ : Pes del tanc pulmó buit (kg)

$\rho_{acer}$ : Densitat de l'acer inoxidable ( $kg/m^3$ )

$$V_{cap} = 0,1 \cdot (5,031^3 - 4,849^3) + 0,1 \cdot (0,5031^3 - 0,322^3) + \frac{\pi \cdot 0,318}{4} \cdot (5,031^2 - 4,906^2)$$

$$= 1,647 \text{ m}^3$$

$$V_{tanc} = \frac{\pi \cdot 7,36}{4} \cdot (5,031^2 - 4,906^2) = 7,14 \text{ m}^3$$

$$V_{paret} = 7,14 + 2 \cdot 1,647 = 10,433 \text{ m}^3$$

$$M_{tanc\ buit} = 10,433 \cdot 7950 = 82.941,29 \text{ kg}$$

### Pes de la columna amb aigua

Per determinar el pes del tanc pulmó amb aigua, s'han de tenir en comptes els volums interns del tanc pulmó tant dels capçals, equació 34, com de la part cilíndrica del tanc pulmó, equació 35.

$$V_{int\ cap} = 0,1 \cdot R^3 + 0,1 \cdot r^3 + \frac{\pi \cdot SF}{4} \cdot D_{int\ tanc}^2 \quad \text{Equació 11.34}$$

$$V_{int\ tanc} = \frac{\pi \cdot h_c}{4} \cdot D_{int\ tanc}^2 \quad \text{Equació 11.35}$$

El volum intern del tanc pulmó es determina mitjançant la suma dels valors interns segons l'equació 36.

$$V_{total\ int\ tanc} = V_{int\ tanc} + 2 \cdot V_{int\ cap} \quad \text{Equació 11.36}$$

A partir del volum total interior del tanc pulmó i al densitat de l'aigua es pot calcular el pes del tanc pulmó amb aigua.

$$M_{tanc\ aigua} = M_{tanc\ buida} + V_{total\ int\ tanc} \cdot \rho_{aigua} \quad \text{Equació 11.37}$$



On:

$V_{int\ cap}$ : Volum intern dels capçals del tanc pulmó ( $m^3$ )

R: Radi del capçal (m)

r: Radi de la curvatura dels capçals (m)

SF: Distància fins la curvatura del capçal (m)

$V_{int\ tanc}$ : Volum interior de la part cilíndrica del tanc pulmó ( $m^3$ )

$h_c$ : Alçada de la part cilíndrica del tanc pulmó (m)

$D_{int\ tanc}$ : Diàmetre intern del tanc pulmó (m)

$V_{total\ int\ tanc}$ : Volum intern del tanc pulmó ( $m^3$ )

$M_{tanc\ oper}$ : Pes del tanc pulmó en operació (kg)

$M_{tanc\ buit}$ : Pes del tanc pulmó buit (kg)

$\rho_{aigua}$ : Densitat de l'aigua ( $kg/m^3$ )

$$V_{int\ cap} = 0,1 \cdot 4,849^3 + 0,1 \cdot 0,322^3 + \frac{\pi \cdot 0,318}{4} \cdot 4,906^2 = 17,412\ m^3$$

$$V_{int\ tanc} = \frac{\pi \cdot 7,36}{4} \cdot 4,906^2 = 139,15\ m^3$$

$$V_{total\ int\ tanc} = 139,15 + 2 \cdot 17,412 = 173,974\ m^3$$

$$M_{tanc\ aigua} = 82.941,29 + 173,974 \cdot 997 = 256.393,343\ kg$$

### Pes del tanc pulmó en operació

El procediment es exactament igual al

utilitzat en l'apartat del pes del tanc pulmó amb aigua, canviant la densitat de l'aigua per la densitat del fluid a processar, que en aquest cas la seva densitat és de  $28,00\ kg/m^3$ .

$$M_{col\ oper} = 82.941,29 + 173,97 \cdot 28,00 = 86.329,29\ kg$$

### 11.2.2 Tanc pulmó TP-401

El tanc pulmó TP-401 te la funció d'assegurar i mantenir el flux constant de recirculació de líquid a la torre de destil·lació CD-401.

Per determinar el volum d'aquest tanc pulmó, es parteix del cabal d'entrada que es de  $1374,83\ m^3/h$ , la pressió d'operació que és  $920\ kPa$ , la temperatura d'operació que és de  $31,98\ ^\circ C$  i la densitat de la mescla que és  $800\ kg/m^3$ .

Tot seguit, es determina el temps de residència que tindrà la mescla segons les propietats dels component. En aquest cas s'ha determinat que el temps de residència per aquest tanc pulmó sigui de 2 minuts ( $0,033h$ ).

Una vegada es te determinat el cabal d'entrada i el temps de residència, es pot calcular el volum necessari del tanc, aplicant-li un factor de sobredimensionament d'un 15%.

La metodologia per dissenyar aquest tanc pulmó ha sigut la mateixa que la utilitzada en el tanc pulmó TP-200 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest tanc pulmó, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

*Taula 11.7. Dades obtingudes pel disseny de TP-401*

Paràmetres	Valor
Material de construcció	Acer Inoxidable 316 L (SS 316 L)
Volum (m <sup>3</sup> )	52,702
Diàmetre del tanc pulmó (m)	3,598
Alçada del tanc pulmó (m)	5,325
Pressió de disseny (kPa)	1116,13
Temperatura de disseny (°C)	46,98
Radi interior del capçal (m)	3,532
Gruix paret tanc pulmó (mm)	24,239
Gruix capçal tanc pulmó (mm)	33,274
Alçada capçal (m)	0,831
Alçada total (m)	6,987
Pes tanc pulmó buit (kg)	16.094,10
Pes tanc pulmó amb aigua (kg)	79.726,189
Pes tanc pulmó en operació (kg)	52.756,24

### 11.2.3 Tanc pulmó TP-402

El tanc pulmó TP-402 te la funció d'assegurar i mantenir el flux constant de recirculació de líquid a la torre de destil·lació CD-402.

Per determinar el volum d'aquest tanc pulmó, es parteix del cabal d'entrada que es de 215,16 m<sup>3</sup>/h, la pressió d'operació que és 920 kPa, la temperatura d'operació que és de 173,5 °C i la densitat de la mescla que és 691 kg/m<sup>3</sup>.

Tot seguit, es determina el temps de residència que tindrà la mescla segons les propietats dels component. En aquest cas s'ha determinat que el temps de residència per aquest tanc pulmó sigui de 2 minuts (0,033h).

Una vegada es te determinat el cabal d'entrada i el temps de residència, es pot calcular el volum necessari del tanc, aplicant-li un factor de sobredimensionament d'un 15%.

La metodologia per dissenyar aquest tanc pulmó ha sigut la mateixa que la utilitzada en el tanc pulmó TP-200 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest tanc pulmó, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

Taula 11.8. Dades obtingudes pel disseny de TP-402

Paràmetres	Valor
Material de construcció	Acer Inoxidable 316 L (SS 316 L)
Volum (m <sup>3</sup> )	8,248
Diàmetre del tanc pulmó (m)	1,949
Alçada del tanc pulmó (m)	2,870
Pressió de disseny (kPa)	1116,13
Temperatura de disseny (°C)	190,85
Radi interior del capçal (m)	1,913
Gruix paret tanc pulmó (mm)	14,215
Gruix capçal tanc pulmó (mm)	17,931
Alçada capçal (m)	0,450
Alçada total (m)	3,77
Pes tanc pulmó buit (kg)	3.233,22
Pes tanc pulmó amb aigua (kg)	13.212,756
Pes tanc pulmó en operació (kg)	8.189,075

#### 11.2.4 Tanc pulmó TP-403

El tanc pulmó TP-403 te la funció d'assegurar i mantenir el flux constant de recirculació de líquid a la torre de destil·lació CD-403.

Per determinar el volum d'aquest tanc pulmó, es parteix del cabal d'entrada que es de 162,24 m<sup>3</sup>/h, la pressió d'operació que és 920 kPa, la temperatura d'operació que és de 241,6 °C i la densitat de la mescla que és 637,4 kg/m<sup>3</sup>.

Tot seguit, es determina el temps de residència que tindrà la mescla segons les propietats dels component. En aquest cas s'ha determinat que el temps de residència per aquest tanc pulmó sigui de 2 minuts (0,33h).

Una vegada es te determinat el cabal d'entrada i el temps de residència, es pot calcular el volum necessari del tanc, aplicant-li un factor de sobredimensionament d'un 15%.

La metodologia per dissenyar aquest tanc pulmó ha sigut la mateixa que la utilitzada en el tanc pulmó TP-200 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest tanc pulmó, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

Taula 11.9. Dades obtingudes pel disseny de TP-403

Paràmetres	Valor
Material de construcció	Acer Inoxidable 316 L (SS 316 L)
Volum (m <sup>3</sup> )	6,219
Diàmetre del tanc pulmó (m)	1,768
Alçada del tanc pulmó (m)	2,612
Pressió de disseny (kPa)	1116,13
Temperatura de disseny (°C)	265,76
Radi interior del capçal (m)	1,735
Gruix paret tanc pulmó (mm)	13,16
Gruix capçal tanc pulmó (mm)	16,32
Alçada capçal (m)	0,408
Alçada total (m)	3,428
Pes tanc pulmó buit (kg)	2.053,79
Pes tanc pulmó amb aigua (kg)	9.567,37
Pes tanc pulmó en operació (kg)	5.500,84

### 11.3 Mescladors

#### 11.3.1 Mesclador M-200

El mesclador M-200 te la funció d'homogeneïtzar la mescla de benzè fresc amb el benzè recirculat procedent de la CD-402 i d'assegurar i mantenir el flux constant de benzè al procés.

Per determinar el volum d'aquest mesclador es parteix del cabal d'entrada que es de 122 m<sup>3</sup>/h, la pressió d'operació que és 920 kPa, la temperatura d'operació que és de 173,5 °C, la densitat de la mescla que és 872,6 kg/m<sup>3</sup> i la seva viscositat que és 0,0001939 Pa·s.

Tot seguit, es determina el temps de residència que tindrà la mescla segons les propietats dels component. En aquest cas s'ha determinat que el temps de residència per aquest tanc pulmó sigui de 2 minuts (0,033h).

Una vegada es te determinat el cabal d'entrada i el temps de residència, es pot calcular el volum necessari del tanc, aplicant-li un factor de sobredimensionament d'un 15%.

La metodologia per dissenyar el tanc del mesclador ha sigut la mateixa que la utilitzada en el tanc pulmó TP-200 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest tanc pulmó, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

Taula 11.10. Dades obtingudes pel disseny de M-200

Paràmetres	Valor
Material de construcció	Acer Inoxidable 316 L (SS 316 L)
Volum (m <sup>3</sup> )	4,677
Diàmetre del tanc pulmó (m)	1,583
Alçada del tanc pulmó (m)	2,375
Pressió de disseny (kPa)	1.1116,13
Temperatura de disseny (°C)	190,85
Radi interior del capçal (m)	1,578
Gruix paret tanc pulmó (mm)	12,196
Gruix capçal tanc pulmó (mm)	14,841
Alçada capçal (m)	0,371
Alçada total (m)	3,117
Pes tanc pulmó buit (kg)	1.567,15
Pes tanc pulmó amb aigua (kg)	7.217,814
Pes tanc pulmó en operació (kg)	5.115,72

Un cop calculades les dimensions del tanc del mesclador es procedeix a dimensionar el mesclador.

S'ha decidit escollir un agitador de turbina amb pales planes encastades sobre un disc perpendicular al eix de rotació.

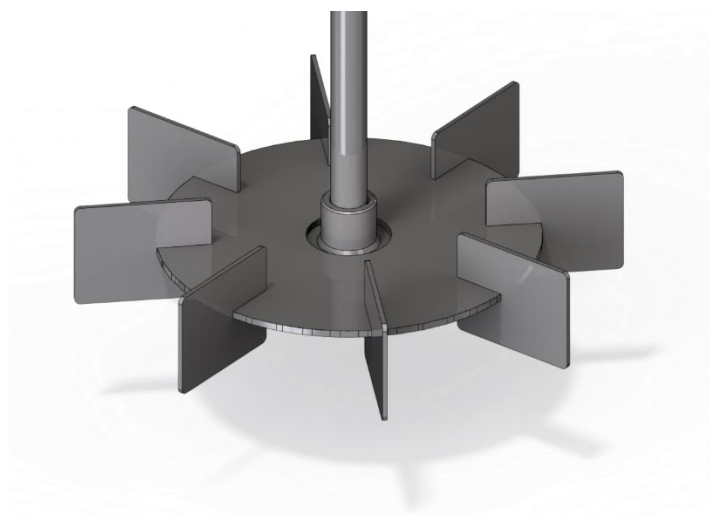


Figura 11.7. Agitador de pales planes

Pel disseny de l'agitador per aquest tanc pulmó, el primer pas a realitzar es el de calcular els requeriments físics d'aquest, seguint les correlacions estàndards. <sup>[5]</sup>

El primer pas es calcular les dimensions generals de l'agitador.

$$Da = E = \frac{Di}{3} \quad \text{Equació 11.38}$$

$$J = \frac{Di}{12} \quad \text{Equació 11.39}$$

$$W = \frac{Di}{5} \quad \text{Equació 11.40}$$

$$f = 0,1 \cdot Di \quad \text{Equació 11.41}$$

$$L = \frac{Da}{4} \quad \text{Equació 11.42}$$

$$Ha = H + W - E \quad \text{Equació 11.43}$$

On:

Da: Diàmetre de l'agitador (m)

E: Distància de l'agitador fins al fons del tanc (m)

Di: Diàmetre intern del tanc (m)

J: Amplada del deflector (m)

W: Amplada de les pales (m)

f: Espai entre els deflectors i les parets del tanc (m)

L: Alçada de les pales (m)

Ha: Alçada de l'agitador (m)

H: Alçada del tanc (m)

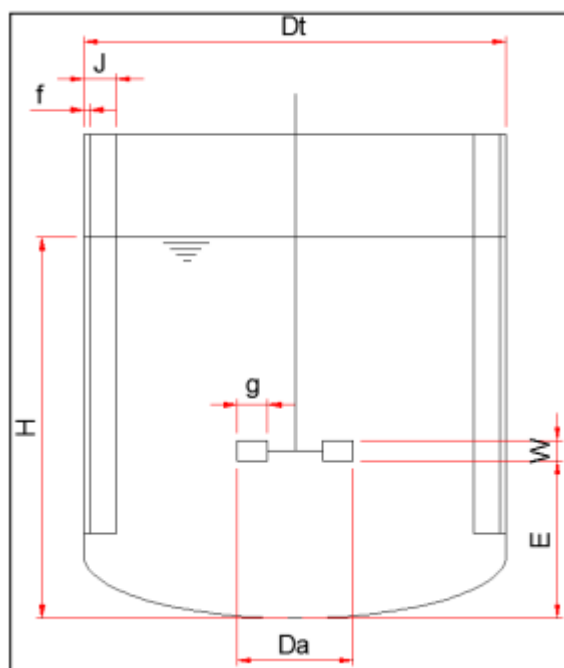


Figura 11.8. Dimensions d'un agitador

$$Da = E = \frac{1,583}{3} = 0,527 \text{ m}$$

$$J = \frac{1,583}{12} = 0,13 \text{ m}$$

$$W = \frac{1,583}{5} = 0,316 \text{ m}$$

$$f = 0,1 \cdot 1,583 = 0,158 \text{ m}$$

$$L = \frac{0,527}{4} = 0,139 \text{ m}$$

$$Ha = H + W - E = 2,375 + 0,316 - 0,527 = 2,164 \text{ m}$$

Per tal de poder calcular la potència de l'agitador i del numero de Reynolds, es necessari conèixer la velocitat angular que requereix l'agitador. Aquest valor es calcula a partir de la següent equació:

$$\left( \frac{N \cdot Da^2 \cdot \mu}{\sigma \cdot Di} \right) \cdot \left( \frac{\rho \cdot \sigma^3}{g \cdot \mu^4} \right)^{0,25} = 2 \cdot \left( \frac{H}{Di} \right)^{0,5} \quad \text{Equació 11.44}$$

On:

N: Velocitat angular de l'agitador (rpm)

$\rho$ : Densitat de la mescla ( $\text{kg/m}^3$ )

$\mu$ : Viscositat de la mescla (Pa·s)

$\sigma$ : Contant entre 0,2 i 0,7

g: Gravetat estàndard ( $\text{m/s}^2$ )

$$\left( \frac{N \cdot 0,527^2 \cdot 0,0001939}{0,4 \cdot 1,583} \right) \cdot \left( \frac{872,6 \cdot 0,4^3}{9,8 \cdot 0,0001939^4} \right)^{0,25} = 2 \cdot \left( \frac{2,375}{1,583} \right)^{0,5}$$

La velocitat angular te una valor de 3,60 rpm

Una vegada obtingut el valor de la velocitat angular, es procedeix a calcular el numero de Reynolds.

$$Re = \frac{N \cdot Da^2 \cdot \rho}{\mu} \quad \text{Equació 11.45}$$

On:

Re: Numero de Reynolds

N: Velocitat angular de l'agitador (rpm)

Da: Diàmetre de l'agitador (m)

$\rho$ : Densitat de la mescla ( $\text{kg/m}^3$ )

$\mu$ : Viscositat de la mescla (Pa·s)

$$Re = \frac{3,60 \cdot 0,527^2 \cdot 872,6}{0,0001939} = 4.518.724,2$$

A partir del numero de Reynolds i havent escollit un agitador de 6 pales planes, mirant la Figura 9, s'obté en numero de potència necessari per calcular la potència de l'agitador.

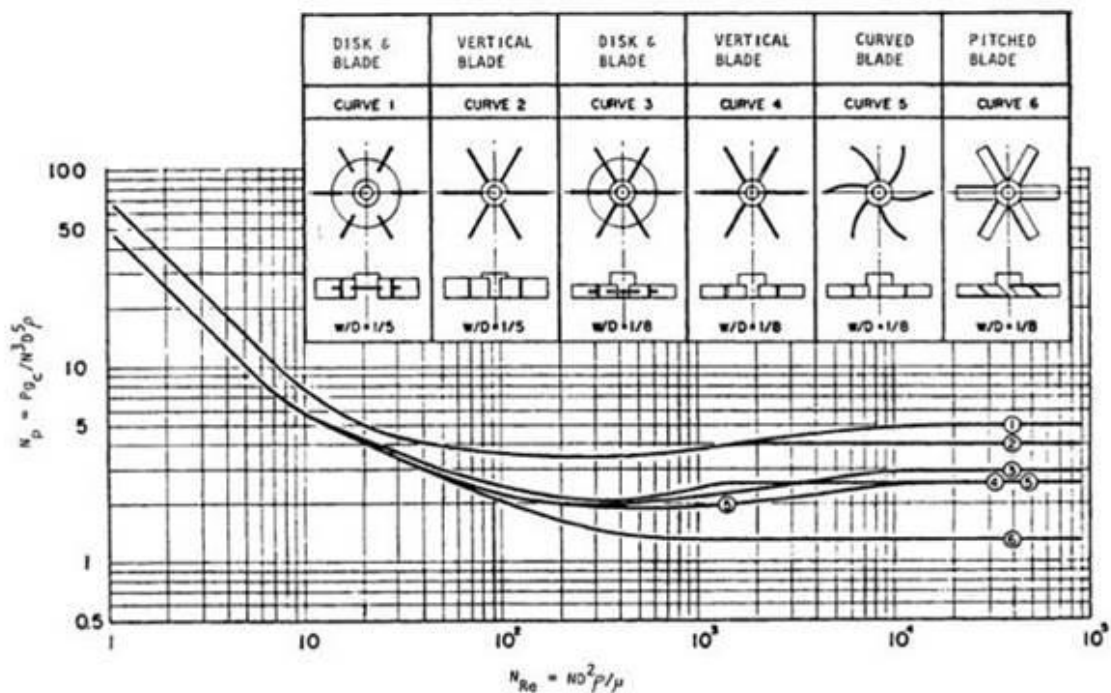


Figura 11.9. Relació entre Reynolds i el numero de potència segons agitador

El numero de potència obtingut és 5

Obtingut el valor del numero de potència, es procedeix a calcular la potència necessària de l'agitador segons la següent formula:

$$P = N_p \cdot \rho \cdot N^3 \cdot Da^5 \quad \text{Equació 11.46}$$

On:

P: Potència de l'agitador (W)

$N_p$ : Numero de potència

$\rho$ : Densitat de la mescla (kg/m<sup>3</sup>)

N: Velocitat angular de l'agitador (rpm)

Da: Diàmetre de l'agitador (m)

$$P = 5 \cdot 872,6 \cdot 3,60^3 \cdot 0,527^5 = 8.368,67 \text{ W} = 8,368 \text{ kW}$$

Per últim, una vegada calculada la potència de l'agitador, es calcula la potència consumida, tenint en compte que el rendiment del motor es del 80%.

$$P_{consum} = \frac{P}{\eta} \quad \text{Equació 11.47}$$

On:

$P_{consum}$ : Potència consumida (W)

P: Potència de l'agitador (W)

$\eta$ : Rendiment del motor (%)



$$P_{consum} = \frac{8,368}{0,8} = 10,46 \text{ kW}$$

### 11.3.2 Mesclador M-500

El mesclador M-500 te la funció d'homogeneïtzar la mescla de benzè el qual es recirculat de la columna CD-402 amb el dietilbenzè procedent de la CD-403 i d'assegurar i mantenir el flux constant al procés.

Per determinar el volum d'aquest mesclador es parteix del cabal d'entrada que es de 16,84 m<sup>3</sup>/h, la pressió d'operació que és 2000 kPa, la temperatura d'operació que és de 300,8 °C, la densitat de la mescla que és 691,7 kg/m<sup>3</sup> i la seva viscositat que és 0,0002253 Pa·s.

Tot seguit, es determina el temps de residència que tindrà la mescla segons les propietats dels component. En aquest cas s'ha determinat que el temps de residència per aquest tanc pulmó sigui de 2 minuts (0,033h).

Una vegada es te determinat el cabal d'entrada i el temps de residència, es pot calcular el volum necessari del tanc, aplicant-li un factor de sobredimensionament d'un 15%.

La metodologia per dissenyar el tanc del mesclador ha sigut la mateixa que la utilitzada en el tanc pulmó TP-200 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest tanc pulmó, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

*Taula 11.11. Dades obtingudes pel disseny de M-500*

Paràmetres	Valor
<b>Material de construcció</b>	Acer Inoxidable 316 L (SS 316 L)
<b>Volum (m<sup>3</sup>)</b>	0,646
<b>Diàmetre del tanc pulmó (m)</b>	0,818
<b>Alçada del tanc pulmó (m)</b>	1,227
<b>Pressió de disseny (kPa)</b>	2200
<b>Temperatura de disseny (°C)</b>	330,88
<b>Radi interior del capçal (m)</b>	0,813
<b>Gruix paret tanc pulmó (mm)</b>	12,448
<b>Gruix capçal tanc pulmó (mm)</b>	15,136
<b>Alçada capçal (m)</b>	0,224
<b>Alçada total (m)</b>	1,675
<b>Pes tanc pulmó buit (kg)</b>	444,122
<b>Pes tanc pulmó amb aigua (kg)</b>	1.250,42
<b>Pes tanc pulmó en operació (kg)</b>	832,397

Un cop calculades les dimensions del tanc del mesclador es procedeix a dimensionar el mesclador. La metodologia seguida ha sigut la mateixa utilitzada en el mesclador M-200 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest mesclador, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

Taula 11.12. Dades de l'agitador M-500

<b>Diàmetre de l'agitador (m)</b>	0,273
<b>Distància de l'agitador al fons del tanc (m)</b>	0,273
<b>Amplada del deflector (m)</b>	0,068
<b>Amplada de les pales (m)</b>	0,164
<b>Espai entre deflectors i parets del tanc (m)</b>	0,082
<b>Alçada de les pales (m)</b>	0,068
<b>Alçada de l'agitador</b>	1,118
<b>Constant</b>	0,400
<b>Gravetat (m/s<sup>2</sup>)</b>	9,800
<b>Velocitat angular de l'agitador (rpm)</b>	7,392
<b>Reynolds</b>	1.688.444,512
<b>Numero de potència</b>	5,000
<b>Potència agitador (kW)</b>	2,109
<b>Potència consumida (kW)</b>	2,636

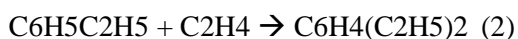
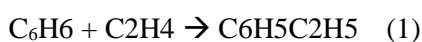
#### 11.4 Reactors d'alquilació

En aquest apartat s'exposa la metodologia seguida per la realització del càlcul utilitzada pel disseny del reactor catalític multitubular R-301, R-302 i R-500.

S'ha escollit la utilització de tres reactors per tal de tenir un major control de la temperatura. Entre reactor i reactor existeix un bescanviador de calor que assegura que la mescla entra al següent reactor a una temperatura de 400 °C.

La producció de etilbenzè es duu a terme a través de l'etilè i el benzè en presència del catalitzador ZSM-5. La reacció es duu a terme en un reactor multitubular en el qual a les parets dels tubs del reactor es troba el catalitzador.

Les reaccions que tenen lloc en els reactors són:



La cinètica de cada reacció és la següent <sup>[7]</sup>:

$$-r_1 = 1,00 \cdot 10^6 \cdot e^{-\frac{22.500}{R \cdot T}} \cdot C_{\text{etilè}}^1 \cdot C_{\text{benzè}}^1 \quad \text{Equació 11.48}$$

$$-r_2 = 6,00 \cdot 10^5 \cdot e^{-\frac{22.500}{R \cdot T}} \cdot C_{\text{etilè}}^1 \cdot C_{\text{etilbenzè}}^1 \quad \text{Equació 11.49}$$

$$-r_3 = 3,80 \cdot 10^6 \cdot e^{-\frac{20.000}{R \cdot T}} \cdot C_{\text{etilè}}^2 \cdot C_{\text{toluè}}^1 \quad \text{Equació 11.50}$$

Els reactius entren en fase gas hi no es dona cap canvi de fase amb la reacció, d'aquesta manera, els productes obtinguts també es trobaran en fase gas i el catalitzador es mantindrà en estat sòlid. Per tant el reactor és multifàsic.

El reactor treballa de manera adiabàtica, per tant no es necessari afegir un sistema de refrigeració addicional.

Una vegada definida la cinètica de les reaccions, el tipus de reactor i les característiques del catalitzador, es procedeix a disseny el reactor mutitubular catalític.

### 11.4.1 Reactor d'alquilació R-301

El primer pas és la de calcular el volum que ha de tenir el reactor per tal d'obtenir la conversió desitjada. Per realitzar aquest càlcul s'ha utilitzat el programa informàtic Aspen HYSYS.

Per començar s'han seleccionat el els components necessaris per tal de dur a terme la reacció.

Component List View: Component List - 1 [HYSYS Databanks]

Source Databank: HYSYS

Component	Type	Group
Benzene	Pure Component	
14-EBenzene	Pure Component	
Ethane	Pure Component	
Toluene	Pure Component	
E-Benzene	Pure Component	
Ethylene	Pure Component	
Propene	Pure Component	
Methane	Pure Component	
Oxygen	Pure Component	
Nitrogen	Pure Component	
H2O	Pure Component	
CO	Pure Component	
CO2	Pure Component	

**Figura 11.10.** Components involucrats en la reacció

A continuació es selecciona el paquet termodinàmic que es vol utilitzar. Per aquest cas s'ha seleccionat el model de Peng Robinson el qual es un model semiempíric que modifica el terme de pressió d'atracció de l'equació de van der Waals amb la finalitat de determinar amb major precisió el valor de la densitat de la fase líquida i el valor de la pressió de vapor de substàncies pures i mescles multicomponents. <sup>[6]</sup>

Com s'ha comentat amb anterioritat, la reacció que es duu a terme és una reacció catalítica heterogènia, per tant es selecciona aquest tipus de reacció.

Un cop seleccionat el tipus de reacció es procedeix a traslladar les dades de les reaccions que estan involucrades, com es pot observar en la Figura 11.

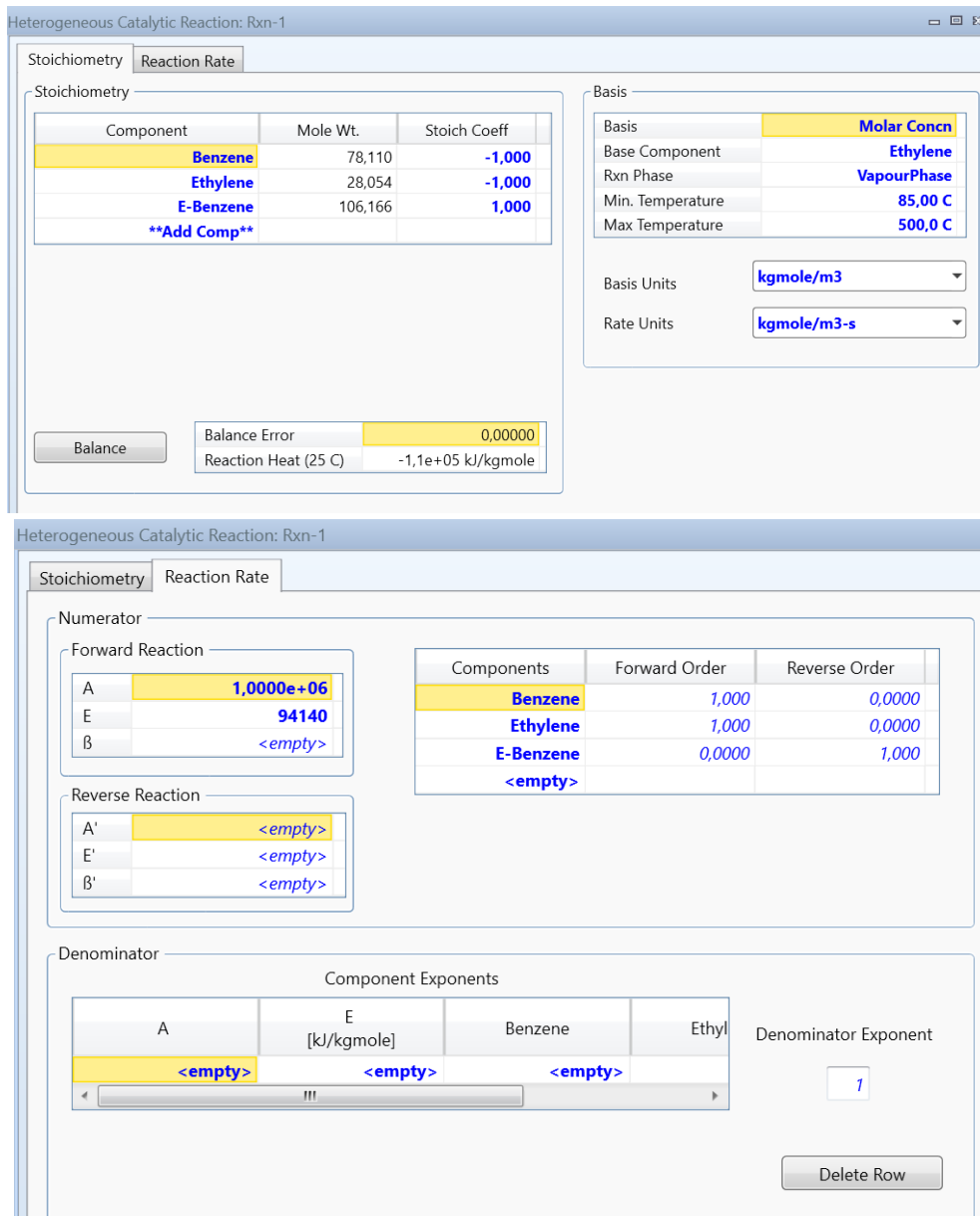


Figura 11.11. Dades cinètiques de les reaccions <sup>[7]</sup>

Una vegada es tenen totes les dades de les reaccions definides es procedeix a calcular el volum necessari.

El tipus de reactor escollit serà un reactor de flux pistó, el qual és l'adequat per tal de poder dur a terme la reacció de tipus catalítica heterogènia i el qual treballa adiabàticament, per tant no hi ha bescanvi de calor amb l'exterior tal com es pot observar en la Figura 12.

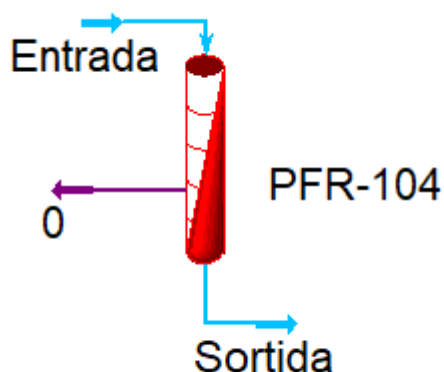


Figura 11.12. Reactor de flux pistó

El següent pas és el de plasmar les dades del catalitzador, juntament amb la porositat que es vol tenir dins del reactor tal com es mostra a la Figura 13.

Plug Flow Reactor: PFR-101 - Set-1

Design Reactions Rating Worksheet Performance Dynamics

**Reactions**

Overall  
 Details  
 Results

Reaction Info

Reaction Set: Set-1

Initialize segment reactions from:

Current  Previous  Re-init

Integration Information

Number of Segments	20
Minimum Step Fraction	1,0e-06
Minimum Step Length	1,000e-005 m

Catalyst Data

Particle Diameter	1,000e-003 m
Particle Sphericity	1,000
Solid Density	7200 kg/m <sup>3</sup>
Bulk Density	1440 kg/m <sup>3</sup>
Solid Heat Capacity	0,9623 kJ/kg-C

Figura 11.13. Dades del catalitzador

Tot seguit es procedeix a determinar el volum del reactor segons el grau de conversió que es vol obtenir. S'ha de tenir un equilibri entre el volum escollit i la conversió obtinguda.

Es tracta d'anar variant el valor del volum de reactor fins aconseguir un valor del grau de conversió el qual satisfà les necessitats de producció d'etilbenzè que te la planta que en aquest cas ha de ser de 350.000 Tn/any.

En aquest cas s'ha decidit que el reactor tingui un volum de 110 m<sup>3</sup> totals, dels quals operatius només es tenen 88m<sup>3</sup> ja que els 22m<sup>3</sup> restants estan ocupats per el catalitzador tal com es pot observar en la Figura 14.

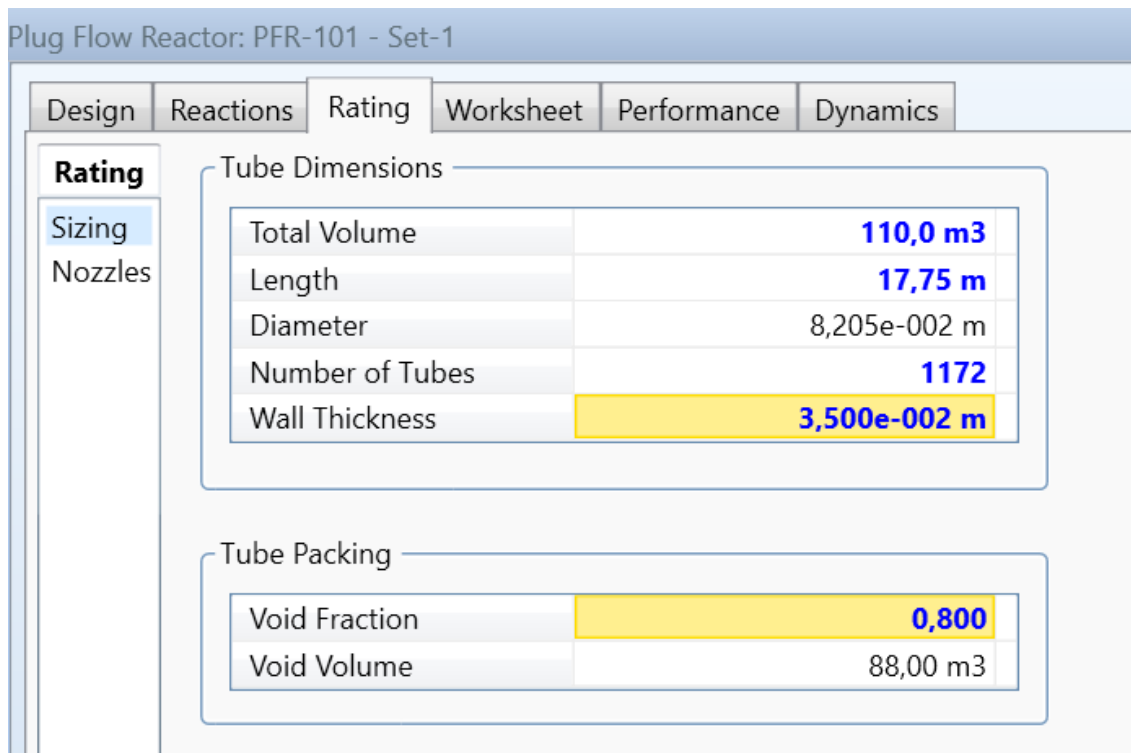


Figura 11.14. Dades obtingudes del reactor

Per últim s'observa quina es la conversió obtinguda del reactor per tal d'assegurar-se que es suficient per complir amb la producció. Com es pot observar en la Figura 15, la conversió d'aquest primer reactor respecte del etilè, el qual es el nostre reactiu, es de 86,35%, tot i que en aquest reactor es duen reaccions simultànies respecte al toluè, el qual entra al procés com a impuresa del etilè.

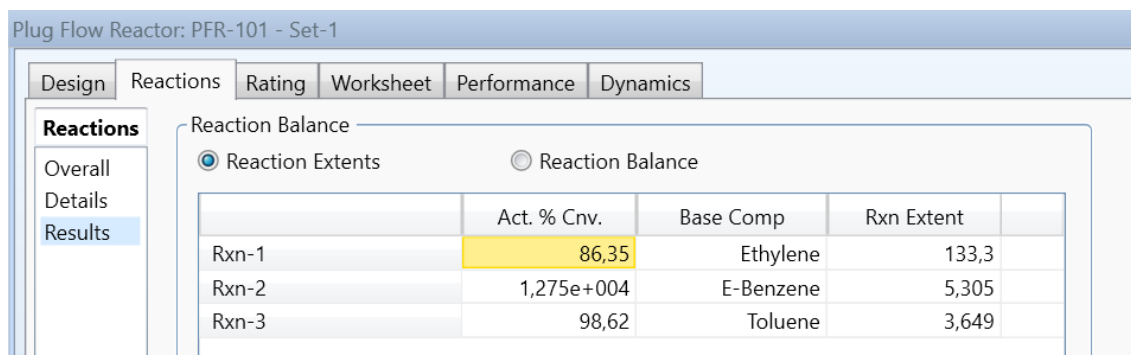


Figura 11.15. Dades de conversió obtingudes en el reactor R-301

Un cop obtingut el volum del reactor, es procedeix a calcular tots els paràmetres interiors els quals son característics d'un reactor multitubular, seguint el mètode de Kern <sup>[8]</sup>.

## Disseny del reactor

### Càlcul del número de tubs

En primer lloc es decideix quines dimensions tindran els tubs per tal de definir el número de tubs necessaris per dur a terme la reacció desitjada. S'ha estipulat que els tubs tindran un diàmetre de 0,088 m, una longitud de 17,75 m amb un espessor de 3,562 mm.

Amb aquestes dades es pot calcular el volum d'un tub de la següent manera:

$$V_{tub} = \frac{\pi}{4} \cdot Di^2 \cdot L \quad \text{Equació 11.51}$$

On:

$V_{tub}$ : Volum d'un tub ( $m^3$ )

$Di$ : Diàmetre interior del tub (m)

$L$ : Longitud del tub (m)

$$V_{tub} = \frac{\pi}{4} \cdot 0,088^2 \cdot 17,75 = 0,108 \text{ m}^3$$

Una vegada tenim el volum d'un tub, es pot calcular el número de tubs necessaris a partir del volum del reactor.

$$Nt = \frac{V_{reactor}}{V_{tub}} \quad \text{Equació 11.52}$$

On:

$Nt$ : Número de tubs

$V_{reactor}$ : Volum del reactor ( $m^3$ )

$V_{tub}$ : Volum d'un tub ( $m^3$ )

$$Nt = \frac{126,5}{0,108} = 1172$$

La distribució dels tubs pot ser de tres configuracions diferents: triangular, quadrada o romboidal. El pitch és la distància entre els centres de dos tubs consecutius. En aquest cas s'ha seleccionat treballar amb un pitch triangular donat que aquest proporciona velocitats de transferència més elevades. A canvi, la pèrdua de pressió serà major. El pitch recomanat es 1,25 vegades el diàmetre exterior del tubs.

$$pitch = 1,25 \cdot D_E = 1,25 \cdot 0,095 = 0,119 \text{ m} \quad \text{Equació 11.53}$$

El següent pas es el de determinar el diàmetre de la carcassa. Aquest es calcula mitjançant la suma del feix de tubs ( $D_b$ ) i l'espai que existeix entre el feix de tubs i la paret externa de la carcassa, que aquest depèn del tipus de carcassa que s'hagi escollit.

El diàmetre de deix de tubs ( $D_b$ ) es calcula a partir de l'equació X on  $K_1$  i  $n_1$  son valor constant que depenent del tipus de pitch seleccionat (triangular) i el número de passes per tubs ( $n_{pt}$ ). S'ha seleccionat que aquest cas que el número de passos per tubs sigui 8.

Taula 11.13. Valor de  $K_1$  i  $n_1$  segons el tipus de pitch i número de passos.

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

Com es pot observar en la Taula 13, els valors de  $K_1$  i  $n_1$  seran 0,0365 i 2,675 respectivament.

$$D_b = D_E \cdot \left(\frac{Nt}{K_1}\right)^{1/n_1} = 0,095 \cdot \left(\frac{1172}{0,0365}\right)^{1/2,675} = 4,257 \text{ m} \quad \text{Equació 11.54}$$

Una vegada calculat el diàmetre de deix de tubs, es procedeix a calcular l'espai que existeix entre el feix de tubs i la paret exterior de la carcassa ( $D_S - D_b$ ). S'ha decidit utilitzar la carcassa tipus S/W (Split-ring floating head) segons el mostra a la Figura 16.

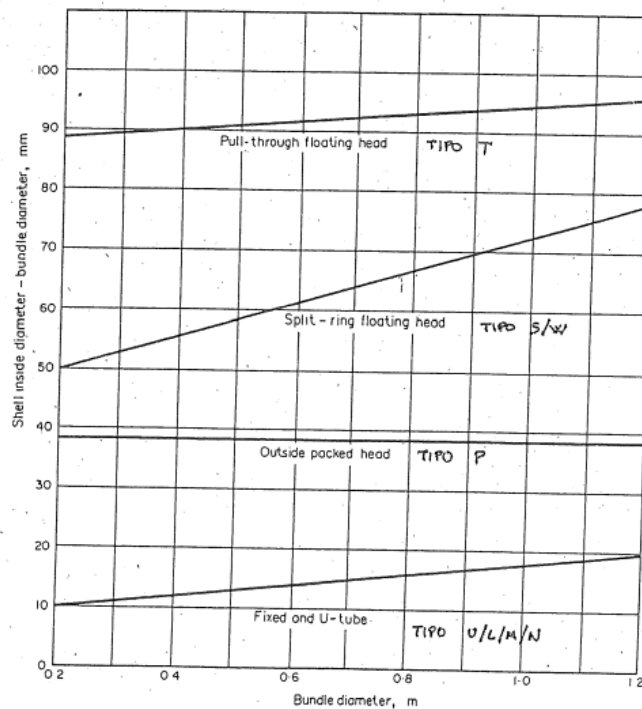


Figura 11.16. Relació de distància des de feix de tubs fins carcassa segons el tipus

El valor de  $D_S - D_b$  és de 0,161 m. Per tant, el diàmetre de la carcassa tindrà un valor de 4,42 m.



A continuació, s'ha de comprovar que la relació entre la longitud i el diàmetre de carcassa estigui dins del rang compres entre 4 i 6. En aquest cas el valor es troba en 4,01, per tant es pot continuar amb el disseny.

El següent pas es el de calcular la velocitat del fluid que circula per tubs, que aquest depèn de l'àrea de pas d'un sol tub i el numero de tubs per pas.

$$v_t = \frac{m_t}{\rho_t \cdot A_{pas\ 1\ tub} \cdot N_{tp}} \quad \text{Equació 11.55}$$

On:

$v_t$ : Velocitat fluid tubs (m/s)

$m_t$ : Cabal fluid tubs (kg/s)

$\rho_t$ : Densitat fluid tubs (kg/m<sup>3</sup>)

$A_{pas\ 1\ tub}$ : Àrea de pas d'un sol tub (m<sup>2</sup>)

$N_{tp}$ : Número de tubs per pas

$$A_{pas\ 1\ tub} = \frac{\pi}{4} \cdot Di^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 0,088^2 = 0,0061\ m^2 \quad \text{Equació 11.56}$$

$$N_{tp} = \frac{N_t}{n_{pt}} = \frac{1172}{8} = 146 \quad \text{Equació 11.57}$$

$$v_t = \frac{27,83}{25,16 \cdot 0,0061 \cdot 146} = 1,24\ m/s$$

Un cop determinada la velocitat de circulació per tubs, es calcula el temps de residència.

$$\tau = \frac{n_{pt} \cdot L}{v_t} = \frac{8 \cdot 17,75}{1,24} = 114,36\ s \quad \text{Equació 11.58}$$

Tot seguit s'ha de calcular les característiques geomètriques de les pantalles deflectores. A l'hora de realitzar aquest càlcul, s'han de tenir en compte dos paràmetres:

- L'espai que queda lliure entre la pantalla i la carcassa (baffle cut). Aquest s'expressa com un percentatge del diàmetre de carcassa. Els valor òptims estan compresos entre el 20 i 25%. Per realitzar aquest disseny s'ha considerat un valor del 25%.
- L'espai entre pantalles ( $I_B$ ) oscil·la entre 0,2 i 1 vegades el diàmetre de la carcassa, sent el rang òptim entre 0,3 i 0,5. Per tant, s'ha agafat un valor de 0,4 vegades el diàmetre de la carcassa.

$$baffle\ cut = 0,25 \cdot D_S = 0,25 \cdot 4,42 = 1,105\ m \quad \text{Equació 11.59}$$

$$I_B = 0,3 \cdot D_S = 0,3 \cdot 4,42 = 1,76 \quad \text{Equació 11.60}$$

$$\text{número de pantalles} = \frac{L}{I_B} - 1 = \frac{17,75}{1,76} - 1 = 9 \quad \text{Equació 11.61}$$

### Balanç d'energia en cas d'alerta

La reacció que es du a terme en una reacció exotèrmica i adiabàtica, per tant, no hi ha bescanvi de calor amb l'exterior. Però en cas de que la reacció es descontrolés i superés els 500 graus, la qual és la temperatura màxima a la que es pot dur la reacció, es refrigeraria el reactor amb aigua fins tornar als 400 graus. Aquesta operació només es dura a terme en un cas extrem.

En aquest cas el calcula el calor que s'hauria d'extreure a partir de l'entalpia de reacció i el cabal del reactor.

$$Q = \text{cabal} \cdot \Delta H_r = 11.200 \cdot 1.487 = 16,65 \cdot 10^6 \text{ KJ/h} \quad \text{Equació 11.62}$$

### Temperatura mitjana logarítmica

El fluid refrigerant és aigua i tindria un salt tèrmic de 25°C a 200°C i la temperatura del reactor tindria un salt tèrmic de 500°C a 400°C.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{\text{reac,entrada}} - T_{\text{aigua,entrada}}) - (T_{\text{reac,sortida}} - T_{\text{aigua,sortida}})}{\ln\left(\frac{T_{\text{reac,entrada}} - T_{\text{aigua,entrada}}}{T_{\text{reac,sortida}} - T_{\text{aigua,sortida}}}\right)} \quad \text{Equació 11.63}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(500 - 25) - (400 - 200)}{\ln\left(\frac{500 - 25}{400 - 200}\right)} = 317,92 \text{ }^\circ\text{C}$$

### Àrea de transferència de calor

El càlcul de l'àrea de transferència de calor ve definida per la següent equació:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{ml}} \quad \text{Equació 11.64}$$

On:

A: Àrea de transferència de calor (m<sup>2</sup>)

Q: Calor a extreure (KJ/h)

U: Coeficient global de transmissió (W/m<sup>2</sup>°C)

$\Delta T_{ml}$ : Temperatura mitjana logarítmica (°C)

Per el coeficient de transferència global s'ha escollit bibliogràficament un valor de 300 W/m<sup>2</sup>°C<sup>[9]</sup>. Per tant, ja es pot calcular l'àrea de transferència de calor.

$$A = \frac{16,65 \cdot 10^6 \cdot 10^3}{300 \cdot 317,92} = 48,5 \text{ m}^2$$

Per últim, es calcula el cabal d'aigua de refrigeració necessària per absorbir la calor generada.

$$m_{H_2O} = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{16,65 \cdot 10^6}{4,186 \cdot 100} = 39.785,95 \text{ kg/h} \quad \text{Equació 11.65}$$

## Disseny mecànic

### Material

Tenint en compte les propietats dels fluids a tractar s'ha decidit utilitzar l'acer inoxidable 316 L, també anomenat SS 316 L.

### Pressió de disseny

Per tal de poder calcular la pressió de disseny dels tubs reactor s'utilitzen les equacions 21 i 22. La pressió de disseny escollida serà la més elevada de les calculades donat que d'aquesta manera es sobredimensiona els tubs del reactor per no tenir majors problemes.

$$P_1 = 1,1 \cdot P_o \quad \text{Equació 11.21}$$

$$P_2 = P_o + 196,13 \quad \text{Equació 11.22}$$

On:

$P_o$ : Pressió màxima d'operació normal de procés als tubs (kPa)

$P_1$ : Pressió de disseny (kPa)

$P_2$ : Pressió de disseny (kPa)

La pressió màxima d'operació normal de procés als tubs d'aquest reactor és 1985 kPa.

$$P_1 = 1,1 \cdot 1985 = 2183,5 \text{ kPa}$$

$$P_2 = 1985 + 196,13 = 2181,13 \text{ kPa}$$

Per tant, segons els valor obtinguts, el els tubs del reactor es dissenyaran per a una pressió de 2200 kPa.

En quant a la carcassa i el capçal s'ha dissenyat per a una pressió màxima d'operació de 500 kPa.

$$P_1 = 1,1 \cdot 500 = 550,00 \text{ kPa}$$

$$P_2 = 500 + 196,13 = 696,13 \text{ kPa}$$

Per tant, segons els valor obtinguts, la carcassa del reactor i el capçal es dissenyarà per a una pressió de 696,13 kPa.

### Temperatura de disseny

La temperatura de disseny serà calculada d'una manera similar a la pressió de disseny. A partir de les equacions 23 i 24 s'escollirà el valor més elevat i aquest serà la temperatura de disseny dels tubs.

$$T_1 = T_o + 0,1 \cdot T_o \quad \text{Equació 11.23}$$

$$T_2 = T_o + 15 \quad \text{Equació 11.24}$$

On:

$T_o$ : Temperatura màxima d'operació normal de procés dels tubs (°C)

$T_1$ : Temperatura de disseny (°C)

$T_2$ : Temperatura de disseny (°C)

La temperatura màxima d'operació normal de procés als tubs d'aquest reactor és 1985 kPa.

$$T_1 = 462,2 + 0,1 \cdot 462,2 = 508,42 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 462,2 + 15 = 477,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Per tant, segons els valors obtingut, els tubs del reactor es dissenyaran a una temperatura de 508,42 °C.

En quant a la carcassa i al capçal, s'ha dissenyat per a una temperatura d'operació de 380°C

$$T_1 = 380 + 0,1 \cdot 380 = 418 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 380 + 15 = 395 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Per tant, segons els valor obtinguts, la carcassa del reactor i el capçal es dissenyarà per a una temperatura de 418°C.

## Juntes

Per tal d'escollir el tipus de junta a utilitza, s'empra la norma UW-12 pertanyent al codi ASME de la secció VIII-Divisió 1. En aquest cas s'ha decidit utilitza per a la realització dels càlculs el valor de la junta tipus 1, la quals te una eficiència de junta de 0,85.

## Esforç del material

L'esforç s'ha determinat mitjançant el material utilitzat, que en aquest cas el l'acer inoxidable segons les restriccions de la Figura 17.

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

Figura 11.17. Esforç dels materials

Per tant i a partir de la Figura 17, es considera un valor d'esforç del material de  $15.700 \text{ lb/pulg}^2 = 1082,48 \text{ bar} = 1,08 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ .

### Gruix dels tubs

Per tal de realitzar el càlcul del gruix dels tubs s'utilitza les equacions indicades per la codificació ASME.

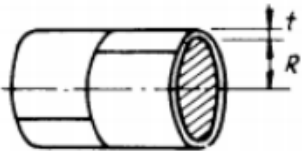
	<b>CASCO CILINDRICO (COSTURA LONGIT.)<sup>1</sup></b>	
	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SE t}{R + 0.6t}$
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Generalmente rige el esfuerzo en la costura longitudinal. Ver página anterior.</li> <li>2. Cuando el espesor de pared exceda de la mitad del radio interior o P exceda de <math>0.385 SE</math>, se aplicarán las fórmulas dadas en el Apéndice del Código, 1-2.</li> </ol>		

Figura 11.18. Guia pel disseny del gruix dels tubs i carcassa

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C. A. \quad \text{Equació 11.25}$$

On:

t: Gruix de la paret dels tubs o carcassa(m)

P: Pressió de disseny (Pa)

R: Radi interior dels tubs o carcassa (m)

S: Esforç del material (Pa)

E: Eficiència de la junta

C.A.: Marge de corrosió (m)

En el cas dels tubs, l'espessor serà el següent:

$$t = \frac{2183500 \cdot 0,044}{1,08 \cdot 10^8 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 2183500} + 0,0025 = 0,00356 \text{ m} = 3,562 \text{ mm}$$

L'espessor dels tubs serà de 3,562 mm.

En el cas de la carcassa, l'espessor serà el següent:

$$t = \frac{696130 \cdot 4,420}{1,08 \cdot 10^8 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 696130} + 0,0025 = 0,019 \text{ m} = 19,33 \text{ mm}$$

L'espessor de la carcassa serà de 19,33 mm.

## Dimensionament del capçal

El capçal que s'ha escollit és el de tipus toriesfèric, els quals son típics per a pressions baixes i mitges.

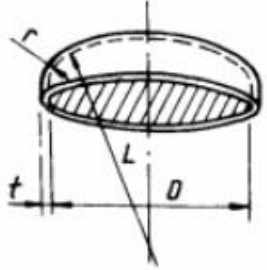
	CABEZA ASME BRIDADA Y ALABEADA (CABEZA TORISFERICA)	
	Cuando $L/r = 16 \frac{2}{3}$	
	$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$
Cuando $Lr$ / menor de $16 \frac{2}{3}$		
$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$	

Figura 11.19. Guia pel disseny d'un capçal toriesfèric

Per tal de saber quina equació s'ha d'utilitzar, s'ha de calcular la relació entre el radi intern del capçal, el qual es igual al diàmetre intern de la torre i el radi interior de curvatures, el qual es un 10% del radi intern del capçal.

$$\frac{L}{r} \quad \text{Equació 11.26}$$

On:

L: Radi intern del capçal (m)

r: Radi interior de les curvatures (m)

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 11.20. Determinació del factor M

$$\frac{L}{r} = \frac{4,420}{0,4420} = 10 \rightarrow M = 1,54$$

Una vegada obtingut el valor M, es procedeix a calcular el gruix del capçal mitjançant l'Equació 27.

$$t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} \quad \text{Equació 11.27}$$

On:

t: Gruix de la paret (m)

P: Pressió de disseny (Pa)

L: Radi interior del capçal (m)

M: Factor M

S: Esforç del material (Pa)

E: Eficiència de la junta

$$t = \frac{696130 \cdot 4,420 \cdot 1,54}{2 \cdot 1,08 \cdot 10^8 \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 696130} = 0,02582 \text{ m} = 25,82 \text{ mm}$$

L'espessor del capçal serà de 25,82 mm.

### Diàmetre exterior

Una vegada calculats els gruixos del tanc, es procedeix a fer el càlcul del diàmetre exterior del reactor per tal de poder calcular el capçal toriesfèric tipus klopper..

$$D_{ext \text{ carcassa}} = D_{int \text{ carcassa}} + 2 \cdot t_c \quad \text{Equació 11.28}$$

On:

$D_{ext \text{ tanc}}$ : Diàmetre extern de la carcassa reactor (m)

$D_{int \text{ tanc}}$ : Diàmetre intern de la carcassa reactor (m)

$t_c$ : Gruix de la carcassa del reactor (m)

$$D_{ext \text{ carcassa}} = 4,420 + 2 \cdot 0,019,33 = 4,458 \text{ m}$$

### Dimensions dels capçals

Per determinar les dimensions del capçal son necessaris saber el diàmetre exterior i l'espessor d'aquest. En aquest cas el diàmetre exterior és de 4,458 m i l'espessor és de 25,826 mm.

A continuació es procedeix a realitzar el càlcul dels paràmetres mitjançant una calculadora de fons tipus toriesfèric.

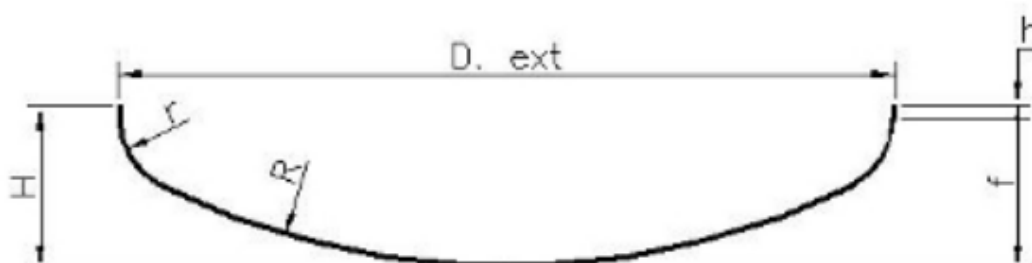


Figura 11.21. Dimensions capçal tipus toriesfèric

A la Taula 14 es mostren els valors obtinguts del capçal toriesfèric.

Taula 11.14. Dimensions del capçal toriesfèric

<b>D ext (m)</b>	4,458
<b>Espessor (mm)</b>	25,826
<b>R (m)</b>	4,458
<b>r (m)</b>	0,4458
<b>h (m)</b>	0,090
<b>f (m)</b>	0,851
<b>H (m)</b>	0,967

### Alçada total del reactor

Per calcular l'alçada total del reactor es necessari haver calculat prèviament tant el valor de l'alçada del reactor com la del capçal. Amb aquests valors es s'obté l'Equació 29.

$$h_t = h_c + 2 \cdot H \quad \text{Equació 11.29}$$

On:

ht: Alçada total del reactor (m)

hc: Alçada de la part cilíndrica del reactor (m)

TH: Alçada total del capçal (m)

$$h_t = 17,75 + 2 \cdot 0,967 = 19,684 \text{ m}$$

### Pes del reactor buit

El reactor es divideix en quatre parts els quals son el capçal interior i el superior, els quals son iguals, els tubs i la carcassa del reactor. Per realitzar el càlcul del pes del reactor, cal determinar el volum dels capçals amb l'Equació 30, la dels tubs amb l'Equació 66 i la de la carcassa amb l'Equació 31.

$$V_{cap} = 0,1 \cdot (R_{ext\ cap}^3 - R^3) + 0,1 \cdot (r_{ext\ cap}^3 - r^3) + \frac{\pi \cdot h}{4} \cdot (D_{ext\ reac}^2 - D_{int\ reac}^2)$$

Equació 30

$$V_{tanc} = \frac{\pi \cdot h_c}{4} \cdot (D_{ext\ reac}^2 - D_{int\ reac}^2) \quad \text{Equació 11.31}$$

$$V_{tubs} = \frac{\pi \cdot h_c}{4} \cdot (D_{ext\ tub}^2 - D_{int\ tub}^2) \cdot n^{\circ} \text{ tubs} \quad \text{Equació 11.66}$$

Una vegada obtinguts els volums dels capçals, de la carcassa i dels tubs del reactor, l'alçada total es calcular mitjançant l'Equació 67.

$$V_{paret\ react} = V_{carcassa} + V_{tubs} + 2 \cdot V_{cap} \quad \text{Equació 11.67}$$

Obtingut el volum total del reactor, es procedeix a calcular el seu pes tenint en compte que la densitat del material SS 316 L és de 7950 kg/m<sup>3</sup>.



$$M_{react\ buit} = V_{paret\ reac} \cdot \rho_{acer} \quad \text{Equació 11.33}$$

On:

$V_{cap}$ : Volum dels capçals del reactor ( $m^3$ )

$R_{ext\ cap}$ : Radi extern del capçal (m)

$R$ : Radi del capçal (m)

$r_{ext\ cap}$ : Radi extern de la curvatura dels capçals (m)

$r$ : Radi de la curvatura dels capçals (m)

$h$ : Distància fins la curvatura del capçal (m)

$V_{carcassa}$ : Volum de la carcassa del reactor ( $m^3$ )

$V_{tubs}$ : Volum dels tubs del reactor ( $m^3$ )

$h_c$ : Alçada de la part cilíndrica del reactor (m)

$D_{ext\ tanc}$ : Diàmetre extern del reactor (m)

$D_{int\ tanc}$ : Diàmetre intern del reactor (m)

$V_{paret\ react}$ : Volum de les parets del reactor ( $m^3$ )

$M_{react\ buit}$ : Pes del reactor buit (kg)

$\rho_{acer}$ : Densitat de l'acer inoxidable ( $kg/m^3$ )

$$V_{cap} = 0,1 \cdot (4,458^3 - 4,407^3) + 0,1 \cdot (0,4458^3 - 0,394^3) + \frac{\pi \cdot 0,090}{4} \cdot (4,458^2 - 4,420^2)$$

$$= 0,332 \text{ m}^3$$

$$V_{carcassa} = \frac{\pi \cdot 17,75}{4} \cdot (4,458^2 - 4,420^2) = 4,786 \text{ m}^3$$

$$V_{tubs} = \frac{\pi \cdot 17,75}{4} \cdot (0,095^2 - 0,088^2) \cdot 1172 = 21,309 \text{ m}^3$$

$$V_{paret\ reactor} = 4,786 + 21,309 + 2 \cdot 0,332 = 26,758 \text{ m}^3$$

$$M_{react\ buit} = 26,758 \cdot 7950 = 212.723,037 \text{ kg}$$

### Pes del reactor amb aigua

Per determinar el pes del reactor amb aigua, s'han de tenir en comptes els volums interns del reactor tant dels capçals, Equació 34 i dels tubs, Equació 68. En operació, per la carcassa no passa cap fluid, per tant a l'hora de calcular el pes no es té en compte.

$$V_{int\ cap} = 0,1 \cdot R^3 + 0,1 \cdot r^3 + \frac{\pi \cdot SF}{4} \cdot D_{int\ reac}^2 \quad \text{Equació 11.34}$$

$$V_{int\ tubs} = \frac{\pi \cdot h_c}{4} \cdot D_{int\ tubs}^2 \cdot n^{\circ} \text{ tubs} \quad \text{Equació 11.68}$$

El volum intern del reactor es determina mitjançant la suma dels valors interns segons l'equació 69.

$$V_{total\ int\ react} = V_{int\ tubs} + 2 \cdot V_{int\ cap} \quad \text{Equació 11.69}$$

A partir del volum total interior del reactor i la densitat de l'aigua es pot calcular el pes del reactor amb aigua.

$$M_{react\ aigua} = M_{react\ buit} + V_{total\ int\ reactor} \cdot \rho_{aigua} \quad \text{Equació 11.70}$$

On:

$V_{int\ cap}$ : Volum intern dels capçals del reactor ( $m^3$ )

R: Radi del capçal (m)

r: Radi de la curvatura dels capçals (m)

SF: Distància fins la curvatura del capçal (m)

$V_{int\ tubs}$ : Volum interior dels tubs del reactor ( $m^3$ )

$h_c$ : Alçada de la part cilíndrica del reactor (m)

$D_{int\ react}$ : Diàmetre intern del reactor (m)

$V_{total\ int\ react}$ : Volum intern del reactor ( $m^3$ )

$M_{react\ oper}$ : Pes del reactor en operació (kg)

$M_{react\ buit}$ : Pes del reactor buit (kg)

$\rho_{aigua}$ : Densitat de l'aigua ( $kg/m^3$ )

$$V_{int\ cap} = 0,1 \cdot 4,407^3 + 0,1 \cdot 0,394^3 + \frac{\pi \cdot 0,090}{4} \cdot 4,420^2 = 9,950\ m^3$$

$$V_{int\ tubs} = \frac{\pi \cdot 17,75}{4} \cdot 0,088^2 \cdot 1172 = 126,5\ m^3$$

$$V_{total\ int\ react} = 126,5 + 2 \cdot 9,950 = 146,4\ m^3$$

$$M_{tanc\ aigua} = 212.723,037 + 146,4 \cdot 997 = 376.899,87\ kg$$

### Pes del reactor en operació

El procediment es exactament igual al utilitzat en l'apartat del pes del reactor amb aigua, canviant la densitat de l'aigua per la densitat del fluid a processar, que en aquest cas la seva densitat és de 25,16  $kg/m^3$ .

$$M_{react\ oper} = 212.723,037 + 146,4 \cdot 25,16 = 234.622,46\ kg$$

### 11.4.2 Reactor d'alquilació R-302

El reactor R-302 te la finalitat de continuar amb la reacció duta a terme en el reactor R-301 per tal d'arribar a la producció d'etilbenzè desitjada.

Donat a que per dissenyar aquest reactor s'ha seguit el mateix procediment que el reactor R-301 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest reactor, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

*Taula 11.15. Valors obtinguts del disseny del reactor R-302*

<b>Volum (m<sup>3</sup>)</b>	138
<b>Conversió obtinguda (%)</b>	75,88
<b>Temperatura de disseny Carc. / Tubs (°C)</b>	418 / 491,81
<b>Pressió de disseny Carcassa / Tubs (kPa)</b>	696,12 / 2156,13
<b>Massa catalitzador (kg)</b>	19.872
<b>Velocitat (m/s)</b>	1,3
<b>Dià. intern Carcassa / Tubs / Capçal (m)</b>	4,518 / 0,088 / 4,504
<b>Espessor Carcassa / Tubs / Capçal (m)</b>	19,70 / 3,548 / 26,39
<b>Longitud tubs (m)</b>	18,25
<b>Nombre de tubs</b>	1.243
<b>Baffle cut (m)</b>	1,129
<b>Espai entre pantalles (m)</b>	1,807
<b>Número de pantalles</b>	9
<b>Número de passos per carcassa</b>	1
<b>Pes operació (kg)</b>	254.214,157
<b>Material</b>	Acer Inoxidable 316L

### 11.4.3 Reactor d'alquilació R-303

El reactor R-303 te la finalitat de continuar amb la reacció duta a terme en el reactor R-302 per tal d'arribar a la producció d'etilbenzè desitjada.

Donat a que per dissenyar aquest reactor s'ha seguit el mateix procediment que el reactor R-301 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest reactor, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

Taula 11.16. Valors obtinguts del disseny del reactor R-303

<b>Volum</b>	166,75
<b>Conversió obtinguda (%)</b>	68,73
<b>Temperatura de disseny Carc. / Tubs (°C)</b>	418 / 496,65
<b>Pressió de disseny Carcassa / Tubs (kPa)</b>	696,13 / 2131,13
<b>Massa catalitzador (kg)</b>	24.012
<b>Velocitat (m/s)</b>	1,3
<b>Dià. intern Carcassa / Tubs / Capçal (m)</b>	4,794 / 0,093 / 4,779
<b>Espessor Carcassa / Tubs / Capçal (m)</b>	20,76 / 3,595 / 28,01
<b>Longitud tubs (m)</b>	19,5
<b>Nombre de tubs</b>	1.259
<b>Baffle cut (m)</b>	1,198
<b>Espai entre pantalles (m)</b>	1,917
<b>Número de pantalles</b>	9
<b>Número de passos per carcassa</b>	1
<b>Pes operació (kg)</b>	296.719,68
<b>Material</b>	Acer Inoxidable 316L

#### 11.4.4 Reactor de Transalquilació R-500

El reactor R-500 te la finalitat de fer reaccionar el dietilbenzè que surt per cues de la columna CD-403 amb benzè per tal de poder produir etilbenzè.

Donat a que per dissenyar aquest reactor s'ha seguit el mateix procediment que el reactor R-301 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest reactor, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

Taula 11.17. Valors obtinguts del disseny del reactor R-500

<b>Volum (m3)</b>	11,5
<b>Conversió obtinguda (%)</b>	99,54
<b>Temperatura de disseny Carc. / Tubs (°C)</b>	418 / 554,29
<b>Pressió de disseny Carcassa / Tubs (kPa)</b>	696,13 / 2200
<b>Massa catalitzador (kg)</b>	1.656
<b>Velocitat (m/s)</b>	6,4
<b>Dià. intern Carcassa / Tubs / Capçal (m)</b>	2,04 / 0,044 / 2,037
<b>Espessor Carcassa / Tubs / Capçal (m)</b>	10,27 / 3,034 / 11,92
<b>Longitud tubs (m)</b>	8,25
<b>Nombre de tubs</b>	917
<b>Baffle cut (m)</b>	0,51
<b>Espai entre pantalles (m)</b>	0,816
<b>Número de pantalles</b>	9
<b>Número de passos per carcassa</b>	1
<b>Pes operació (kg)</b>	33.922,46
<b>Material</b>	Acer Inoxidable 316L

## 11.5 Columnes de destil·lació

En el procés que es du a terme són necessàries 3 columnes de destil·lació, la primera té l'objectiu de separar el metà, età, propilè i l'etilè que no hagi reaccionat en els reactors d'alquilació del benzè, etilbenzè i dietilbenzè, la segona columna separa el benzè del etilè i etilbenzè i la tercera separa l'etilbenzè del dietilbenzè, el qual aquest últim es enviat al reactor de translaquilació.

Les tres columnes tenen un comportament semblant, per tant, la columna de la qual es realitzarà el disseny d'exemple serà la CD-402.

### 11.5.1 Columna separació gasos CD-401

La columna CD-401 s'utilitza amb l'objectiu de separar l'età, metà, etilè que no ha reaccionat i propilè del benzè, etilbenzè i dietilbenzè. Treballa a pressió de 920 kPa i amb un rang de temperatura de 31,69 a 191,6°C. Donat a que per dissenyar aquesta columna s'ha seguit el mateix procediment que la columna CD-402 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquesta columna, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

Tray Type	Bubble Cap	Section Starting Stage	1_ Main Tower
Diameter [m]	2,950	Section Ending Stage	17_ Main Tower
Tray Spacing [m]	0,5700	Tray Type	Bubble Cap
Number Of Passes	4	Number Of Passes	4
Number Of Caps	273	Tray Spacing [m]	0,5700
Number Of Caps Per Active Area [1/m <sup>2</sup> ]	50,00	Section Diameter [m]	2,950
Deck Gauge Thickness	10 Gauge	Section Height [m]	9,690
Deck Gauge Thickness Value [mm]	3,404	Section Pressure Drop [mbar]	105,6
Cross-Sectional Area [m <sup>2</sup> ]	6,835	Section Head Loss [mm]	1546
Active Area [m <sup>2</sup> ]	5,468	Trays With Weeping	None
Net Area [m <sup>2</sup> ]	6,151		

Figura 11.22. Valors obtinguts pel disseny de la columna de destil·lació CD-401

Taula 11.18. Valors obtinguts del disseny mecànic CD-401

Paràmetres	Valor
Material de construcció	Acer Inoxidable 316 L (SS 616 L)
Pressió de disseny (kPa)	1116,13
Temperatura de disseny (°C)	210,76
Radi interior del capçal (m)	2,950
Gruix paret columna (mm)	20,56
Gruix capçal columna (mm)	27,65
Alçada capçal (m)	0,693
Alçada total columna (m)	11,416
Pes columna buida (kg)	25.720,43
Pes columna amb aigua (kg)	110.489,04
Pes columna en operació (kg)	69.478,511
Aïllament (Gruix (mm) / Volum (m <sup>3</sup> ))	65 / 3,53

## 11.5.2 Columna separació benzè CD-402

El mètode per tal de dissenyar aquesta columna i la resta s'ha fet ús del programa Aspen HYSYS. Primerament s'ha realitzat una aproximació realitzada pel mètode short cut, el qual proporciona uns valors orientatius de com serà el dimensionament final de la columna. Seguidament s'ha realitzat el càlcul més detallat amb l'opció de Distillation Colum, per tal d'obtenir uns valors de temperatura, numero de plats, concentracions dels productes i eficàcia de plats més rigorós. Una vegada obtinguts aquests valors, es realitza el disseny intern de la columna, on es troba la distància entre plats, tipus de plats, diàmetre de la columna, etc... Finalment es dissenyen tant els capçals superior e inferiors com el gruix de la part cilíndrica de la columna segons les condicions de cada columna.

L'objectiu d'aquesta columna és la separació de benzè del etilbenzè i dietilbenzè, d'aquesta manera es recircula l'excés de benzè introduït per evitar la formació de subproductes no desitjats i la quantitat de benzè fresc que s'hauria d'introduir es veu reduïda considerablement.

### 11.5.2.1 Short-cut

Com s'ha esmentat a l'apartat anterior, el primer pas a realitzar és dissenyar la columna mitjançant el mètode short-cut.

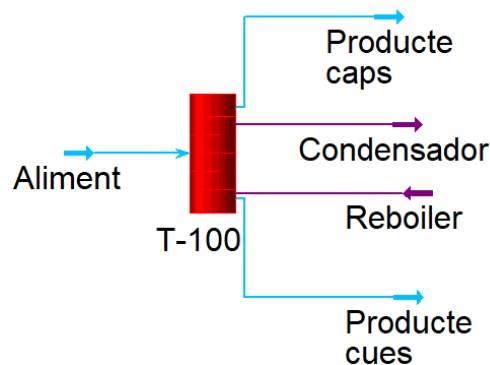


Figura 11.23. Esquema sort-cut i connexions del procés

El primer pas a realitzar serà indicar quins seran els corrents d'aliment i de producte juntament amb els corrents d'energia tant del condensadors com del reboiler. En aquest punt ja s'han de conèixer totes les característiques relacionades amb el corrent d'aliment com per exemple la composició, la temperatura, la pressió, cabal, etc...

Shortcut Column: T-100

Design Rating Worksheet Performance Dynamics

**Design**

Connections  
 Parameters  
 User Variables  
 Notes

Components

Component	Mole Fraction
Light Key in Bottoms Benzene	0,0000
Heavy Key in Distillate E-Benzene	0,0000

Pressures

Condenser Pressure	920,000 kPa
Reboiler Pressure	920,000 kPa

Reflux Ratios

External Reflux Ratio	1,300
Minimum Reflux Ratio	0,340

Delete OK Ignored

*Figura 11.24. Dades necessàries pel disseny mitjançant short-cut*

El següent pas a realitzar és indicar quina serà la composició desitjada del component clau volàtil (Light Key) que tindrà el producte en cues i la composició del component clau pesat (Heavy Key) que tindrà el producte per caps, juntament amb les pressions a les quals treballaran tant el condensador com el reboiler i el valor del reflux extern tenint en compte el valor del reflux mínim proporcionat pel programa per les condicions d'operació esmentades.

Per poder saber quin component és volàtil i el pesat, s'han de calcular i comparar les seves volatilitats relatives de les productes a partir de les volatilitats absolutes obtingudes pel programa i s'obté que el component volàtil és el benzè, metre que el component pesat és l'etilbenzè.

Per definir el valor a utilitzar de reflux externa s'ha de tenir en consideració que a major reflux extern, es necessiten menys etapes d'equilibri per arribar a obtenir la composició desitjada, però per contra fa augmenta el caudal intern de la columna fent que la columna sigui més gran. Per tant, a l'hora de definir el reflux extern s'han de tenir presents aquestes consideracions.

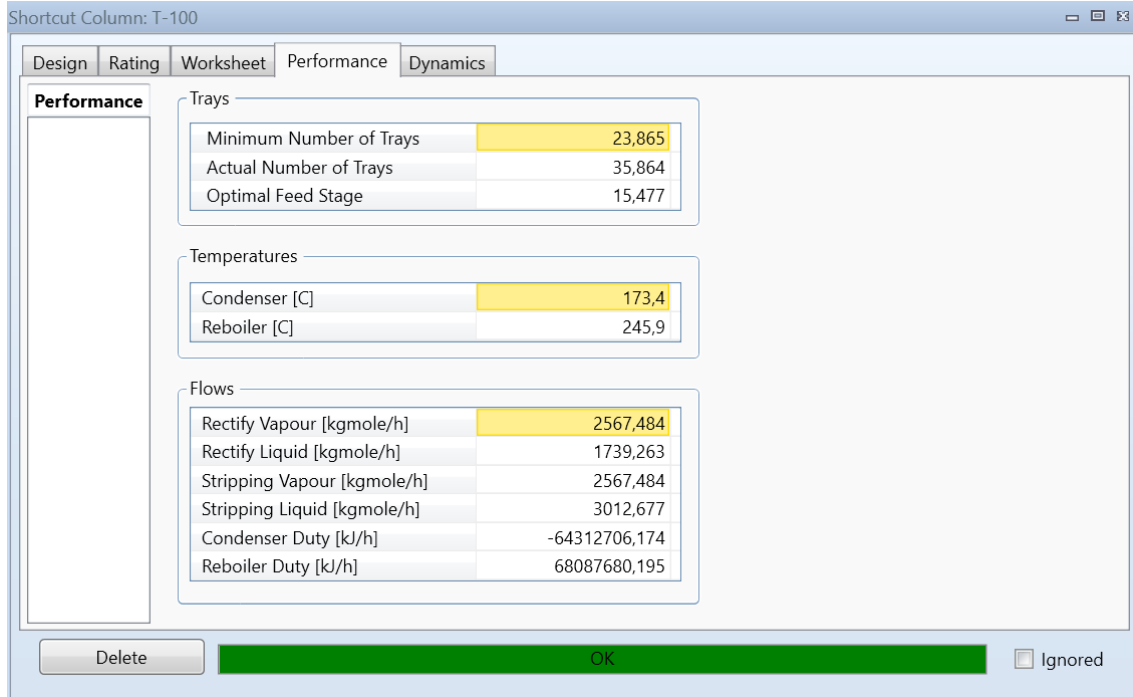


Figura 11.25. Dades obtingudes del short-cut

Una vegada introduïdes totes les dades, el programa ens proporciona el número de plats mínims, el número de plats actuals, el plat òptim d'alimentació, temperatura en el condensador i reboiler i els caudals de recirculació tant de líquid com de vapor.

En referència la número de plants, el mètode de short-cut estima que l'eficàcia dels plats és del 100%, però això en la realitat no es veritat, per tant, s'haurà d'augmentar el número de plats i modificar el número de plat on entre l'aliment per arribar a la separació desitjada.

### 11.5.2.2 Disseny rigorós

En aquest apartat es durà terme un disseny més rigorós de la columna de destil·lació a partir de les dades obtingudes pel mètode de short-cut.

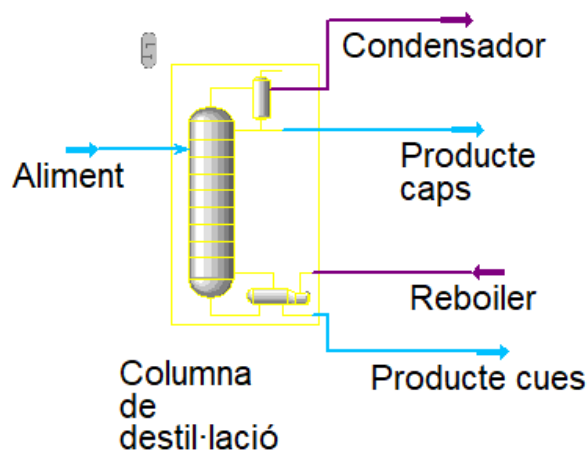


Figura 11.26. Esquema columna de destil·lació i connexions del procés



Al igual que en mètode shot-cut, el primer pas és indicar els corrents d'aliment i els productes per caps i per cues, juntament amb el corrents d'energia del condensador i del reboiler, tenint caracteritzat el corrent d'aliment.

Tot seguit, s'han de realitzar cinc passos per tal de caracteritzar la columna de destil·lació que el programa anirà indicant per ordre.

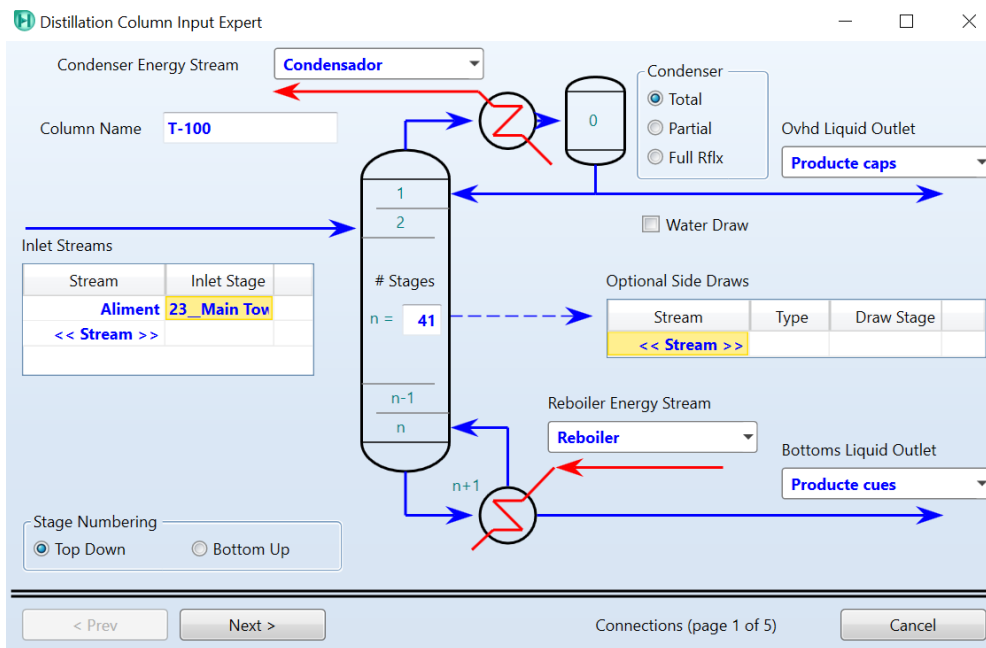


Figura 11.27. Primer pas per dissenyar la columna de destil·lació

En el primer pas s'han d'indicar tots els corrents, tant de matèria com d'energia, així com el tipus de condensador que es desitja, el plat d'aliment i el número de plats que tindrà la columna.

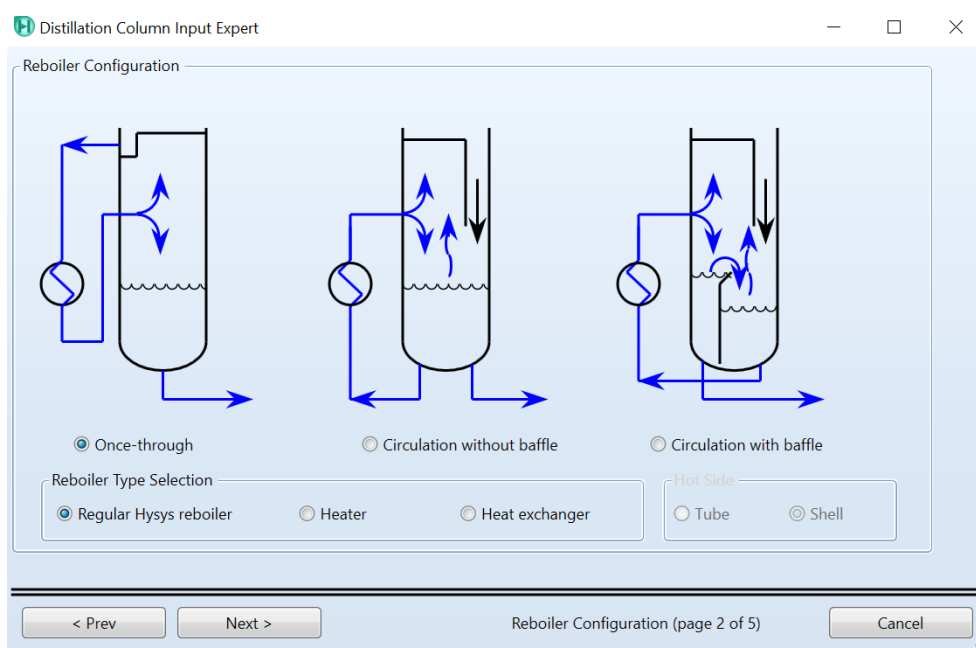
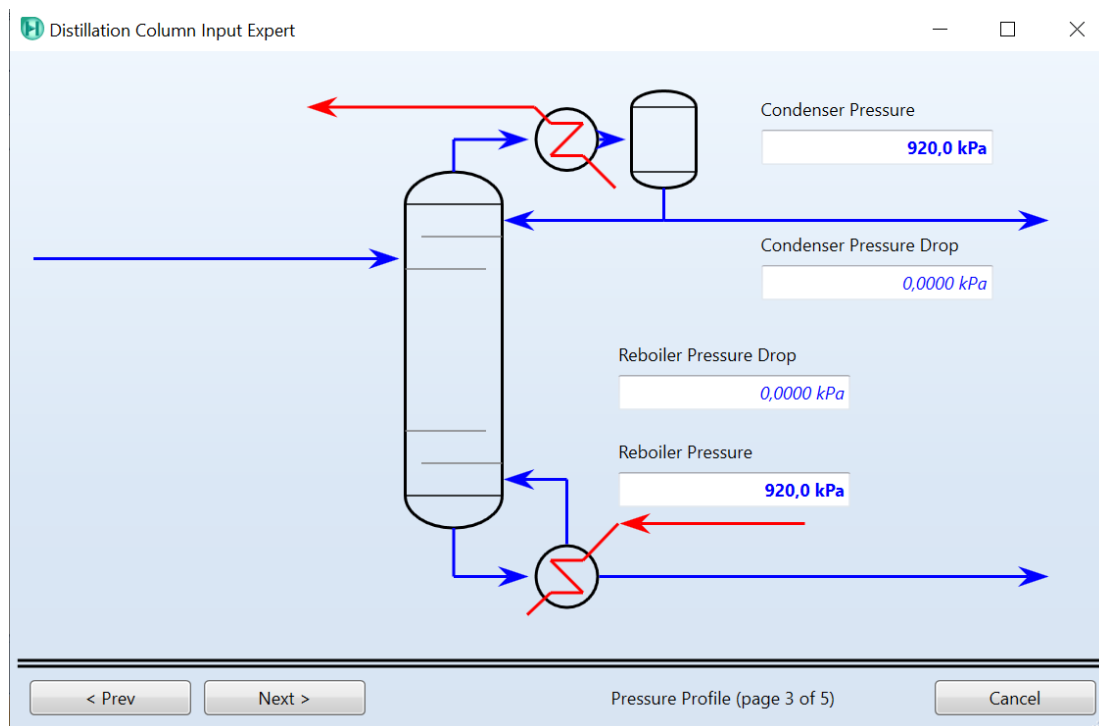


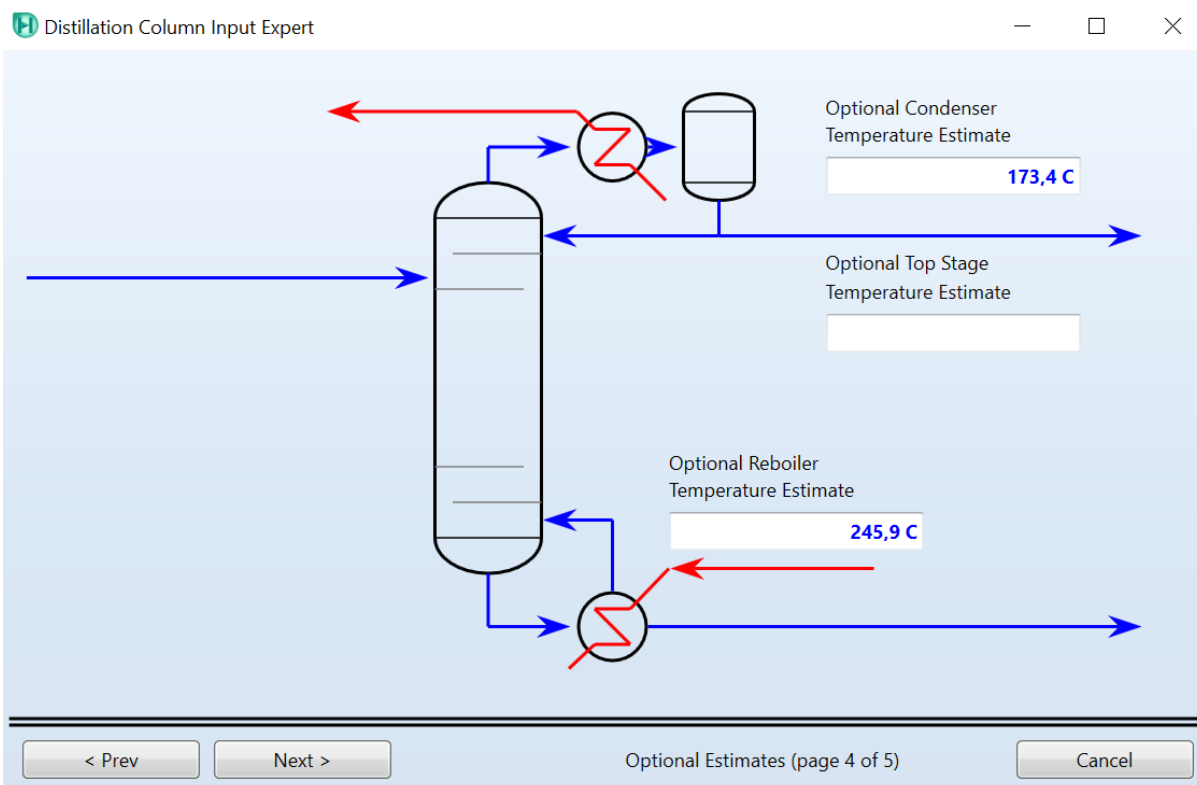
Figura 11.28. Segon pas per dissenyar la columna de destil·lació

En el segon pas s'ha d'escollir el tipus de reboiler amb el qual es vol dissenyar la columna. En aquest cas s'ha escollit el reboiler d'un sol pas ja que si aquest funciona correctament, la temperatura de sortida del reboiler i la temperatura inferior de la torre son idèntiques. En cas que la temperatura del fons de la torre es més baixa que la temperatura de sortida del reboiler significa que alguna cosa no va bé amb la circulació del termosifó.



**Figura 11.29.** Tercer pas per dissenyar la columna de destil·lació

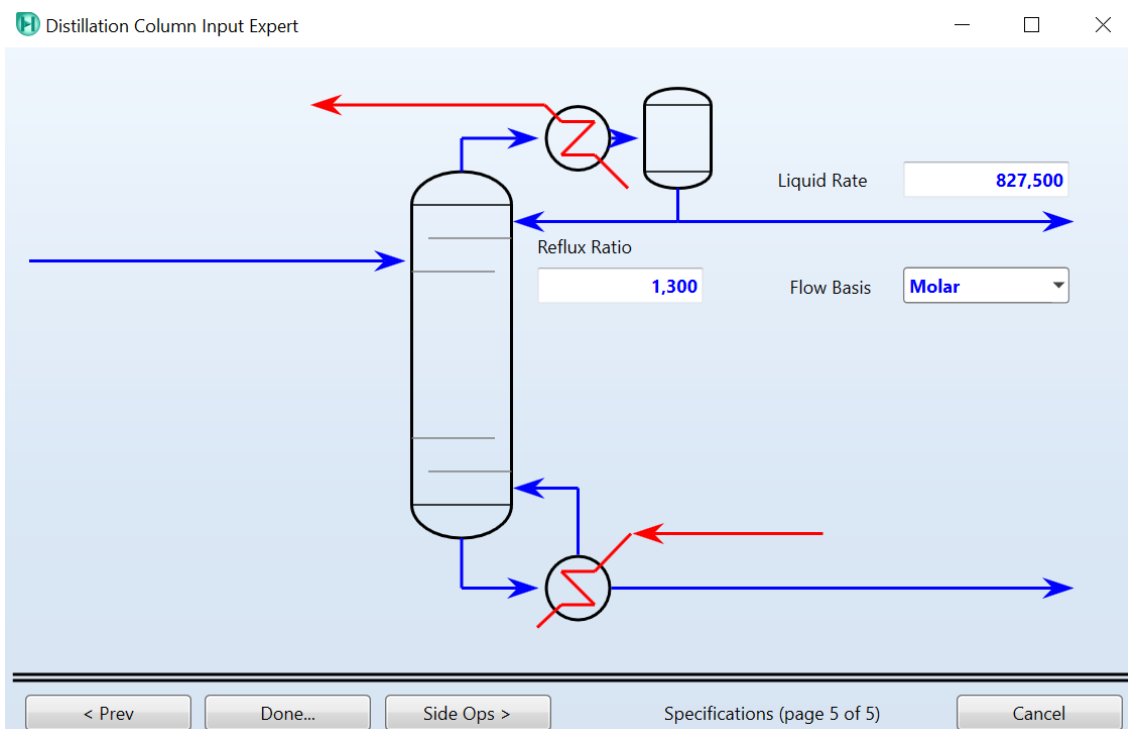
En aquest tercer pas s'indiquen les pressions a les quals treballaran tant el condensador com el reboiler les quals son les mateixes que les indicades en el mètode de short-cut i que en aquest cas treballen a pressió atmosfèrica tant el condensador com el reboiler.



*Figura 11.30. Quart pas per dissenyar la columna de destil·lació*

En el quart pas s'indiquen les temperatures a les quals treballaran tant el condensador com el reboiler les quals són les que s'han calculat pel mètode short-cut. Aquestes temperatures obtingudes pel mètode short-cut són orientatives i poden canviar donat a les dades d'aquest mètode no són tant precises com les proporcionades en el mètode rigorós.

En el cas de que no s'indiquen les temperatures, el programa les calcularà amb les dades proporcionades fins ara.



*Figura 11.31. Cinquè pas per dissenyar la columna de destil·lació*

En el cinquè pas es demanen les dades tant les reflux com del caudal de líquid que es vol extreure per caps.

El valor del reflux ha de ser el mateix que l'estipulat en el mètode short-cut tot i que una vegada dissenyada la columna sempre es pot modificar en cas que la separació no sigui la desitjada.

El caudal de líquid que es vol extreure per caps serà pràcticament el mateix que entra a la columna per tal d'obtenir una bona separació, sempre tenint en compte de no sobrepassar aquest valor, sinó començarà a sortir part del producte pesat per caps, cosa que ens portaria a una separació no desitjada.

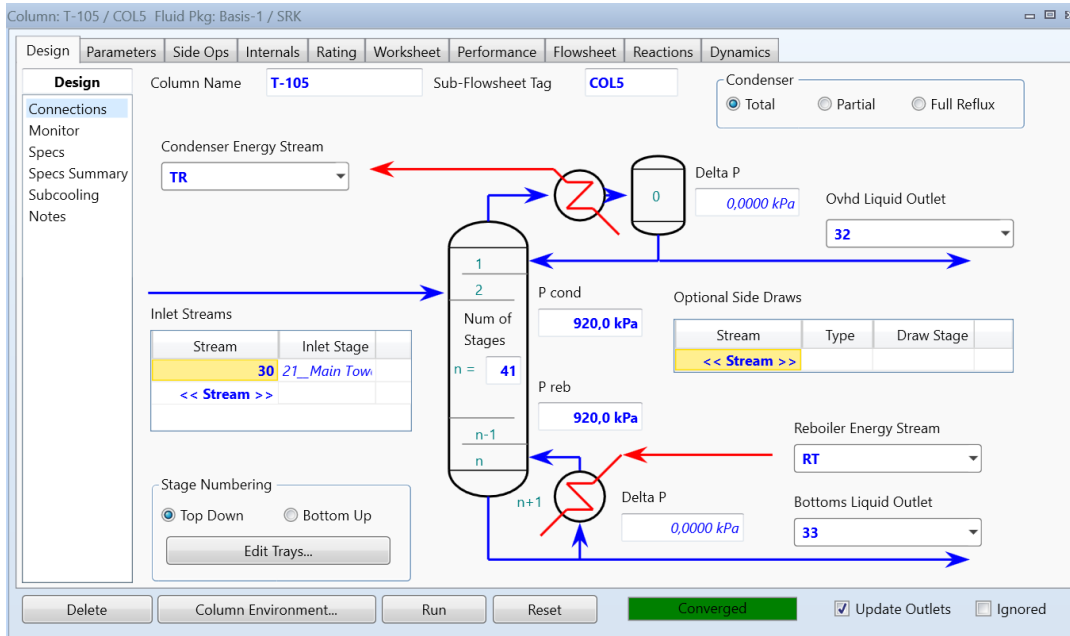


Figura 11.32. Condicions d'operació de la columna de destil·lació

Una vegada finalitzats els cinc passos, la columna ja està dissenyada segons les condicions descrites anteriorment.

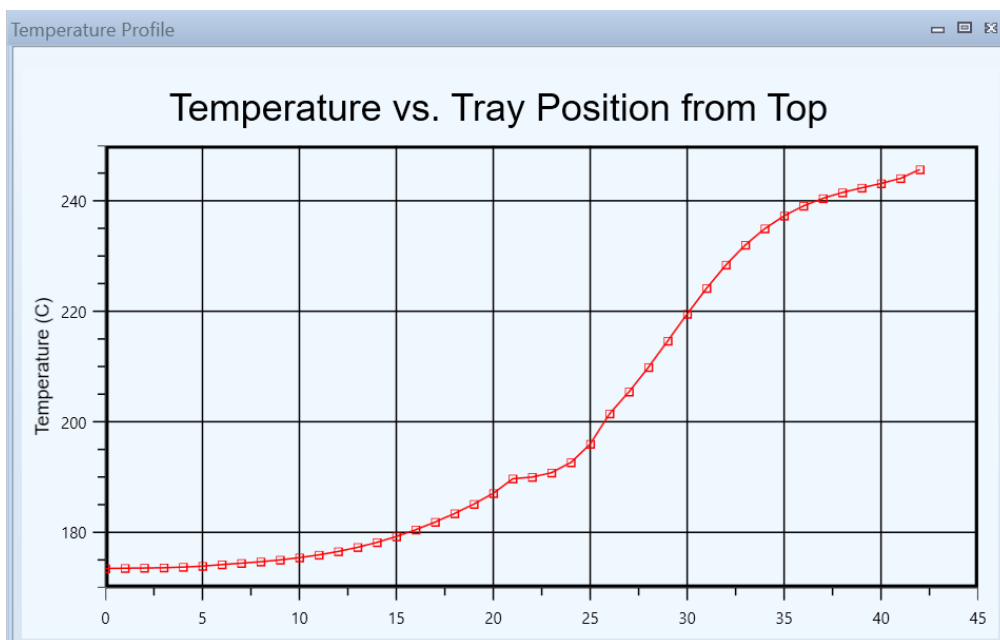
El programa ens facilita les dades de pressió, temperatura i els cabals tant de líquid com de vapor al llarg de la columna, especificats per plats.

	Stage	Pressure [kPa]	Temp [C]	Net Liquid [kgmole/h]	Net Vapour [kgmole/h]
Condenser	0	920,0	173,5	1076	2,220e-006
1_Main Tower	1	920,0	173,5	1076	1903
2_Main Tower	2	920,0	173,5	1075	1903
3_Main Tower	3	920,0	173,6	1074	1903
4_Main Tower	4	920,0	173,7	1073	1902
5_Main Tower	5	920,0	173,9	1070	1900
6_Main Tower	6	920,0	174,2	1068	1898
7_Main Tower	7	920,0	174,4	1066	1896
8_Main Tower	8	920,0	174,7	1064	1894
9_Main Tower	9	920,0	175,0	1060	1891
10_Main Tower	10	920,0	175,4	1056	1888
11_Main Tower	11	920,0	175,9	1051	1884
12_Main Tower	12	920,0	176,5	1045	1879
13_Main Tower	13	920,0	177,3	1038	1873
14_Main Tower	14	920,0	178,2	1030	1866
15_Main Tower	15	920,0	179,2	1021	1858
16_Main Tower	16	920,0	180,5	1010	1848
17_Main Tower	17	920,0	181,8	998,3	1837
18_Main Tower	18	920,0	183,4	985,7	1826
19_Main Tower	19	920,0	185,1	971,4	1813
20_Main Tower	20	920,0	187,0	951,7	1799
21_Main Tower	21	920,0	189,7	2220	1779
22_Main Tower	22	920,0	190,0	2215	1775
23_Main Tower	23	920,0	190,8	2202	1769

24_Main Tower	24	920,0	192,6	2184	1756
25_Main Tower	25	920,0	196,0	2159	1738
26_Main Tower	26	920,0	201,5	2170	1713
27_Main Tower	27	920,0	205,4	2166	1724
28_Main Tower	28	920,0	209,9	2164	1720
29_Main Tower	29	920,0	214,6	2165	1718
30_Main Tower	30	920,0	219,5	2173	1720
31_Main Tower	31	920,0	224,2	2185	1727
32_Main Tower	32	920,0	228,4	2201	1739
33_Main Tower	33	920,0	232,0	2218	1755
34_Main Tower	34	920,0	234,9	2235	1772
35_Main Tower	35	920,0	237,3	2249	1789
36_Main Tower	36	920,0	239,1	2261	1803
37_Main Tower	37	920,0	240,4	2270	1815
38_Main Tower	38	920,0	241,5	2277	1824
39_Main Tower	39	920,0	242,3	2280	1831
40_Main Tower	40	920,0	243,1	2280	1834
41_Main Tower	41	920,0	244,0	2272	1834
Reboiler	42	920,0	245,7	445,9	1827

**Figura 11.33.** Evolució de la pressió, temperatura i cabals de líquid i vapor al llarg de la columna de destil·lació

Els valors obtinguts en la Figura 33 es poden veure representats gràficament en les Figures 34, 35 i 36 més detalladament.



**Figura 11.34.** Representació de la temperatura al llarg de la columna

Com es pot observar en la Figura 34, la temperatura a l'interior de la columna no es manté constant al llarg de les etapes, sinó que en el plat d'aliment (21), on la temperatura és de 191,6°C, la temperatura augmentarà considerablement a mida que s'apropa al reboiler, metre que la temperatura a prop del condensador és pot considera pràcticament constant fins el plat de l'aliment.

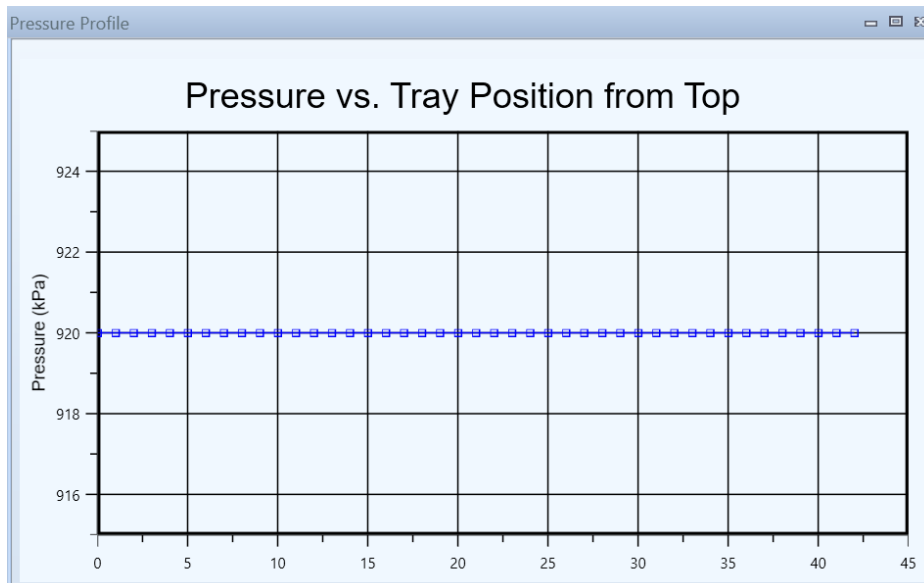


Figura 11.35. Representació de la pressió al llarg de la columna

Com es pot observar a la Figura 35, al contrari pel que fa la temperatura, la pressió de la columna de destil·lació es manté constant a 920 kPa en el seu interior.

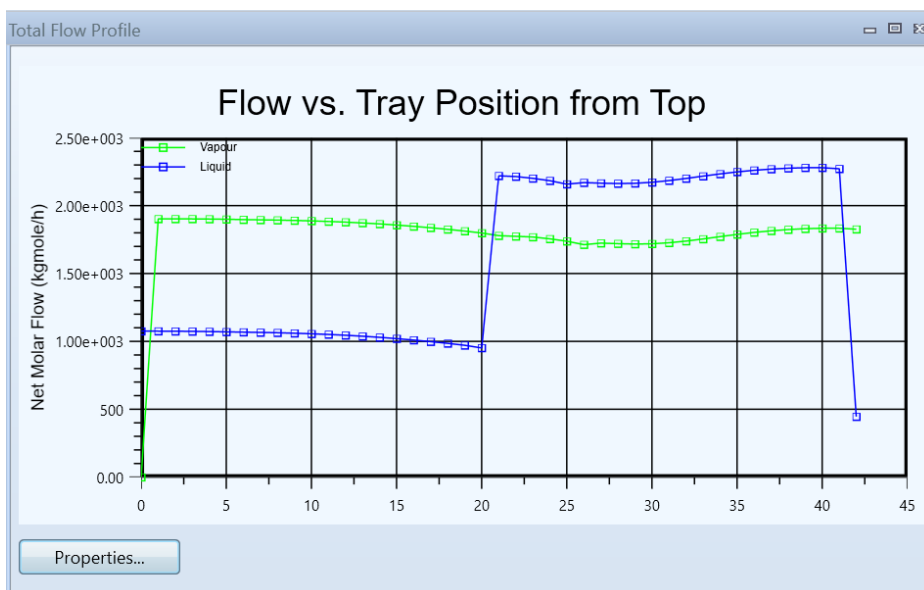


Figura 11.36. Representació dels cabals al llarg de la columna de destil·lació

A la Figura 36 es pot observar que el cabal de líquid es manté constant fins arribar al plat d'aliment (21) on hi ha un augment considerable donat a que aquest entra en estat líquid. Pel que fa al cabal de vapor es pot dir que manté pràcticament constant la llarg de total la columna.

### Eficàcia dels plats

Com s'ha comentat anteriorment, l'eficàcia dels plats de la columna de destil·lació no és 100%. En aquest cas s'ha estipulat que l'eficàcia de cada plat és del 55%, valor dintre dels rancs tipis

d'eficàcia els quals son entre un 40% i un 60%. Per tal de de compensar aquest dèficit d'eficàcia, s'han afegit 8 plats i s'ha decidit que el plat òptim d'entrada de l'aliment és el plat 21.

### Condensador i Reboiler

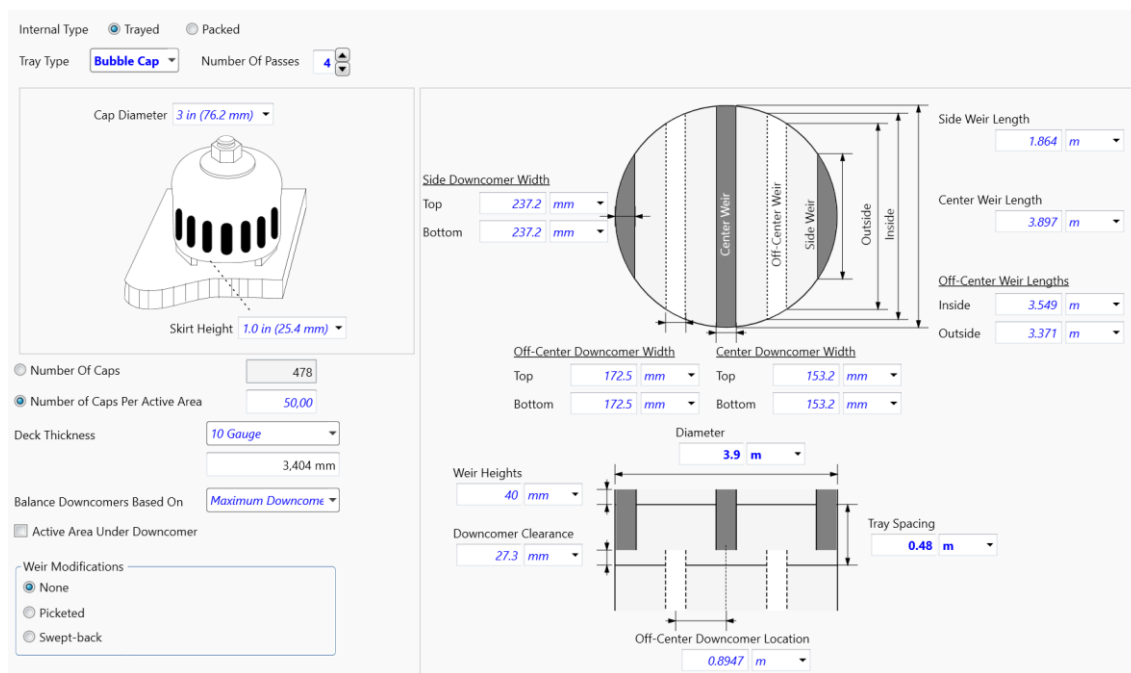
El programa també proporciona les dades del condensador i del reboiler tal com es pot observar en la Figura 37.

Condenser		Reboiler	
Type	Total	Type	Regular
Temperature	173,5 C	Temperature	245,5 C
Pressure	920,0 kPa	Pressure	920,0 kPa
Duty	7,047e+007 kJ/h	Duty	7,422e+007 kJ/h
Reflux Flowrate	1986 kgmole/h	Outlet Flowrate	446,9 kgmole/h

Figura 11.37. Característiques del condensador i el reboiler

### Disseny intern

Per últim, el programa proporciona en disseny intern de la columna on especifica paràmetres principals com el tipus de plat, el seu diàmetre, el seu grossor, l'espaiat entre plats, l'altura total de la columna de destil·lació, etc.. Aquest paràmetres es podem observar en les Figures 38 i 39.



The screenshot shows the internal design configuration for a distillation column tray. Key parameters include:

- Internal Type:** Trayed (selected), Packed.
- Tray Type:** Bubble Cap.
- Number Of Passes:** 4.
- Cap Diameter:** 3 in (76.2 mm).
- Skirt Height:** 1.0 in (25.4 mm).
- Number Of Caps:** 478.
- Number of Caps Per Active Area:** 50.00.
- Deck Thickness:** 10 Gauge (3,404 mm).
- Balance Downcomers Based On:** Maximum Downcome.
- Active Area Under Downcomer:** Unchecked.
- Weir Modifications:** None (selected), Picketed, Swept-back.
- Side Downcomer Width:** Top: 237.2 mm, Bottom: 237.2 mm.
- Off-Center Downcomer Width:** Top: 172.5 mm, Bottom: 172.5 mm.
- Center Downcomer Width:** Top: 153.2 mm, Bottom: 153.2 mm.
- Diameter:** 3.9 m.
- Weir Heights:** 40 mm.
- Downcomer Clearance:** 27.3 mm.
- Tray Spacing:** 0.48 m.
- Off-Center Downcomer Location:** 0.8947 m.
- Side Weir Length:** 1.864 m.
- Center Weir Length:** 3.897 m.
- Off-Center Weir Lengths:** Inside: 3.549 m, Outside: 3.371 m.

Figura 11.38. Disseny dels plats de la columna de destil·lació



Tray Type	Bubble Cap	Section Starting Stage	1_Main Tower
Diameter [m]	3,900	Section Ending Stage	41_Main Tower
Tray Spacing [m]	0,4800	Tray Type	Bubble Cap
Number Of Passes	4	Number Of Passes	4
Number Of Caps	478	Tray Spacing [m]	0,4800
Number Of Caps Per Active Area [1/m <sup>2</sup> ]	50,00	Section Diameter [m]	3,900
Deck Gauge Thickness	10 Gauge	Section Height [m]	19,68
Deck Gauge Thickness Value [mm]	3,404	Section Pressure Drop [mbar]	265,0
Cross-Sectional Area [m <sup>2</sup> ]	11,95	Section Head Loss [mm]	4028
Active Area [m <sup>2</sup> ]	9,557	Trays With Weeping	None
Net Area [m <sup>2</sup> ]	10,75		

Figura 11.39. Dimensionament intern de la columna de destil·lació

### Funcionament intern de la columna

Una vegada dissenyada la columna, s'ha de mirar que l'interior de la columna no tingui problemes de "Weeping" o degoteig. En cas de que hi hagues algun problema, el programa marcaria quins plats estan afectats i quina seria la solució.

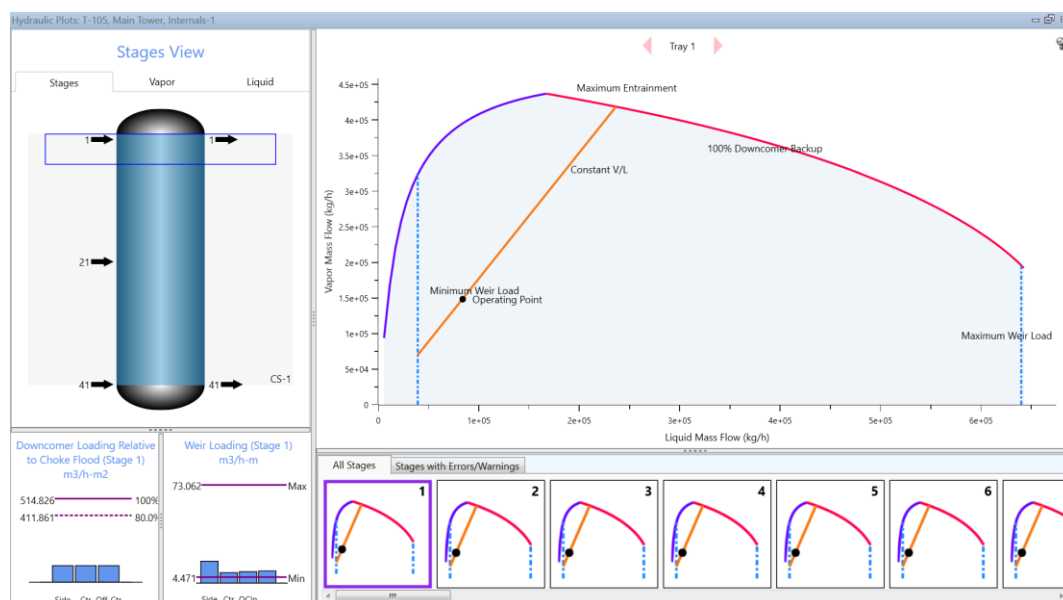


Figura 11.40. Funcionament intern de la columna de destil·lació

El programa gràfica el funcionament intern de la columna de destil·lació per prevenir la possibilitat de Weeping o degoteig en la columna. Aquest factor depèn de la quantitat de líquid que circuli a través de la columna i del mateix vapor. Un excés de vapor produiria un arrosseigament del líquid, mentre que un dèficit provocaria un degoteig en les etapes.

Per tal d'obtenir unes condicions òptimes, ha de treballar en l'àrea sota la corba de "Maximum Entrainment" i per sobre de la corba del "Weeping". L'operació es du a terme en un punt on el cabal del líquid dins de la columna no sigui molt elevat, però amb un valor de vapor elevat, com es pot observar en la Figura 40.

Un cop definits tots els paràmetres i dissenyada la columna de destil·lació, amb totes les dades proporcionades es pot dur a terme el disseny mecànic de la columna.

### 11.5.2.3 Disseny mecànic

En aquest apartat es descriu com s'ha realitzat el disseny mecànic de les columnes CD-401, CD-402 i CD-403, mitjançant el codi ASME (American Society of Mechanical Engineers) per calderes i recipients a pressió, concretament per la seva secció VIII-Divisió 1, la qual descriu el disseny de tancs a pressió.

#### Material

El primer pas és l'elecció del tipus de material amb el qual es vol construir la columna. Tenint en compte les propietats dels fluids a tractar s'ha decidit utilitzar l'acer inoxidable 316 L, també anomenat SS 316 L.

#### Pressió de disseny

Per tal de poder calcular la pressió de disseny de la columna s'utilitzen les Equacions 21 i 22. La pressió de disseny escollida serà la més elevada de les calculades donat que d'aquesta manera es sobredimensiona la columna per no tenir majors problemes.

$$P_1 = 1,1 \cdot P_o \quad \text{Equació 11.21}$$

$$P_2 = P_o + 196,13 \quad \text{Equació 11.22}$$

On:

$P_o$ : Pressió màxima d'operació normal de procés (kPa)

$P_1$ : Pressió de disseny (kPa)

$P_2$ : Pressió de disseny (kPa)

La pressió màxima d'operació normal de procés en aquesta columna és 920 kPa.

$$P_1 = 1,1 \cdot 920 = 1012,00 \text{ kPa}$$

$$P_2 = 920 + 196,13 = 1116,13 \text{ kPa}$$

Per tant, segons els valor obtinguts, la columna es dissenyarà per a una pressió de 1116,13 kPa.

#### Temperatura de disseny

La temperatura de disseny serà calculada d'una manera similar a la pressió de disseny. A partir de les Equacions 23 i 24 s'escollirà el valor més elevat i aquest serà la temperatura de disseny.

$$T_1 = T_o + 0,1 \cdot T_o \quad \text{Equació 11.23}$$

$$T_2 = T_o + 15 \quad \text{Equació 11.24}$$

On:

$T_o$ : Temperatura màxima d'operació normal de procés (°C)

$T_1$ : Temperatura de disseny (°C)

$T_2$ : Temperatura de disseny (°C)

La temperatura màxima d'operació normal de procés en aquesta columna és 245,5 °C en el reboiler.

$$T_1 = 245,5 + 0,1 \cdot 245,5 = 270,05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 245,5 + 15 = 260,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Per tant, segons els valors obtingut, la columna es dissenyarà a una temperatura de 270,05 °C.

### Juntes

Per tal d'escollir el tipus de junta a utilitza, s'empra la norma UW-12 pertanyent al codi ASME de la secció VIII-Divisió 1. En aquest cas s'ha decidit utilitza per a la realització dels càlculs el valor de la junta tipus 1, la quals te una eficiència de junta de 0,85.

### Esforç del material

L'esforç s'ha determinat mitjançant el material utilitzat, que en aquest cas el l'acer inoxidable segons les restriccions de la Figura 41.

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

*Figura 11.41. Esforç dels materials*

Per tant i a partir de la Figura 41, es considera un valor d'esforç del material de 15.700 lb/pulg<sup>2</sup> = 1082,48 bar = 1,08 · 10<sup>8</sup> Pa.

### Gruix de la columna

Per tal de realitzar el càlcul del gruix de la part cilíndrica de la columna s'utilitza les equacions indicades per la codificació ASME.

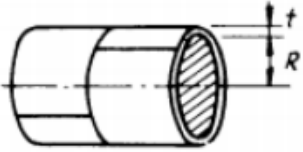
	<b>CASCO CILINDRICO (COSTURA LONGIT.)<sup>1</sup></b>	
	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$
1. Generalmente rige el esfuerzo en la costura longitudinal. Ver página anterior. 2. Cuando el espesor de pared exceda de la mitad del radio interior o P exceda de 0.385 SE, se aplicarán las fórmulas dadas en el Apéndice del Código, 1-2.		

Figura 11.42. Guia pel disseny del gruix d'una columna de destil·lació

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C. A. \quad \text{Equació 11.25}$$

On:

t: Gruix de la paret de la columna (m)

P: Pressió de disseny (Pa)

R: Radi interior de la columna (m)

S: Esforç del material (Pa)

E: Eficiència de la junta

C.A.: Marge de corrosió (m)

$$t = \frac{1116130 \cdot 1,95}{1,08 \cdot 10^8 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 1116130} + 0,0025 = 0,02638 \text{ m} = 26,38 \text{ mm}$$

L'espessor de la columna serà de 26,38 mm.

### Dimensionament del capçal

El capçal que s'ha escollit és el de tipus toriesfèrics, els quals son típics per a pressions baixes i mitges.

	<b>CABEZA ASME BRIDADA Y ALABEADA (CABEZA TORISFERICA)</b>		
	Cuando L/r = 16 2/3		
	$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P}$	$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t}$	
	Cuando Lr/ menor de 16 2/3		
		$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$	$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t}$

Figura 11.43. Guia pel disseny d'un capçal toriesfèric

Per tal de saber quina equació s'ha d'utilitzar, s'ha de calcular la relació entre el radi intern del capçal, el qual es igual al diàmetre intern de la torre i el radi interior de curvatures, el qual es un 10% del radi intern del capçal.

$$\frac{L}{r} \quad \text{Equació 11.26}$$

On:

L: Radi intern del capçal (m)

r: Radi interior de les curvatures (m)

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 11.44. Determinació del factor M

$$\frac{L}{r} = \frac{39}{0,39} = 10 \rightarrow M = 1,54$$

Una vegada obtingut el valor M, es procedeix a calcular el gruix del capçal mitjançant l'Equació 27.

$$t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} \quad \text{Equació 11.27}$$

On:

t: Gruix de la paret (m)

P: Pressió de disseny (Pa)

L: Radi interior del capçal (m)

M: Factor M

S: Esforç del material (Pa)

E: Eficiència de la junta

$$t = \frac{1116130 \cdot 3,9 \cdot 1,54}{2 \cdot 1,08 \cdot 10^8 \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 1119130} = 0,03655 \text{ m} = 36,55 \text{ mm}$$

L'espessor del capçal serà de 36,55 mm.

### Diàmetre exterior

Una vegada calculats els gruixos de la columna, es procedeix a fer el càlcul del diàmetre exterior, que juntament amb l'espessor del capçal son necessaris per tal de dimensionar en capçal tipus toriesfèric.

$$D_{ext \text{ col}} = D_{int \text{ col}} + 2 \cdot t_c \quad \text{Equació 11.28}$$

On:

$D_{ext\ col}$ : Diàmetre extern de la columna (m)

$D_{int\ col}$ : Diàmetre intern de la columna (m)

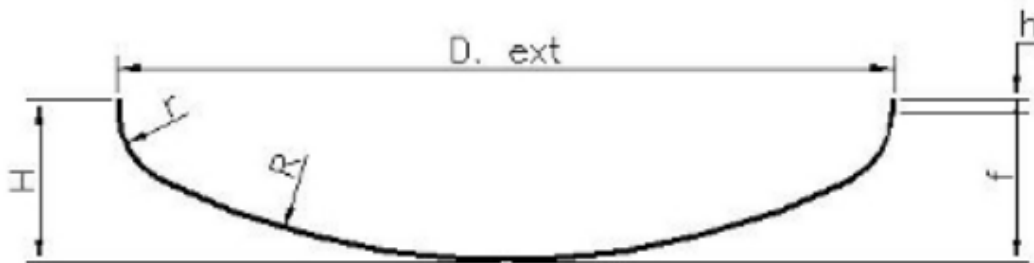
$T_c$ : Gruix de la columna (m)

$$D_{ext\ col} = 3,9 + 2 \cdot 0,02638 = 3,973\ m$$

### Dimensions dels capçals

Per determinar les dimensions del capçal son necessaris saber el diàmetre exterior i l'espessor d'aquest. En aquest cas el diàmetre exterior és de 3,973 m i l'espessor és de 36,556 mm.

Un cop obtinguts es procedeix a realitzar el càlcul dels paràmetres mitjançant una calculadora de fons tipus toriesfèric.



*Figura 11.44. Dimensions capçal tipus toriesfèric*

A la Taula 19 es mostren els valors obtinguts del capçal toriesfèric.

*Taula 11.19. Dimensions del capçal toriesfèric*

<b>D ext (m)</b>	3,973
<b>Espessor (mm)</b>	36,556
<b>R (m)</b>	3,973
<b>r (m)</b>	0,3973
<b>h (m)</b>	0,128
<b>f (m)</b>	0,752
<b>H (m)</b>	0,917

### Alçada total de la columna

Per calcular l'alçada total de la columna es necessari haver calculat prèviament tant el valor de l'alçada de la columna com la del capçal. Amb aquests valors es s'obté l'Equació 29.

$$h_t = h_c + 2 \cdot H \quad \text{Equació 11.29}$$

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)

$$h_t = 18,86 + 2 \cdot 0,917 = 20,694 \text{ m}$$

### Pes de la columna buida

La columna es divideix en tres parts els quals son el capçal interior i el superior, els quals son iguals, i la part cilíndrica que conforma el cos de la columna. Per realitzar el càlcul del pes de la columna, cal determinar el volum dels capçals amb l'Equació 30 i la part cilíndrica amb l'Equació 31.

$$V_{cap} = 0,1 \cdot (R_{ext\ cap}^3 - R^3) + 0,1 \cdot (r_{ext\ cap}^3 - r^3) + \frac{\pi \cdot h}{4} \cdot (D_{ext\ col}^2 - D_{int\ col}^2) \text{ Equació 30}$$

$$V_{tanc} = \frac{\pi \cdot h_c}{4} \cdot (D_{ext\ col}^2 - D_{int\ col}^2) \quad \text{Equació 11.31}$$

Una vegada obtinguts els volums dels capçals i de la part cilíndrica de la columna, l'alçada total es calcular mitjançant l'Equació 32.

$$V_{paret} = V_{tanc} + 2 \cdot V_{cap} \quad \text{Equació 11.32}$$

Obtingut el volum total de la columna, es procedeix a calcular el seu pes tenint en compte que la densitat del material SS 316 L és de 7950 kg/m<sup>3</sup> i tenint en consideració els diferents elements del que estarà constituïda la part inferior de la columna s'afegeix un factor de seguretat d'un 10%.

$$M_{col\ buit} = V_{paret} \cdot \rho_{acer} \quad \text{Equació 11.33}$$

On:

$V_{cap}$ : Volum dels capçals de la columna (m<sup>3</sup>)

$R_{ext\ cap}$ : Radi extern del capçal (m)

$R$ : Radi del capçal (m)

$r_{ext\ cap}$ : Radi extern de la curvatura dels capçals (m)

$r$ : Radi de la curvatura dels capçals (m)

$h$ : Distància fins la curvatura del capçal (m)

$V_{col}$ : Volum de la part cilíndrica de la columna (m<sup>3</sup>)

$h_c$ : Alçada de la part cilíndrica de la columna (m)

$D_{ext\ col}$ : Diàmetre extern de la columna (m)

$D_{int\ col}$ : Diàmetre intern de la columna (m)

$V_{apret}$ : Volum de les parets de la columna (m<sup>3</sup>)

$M_{col\ buida}$ : Pes de la columna buida (kg)

$\rho_{acer}$ : Densitat de l'acer inoxidable (kg/ m<sup>3</sup>)

$$\begin{aligned} V_{cap} &= 0,1 \cdot (3,973^3 - 3,9^3) + 0,1 \cdot (0,3973^3 - 0,324^3) + \frac{\pi \cdot 0,128}{4} \cdot (3,973^2 - 3,9^2) \\ &= 0,401 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$V_{col} = \frac{\pi \cdot 18,86}{4} \cdot (3,973^2 - 3,90^2) = 8,526 \text{ m}^3$$

$$V_{paret} = 8,526 + 2 \cdot 0,401 = 9,328 \text{ m}^3$$

$$M_{col \text{ buida}} = 1,1 \cdot 9,328 \cdot 7950 = 81.569.30 \text{ kg}$$

### Pes de la columna amb aigua

Per determinar el pes de la columna amb aigua, s'han de tenir en comptes els volums interns de la columna tant dels capçals, Equació 34, com de la part cilíndrica de la columna, Equació 35.

$$V_{int \text{ cap}} = 0,1 \cdot R^3 + 0,1 \cdot r^3 + \frac{\pi \cdot h}{4} \cdot D_{int \text{ col}}^2 \quad \text{Equació 11.34}$$

$$V_{int \text{ col}} = \frac{\pi \cdot h_c}{4} \cdot D_{int \text{ col}}^2 \quad \text{Equació 11.35}$$

El volum intern de la columna es determina mitjançant la suma dels valors interns segons l'Equació 36.

$$V_{total \text{ int col}} = V_{int \text{ col}} + 2 \cdot V_{int \text{ cap}} \quad \text{Equació 11.36}$$

A partir del volum total interior de la columna i al densitat de l'aigua es pot calcular el pes de la columna amb aigua. Però també s'ha de tenir en compte que hi ha un rebliment incorporat a la columna que té un pes especificat i que s'ha de tenir en compte.

$$M_{col \text{ oper}} = M_{col \text{ buida}} + M_{rebliment} + 1,1 \cdot V_{total \text{ int col}} \cdot \rho_{aigua} \quad \text{Equació 11.71}$$

On:

$V_{int \text{ cap}}$ : Volum intern dels capçals de la columna ( $\text{m}^3$ )

R: Radi del capçal (m)

r: Radi de la curvatura dels capçals (m)

h: Distància fins la curvatura del capçal (m)

$V_{int \text{ col}}$ : Volum interior de la part cilíndrica de la columna ( $\text{m}^3$ )

$h_c$ : Alçada de la part cilíndrica de la columna (m)

$D_{int \text{ col}}$ : Diàmetre intern de la columna (m)

$V_{total \text{ int col}}$ : Volum intern de la columna ( $\text{m}^3$ )

$M_{col \text{ oper}}$ : Pes de la columna en operació (kg)

$M_{col \text{ buida}}$ : Pes de la columna buida (kg)

$M_{rebliment}$ : Pes del rebliment (kg)

$\rho_{aigua}$ : Densitat de l'aigua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$$V_{int \text{ cap}} = 0,1 \cdot 3,9^3 + 0,1 \cdot 0,324^3 + \frac{\pi \cdot 0,128}{4} \cdot 3,9^2 = 7,463 \text{ m}^3$$



$$V_{int\ col} = \frac{\pi \cdot 18,86}{4} \cdot 3,9^2 = 225,3\ m^3$$

$$V_{total\ int\ col} = 225,3 + 2 \cdot 7,463 = 240,22\ m^3$$

$$M_{col\ aigua} = 81.569,30 + 2500 + 1,1 \cdot 240,22 \cdot 997 = 347.525,33\ kg$$

### Pes de la columna en operació

El procediment es exactament igual al utilitzat en l'apartat del pes de la columna amb aigua, canviant la densitat de l'aigua per la densitat del fluid a processar, que en aquest cas la seva densitat és de 650 kg/m<sup>3</sup>.

$$M_{col\ oper} = 81.569,302 + 2500 + 1,1 \cdot 240,226 \cdot 650 = 255.831,01\ kg$$

### Aïllament

Per útil és decideix aïllar la columna tant per tenir un control més acurat de la temperatura de treball al seu interior i no es vegi influenciada per possibles canvis de temperatura a l'exterior de la planta així com per el perill que pugui tenir per els operaris el fet de tenir la columna sense cap mena de protecció.

S'ha decidit per a totes les columnes que el material més adient per aïllar els equips es la llana de vidre, la qual presenta una conductivitat tèrmica d'entre un 0,03 a 0,05 W/m°C.

L'espessor mínim de l'aïllant be expressada per l'Equació 72.

$$d = \frac{D_{ext}}{2} \cdot \left( \exp \left( \frac{\lambda}{\lambda_{ref}} \cdot \ln \frac{D_{ext} + 2 \cdot d_{ref}}{D_{ext}} \right) - 1 \right) \quad \text{Equació 11.72}$$

On:

d: Espessor mínim de l'aïllant (mm)

D<sub>ext</sub>: Diàmetre extern de la columna (mm)

λ: Conductivitat tèrmica de l'aïllant (W/m°C)

λ<sub>ref</sub>: Conductivitat tèrmica de referència (0,04 W/m°C)

d<sub>ref</sub>: Espessor mínim de referència (50 mm)

Una vegada determinat l'espessor de l'aïllant, es procedeix a calcular el volum d'aquest.

$$V_{cap\ aïll} = 0,1 \cdot \left( (R_{ext\ cap} + d)^3 - R_{ext\ cap}^3 \right) + 0,1 \cdot \left( (r_{ext\ cap} + d)^3 - r_{ext\ cap}^3 \right) + \frac{\pi \cdot h}{4} \cdot (2 \cdot d \cdot D_{ext\ col} + d^2) \quad \text{Equació 11.73}$$

$$V_{col\ aïll} = \frac{\pi \cdot h_c}{4} \cdot (2 \cdot d \cdot D_{ext\ col} + d^2) \quad \text{Equació 11.74}$$

Per tant, el volum total d'aïllant és calcula mitjançant l'Equació 75.

$$V_{total\ col\ aïll} = V_{col\ aïll} + 2 \cdot V_{cap\ aïll} \quad \text{Equació 11.75}$$

On:

$V_{cap\ aïll}$ : Volum del capçal aïllat ( $m^3$ )

$R_{ext\ cap}$ : Radi extern del capçal (m)

$d$ : Espessor de l'aïllant (m)

$r_{ext\ cap}$ : Radi extern de la curvatura dels capçals (m)

$V_{col\ aïll}$ : Volum de la part cilíndrica de la columna aïllada ( $m^3$ )

$h_c$ : Alçada de la part cilíndrica de la columna (m)

$D_{ext\ col}$ : Diàmetre extern de la columna (m)

$V_{total\ col\ aïll}$ : Volum total de la columna aïllada ( $m^3$ )

$$d = \frac{3973}{2} \cdot \left( \exp\left(\frac{0,05}{0,04} \cdot \ln \frac{3973 + 2 \cdot 50}{3918}\right) - 1 \right) = 62,69\ mm$$

Per tal de sobredimensionar, s'estima un espessor de 65 mm per al càlcul del volum necessari d'aïllant.

$$V_{cap\ aïll} = 0,1 \cdot ((3,973 + 0,065)^3 - 3,973^3) + 0,1 \cdot ((0,3973 + 0,065)^3 - 0,3973^3) + \frac{\pi \cdot 0,128}{4} \cdot (2 \cdot 0,065 \cdot 3,973 + 0,065^2) = 0,368\ m^3$$

$$V_{col\ aïll} = \frac{\pi \cdot 18,86}{4} \cdot (2 \cdot 0,065 \cdot 3,973 + 0,065^2) = 7,713\ m^3$$

$$V_{total\ col\ aïll} = 7,713 + 2 \cdot 0,368 = 8,451\ m^3$$

### 11.5.3 Columna separació etilbenzè CD-403

La columna CD-403 s'utilitza amb l'objectiu de separar l'etilbenzè, el qual es el nostre producte d'interès, del dietilbenzè. Treballa a pressió de 920 kPa i amb un rang de temperatura de 241,8 a 298,5 °C. Donat a que per dissenyar aquesta columna s'ha seguit el mateix procediment que la columna CD-402 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquesta columna, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

Tray Type	Sieve	Section Starting Stage	1_Main Tower
Diameter [m]	3,050	Section Ending Stage	42_Main Tower
Tray Spacing [m]	0,3800	Tray Type	Sieve
Number Of Passes	4	Number Of Passes	4
Hole Diameter [mm]	12,70	Tray Spacing [m]	0,3800
Hole Area to Active Area	0,1000	Section Diameter [m]	3,050
Deck Gauge Thickness	10 Gauge	Section Height [m]	15,96
Deck Gauge Thickness Value [mm]	3,404	Section Pressure Drop [mbar]	155,2
Cross-Sectional Area [m2]	7,306	Section Head Loss [mm]	2567
Active Area [m2]	5,845	Trays With Weeping	None
Net Area [m2]	6,576		

Figura 11.45. Valors obtinguts pel disseny de la columna de destil·lació CD-403

Taula 11.20. Valors obtinguts del disseny mecànic CD-403

Paràmetres	Valor
Material de construcció	Acer Inoxidable 316 L (SS 616 L)
Pressió de disseny (kPa)	297,43
Temperatura de disseny (°C)	202,29
Radi interior del capçal (m)	3,026
Gruix paret columna (mm)	7,41
Gruix capçal columna (mm)	7,55
Alçada capçal (m)	0,619
Alçada total columna (m)	20,488
Pes columna buida (kg)	12.884,813
Pes columna amb aigua (kg)	173.710,599
Pes columna en operació (kg)	143.172,938
Aïllament (Gruix (mm) / Volum (m <sup>3</sup> ))	65 / 6,43

## 11.6 Bescanviadors de calor

### 11.6.1 Introducció i consideracions

A la planta de EBenz es necessiten diferents tipus de bescanviadors de calor segons si es vol escalfar, calentar, evaporar o condensar els diferents corrents que circulen per el procés.

El tipus de bescanviador que s'utilitzarà en aquesta planta serà de carcassa i tubs, donat que aquest presenta diferents avantatges sobre la resta de possibilitats, entre les quals destaquen el seu fàcil disseny, una fàcil neteja i que son els més econòmics comparats amb altres tipus de bescanviadors. En la Figura 46 es pot observar un exemple del bescanviador escollit.

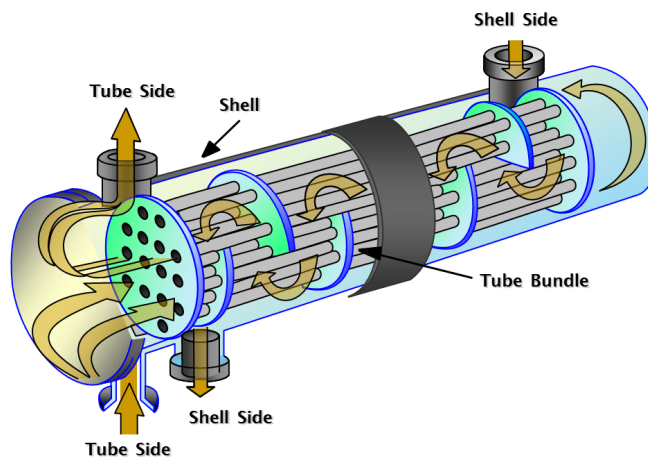


Figura 11.46.- Bescanviador de calor de carcassa i tubs

Partint d'aquest tipus de bescanviador, en la planta es pot trobar diferents tipus de bescanviadors de carcassa i tubs, segons la seva finalitat, que es divideixen quatre grans grups:

- Bescanviadors refrigerants
- Bescanviadors calefactors
- Condensadors
- Reboilers

### Circulació dels fluids

Un dels aspectes més importants a considerar en un bescanviador de calor es la localització dels fluids de procés. En aquesta planta existeix la possibilitat fer circular el fluid de procés per la carcassa o per tubs. Per tal de decidir quin fluid circula per carcassa i quin per tubs s'han tingut en compte diferents indicacions que s'han de seguir:

- En el cas dels tubs, circularà per aquest els fluids els quals siguin més corrosius i tòxics, així també com el que tinguin un coeficient d'embrutiment més petit debut a la dificultat de neteja del tubs.
- El fluid més calent circularà per tubs per així reduir la pèrdua de càrrega i facilitar l'intercanvi de calor.

### Velocitats típiques de circulació

La velocitat de circulació dels fluids és un aspecte molt important a tenir en compte per tal d'aconseguir una bona transferència de calor, donat a que existeixen uns valor típics segons la seva localitat, tipus de fluid i pressió a la qual circulen. En la Taula 21 es poden observar les velocitats típiques.

*Taula 11.21. Velocitat típiques*

CIRCULACIÓ PER TUBS	
Líquid de procés	1-2 m/s, 4 màxim si es vol evitar l'embrutiment
Aigua de torre	1,5 – 2,5 m/s
Líquid per carcassa	0,3 – 1 m/s
GASOS I VAPORS	
Buit	50 – 70 m/s
Pressió atmosfèrica	10 – 30 m/s
Alta pressió	5- 10 m/s

### Característiques dels tubs

En quan als tubs dels bescanviadors de calor, aquests solen tenir un diàmetre extern el qual oscil·la entre 16 i 50 mm. Generalment s'utilitzen tubs els quals tenen un diàmetre petit degut a que d'aquesta manera l'equip és més petit i econòmic, tot i que els tubs que son més amples tenen una major facilitat de ser netejats per mètodes mecànics.

En referència a l'espessor dels tubs, aquest valor ve determinat per la pressió interna i el factor de corrosió.

Els tubs han de tenir una certa distància entre dos tubs consecutius i aquesta distància s'anomena pitch. Aqueta distància vindrà determinada segons el tipus de distribució dels tubs escollida, la qual pot ser triangular, quadrada o romboidal tal com es pot observar en la Figura 47.

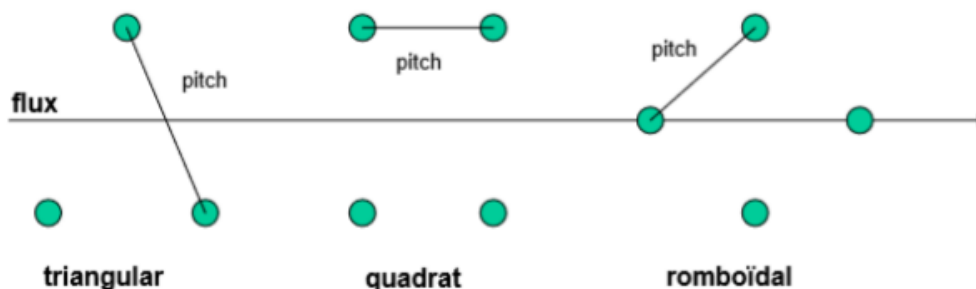


Figura 11.47. Tipus de distribució dels tubs

Els pitch triangulars i romboïdals presenten alta velocitat de transferència de calor, en canvi el pitch quadrat provoca pèrdues de pressió més baixes comparat amb els altres dos pitch. Per norma, el pitch recomanat és de 1,25 vegades el diàmetre extern del tub. A més, cada tipus de disposició té una aplicació diferent, les quals s'exposen en la Taula 21.

Taula 11.21. Diferents tipus de pitch

Tipus de disposició	Aplicacions
<b>Triangular 30°</b>	És el més utilitzat gràcies a la possibilitat de ser utilitzat en qualsevol tipus de règim de circulació i amb factors d'embrutiment baixos.
<b>Romboidal 60°</b>	No se sol utilitzar massa degut a que produeix una caiguda de pressió relativament alta.
<b>Quadrat 45°</b>	Se sol utilitzar quan es tenen fluxos laminars amb $Re < 2000$ .
<b>Quadrat 90°</b>	Empleats en casos on la neteja és un factor crucial i el flux és turbulent, juntament en casos on existeix una limitació de caiguda de pressió

### Característiques de la carcassa

En la planta de EBenz s'han tingut en compte tots els tipus de carcassa i capçals que es mostren en la Figura 48. Finalment s'ha decidit utilitzar la configuració BEM per tots els bescanviadors de refredament, esclafament i condensadors i la configuració BKU per als reboilers.

Un aspecte important a tenir en consideració és que la relació entre la longitud dels tubs i el diàmetre de la carcassa s'ha de situar entre 4 i 6 per tal d'obtenir un bescanviador el més optimitzat possible.

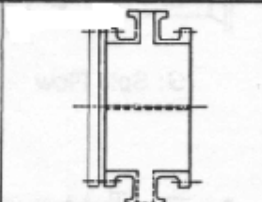
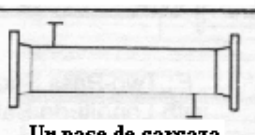
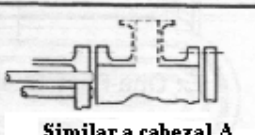
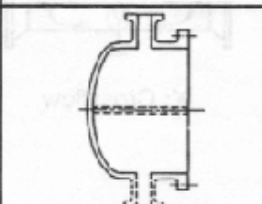
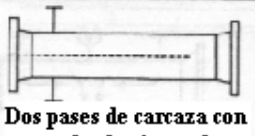

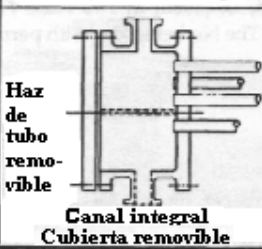
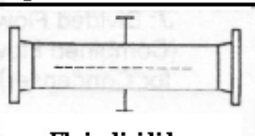

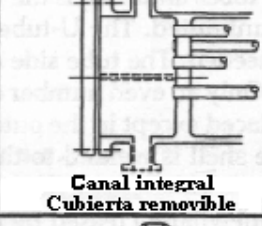



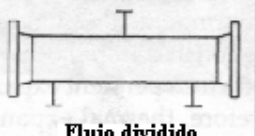

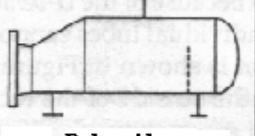

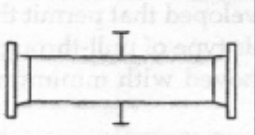
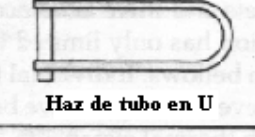

	Frente Cabezas estacionarios		Tipo de carcasa		Terminal Tipos de cabezal
A	 Canal y cubierta removible	E	 Un pase de carcasa	L	 Similar a cabezal A
B	 Bonete (cubierta integral)	F	 Dos pases de carcasa con separador horizontal	M	 Similar a cabezal B
C	 Haz de tubo removible Canal integral Cubierta removible	G	 Flujo dividido	N	 Similar a cabezal N
N	 Canal integral Cubierta removible	H	 Doble flujo dividido	P	 Cabezal flotante empacado por el exterior
D	 Altas presiones	J	 Flujo dividido	S	 Cabezal flotante
		K	 Rehervidor	T	 Cabezal flotante deslizante
		X	 Flujo cruzado	U	 Haz de tubo en U
				W	 Sello externo

Figura 11.48. Diferents configuracions de bescanviador

### Pantalles deflectores (Baffles) y separació entre pantalles

Les pantalles deflectores o baffles, es determinen principalment tenint en compte dos consideracions geomètriques, les quals son:

- L'espai que queda lliure entre la pantalla i la carcassa per on passarà el fluid. Aquest valor ha d'estar entre un 15 i 45% del diàmetre de la carcassa. Les valors òptims se situen en valors d'entre un 20 i 25%.

- L'espai entre pantalles deflectores. Aquest valor sol situar-se entre 0,2 i 1 vegades el diàmetre de la carcassa, tenint en compte que el valor òptim oscil·la entre 0,3 i 0,5 el diàmetre d'aquest.

En la Figura 49, es poden observar les característiques anteriorment esmentades.

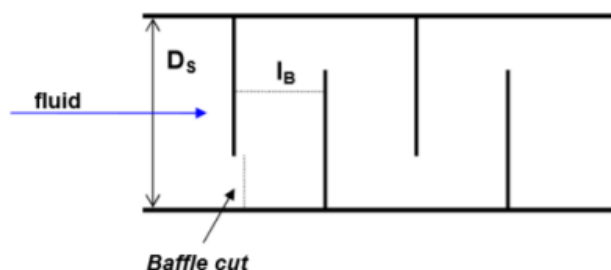


Figura 11.49. Representació altura lliure i espai entre pantalles

### Coefficient d'embrutiment (fouling)

El valor del coeficient d'embrutiment varia segons el fluid a tractar. Aquest embrutiment interior i exterior en els tubs dels bescanviadors suposa una resistència a la transmissió de calor i per tant es un factor que s'ha de tenir present a l'hora de dissenyar el bescanviador, especialment en fluids on que tenen tendència a ser més bruts.

Els coeficients d'embrutiment que s'han tingut en compte en el procés per els diferents fluids que intervenen estan recopilats en la Taula 22.

Taula 11.22. Coeficients d'embrutiment <sup>[10]</sup>

Fluid	Coefficient d'embrutiment (m <sup>2</sup> °C/W)
Fluid de procés	0,0002
Aigua de torre	0,0002

### Pèrdua de pressió

Les pèrdues de pressió venen donades principalment degut a les pèrdues per fricció i a contraccions/expansions. Aquestes pèrdues es poden estimar mitjançant mètodes correlatius i els seus límits depenen de l'estat del fluid per tal de que el disseny sigui el més òptim possible. Els límits de pèrdues de pressió venen recollides en la Taula 23.

Taula 11.23. Límits de pèrdues de pressió

Líquids		Gasos	
Viscositat (cP)	Pèrdua de pressió (kN/m <sup>2</sup> )	Pressió	Pèrdua de pressió (kN/m <sup>2</sup> )
$\mu < 1$	35	Buit elevat	0,4 - 0,5
$1 < \mu < 10$	5 - 70	Buit mig	0,1 * P <sub>absoluta</sub>
		1 a 2 bar	0,5 * P <sub>manomètrica</sub>
		>10 bar	0,1 * P <sub>manomètrica</sub>

Un cop establerts els valors típics i configuracions dels bescanviadors, en procedeix al disseny.

Per el disseny dels bescanviadors de calor s'ha utilitzat el programa Aspen Exchanger Design and Rating donat que aquest ens permet fer la simulació del disseny del bescanviador. Aquest programa es basa en el mètode de Kern respectant els paràmetres del codi ASME.

### 11.6.2 Mètode de Kern

Aquest mateix mètode s'ha fet servir per al disseny dels reactors multitubulars, per tant la metodologia seguida per el disseny dels bescanviador es igual a la dels reactors multitubulars.

El primer pas d'aquest mètode es decidir si el fluid de procés circularà per tubs o per carcassa.

En tots els bescanviadors que s'han utilitzat amb la finalitat de refredar el fluid de procés, el fluid calent circularà per tubs i el fluid refrigerant circularà per la carcassa.

El segon pas es comprovar la igualtat següent:

$$Q_Q = m_s \cdot C_{p_s} \cdot (T_{2,s} - T_{1,s}) = m_t \cdot C_{p_t} \cdot (T_{2,t} - T_{1,t}) \text{ Equació 11.76}$$

On:

$Q_Q$ : Cabal de calor bescanviat (W)

m: Cabal màssic (kg/s)

$C_p$ : Calor específic (J/kg°C)

$T_1$ : Temperatura de entrada del fluid (°C)

$T_2$ : Temperatura de sortida del fluid (°C)

La s fa referència a la carcassa

La t fa referència als tubs

Aquest mètode es tracta d'anar realitzant interaccions fins arribar al bescanviador amb els passos per tubs òptims, per començar se suposa un numero de passos per tubs i per carcassa que és 1, tot seguit es busca en la bibliografia un valor del coeficient global i es calcula l'àrea del bescanviador.

$$A = \frac{Q_Q}{U \cdot (\Delta T_{ml})_c} \text{ Equació 11.77}$$

On:

A: Àrea de bescanvi (m<sup>2</sup>)

U: Coeficient global de transmissió de calor (W/m<sup>2</sup>°C)

$(\Delta T_{ml})_c$ : Variació mitjana logarítmica de la temperatura (°C)

En tots els bescanviadors s'ha optat per una circulació en contracorrent dels fluids implicats, donat que amb aquest tipus de circulació aconseguix una transferència de calora major gràcies al gradient contant de temperatures.



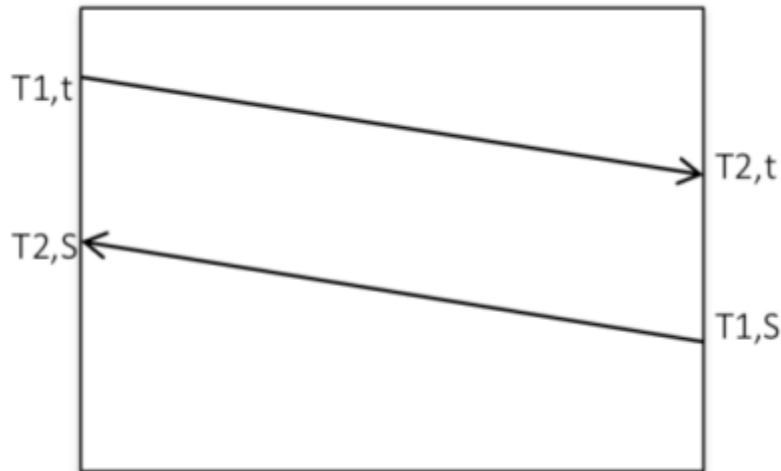


Figura 11.50. Perfil de temperatures en contracorrent

Una vegada son conegudes les temperatures d'entrada i sortida dels fluids que intervenen, es realitza el càlcul de la temperatura mitjana logarítmica.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad \text{Equació 11.78}$$

$$(\Delta T_{ml})_c = F \cdot \Delta T_{ml} \quad \text{Equació 11.79}$$

On:

$\Delta T_{ml}$ : Variació temperatura mitjana logarítmica

F: Factor de correcció a partir de correlacions gràfiques. Si aquest valor sobrepassa de 0,85, el valor de la variació de la mitjana logarítmica s'ha de corregir o bé el número de passos per carcassa.

A continuació, es determinen els paràmetres característics del tubs.

$$A_{tubs} = \pi \cdot D_{ext} \cdot L \quad \text{Equació 11.80}$$

On:

$A_{tubs}$ : Àrea de cada tub

$D_{ext}$ : Diàmetre exterior dels tubs

L: Longitud dels tubs

Una vegada se sap l'àrea de cada tub, es procedeix a calcular el numero de tubs necessària a partir de l'Equació 81.

$$Nt = \frac{A}{A_{tubs}} \quad \text{Equació 11.81}$$

El següent pas es especificar la disposició dels tubs. Donat que els fluids que circulen pel bescanviador no requereixen de una neteja freqüent, s'ha decidit escollir un pitch triangular.

Un cop escollit el pitch, el següent pas es el de la determinació del diàmetre de feixos de tubs a partir de les constants  $n_1$  i  $k_1$ , les quals son funció del pitch escollit i del numero de passos per tubs.

$$D_b = D_E \cdot \left(\frac{N_t}{K_1}\right)^{\frac{1}{n_1}} \quad \text{Equació 11.82}$$

Una vegada calculat el diàmetre de feixos de tubs, es procedeix a calcular la distància que hi haurà entre el feix de tubs i la carcassa, a partir de la Figura 51.

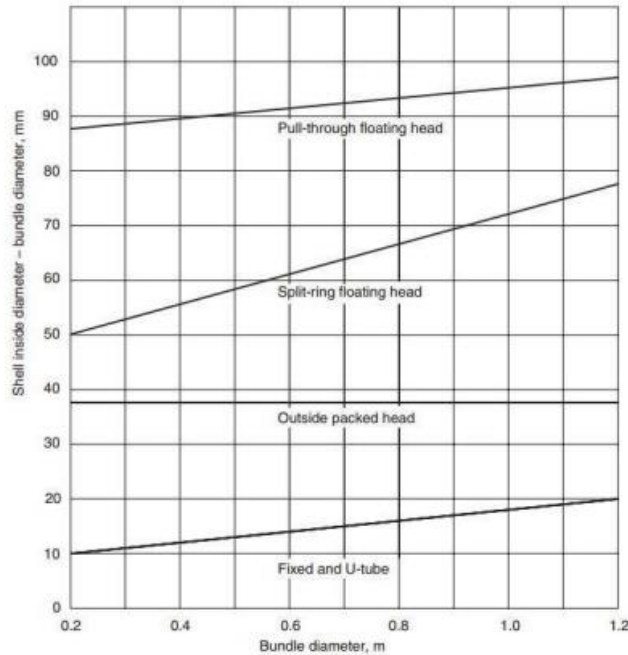


Figura 11.51. Distància entre feix de tubs i carcassa

Un cop obtingut el valor de la distància que hi haurà entre el feix de tubs i la carcassa, aquest es suma al diàmetre de feix de tubs amb el qual s'obté el diàmetre de la carcassa.

A continuació es calculen els paràmetres referits a les pantalles deflectores, les quals son les encarregades d'evitar la formació de vòrtex dintre de l'equip.

Tenint clares les anteriors consideracions, es procedeix a calcular en numero de pantalles deflectores segons l'Equació 83.

$$N_{pantalles} = \left(\frac{L}{l_B}\right) - 1 \quad \text{Equació 11.83}$$

A més s'ha de comprovar que la relació entre la longitud del tubs i el diàmetre de la carcassa esta dins del rang d'entre 4 i 6. En el cas de que obtinguem un valor superior s'ha de disminuir la longitud, en canvi, si obtenim un valor inferior, s'ha de d'augmentar la longitud dels tubs.

Per últim s'ha de comprovar la velocitat dels fluids, la qual ha de ser lo suficientment alta per prevenir possibles estancaments dels sòlids, però no massa alta ja que sinó podria ocasionar

problemes. En cas de que la velocitat augmentes, els coeficients de transferència augmenten i l'embrutiment es veu reduït. Aquest paràmetre es comprova observant la Taula 21.

També s'ha de calcular el coeficient individual global. El programa el calcula de manera automàtica gràcies a una sèrie de correlacions. Per a la realització d'aquest càlcul es tenen en compte els coeficients d'embrutiment dels diferents fluids utilitzats.

$$\frac{1}{U_r} = \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_t} + \frac{D_{ext} \cdot \ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{int}}\right)}{2 \cdot k_{acer}} + \frac{D_{ext}}{D_{int}} \cdot \frac{1}{R_t} + \frac{D_{ext}}{D_{int}} \cdot \frac{1}{h_c} \quad \text{Equació 11.84}$$

On:

$h_r$ : Factor d'embrutiment del fluid per tubs

$h_s$ : Factor d'embrutiment del fluid per carcassa

$k_{acer}$ : Conductivitat tèrmica de l'acer

## DISSENY AMB ASPEN HYSYS

### 11.6.3 Bescanviador E-301

Per la realització del disseny tant mecànic com funcional dels bescanviadors de calor de carcassa i tubs s'ha realitzat mitjançant el programa Aspen Exchanger Design and Rating. Aquest programa ofereix la possibilitat de realitzar una simulació del disseny de qualsevol tipus de bescanviadors i una de les grans avantatges es que presenta una gran base de dades de propietats físiques i de models termodinàmics.

A continuació es comenten les passos realitzats amb el programa Aspen Exchanger per a la simulació dels bescanviadors, tenen en compte els factors comentats anteriorment.

El primer pas es seleccionar el tipus de bescanviador de es vol dissenyar. En aquest cas es tracta d'un bescanviador de tubs i carcassa.

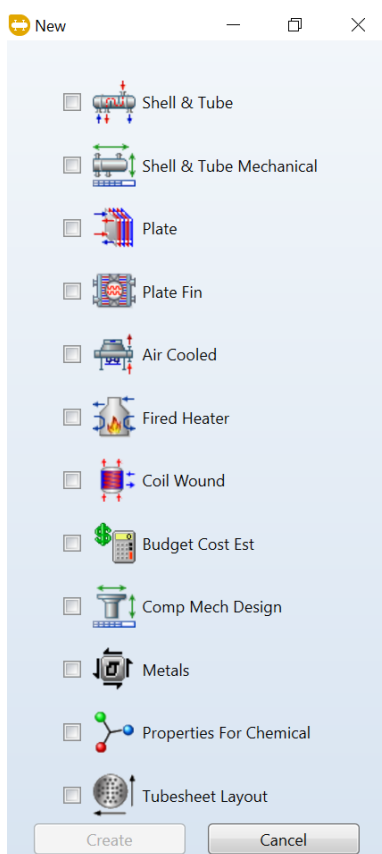


Figura 11.52. Diferents tipus de bescanviadors

Un cop escollit el tipus de bescanviador, es procedeix a decidir per on circularà el fluid calent, si per tubs o per carcassa. En tots els casos el fluid calent circularà per tubs.

Geometry | 
  Process | 
  Errors & Warnings

Calculation mode: Design (Sizing)

**Configuration**

TEMA Type: B - E - M -

Tube layout option: New (optimum) layout

Location of hot fluid: Tube side

Tube OD / Pitch: mm 15 / 18,75

Tube pattern: 30-Triangular

Tubes are in baffle window: Yes

Baffle type: Single segmental

Baffle cut orientation: Horizontal

Default exchanger material: SS 316L 9

Figura 11.53. Definició de la circulació del fluid calent

El següent pas es el de definir el sistema. Per això es defineixen les propietats conegudes, és a dir, les temperatures d'entrada i sortida del fluid de procés, així com el cabal i la pressió a la que entra al bescanviador. També s'han de definir les propietats el fluid refrigerant o tèrmic.

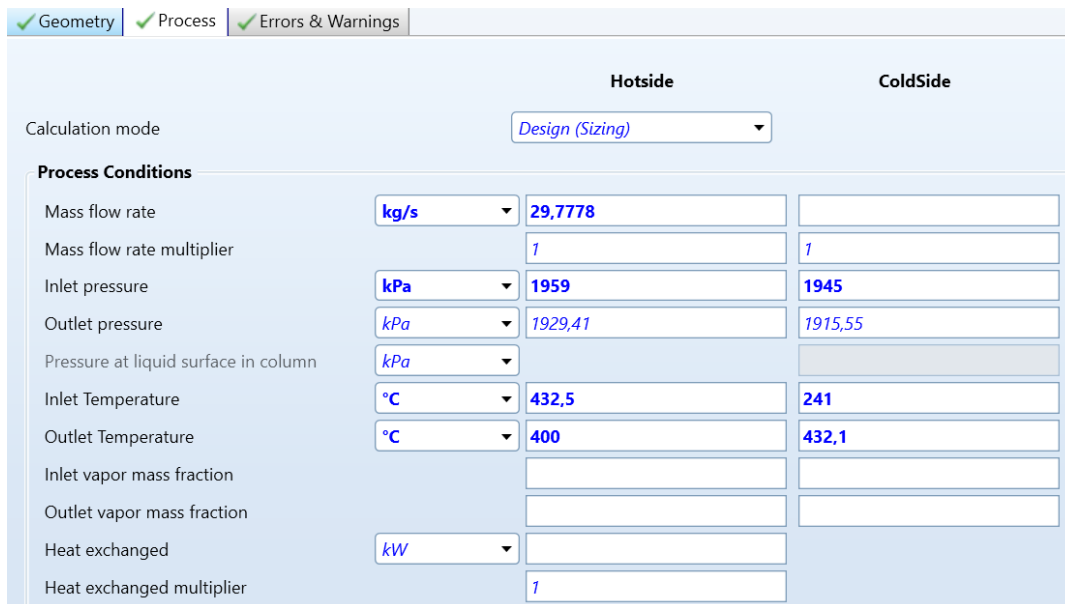
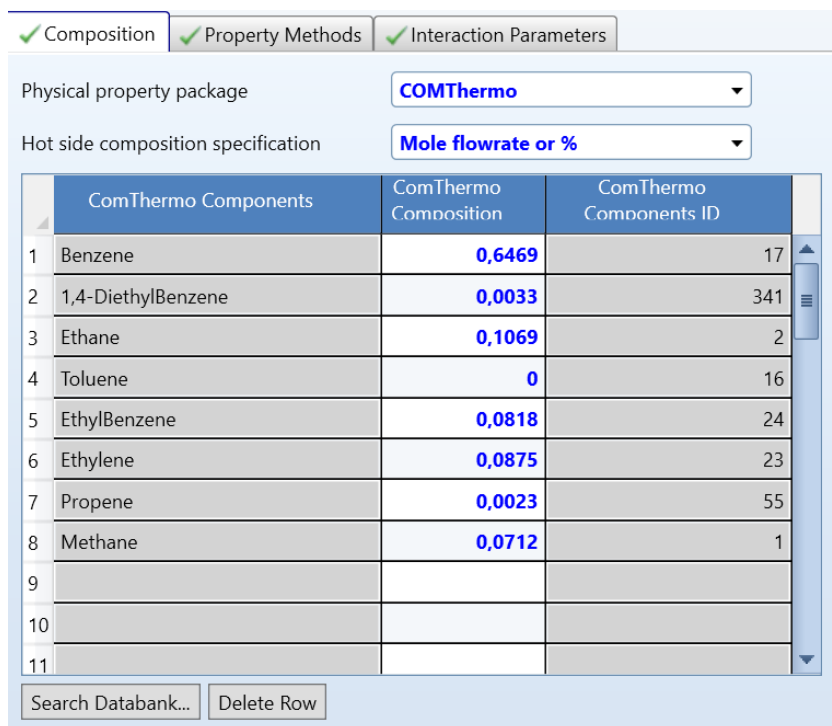


Figura 11.54. Definició del sistema

A continuació s'han de definir les composicions dels fluids que intervenen en el procés, les seves propietats i el model termodinàmic. Aquests paràmetres s'han de definir tant pel fluid calent com pel fluid fred.

El programa proporciona una base de dades de la qual es poden definir les composicions.



	ComThermo Components	ComThermo Composition	ComThermo Components ID
1	Benzene	0,6469	17
2	1,4-DiethylBenzene	0,0033	341
3	Ethane	0,1069	2
4	Toluene	0	16
5	EthylBenzene	0,0818	24
6	Ethylene	0,0875	23
7	Propene	0,0023	55
8	Methane	0,0712	1
9			
10			
11			

Figura 11.55. Definició de la composició dels fluids

També s'ha de definir la geometria que tindrà el bescanviador. En aquest cas tots els bescanviadors de calor tenen una geometria BEM.

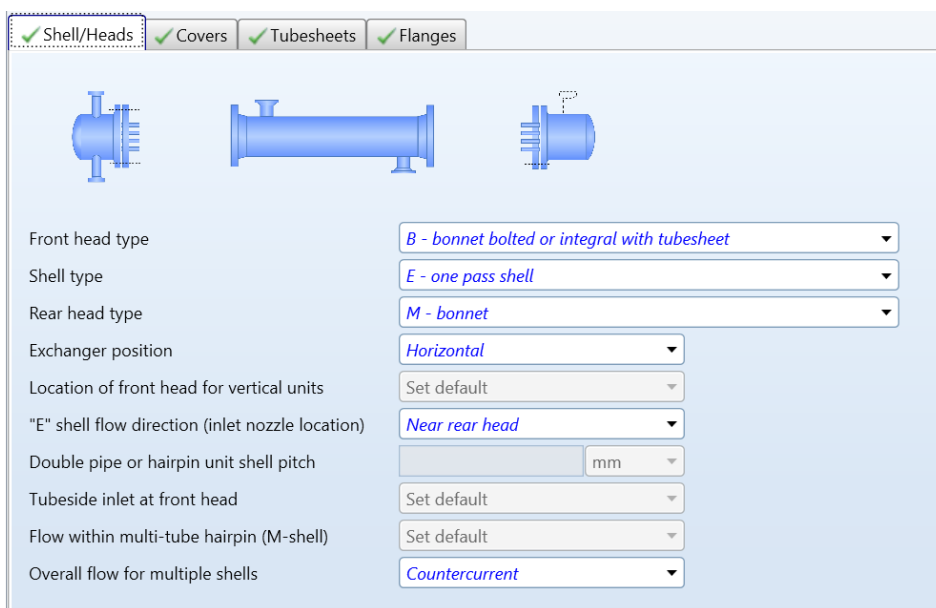


Figura 11.56. Geometria del bescanviador

A continuació s'ha de definir el diàmetre dels tubs i del pitch, que com s'ha comentat anteriorment, aquest serà triangular.

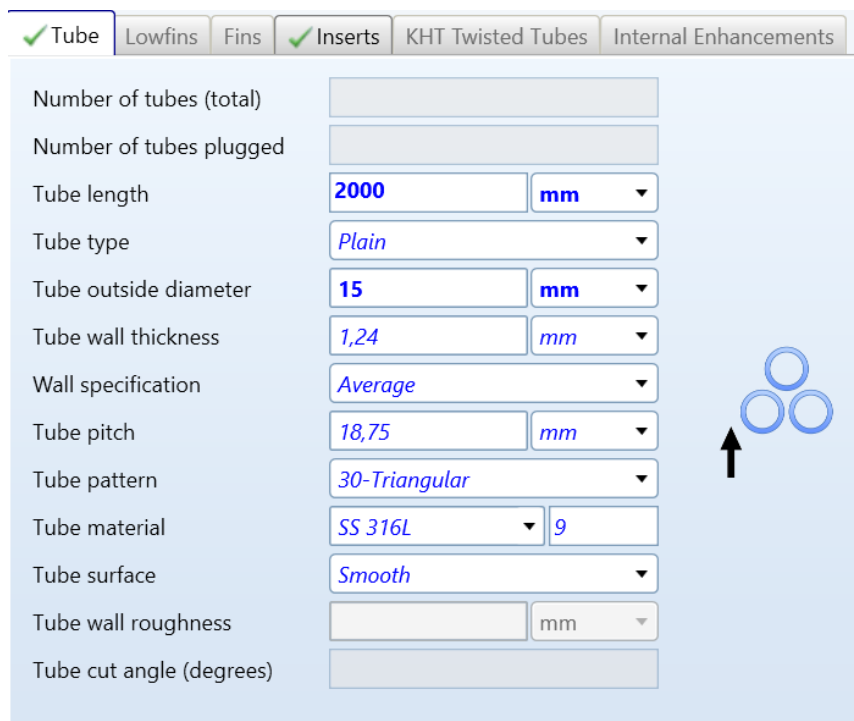


Figura 11.57. Definició del diàmetre dels tubs

El programa també ens dona l'opció d'escollir el tipus de pantalles deflectores que es vol utilitzar en el bescanviador.

Baffles  
  Tube Supports  
 Longitudinal Baffles  
  Variable Baffle Pitches  
  Deresonating Baffles

Baffle type:

Tubes are in baffle window:

Baffle cut % - inner/outer/intermediate:  /  /

Align baffle cut with tubes:

Multi-segmental baffle starting baffle:

Baffle cut orientation:

Baffle thickness:  mm

Baffle spacing center-center (Bc):  mm

Baffle spacing at inlet (Bi):  mm      at outlet (Bo):  mm

Number of baffles:




Figura 11.58. Definició del les pantalles deflectores

Per útil, el programa ens dona l'opció d'escollir de quin material estarà construït el bescanviador de calor. Tenint en compte les propietats químiques dels fluids que s'utilitzen al llarg del procés, s'escull el material de construcció més adequat.

Vessel Materials  
  Cladding/Gasket Materials  
  Tube Properties

Default exchanger material:

Component	Material	Designator
Cylinder - hot side	<input type="text" value="SS 316L"/>	<input type="text" value="9"/>
Cylinder - cold side	<input type="text" value="SS 316L"/>	<input type="text" value="9"/>
Tubesheet	<input type="text" value="SS 316L"/>	<input type="text" value="9"/>
Double tubesheet (inner)	<input type="text" value="Set Default"/>	<input type="text" value="0"/>
Baffles	<input type="text" value="SS 316L"/>	<input type="text" value="9"/>
Tube material	<input type="text" value="SS 316L"/>	<input type="text" value="9"/>
Fin material	<input type="text" value="Set Default"/>	<input type="text" value="0"/>

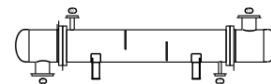
Figura 11.59. Elecció del material del bescanviador

Un cop acabat de configurar el bescanviador, el programa calcula totes les especificacions del bescanviador desitjat.

Aquestes especificacions venen recollides un full resum com el que es mostra a la Figura 60.

TEMA Sheet

Heat Exchanger Specification Sheet										
1	Company:									
2	Location:									
3	Service of Unit:				Our Reference:					
4	Item No.:				Your Reference:					
5	Date:			Rev No.:		Job No.:				
6	Size : 381 - 2000 mm		Type:	BEM Horizontal		Connected in: 8 parallel		2 series		
7	Surf/unit(eff.) 443 m <sup>2</sup>		Shells/unit 16		Surf/shell(eff.) 27,7 m <sup>2</sup>					
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT									
9	Fluid allocation			Shell Side			Tube Side			
10	Fluid name									
11	Fluid quantity, Total kg/s			2,9333			29,7778			
12	Vapor (In/Out) kg/s			0		2,9333		29,7778		
13	Liquid kg/s			2,9333		0		0		
14	Noncondensable kg/s			0		0		0		
15										
16	Temperature (In/Out) °C			241		432,1		432,5		
17	Bubble / Dew point °C			/ 293,49		256,8 / 293,3		/ /		
18	Density Vapor/Liquid kg/m <sup>3</sup>			/ 596,09		38,27 /		23,48 /		
19	Viscosity mPa-s			/ 0,109		0,0171 /		0,0201 /		
20	Molecular wt, Vap					99,29		66,57		
21	Molecular wt, NC									
22	Specific heat kJ/(kg-K)			/ 2,706		2,56 /		2,423 /		
23	Thermal conductivity W/(m-K)			/ 0,073		0,0522 /		0,0598 /		
24	Latent heat kJ/kg			218,2		186,6				
25	Pressure (abs) bar			20		19,96		19,7		
26	Velocity (Mean/Max) m/s			0,35 / 0,39				8,12 / 8,6		
27	Pressure drop, allow./calc. bar			0,49987		0,06244		0,297		
28	Fouling resistance (min) m <sup>2</sup> -K/W			0,0002				0,0002		
29	Heat exchanged 2306,1 kW					MTD (corrected) 35,82 °C				
30	Transfer rate, Service 145,3			Dirty 158,8		Clean 171,2		W/(m <sup>2</sup> -K)		
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL									
32				Shell Side			Tube Side			
33	Design/Vacuum/test pressure bar			22,06323/ /			22,06323/ /			
34	Design temperature / MDMT °C			471,11 /			471,11 /			
35	Number passes per shell			1			1			
36	Corrosion allowance mm			3,18			3,18			
37	Connections In mm			1 25,4 / -		1 152,4 / -				
38	Size/Rating Out			1 38,1 / -		1 152,4 / -				
39	Nominal Intermediate			1 38,1 / -		1 152,4 / -				
40	Tube #: 309			OD: 15		Tks. Average 1,65 mm		Length: 2000 mm		
41	Tube type: Plain			Insert: None		Fin#: #/m		Material: SS 316L		
42	Shell SS 316L			ID 373,08		OD 406,4 mm		Shell cover -		
43	Channel or bonnet SS 316L							Channel cover -		
44	Tubesheet-stationary SS 316L							Tubesheet-floating -		
45	Floating head cover -							Impingement protection None		
46	Baffle-cross SS 316L			Type Single segmental		Cut(%d) 41,3		H. Spacing: c/c 500 mm		
47	Baffle-long -			Seal Type				Inlet 700,79 mm		
48	Supports-tube U-bend			0		Type				
49	Bypass seal			Tube-tubesheet joint			Expanded only (2 grooves)(App.A 'i')			
50	Expansion joint -			Type None						
51	RhoV2-Inlet nozzle 1390			Bundle entrance 0		Bundle exit 6		kg/(m-s <sup>2</sup> )		
52	Gaskets - Shell side -			Tube side			Flat Metal Jacket Fibe			
53	Floating head -									
54	Code requirements ASME Code Sec VIII Div 1					TEMA class R - refinery service				
55	Weight/Shell 1148,1			Filled with water 1410,8		Bundle 445,3		kg		
56	Remarks									
57										
58										



**Figura 11.60. Fitxa tècnica del bescanviador E-301**



### 11.6.4 Bescanviador E-302

El bescanviador E-302 es troba situat entre el reactor R-301 i R-302. La seva finalitat es la de refredar el corrent de sortida del R-301 fins a 400°C, la qual es la temperatura ideal la qual ha d'entrar al reactor R-302 per tal d'optimitzar la reacció. S'encarrega d'absorbir la calor que ha alliberat el R-301.

Donat a que per dissenyar aquest bescanviador s'ha seguit el mateix procediment que el bescanviador E-301 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest bescanviador, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

*Taula 11.24. Dades E-302*

<b>Cabal a refredar (kg/s)</b>	32,0278
<b>Cabal d'aigua (kg/s)</b>	29,9533
<b>Temperatura entrada / sortida (°C)</b>	416,7 / 400
<b>Calor bescanviat (kW)</b>	1.292,00
<b>Àrea de bescanvi (m<sup>2</sup>)</b>	69,1
<b>Número de tubs</b>	242
<b>Llargada de tubs (mm)</b>	2.500
<b>Diàmetre de la carcassa (mm)</b>	457,2
<b>Diàmetre dels tubs (mm)</b>	19,05
<b>Pitch (mm)</b>	23,81
<b>Material</b>	SS 316L
<b>Tipus</b>	BEM

### 11.6.5 Bescanviador E-401

El bescanviador E-401 es troba situa a la sortida del reactor R-303 i R-500. Aquest es l'encarregat de refredar el corrent que entrarà a la columna CD-401. Per tal d'aprofitar el calor d'aquest corrent, es refreda amb el corrent de benzè que hi ha a l'entrada del procés just avanç de ajuntar-se amb el corrent d'etilè el qual es troba a temperatura ambient. D'aquesta manera es duu a terme un aprofitament energètic i s'estalvia una quantitat important tant d'aigua com d'oli tèrmic.

Donat a que per dissenyar aquest bescanviador s'ha seguit el mateix procediment que el bescanviador E-301 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest bescanviador, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

Taula 11.25. Dades E-401

<b>Cabal a refredar (kg/s)</b>	34,9444
<b>Cabal a escalfar (kg/s)</b>	25,5861
<b>Temperatura entrada / sortida (°C)</b>	127,8 / 436,1
<b>Calor bescanviat (kW)</b>	23.769,50
<b>Àrea de bescanvi (m<sup>2</sup>)</b>	399,40
<b>Número de tubs</b>	325
<b>Llargada de tubs (mm)</b>	2.700
<b>Diàmetre de la carcassa (mm)</b>	558,80
<b>Diàmetre dels tubs (mm)</b>	19,05
<b>Pitch (mm)</b>	23,81
<b>Material</b>	SS 316L
<b>Tipus</b>	BEM

### 11.6.6 Bescanviador E-402

El bescanviador E-402 es troba situa a la sortida de la columna CD-403 amb la finalitat de refredar el corrent d'etilbenzè des d'una temperatura de 135°C fins a 30°C, la qual es la temperatura recomanada d'emmagatzematge.

Donat a que per dissenyar aquest bescanviador s'ha seguit el mateix procediment que el bescanviador E-301 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest bescanviador, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

Taula 11.25. Dades E-402

<b>Cabal a refredar (kg/s)</b>	11,9917
<b>Cabal d'aigua (kg/s)</b>	54,0104
<b>Temperatura entrada / sortida (°C)</b>	135 / 30
<b>Calor bescanviat (kW)</b>	2.330,00
<b>Àrea de bescanvi (m<sup>2</sup>)</b>	83,50
<b>Número de tubs</b>	98
<b>Llargada de tubs (mm)</b>	1.500
<b>Diàmetre de la carcassa (mm)</b>	323,85
<b>Diàmetre dels tubs (mm)</b>	19,05
<b>Pitch (mm)</b>	23,81
<b>Material</b>	SS 316L
<b>Tipus</b>	BEM

### 11.6.7 Bescanviador E-500

El bescanviador E-500 es troba situat a la sortida del E-301. Aquest s'encarrega d'esclafar el corrent d'entrada al reactor de transalquilació, el qual per tal de tenir una reacció lo més òptima possible en el reactor a d'estar a 500°C. Per tal de esclafar aquest corrent, s'aprofita el corrent que surt del reactor de transalquilació, el qual es troba a una temperatura de 503,9°C. D'aquesta manera, el corrent que surt del reactor R-500, es refreda prèviament avanç d'entrar al bescanviador E-401 per tal de baixar la temperatura a 185°C, la qual es la temperatura a la que la mescla entra a les columnes.

Donat a que per dissenyar aquest bescanviador s'ha seguit el mateix procediment que el bescanviador E-301 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest bescanviador, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

**Taula 11.26.** Dades E-500

<b>Cabal a refredar (kg/s)</b>	2,9333
<b>Cabal a esclafar (kg/s)</b>	2,930
<b>Temperatura entrada / sortida (°C)</b>	432,1 / 500
<b>Calor bescanviat (kW)</b>	523,00
<b>Àrea de bescanvi (m<sup>2</sup>)</b>	139,00
<b>Número de tubs</b>	94
<b>Llargada de tubs (mm)</b>	1.400
<b>Diàmetre de la carcassa (mm)</b>	273,05
<b>Diàmetre dels tubs (mm)</b>	15
<b>Pitch (mm)</b>	18,75
<b>Material</b>	SS 316L
<b>Tipus</b>	BEM

### 11.6.8 Condensador C-401

El condensador C-401 es troba situat a la columna CD-401. Aquest es un condensador parcial, ja que el producte que es vol obtenir, el qual són gasos, ha d'estar en fase vapor i el reflux que torna a la columna ha d'estar en fase líquida. El condensador C-401 es refreda amb aigua la qual prové de la torre de refrigeració a 30 graus i surt a 40 graus.

Donat a que per dissenyar aquest bescanviador s'ha seguit el mateix procediment que el bescanviador E-301 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest bescanviador, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

Taula 11.27. Dades C-401

<b>Cabal a refrigerar (kg/s)</b>	22,4527
<b>Cabal d'aigua (kg/s)</b>	262,115
<b>Temperatura entrada / sortida (°C)</b>	119,6 / 31,98
<b>Calor bescanviat (kW)</b>	11.307,60
<b>Àrea de bescanvi (m<sup>2</sup>)</b>	1.280
<b>Número de tubs</b>	193
<b>Llargada de tubs (mm)</b>	2.200
<b>Diàmetre de la carcassa (mm)</b>	558,80
<b>Diàmetre dels tubs (mm)</b>	25,00
<b>Pitch (mm)</b>	31,25
<b>Material</b>	SS 316L
<b>Tipus</b>	BEM

### 11.6.9 Condensador C-402

El condensador C-402 es troba situat a la columna CD-402. Aquest es un condensador total, ja que el producte que es vol obtenir ha d'estar en fase líquida i el reflux que torna a la columna també ha d'estar en fase líquida. El condensador C-402 es refreda amb aigua la qual prové de la torre de refrigeració a 30 graus i surt a 40 graus.

Donat a que per dissenyar aquest bescanviador s'ha seguit el mateix procediment que el bescanviador E-301 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest bescanviador, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

Taula 11.28. Dades C-402

<b>Cabal a refrigerar (kg/s)</b>	41,3055
<b>Cabal d'aigua (kg/s)</b>	309,1998
<b>Temperatura entrada / sortida (°C)</b>	173,5 / 173,5
<b>Calor bescanviat (kW)</b>	13.338,90
<b>Àrea de bescanvi (m<sup>2</sup>)</b>	125,80
<b>Número de tubs</b>	255
<b>Llargada de tubs (mm)</b>	3.500
<b>Diàmetre de la carcassa (mm)</b>	619,12
<b>Diàmetre dels tubs (mm)</b>	23,00
<b>Pitch (mm)</b>	28,75
<b>Material</b>	SS 316L
<b>Tipus</b>	BEM

### 11.6.10 Condensador C-403

El condensador C-403 es troba situat a la columna CD-403. Aquest es un condensador total, ja que el producte que es vol obtenir ha d'estar en fase líquida i el reflux que torna a la columna també ha d'estar en fase líquida. El condensador C-403 es refreda amb aigua la qual prové de la torre de refrigeració a 30 graus i surt a 40 graus.

Donat a que per dissenyar aquest bescanviador s'ha seguit el mateix procediment que el bescanviador E-301 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest bescanviador, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

*Taula 11.29. Dades C-403*

<b>Cabal a refrigerar (kg/s)</b>	28,7222
<b>Cabal d'aigua (kg/s)</b>	175,3557
<b>Temperatura entrada / sortida (°C)</b>	243 / 241
<b>Calor bescanviat (kW)</b>	7.564,80
<b>Àrea de bescanvi (m<sup>2</sup>)</b>	40,00
<b>Número de tubs</b>	176
<b>Llargada de tubs (mm)</b>	2.200
<b>Diàmetre de la carcassa (mm)</b>	406,40
<b>Diàmetre dels tubs (mm)</b>	17,00
<b>Pitch (mm)</b>	21,25
<b>Material</b>	SS 316L
<b>Tipus</b>	BEM

### 11.6.11 Reboiler RB-401

El reboiler RB-401 es troba situat a la columna CD-401. Aquest té la finalitat de passar una part del líquid que surt de la columna a vapor, mentre que el producte que es vol obtenir seguirà sent líquid. Per tant, el reboiler RB-401 realitza un canvi parcial d'estat.

Donat a que per dissenyar aquest bescanviador s'ha seguit el mateix procediment que el bescanviador E-301 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest bescanviador, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

Taula 11.30. Dades RB-401

<b>Cabal a escalfar (kg/s)</b>	35,8333
<b>Cabal d'oli tèrmic (kg/s)</b>	5,3266
<b>Temperatura entrada / sortida (°C)</b>	189,8 / 191,6
<b>Calor bescanviat (kW)</b>	1.739,80
<b>Àrea de bescanvi (m<sup>2</sup>)</b>	29,50
<b>Número de tubs</b>	27
<b>Llargada de tubs (mm)</b>	1.500
<b>Diàmetre de la carcassa (mm)</b>	273,00
<b>Diàmetre dels tubs (mm)</b>	21,00
<b>Pitch (mm)</b>	26,25
<b>Material</b>	SS 316L
<b>Tipus</b>	BEM

### 11.6.12 Reboiler RB-402

El reboiler RB-402 es troba situat a la columna CD-402. Aquest té la finalitat de passar una part del líquid que surt de la columna a vapor, mentre que el producte que es vol obtenir seguirà sent líquid. Per tant, el reboiler RB-402 realitza un canvi parcial d'estat.

Donat a que per dissenyar aquest bescanviador s'ha seguit el mateix procediment que el bescanviador E-301 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest bescanviador, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

Taula 11.31. Dades RB-402

<b>Cabal a escalfar (kg/s)</b>	67,8611
<b>Cabal d'oli tèrmic (kg/s)</b>	53,5745
<b>Temperatura entrada / sortida (°C)</b>	245 / 245,5
<b>Calor bescanviat (kW)</b>	14.242,90
<b>Àrea de bescanvi (m<sup>2</sup>)</b>	371,70
<b>Número de tubs</b>	268
<b>Llargada de tubs (mm)</b>	2.500
<b>Diàmetre de la carcassa (mm)</b>	558,80
<b>Diàmetre dels tubs (mm)</b>	21,00
<b>Pitch (mm)</b>	26,25
<b>Material</b>	SS 316L
<b>Tipus</b>	BEM

### 11.6.13 Reboiler RB-403

El reboiler RB-403 es troba situat a la columna CD-403. Aquest té la finalitat de passar una part del líquid que surt de la columna a vapor, mentre que el producte que es vol obtenir seguirà sent líquid. Per tant, el reboiler RB-403 realitza un canvi parcial d'estat.

Donat a que per dissenyar aquest bescanviador s'ha seguit el mateix procediment que el bescanviador E-301 i que les dades característiques es presentaran en el full d'especificacions corresponent a aquest bescanviador, en aquest apartat es mostraran directament els valor obtinguts.

*Taula 11.32. Dades RB-403*

<b>Cabal a escalfar (kg/s)</b>	35,8611
<b>Cabal d'oli tèrmic (kg/s)</b>	49,0425
<b>Temperatura entrada / sortida (°C)</b>	297,7 / 298,5
<b>Calor bescanviat (kW)</b>	7.816,40
<b>Àrea de bescanvi (m<sup>2</sup>)</b>	238,70
<b>Número de tubs</b>	266
<b>Llargada de tubs (mm)</b>	2.000
<b>Diàmetre de la carcassa (mm)</b>	457,20
<b>Diàmetre dels tubs (mm)</b>	17,00
<b>Pitch (mm)</b>	21,25
<b>Material</b>	SS 316L
<b>Tipus</b>	BEM

## 11.7 Serveis de planta

### 11.7.1 Torre de refrigeració

La planta té unes necessitats de refrigerar els fluids de procés mitjançant aigua la qual es refreda mitjançant una torre de refrigeració.

A EBenz, la temperatura requerida del refrigerant per refredar tots els equips es troba en la gran majoria a 30°C, per tant es requereix una torre que refredi l'aigua contínuament. Aquest corrent principal prové de la torre de refrigeració i es divideixen en diferent corrents per tal de satisfer les necessitats dels equips.

El equip els qual requereixen refredar aigua la torre són els que es mostren en la Taula 33.

Taula 11.33. Equips amb necessitat de la torre de refrigeració

Equip	Calor bescanviat (kW)	Aigua (m <sup>3</sup> /h)
E-302	1.292,00	108,15
E-402	2.330,00	195,02
C-401	11.307,60	946,45
C-402	13.338,90	1.116,46
C-403	7.564,80	633,18
<b>Total</b>	<b>35.833,30</b>	<b>2999,28</b>

Per tant, s'ha d'escollir una torre de refrigeració la qual sigui capaç de bescanviar un total de 35.833,30 kW. Per tal de satisfer aquestes necessitats s'ha decidit posar 4 torres de refrigeració.

### 11.7.2 Caldera

La planta té unes necessitats d'esclafar els fluids de procés mitjançant oli tèrmic el qual s'escalfa mitjançant una caldera de d'oli tèrmic.

A EBenz, la temperatura requerida de l'oli tèrmic per satisfer les necessitats tots els equips es troba en la gran majoria a 370°C, per tant es requereix una caldera bescanvií tot el calor alliberat durant el procés. Aquest corrent principal prové de la caldera d'oli tèrmic i es divideixen en diferents corrents per tal de satisfer les necessitats dels equips.

El equip els quals s'han d'esclafar mitjançant oli tèrmic tenen les següents necessitats mostrades en la Taula 34.

Taula 11.34. Equips amb necessitat de caldera

Equip	Calor bescanviat (kW)	Oli tèrmic (kg/h)
RB-401	1.739,80	19.175,76
RB-402	14.242,90	192.868,20
RB-403	7.816,40	176.553
<b>Total</b>	<b>23.799,10</b>	<b>388.596,96</b>

Per tant s'ha d'escollir una caldera d'oli tèrmic la qual sigui capaç de bescanviar un total de 23.799,10 kW. Per tal de satisfer aquestes necessitats s'ha decidit posar una caldera d'oli tèrmic amb una capacitat de 30.000 kW.

### 11.7.3 Aire comprimit

L'aire comprimit que es necessita en la planta principalment prové de les vàlvules automàtiques a partir del seu actuator donat que no es té cap equip el qual tingui unes necessitats d'aire comprimit de manera intensiva. Aquestes vàlvules necessiten aire comprimit a 6 bars, per lo qual necessiten un compressor que pugui proporcionar el cabal necessari a la pressió de treball.

Les vàlvules requereixen d'un mínim de 1,5 m<sup>3</sup>/h i d'un màxim de 3 m<sup>3</sup>/h d'aire comprimit per al seu funcionament òptim. Per lo tant, s'escull el cas més desfavorable i amb el número de vàlvules automàtiques que es té en la planta s'estima les necessitats d'aire comprimit de la planta.

$$Q_{\text{aire}} = 3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot N_{\text{vàlvules}} = 3 * 92 = 276 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad \text{Equació 11.85}$$



### 11.7.4 Nitrogen

Les necessitats de nitrogen venen marcades pel volum dels equips els quals necessiten d'aquest. A la Taula 35 es mostres els volums dels equips per tal de realitzar una estimació de la quantitat de nitrogen requerit.

*Taula 11.35. Volum necessari de nitrogen*

Equip	Volum (m3)
<b>T-101 / T-107</b>	3010
<b>T-601 / T-609</b>	4140
<b>R-301</b>	126,5
<b>R-302</b>	138
<b>R-303</b>	166,75
<b>R-500</b>	11,5
<b>TP-200</b>	139,15
<b>TP-401</b>	52,7
<b>TP-402</b>	8,248
<b>TP-403</b>	6,219
<b>M-200</b>	4,677
<b>M-500</b>	0,809
<b>CD-401</b>	75,015
<b>CD-402</b>	240,22
<b>CD-404</b>	123,74
<b>Total</b>	8.243,51

La suma de tots els volums dels equips els quals necessitaran nitrogen és de 8.243,51 m<sup>3</sup>. Aquest valor el passem a estat líquid dividint el volum entre 727, obtenint un valor de necessitats de nitrogen líquid de 11,339 m<sup>3</sup>.

Es passa primer a dm<sup>3</sup> obtenint 11339,10 dm<sup>3</sup> i per últim es passa a massa amb la seva densitat la qual és de 0,8083 kg/dm<sup>3</sup>, obtenint finalment una quantitat de nitrogen de 14.028,34 kg.

S'ha decidit que el temps per inertitzar tot els equips ha sigut de 8 hores. Per tant el cabal de nitrogen necessari serà de 1.417,38 dm<sup>3</sup>/h o el que es el mateix 1.753,54 kg/h.

### 11.7.5 Estació transformadora

Per tal de que la planta pugui operar ha d'existir una estació transformadora la qual satisfaci les necessitats elèctriques de la planta. L'energia elèctrica consumida ve donada per els diferents equips de la planta de producció i per la zona on es troben situades les oficines. Per tal de quantificar el consum en els diferents equips s'utilitza la potència d'aquest, mentre que per les oficines es realitzarà una estimació, essent aquesta potència un 10% de la que consumeixen els equips de la planta. A més per evitar incidències un cop calculada la potència final, aquesta serà sobredimensionada un 15%.

A la Taula 36 es poden observar les potències dels diferents equips.

Taula 11.36. Equips consumidors d'energia elèctrica

Equip	Consum (kW)
<b>Agitadors</b>	13,09
<b>Bombes</b>	183,52
<b>Compressors</b>	30
<b>Descalcificadors</b>	9
<b>Torre de refrigeració</b>	88
<b>Oficines</b>	32,36
<b>Total</b>	355,97
<b>Total amb sobredimensionament</b>	409,37

Per tant la potència necessària que ha de subministrar l'estació transformadora en kVA és la següent:

$$\text{Potència} = 409,37 \text{ kW} \cdot \frac{1 \text{ kVA}}{0,8 \text{ kW}} = 511,71 \text{ kVA} \quad \text{Equació 11.86}$$

### 11.7.6 Consum elèctric

Per tal de determinar el consum elèctric anual que necessitarà la planta es realitza un recompte dels equips els quals requereixen de potència elèctrica i la zona d'oficines. Es segueixen les mateixes estimacions que s'han realitzar per tal de calcular l'estació transformadora. A la Taula 37 es troben desglossats aquest valors.

Taula 11.37. Consum elèctric de cada equip

Equip	Consum anual (kW)
<b>Agitador</b>	110.006,40
<b>Bombes</b>	1.541.568,00
<b>Compressor d'aire comprimit</b>	252.000
<b>Descalcificador</b>	3.150
<b>Torre de refrigeració</b>	739.200
<b>Oficines</b>	264.592,44
<b>Total</b>	2.910.516,84

Però una vegada calculat el consum total anual se li ha d'aplicar un factor de correcció, ja que els equips realment no consumeixen el 100% de la seva potència, sinó que consumeixen el 60%. Per tant, s'ha de multiplicar el total obtingut per 0,6, fent que el consum anual total de la planta sigui de 1.746.310,10 kW.

### 11.7.7 Oli Tèrmic

Per tal de determinar l'oli tèrmic a incorporar al circuit tancat, s'ha determinat el volum de les canonades que connecta la caldera amb els reboilers i a l'inrevés i s'ha obtingut un volum de 11,2 m<sup>3</sup>. També s'ha calculat el volum de la carcassa dels reboilers i s'ha obtingut un volum de 7,51 m<sup>3</sup>. Tenint en compte que tot això està omplert un 80%. El volum d'oli tèrmica necessari cada dos anys (Temps en el que es substitueix) és de 15 m<sup>3</sup>.

## 11.8 Disseny de canonades

El disseny de les diferents canonades que componen el procés i els diferents serveis de planta a EBenz és necessari per dur a terme un flux correcte dels diferents corrents que participen a la planta. Així doncs, per tal de dimensionar les canonades cal tenir en compte alguns factors que afectaran al disseny d'aquesta. Principalment cal conèixer la tempera de treball, el fluid o mescla que circula per la canonada i el caudal volumètric del corrent que es vulgui estudiar.

Un cop establert això, cal identificar el tipus de flux de la canonada que s'està estudiant i, a partir de la Taula 11.38, cal suposar una velocitat típica de circulació del fluid, la qual es trobi dins del rang de velocitats típiques segons el tipus de flux. Aquestes velocitats típiques depenen de l'ubicació de la conducció, si aquesta es troba abans o després d'una bomba, si es tracta d'un líquid viscos o és un gas o vapor d'aigua.

**Taula 11.38:** Velocitats típiques de circulació de fluids per canonades<sup>11</sup>

Fluido	Tipo de Flujo	Velocidad	
		ft/s	m/s
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0.5 – 1	0.15 – 0.30
	Entrada de bomba	1 – 3	0.3 – 0.9
	Salida de bomba	4 – 10	1.2 – 3
	Línea de Conducción	4 – 8	1.2 – 2.4
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0.2 – 0.5	0.06 – 0.15
	Salida de bomba	0.5 – 2	0.15 – 0.6
Vapor de Agua		30 – 50	9 – 15
Aire o gas		30 – 100	9 – 30

Un cop s'ha suposat una velocitat típica, es pot realitzar el càlcul del diàmetre intern de la canonada amb l'Equació 11.87, la qual requereix per calcular el diàmetre intern, tant el cabal volumètric com la velocitat típica suposada

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} \quad \text{aïllant} \quad \rightarrow \quad D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} \quad \text{Equació 11.87}$$

On:

Q = Caudal volumètric que circula per la canonada ( $m^3/s$ )

v = Velocitat típica de circulació del fluid a través de la canonada que s'ha suposat (m/s)

A = Àrea de la secció de la canonada ( $m^2$ )

$D_i$  = Diàmetre intern de la canonada (m)

Aquesta mesura del diàmetre intern correspon a la velocitat típica de circulació del fluid suposada. Per tant, per tal de calcular la mesura del diàmetre intern, s'ha d'utilitzar la Taula 11.39, en la qual es troben diferents valors de diàmetres externs depenent del seu Schedule, el qual definirà el gruix de les parets de la canonada. Aquesta taula correspon a les canonades d'acer inoxidable

316L, que són les que s'han utilitzat a E-Benz. Això ja s'ha discutit prèviament al Capítol 4 del projecte.

Taula 11.39: Diàmetres i gruixos de canonades d'acer inoxidable<sup>12</sup>

Nominal Pipe Size		Outside Diameter (mm)	Nominal Wall Thickness Schedule																
NPS	DN		SCH 5s	SCH 10s	SCH 10	SCH 20	SCH 30	SCH 40s	SCH STD	SCH 40	SCH 60	SCH 80s	SCH XS	SCH 80	SCH 100	SCH 120	SCH 140	SCH 160	SCH XXS
1/8	6	10.3		1.24				1.73	1.73	1.73		2.41	2.41	2.41					
1/4	8	13.7		1.65				2.24	2.24	2.24		3.02	3.02	3.02					
3/8	10	17.1		1.65				2.31	2.31	2.31		3.20	3.20	3.20					
1/2	15	21.3	1.65	2.11				2.77	2.77	2.77		3.73	3.73	3.73				4.78	7.47
3/4	20	26.7	1.65	2.11				2.87	2.87	2.87		3.91	3.91	3.91				5.56	7.82
1	25	33.4	1.65	2.77				3.38	3.38	3.38		4.55	4.55	4.55				6.35	9.09
1 1/4	32	42.2	1.65	2.77				3.56	3.56	3.56		4.85	4.85	4.85				6.35	9.70
1 1/2	40	48.3	1.65	2.77				3.68	3.68	3.68		5.08	5.08	5.08				7.14	10.15
2	50	60.3	1.65	2.77				3.91	3.91	3.91		5.54	5.54	5.54				8.74	11.07
2 1/2	65	73	2.11	3.05				5.16	5.16	5.16		7.01	7.01	7.01				9.53	14.02
3	80	88.9	2.11	3.05				5.49	5.49	5.49		7.62	7.62	7.62				11.13	15.24
3 1/2	90	101.6	2.11	3.05				5.74	5.74	5.74		8.08	8.08	8.08					
4	100	114.3	2.11	3.05				6.02	6.02	6.02		8.56	8.56	8.56		11.13		13.49	17.12
5	125	141.3	2.77	3.40				6.55	6.55	6.55		9.53	9.53	9.53		12.70		15.88	19.05
6	150	168.3	2.77	3.40				7.11	7.11	7.11		10.97	10.97	10.97		14.27		18.26	21.95
8	200	219.1	2.77	3.76		6.35	7.04	8.18	8.18	8.18	10.31	12.70	12.70	12.70	15.09	18.26	20.62	23.01	22.23
10	250	273.1	3.40	4.19		6.35	7.80	9.27	9.27	9.27	12.70	12.70	12.70	15.09	18.26	21.44	25.40	28.58	25.40
12	300	323.9	3.96	4.57		6.35	8.38	9.53	9.53	10.31	14.27	12.70	12.70	17.48	21.44	25.40	28.58	33.32	25.40
14	350	355.6	3.96	4.78	6.35	7.92	9.53		9.53	11.13	15.09		12.70	19.05	23.83	27.79	31.75	35.71	
16	400	406.4	4.19	4.78	6.35	7.92	9.53		9.53	12.70	16.66		12.70	21.44	26.19	30.96	36.53	40.49	
18	450	457.2	4.19	4.78	6.35	7.92	11.13		9.53	14.27	19.05		12.70	23.83	29.36	34.93	39.67	45.24	
20	500	508	4.78	5.54	6.35	9.53	12.70		9.53	15.09	20.62		12.70	26.19	32.54	38.10	44.45	50.01	
22		559	4.78	5.54	6.35	9.53	12.70		9.53		22.23		12.70	28.58	34.93	41.28	47.63	53.98	
24	600	610	5.54	6.35	6.35	9.53	14.27		9.53	17.48	24.61		12.70	30.96	38.89	46.02	52.37	59.54	
26		660			7.92	12.70			9.53				12.70						
28	700	711			7.92	12.70	15.88		9.53				12.70						
30		762	6.35	7.92	7.92	12.70	15.88		9.53				12.70						
32	800	813			7.92	12.70	15.88		9.53	17.48			12.70						
34		884			7.92	12.70	15.88		9.53	17.48			12.70						
36	900	914			7.92	12.70	15.88		9.53	19.05			12.70						
38		965							9.53				12.70						
40	1000	1016						9.53		12.70									
42		1067				12.70	15.88		9.53	19.05			12.70						
44	1100	1118							9.53				12.70						
46		1168							9.53				12.70						
48	1200	1219							9.53			12.70							

Depenent de la pressió del corrent a estudiar, es definirà un major Schedule o menor. A partir de la determinació del Schedule de la canonada, es pot determinar la pressió màxima admissible d'aquesta. La qual ha de ser un 20% superior a la pressió de disseny a la canonada, a efectes de deixar un marge de seguretat. A continuació es disposarà el procediment de càlcul i les accions a realitzar en funció del resultat.

La pressió de disseny és la pressió que es pot assolir a les condicions més severes que poden ocórrer durant el procés, la qual té en compte a part de la pressió a l'interior de la canonada, també té en compte les condicions externes causades per efectes ambientals o operacionals que puguin fer que la pressió a la canonada eventualment augmenti. Així doncs, la pressió de disseny s'ha establert com un 20% de la pressió de treball.

Un cop es calcula el diàmetre intern de la canonada a partir de la velocitat típica de circulació, aquest s'aproxima a un dels valors de diàmetre extern OD superior o similar al diàmetre intern calculat. A partir d'aquí, es suposa un valor de Schedule aproximat a partir de la pressió de disseny i es calcula la màxima pressió admissible a partir de l'Equació 11.89, la qual s'ha obtingut de la norma ASME B31.3 per canonades de procés<sup>13</sup>. Normalment, aquest càlcul és més important per les canonades del procés que treballen a una pressió superior a l'atmosfèrica, ja que quan la pressió del corrent és atmosfèrica, el Schedule sol correspondre al gruix de canonades més petit, com és lògic.

Tot i així, a totes les canonades d'EBenz s'ha realitzat aquest càlcul per comprovar que el gruix de la canonada que s'instal·larà té una màxima pressió admissible superior, com a mínim, un 20% de la pressió de disseny, per tal de garantir aquest marge de seguretat.

$$P = \frac{2 \cdot t \cdot S \cdot E}{D - 2 \cdot t \cdot Y} \quad \text{Equació 11.88}$$

On:

P = pressió màxima admissible (psi)

t = gruix de les parets de la canonada (in)

D = diàmetre extern de la canonada (in)

S = tensió de tracció permesa pel material de la canonada a la temperatura de disseny (psi)

Y = Coeficient del gruix de la paret

E = factor de qualitat de la canonada, per a les canonades d'acer inoxidable que s'utilitzen a EBenz, les quals han passat satisfactòriament un assaig radiogràfic, per tant E=1.

Un cop escollit el diàmetre extern de la canonada a partir del diàmetre obtingut mitjançant l'aproximació de les velocitats típiques de circulació, es selecciona un valor de Schedule segons cadascuna de les columnes de la Taula 11.40, això farà variar el valor del gruix de les parets de la canonada (t). Com ja s'ha esmentat al Capítol 4 del projecte. Si es manté el NPS (Nominal Pipe Size) igual i s'augmenta el Schedule, el diàmetre intern es disminuirà, degut a que augmentarà el gruix de les parets de les canonades amb el mateix diàmetre extern de canonada.

Per obtenir els valors de S per a cada cas s'han obtingut de la Taula 11.40, la qual dóna valors de la tensió de tracció permesa pel material de la canonada, en aquest cas TP316L, on TP vol dir *Tubular Products*.

**Taula 11.40.** Tensió de tracció  $S$  [MPa] permesa per l'acer inoxidable 316L (3ra columna)<sup>14</sup>

Type/Grade	F321	F316L	TP316L
-30 to 40°C [MPa]	138	115	97.9
≤ 65°C [MPa]	130	106	97.9
≤ 100°C [MPa]	123	96.3	97.9
≤ 125°C [MPa]	118	91.3	97.9
≤ 150°C [MPa]	114	87.4	97.9
≤ 200°C [MPa]	106	81.2	93.0
≤ 250°C [MPa]	99.7	76.0	87.2
≤ 300°C [MPa]	94.5	72.5	82.9
≤ 325°C [MPa]	92.3	71.2	81.6
≤ 350°C [MPa]	90.7	70.0	80.2
≤ 375°C [MPa]	89.4	68.8	78.4
≤ 400°C [MPa]	87.5	67.5	77.2
≤ 425°C [MPa]	86.9	66.3	76.9
≤ 450°C [MPa]	85.7	65.0	74.7
≤ 475°C [MPa]	85.0	63.8	73.4

Aquesta taula diferencia els diferents valors de  $S$  depenent de la temperatura de disseny. A EBenz, la temperatura de disseny correspon a la temperatura de treball amb un marge de seguretat de 15°C per sobre d'aquesta temperatura (en el cas de que sigui superior a la temperatura ambient). Aquest marge ajuda a esmenar l'efecte sobre la temperatura que pot provocar una sobrepressió, així com dimensionar l'aïllament de la canonada, en el cas de que sigui necessari, amb questa temperatura.

Tot seguit, per obtenir el valor de  $Y$ , el qual pren la suma de les toleràncies mecàniques de la canonada i las toleràncies de corrosió i erosió del material, s'ha utilitzat la Taula 11.41, la qual s'ha obtingut de la Taula 304.1.1 de la normativa ASME B31.3<sup>13</sup>.

**Taula 11.41.** Coeficient del gruix de la paret  $Y$ <sup>13</sup>

Materiales	Temperatura, °C (°F)					
	≤ 482 (900 y menores)	510 (950)	538 (1.000)	566 (1.050)	593 (1.100)	≤ 621 (1.150 y mayores)
Aceros Ferriticos	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7
Aceros Austeniticos	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7
Otos metales ductiles	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Hierro Fundido	0,0	...	...	...	...	...

Segons la Taula 11.41, i degut a que l'acer inoxidable 316L és un acer austenític, i a més els corrents del procés no superen en cap moment els 566°C, s'obté un coeficient de  $Y=0.4$  per totes les canonades.

Un cop s'obtenen totes les dades necessàries per calcular la màxima pressió admissible, es realitza el càlcul i després es multiplica el resultat obtingut per 0.8, per així tenir un marge de seguretat del 20%. És a dir, la màxima pressió admesa serà realment el 80% de la màxima pressió admissible calculada.

Així doncs, ja es pot calcular el percentatge de sobrepressió de la màxima pressió admissible respecte la pressió de disseny. Aquesta sobrepressió ha de ser superior, com a mínim, en un 20% sobre la pressió de disseny. Si un cop calculada la sobrepressió aquesta és inferior al 20%, s'haurà d'escollir un Schedule superior, amb el seu corresponent gruix de la paret de la canonada superior, i tornar a repetir el procediment fins que la sobrepressió de la màxima pressió admissible respecte la pressió de disseny sigui superior al 20%. Quan això succeeixi, la canonada en qüestió es dimensionarà amb aquell diàmetre nominal i Schedule.

Un cop s'ha dimensionat satisfactòriament la canonada, cal calcular la velocitat a partir del diàmetre intern que té la canonada ja dimensionada, restant dues vegades el gruix de les parets de la canonada al diàmetre extern de la canonada es pot obtenir l'àrea de la secció de la canonada dimensionada, realitzant les modificacions que tot just s'acaben de comentar a l'Equació 11.88.

Per últim, es calcula la velocitat del flux de la canonada ja dimensionada amb aquesta equació i es comprova que sigui un valor proper a la velocitat típica suposada inicialment i que estigui dins del rang de velocitats típiques depenent del flux, com s'observa a la Taula 11.38.

### 11.8.1 Exemple de càlcul de disseny de canonades

Un exemple del càlcul del diàmetre de canonada, del Schedule d'aquesta i de la velocitat del fluid que circula per la canonada es realitza per la canonada 250-M2G-316L-203, per on circula un cabal de  $3290 \frac{m^3}{h} = 0.914 \frac{m^3}{s}$ , aquest corrent, el qual correspon al corrent 5 del diagrama de flux, es troba a una pressió de 19.85 bar i a una temperatura de 436.2 °C. En aquest cas, es tracta d'un corrent gasós, cosa que fa que la velocitats típiques del fluid siguin diferents respecte l'estat líquid. Així doncs, per aquest cas s'ha suposat una velocitat típica del fluid de  $18 \frac{m}{s}$ .

En primer lloc, es calcula el diàmetre intern amb la velocitat típica suposada i el cabal volumètric:

$$Di = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.914}{\pi \cdot 18}} = 0.2543 \text{ m} = 254.3 \text{ mm}$$

Un cop s'ha determinat el diàmetre intern aproximadament, es pot consultar la Taula 11.39 i obtenir un diàmetre extern que correspongui a un valor semblant o lleugerament superior al diàmetre intern calculat. Així doncs, es selecciona un diàmetre extern de canonada (Outside Diameter) de 273.1 mm (DN250).

A continuació, cal determinar el Schedule de la canonada. Com s'ha comentat inicialment, es comença a calcular la màxima pressió admissible per la canonada amb un Schedule 20 en aquest cas, ja que a través de la canonada circularà un fluid a gairebé 20 bars de pressió. Així doncs, s'utilitza el gruix de les parets de la canonada associada a aquest Schedule, els diferents paràmetres associats a les condicions en que es troba aquest corrent associades a les taules mostrades anteriorment i es calcula la màxima pressió admissible d'aquesta manera (cal realitzar els factors de conversió pertinents):

$$P = \frac{2 \cdot t \cdot S \cdot E}{D - 2 \cdot t \cdot Y} = \frac{2 \cdot 0.25 \text{ in} \cdot 11153.4 \text{ psi} \cdot 1}{10.75 \text{ in} - 2 \cdot 0.25 \text{ in} \cdot 0.4} = 528.5 \text{ psi} = 36.46 \text{ bar}$$

A continuació es calcula el 80% de la màxima pressió admesa calculada per obtenir la màxima pressió admesa real, a efectes d'aplicar un paràmetre de seguretat, i sobre aquesta dada es comprova que es compleix que és un 20% superior a la pressió de disseny de la canonada.

$$36.46 \text{ bar} \cdot 0.8 = 29.17 \text{ bar}$$

$$P_{\text{disseny}} = 1.2 \cdot P_{\text{treball}} = 1.2 \cdot 19.85 = 23.82 \text{ bar}$$

$$\frac{29.17 \text{ bar}}{23.82 \text{ bar}} = 22\% \text{ sobrepressió}$$

Com la diferència entre la pressió de disseny i la màxima pressió admissible és superior a un 20%, la canonada tindrà un Schedule 20 i un diàmetre nominal DN250.

Un cop es coneix el diàmetre extern de la canonada i el gruix de la paret de la mateixa, es pot calcular la velocitat real que tindrà el fluid a través de la canonada en qüestió treballant l'Equació 11.88, tenint en compte que el diàmetre intern de la canonada correspon al diàmetre extern menys dues vegades el gruix de la paret de la canonada, i també considerant que la velocitat real estigui dins del rang de velocitats típiques per aquell tipus de fluid:

$$v = \frac{0.914}{\frac{\pi}{4} \cdot (0.273 - 2 \cdot 0.00635)^2} = 17.17 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

## 11.8.2 Aïllament tèrmic de canonades

Depenent de la temperatura a la que circuli el fluid a través de la canonada, s'haurà d'instal·lar aïllament tèrmic de diferents tipus en funció de la temperatura del corrent i el grosor d'aquest dependrà de la diferència de temperatures del corrent que hagi de soportar l'aïllant.

El tipus de canonades a les quals s'haurà d'instal·lar aïllament tèrmic ja s'ha discutit a l'Apartat 4. Per tal de calcular el gruix d'aïllant que s'ha determinat en cada cas, s'ha utilitzat el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE)<sup>15</sup>. El qual indica que el gruix d'aïllant es determina mitjançant l'Equació 11.89.



$$d = \frac{D}{2} \cdot \left[ \text{EXP} \left( \frac{\lambda}{\lambda_{ref}} \cdot \ln \frac{D+2 \cdot d_{ref}}{D} \right) - 1 \right] \quad \text{Equació 11.89}$$

On:

$\lambda_{ref}$ : Conductivitat tèrmica de referència a 10° ( $\frac{w}{m \cdot K}$ )

$\lambda$ : Conductivitat tèrmica de l'aïllant a la temperatura de disseny de la canonada ( $\frac{w}{m \cdot K}$ )

$d$ : gruix mínim de l'aïllant (mm) ;  $d_{ref}$ : Gruix mínim de referència de l'aïllant (mm)

$D$ : Diàmetre interior del material aïllant (mm)

En el cas de la llana de roca a la Taula 11.42 es pot observar la variació de la conductivitat tèrmica dels aïllants seleccionats del proveïdor (marcats en vermell), seguint el criteri de selecció tal i com s'ha explicat al Capítol 4 del projecte. Per obtindre la conductivitat tèrmica de la llana de roca a una temperatura determinada s'ha interolat per tal d'obtindre un resultat més acurat.

**Taula 11.42:** Conductivitat tèrmica respecte la temperatura per l'aïllament de llana de roca (marcat de color vermell)<sup>19</sup>

Producto	Lana de Vidrio	Lana de Roca	Lana ULTIMATE	Conductividad Térmica ( $\lambda$ )											Reac-ción al fuego	Formato	Rango T° (°C)	
				T°	50	100	150	200	250	300	400	500	550	600				650
AISLAMIENTO TÉRMICO Y CALORIFUGADO PARA TUBERÍAS																		
TECH PIPE Section MT 4.0	+			$\lambda$	0,037	0,043	0,052	0,062	0,074	0,089	-	-	-	-	-	A1	Coquilla	-40-400
TECH PIPE Section MT 4.1		+		$\lambda$	0,038	0,045	0,054	0,063	0,073	0,084	-	-	-	-	-	A1	Coquilla	hasta 640
U-TECH PIPE Section MT 4.0			+	$\lambda$	0,037	0,043	0,052	0,062	0,074	0,089	-	-	-	-	-	A1	Coquilla	hasta 660
TECH Wired Mat MT 3.1		+		$\lambda$	0,040	0,047	0,057	0,067	-	0,094	0,134	0,173	0,200	-	-	A1	Manta	hasta 560
TECH Wired Mat MT 4.2		+		$\lambda$	0,041	0,047	-	0,065	-	0,090	0,124	0,167	0,217	-	-	A1	Manta	hasta 600
TECH Wired Mat MT 5.1		+		$\lambda$	0,039	0,045	0,052	0,061	-	0,081	0,106	0,137	-	0,175	0,195	A1	Manta	hasta 660
TECH Wired Mat MT 6.1		+		$\lambda$	0,040	0,045	0,051	0,058	-	0,076	0,098	0,124	-	0,156	0,174	A1	Manta	hasta 680

La conductivitat tèrmica de referència de cadascun dels aïllants escollits s'ha especificat al Capítol 4 del projecte. A més, per obtindre el gruix de referència de l'aïllant ( $d_{ref}$ ) en funció de la temperatura i el diàmetre nominal de la canonada, es pot consultar la Taula 11.43.

**Taula 11.43.** Gruix de referència d'aïllant segons diàmetre nominal i temperatura de disseny<sup>19</sup>

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

Pel que fa al poliuretà, el qual s'utilitza per operar a temperatures més baixes a EBenz, el seu valor de conductivitat tèrmica es troba entre 0.018 i 0.03  $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)^{16}$  distribuïts al llarg del interval de temperatures d'operació d'aquest tipus d'aïllant. En aquest cas,  $\lambda_{ref} = 0.018 \left(\frac{W}{m \cdot K}\right)^{17}$ .

Així doncs, per calcular la conductivitat tèrmica a la temperatura de disseny de la canonada, s'ha d'interpol·lar entre el rang de temperatures que opera aquest aïllant i el seu rang de conductivitat tèrmica per tal d'obtenir el valor de la conductivitat tèrmica aproximada del poliuretà a una temperatura determinada.

Respecte el diàmetre de referència, es segueix el reglament RITE<sup>15</sup> per donar el gruix de referència segons la temperatura del fluid i el diàmetre extern de la canonada, aquests valors es troben a les Taules 11.44 i 11.45<sup>18</sup>.

**Taula 11.44:** Gruixos mínims de referència d'aïllant segons el reglament RITE (1/2)

Diámetro exterior (mm)	Temperatura mínima del fluido (°C)		
	> -10 .. 0	> 0...10	> 10
$D \leq 35$	50	40	40
$35 < D \leq 60$	60	50	40
$60 < D \leq 90$	60	50	50
$90 < D \leq 140$	70	60	50
$140 < D$	70	60	50

**Taula 11.45:** Gruixos mínims de referència d'aïllant segons el reglament RITE (2/2)

Diàmetre exterior (mm)	Temperatura màxima del fluid (°C)		
	40...60	> 60...100	> 100...180
$D \leq 35$	35	35	40
$35 < D \leq 60$	40	40	50
$60 < D \leq 90$	40	40	50
$90 < D \leq 140$	40	50	60
$140 < D$	45	50	60

### 11.8.2.1 Exemple de càlcul d'aïllament tèrmic de canonades

Un exemple de càlcul del gruix d'aïllament tèrmic de canonades es realitza per la canonada 300-M3G-316L-205, corresponent al corrent 7 del diagrama de flux. Aquest corrent circula a una temperatura de disseny de 450°C. Es tracta d'una canonada amb un diàmetre nominal DN250, per tant s'utilitzarà l'aïllant de llana de roca ISOVER TECH Wired Mat MT 6.1, amb els valors de gruix de referència i conductivitat tèrmica obtinguts amb les interpolacions corresponents a les condicions d'operació del corrent a les Taules 11.42 i 11.43.

Així doncs,  $\lambda_{ref} = 0.04 \frac{w}{m \cdot K}$ ;  $\lambda = 0.1022 \frac{w}{m \cdot K}$  (interpolat);  $D = 273.1 \text{ mm}$ ;  $d_{ref} = 200 \text{ mm}$

Aplicant l'Equació 11.89:

$$d = \frac{273.1}{2} \cdot \left[ \text{EXP} \left( \frac{0.1022}{0.04} \cdot \ln \frac{273.1 + 2 \cdot 200}{273.1} \right) - 1 \right] = 1231.9 \text{ mm}$$

## 11.9 Disseny de bombes

Per tal d'impulsar els fluids al llarg de tota l'instal·lació, s'utilitzen bombes, les quals s'han de dissenyar de la manera que s'explica a continuació. El càlcul de la potència teòrica necessària per a que la bomba funcioni consta d'una equació que té en compte diferents paràmetres.

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h \quad \text{Equació 11.90}$$

On:

$P$  = Potència teòrica de la bomba (W)

$\rho$  = Densitat del fluid  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$g$  = Acceleració de la gravetat  $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

$Q$  = Cabal volumètric  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$h$  = Càrrega total de la bomba (m)

El terme de càrrega total de la bomba s'obté mitjançant la realització d'un balanç d'energia mecànica entre dos punts d'estudi. El primer punt és el punt des del qual es vol impulsar el fluid

i el segon punt consisteix en el punt fins el que arribarà<sup>11</sup>. Així doncs, la càrrega total de la bomba, que és un dels termes necessaris per calcular la potència de la bomba i també és important per escollir un proveïdor de bombes adequat a les necessitats operacionals, es calcula mitjançant l'Equació 11.91.

$$h = (z_2 - z_1) + \frac{1}{g} \cdot \left( \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{v_2^2}{\alpha} - \frac{v_1^2}{\alpha} \right) + e_v \right) \quad \text{Equació 11.91}$$

On:

$h$  = Càrrega total de la bomba (m)

$P$  = Pressió a cadascun dels punts d'estudi (Pa)

$z$  = Alçada a cadascun dels punts d'estudi (m)

$v$  = Velocitat de circulació del fluid en el punt d'estudi  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$\alpha$  = Coeficient de correcció de l'energia cinètica. En aquest cas equival a 1 ja que la circulació dels fluids de procés a EBenz succeeix a règim turbulent. En qualsevol cas, cal confirmar-ho calculant el Reynolds, en cas de que es tracti d'un règim de circulació laminar, és a dir, que el Reynolds sigui inferior a 2000, el valor de  $\alpha$  serà de 0.5.

$e_v$  = Pèrdua de càrrega que pateix el fluid a causa de la circulació del fluid a través d'un tram recte i accidents  $\left(\frac{m^2}{s^2}\right) = \left(\frac{J}{kg}\right)$

Tots els paràmetres necessaris per determinar la càrrega total de la bomba es coneixen prèviament ja que han sigut calculats i especificats prèviament, com per exemple l'alçada, la pressió i la velocitat del fluid a cada punt d'estudi. No obstant, hi ha factors que tot i que no es coneixen els seus valors, es poden calcular de la manera que s'explica a continuació. Això afecta principalment a les pèrdues de càrrega que pateix el fluid quan circula.

En primer lloc, per calcular el coeficient de correcció de l'energia cinètica, s'ha de calcular el número de Reynolds del fluid que circula a través d'una canonada. L'equació per calcular el número de Reynolds és l'Equació 11.92.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad \text{Equació 11.92}$$

On:

$\rho$  = Densitat  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$\mu$  = Viscositat  $\left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)$

$D$  = Diàmetre intern de la canonada (m)

$v$  = Velocitat de circulació del fluid  $\left(\frac{m}{s}\right)$

Un cop es calcula el número de Reynolds, en funció del valor obtingut es categoritza el fluid en tres grups, dins dels quals el règim laminar correspon a un  $\alpha = 0.5$ , mentre que el règim turbulent, com s'ha esmentat anteriorment, correspon a un valor de  $\alpha = 1$ .

$Re < 2000$  : Règim laminar

$2000 < Re < 4000$  : Zona de transició

Re > 4000 : Règim turbulent

Un cop establert aquest valor, l'últim que falta per determinar són les pèrdues de càrrega que pateix el fluid quan circula a través de la canonada. Així doncs, aquest terme es caracteritza tant pel tram d'aspiració com pel tram d'impulsió, i consisteix en el sumatori de les pèrdues de càrrega del tram recte i dels accidents de cadascuna de les parts que s'estudien a l'hora de realitzar el disseny d'una bomba. Per tant, l'equació general pel càlcul de les pèrdues de càrrega correspon a l'Equació 11.93.

$$e_v = e_{v_{tram\ recte\ (aspiració\ +\ impulsió)}} + e_{v_{accidents\ (aspiració\ +\ impulsió)}} \quad \text{Equació 11.93}$$

Així doncs, les pèrdues de càrrega en el tram recte es calculen segons les Equacions 11.94 i 11.95.

$$e_{v_{tram\ recte\ (aspiració)}} = 4f_{aspiració} \cdot \frac{L_{aspiració}}{D_{aspiració}} \cdot \frac{v_{aspiració}^2}{2} \quad \text{Equació 11.94}$$

$$e_{v_{tram\ recte\ (impulsió)}} = 4f_{impulsió} \cdot \frac{L_{impulsió}}{D_{impulsió}} \cdot \frac{v_{impulsió}^2}{2} \quad \text{Equació 11.95}$$

On:

$L$  = Longitud de la canonada d'aspiració o impulsió (m)

$D$  = Diàmetre intern de la canonada d'aspiració o impulsió (m)

$v$  = Velocitat de circulació del fluid  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$4f$  = Factor de fricció de Fanning d'aspiració o impulsió

En aquest cas, en primer lloc cal determinar la rugositat relativa, ja que el número de Reynolds s'obté a partir de característiques del fluid i la canonada obtingudes anteriorment. Per tal de determinar la rugositat relativa de la canonada cal conèixer el diàmetre intern de la canonada (obtinguda anteriorment) i de la rugositat del material, la qual s'obté mitjançant la Taula 11.46.

Així doncs, per tal de calcular les pèrdues de càrrega que pateix el fluid quan circula a través d'un tram recta d'aspiració o impulsió, coneixem tots els paràmetres menys el factor de fricció de Fanning, el qual es pot determinar a partir del número de Reynolds i la rugositat relativa  $\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)$  a partir de l'àbac de Moody.

Taula 11.46: Valors de disseny de rugositat del material de diferents canonades<sup>20</sup>

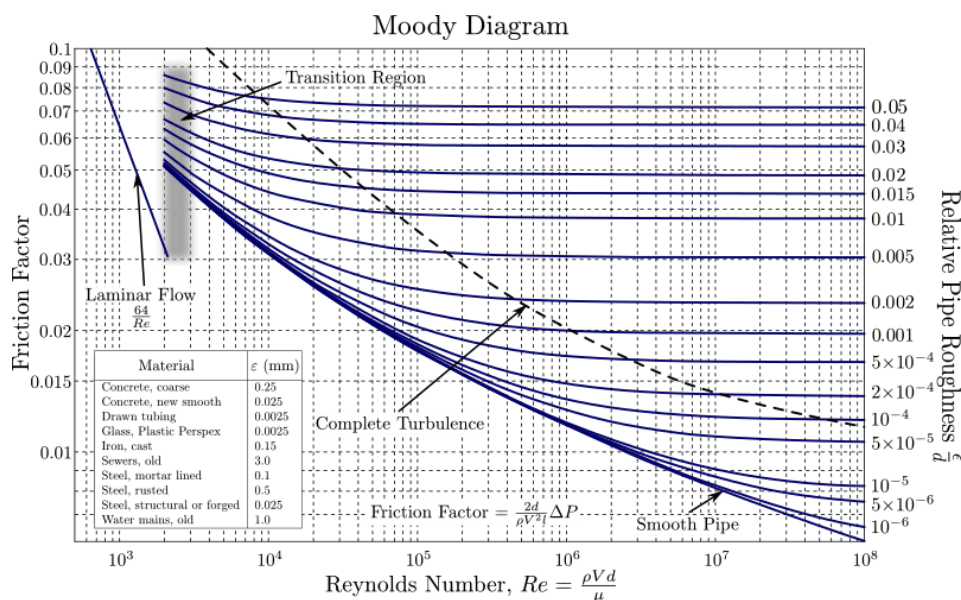
Material	Rugositat (m)
Vidrio	Liso
Plàstic	$3,0 \times 10^{-7}$
Tubo extruïdo, cobre, latón y acero	$1,5 \times 10^{-6}$
Acero comercial o soldado	$4,6 \times 10^{-5}$
Hierro galvanizado	$1,5 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil recubierto	$1,2 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil no recubierto	$2,4 \times 10^{-4}$
Concreto, bien fabricado	$1,2 \times 10^{-4}$
Acero Remachado	$1,8 \times 10^{-4}$

Com el material de les canonades que s'utilitzen a E-Benz és l'acer inoxidable, la rugositat ( $\epsilon$ ) és de  $4.6 \cdot 10^{-5}$  m. A partir d'aquí, s'utilitza l'Equació 11.96 per calcular la rugositat relativa.

$$\text{relative roughness} = \frac{\epsilon}{D} \quad \text{Equació 11.96}$$

Un cop es coneix la rugositat relativa i el número de Reynolds, es pot recurrir a l'àbac de Moody, el qual es troba a la Figura 11.6, per tal de determinar el factor de fricció de Fanning.

Figura 11.61: Àbac de Moody<sup>21</sup>



Mitjançant l'àbac de Moody es pot calcular el factor de fricció de Fanning i consecuentment les pèrdues de càrrega que pateix el fluid en un tram recte.

Per calcular les pèrdues de càrrega que pateix el fluid quan aquest passa a través d'accidents de diferents tipus s'utilitza una equació generalitzada que aplica un coeficient que varia en funció de l'accident, aquest terme es troba a les Equacions 11.97 i 11.98.

$$e_{v_{accidents} (aspiració)} = \sum K \cdot \frac{v_{aspiració}^2}{2} \quad \text{Equació 11.97}$$

$$e_{v_{accidents} (impulsió)} = \sum K \cdot \frac{v_{impulsió}^2}{2} \quad \text{Equació 11.98}$$

On:

K = coeficient que varia en funció de l'accident (veure Taula 11.47)

v = Velocitat de circulació del fluid  $\left(\frac{m}{s}\right)$

Com s'observa a aquestes equacions, el càlcul de les pèrdues de càrrega en els accidents consisteix en el sumatori d'un coeficient que varia segons l'accident el qual el fluid estigui circulant a través d'aquest. Per cadascun dels accidents que el fluid circuli a través de la zona d'estudi, s'ha de sumar al factor de K. El valor de K per cadascun dels accidents es pot observar a la Taula 11.47.

*Taula 11.47: Valors del coeficient K per cadascun dels accidents<sup>21</sup>*

ACCIDENT	K	ACCIDENT	K
<b>Entrada/sortida circuit</b>		<b>Vàlvula de diafragma</b>	
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	<b>Vàlvula de seient</b>	
Sortida arrodonida	1,00	oberta	9,0
<b>Colzes/ Unions</b>		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	<b>Vàlvula angular oberta</b>	2,0
Colze de 90° gran curvatura	0,45	<b>Vàlvula de bola</b>	
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)	<b>Vàlvula de papallona</b>	
Unió roscada	0,04	oberta	0,24
Maneguet d'unió	0,04	20°	1,54
<b>Vàlvula comporta</b>		40°	10,8
oberta	0,17	60°	118,0
¾ oberta	0,90	<b>Vàlvula de retenció (oberta)</b>	
½ oberta	4,5	de frontissa (columpio, charnera)	2,0
¼ oberta	24,0	de bola	70,0
<b>Cabalímetres mecànics</b>		de disc	10,0
de disc	7,0	<b>Canvi de diàmetre</b>	
de pistó	15,0	Estretament/	** (b)
rotatori	10,0	Eixamplament	** (b)
de turbina	6,0		

A partir d'aquí, ja es pot realitzar el càlcul de la potència de la bomba amb l'Equació 11.91. Així doncs, la potència teòrica obtinguda es divideix entre el rendiment de la bomba (al voltant del 75% habitualment) per tal d'obtenir la potència real de la bomba que necessitem per part del proveïdor, aquest càlcul s'especifica amb l'Equació 11.99.

$$Potència_{real} = \frac{P}{0.75} \quad \text{Equació 11.99}$$

El NPSH (Net Positive Suction Head) es pot diferenciar en dos conceptes: el NPSH requerit i el NPSH disponible. El primer depèn del disseny de la bomba i representa l'energia necessària per omplir la part d'aspiració de la mateixa i vèncer les pèrdues de càrrega a causa del fregament o accidents des de la connexió d'aspiració a l'entrada de la bomba. Per tant, és un valor que depèn del disseny constructiu de la bomba i que ha de subministrar el fabricant d'aquesta. D'altra banda, el NPSH disponible és la diferència entre la pressió a l'entrada i la pressió de vapor del fluid a la temperatura d'operació.

Com és lògic per definició, per tal d'evitar problemes de cavitació que puguin afectar al correcte funcionament de la bomba, el NPSH disponible haurà de ser superior que el NPSH requerit. En cas contrari, la pressió a l'entrada de la bomba seria inferior a la pressió de vapor del fluid a les condicions d'operació determinades, cosa que provocaria l'aparició de bombolles de vapor, causant que la bomba cavití, cosa que redueix la seva càrrega total, la seva eficàcia, i fa malbé l'estructura interna de la bomba, reduint severament la vida útil d'aquesta.

A part de la potència de la bomba, el proveïdor també haurà de complir amb els paràmetres de disseny obtinguts anteriorment com la càrrega total de la bomba i, a més, un NPSH disponible (calculat mitjançant l'Equació 11.100) superior al NPSH requerit establert per part del fabricant.

$$NPSH_{disp} = (\Delta z) + \frac{1}{g} \cdot \left( \frac{P_1 - P_v}{\rho} + \frac{v_1^2}{2 \cdot \alpha} - (e_v)_{asp} \right) \quad \text{Equació 11.100}$$

On:

$\Delta z$  = Diferència d'alçada del tram d'aspiració

$g$  = Acceleració de la gravetat  $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

$P_1$  = Pressió del fluid al tram d'aspiració (Pa)

$P_v$  = Pressió de vapor del fluid a les condicions de treball (Pa)

$v_1$  = Velocitat de circulació del fluid en el tram d'aspiració  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$\alpha$  = Coeficient de correcció de l'energia cinètica.

$(e_v)_{asp}$  = Pèrdua de càrrega total (tram recte + accidents) que experimenta el fluid en el tram d'aspiració  $\left(\frac{m^2}{s^2}\right) = \left(\frac{J}{kg}\right)$

La pressió de vapor a les condicions de treball s'ha obtingut a partir de l'equació d'Antoine (Equació 11.101) per cadascuna de les substàncies de les quals es vol obtenir la pressió de vapor a unes condicions determinades de treball. Les constants A, B i C per cadascuna de les substàncies s'han obtingut a partir del banc de dades de propietats<sup>22</sup>.

$$\log_{10}(P_v) = A - \frac{B}{T(^{\circ}C) + C} \quad \text{Equació 11.101}$$



A l'Equació 11.101, l'única incògnita és la pressió de vapor, la qual s'expressa en mmHg quan s'obté el resultat. Per tant, cal realitzar la conversió pertinent a Pascals.

### 11.9.1 Exemple de càlcul de disseny de bombes

A continuació, es realitza un exemple de càlcul de disseny de bombes, en aquest cas, es calcularan les bombes que impulsen el benzè al parc de tancs d'emmagatzematge de benzè (A-100). Totes les bombes tenen les mateixes característiques. Per tant, el càlcul de la potència real, càrrega total màxima i NPSH disponible correspon a les bombes P-101A/B i P-102A/B). Les dades a partir de les quals es realitzaran els càlculs pertinents corresponen al llistat de bombes, canonades i vàlvules de l'Àrea 100 del Capítol 4.

En primer lloc, per tal de calcular la potència de la bomba, es calcula la càrrega total de la bomba. Per a calcular aquest valor, l'únic valor que encara no s'ha determinat són les pèrdues de càrrega. Així doncs, es realitza el càlcul de les pèrdues de càrrega tant per aspiració com per impulsió.

Es calcula el número de Reynolds (Equació 11.92), la rugositat relativa i s'obté el valor del factor de fricció de Fanning (4f) mitjançant l'àbac de Moody tant per aspiració com per impulsió:

$$Re_{\text{aspiració}} = \frac{873.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.708 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0.125 \text{ m}}{6.01 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 1.29 \cdot 10^5$$

$$Re_{\text{impulsió}} = \frac{873.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2.707 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0.100 \text{ m}}{6.01 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 3.93 \cdot 10^5$$

$Re > 4000$  : Règim de circulació turbulent

El valor de les propietats físiques de cada substància necessàries per calcular el número de Reynolds s'ha obtingut de la bibliografia del Capítol 1, de les diverses fitxes de especificacions i de seguretat de les diferents substàncies.

Com s'ha comentat anteriorment, es calcula la rugositat relativa (Equació 11.96):

$$\text{relative roughness}_{\text{aspiració}} = \frac{0.000046 \text{ m}}{0.125 \text{ m}} = 3.68 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{relative roughness}_{\text{impulsió}} = \frac{0.000046 \text{ m}}{0.100 \text{ m}} = 4.6 \cdot 10^{-4}$$

Tot seguit, a partir de l'àbac de Moody (Figura 11.61.), es calcula el factor de fricció de Fanning per cadascun dels trams, tant d'aspiració com el d'impulsió, donat que tenen un número de Reynolds diferent, aquest factor també ho serà.

$$4f_{\text{aspiració}} = 0.019$$

$$4f_{impulsió} = 0.0175$$

Utilitzant les Equacions 11.94 i 11.95 ja es poden calcular les pèrdues de càrrega que pateix el fluid a través del tram recte:

$$e_{v_{tram\ recte\ (aspiració)}} = 0.019 \cdot \frac{5}{0.125} \cdot \frac{0.708^2}{2} = 0.1905 \frac{J}{kg}$$

$$e_{v_{tram\ recte\ (impulsió)}} = 0.0175 \cdot \frac{5}{0.125} \cdot \frac{2.707^2}{2} = 2.564 \frac{J}{kg}$$

Per calcular les pèrdues de càrrega que pateix el fluid quan aquest passa a través d'accidents de diferents tipus s'utilitzen les Equacions 11.97 i 11.98. En aquest cas, cal revisar quins són els accidents que intervenen en cadascun dels trams en funció del seu valor de K i fer el sumatori de cadascun d'aquests valors en el tram que pertorqui.

En aquest cas, en el tram d'aspiració hi ha 1 'T' estàndard, 2 colzes de 90° estàndard, 10 unions roscades i 3 vàlvules de papallona obertes.

En el tram d'impulsió, hi ha 1 vàlvula de retenció de disc oberta, 2 vàlvules de papallona obertes, 2 colzes de 90° estàndard i 1 'T' estàndard.

$$e_{v_{accidents\ (aspiració)}} = (1 + 1.5 + 0.4 + 0.72) \frac{0.708^2}{2} = 0.907 \frac{J}{kg}$$

$$e_{v_{accidents\ (impulsió)}} = (10 + 0.48 + 1.5 + 1) \frac{2.707^2}{2} = 47.56 \frac{J}{kg}$$

Ara que ja tenim totes les pèrdues de càrrega podem calcular el total realitzant el sumatori de cadascuna de les contribucions, utilitzant l'Equació 11.93

$$e_v = 0.1905 \frac{J}{kg} + 2.564 \frac{J}{kg} + 1.037 \frac{J}{kg} + 50.74 \frac{J}{kg} = 51.22 \frac{J}{kg}$$

Ara ja tenim tots els valors per calcular la càrrega total de la bomba. Per tant, tornem a l'Equació 11.91.

$$h = (3\ m - 0\ m) + \frac{1}{9.81 \frac{m}{s^2}} \cdot \left( \frac{111300\ Pa - 101300\ Pa}{873.6 \frac{kg}{m^3}} + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{2.707^2}{1} - \frac{0.708^2}{1} \right) + 51.22 \frac{J}{kg} \right) = 9.710\ m$$

Així, ja es pot calcular la potència teòrica de la bomba, segons l'Equació 11.90.

$$P = 873.6 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 36.410 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1\ h}{3600\ s} \cdot 9.710\ m = 841.34\ W = 0.8413\ kW$$

Per últim, es divideix la potència obtinguda entre el rendiment de la bomba, tal i com es mostra a l'Equació 11.99, per tal d'obtenir la potència real de la bomba necessària per impulsar el fluid.

$$Potència_{real} = \frac{0.8413}{0.75} = 1.122\ kW$$

Per tal d'evitar problemes de cavitació es calcula el NPSH disponible mitjançant l'Equació 11.100 i es comprova a l'hora d'emplenar la fulla d'especificacions d'aquesta bomba que el NPSH

requerit sigui inferior al NPSH disponible calculat, per tal d'evitar problemes de cavitació, com s'ha esmentat anteriorment.

En aquest cas, la diferència d'alçada en el tram d'aspiració és d'1m. A més, la pressió de vapor en aquestes condicions es calcula mitjançant l'equació d'Antoine (Equació 11.101) i amb els valors de les constants obtingudes del banc de dades de propietats<sup>22</sup>

$$\log_{10}(P_v) = 6.9056 - \frac{1211.03}{25^\circ\text{C} + 220.79}$$

$$P_v = 95.18 \text{ mmHg} = 12690 \text{ Pa}$$

$$NPSH_{disp} = (1 \text{ m}) + \frac{1}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \cdot \left( \frac{101300 \text{ Pa} - 12690 \text{ Pa}}{873.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} + \frac{0.708^2}{2 \cdot 1} - \left( 0.1905 \frac{\text{J}}{\text{kg}} + 0.907 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right) \right)$$

$$NPSH_{disp} = 11.264 \text{ m}$$

Per tant, ara cal trobar un proveïdor de bombes que ens pugui proporcionar bombes amb una potència igual o superior a la calculada, una càrrega total igual o superior a la calculada, capacitat d'impulsar el cabal volumètric que es vol fer circular, una pressió màxima d'impulsió superior a la pressió d'operació i un NPSH requerit inferior al calculat, mentre major sigui la diferència entre el  $NPSH_{disp}$  i el  $NPSH_{req}$  menor serà el risc de cavitació a les bombes.

### 11.10 Bibliografia

- [1] American Petroleum Institute, *API 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage*. Ieventh Edition, June 2008.
- [2] Properties of AISI Type 316L Stainless Steel, MatWeb, <<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a2d0107bf958442e9f8db6dc9933fe31&ckck=1>>
- [3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Volume VIII, Division 1 RULES FOR CONSTRUCTION OF PRESSURE VESSELS. 2010 Edition. The American Society of Mechanical Engineers. Three Park Avenue, New York, NY.
- [4] Calculadora para dimensionar un fondo toriesferico tipo Klopper, Casia S.L. <<http://www.caisasl.com/es/herramientas>>
- [5] Diseño y cálculo de un agitador de fluidos, Universidad de Bío-Bío <[http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo\\_Urbe\\_Vladimir.pdf](http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo_Urbe_Vladimir.pdf)>
- [6] Suppes, G., J., Selecting Thermodynamic Models for Process Simulation of Organic VLE and LLE Systems, Departament d'Enginyeria Química, Universitat de Missouri-Columbia.
- [7] Turton, R.; Shaeiwitz, J.A. *Analysys, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. Pearson College Div; Third Edition, 2003.
- [8] J. Ball, *Construction Basic of Shell and Tube Heat Exchanger*, API Heat Transfer, March 2000.
- [9] McCabe, W.L.; Smith, J.C; Harriot, P. *Operaciones unitaria en ingeniería química*. McGraw-Hill. Serie: Ingeniería química, 2007. 7ª edición.
- [10] Towler, G.; Sinnott, R.K., *Chemical Engineering Design Principles, Practices and Economics of Plant and Process Design*, 2012.
- [11] *DISEÑO DEL SISTEMA DE TUBERÍAS Y CÁLCULO DE LAS BOMBAS*. (s.d.). <<https://www.ugr.es/~aulavirtualpfcic/descargas/documentos/BOMBAS%20Y%20TUBERIAS.pdf>>
- [12] *Find out Steel Pipe Dimensions & Sizes (Schedule 40, 80 Pipe Means)*. (2017). Octalsteel. <<https://www.octalsteel.com/steel-pipe-dimensions-sizes>>
- [13] Oruch, T., Beckman, K., Duprè, C., Grewal, G., & Christensen, K. (s.d.). *LANL Engineering Standards Manual PD342 ASME B31.3 Process Piping Guide Revision 2 RECORDS OF REVISION*. <[https://engstandards.lanl.gov/esm/pressure\\_safety/process\\_piping\\_guide\\_R2.pdf](https://engstandards.lanl.gov/esm/pressure_safety/process_piping_guide_R2.pdf)>

- [14] *Allowable stresses of typical ASME materials - Stainless Steel*. (s.d.). [Www.cis Inspector.com](http://www.cis-inspector.com). <https://www.cis-inspector.com/asme-code-calculation-allowable-stresses-high-alloy.html>
- [15] *RITE: VERSIÓN CONSOLIDADA MARZO 2021*. (n.d.). <https://www.acae.es/catalogos/kflex/febdc/es-plist-rite-03-2021.pdf>
- [16] Carriço, C., Fraga, T., Carvalho, V., & Pasa, V. (2017). Polyurethane Foams for Thermal Insulation Uses Produced from Castor Oil and Crude Glycerol Biopolyols. *Molecules*, 22(7), 1091. <https://doi.org/10.3390/molecules22071091>
- [17] *PUF Pipe Section and Supports An Effective for Pipe Lines*. (s.d.). de <https://5.imimg.com/data5/SELLER/Doc/2021/1/LU/DO/IH/685825/puf-pir-pipe-section.pdf>
- [18] *Exigencias de aislamiento del RITE – Rendimiento de Instalaciones Térmicas*. (s.d.). AENOR Certificaciones de Aislamiento Térmico. De <https://aislamientocertificado.aenor.com/exigencias-de-aislamiento-del-rite-rendimiento-de-instalaciones-termicas/>
- [19] Aislamiento de Tuberías (s.d.). Isover.es. <https://www.isover.es/sites/isover.es/files/assets/documents/aislamiento-tuberias-2018.pdf>
- [20] Mott, R.L. (2006). *Mecánica de fluidos* (6ª ed.).
- [21] Perry's Chemical engineers' handbook. (1984). New York: McGraw-Hill
- [22] POLING, BRUCE; PRAUSNITZ, JOHN & O'CONNELL, JOHN. "The Properties of Gases and Liquids". 5th edition. McGraw Hill. New York. 2001