



## PROJECTE ATENEA

# Planta de producció d'etilbenzè

TREBALL DE FI DE GRAU  
GRAU EN ENGINYERIA QUÍMICA

Tutor: Marc Peris Miras

---

CIURÓ CASAS, Marcel  
PÉREZ GIRALT, Ainhoa  
RODRÍGUEZ BIFET, Dídac

ROMÁN PANIELLO, Marina  
CARRERA LAUREANO, Patricia Natali  
MARTINEZ RODRIGUEZ, Gerard Francesc







## PROJECTE ATENEA

# Planta de producció d'etilbenzè

## CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCULS

Tutor: Marc Peris Miras

---

CIURÓ CASAS, Marcel  
PÉREZ GIRALT, Ainhoa  
RODRÍGUEZ BIFET, Dídac

ROMÁN PANIELLO, Marina  
CARRERA LAUREANO, Patricia Natali  
MARTINEZ RODRIGUEZ, Gerard Francesc







# Índex

<b>11.1.</b>	<b>Introducció .....</b>	<b>1</b>
<b>11.2.</b>	<b>Disseny del procés amb Aspen HYSYS .....</b>	<b>1</b>
11.2.1.	<i>Pretractament dels reactius .....</i>	<i>1</i>
11.2.2.	<i>Àrea de reacció.....</i>	<i>4</i>
11.2.3.	<i>Purificació del producte.....</i>	<i>5</i>
11.2.4.	<i>Procés complet .....</i>	<i>5</i>
<b>11.3.</b>	<b>Càlculs zona de càrrega i descàrrega .....</b>	<b>6</b>
<b>11.4.</b>	<b>Disseny dels intercanviadors de calor .....</b>	<b>7</b>
11.4.1.	<i>Exemple de disseny del Bescanviador (B-1401).....</i>	<i>7</i>
<b>11.5.</b>	<b>Disseny del cooler .....</b>	<b>13</b>
<b>11.6.</b>	<b>Disseny de l'expander .....</b>	<b>17</b>
<b>11.7.</b>	<b>Disseny dels reactors d'alquilació .....</b>	<b>21</b>
11.7.1.	<i>Balanços molars .....</i>	<i>21</i>
11.7.2.	<i>Balanç d'energia.....</i>	<i>22</i>
11.7.3.	<i>Disseny en Matlab .....</i>	<i>23</i>
11.7.3.1	<i>Codi de MatLab .....</i>	<i>25</i>
11.7.4.	<i>Disseny mecànic dels reactors.....</i>	<i>28</i>
11.7.4.1.	<i>Càlcul del volum dels reactors.....</i>	<i>28</i>
11.7.4.2.	<i>Càlcul de la pressió de disseny .....</i>	<i>29</i>
11.7.4.3.	<i>Càlcul de la temperatura de disseny .....</i>	<i>29</i>
11.7.4.4.	<i>Dimensions dels reactors .....</i>	<i>29</i>
11.7.4.5.	<i>Volum i pes del material.....</i>	<i>33</i>
11.7.4.6.	<i>Aïllament del reactor.....</i>	<i>36</i>
11.7.5.	<i>Disseny amb HYSYS.....</i>	<i>38</i>
11.7.5.1.	<i>Cinètiques i reaccions.....</i>	<i>38</i>
11.7.5.2.	<i>Característiques del catalitzador .....</i>	<i>38</i>
11.7.5.3.	<i>Característiques de construcció .....</i>	<i>39</i>
11.7.5.4.	<i>Pèrdua de pressió.....</i>	<i>40</i>
11.7.5.5.	<i>Corrent de sortida d'un llit fix .....</i>	<i>40</i>
<b>11.8.</b>	<b>Disseny del reactor de transalquilació (R-1504).....</b>	<b>41</b>
11.8.1.	<i>Balanços molars .....</i>	<i>41</i>
11.8.2.	<i>Balanç d'energia.....</i>	<i>42</i>
11.8.3.	<i>Disseny en MatLab .....</i>	<i>42</i>

11.8.3.1.	Codi de MatLab .....	44
11.8.4.	<i>Disseny mecànic del reactor</i> .....	47
11.8.4.1.	Càlcul del volum del reactor .....	47
11.8.4.2.	Càlcul de la pressió de disseny .....	47
11.7.5.6.	Càlcul de la temperatura de disseny .....	48
11.8.4.3.	Dimensions del reactor .....	48
11.8.4.4.	Volum i pes del material.....	51
11.8.4.5.	Aïllament del reactor.....	54
11.8.5.	<i>Disseny amb HYSYS</i> .....	56
11.8.5.1.	Cinètiques i reaccions.....	56
11.8.5.2.	Característiques del catalitzador .....	56
11.8.5.3.	Característiques de construcció .....	57
11.8.5.4.	Pèrdua de pressió .....	58
11.8.5.5.	Corrent de sortida del reactor.....	58
<b>11.9.</b>	<b>Disseny columnes de destil·lació del pretractament</b> .....	<b>60</b>
11.9.1.	<i>Columna de tractament del benzè i toluè (D-1401)</i> .....	60
11.9.1.1.	Disseny mecànic de la columna .....	62
11.9.2.	<i>Columna de tractament de l'etilè diluït (D-1402)</i> .....	70
11.9.2.1.	Disseny mecànic de la columna .....	72
11.9.3.	<i>Columna de tractament de l'etilè diluït (D-1403)</i> .....	79
11.9.3.1.	Disseny mecànic de la columna .....	81
<b>11.10.</b>	<b>Disseny columnes de destil·lació del post-tractament</b> .....	<b>89</b>
11.10.1.	<i>Columna de tractament del benzè (D-1601)</i> .....	89
11.10.1.1.	Disseny mecànic de la columna .....	91
11.10.2.	<i>Columna de tractament de l'etilbenzè (D-1602)</i> .....	98
11.10.2.1.	Disseny mecànic de la columna .....	100
11.10.3.	<i>Columna de tractament del dietilbenzè (D-1603)</i> .....	108
11.10.3.1.	Disseny mecànic de la columna .....	109
<b>11.11.</b>	<b>Tancs d'emmagatzematge</b> .....	<b>117</b>
11.11.1.	<i>Tancs d'emmagatzematge segons API 650</i> .....	117
11.11.1.1.	Càlcul del volum del cos .....	117
11.11.1.2.	Espessor del cos .....	120
11.11.1.3.	Espessor del fons.....	125
11.11.1.4.	Espessor del sostre.....	126
11.11.1.5.	Pressió de disseny .....	127
11.11.1.6.	Temperatura de disseny.....	127

11.11.1.7. Pes del tanc .....	127
<b>11.11.2 Tancs d'emmagatzematge segons ASME .....</b>	<b>128</b>
11.11.2.1. Càlcul del volum del cos .....	129
11.11.2.2. Espessor del cos .....	130
11.11.2.3. Espessor dels extrems .....	130
11.11.2.4. Càlcul de l'altura del capçal tori esfèric .....	132
11.11.2.5. Aïllament del tanc .....	133
11.11.2.6. Pressió de disseny .....	135
11.11.2.7. Temperatura de disseny.....	135
11.11.2.8. Pes de l'equip .....	135
11.11.2.9. Agitació del tanc.....	136
<b>11.12. Tanc pulmó .....</b>	<b>138</b>
11.12.1. Volum del tanc .....	138
11.12.2. Material i espessor del recipient.....	139
11.12.3. Pressió de disseny .....	140
11.12.1.4. Temperatura de disseny.....	140
11.12.1.5. Pes de l'equip .....	140
<b>11.13. Seguretat i Higiene.....</b>	<b>140</b>
11.13.1. Emmagatzematge de substàncies de la planta .....	141
11.13.1.1. Distància de seguretat productes inflamables.....	141
11.13.1.2. Distància de seguretat productes tòxics .....	145
11.13.2. Risc d'incendi.....	146
11.13.2.1. Establiments industrials segons el seu risc intrínsec .....	146
<b>11.14. Canonades .....</b>	<b>148</b>
<b>11.15. Bombes.....</b>	<b>149</b>
11.15.1. Càrrega total .....	149
11.15.2. NPSH disponible .....	150
11.15.3. Potència total .....	151
<b>11.16. Avaluació econòmica .....</b>	<b>152</b>
11.16.1. Estimació del cost dels tancs d'emmagatzematge .....	152
11.16.2. Estimació del cost dels intercanviadors de calor.....	152
11.16.3. Estimació del cost de les columnes de destil·lació.....	153
11.16.4. Estimació del cost dels reactors .....	154
11.16.5. Estimació del cost de les bombes .....	154
11.16.6. Estimació del cost de les torres de refrigeració.....	155
11.16.7. Estimació del cost dels compressors .....	155

11.16.8. Estimació del cost del cooler .....	156
11.16.9. Estimació del cost de la caldera .....	156
<b>11.17. Bibliografia .....</b>	<b>157</b>

## PROJECTE ATENEA

---

### CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCULS

#### 11.1. Introducció

Des de ProQject, s'ha volgut realitzar un recull de metodologies i detalls dels càlculs que s'han utilitzat pel disseny de les diferents seccions de la planta. A continuació es troba detallat el càlcul del disseny de cada un dels equips principals de la planta, a part dels càlculs necessaris per avaluar les necessitats de canonades i vàlvules, seguretat, i finalment l'estimació dels costos de cada un dels equips.

Prèviament al disseny dels equips, s'ha de conèixer en detall el procés i certs paràmetres inherents de la planta com les reaccions químiques i la seva estequiometria, els balanços de matèria i energia, la producció estimada que es vol fer i els equips necessaris pel procés en qüestió.

L'objectiu de la planta de producció de ProQject és d'unes 350.000 Tn/any, tenint en compte que la planta opera 350 dies l'any, es tradueix en una producció d'unes 1000 Tn/dia. A partir d'aquestes necessitats, s'han dut a terme tots els càlculs pertinents. El disseny del procés i d'alguns equips s'ha realitzat amb el simulador de processos Aspen HYSYS. A continuació es detalla aquest disseny.

Pel que fa a els balanços de matèria i energia i els detalls de la cinètica de les reaccions en qüestió, es troben detallats en el disseny de cada un dels equips.

#### 11.2. Disseny del procés amb Aspen HYSYS

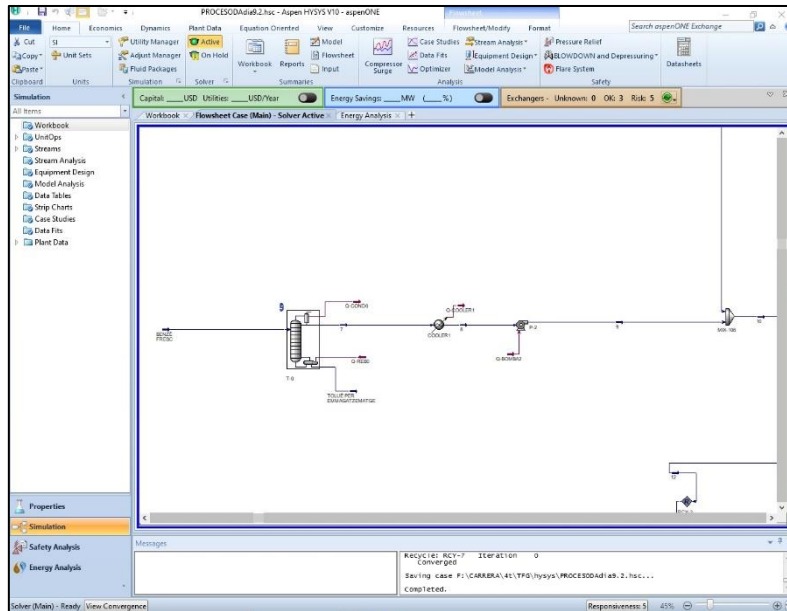
Un cop conegudes les necessitats de producció de la planta i escollit el procés corresponent, es procedeix a fer el disseny amb el simulador. El procés escollit es detalla en l'apartat d'Especificacions. Per realitzar aquest disseny correctament ha sigut necessari una sèrie d'iteracions fins a trobar el disseny òptim entre producció, característiques dels equips, etc.

En aquest recull de càlculs dels diferents equips es detalla per cada un d'aquests el disseny amb el simulador. A continuació es mostra el procés per parts:

##### 11.2.1. Pretractament dels reactius

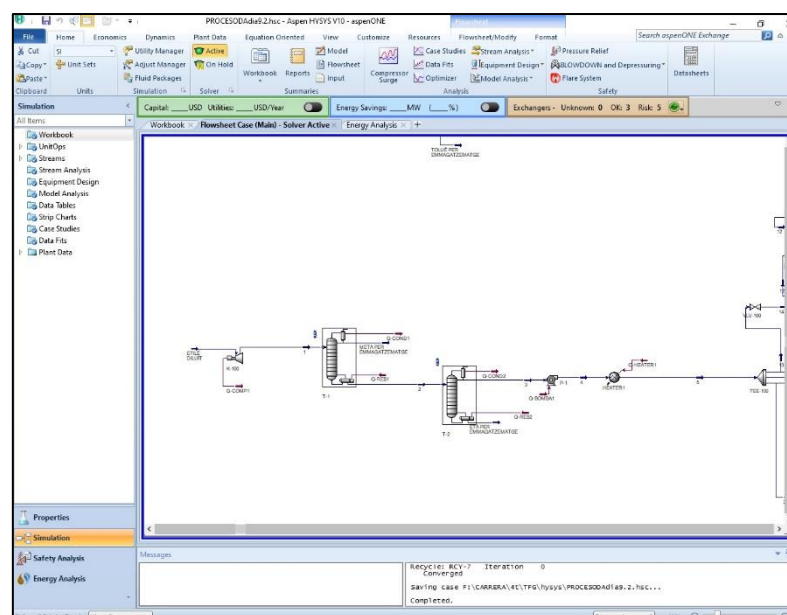
A continuació, en la Figura 11.1 es mostra el tractament del benzè, el qual es purifica per eliminar el toluè del corrent. Aquest procés està compost per un sol equip, la torre de destil·lació D-1401,

amb la qual s'aconsegueix la puresa desitjada del reactiu. El disseny de l'equip es troba detallat en els càlculs de disseny d'equips.



**Figura 11.1: Pretractament del benzè**

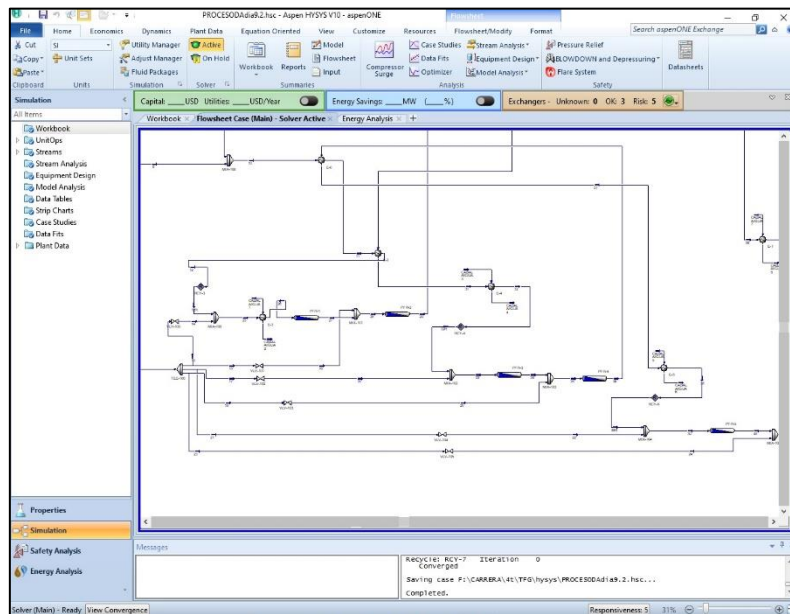
En el cas de l'etilè, aquest arriba diluït a la planta, per això es tracta, amb la torre D-1402 per separar el metà, i amb la D-1403 per separar l'età. A la Figura 11.2 es mostra aquest tractament amb el simulador. El disseny de l'equip es troba detallat en els càlculs de disseny d'equips.



**Figura 11.2: Pretractament de l'etilè diluït**

### 11.2.2. Àrea de reacció

Pel que fa a l'àrea on es duen a terme les diferents reaccions químiques del procés, disposa de 4 equips, tres alquiladors i un transalquiladors. En el cas dels reactors d'alquilació, disposen de 2 llits catalítics cada un, per aquest motiu amb el simulador HYSYS s'ha dissenyat com si fossin sis equips d'alquilació. En la Figura 11.3 es mostren els primers cinc llits i en la Figura 11.4 apareix l'últim alquilador i el transalquilador. Tots els equips s'han dissenyat detalladament a l'apartat de càlculs de disseny dels reactors.



**Figura 11.3: Àrea de reacció, R-1501; R-1502**



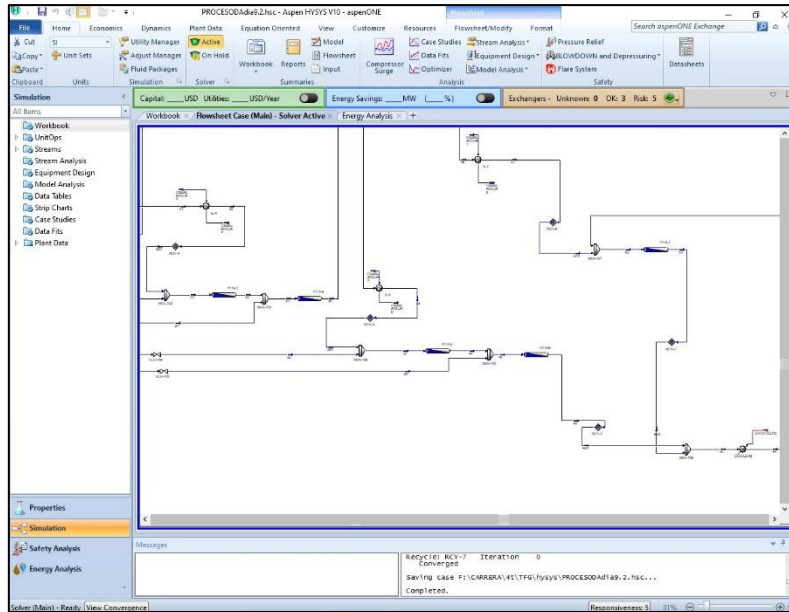


Figura 11.4: Àrea de reacció, R-1503; R-1504

### 11.2.3. Purificació del producte

Per últim, l'àrea de purificació de l'etilbenzè consta de 3 torres de destil·lació i una destil·lació flash. En la Figura 11.5 es mostren aquests equips dissenyats amb el simulador. En la primera torre es recupera l'excés de benzè, que és recircula al procés, en la segona s'extreu l'etilbenzè i en l'última es recupera el dietilbenzè que és recircula al transalquilador.

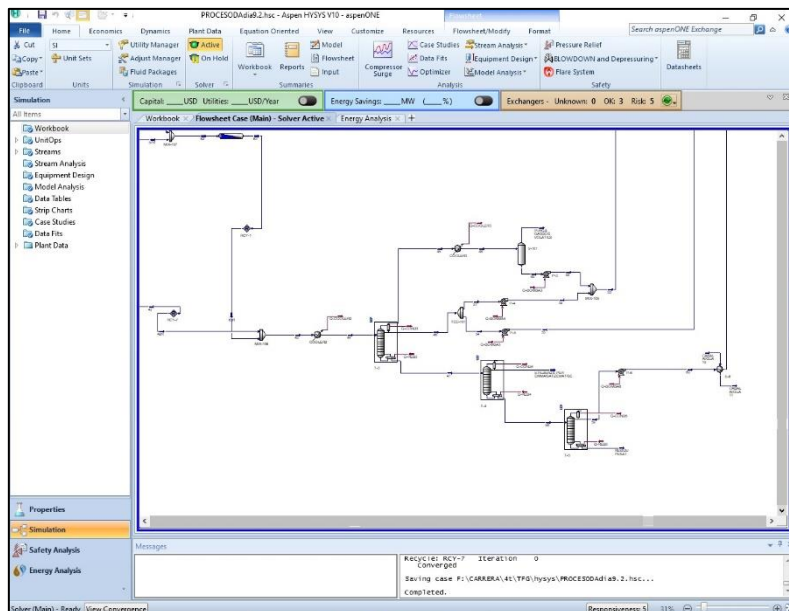


Figura 11.5: Purificació de l'etilbenzè

### 11.2.4. Procés complet

A continuació, en la Figura 11.6 es mostra el procés complet en el simulador HYSYS. Cal comentar que es van realitzar diverses combinacions i proves amb el procés complet al simulador per trobar la combinació òptima d'equips, recirculacions, etc.

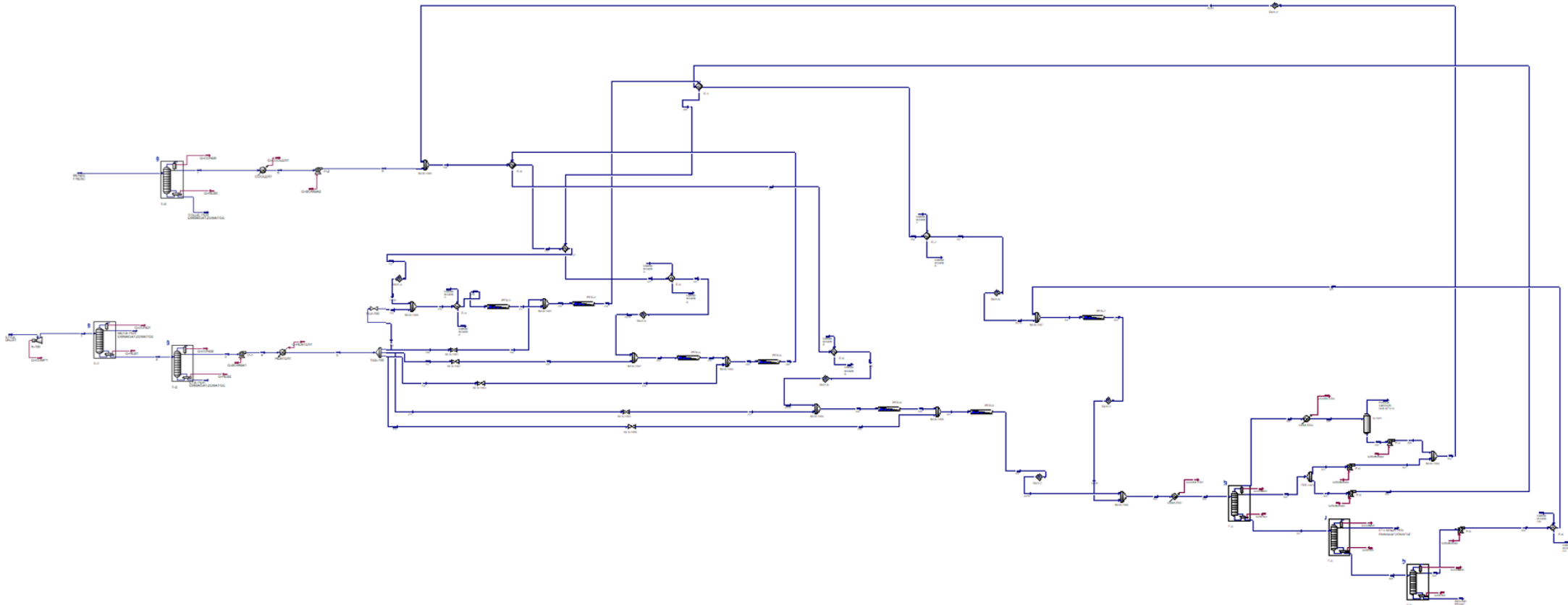


Figura 11.6: Procés complet en Aspen HYSYS

### 11.3. Càlculs zona de càrrega i descàrrega

Pel que fa la a zona de càrrega i descàrrega de la planta del projecte Atenea, s'ha calculat les necessitats i característiques pel que fa a equips i logística d'aquesta zona.

A la Taula 11.1 es troba un recull de les necessitats tant d'entrada i sortida de camions com de punts per la càrrega i descàrrega dels corresponents productes i reactius.

En el cas del metà, es considera un consum d'aquest component a la planta del 30%, per la qual cosa les necessitats de càrrega són menors.

*Taula 11.1: Recull logístic de la zona de càrrega i descàrrega*

	Descàrrega		Càrrega	
<b>Cabal de producte / reactius [ kg/dia ]</b>	Benzè Fresc	821219,5	Etilbenzè	1087894,8
	Etilè Fresc	0	Toluè	8847,12
	Metà	0	Metà	3276,10
	Età	0	Età	5800
<b>Necessitats de camions / dia</b>	Benzè Fresc	26	Etilbenzè	34
	Etilè Fresc	0	Toluè	1 cada 3-4 dies
	Metà	0	Metà	2-3 al dia
	Età	0	Età	4-5 al dia
<b>Punts de càrrega / Descàrrega</b>	Benzè Fresc	7	Etilbenzè	9
	Etilè Fresc	0	Toluè	1
	Metà	0	Metà	1
	Età	0	Età	2

Per realitzar el càlcul d'aquestes necessitats, s'ha tingut en compte una franja horària d'entrada i sortida de camions de 10h, entre les 08:00h i les 18:00h. Pel que fa al temps en què cada un dels camions es trobarà dins el recinte, s'ha partit d'un temps entre la mateixa operació de càrrega/descàrrega i els temes logístics de comprovació de certificats, etc. d'unes 2,5h.

Pel que fa a la capacitat de càrrega dels camions cisterna, es disposa d'un màxim de càrrega de producte de 32.000 kg.

A continuació es presenta un exemple de càlcul per les necessitats de camions cisterna per la descàrrega del benzè. Es fan aproximacions, ja que els camions han de carregar-se completament per optimitzar el cost del transport, i els punts de càrrega han de tenir cert marge de seguretat.

$$821.219,5 \frac{kg}{dia} \cdot \frac{1 \text{ camió}}{32.000kg} = 25,66 \frac{camions}{dia}$$

$$25,66 \frac{camions}{dia} \approx 26 \frac{camions}{dia} \cdot \frac{2,5 \frac{h}{camió}}{10 \frac{h}{dia}} = 6,5 \approx 7 \text{ punts de descàrrega}$$

#### 11.4. Disseny dels intercanviadors de calor

Els intercanviadors de calor són equips que faciliten la transferència d'energia tèrmica entre dos fluids a diferents temperatures, circulant cada un per diferents conductes, separats pel material del qual l'intercanviador està format, de manera que els fluids no es barregin i modifiquin les seves composicions i propietats.

En el disseny dels intercanviadors, és té en compte diferents aspectes, començant pel tipus d'intercanviadors, on en el Projecte Atenea tots són del tipus de carcassa i tubs, continuant pel nombre de passos, dimensions, etc, per tal d'obtenir aquest intercanvi de calor necessari i desitjat pel nostre procés.

El procés pel disseny de tots els intercanviadors de la planta, s'han realitzat d'igual manera, amb l'ajuda del simulador Aspen Exchanger Desing & Rating V10, comunament conegut com a HYSYS, pertanyent a AspenTech. El simulador té la capacitat de dissenyar un intercanviador a partir d'uns paràmetres inicials, com pot ser els cabals dels fluids, les temperatures d'entrada i les de sortida desitjades, pressions... assolir un disseny eficient en les necessitats requerides.

##### 11.4.1. Exemple de disseny del Bescanviador (B-1401)

En aquest exemple, es mostra d'on s'han aconseguit les dades de disseny dels intercanviadors de calor, amb l'ajuda de figures extretes del simulador HYSYS. En particular es mostra l'exemple d'un dels bescanviadors de calor de l'àrea 1400, el B-1401.

Prèviament, s'ha definit algunes variables de l'intercanviador, com ara els corrents d'entrada i sortida, tant dels tubs com de la carcassa, com la temperatura d'entrada i de sortida que es vol assolir.

En la Figura 11.7, donada pel simulador, observa un esquema de la distribució de l'intercanviador, on s'ha definit l'entrada i la sortida, dels tubs i carcassa.

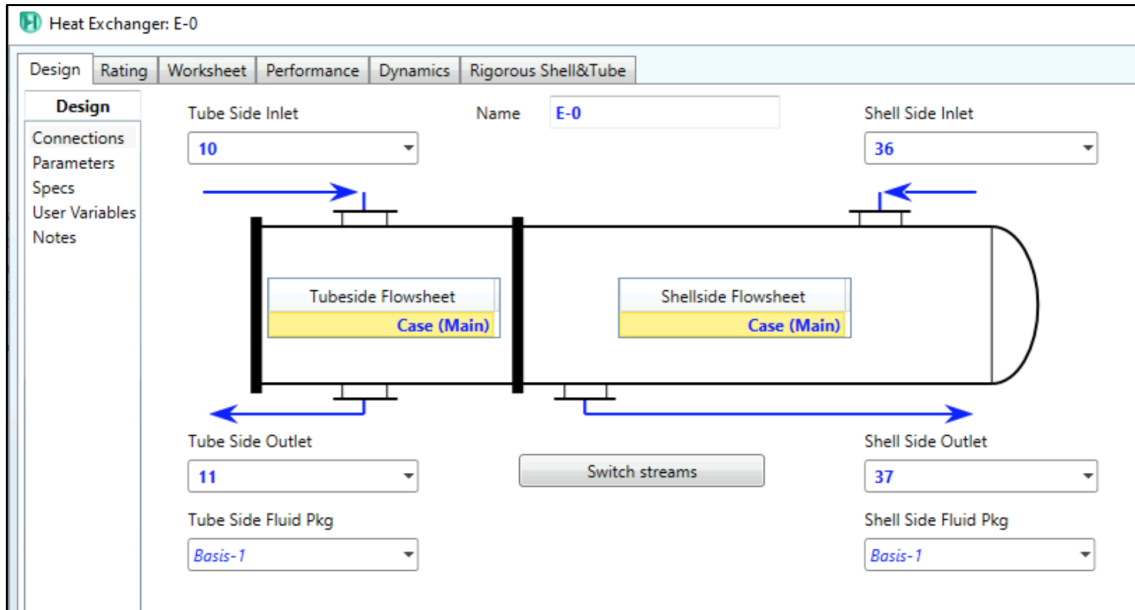


Figura 11.7: Simulador ASPEN HYSYS - Distribució intercanviador B-1401.

En l'apartat de paràmetres, dins de la mateixa pestanya, es defineix el model d'intercanviador, en el cas de tots els intercanviadors del projecte, "Rigorous Shell&Tube", on s'indica els paràmetres de temperatura i pressió que es necessita perquè l'equip actuï sobre els valors desitjats. Figura 11.8.

Design Conditions		
Specified Duty [kJ/h]	<empty>	
	SHELL-SIDE	TUBE-SIDE
Inlet Temperature [C]	225,5	58,75
Specified Outlet Temperature [C]	<empty>	
Allowable Pressure Drop [kPa]	18,84	15,00
Effective Surface Area [m2]	43,92	
Overall Dirty Coeff [kJ/h-m2-C]	3050	
Vibration Problem	No	
	SHELL-SIDE	TUBE-SIDE
Film Coefficient [kJ/h-m2-C]	9212	7002
Calculated Pressure Drop [kPa]	14,46	11,84

For more details of rigorous model see Rigorous Shell&Tube tab

Figura 11.8: Simulador ASPEN HYSYS - Paràmetres intercanviador B-1401.

Dins de la pestanya “worksheet”, en l’apartat de “conditions”, es troba els paràmetres dels fluids que hi circulen per l’equip, com la fracció de vapor, la temperatura i la pressió entre d’altres, de cada un dels corrents d’entrada i de sortida. Hi ha paràmetres que el simulador calcula directament, depenent del nombre de variables que s’ha proporcionat. Figura 11.9.

Heat Exchanger: E-0							
		Design	Rating	Worksheet	Performance	Dynamics	Rigorous Shell&Tube
<b>Worksheet</b>	Name			10	11	36	37
Conditions	Vapour			0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Properties	Temperature [C]			58,75	127,4	225,5	177,7
Composition	Pressure [kPa]			3500	3488	3216	3202
PF Specs	Molar Flow [kgmole/h]			1410	1410	1413	1413
	Mass Flow [kg/h]			1,101e+005	1,101e+005	1,189e+005	1,189e+005
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]			124,8	124,8	135,4	135,4
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]			5,443e+004	6,418e+004	7,055e+004	6,083e+004
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]			-132,3	-105,7	-39,72	-60,20
	Heat Flow [kJ/h]			7,673e+007	9,048e+007	9,969e+007	8,594e+007

**Figura 11.9: Simulador ASPEN HYSYS - Condicions intercanviador B-1401.**

En las pestanya “Rigorous Shell&Tube”, s’accedeix a la configuració de l’intercanviador, clicant en el botó “View EDR Browser...”, on s’obre una altra pantalla amb la configuració de l’equip. Figura 11.10.

Configuration			BEM		
TEMA Type	B -	E -	M -		
Tube layout option	New (optimum) layout		New (optimum) layout		
Location of hot fluid	Shell side		Shell side		
Tube OD / Pitch	mm	19,05	/	23,81	19,05 / 23,81
Tube pattern	30-Triangular		30		
Tubes are in baffle window	Yes		Yes		
Baffle type	Single segmental		Single segmental		
Baffle cut orientation	Horizontal		H		
Default exchanger material	Carbon Steel		Carbon Steel		
<b>Size</b>					
Specify some sizes for Design	Set default				
Shell ID / OD	mm	482,6	/	508	482,6 / 508
Tube length	mm	2700	2700		
Baffle spacing center-center	mm	285	285		
Number of baffles	6		6		
Number of tube / passes	283	/	2	283 / 2	
Shells in series	1		1		
Shells in parallel	1		1		
<b>Overall Results</b>					
Excess surface (%)			0		
Dp-ratio Shellside / Tubeside			0,7672 / 0,7891		
Total cost (all shells)	Euro(EU)	24619			

Figura 11.10: Simulador ASPEN HYSYS - Configuració intercanviador B-1401.

Aquesta configuració és donada pel simulador en funció dels paràmetres indicats, on es troba la configuració de l'interior de l'intercanviador, com la disposició i nombre de tubs, el "pitch", nombre de pantalles i distància entre elles, etc.

Una vegada definit els paràmetres i dades d'operació, el simulador, també proporciona una fulla d'especificacions ja predissenyada, on incorpora totes les dades referents a les especificacions de l'equip, presentat a continuació en la Figura 11.11. Aquesta fitxa d'especificacions, es troba en la carpeta de "Results Summary", en el "Team 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: 483 - 2700		mm		Type: BEM Horizontal		Connected in: 1 parallel 1 series		
7	Surf/unit(eff.)		43,9		m <sup>2</sup>		Shells/unit 1		Surf/shell(eff.) 43,9 m <sup>2</sup>
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT								
9	Fluid allocation			Shell Side			Tube Side		
10	Fluid name			36->37			10->11		
11	Fluid quantity, Total			kg/h			118860		
12	Vapor (In/Out)			kg/h			0 0 0 0		
13	Liquid			kg/h			118860 118860 110051 110051		
14	Noncondensable			kg/h			0 0 0 0		
15									
16	Temperature (In/Out)			°C			225,48 177,74 58,75 127,4		
17	Bubble / Dew point			°C			266,99 / 276,79 266,62 / 276,46 260,98 / 261,33 260,72 / 261,07		
18	Density Vapor/Liquid			kg/m <sup>3</sup>			/ 626,39 / 699,8 / 837,37 / 757,18		
19	Viscosity			cp			/ 0,0843 / 0,1313 / 0,3948 / 0,1936		
20	Molecular wt, Vap								
21	Molecular wt, NC								
22	Specific heat			kJ/(kg-K)			/ 2,618 / 2,262 / 1,663 / 1,982		
23	Thermal conductivity			W/(m-K)			/ 0,0734 / 0,0907 / 0,1221 / 0,1035		
24	Latent heat kJ/kg								
25	Pressure (abs)			kPa			3216,469 3202,013 3500 3488,164		
26	Velocity (Mean/Max)			m/s			0,94 / 1,05 1,57 / 1,72		
27	Pressure drop, allow./calc.			kPa			18,844 14,456 15 11,836		
28	Fouling resistance (min)			m <sup>2</sup> -K/W			0,0001 0,0001 0,00013 Ao based		
29	Heat exchanged			kW			3817,8 MTD (corrected) 102,61 °C		
30	Transfer rate, Service			Dirty 847,2			Clean 1050,3 W/(m <sup>2</sup> -K)		
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL								
32				Shell Side			Tube Side		
33	Design/Vacuum/test pressure			kPa			3600 / / 3900 / /		
34	Design temperature			°C			265 165		
35	Number passes per shell						1 2		
36	Corrosion allowance			mm			3,18 3,18		
37	Connections			In mm			1 202,72 / - 1 154,05 / -		
38	Size/Rating			Out			1 202,72 / - 1 154,05 / -		
39	ID			Intermediate			/ - / -		
40	Tube #: 283 OD: 19,05 Tks. Average 2,11 mm Length: 2700 mm Pitch: 23,81 mm Tube pattern:30								
41	Tube type: Plain			Insert:None			Fin#: #/m Material:Carbon Steel		
42	Shell Carbon Steel			ID 482,6 OD 508			mm Shell cover -		
43	Channel or bonnet Carbon Steel						Channel cover -		
44	Tubesheet-stationary Carbon Steel						Tubesheet-floating -		
45	Floating head cover -						Impingement protection None		
46	Baffle-cross Carbon Steel			Type Single segmental			Cut(%d) 33,56 Hori:Spacing: c/c 285 mm		
47	Baffle-long -			Seal Type			Inlet 583,98 mm		
48	Supports-tube U-bend			0			Type		
49	Bypass seal			Tube-tubesheet joint			Expanded only (2 grooves)(App A Y)		
50	Expansion joint -			Type None					
51	RhoV2-Inlet nozzle 1671			Bundle entrance 819			Bundle exit 603 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 1854,7			Filled with water 2379			Bundle 872,1 kg		
56	Remarks								
57									
58									

Figura 11.11: Simulador Aspen HYSYS - Fulla d'especificacions.

En acabat, en la carpeta de "Mechanical Summary", en "Setting Plan & Tubesheet Layout", es troba els plànols de l'equip, amb les seves mides i distribució, juntament amb un plànol d'un tall transversal on es visualitza l'interior de l'intercanviador. Figures 11.12 i 11.13.

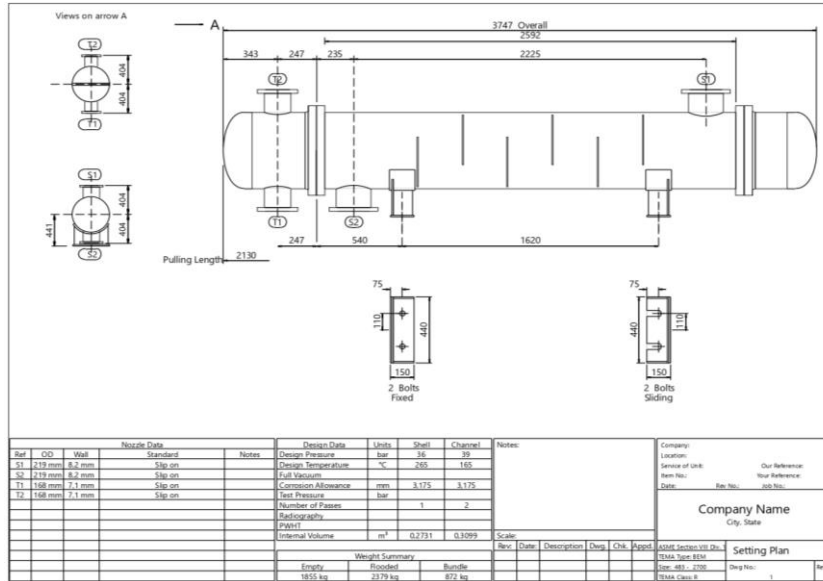


Figura 11.12: Simulador ASPEN HYSYS - Distribució exterior intercanviador B-1401.

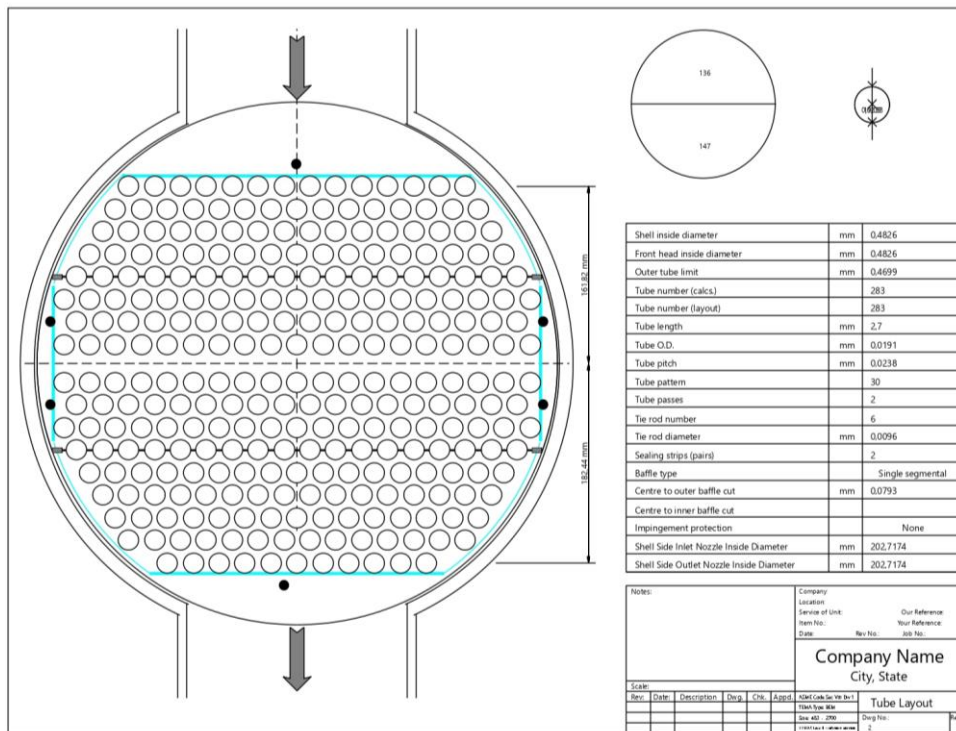


Figura 11.13: Simulador ASPEN HYSYS - Distribució interior intercanviador B-1401.

En el Capítol 2 d'Equips, es troben les fulles d'especificacions de tots els intercanviadors que formen part del projecte.

### 11.5. Disseny del cooler

Els *coolers*, coneguts també com a *chillers*, són equips de refrigeració que tenen com a principal funció dissipar la calor generada durant un procés, proporcionant així un refredament necessari per a un corrent determinat.

El seu funcionament es basa en l'ús de ventiladors o turbines, que, que funcionen mitjançant una acció principalment elèctrica, dissipen la calor del corrent. A més, aquests equips inclouen un serpentí per on circula un líquid refrigerant, que facilita la refrigeració de l'aire calent.

Quan l'aire calent és aspirat pel *cooler*, passa a través del serpentí, transferint la calor de l'aire al líquid refrigerant i, d'aquesta manera, refredant l'aire. És important destacar que el líquid refrigerant és essencial per al procés de refrigeració, ja que ajuda a absorbir la calor i a refredar eficientment l'aire. Això permet mantenir un corrent fresc i controlar la temperatura durant el procés.

En el procés de disseny dels *coolers*, és crucial disposar de dades precises i detallades per garantir un funcionament òptim i eficient. Per aconseguir-ho, l'ús de simuladors de processos Aspen HYSYS s'ha convertit en una eina essencial per obtenir dades de disseny fiables. A continuació es presenta com s'ha obtingut les dades de disseny del *cooler* utilitzant el simulador HYSYS, centrant-nos en un exemple del *cooler* CO-1601, que forma part de l'àrea 1600.

HYSYS és un simulador de processos avançat que permet modelar i analitzar el comportament tèrmic dels sistemes de refrigeració. Mitjançant aquesta eina, s'han realitzat simulacions detallades per assolir dades precises sobre la capacitat de refrigeració, el rendiment energètic i les propietats termodinàmiques involucrades en el funcionament dels *coolers*.

#### ***Exemple de disseny del cooler CO-1601:***

Primer de tot, es defineix el corrent d'entrada i de sortida, i el corrent energètic de l'equip, de manera que en la Figura 11.14, es veu la distribució d'aquest.

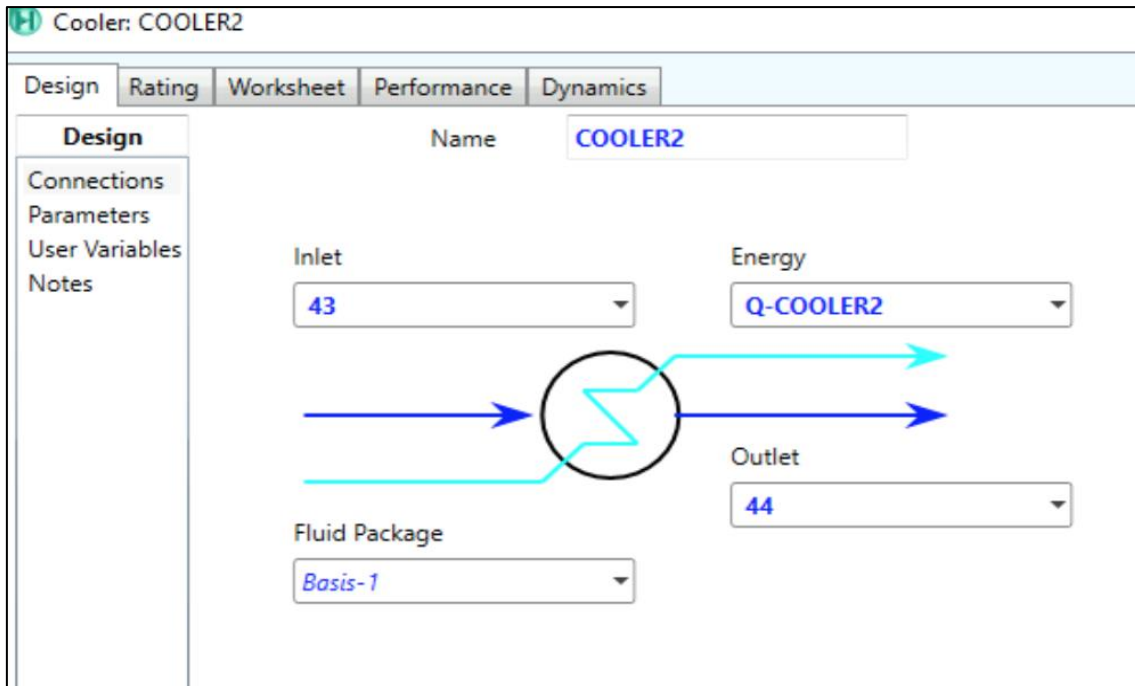
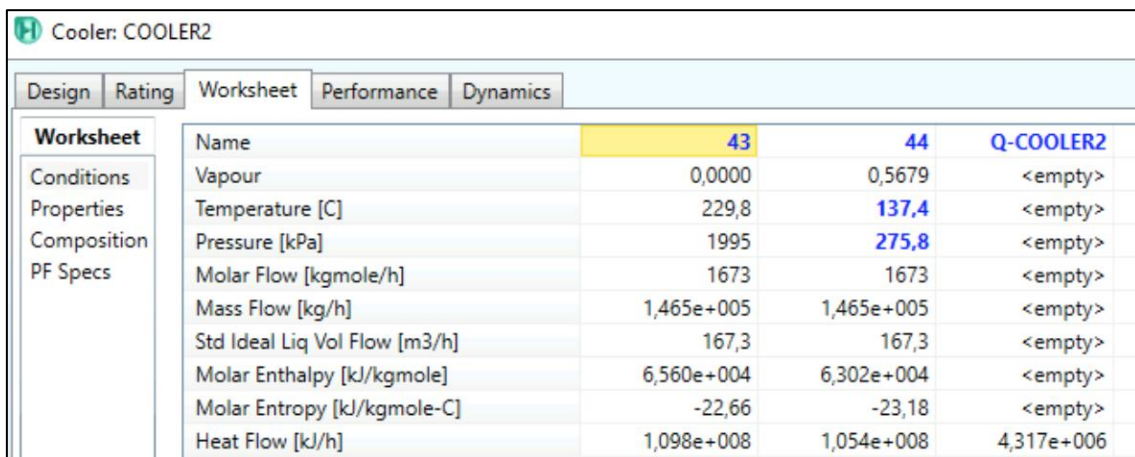


Figura 11.14: Simulador Aspen HYSYS - Distribució cooler CO-1601.

Seguidament en la pestanya "Worksheet" en l'apartat "Conditions", es defineix els paràmetres que es volen obtenir de sortida, que en aquest cas és la temperatura i la pressió. Com s'observa en la Figura 11.15.



	Name	43	44	Q-COOLER2
Conditions	Vapour	0,0000	0,5679	<empty>
Properties	Temperature [C]	229,8	137,4	<empty>
Composition	Pressure [kPa]	1995	275,8	<empty>
PF Specs	Molar Flow [kgmole/h]	1673	1673	<empty>
	Mass Flow [kg/h]	1,465e+005	1,465e+005	<empty>
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	167,3	167,3	<empty>
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	6,560e+004	6,302e+004	<empty>
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	-22,66	-23,18	<empty>
	Heat Flow [kJ/h]	1,098e+008	1,054e+008	4,317e+006

Figura 11.15: Simulador Aspen HYSYS - Conditions cooler CO-1601.

Una vegada definits aquests paràmetres, el simulador ja realitza els càlculs pertinents de manera manual, on proporciona paràmetres com la diferència de temperatura i pressió, i l'energia de l'equip, com altres valors de disseny de l'entrada i la sortida o pèrdua de calor. Figures 11.16, 11.17 i 11.18.

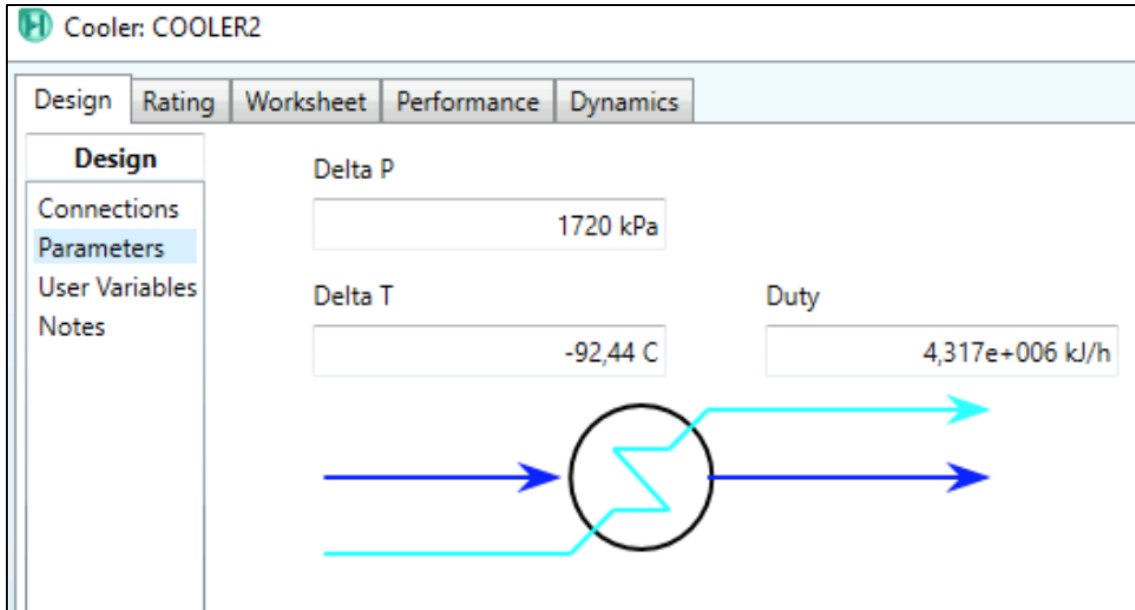


Figura 11.16: Simulador Aspen HYSYS - Paràmeters cooler CO-1601.

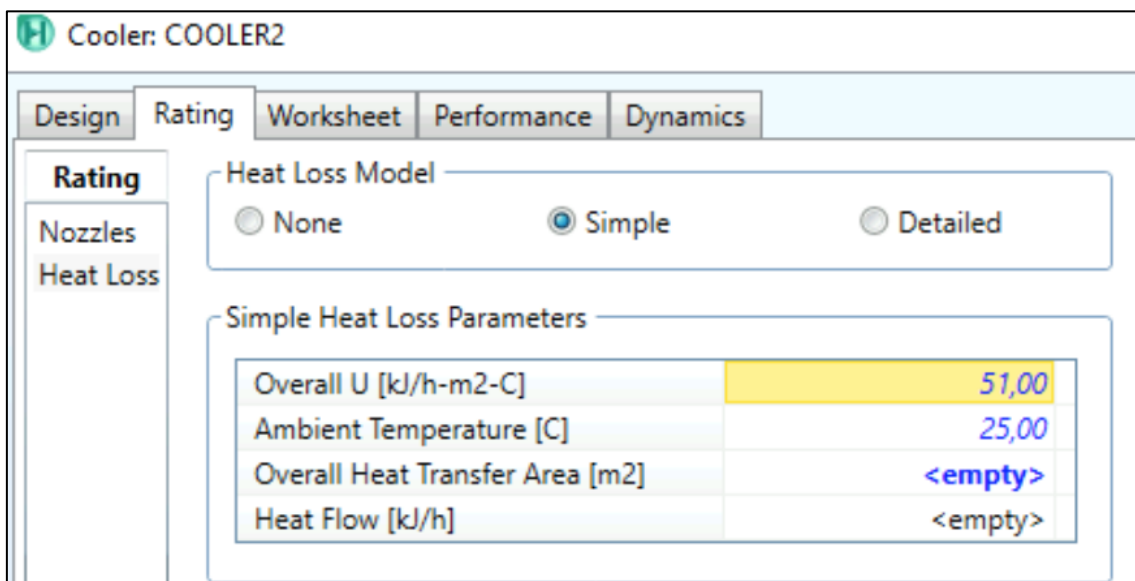


Figura 11.17: Simulador Aspen HYSYS - Rating cooler CO-1601.

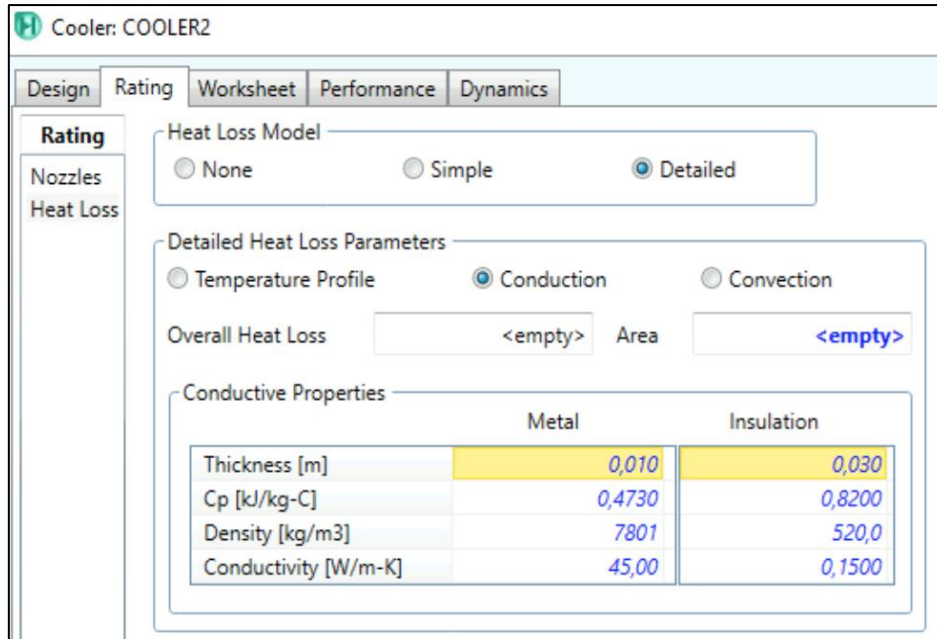


Figura 11.18: Simulador Aspen HYSYS - Rating cooler CO-1601.

Una altra vegada en la pestanya "Worksheet", en l'apartat "Properties", es troba les propietats del fluid d'entrada i el de sortida, on s'observa propietats com la densitat, cabal molar... Figura 11.19.

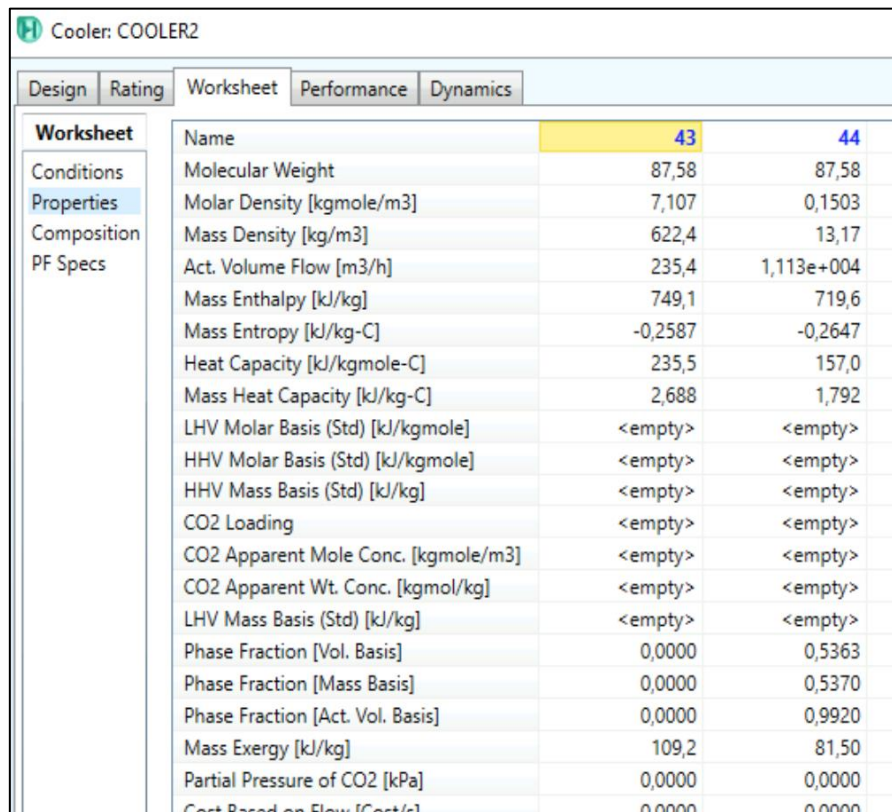


Figura 11.19: Simulador Aspen HYSYS - Properties cooler CO-1601.



### 11.6. Disseny de l'expander

Un *expander* és un dispositiu industrial conegut també com a turbina de gas expansor. La seva finalitat és reduir la pressió d'un gas d'alta pressió per adaptar-la a nivells més adequats per al funcionament. A més, aquest equip aprofita l'expansió del gas per fer girar una turbina, convertint així l'energia del flux en energia mecànica, que pot ser utilitzada per altres equips o convertida en energia elèctrica.

El funcionament d'aquest dispositiu es basa en l'entrada d'un flux a una pressió determinada, que travessa l'*expander*. A l'interior d'aquest, hi ha àleps que formen part de la turbina i generen una sèrie d'etapes d'expansió. A mesura que el flux passa per l'*expander*, es produeix una expansió que genera una força aplicada a la turbina, transformant-se així en energia mecànica que pot ser aprofitada durant el procés.

#### Exemple de disseny de l'expander EX-1401:

Aquest equip s'ha dissenyat amb l'ajuda del simulador del grup AspenTech, Aspen HYSYS, on es mostra el disseny de l'equip EX-1401.

El primer pas és definir els corrents d'entrada i de sortida de l'equip, com s'observa en la Figura 11.20, i una vegada definits, s'estableix els paràmetres en què es vol que treballi, i que s'obtingui a la sortida de l'equip.

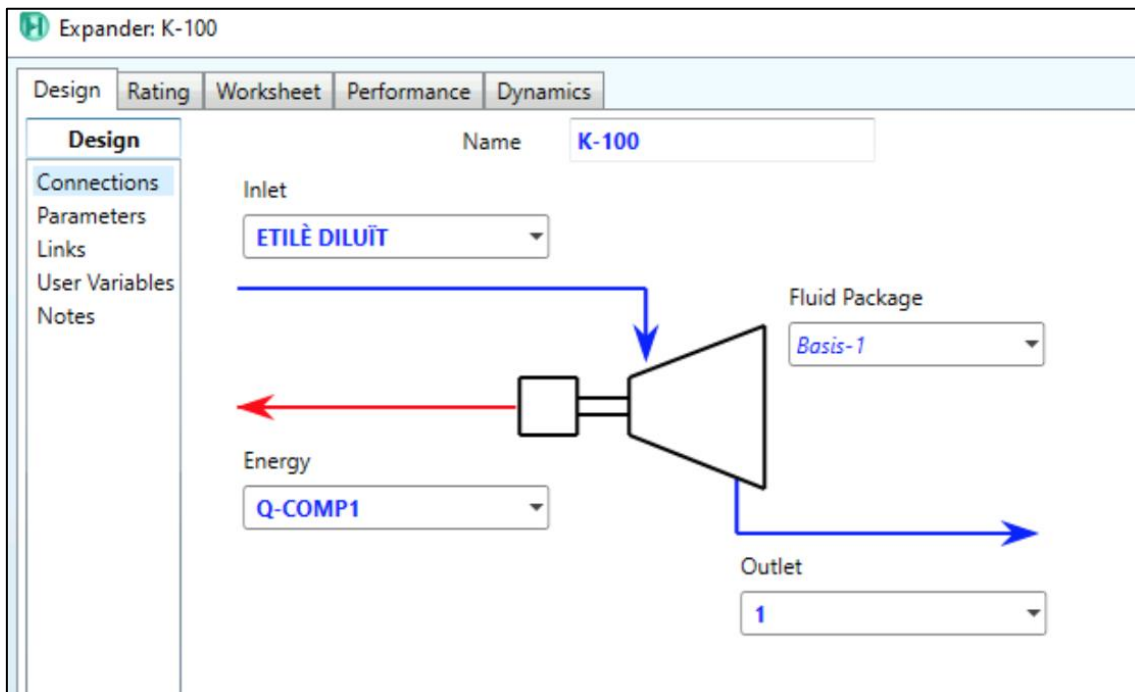
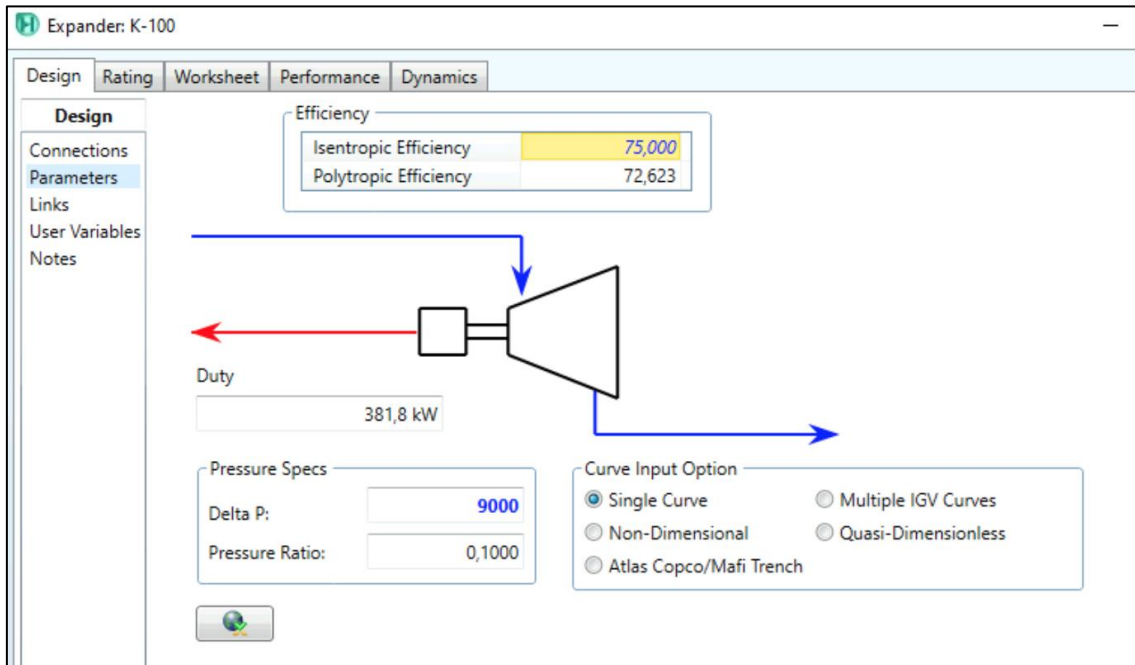


Figura 11.20: Simulador Aspen HYSYS - Distribució expander EX-1401.



Una vegada definits els paràmetres de pressió d'entrada i de sortida (delta P), juntament amb l'eficiència isentròpica, Figura 11.21, el simulador realitza els càlculs pertinents. A l'hora de definir aquests paràmetres, s'indica en l'apartat "Parameters".



**Figura 11.21: Simulador Aspen HYSYS - Paràmetres expander EX-1401.**

En la finestra "Rating", es veu els diàmetres d'entrada i sortida de l'expander, predefinits pel simulador, i paràmetres de disseny de l'equip com el radi de gir, la massa i el factor de fricció. Figura 11.22.

Expander: K-100

Design Rating Worksheet Performance Dynamics

**Rating**

Curves  
Flow Limits  
Nozzles  
Inertia

Base Elevation Relative to Ground Level

Nozzle Parameters

	ETILÈ DILUÏT	1
Diameter [m]	5,000e-002	5,000e-002
Elevation (Base) [m]	0,0000	0,0000
Elevation (Ground) [m]	0,0000	0,0000

Expander: K-100

Design Rating Worksheet Performance Dynamics

**Rating**

Curves  
Flow Limits  
Nozzles  
Inertia

Inertia Modeling Parameters (Dynamics)

Rotational Inertia [kg-m <sup>2</sup> ]	6,000
Radius of Gyration [m]	0,2000
Mass [kg]	150,0

Friction Loss (Enter one of the two following values)

Friction Loss Factor [kg-m <sup>2</sup> /s]	6,000e-003
First Order TimeConstant [seconds]	000:16:40,00

Figura 11.22: Simulador Aspen HYSYS - Rating expander EX-1401.

El simulador també proporciona les condicions d'entrada i de sortida del corrent. Aquest apartat es troba en la pestanya "Worksheet", en l'apartat "Conditions", Figura 11.23, així com les propietats de cada un, en l'apartat "Properties".

Expander: K-100

Design Rating Worksheet Performance Dynamics

Worksheet	Name	ETILÈ DILUÏT	1	Q-COMP1
Conditions	Vapour	1,0000	0,6399	<empty>
Properties	Temperature [C]	25,00	-55,46	<empty>
Composition	Pressure [kPa]	1,000e+004	1000	<empty>
PF Specs	Molar Flow [kgmole/h]	920,0	920,0	<empty>
	Mass Flow [kg/h]	2,416e+004	2,416e+004	<empty>
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	66,87	66,87	<empty>
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2,097e+004	-2,246e+004	<empty>
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	136,7	139,0	<empty>
	Heat Flow [kJ/h]	-1,929e+007	-2,066e+007	1,374e+006

Figura 11.23: Simulador Aspen HYSYS - Conditions expander EX-1401.

Finalment, el HYSYS proporciona uns resultats de càlculs automatitzats que té, com ara la potència del fluid. Figura 11.24.

Expander: K-100

Design Rating Worksheet Performance Dynamics

Performance

Results

Results	
Adiabatic Head [m]	7735
Polytropic Head [m]	7989
Adiabatic Fluid Head [kJ/kg]	75,86
Potential Fluid Head [kJ/kg]	78,34
Isentropic Efficiency	75,000
Polytropic Efficiency	72,623
Power Produced [kW]	381,8
Friction Loss [kW]	0,0000
Rotational inertia [kW]	0,0000
Fluid Power [kW]	381,8
Polytropic Head Factor	0,8812
Polytropic Exponent	0,9975
Isentropic Exponent	1,0262

Figura 11.24: Simulador Aspen HYSYS - Resultats expander EX-1401.

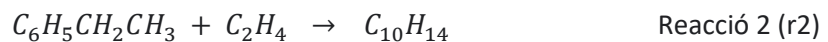
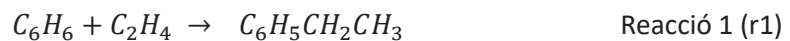
## 11.7. Disseny dels reactors d'alquilació

Per tal de calcular el volum necessari dels reactors per aquest procés, cal conèixer la massa de catalitzador necessària, ja que es tracta de reactors catalítics de llit empaquetat. A partir d'aquest valor es podrà fer el disseny corresponent de l'equip amb els paràmetres característics del llit. Es disposarà de 3 reactors adiabàtics, amb dos llits empaquetats per reactor i refrigeració a la sortida de cada un d'aquests.

Per al càlcul de les necessitats de catalitzador de la reacció d'alquilació, es procedeix a realitzar un codi de Matlab amb el qual trobar el valor de la massa de catalitzador necessària per poder fer posteriorment el disseny amb el programa Aspen HYSYS.

### 11.7.1. Balanços molars

Les reaccions químiques que es duen a terme als reactors d'alquilació del benzè amb etilè són les següents<sup>[1,2]</sup>.



A continuació, en la Taula 11.2 trobem en forma d'equacions diferencials el balanç molar per les dues reaccions que es donen en els reactors. El disseny en Matlab es farà per un sol llit fix, ja que tots els reactors del procés d'alquilació seran idèntics en l'àmbit de construcció.

Pel que fa a l'entrada de reactius, tant d'etilè fresc com de benzè, s'ha tingut en compte les proporcions d'entrada a cada llit que proposa la bibliografia<sup>[3]</sup>.

L'entrada de benzè és única al primer reactor, però la d'etilè és diferent en funció del llit a què s'està proporcionant. A la Taula 11.3 es mostra l'entrada d'etilè segons la unitat de llit fix.

**Taula 11.2: Balanç molar i condicions inicials per un llit de l'etapa d'alquilació**

Balanç Molar	Condicció Inicial $\left[\frac{kmol}{h}\right]$	Concentració $\left[\frac{kmol}{m^3}\right]$
$\frac{dF_E}{dW} = \frac{r_E}{\rho_B}$	$F_E(0) = 87\left[\frac{kmol}{h}\right]$	$C_E = \frac{F_E}{v_0}$
$\frac{dF_B}{dW} = \frac{r_B}{\rho_B}$	$F_B(0) = 1410\left[\frac{kmol}{h}\right]$	$C_B = \frac{F_B}{v_0}$
$\frac{dF_{EB}}{dW} = \frac{r_{EB}}{\rho_B}$	$F_{EB}(0) = \left[\frac{kmol}{h}\right]$	$C_{EB} = \frac{F_{EB}}{v_0}$
$\frac{dF_{DEB}}{dW} = \frac{r_{DEB}}{\rho_B}$	$F_{DEB}(0) = \left[\frac{mol}{s}\right]$	$C_{DEB} = \frac{F_{DEB}}{v_0}$

**Taula 11.3: Cabal d'entrada d'etilè segons la unitat de llit fix.**

Reactor	Llit Fix	Cabal d'etilè $\left[\frac{\text{kmol}}{\text{h}}\right]$
R1	L1	$F_{E L1} = 0.2000 \cdot F_{E TOTAL}$
	L2	$F_{E L2} = 0.1750 \cdot F_{E TOTAL}$
R2	L3	$F_{E L3} = 0.1750 \cdot F_{E TOTAL}$
	L4	$F_{E L3} = 0.1500 \cdot F_{E TOTAL}$
R3	L5	$F_{E L4} = 0.1500 \cdot F_{E TOTAL}$
	L6	$F_{E L5} = 0.1500 \cdot F_{E TOTAL}$

Les dades cinètiques corresponents a les equacions de formació d'etilbenzè i del dietilbenzè als reactors d'alquilació es mostren a la Taula 11.4 <sup>[1,2]</sup>.

**Taula 11.4: Dades cinètiques per les reaccions de l'etapa d'alquilació**

Reacció	Equació de Velocitat $\left[\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}}\right]$
$2C_6H_6 + C_2H_4 \rightarrow C_6H_5CH_2CH_3$ (R1)	$r_1 = 1,528 \cdot 10^6 \exp \exp \left( \frac{-7,113 \cdot 10^4}{RT} \right) C_E C_B$
$C_6H_5CH_2CH_3 + C_2H_4 \rightarrow C_{10}H_{14}$ (R2)	$r_2 = 2,778 \cdot 10^7 \exp \exp \left( \frac{-8,368 \cdot 10^4}{RT} \right) C_{EB} C_B$

### 11.7.2. Balanç d'energia

En tractar-se de reactors adiabàtics amb reaccions exotèrmiques, és de gran interès avaluar el canvi de la temperatura al llarg de cada llit que compon l'etapa de reacció. Ja que cada dos llits, per tant, a la sortida de cada reactor es duu a terme un refredament del corrent, s'ha suposat que les etapes són perfectament adiabàtiques.

A continuació trobem l'equació de balanç d'energia en la qual s'avalua el canvi en la temperatura al llarg de la massa de catalitzador del llit suposant que no hi ha pèrdues de calor.

$$\frac{dT}{dW} = \frac{r_x \Delta H_{rx}(T)}{\sum F_i \cdot C_{p_j}} \quad \text{Equació 11.1}$$

$\frac{dT}{dW}$  : Variació de Temperatura amb al llarg de la massa catalitzador

$r_A$  : Velocitat de la reacció x  $\left[ \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right]$

$\Delta H_{rx}$  : Entalpia de la reacció x  $\left[ \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \right]$

$F_i$  : Cabal molar del component j  $\left[ \frac{\text{kmols}}{\text{h}} \right]$

$C_{p_j}$  : Capacitat calorífica dle component j  $\left[ \frac{\text{KJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right]$

La següent equació mostra el balanç d'energia amb les variables del nostre procés.

$$\frac{dT}{dW} = \frac{(r_1 \Delta H_{r1} + r_2 \Delta H_{r2})}{(F_E C_{pE} + F_B C_{pB} + F_{EB} C_{pEB} + F_{DEB} C_{pDEB})} \quad \text{Equació 11.2}$$

A la Taula 11.5, trobem les dades termodinàmiques dels components implicats en la reacció d'alquilació. En aquest disseny preliminar no es té en compte la formació de trietilbenzè i altres composts pesats.

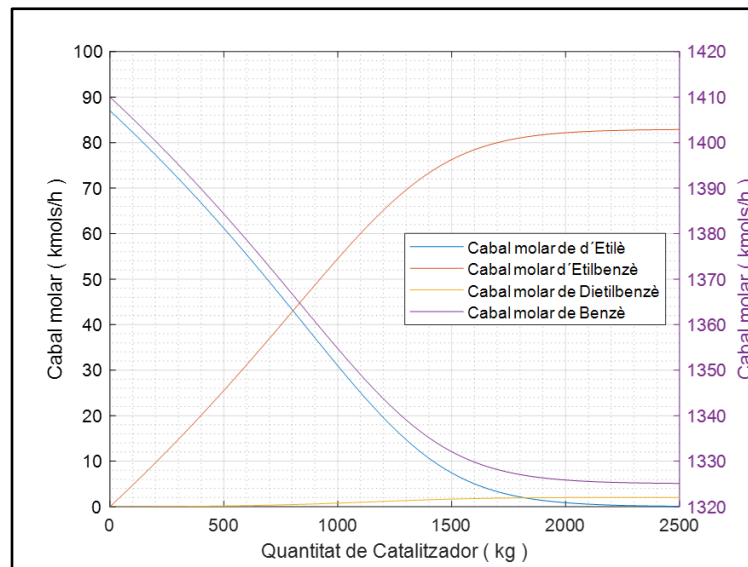
**Taula 11.5: Entalpies de formació i capacitats calorífiques dels components implicats en l'etapa l'alquilació. [4]**

Component j	$\Delta H_f \left[ \frac{\text{KJ}}{\text{kmol}} \right]$	$C_p = A + BT + CT^2 + DT^3 \left[ \frac{\text{KJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right]$			
		A	B	C	D
Etilè ( E )	52335	70,92	0,804	-0,0021	0,00005
Benzè ( B )	82982	-31,66	1,3	0,0036	0,00004
Etilbenzè ( EB )	-29810	183,37	0,169	0,005	0
Dietilbenzè ( DEB )	-20381	140,766	0,722	-0,0019	0,00003

### 11.7.3. Disseny en Matlab

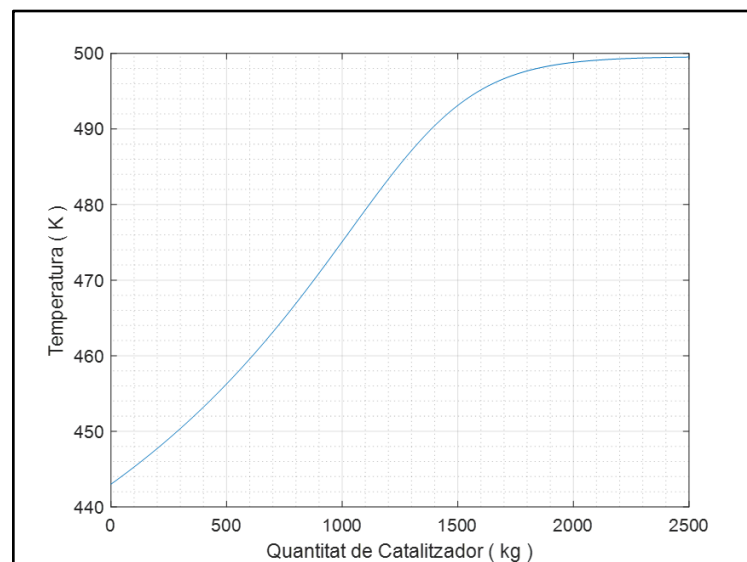
Pel càlcul de la massa de catalitzador necessària amb el programa MatLab, s'ha partit de les condicions d'entrada al primer reactor que proposa [3].

En la Figura 11.25 s'observa l'evolució de les concentracions dels reactius i productes al llarg de la massa de catalitzador del llit. Com s'observa la formació de dietilbenzè és molt petita en comparació amb la del producte d'interès.



**Figura 11.25: Cabals dels diferents components**

En la *Figura 11.26* obtenim el perfil simulat amb MatLab de la temperatura per un llit d'alquilació. Pel que fa a la temperatura, se simularà amb més precisió amb el programa MatLab més endavant per assolir un perfil més correcte tenint en compte altres factors termodinàmics i de construcció. Tot i així s'observa un salt de temperatura per un llit d'uns 55°C, una mica superior al que proposa <sup>[3]</sup> de 50°C.



**Figura 11.26: Perfil de temperatura al reactor d'alquilació**



Pel que fa a les necessitats de catalitzador, s'ha considerat la massa corresponent a una conversió d'etilè d'un 95%, ja que es considera complicat arribar a un 100% d'aquesta, obtenint un resultat de  $W = 1720 \text{ kg catalitzador}$

A partir d'aquest valor ja es pot procedir a calcular el volum de reactor i les característiques de construcció.

### 11.7.3.1 Codi de MatLab

```
function Alquilador
clear all
close all
clc

%Pesos Moleculars Components
PM_E=28.05; %kg/kmol
PM_B=78.11; %kg/kmol

%Densitat Benzè
dens_B=876; %kg/m3

%Limits de la variable independent
W = (0:10:2500); %kg Catalitzador

%Entalpies de formació:
H_E = 52335; %KJ/kmol
H_B = 82982; %KJ/kmol
H_EB = -29810; %KJ/kmol
H_DEB = -20381; %KJ/kmol

%Entalpies de reacció
dH_r1_0 = H_EB - H_E - H_B; %KJ/kmol
dH_r2_0 = H_DEB - H_EB - H_E; %KJ/kmol

%Condicions inicials de les variables dependents
F_E0 = 87; %kmol / h
F_B0 = 1410; %kmol/h
F_EB0 = 0; %kmol/h
F_DEB0 = 0; %kmol/h
T0=443; %K

%Condicions inicials ODE
condini = [F_E0;F_B0;F_EB0;F_DEB0;T0];
```

```
[W,Y] = ode45(@Alquilador,W,condini);

x1 = Y(:,1)
x2 = Y(:,2);
x3 = Y(:,3);
x4 = Y(:,4);
x5 = Y(:,5);

%Gràfics

figure

plot(W,x1,W,x3,W,x4)

ylim([0 100])

ylabel('Cabal molar ( kmols/h )')

yyaxis right

plot(W,x2);

ylim([1320 1420])

xlabel('Quantitat de Catalitzador ( kg )')

ylabel('Cabal molar ( kmols/h )')

legend('Cabal molar de d'Etilè','Cabal molar d'Etilbenzè','Cabal molar de Dietilbenzè','Cabal molar de Benzè','Location','east')

grid on

grid minor

figure

plot(W,x5)

xlabel('Quantitat de Catalitzador ( kg )')

ylabel('Temperatura ( K )')

grid on

grid minor

%Descripció de la funció

function [ dxdW ] = Alquilador(W,x);

%Càlcul cabal d'entrada v0

p = ((F_E0*PM_E+F_B0*PM_B)/dens_B);

Ct0=(F_E0+F_B0)/p;   %kmols/m3

Ft0 = (F_E0+F_B0);   %kmol/h

v0=Ft0/Ct0;        %m3/h

%Dades cinètiques

R=8.314;
```

$$k1a = 1.528E6 * \exp((-7.113E4)/(R * x(5))); \quad \% \text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$$

$$k2c = 2.778E7 * \exp((-8.368E4)/(R * x(5))); \quad \% \text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$$

$$F_t = x(1) + x(2) + x(3) + x(4);$$

*%Evolució Concentracions*

$$C_E = x(1) / v_0;$$

$$C_B = x(2) / v_0;$$

$$C_{EB} = x(3) / v_0;$$

$$C_{DEB} = x(4) / v_0;$$

*%Descripció equacions de Velocitat*

$$r1a = -k1a * C_E * C_B;$$

$$r2c = -k2c * C_E * C_{EB};$$

$$r_E = r1a + r2c;$$

$$r_B = r1a;$$

$$r_{EB} = -r1a + r2c;$$

$$r_{DEB} = -r2c;$$

*%Capacitats Calorífiques*

$$Cp_E = (70.92 + 0.804 * x(5) - 0.0021 * x(5)^2 + 0.00018 * x(5)^3); \quad \% \text{KJ}/\text{kmol} \cdot \text{K}$$

$$Cp_B = (-31.66 + 1.3 * x(5) + 0.0036 * x(5)^2 + 0.000024 * x(5)^3); \quad \% \text{KJ}/\text{kmol} \cdot \text{K}$$

$$Cp_{EB} = (183.37 + 0.169 * x(5) + 0.0005 * x(5)^2); \quad \% \text{KJ}/\text{kmol} \cdot \text{K}$$

$$Cp_{DEB} = (140.766 + 0.722 * x(5) - 0.0019 * x(5)^2 + 0.00003 * x(5)^3); \quad \% \text{KJ}/\text{kmol} \cdot \text{K}$$

*%Calors de reacció*

$$dH_{r1} = dH_{r1\_0} + (Cp_{EB} - Cp_E - Cp_B) * (x(5) - 298.15); \quad \% \text{KJ}/\text{kmol}$$

$$dH_{r2} = dH_{r2\_0} + (Cp_{DEB} - Cp_E - Cp_{EB}) * (x(5) - 298.15); \quad \% \text{KJ}/\text{kmol}$$

$$dxdW(1) = r_E; \quad \% \text{Eq. diferencial per l'Etilè}$$

$$dxdW(2) = r_B; \quad \% \text{Eq. diferencial pel Benzè}$$

$$dxdW(3) = r_{EB}; \quad \% \text{Eq. diferencial per l'Etilbenzè}$$

$$dxdW(4) = r_{DEB}; \quad \% \text{Eq. diferencial pel Dietilbenzè}$$

$$dxdW(5) = (r1a * dH_{r1} + r2c * dH_{r2}) / (x(1) * Cp_E + x(2) * Cp_B + x(3) * Cp_{EB} + x(4) * Cp_{DEB}); \quad \% \text{Eq. diferencial del Balanç d'Energia}$$

$$dxdW = dxdW';$$

$$W_{95} = 0.05 * F_{E0};$$

end

#### 11.7.4. Disseny mecànic dels reactors

##### 11.7.4.1. Càlcul del volum dels reactors

Amb l'equació de disseny per un reactor catalític RCFP de llit fix, Equació 11.3, es pot trobar el volum necessari de l'equip.

$$\rho_L = \frac{W}{V} \quad \text{Equació 11.3}$$

$\rho_L$ : Densitat Aparent del Llit ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$W$ : Massa de Catalitzador (kg)

$V$ : Volum total del Llit ( $m^3$ )

Coneixent els valors característics del catalitzador utilitzat en el procés d'alquilació,  $\varepsilon_L = 0.48$  i  $\rho_{P \text{ alquilació}} = 550 \frac{kg}{m^3}$  [3] es pot calcular la densitat del llit. Per calcular-la es pot fer a partir dels valors bibliogràfics de porositat i densitat de partícula a partir de les següents equacions.

$$\varepsilon_L = \frac{V - V_P}{V} = \frac{V - V \frac{\rho_L}{\rho_P}}{V} = 1 - \frac{\rho_L}{\rho_P} \quad \text{Equació 11.4}$$

$\varepsilon_L$ : Porositat del Llit

$V_P$ : Volum de les Partícules ( $m^3$ )

$\rho_{P \text{ alquilació}}$ : Densitat Partícules Catalitzador d'Alquilació ( $\frac{kg}{m^3}$ )

Aïllant l'anterior equació s'obté la següent expressió pel càlcul de la densitat del llit de partícules.

$$\rho_L = \rho_{P \text{ alquilació}} (1 - \varepsilon_L)$$

$$\rho_L = 550(1 - 0.48) \quad \rho_L = 286 \frac{kg}{m^3}$$

Un cop s'ha obtingut el valor de densitat del llit  $\rho_L = 286 \frac{kg}{m^3}$ , amb la massa de catalitzador ja es pot trobar el volum necessari del llit.

$$V = \frac{W}{\rho_L} ; \quad V = 6,01 m^3$$

#### 11.7.4.2. Càlcul de la pressió de disseny

Per calcular la pressió de disseny del reactor, s'usa l'Equació 11.5, en la que es té en compte la pressió d'operació i certs factors de seguretat.

$$P_{DISSENY} = P_{OP} + \Delta P + (P_{OP} + \Delta P) \cdot 0,15 \text{ [psi]} \quad \text{Equació 11.5}$$

$P_{OP}$ : Pressió d'operació [psi] ;

La pressió d'operació és  $P_{OP} = 502,7 \text{ psi}^{[3]}$

$\Delta P$ : Pressió hidrostàtica [psi]

Al tractar-se d'un reactor de llit empaquetat continu, el flux de líquid a través d'aquest és constant, i per tant l'altura de columna de líquid es considera molt baixa. Tot i així s'ha considerat augmentar el factor de seguretat de 0.15 a 0.20, donant lloc a l'Equació 11.6:

$$P_{DISSENY} = P_{OP} + (P_{OP} \cdot 0,20) \text{ [psi]} \quad \text{Equació 11.6}$$

$$P_{DISSENY} = 603,24 \text{ psi}$$

#### 11.7.4.3. Càlcul de la temperatura de disseny

Pel que fa a la temperatura de disseny, es calcula aplicant un factor de seguretat del 15% a la temperatura d'operació màxima del reactor a partir de l'Equació 11.7, obtenint un resultat de  $T_{DISSENY} = 268,3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$T_{DISSENY} = T_{MAX OPERACIÓ} \cdot (1 + 0,15) \quad \text{Equació 11.7}$$

#### 11.7.4.4. Dimensions dels reactors

Per un volum de llit de  $6 \text{ m}^3$ , s'ha escollit unes dimensions de llargada  $L = 3 \text{ m}$  i diàmetre  $D = 1,6 \text{ m}$ , de manera que es compleixin les relacions mínimes entre dimensions de l'equip i característiques del catalitzador. Coneixem que les partícules de catalitzador tenen unes dimensions,  $D_p = 5 \text{ mm}$  i que hem de complir les  $H > 1 \text{ m}$  i  $D > 0,05 \text{ m}^{[3]}$ .

A continuació es troben les relacions entre el diàmetre de la partícula de catalitzador i la llargada o diàmetre del reactor.

$$\frac{H}{D_p} > 200 \quad i \quad \frac{D_p}{D} < 0,10$$

*H: Longitud del llit*

*D: Diàmetre del llit*

*D<sub>p</sub>: Diàmetre de partícula de catalitzador*

Per aquestes mides de llit, s'obté una relació  $\frac{H}{D_p} = 600 > 200$  i  $\frac{D_p}{D} = 0,003 < 0,10$  per la qual cosa es compleixen aquestes relacions.

A continuació es realitza el disseny mecànic rigorós dels reactors d'alquilació segons els criteris ASME, considerant la seva construcció en acer inoxidable 316L. Cal tenir en compte que cada un dels reactors conté 2 llits, amb una entrada d'etilè fresc entre el primer i segon llit, de manera que per el disseny del reactor es considera augmentar en un 10% el volum del reactor de manera que es pugui col·locar una dutxa per l'entrada de reactiu abans del segon llit.

### ***Gruix segons pressió interna del cos del reactor:***

Per al càlcul del gruix del cos del reactor segons la pressió interna, s'utilitza l'Equació 11.8.

$$\tau = \frac{P_D \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_D} \quad \text{Equació 11.8}$$

*τ: Gruix del cos del reactor [inch]*

*P<sub>D</sub>: Pressió de disseny [psi]*

*R: Radi intern [inch]*

*S: Tensió del material [psi];*

*Per acer inoxidable 316L que no supera els 427°C (S = 12.400 psi)*

*Segons normativa [5]*

*E: Valor d'Eficàcia; per l'acer inoxidable 316L (E = 0,8)*

A partir dels valors calculats anteriorment i l'Equació 11.8, s'obté un resultat pel gruix del reactor de  $\tau = 50,49 \text{ mm}$ .

**Gruix segons pressió interna dels caps toriesfèrics:**

Primer de tot s'ha de comprovar la relació  $L/r$  sigui igual o inferior que  $16^{2/3}$ , on  $L$  fa referència al radi intern, i  $r$  suposa un 10% d'aquest radi de l'equip.

Coneixent  $L = 0,80 \text{ m}$ ;  $r = 0,10 \cdot 0,80 = 0,08 \text{ m}$ , s'obté que la relació  $L/r$  és igual a 10, i per tant inferior a  $16^{2/3}$ . Per tant, l'equació necessària pel càlcul del gruix dels caps toriesfèrics segons la pressió interna és la següent Equació 11.9.

Per  $L/r = 10$ , a partir de la *Figura 11.27*, s'obté un valor del factor  $M = 1,54$

$$t = \frac{P_D \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_D} \quad \text{Equació 11.9}$$

$t$ : Gruix dels caps toriesfèrics [mm]

$L$ : Radi intern [inch]

$M$ : Factor tabulat que depèn del factor  $L/r$

Per tant, a partir dels anteriors valors, s'obté un gruix dels caps toriesfèrics de  $t = 37,69 \text{ mm}$ .

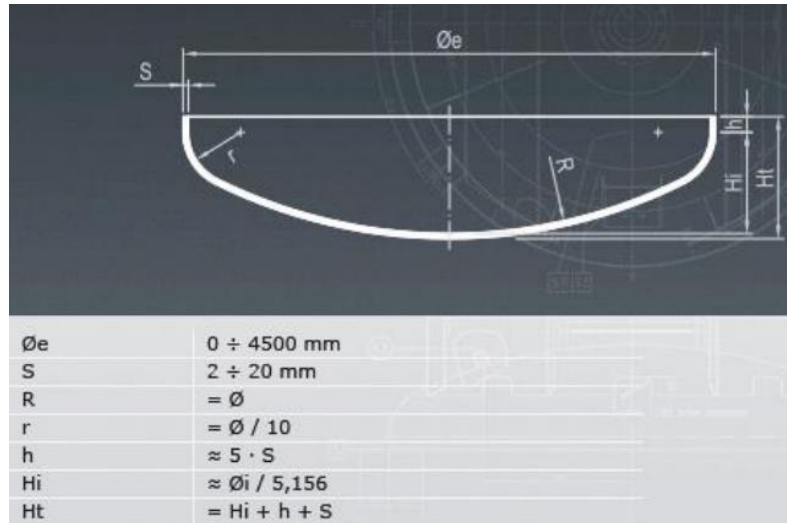
VALUES OF FACTOR "M"																	
$L/r$	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39
$L/r$	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00	9.50	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16.3	*
M	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77	
* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : $L = D + 2t$ (see note 2 on facing page)																	

*Figura 11.27: Valors del factor M<sup>[6]</sup>*

A l'obtenir un resultat pel gruix dels caps toriesfèrics inferior al gruix del cos del reactor, s'escull el gruix del cos per a la construcció de totes les parts de l'equip.

**Alçades i Dimensionament del cap toriesfèric, segons pressió interna:**

El dimensionament del cap toriesfèric es realitza mitjançant la nomenclatura de la *Figura 11.28*.



**Figura 11.28: Disseny d'un capçal toriesfèric [6]**

Les anteriors variables corresponen a:

*S*: Gruix del capçal toriefèric [inch]; ( $S=50,49 \text{ mm} = 1,99 \text{ inch}$ )

*Øe*: Radi intern [inch]; ( $\text{Øe} = 0,8 \text{ m} = 31,50 \text{ inch}$ )

Per tant, a partir de la Figura 11.28, obtenim un resultat de  $h = 9,95 \text{ inch}$  i  $Hi = 6,11 \text{ inch}$ , per tant, finalment obtenim un resultat de l'alçada del cap de  $Ht = 18.05 \text{ inch} = 0,4585 \text{ m}$

### **Alçada total del reactor:**

Considerant que el reactor conté dos llits de 3m de llargada cada un, i que s'ha decidit augmentar un 10% aquesta llargada per tal que la construcció de l'entrada de reactius i separació entre llits sigui correcte, la llargada total del cos del reactor seria de **6,6 m**.

Tenint en compte l'alçada dels capçals toriesfèrics, la llargada total de l'equip es calcula com:

$$L_{ALQUILADOR} = 6,6 + (2 \cdot 0,4585) = 7,52 \text{ m}$$



#### 11.7.4.5. Volum i pes del material

##### **Volum de material:**

Es calcula per cada una de les parts de l'equip, el volum i pes de material que serà necessari per a la construcció dels reactors d'alquilació.

##### **Volum dels capçals:**

Primerament, es calcula el volum intern dels capçals:

$$V_{Int. Capçals} = 0,1 \cdot (D_{Int.})^3 = 0,1 \cdot (1,6)^3 = 0,4096 \text{ m}^3$$

En que les variables corresponen a:

$$V_{Int. Capçals}: \text{Volum intern dels capçals [ m ]}$$

$$D_{Int.}: \text{Diàmetre intern de l'alquilador [ m ]}$$

Seguidament es calcula el volum exterior d'aquests:

$$V_{Ext. Capçals} = 0,1 \cdot (D_{Ext.})^3 = 0,1 \cdot (1,6 + 50,49 \cdot 10^{-3})^3 = 0,4496 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{Ext. Capçals}: \text{Volum extern dels capçals [ m ]}$$

$$D_{Ext.}: \text{Diàmetre extern de l'alquilador [ m ]}$$

A partir de la diferència entre el volum intern i extern s'obté el volum necessari de material:

$$V_{Material Capçals} = V_{Ext. Capçals} - V_{Int. Capçals} = 0,4496 - 0,4096 = 0,040 \text{ m}^3$$

##### **Volum del cos de l'alquilador:**

A continuació es realitza el mateix procediment pel cos del reactor. Es calcula el volum intern d'aquest:

$$V_{Int.} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Int.})^2 \cdot H_{TOR.} \quad \text{Equació 11.10}$$

$$V_{Int.} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,6)^2 \cdot 7,52 = 15,12 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{Int.}$ : Volum interior del reactor [ m<sup>3</sup> ]

$D_{Int.}$ : Diàmetre interior del reactor [ m ]

$H_{TOT.}$ : Alçada total del reactor [ m ]

Seguidament, es calcula el volum extern del cos de l'equip:

$$V_{Ext.} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Ext.})^2 \cdot H_{TOT.} \quad \text{Equació 11.1}$$

$$V_{Ext.} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,6 + 50,49 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 7,52 = 16,09 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{Ext.}$ : Volum exterior del reactor [ m<sup>3</sup> ]

$D_{Ext.}$ : Diàmetre exterior del reactor [ m ]

$H_{TOT.}$ : Alçada total del reactor [ m ]

Finalment, a partir de la diferència entre el volum interior i exterior del cos de l'equip, s'obté la necessitat de material per a la construcció:

$$V_{Material} = (V_{Ext.} - V_{Int.}) + V_{Material \text{ Capçals}} \quad \text{Equació 11.12}$$

$$V_{Material} = (16,09 - 15,12) + 0,040 = 1,01 \text{ m}^3$$

### **Pes del reactor:**

Es procedeix a calcular el pes de l'alquilador en les situacions següents:

### **Pes del reactor Buit:**

En aquest cas es calcula el pes de l'equip buit, aplicant per això un sobredimensionant del 10%, tenint en compte la densitat del material en qüestió:

$$M_{Alquilador,buit} = (V_{Material} \cdot \rho_{acer\ 316L}) \cdot 1,1 \quad \text{Equació 11.13}$$

$$M_{Alquilador,buit} = (1,01 \cdot 8000) \cdot 1,1 = 8888\ kg$$

En què les variables corresponen a:

$$M_{Alquilador,buit}: \text{Massa del reactor buit [ kg ]}$$

$$\rho_{acer\ 316L}: \text{Densitat de l'acer inoxidable 316L } \left(8000 \frac{kg}{m^3}\right)^{[7]}$$

#### **Pes del reactor amb catalitzador:**

En aquest cas es calcula el pes de l'equip buit, aplicant per això un sobredimensionant del 10%, tenint en compte la densitat del material en qüestió:

$$M_{Alquilador,cat.} = (V_{Material} \cdot \rho_{acer\ 316L}) \cdot 1,1 + M_{Catalitzador}$$

**Equació 11.14**

$$M_{Alquilador,cat.} = (1,01 \cdot 8000) \cdot 1,1 + (2 \cdot 1720) = 12328\ kg$$

En què les variables corresponen a:

$$M_{Catalitzador}: \text{Massa del catalitzador [ kg ]}$$

$$M_{Alquilador,cat.}: \text{Massa del reactor amb el catalitzador [ kg ]}$$

$$\rho_{acer\ 316L}: \text{Densitat de l'acer inoxidable 316L } \left(8000 \frac{kg}{m^3}\right)^{[7]}$$

#### **Pes del reactor en proves:**

En aquest cas es calcula el pes total de l'equip si aquest estigués ple d'aigua, tenint en compte el catalitzador. Es realitza el càlcul a partir del volum total de l'equip, el volum de catalitzador i la densitat de l'aigua.

$$M_{Alquilador,aigua} = M_{Alquilador,cat.} + ((V_{Int.} + 2 \cdot V_{Int. Capçals} - V_{Catalizador}) \cdot \rho_{aigua}) \quad \text{Equació 11.15}$$

$$V_{Cat.} = \frac{M_{cat.}}{\rho_L} = 2 \cdot 1720 \text{ kg} \cdot \frac{1}{286 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 12,03 \text{ m}^3$$

$$M_{Alquilador,aigua} = 12328 + ((15,12 + 2 \cdot 0,4096 - 12,03) \cdot 1000) = 16238 \text{ kg}$$

En què les variables corresponen a:

$$M_{Alquilador,aigua}: \text{Pes del reactor ple d'aigua [ kg ]}$$

$$\rho_{aigua}: \text{Densitat de l'aigua } \left( 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

#### **Pes del reactor en operació:**

Per últim, es realitza el càlcul del pes de la columna en condicions d'operació, a partir de la densitat de la mescla d'entrada a l'equip.

$$M_{Alquilador,op} = M_{Alquilador,cat.} + ((V_{Int.} + 2 \cdot V_{Int. Capçals} - V_{Catalizador}) \cdot \rho_{mescla}) \quad \text{Equació 11.16}$$

$$M_{Alquilador,op} = 12328 + ((15,12 + 2 \cdot 0,4096 - 12,03) \cdot 879,5) = 15766 \text{ kg}$$

En què les variables corresponen a:

$$M_{Alquilador,op}: \text{Pes del reactor en condicions d'operació [ kg ]}$$

$$\rho_{mescla}: \text{Densitat del corrent d'entrada } \left( 879,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

#### **11.7.4.6. Aïllament del reactor**

Degut a les condicions d'operació de l'alquilador, s'ha tingut en compte la necessitat d'aïllar l'equip per mantenir aquestes condicions constants. S'ha escollit la llana de roca com a aïllant per l'equip, ja que les seves propietats són adients per aquestes condicions. Tot i que existeixen algunes diferències de temperatures entre els diferents reactors d'alquilació, s'ha dissenyat

l'aïllament igual per aquests, ja que es considera que les condicions d'operació són semblants i d'aquesta manera es facilita la construcció dels equips.

A continuació es calcula el gruix necessari per a aquest aïllant:

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{Ext}}\right)^{\frac{1}{4}}} \quad \text{Equació 11.17}$$

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{(235 - 25)}{(1,6 + 50,49 \cdot 10^{-3}) \cdot 100}\right)^{\frac{1}{4}}} = 7,85 \text{ cm}$$

En què les variables corresponen a:

$t_{aïllant}$ : Gruix de l'aïllant de llana de roca [ cm ]

$\Delta T$ : Diferència de temperatura entre l'interior i l'exterior del reactor [ °C ]

$D_{Ext}$ : Diàmetre extern de l'equip [ cm ]

Pel que fa als valors típics per gruixos d'aïllants, s'ha escollit 8cm, per tal d'utilitzar un valor unificat i facilitar la construcció de l'equip<sup>[8]</sup>.

Per últim, es calcula el volum de material aïllant que serà necessari per a la construcció de l'equip. Primerament, es calculen les superfícies exteriors del cos del reactor i dels capçals:

$$S_{Ext. Cos} = \pi \cdot D_{Ext. Cos} \cdot H_{TOT} = \pi \cdot (1,6 + 50,49 \cdot 10^{-3}) \cdot 7,52 = 38,99 \text{ m}^2$$

$$S_{Ext. Capçals} = 0,931 \cdot D_{Ext. Cos}^2 = 0,931 \cdot (1,6 + 50,49 \cdot 10^{-3})^2 = 2,54 \text{ m}^2$$

$$S_{Ext. TOT} = S_{Ext. Cos} + 2 \cdot S_{Capçals} = 38,99 + 2 \cdot 2,54 = 44,06 \text{ m}^2$$

A partir del càlcul de les superfícies, es calcula el valor del volum de material:

$$V_{aïllant} = S_{Ext. TOT} \cdot t_{aïllant}$$

$$V_{aïllant} = 44,06 \text{ m}^2 \cdot 0,08 \text{ m} = 3,52 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{aïllant}$ : Volum del material aïllant [ m<sup>3</sup> ]

$S_{Ext. TOT}$ : Secció externa del reactor [ m<sup>2</sup> ]

$t_{aïllant}$ : Gruix de l'aïllant [ m ]

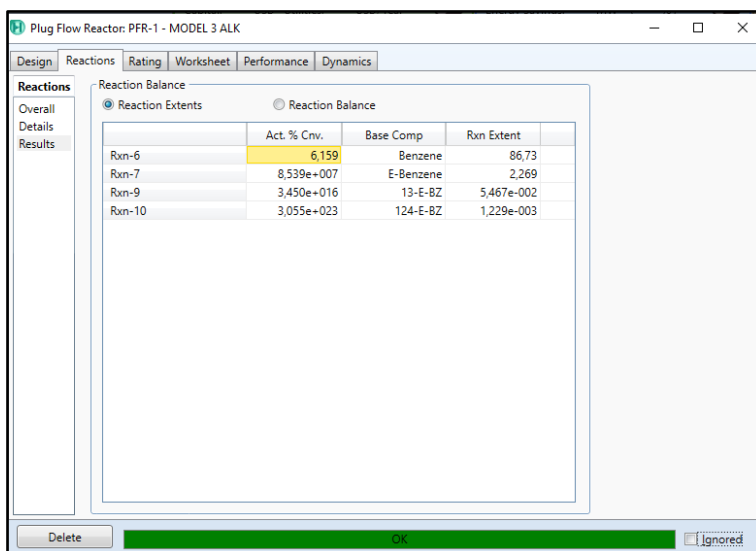
### 11.7.5. Disseny amb HYSYS

Com s'ha comentat, a partir del disseny preliminar amb Matlab, s'ha procedit a realitzar el disseny del procés, i per tant dels reactors d'alquilació amb el simulador de processos HYSYS.

S'ha introduït totes les dades característiques del reactor obtingudes fins al moment al simulador per tal d'obtenir un correcte disseny de l'equip. El disseny amb el simulador s'ha realitzat per una unitat de llit fix catalític.

#### 11.7.5.1. Cinètiques i reaccions

Primer de tot s'ha introduït com s'observa en la Figura 11.29 les dades cinètiques comentades anteriorment pel procés d'alquilació, a part de paràmetres cinètics que ens permeten aproximar la formació de subproductes com el dietilbenzè o el trietilbenzè.

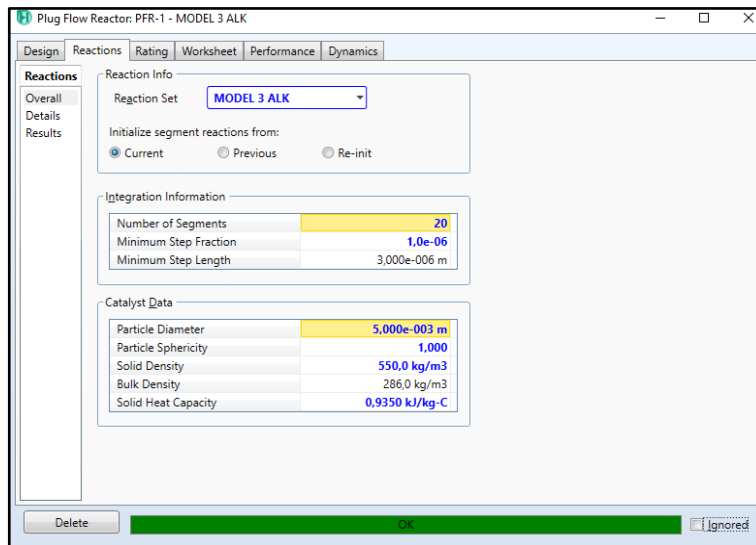


	Act. % Crv.	Base Comp	Rxn Extent
Rxn-6	6,159	Benzene	86,73
Rxn-7	8,539e+007	E-Benzene	2,269
Rxn-9	3,450e+016	13-E-BZ	5,467e-002
Rxn-10	3,055e+023	124-E-BZ	1,229e-003

Figura 11.29: Dades cinètiques del procés d'alquilació al simulador HYSYS

#### 11.7.5.2. Característiques del catalitzador

Pel que fa a les característiques del catalitzador utilitzat, s'ha introduït els valors referents al mida i esfericitat de la partícula, la densitat del sòlid, o la capacitat calorífica com s'observa en la Figura 11.30.

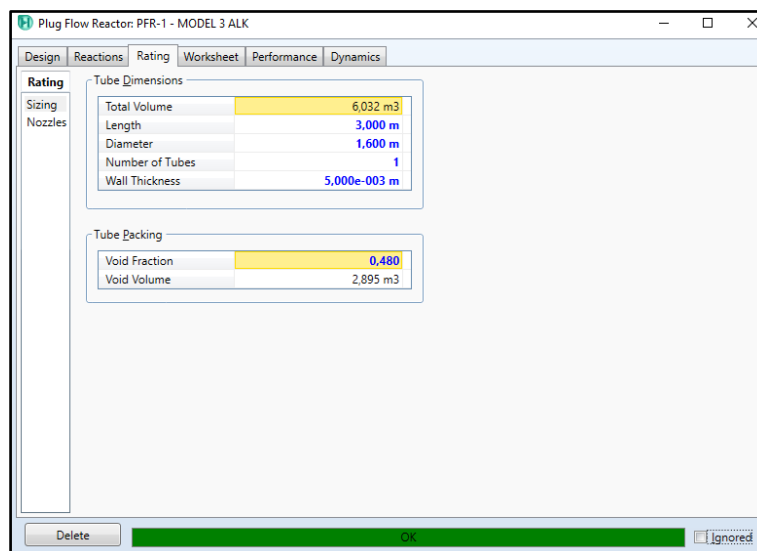


**Figura 11.30: Dades característiques del catalitzador**

### 11.7.5.3. Característiques de construcció

Pel que fa a les característiques de construcció dels reactors, en aquest cap com que el disseny és per un sol llit, s'ha introduït les mides de longitud i diàmetre calculades anteriorment, considerant que el reactor un sol tub, en la Figura 11.31 s'observen els paràmetres corresponents.

També s'ha tingut en compte la fracció de buit del llit fix <sup>[3]</sup>.



**Figura 11.31: Característiques de construcció d'un llit fix**

#### 11.7.5.4. Pèrdua de pressió

A partir de les anteriors característiques del llit, el simulador HYSYS ha calculat la pèrdua de pressió per cada un d'aquests seguint l'equació d'Ergun. S'obté una pèrdua de pressió  $\Delta P_{OP} = 1,929 \text{ kPa}$  En la Figura 11.32 es pot observar el resultat del simulador.

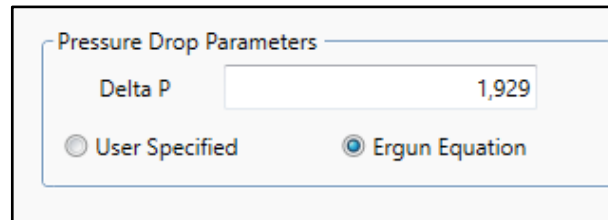
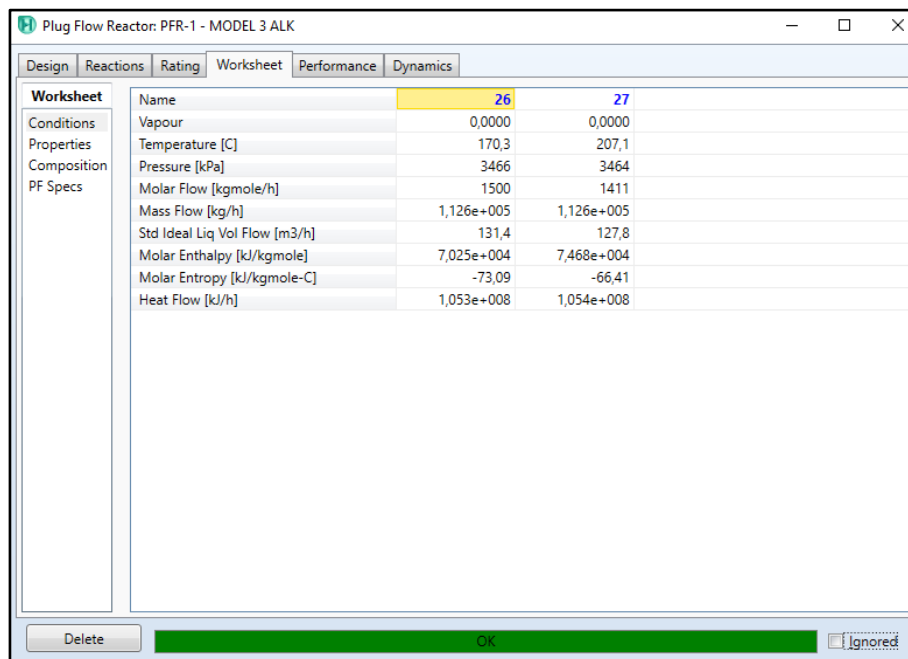


Figura 11.32: Resultat de la pèrdua de pressió a través d'un llit fix.

#### 11.7.5.5. Corrent de sortida d'un llit fix

A continuació en la Figura 11.33, s'observa el corrent d'entrada i el de sortida del primer llit fix del procés. L'entrada al reactor té una temperatura de  $170,3^{\circ}\text{C}$ , i en tractar-se d'una reacció exotèrmica a la sortida el corrent té una temperatura de  $207,1^{\circ}\text{C}$ , per tant, es genera un corrent energètic força considerable. Comparant el disseny amb el preliminar amb MatLab veiem algunes diferències pel que fa a la temperatura, per això es considera com a correctes els valors del simulador HYSYS, ja que conté un paquet termodinàmic que permet realitzar càlculs molt més precisos.

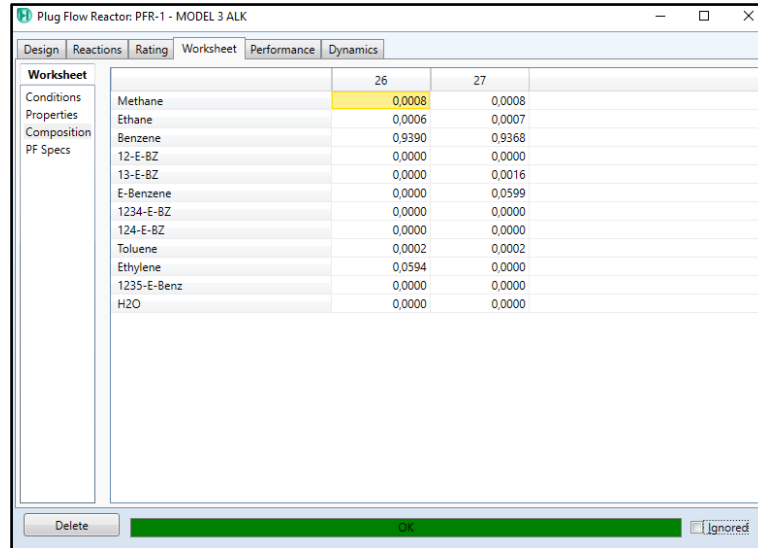


	26	27
Name		
Vapour	0,0000	0,0000
Temperature [C]	170,3	207,1
Pressure [kPa]	3466	3464
Molar Flow [kgmole/h]	1500	1411
Mass Flow [kg/h]	1,126e+005	1,126e+005
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	131,4	127,8
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	7,025e+004	7,468e+004
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	-73,09	-66,41
Heat Flow [kJ/h]	1,053e+008	1,054e+008

Figura 11.33: Característiques dels corrents a l'entrada i sortida del primer llit fix



Pel que fa a les composicions dels diferents components a la Figura 11.34 s'observa com l'etilè d'entrada al reactor es consumeix completament, i a la vegada s'observa la formació del producte d'interès etilbenzè, i els altres subproductes.



	26	27
Methane	0,0008	0,0008
Ethane	0,0006	0,0007
Benzene	0,9390	0,9368
12-E-BZ	0,0000	0,0000
13-E-BZ	0,0000	0,0016
E-Benzene	0,0000	0,0599
1234-E-BZ	0,0000	0,0000
124-E-BZ	0,0000	0,0000
Toluene	0,0002	0,0002
Ethylene	0,0594	0,0000
1235-E-Benz	0,0000	0,0000
H2O	0,0000	0,0000

**Figura 11.34:** Composicions dels corrents d'entrada i sortida del primer llit fix

## 11.8. Disseny del reactor de transquilació (R-1504)

Per realitzar el disseny del reactor de transquilació, cal calcular el volum necessari, que com en el cas dels alquiladors, es parteix del càlcul de les necessitats de massa de catalitzador. En aquest cas també es tracta d'un reactor catalític de llit empaquet i per aquest procés és necessari un únic reactor amb un sol llit.

En aquest cas també s'ha realitzat un codi de MatLab amb el qual trobar el valor de la massa de catalitzador necessària per poder fer posteriorment el disseny amb el programa Aspen HYSYS.

### 11.8.1. Balanços molars

En el cas del procés de transquilació es duu a terme una única reacció <sup>[1,2]</sup>.



A la Taula 11.6 trobem la descripció de les equacions diferencials del balanç molar per la reacció de transquilació. Pel que fa a l'entrada de reactius, tant de benzè com dietilbenzè, s'ha tingut en compte les proporcions d'entrada a cada llit que proposa <sup>[3]</sup>.

**Taula 11.6: Balanç molar i condicions inicials per un llit de l'etapa d'alquilació**

Balanç Molar	Condió Inicial $\left[\frac{kmol}{h}\right]$	Concentració $\left[\frac{kmol}{m^3}\right]$
$\frac{dF_B}{dW} = \frac{r_B}{\rho_B}$	$F_B(0) = 188\left[\frac{kmol}{h}\right]$	$C_B = \frac{F_B}{v_0}$
$\frac{dF_{EB}}{dW} = \frac{r_{EB}}{\rho_B}$	$F_{EB}(0) = \left[\frac{kmol}{h}\right]$	$C_{EB} = \frac{F_{EB}}{v_0}$
$\frac{dF_{DEB}}{dW} = \frac{r_{DEB}}{\rho_B}$	$F_{DEB}(0) = 61\left[\frac{mol}{s}\right]$	$C_{DEB} = \frac{F_{DEB}}{v_0}$

En aquest cas la reacció també es duu a terme en fase líquida, per tant, la concentració de cada compost es calcula igual que en el disseny dels alquiladors.

Les dades cinètiques corresponents a la reacció de transalquilació es mostren a la Taula 11.7.

**Taula 11.7: Dades cinètiques per les reaccions de l'etapa d'alquilació <sup>[1,2]</sup>**

Reacció	Equació de Velocitat $\left[\frac{kmol}{m^3 \cdot s}\right]$
$C_{10}H_{14} + C_6H_6 \rightarrow 2C_8H_{10} \text{ (R3)}$	$r_3 = 1000 \cdot \exp\left(\frac{-6,276 \cdot 10^4}{RT}\right) C_{DEB} C_B$

### 11.8.2. Balanç d'energia

Pel reactor de transalquilació també s'ha realitzat una simulació preliminar de l'evolució de la temperatura al llarg de la massa de catalitzador. Posteriorment es realitzarà correctament amb el simulador HYSYS.

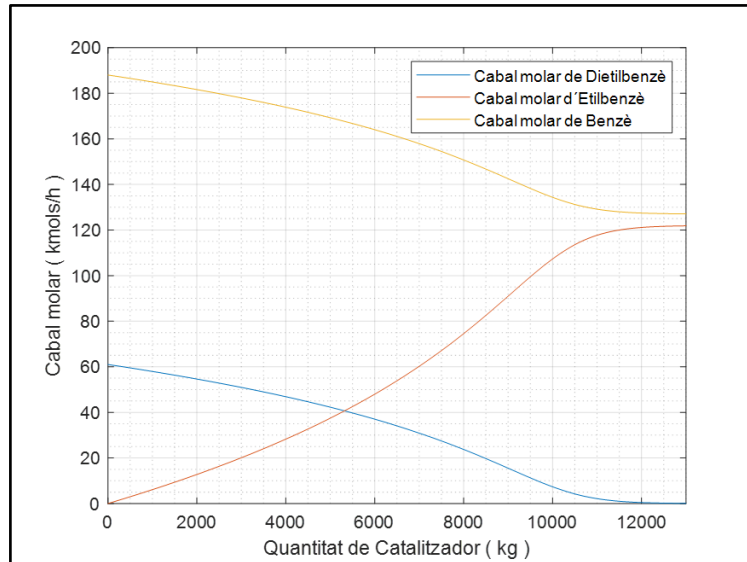
A continuació trobem l'equació de balanç d'energia en la qual s'avalua el canvi en la temperatura al llarg de la massa de catalitzador del llit pel transalquilador suposant que no hi ha pèrdues de calor. Les dades termodinàmiques corresponents que s'han utilitzat es torben a la Taula 11.5.

$$\frac{dT}{dW} = \frac{(r_3 dH_{r3})}{(F_{DEB} C_{pDEB} + F_B C_{pB} + F_{EB} C_{pEB})} \quad \text{Equació 11.18}$$

### 11.8.3. Disseny en MatLab

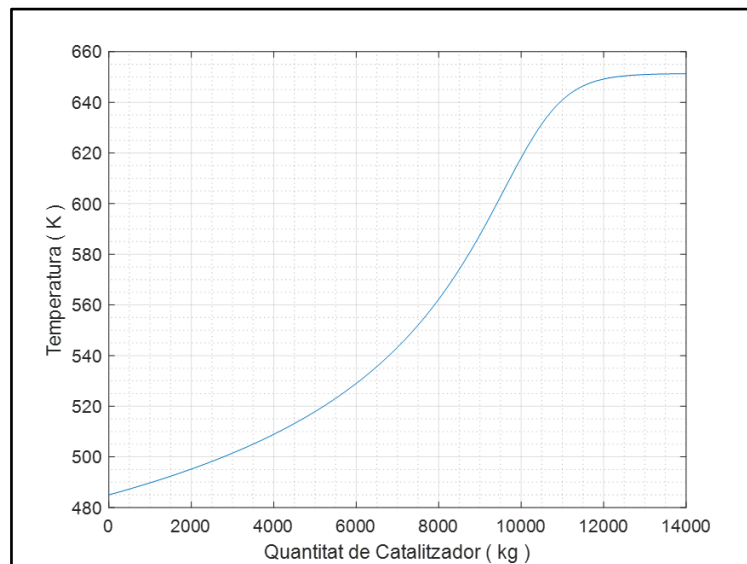
Pel càlcul de la massa de catalitzador necessària amb el programa MatLab, s'ha partit de les condicions d'entrada que proposa <sup>[3]</sup>.

En la Figura 11.35 s'observa l'evolució de les concentracions dels reactius i productes al llarg de la massa de catalitzador del llit.



**Figura 11.35: Perfil de concentracions per el reactor de transalquilació**

En la Figura 11.36 obtenim el perfil de temperatura simulat amb MatLab pel reactor de transalquilació. En aquest cas es realitzarà el correcte disseny amb el simulador HYSYS, ja que el salt de temperatura obtingut és massa elevat per les referències bibliogràfiques consultades [3].



**Figura 11.36: Perfil de temperatura al reactor de transalquilació**

Pel càlcul de la massa de catalitzador necessària, s'ha considerat la massa corresponent a una conversió de dietilbenzè d'un 95%, ja que es considera complicat arribar a un 100% d'aquesta, obtenint un resultat de  $W = 10750 \text{ kg catalitzador}$

A partir d'aquest valor es pot procedir a calcular el volum de reactor i les característiques de construcció corresponents.

### **11.8.3.1. Codi de MatLab**

```
function Transalquilador
clear all
close all
clc
%Pesos Moleculars Components
PM_E=28.05; %kg/kmol
PM_B=78.11; %kg/kmol
PM_DEB=134.22 %kg/kmol
%Densitat Benzè
dens_B=876; %kg/m3
%Limits de la variable independent
W = (0:10:10750); %kg Catalitzador
%Entalpies de formació:
H_E = 52335; %KJ/kmol
H_B = 82982; %KJ/kmol
H_EB = -29810; %KJ/kmol
H_DEB = -20381; %KJ/kmol
%Entalpies de reacció
dH_r1_0 = H_EB - H_E - H_B %KJ/kmol
%Condicions inicials de las variables dependents
F_E0 = 0 %kmol/h
F_B0 = 188 %kmol/h
F_EB0 = 0 %kmol/h
```

```

F_DEB0 = 61   %kmol/h
T0=485      %K

%Condicions inicials ODE

condini = [F_DEB0;F_B0;F_EB0;T0];
[W,Y] = ode45(@Transalquilador,W,condini);
x1 = Y(:,1)
x2 = Y(:,2);
x3 = Y(:,3);
x4 = Y(:,4);

%Gràfics

figure

plot(W,x1,W,x3,W,x2)

xlim([0 13000])

ylabel('Cabal molar ( kmols/h )')

xlabel('Quantitat de Catalitzador ( kg )')

legend('Cabal molar de Dietilbenzè','Cabal molar d'Etilbenzè','Cabal molar de Benzè','Location','northeast')

grid on

grid minor

figure

plot(W,x4)

xlabel('Quantitat de Catalitzador ( kg )')

ylabel('Temperatura ( K )')

grid on

grid minor

('Cabal molar ( kmols/h )')

legend('Cabal molar de Dietilbenè','Cabal molar d'Etilbenzè','Location','northwest')

xlim([0 13000])

grid on

grid minor

%Descripció de la funció

```

```

function [ dxdW ] = Transalquilador(W,x);

%Càlcul cabal d'entrada v0

p = ((F_DEB0*PM_DEB+F_B0*PM_B)/dens_B);

Ct0=(F_DEB0+F_B0)/p; %kmol/m3

Ft0 = (F_DEB0+F_B0); %kmol/h

v0=Ft0/Ct0 %m3/h

%Dades cinètiques

R=8.314;

k1a = 1000*exp((-6.276E4)/(R*x(4))); %kmol/(m3·s)

Ft = x(1)+x(2)+x(3);

%Evolució Concentracions

C_DEB = x(1)/ v0;

C_B = x(2)/ v0;

C_EB = x(3)/ v0;

%Descripció equacions de Velocitat

r1a = -k1a*C_DEB*C_B;

r_DEB = r1a;

r_B = r1a;

r_EB = -2*r1a;

%Capacitats Calorífiques

Cp_B = (-31.66 +1.3 * x(4) + 0.0036 * x(4) ^ 2+0.000024*x(4)^3); %KJ/kmol·K

Cp_EB = (183.37 + 0.169 * x(4) + 0.0005 * x(4) ^ 2); %KJ/kmol·K

Cp_DEB = (140.766 + 0.722 * x(4) - 0.0019 * x(4)^2 + 0.00003*x(4)^3); %KJ/kmol·K

%Calors de reacció

dH_r1 = dH_r1_0 + (Cp_EB - Cp_DEB - Cp_B) * (x(4) - 298.15); %KJ/kmol

dxdW(1) = r_DEB; %Eq. diferencial pel Dietilbenzè

dxdW(2) = r_B; %Eq. diferencial pel Benzè

dxdW(3) = r_EB; %Eq. diferencial per l'Etilbenzè

dxdW(4)=(r1a*dH_r1)/(x(1)*Cp_DEB+x(2)*Cp_B+x(3)*Cp_EB); %Eq. diferencial del balanç
d'Energía
    
```

$dx dW = dx dW'$ ;

end

end

#### 11.8.4. Disseny mecànic del reactor

##### 11.8.4.1. Càlcul del volum del reactor

Com en el cas dels alquiladors, amb l'equació de disseny per un reactor catalític RCFP de llit fix, es pot trobar el volum necessari de l'equip. En aquest cas coneixem els valors característics del catalitzador,  $\varepsilon_L = 0.48$  i  $\rho_P \text{ transalquilador} = 585 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  [3] es pot calcular la densitat del llit. Per calcular-la es pot fer a partir dels valors bibliogràfics de porositat i densitat de partícula com en el cas dels alquiladors.

S'obté la següent expressió pel càlcul de la densitat del llit de partícules del transalquilador:

$$\rho_L = \rho_P(1 - \varepsilon_L) \quad \text{Equació 11.19}$$

$$\rho_L = 585(1 - 0.48) \quad \rho_L = 304,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Amb el valor de densitat del llit  $\rho_L = 304,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , i la massa de catalitzador  $W = 10078 \text{ kg}$ , ja es pot trobar el volum necessari del llit.

$$V = \frac{W}{\rho_L} \quad \text{Equació 11.20}$$

$$V = 33,13 \text{ m}^3$$

##### 11.8.4.2. Càlcul de la pressió de disseny

$$P_{\text{DISSENY}} = P_{OP} + \Delta P + (P_{OP} + \Delta P) \cdot 0,15 \text{ [psi]} \quad \text{Equació 11.21}$$

$P_{OP}$ : Pressió d'operació [psi];

La pressió d'operació és  $P_{OP} = 289,5 \text{ psi}$  [3]

$\Delta P$ : Pressió hidrostàtica [psi]

Al tractar-se d'un reactor de llit empaquetat continu, el flux de líquid a través d'aquest és constant, i com en el cas dels alquiladors l'altura de columna de líquid es considera molt baixa. Tot i així s'ha considerat augmentar el factor de seguretat de 0.15 a 0.20, donant lloc a l'Equació 11.22:

$$P_{DISSENY} = P_{OP} + (P_{OP} \cdot 0,20) \text{ [psi]} \quad \text{Equació 11.22}$$

$$P_{DISSENY} = 347,4 \text{ psi}$$

#### 11.7.5.6. Càlcul de la temperatura de disseny

Pel que fa a la temperatura de disseny, es calcula aplicant un factor de seguretat del 15% a la temperatura d'operació màxima del reactor a partir de l'Equació 11.23, obtenint un resultat de  $T_{DISSENY} = 247,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

$$T_{DISSENY} = T_{MAX OPERACIÓ} \cdot (1 + 0,15) \quad \text{Equació 11.23}$$

#### 11.8.4.3. Dimensions del reactor

Per un volum de llit de  $33,13 \text{ m}^3$ , s'ha escollit unes dimensions de llargada  $L = 12 \text{ m}$  i diàmetre  $D = 1,875 \text{ m}$ , de manera que es compleixin les relacions mínimes entre dimensions de l'equip i característiques del catalitzador. Coneixem que les partícules de catalitzador tenen unes dimensions,  $D_p = 5 \text{ mm}$  i que hem de complir les  $H > 1 \text{ m}$  i  $D > 0,05 \text{ m}$ <sup>31</sup>.

A continuació es troben les relacions entre el diàmetre de la partícula de catalitzador i la llargada o diàmetre del reactor.

$$\frac{H}{D_p} > 200 \quad i \quad \frac{D_p}{D} < 0,10$$

$H$ : Longitud del llit

$D$ : Diàmetre del llit

$D_p$ : Diàmetre de partícula de catalitzador

Per aquestes mides de llit, s'obté una relació  $\frac{H}{D_p} = 2400 > 200$  i  $\frac{D_p}{D} = 0,0027 < 0,10$  per la qual cosa es compleixen aquestes relacions.

A continuació es realitza el disseny mecànic rigorós del reactor de transalquilació segons els criteris ASME, considerant la seva construcció en acer inoxidable 316L. Es considera augmentar en un 10% el volum del reactor de manera que quedi un espai entre el llit i el capçal del reactor.

#### **Gruix segons pressió interna del cos del reactor:**

Per al càlcul del gruix del cos del reactor segons la pressió interna, s'utilitza l'Equació 11.24.



$$\tau = \frac{P_D \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_D} \quad \text{Equació 11.24}$$

$\tau$ : Gruix del cos del reactor [inch]

$P_D$ : Presió de disseny [psi]

$R$ : Radi intern [inch]

$S$ : Tensió del material [psi];

Per acer inoxidable 316L que no supera els 427°C ( $S = 12.400$  psi)

$E$ : Valor d'Eficàcia; per l'acer inoxidable 316L ( $E = 0,8$ )

A partir dels valors calculats anteriorment, s'obté un resultat pel gruix del reactor de  $\tau = 33,54$  mm.

### Gruix segons pressió interna dels caps toriesfèrics:

Primer de tot s'ha de comprovar la relació  $L/r$  sigui igual o inferior que  $16^{2/3}$ , on  $L$  fa referència al radi intern, i  $r$  suposa un 10% d'aquest radi de l'equip.

Coneixent  $L = 1,875$  m;  $r = 0,10 \cdot 1,875 = 0,188$  m, s'obté que la relació  $L/r$  és igual a 10, i per tant inferior a  $16^{2/3}$ . Per tant, l'equació necessària pel càlcul del gruix dels caps toriesfèrics segons la pressió interna és la següent.

Per  $L/r = 10$ , a partir de la Figura 11.37, s'obté un valor del factor  $M = 1,54$

$$t = \frac{P_D \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_D} \quad \text{Equació 11.25}$$

$t$ : Gruix dels caps toriesfèrics [mm]

$L$ : Radi intern [inch]

$M$ : Factor tabulat que depèn del factor  $L/r$

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

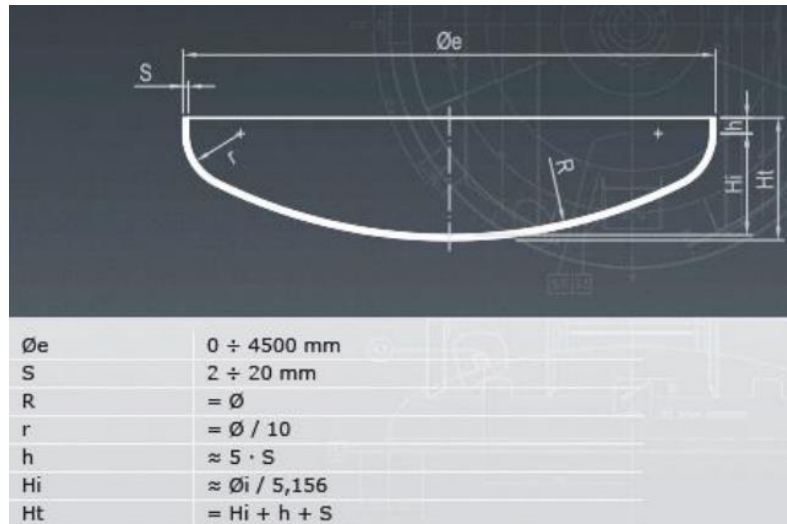
Figura 11.37: Valors del factor  $M$

Per tant, a partir dels anteriors valors, s'obté un gruix dels caps toriesfèrics de  $t = 25,37$  mm.

A l'obtenir un resultat pel gruix dels caps toriesfèrics inferior al gruix del cos del reactor, s'escull el gruix del cos per a la construcció de totes les parts de l'equip.

**Alçades i Dimensionament del cap toriesfèric, segons pressió interna:**

El dimensionament del cap toriesfèric es realitza mitjançant la nomenclatura de la Figura 11.38.



**Figura 11.38: Dimensionament capçal toriesfèric**

Les anteriors variables de disseny corresponen a:

*S: Gruix del capçal toriefèric [inch]; (S=33,54 mm = 1,32 inch)*

*Øe: Radi intern [inch]; (Øe = 0,9375 m = 36,91 inch)*

Per tant, obtenim un resultat de  $h = 6,6 \text{ inch}$  i  $Hi = 7,16 \text{ inch}$ , per tant, finalment obtenim un resultat de l'alçada del cap de  $Ht = 15.08 \text{ inch} = 0,3830 \text{ m}$

**Alçada total del reactor:**

Considerant que el reactor conté un únic llit de 12m de llargada, i que s'ha decidit augmentar un 10% aquesta llargada per tal que la construcció del llit dins l'equip, i possibles problemes amb l'entrada de reactius sigui correcte, la llargada total del cos del reactor seria de **13,2 m**.

Tenint en compte l'alçada dels capçals toriesfèrics, la llargada total de l'equip es calcula com:

$$L_{ALQUILADOR} = 13,2 + (2 \cdot 0,3830) = 13,97 \text{ m}$$

#### 11.8.4.4. Volum i pes del material

##### **Volum de Material:**

Es calcula per cada una de les parts de l'equip, el volum i pes de material que serà necessari per a la construcció del reactor de transalquilació.

##### **Volum dels capçals:**

Primerament, es calcula el volum intern dels capçals:

$$V_{Int. Capçals} = 0,1 \cdot (D_{Int.})^3 = 0,1 \cdot (1,875)^3 = 0,6592 \text{ m}^3$$

En que les variables corresponen a:

$$V_{Int. Capçals}: \text{Volum intern dels capçals [ m ]}$$

$$D_{Int.}: \text{Diàmetre intern del alquilador [ m ]}$$

Seguidament es calcula el volum exterior d'aquests:

$$V_{Ext. Capçals} = 0,1 \cdot (D_{Ext.})^3 = 0,1 \cdot (1,875 + 33,54 \cdot 10^{-3})^3 = 0,6952 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{Ext. Capçals}: \text{Volum extern dels capçals [ m ]}$$

$$D_{Ext.}: \text{Diàmetre extern del transalquilador [ m ]}$$

A partir de la diferència entre el volum intern i extern s'obté el volum necessari de material:

$$V_{Material Capçals} = V_{Ext. Capçals} - V_{Int. Capçals} = 0,6952 - 0,6592 = 0,03599 \text{ m}^3$$

##### **Volum del cos del transalquilador:**

A continuació es realitza el mateix procediment pel cos del reactor. Es calcula el volum intern d'aquest:

$$V_{Int.} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Int.})^2 \cdot H_{TOT.} \quad \text{Equació 11.26}$$

$$V_{Int.} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,875)^2 \cdot 13,97 = 38,57 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{Int.}$ : Volum interior del reactor [ m<sup>3</sup> ]

$D_{Int.}$ : Diàmetre interior del reactor [ m ]

$H_{TOT.}$ : Alçada total del reactor [ m ]

Seguidament es calcula el volum extern del cos de l'equip:

$$V_{Ext.} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Ext.})^2 \cdot H_{TOT.} \quad \text{Equació 11.27}$$

$$V_{Ext.} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,875 + 33,54 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 13,97 = 39,97 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{Ext.}$ : Volum exterior del reactor [ m<sup>3</sup> ]

$D_{Ext.}$ : Diàmetre exterior del reactor [ m ]

$H_{TOT.}$ : Alçada total del reactor [ m ]

Finalment, a partir de la diferència entre el volum interior i exterior del cos de l'equip, s'obté la necessitat de material per a la construcció:

$$V_{Material} = (V_{Ext.} - V_{Int.}) + V_{Material \text{ Capçals}} \quad \text{Equació 11.28}$$

$$V_{Material} = (39,97 - 38,57) + 0,03599 = 1,44 \text{ m}^3$$

### **Pes del reactor:**

Es procedeix a calcular el pes del transalquilador en les situacions següents:

### **Pes del reactor buit:**

En aquest cas es calcula el pes de l'equip buit, aplicant per això un sobredimensionant del 10%, tenint en compte la densitat del material en qüestió:

$$M_{Transalquilador, buit} = (V_{Material} \cdot \rho_{acer \ 316L}) \cdot 1,1$$

$$M_{Transalquilador,buit} = (1,44 \cdot 8000) \cdot 1,1 = 12672 \text{ kg}$$

En que les variables corresponen a:

$$M_{Transalquilador,buit}: \text{Massa del reactor buit [ kg ]}$$

$$\rho_{acer\ 316L}: \text{Densitat de l'acer inoxidable 316L } \left(8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)^{[7]}$$

### **Pes del reactor amb catalitzador:**

En aquest cas es calcula el pes de l'equip buit, aplicant per això un sobredimensionant del 10%, tenint en compte la densitat del material en qüestió:

$$M_{Transalquilador,cat.} = (V_{Material} \cdot \rho_{acer\ 316L}) \cdot 1,1 + M_{Catalitzador} \quad \text{Equació 11.29}$$

$$M_{Transalquilador,cat.} = (1,44 \cdot 8000) \cdot 1,1 + 10750 = 23422 \text{ kg}$$

En què les variables corresponen a:

$$M_{Catalitzador}: \text{Massa del catalitzador [ kg ]}$$

$$M_{Transalquilador,cat.}: \text{Massa del reactor amb el catalitzador [ kg ]}$$

$$\rho_{acer\ 316L}: \text{Densitat de l'acer inoxidable 316L } \left(8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)^{[7]}$$

### **Pes del reactor en proves:**

En aquest cas es calcula el pes total de l'equip si aquest estigués ple d'aigua, tenint en compte el catalitzador. Es realitza el càlcul a partir del volum total de l'equip, el volum de catalitzador i la densitat de l'aigua.

$$M_{Transalquilador,aigua} = M_{Transalquilador,cat.} + (V_{Int.} + 2 \cdot V_{Int. \text{ Capçals}} - V_{Catalitzador}) \cdot \rho_{aigua}$$

**Equació 11.30**

$$V_{Cat.} = \frac{M_{Cat.}}{\rho_L} = 10750 \text{ kg} \cdot \frac{1}{304,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 35,34 \text{ m}^3$$

$$M_{Transalquilador,buit} = 23422 + ((38,57 + 2 \cdot 0,6592 - 35,34) \cdot 1000) = 27970 \text{ kg}$$

En què les variables corresponen a:

$M_{Transalquilador,aigua}$ : Pes del reactor ple d'aigua [ kg ]

$\rho_{aigua}$ : Densitat de l'aigua  $\left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

$\rho_L$ : Densitat del llit  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

**Pes del reactor en operació:**

Per últim, es realitza el càlcul del pes de la columna en condicions d'operació, a partir de la densitat de la mescla d'entrada a l'equip.

$$M_{Transalquilador,op} = M_{Transalquilador,cat.} + ((V_{Int.} + 2 \cdot V_{Int. \text{ Capçals}} - V_{Catalizador}) \cdot \rho_{mescla})$$

**Equació 11.31**

$$M_{Transalquilador,op} = 23422 + ((38,57 + 2 \cdot 0,6592 - 35,34) \cdot 874,8) = 27400 \text{ kg}$$

En què les variables corresponen a:

$M_{Transalquilador,op}$ : Pes del reactor en condicions d'operació [ kg ]

$\rho_{mescla}$ : Densitat del corrent d'entrada  $\left(874,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

**11.8.4.5. Aïllament del reactor**

Degut a les condicions d'operació de l'alquilador, s'ha tingut en compte la necessitat d'aïllar l'equip per mantenir aquestes condicions constants. S'ha escollit la llana de roca com a aïllant

per l'equip, ja que les seves propietats són adients per aquestes condicions. A continuació es calcula el gruix necessari per a aquest aïllant:

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{Ext}}\right)^{\frac{1}{4}}} \quad \text{Equació 11.32}$$

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{(247,3 - 25)}{(1,875 + 2 \cdot 33,54 \cdot 10^{-3}) \cdot 100}\right)^{\frac{1}{4}}} = 8,06 \text{ cm}$$

En què les variables corresponen a:

$t_{aïllant}$ : Gruix de l'aïllant de llana de roca [ cm ]

$\Delta T$ : Diferència de temperatura entre l'interior i l'exterior del reactor [ °C ]

$D_{Ext}$ : Diàmetre extern de l'equip [ cm ]

Pel que fa a els valors típics per gruixos d'aïllants, s'ha escollit 10cm, per tal d'utilitzar un valor unificat i facilitar la construcció de l'equip [9].

Per últim, es calcula el volum de material aïllant que serà necessari per a la construcció de l'equip. Primerament, es calculen les superfícies exteriors del cos del reactor i dels capçals:

$$S_{Ext. Cos} = \pi \cdot D_{Ext. Cos} \cdot H_{TOT} = \pi \cdot (1,875 + 2 \cdot 33,54 \cdot 10^{-3}) \cdot (13,2 + 2 \cdot 0,383) = 85,21 \text{ m}^2$$

$$S_{Ext. Capçals} = 0,931 \cdot D_{Ext. Cos}^2 = 0,931 \cdot (1,875 + 2 \cdot 33,54 \cdot 10^{-3})^2 = 3,51 \text{ m}^2$$

$$S_{Ext. TOT} = S_{Ext. Cos} + 2 \cdot S_{Capçals} = 85,21 + 2 \cdot 3,51 = 92,23 \text{ m}^2$$

A partir del càlcul de les superfícies, es calcula el valor del volum de material:

$$V_{aïllant} = S_{Ext. TOT} \cdot t_{aïllant} \quad \text{Equació 11.33}$$

$$V_{aïllant} = 92,23 \text{ m}^2 \cdot 0,10 \text{ m} = 9,22 \text{ m}^3$$

En que les variables corresponen a:

$V_{aïllant}$ : Volum del material aïllant [ m<sup>3</sup> ]

$S_{Ext. TOT}$ : Secció externa del reactor [ m<sup>2</sup> ]

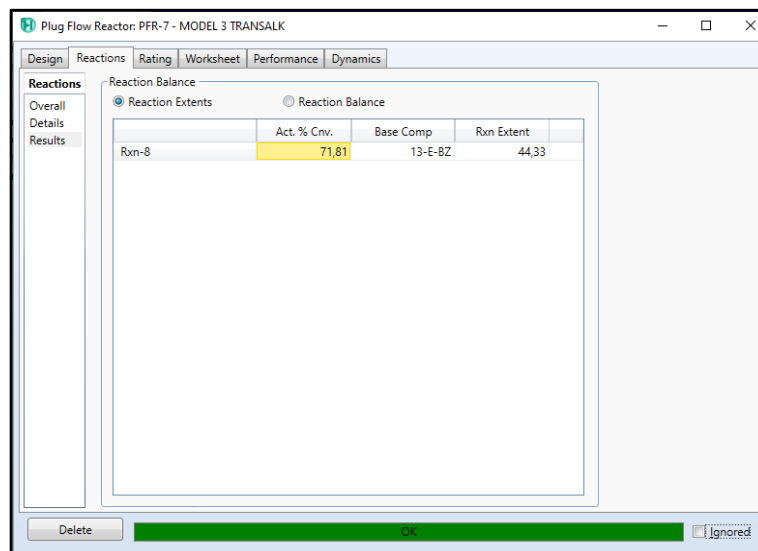
$t_{aïllant}$ : Gruix de l'aïllant [ m ]

### 11.8.5. Disseny amb HYSYS

En el cas del transquilador, com en el cas dels alquiladors s'ha realitzat el disseny amb el simulador de processos HYSYS, a partir de les característiques bàsiques de l'equip calculades anteriorment.

#### 11.8.5.1. Cinètiques i reaccions

S'ha introduït al simulador les dades cinètiques per la reacció de transquilació comentades anteriorment. En la Figura 11.39 s'observen aquests paràmetres.



	Act. % Conv.	Base Comp	Rxn Extent
Rxn-8	71,81	13-E-BZ	44,33

Figura 11.39: Dades cinètiques de la transquilació al HYSYS

#### 11.8.5.2. Característiques del catalitzador

Pel que fa a les característiques del catalitzador també s'ha introduït al programa, en la Figura 11.40 es pot observar el resum de les propietats d'aquest.



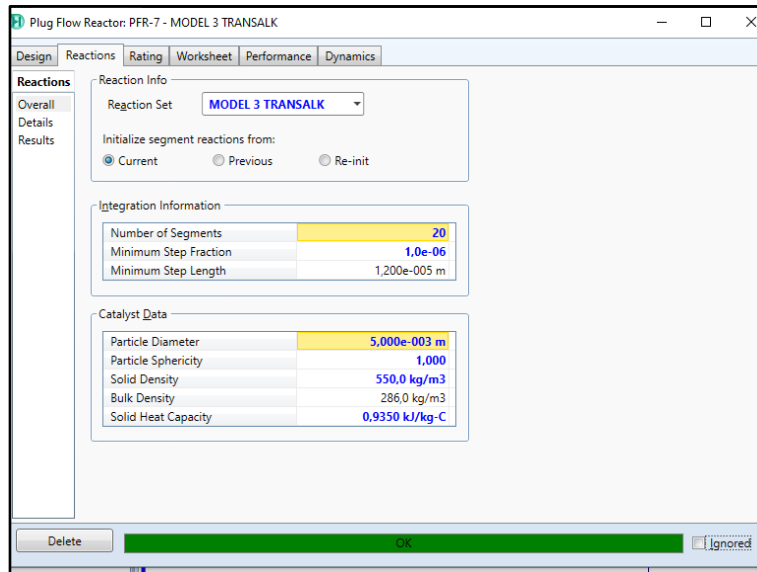


Figura 11.40: Dades del catalitzador al HYSYS

### 11.8.5.3. Característiques de construcció

Pel que fa a les característiques de construcció de l'equip, en la Figura 11.41 s'observa tant les mides de l'equip calculades anteriorment com el nombre de tubs, que en aquest cas és un únic tub igual que en els alquiladors.

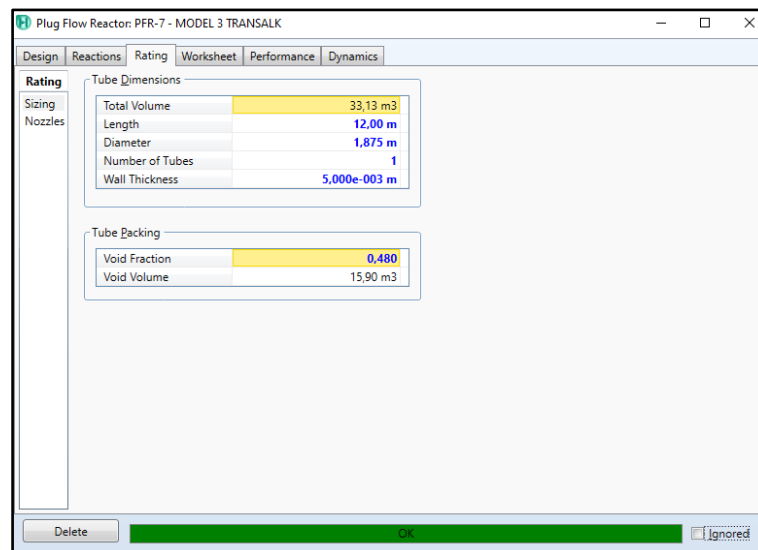


Figura 11.41: Característiques de construcció del reactor de transalquilació al HYSYS

#### 11.8.5.4. Pèrdua de pressió

A partir de les anteriors característiques del llit, el simulador HYSYS ha calculat la pèrdua a través del reactor de transalquilació seguint l'equació d'Ergun. Com a resultat s'obté una pèrdua de pressió  $\Delta P_{OP} = 0,2463 \text{ kPa}$ . En la Figura 11.42 es pot observar el resultat del simulador.

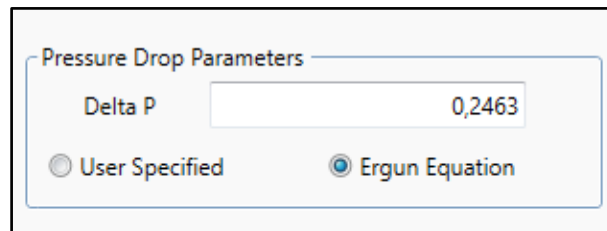
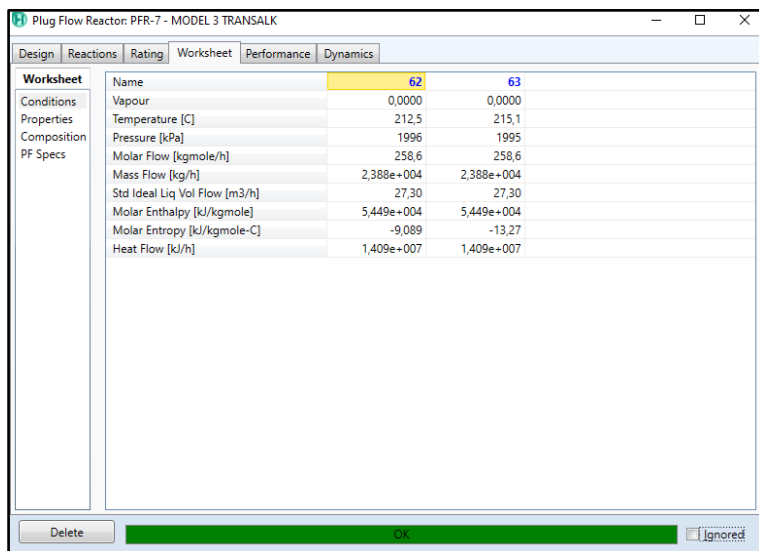


Figura 11.42: Pèrdua de pressió del reactor de transalquilació

#### 11.8.5.5. Corrent de sortida del reactor

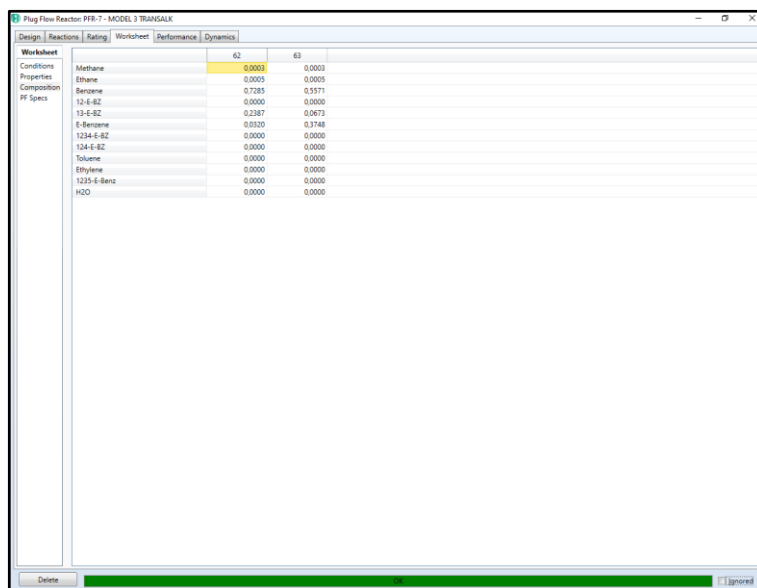
A continuació en la Figura 11.43, s'observa el corrent d'entrada i el de sortida del reactor de transalquilació. L'entrada a l'equip té una temperatura de 212,5°C, i en tractar-se d'una reacció exotèrmica, però de poca intensitat, a la sortida el corrent té una temperatura de 215,1°C, que per tractar-se d'un equip de 14m de llargada es consideraria condicions pràcticament isotèrmiques. Comparant el disseny amb el preliminar amb MatLab veiem que la simulació del perfil de temperatura anterior era bastant més creixent, de manera que finalment s'ha basat el procés en els resultats del simulador HYSYS, ja que conté un paquet termodinàmic que permet realitzar càlculs molt més precisos a diferència dels valors de capacitats calorífiques, entalpies, etc. utilitzats en la simulació en MatLab.



	62	63
Name		
Vapour	0,0000	0,0000
Temperature [C]	212,5	215,1
Pressure [kPa]	1996	1995
Molar Flow [kgmole/h]	258,6	258,6
Mass Flow [kg/h]	2,388e+004	2,388e+004
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	27,30	27,30
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	5,449e+004	5,449e+004
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	-9,089	-13,27
Heat Flow [kJ/h]	1,409e+007	1,409e+007

**Figura 11.43: Corrents d'entrada i sortida del reactor de transalquilació**

Pel que fa a les composicions dels diferents components a la Figura 11.44 s'observa com l'etilbenzè d'entrada al reactor es consumeix pràcticament al complet, i a la vegada s'observa la formació del producte d'interès etilbenzè.



	62	63
Methane	0,0003	0,0003
Ethane	0,0005	0,0005
Benzene	0,7285	0,5571
12-E-82	0,0000	0,0000
12-E-82	0,2287	0,0673
E-Benzene	0,0320	0,3748
1234-E-82	0,0000	0,0000
124-E-82	0,0000	0,0000
Toluene	0,0000	0,0000
Ethylene	0,0000	0,0000
1235-E-Benz	0,0000	0,0000
H2O	0,0000	0,0000

**Figura 11.44: Composicions d'entrada i sortida del reactor de transalquilació**

## **11.9. Disseny columnes de destil·lació del pretractament**

A continuació es troben els dissenys per les diferents torres de destil·lació del projecte Atenea que s'encarreguen del pretractament de les matèries primeres. En el disseny d'aquests equips s'ha utilitzat el simulador de processos HYSYS. Per totes les columnes s'ha realitzat primerament un disseny *short-cut* amb el mateix programa, de manera que a partir de les dades obtingudes s'ha realitzat el disseny rigorós de cada una d'elles. A continuació es presenta el disseny rigorós final amb els corresponents càlculs.

Pel que fa a aquest pretractament, es disposa de dues zones, la de tractament del benzè i toluè, que es realitza mitjançant una sola columna de destil·lació per separar el toluè del corrent de benzè d'interès. Per altra banda es tracta l'etilè, amb part de metà i età, que es separen mitjançant dues columnes de destil·lació consecutives.

### **11.9.1. Columna de tractament del benzè i toluè (D-1401)**

El tractament del benzè abans d'entrar al procés consisteix en l'eliminació pràcticament total del toluè, per tal d'evitar problemes operacionals com formació de productes indesitjats.

A la Taula 11.8 es troba un recull de les principals condicions d'operació de la columna. En la Taula 11.9 les característiques dels diferents corrents, i en la Taula 11.10 les característiques dels plats.

**Taula 11.8: Condicions d'operació de la Columna D-1401**

Temperatura d'entrada [ °C ]	25
Pressió [ kPa ]	101,3
Relació de reflux	0,85
Cabal màssic [ kg/h ]	34218
Nombre d'etapes teòriques	17
Plat d'aliment	11

**Taula 11.9: Característiques dels corrents de la columna D-1401**

	Aliment	Destil·lat	Residu
nº Corrent	2	5	3
Fracció de Vapor	0	0	0
Temperatura [ °C ]	25,00	80,18	103,40
Pressió [ kPa ]	101,3	101,3	101,3
Cabal molar [ kmols/h ]	437,4	433,3	4,103
Cabal màssic [ kg/h ]	3,42E+04	3,39E+04	368,6
Entalpia molar [ KJ/kmol ]	4,99E+04	5,72E+04	3,13E+04
Cabal de calor [ KJ/h ]	2,18E+07	2,48E+07	1,28E+05
<b>Composicions màssiques</b>			
Benzè	0,9915	0,9993	0,1630
Toluè	0,0085	0,0007	0,8370

**Taula 11.10: Característiques, geometria i paràmetres hidràulics dels plats**

Geometria	
Diàmetre [ m ]	2,638
Distància entre plats [ m ]	0,6096
Altura [ m ]	10,36
Àrea transversal [ m <sup>2</sup> ]	5,467
Àrea activa [ m <sup>2</sup> ]	4,374
Característiques dels plats	
Tipus de plat	"Sieve" ( Perforat )
Número del passos del flux	1
Mètode d'inundació	GLITSCH
Número d'orificis	3453
Diàmetre dels orificis [ mm ]	12,7
Altura de l'abocador [ mm ]	50,8
Paràmetres Hidràulics	
Màxima pèrdua de pressió per plat [ kPa ]	2,5
Càrrega màxima de l'abocador [ m <sup>3</sup> /h·m ]	117,4
Càrrega mínima de l'abocador [ m <sup>3</sup> /h·m ]	4,471

### 11.9.1.1. Disseny mecànic de la columna

#### 11.9.1.1.1. Selecció del material

El disseny de la columna de destil·lació del benzè i toluè, s'ha dut a terme amb acer inoxidable 316L, ja que es considera el material òptim per les condicions d'operació i productes a tractar.

El disseny mecànic de l'equip s'ha realitzat segons els criteris ASME.

#### 11.9.1.1.2. Dimensionament de la columna

##### **Càlcul de la pressió de disseny:**

En primer lloc, es calcula la pressió de disseny segons l'Equació 11.34, amb un resultat de  $P_{DISSENY} = 132,77 \text{ kPa}$

$$P_{DISSENY} = P_{OPERACIÓ} + \Delta P + (P_{OPERACIÓ} + \Delta P) \cdot 0,15 \quad \text{Equació 11.34}$$

$\Delta P$ : Pèrdua de pressió a la columna [ kPa ]

El valor de la pèrdua de pressió s'observa a la figura X i és

$P_{OPERACIÓ}$ : Pressió d'operació de la columna [ kPa ]

$$\Delta P = 141,5 \text{ mbars} = 14,15 \text{ kPa}$$

### **Càlcul de la temperatura de disseny:**

Pel que fa a la temperatura de disseny, es calcula aplicant un factor de seguretat del 15% a la temperatura d'operació màxima de la columna a partir de l'Equació 11.35, obtenint un resultat de  $T_{DISSENY} = 118,91 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

$$T_{DISSENY} = T_{MAX OPERACIÓ} \cdot (1 + 0,15) \quad \text{Equació 11.35}$$

### **Càlcul del gruix del cos de la columna:**

A partir de l'Equació 11.36 es calcula el gruix del cos de la columna segons els paràmetres corresponents descrits a continuació. S'obté un resultat del gruix del cos de la torre de  $\tau = 2,00 \text{ mm}$ .

Per tal de facilitar la construcció de l'equip s'ha escollit un valor unificat de gruix de l'acer inoxidable de  $\tau = 2,20 \text{ mm}$ .

$$\tau = \frac{P_{DISSENY} \cdot D}{2 \cdot S \cdot E - 1,2 \cdot P_{DISSENY}} \quad \text{Equació 11.36}$$

$\tau$ : Gruix del cos de la columna [ inch ]

$P_{DISSENY}$ : Pressió de disseny (14,962 psi) [ psi ]

$D$ : Diàmetre intern (103,86 inch) [ inch ]

$S$ : Tensió del material [ psi ] ;

Per acer inoxidable 316L que no supera els 427°C ( $S = 12.400 \text{ psi}$ )

$E$ : Valor d'Eficàcia ; per l'acer inoxidable 316L ( $E = 0,8$ )

**Càlcul del gruix segons pressió interna, dels caps toriesfèrics:**

Primerament, es comprova que la relació L/r sigui igual o inferior que  $16^{2/3}$ , on L fa referència al radi intern, i r suposa un 10% d'aquest radi de l'equip.

Coneixent  $L=2,638/2$  m ;  $r=0,10 \cdot (2,638/2) = 0,1319$  m, s'obté que la relació L/r és igual a 10, i per tant inferior a  $16^{2/3}$ . Per tant, l'equació necessària pel càlcul del gruix dels caps toriesfèrics segons la pressió interna és la següent:

Per  $L/r=10$ , a partir de la Figura 11.45, s'obté un valor del factor  $M=1,54$

$$t = \frac{P_D \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_D} \quad \text{Equació 11.37}$$

*t*: Gruix dels caps toriesfèrics [mm]

*L*: Radi intern [inch]

*M*: Factor tabulat que depèn del factor L/r

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

Figura 11.45: Valors del factor M

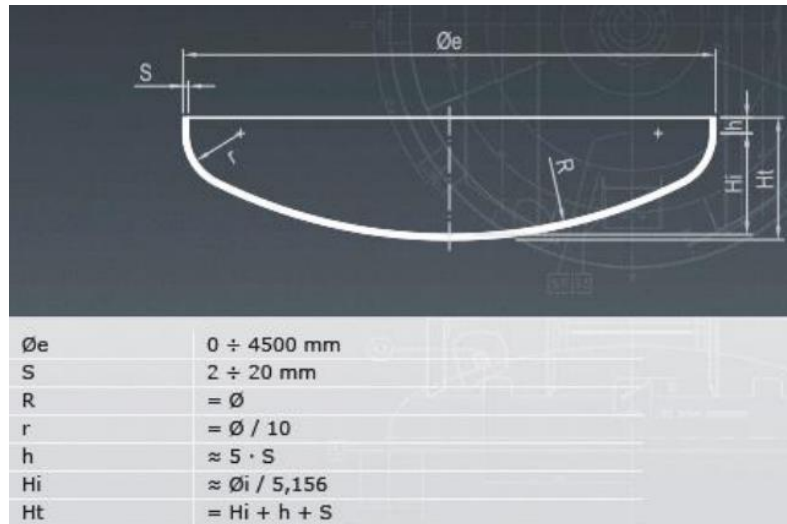
Per tant, a partir dels anteriors valors, s'obté un gruix dels caps toriesfèrics de  $t=1,61$  mm.

A l'obtenir un resultat pel gruix dels caps toriesfèrics inferior al gruix del cos del reactor, s'escull el gruix del cos per a la construcció de totes les parts de l'equip.



**Alçades i Dimensionament del cap toriesfèric, segons pressió interna:**

El dimensionament del cap toriesfèric es realitza mitjançant la nomenclatura de la Figura 11.46.



**Figura 11.46: Dimensionament capçal toriesfèric**

Les anteriors variables corresponen a:

S: Gruix del capçal toriesfèric [inch]; (S=2,00 mm = 0,07864 inch)

Øe: Radi intern inch; (Øe=1,319m=51,93 inch)

Per tant, a partir de la Figura 11.46, obtenim un resultat de h=0,3932 inch i Hi=10,07 inch, per tant, finalment obtenim un resultat de l'alçada del cap de Ht=10,54 inch=0,2677 m.

**Càlcul de l'alçada total de la columna:**

Tenint en compte l'alçada del cos de la columna, que és de 10,36m segons el disseny del simulador HYSYS, que té en compte els plats teòrics i la separació entre aquests, i l'alçada dels capçals toriesfèrics, la llargada total de l'equip es calcula com:

$$L_{COLUMNA\ BENZÈ} = 10,36 + (0,2677 \cdot 2) = 10,90m$$

### 11.9.1.1.3. Volum i pes del material

#### ***Volum de Material:***

Es calcula per cada una de les parts de l'equip, el volum i pes de material que serà necessari per a la construcció de la columna.

#### ***Volum dels capçals:***

Primerament es calcula el volum intern dels capçals:

$$V_{Int. Capçals} = 0,1 \cdot (D_{Int. D-1401})^3 = 0,1 \cdot (2,638)^3 = 1,83579 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{Int. Capçals}: \text{Volum intern dels capçals [ m ]}$$

$$D_{Int. D-1401}: \text{Diàmetre intern de la columna [ m ]}$$

Seguidament es calcula el volum exterior d'aquests:

$$V_{Ext. Capçals} = 0,1 \cdot (D_{Ext. D-1401})^3 = 0,1 \cdot (2,638 + 2 \cdot 2,20 \cdot 10^{-3})^3 = 1,8404 \text{ m}^3$$

En que les variables corresponen a:

$$V_{Ext. Capçals}: \text{Volum extern dels capçals [ m ]}$$

$$D_{Ext. D-1401}: \text{Diàmetre extern de la columna [ m ]}$$

A partir de la diferència entre el volum intern i extern s'obté el volum necessari de material:

$$V_{Material Capçals} = V_{Ext. Capçals} - V_{Int. Capçals} = 1,8404 - 1,83579 = 0,004603 \text{ m}^3$$

#### ***Volum de la Columna:***

A continuació es realitza el mateix procediment pel cos de la columna. Es calcula el volum intern d'aquesta:

$$V_{Int. D-1401} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Int. D-1401})^2 \cdot H_{TOT. D-1401} \quad \text{Equació 11.38}$$

$$V_{Int. D-1401} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,638)^2 \cdot 10,36 = 56,62 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{Int. D-1401}$ : Volum interior de la columna [ m<sup>3</sup> ]

$D_{Int. D-1401}$ : Diàmetre interior de la columna [ m ]

$H_{TOT. D-1401}$ : Alçada total de la columna [ m ]

Seguidament, es calcula el volum extern del cos de l'equip:

$$V_{Ext. D-1401} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Ext. D-1401})^2 \cdot H_{TOT. D-1401} \quad \text{Equació 11.39}$$

$$V_{Ext. D-1401} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,638 + 2 \cdot 2,20 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10,36 = 56,8129 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{Ext. D-1401}$ : Volum exterior de la columna [ m<sup>3</sup> ]

$D_{Ext. D-1401}$ : Diàmetre exterior de la columna [ m ]

$H_{TOT. D-1401}$ : Alçada total de la columna [ m ]

Finalment, a partir de la diferència entre el volum interior i exterior del cos de la columna, s'obté la necessitat de material per a la construcció:

$$V_{Material Columna D-1401} = (V_{Ext. D-1401} - V_{Int. D-1401}) + V_{Material Capçals} \quad \text{Equació 11.40}$$

$$V_{Material Columna D-1401} = (56,8129 - 56,6238) = 0,1891 \text{ m}^3$$

### **Pes de la columna:**

Es procedeix a calcular el pes de la columna en les situacions següents:

### **Pes columna Buida:**

En aquest cas es calcula el pes de la columna buida, aplicant per això un sobredimensionant del 10%, tenint en compte la densitat del material en qüestió:

$$M_{D-1401,buida} = (V_{Material\ Columna\ D-1401} \cdot \rho_{acer\ 316L}) \cdot 1,1 \quad \text{Equació 11.41}$$

$$M_{D-1401,buida} = (0,1891 \cdot 8000) \cdot 1,1 = 1663,85 \text{ kg}$$

En què les variables corresponen a:

$M_{D-1401,buida}$ : Massa de la columna buida [ kg ]

$\rho_{acer\ 316L}$ : Densitat de l'acer inoxidable 316L  $\left(8000 \frac{kg}{m^3}\right)$

### **Pes de la columna en proves:**

En aquest cas es calcula el pes total de la columna si aquesta estigués plena d'aigua. Es realitza el càlcul a partir del volum total de la columna i la densitat de l'aigua.

$$M_{D-1401,aigua} = M_{D-1401,buida} + ((V_{Int.\ D-1401} + 2 \cdot V_{Int.\ Capçals-1401}) \cdot \rho_{aigua}) \quad \text{Equació 11.42}$$

$$M_{D-1401,aigua} = 1663,85 + ((56,62 + 2 \cdot 1,8357) \cdot 1000) = 61955 \text{ kg}$$

En què les variables corresponen a:

$M_{D-1401,aigua}$ : Pes de la columna plena d'aigua [ kg ]

$\rho_{aigua}$ : Densitat de l'aigua  $\left(1000 \frac{kg}{m^3}\right)$

### **Pes de la columna en operació:**

Per últim, es realitza el càlcul del pes de la columna en condicions d'operació, a partir de la densitat de la mescla d'entrada a l'equip.

$$M_{D-1401,op} = M_{D-1401,buida} + ((V_{Int.\ D-1401} + 2 \cdot V_{Int.\ Capçals-1401}) \cdot \rho_{mescla}) \quad \text{Equació 11.43}$$

$$M_{D-1401,buida} = 1663,85 + ((56,62 + 2 \cdot 1,8357) \cdot 876) = 54479 \text{ kg}$$

En què les variables corresponen a:

$M_{D-1401,op}$ : Pes de la columna en condicions d'operació [ kg ]

$\rho_{mescla}$ : Densitat del corrent d'entrada  $\left(876 \frac{kg}{m^3}\right)$

#### 11.9.1.1.4. Aïllament de la columna

Degut a les condicions d'operació de la columna, s'ha tingut en compte la necessitat d'aïllar l'equip per mantenir aquestes condicions constants. S'ha escollit la llana de roca com a aïllant per l'equip, ja que les seves propietats són adients per a aquestes condicions.

A continuació es calcula el gruix necessari per aquest aïllant:

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{Ext, D-1401}}\right)^{\frac{1}{4}}} \quad \text{Equació 11.44}$$

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{(103,40 - 25)}{(2,638 + 2 \cdot 2,20 \cdot 10^{-3}) \cdot 100}\right)^{\frac{1}{4}}} = 11,29 \text{ cm}$$

En què les variables corresponen a:

$t_{aïllant}$ : Gruix de l'aïllant de llana de roca [ cm ]

$\Delta T$ : Diferència de temperatura entre l'interior i l'exterior de la columna [ °C ]

$D_{Ext, D-1401}$ : Diàmetre extern de la columna [ cm ]

Pel què fa a els valors típics per gruixos d'aïllants, s'ha escollit 12cm, per tal d'utilitzar un valor unificat i facilitar la construcció de l'equip <sup>[9]</sup>.

Per últim, es calcula el volum de material aïllant que serà necessari per a la construcció de l'equip. Primerament es calculen les superfícies exteriors del cos de la columna i dels capçals:

$$S_{Ext. C} = \pi \cdot D_{Ext. C} \cdot H_{TOT. D-1401} = \pi \cdot (2,638 + 2 \cdot 2,20 \cdot 10^{-3}) \cdot 10,36 = 85,93 \text{ m}^2$$

$$S_{Ext. Capçals} = 0,931 \cdot D_{Ext. C}^2 = 0,931 \cdot (2,638 + 2 \cdot 2,20 \cdot 10^{-3})^2 = 6,49 \text{ m}^2$$

$$S_{Ext. TOT} = S_{Ext. C} + 2 \cdot S_{Capçals} = 85,93 + 2 \cdot 6,49 = 98,91 \text{ m}^2$$

A partir del càlcul de les superfícies, es calcula el valor del volum de material:

$$V_{\text{aïllant}} = S_{\text{Ext. TOT}} \cdot t_{\text{aïllant}} \quad \text{Equació 11.45}$$

$$V_{\text{aïllant}} = 98,91 \text{ m}^2 \cdot 0,12 \text{ m} = 11,87 \text{ m}^3$$

En que les variables corresponen a:

$V_{\text{aïllant}}$ : Volum del material aïllant [ m<sup>3</sup> ]

$S_{\text{Ext. TOT}}$ : Secció externa del cos de la columna [ m<sup>2</sup> ]

$t_{\text{aïllant}}$ : Gruix de l'aïllant [ m ]

### 11.9.2. Columna de tractament de l'etilè diluït (D-1402)

El tractament de l'etilè abans d'entrar al procés consisteix en l'eliminació pràcticament total del metà i età, per tal d'evitar problemes operacionals o un sobredimensionament innecessària dels equips.

A la Taula 11.11 es troba un recull de les principals condicions d'operació de la columna. En la Taula 11.12 les característiques dels diferents corrents, i en la Taula 11.13 les característiques dels plats.

*Taula 11.11: Condicions d'operació de la columna D-1402*

Temperatura d'entrada [ °C ]	-55,46
Pressió [ kPa ]	1000
Relació de reflux	4,25
Cabal màssic [ kg/h ]	24155,93
Número d'etapes teòriques	15
Plat d'aliment	8

Taula 11.12: Característiques dels corrents de la columna D-1402

	Aliment	Destil·lat	Residu
<b>nº Corrent</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>49</b>
Fracció de Vapor	0,6399	0	0
Temperatura [ °C ]	-55,46	-122,5	-47,26
Pressió [ kPa ]	1000	1000	1000
Cabal molar [ kmols/h ]	920	194	726
Cabal màssic [ kg/h ]	24160	3276	20880
Entalpia molar [ KJ/kmol ]	-2,25E+04	-7,88E+04	-1,57E+04
Cabal de calor [ KJ/h ]	-2,07E+07	-1,53E+07	1,14E+07
<b>Composicions màssiques</b>			
Metà	0,2000	0,9299	0,0050
Età	0,3000	0,0006	0,3800
Etilè	0,5000	0,0695	0,6150

Taula 11.13: Característiques dels plats de la columna D-1402

<b>Geometria</b>	
Diàmetre [ m ]	1,5
Distància entre plats [ m ]	0,7
Altura [ m ]	10,5
Àrea transversal [ m <sup>2</sup> ]	1,767
Àrea activa [ m <sup>2</sup> ]	1,414
<b>Característiques dels plats</b>	
Tipus de plat	"Bubble Cap"
Número del passos del flux	1
Mètode d'inundació	GLITSCH
Número de cascs	71
Diàmetre dels cascs [ mm ]	76,2
Altura de l'abocador [ mm ]	58,33
<b>Paràmetres Hidràulics</b>	
Màxima pèrdua de pressió per plat [ kPa ]	2,5
Càrrega màxima de l'abocador [ m <sup>3</sup> /h·m ]	134,1
Càrrega mínima de l'abocador [ m <sup>3</sup> /h·m ]	4,471

### 11.9.2.1. Disseny mecànic de la columna

#### 11.9.2.1.1. Selecció del material

La selecció del material de construcció depèn sobretot de les propietats dels compostos i les condicions d'operació. En el cas de la columna de destil·lació de metà, s'opera a temperatures molt baixes, en les que materials com l'acer inoxidable 316L convencional pot presentar fragilitats i possibles problemes en l'operació de l'equip degut a canvis en les seves propietats <sup>[10]</sup>.

A aquestes temperatures, que es consideren criogèniques, se sol treballar amb materials com l'acer inoxidable austenític (304, 304L, 316, 312), mescles d'alumini (6061, 6063, 1100), coure, o llautó. A partir de consultes bibliogràfiques s'ha escollit l'acer inoxidable austenític (SS) com a material de construcció <sup>[11,12]</sup>.

Tenint en compte les condicions d'operació, dels diferents acers austenítics, s'ha escollit el 304 (AISI 304). A la Taula 11.14 es troba un recull de l'esforç màxim admissible per diferents tipus d'acer.

**Taula 11.14: Esforç màxim admissible de certs materials**

Tipo acero	Temperatura (°C)			
	-40	-62	-196	-252
Esfuerzo máximo admisible ·10 <sup>5</sup> (psi)				
304	1,55	1,7	2,21	2,43
310	0,95	1	1,52	1,76
316	1,04	1,18	1,85	2,1
347	1,17	1,3	2	2,28

El disseny mecànic de l'equip s'ha realitzat segons els criteris ASME.

#### 11.9.2.1.2. Dimensionament de la columna

##### **Càlcul de la pressió de disseny:**

En primer lloc, es calcula la pressió de disseny segons l'Equació 11.46, amb un resultat de  $P_{DISSENY} = 1159,25 \text{ kPa}$

$$P_{DISSENY} = P_{OPERACIÓ} + \Delta P + (P_{OPERACIÓ} + \Delta P) \cdot 0,15 \quad \text{Equació 11.46}$$

$$P_{OPERACIÓ}: \text{Pressió d'operació de la columna (1000 kPa) [ kPa ]}$$

$$\Delta P: \text{Pèrdua de pressió a la columna [ kPa ]}$$

El valor de la pèrdua de pressió és:



$$\Delta P = 80,46 \text{ mbars} = 8,046 \text{ kPa}$$

### ***Càlcul de la temperatura de disseny:***

Pel que fa a la temperatura de disseny, es calcula aplicant un factor de seguretat del 15% a la temperatura d'operació màxima de la columna, que en aquest cas correspondrà a la temperatura és baixa, ja que es treballa a temperatures criogèniques. A partir de l'Equació 11.47, s'obté un resultat de  $T_{DISSENY} = -140,88 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

$$T_{DISSENY} = T_{MAX OPERACIÓ} \cdot (1 + 0,15) \quad \text{Equació 11.47}$$

### ***Càlcul del gruix del cos de la columna:***

A partir de l'Equació 11.48 es calcula el gruix del cos de la columna segons els paràmetres corresponents descrits a continuació. S'obté un resultat del gruix del cos de la torre de  $\tau = 6,19 \text{ mm}$ .

Per tal de facilitar la construcció de l'equip s'ha escollit un valor unificat de gruix de l'acer inoxidable de  $\tau = 8 \text{ mm}$ .

$$\tau = \frac{P_{DISSENY} \cdot D}{2 \cdot S \cdot E - 1,2 \cdot P_{DISSENY}} \quad \text{Equació 11.48}$$

$\tau$ : Gruix del cos de la columna [inch]

$P_{DISSENY}$ : Pressió de disseny (145,04 psi) [psi]

$D$ : Diàmetre intern (59,06 inch) [inch]

$S$ : Tensió del material [psi] ;

Per acer inoxidable 304 ( $S = 2,21 \cdot 10^5 \text{ psi}$ )

$E$ : Valor d'Eficàcia ; per l'acer inoxidable 304L ( $E = 0,8$ )

### ***Càlcul del gruix segons pressió interna, dels caps toriesfèrics:***

Primerament, es comprova que la relació  $L/r$  sigui igual o inferior que  $16^{2/3}$ , on  $L$  fa referència al radi intern, i  $r$  suposa un 10% d'aquest radi de l'equip.

Coneixent  $L=1,5/2$  m ;  $r=0,10 \cdot (1,5/2) = 0,075$  m , s'obté que la relació  $L/r$  és igual a 10, i per tant inferior a  $16^{2/3}$ . Per tant, l'equació necessària pel càlcul del gruix dels caps toriesfèrics segons la pressió interna és la següent:

Per  $L/r=10$ , a partir de la Figura 11.47, s'obté un valor del factor  $M=1,54$

$$t = \frac{P_D \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P_D} \quad \text{Equació 11.49}$$

$t$ : Gruix dels caps toriesfèrics [mm]

$L$ : Radi intern [inch]

$M$ : Factor tabulat que depèn del factor  $L/r$

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

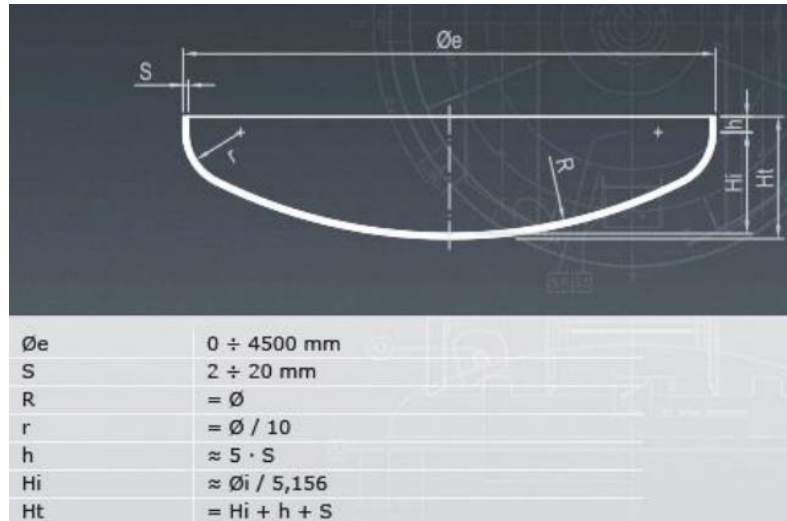
Figura 11.47: Valors del factor M

Per tant, a partir dels anteriors valors, s'obté un gruix dels caps toriesfèrics de  $t=4,74$  mm.

A l'obtenir un resultat pel gruix dels caps toriesfèrics inferior al gruix del cos del reactor, s'escull el gruix del cos per a la construcció de totes les parts de l'equip.

### **Alçades i Dimensionament del cap toriesfèric, segons pressió interna:**

El dimensionament del cap toriesfèric es realitza mitjançant la nomenclatura de la Figura 11.48.



**Figura 11.48: Dimensionament capçal toriesfèric**

Les anteriors variables corresponen a:

S: Gruix del capçal toriesfèric [inch]; (S=6,19 mm = 0,2437 inch)

Øe: Radi intern inch; (Øe=0,75m=29,53 inch)

Per tant, a partir de la Figura 11.48, obtenim un resultat de h=1,22 inch i Hi=5,73 inch, per tant, finalment obtenim un resultat de l'alçada del cap de Ht=7,19 inch=0,1826 m

#### **Càlcul de l'alçada total de la columna:**

Tenint en compte l'alçada del cos de la columna, que és de 10,50m segons el disseny del simulador HYSYS, i l'alçada dels capçals toriesfèrics, la llargada total de l'equip es calcula com:

$$L_{COLUMNA METÀ} = 10,50 + (0,1826 \cdot 2) = 10,87m$$

#### **11.9.2.1.3. Volum i pes del material**

##### **Volum de Material:**

Es calcula per cada una de les parts de l'equip, el volum i pes de material que serà necessari per a la construcció de la columna.

##### **Volum dels capçals:**

Primerament, es calcula el volum intern dels capçals:

$$V_{Int. capçals} = 0,1 \cdot (D_{Int. D-1402})^3 = 0,1 \cdot (1,5)^3 = 0,3375 m^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{Int. Capçals}: \text{Volum intern dels capçals [ m ]}$$

$$D_{Int. D-1402}: \text{Diàmetre intern de la columna [ m ]}$$

Seguidament es calcula el volum exterior d'aquests:

$$V_{Ext. Capçals} = 0,1 \cdot (D_{Ext. D-1402})^3 = 0,1 \cdot (1,5 + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-3})^3 = 0,3429 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{Ext. Capçals}: \text{Volum extern dels capçals [ m ]}$$

$$D_{Ext. D-1402}: \text{Diàmetre extern de la columna [ m ]}$$

A partir de la diferència entre el volum intern i extern s'obté el volum necessari de material:

$$V_{Material Capçals} = V_{Ext. Capçals} - V_{Int. Capçals} = 0,3429 - 0,3375 = 0,005429 \text{ m}^3$$

### **Volum de la Columna:**

A continuació es realitza el mateix procediment pel cos de la columna. Es calcula el volum intern d'aquesta:

$$V_{Int. D-1402} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Int. D-1402})^2 \cdot H_{TOT. D-1402} \quad \text{Equació 11.50}$$

$$V_{Int. D-1402} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,5)^2 \cdot 10,50 = 18,56 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{Int. D-1402}: \text{Volum interior de la columna [ m}^3 \text{ ]}$$

$$D_{Int. D-1402}: \text{Diàmetre interior de la columna [ m ]}$$

$$H_{TOT. D-1402}: \text{Alçada total de la columna [ m ]}$$

Seguidament, es calcula el volum extern del cos de l'equip:

$$V_{Ext. D-1402} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Ext. D-1402})^2 \cdot H_{TOT. D-1402} \quad \text{Equació 11.51}$$

$$V_{Ext. D-1402} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,5 + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10,5 = 18,95 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{Ext. D-1402}$ : Volum exterior de la columna [ m<sup>3</sup> ]

$D_{Ext. D-1402}$ : Diàmetre exterior de la columna [ m ]

$H_{TOT. D-1402}$ : Alçada total de la columna [ m ]

Finalment, a partir de la diferència entre el volum interior i exterior del cos de la columna, s'obté la necessitat de material per a la construcció:

$$V_{Material Columna D-1402} = (V_{Ext. D-1402} - V_{Int. D-1402}) + V_{Material Capçals} \quad \text{Equació 11.52}$$

$$V_{Material Columna D-1402} = (18,950 - 18,560) = 0,39 \text{ m}^3$$

#### **Pes de la columna:**

Es procedeix a calcular el pes de la columna en les situacions següents:

#### **Pes columna Buida:**

En aquest cas es calcula el pes de la columna buida, aplicant per això un sobredimensionant del 10%, tenint en compte la densitat del material en qüestió:

$$M_{D-1402,buida} = (V_{Material Columna D-1402} \cdot \rho_{acer 304L}) \cdot 1,1$$

**Equació 11.53**

$$M_{D-1402,buida} = (0,39 \cdot 8000) \cdot 1,1 = 3432 \text{ kg}$$

En què les variables corresponen a:

$M_{D-1402,buida}$ : Massa de la columna buida [ kg ]

$\rho_{acer 304L}$ : Densitat de l'acer inoxidable 304L  $\left(8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

### ***Pes de la columna en proves:***

En aquest cas es calcula el pes total de la columna si aquesta estigués plena d'aigua. Es realitza el càlcul a partir del volum total de la columna i la densitat de l'aigua.

$$M_{D-1402,aigua} = M_{D-1402,buida} + ((V_{Int. D-1402} + 2 \cdot V_{Int. Capçals-1402}) \cdot \rho_{aigua}) \quad \text{Equació 11.54}$$

$$M_{D-1402,buida} = 3432 + ((18,56 + 2 \cdot 0,3375) \cdot 1000) = 22667 \text{ kg}$$

En què les variables corresponen a:

$M_{D-1402,aigua}$ : Pes de la columna plena d'aigua [ kg ]

$\rho_{aigua}$ : Densitat de l'aigua  $\left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

### ***Pes de la columna en operació:***

Per últim, es realitza el càlcul del pes de la columna en condicions d'operació, a partir de la densitat de la mescla d'entrada a l'equip.

$$M_{D-1402,op} = M_{D-1402,buida} + ((V_{Int. D-1402} + 2 \cdot V_{Int. Capçals-1402}) \cdot \rho_{mescla})$$

**Equació 11.55**

$$M_{D-1402,buida} = 3432 + ((18,56 + 2 \cdot 0,3375) \cdot 361,22) = 10380,1 \text{ kg}$$

En què les variables corresponen a:

$M_{D-1402,op}$ : Pes de la columna en condicions d'operació [ kg ]

$\rho_{mescla}$ : Densitat del corrent d'entrada  $\left(361,22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

*La densitat del corrent correspon a la proporcionada pel simulador "HYSYS"*

#### **11.9.2.1.4. Aïllament de la columna**

Degut a les condicions d'operació de la columna, s'ha tingut en compte la necessitat d'aïllar l'equip per mantenir aquestes condicions constants. S'ha escollit la llana de roca com a aïllant per l'equip, ja que les seves propietats són adients per a aquestes condicions.

A continuació es calcula el gruix necessari per aquest aïllant:

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D_{Ext, D-1401}}\right)^{\frac{1}{4}}} \quad \text{Equació 11.56}$$

$$t_{\text{aïllant}} = \frac{30}{3,6 \cdot \left( \frac{\text{abs}(-122,50 - 25)}{(1,5 + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-3}) \cdot 100} \right)^{\frac{1}{4}}} = 8,39 \text{ cm}$$

En què les variables corresponen a:

$t_{\text{aïllant}}$ : Gruix de l'aïllant de llana de roca [ cm ]

$\Delta T$ : Diferència de temperatura entre l'interior i l'exterior de la columna [ °C ]

$D_{\text{Ext}, D-1402}$ : Diàmetre extern de la columna [ cm ]

Pel que fa als valors típics per gruixos d'aïllants, s'ha escollit 10cm, per tal d'utilitzar un valor unificat i facilitar la construcció de l'equip <sup>[9]</sup>.

Per últim, es calcula el volum de material aïllant que serà necessari per a la construcció de l'equip. Primerament es calculen les superfícies exteriors del cos de la columna i dels capçals:

$$S_{\text{Ext. C}} = \pi \cdot D_{\text{Ext. C}} \cdot H_{\text{TOT. D-1402}} = \pi \cdot (1,5 + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-3}) \cdot 10,50 = 50,01 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{Ext. Capçals}} = 0,931 \cdot D_{\text{Ext. C}}^2 = 0,931 \cdot (1,5 + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-3})^2 = 2,14 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{Ext. TOT}} = S_{\text{Ext. C}} + 2 \cdot S_{\text{Capçals}} = 50,01 + 2 \cdot 2,14 = 54,29 \text{ m}^2$$

A partir del càlcul de les superfícies, es calcula el valor del volum de material:

$$\begin{aligned} V_{\text{aïllant}} &= S_{\text{Ext. TOT}} \cdot t_{\text{aïllant}} && \text{Equació 11.57} \\ V_{\text{aïllant}} &= 54,29 \text{ m}^2 \cdot 0,10 \text{ m} = 5,43 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

En què les variables corresponen a:

$V_{\text{aïllant}}$ : Volum del material aïllant [ m<sup>3</sup> ]

$S_{\text{Ext. TOT}}$ : Secció externa del cos de la columna [ m<sup>2</sup> ]

$t_{\text{aïllant}}$ : Gruix de l'aïllant [ m ]

### 11.9.3. Columna de tractament de l'etilè diluït (D-1403)

El tractament de l'etilè abans d'entrar al procés consisteix en l'eliminació pràcticament total de l'età, per tal d'evitar problemes operacionals o un sobredimensionament innecessari dels equips.

A la Taula 11.15 es troba un recull de les principals condicions d'operació de la columna. En la Taula 11.16 les característiques dels diferents corrents, i en la Taula 11.17 les característiques dels plats.

Taula 11.15: Condicions d'operació de la columna D-1403

Temperatura d'entrada [ °C ]	-47,26
Pressió [ kPa ]	1000
Relació de reflux	3,53
Cabal màssic [ kg/h ]	20879,84
Nombre d'etapes teòriques	46
Plat d'aliment	23

Taula 11.16: Característiques dels corrents de la columna D-1403

	Aliment	Destil·lat	Residu
nº Corrent	49	52	50
Fracció de Vapor	0	0	0
Temperatura [ °C ]	-47,26	-53,49	-32,26
Pressió [ kPa ]	1000	1000	1000
Cabal molar [ kmols/h ]	726	450	276
Cabal màssic [ kg/h ]	20800	12580	8297
Entalpia molar [ KJ/kmol ]	-1,57E+04	3,60E+04	-9,98E+04
Cabal de calor [ KJ/h ]	-1,14E+07	1,62E+07	-2,75E+00
<b>Composicions màssiques</b>			
Metà	0,0050	0,008	0,0000
Età	0,3800	0,0025	0,9956
Etilè	0,6150	0,9895	0,0044



Taula 11.17: Característiques dels plats de la columna D-1403

	Secció 1	Secció 2
<b>Geometria</b>		
<b>Diàmetre [ m ]</b>	1,787	1,876
<b>Distància entre plats [ m ]</b>	0,6096	0,75
<b>Altura [ m ]</b>	13,41	18
<b>Àrea transversal [ m<sup>2</sup> ]</b>	2,508	2,625
<b>Àrea activa [ m<sup>2</sup> ]</b>	2,007	2,1523
<b>Característiques dels plats</b>		
<b>Tipus de plat</b>	"Sieve" ( Perforat )	"Sieve" ( Perforat )
<b>Número del passos del flux</b>	1	1
<b>Mètode d'inundació</b>	GLITSCH	GLITSCH
<b>Número de forats</b>	1584	2053
<b>Diàmetre dels forats [ mm ]</b>	12,7	12,7
<b>Altura de l'abocador [ mm ]</b>	50,8	50,8
<b>Paràmetres Hidràulics</b>		
<b>Màxima pèrdua de pressió per plat [ kPa ]</b>	2,5	2,5
<b>Càrrega màxima de l'abocador [ m<sup>3</sup>/h·m ]</b>	117,4	117,4
<b>Càrrega mínima de l'abocador [ m<sup>3</sup>/h·m ]</b>	4,471	4,471

### 11.9.3.1. Disseny mecànic de la columna

#### 11.9.3.1.1. Selecció del material

En aquest cas, la destil·lació de l'età comporta treballar a temperatures molt baixes, en menor mesura que en el cas anterior de destil·lació del metà, però tot i així pel que fa a la selecció del material de construcció s'ha escollit el mateix, ja que es coneix que per aquestes temperatures és més resistent que l'acer inoxidable convencional. El material amb el qual es realitzarà la construcció de l'equip és l'acer 304 (AISI 304). A la Taula 11.18 es troba un recull de l'esforç màxim admissible per diferents tipus d'acer.

Taula 11.18: Esforç màxim admissible per diferents materials

Tipo acero	Temperatura (°C)			
	-40	-62	-196	-252
<b>Esfuerzo máximo admissible ·10<sup>5</sup> (psi)</b>				
<b>304</b>	1,55	1,7	2,21	2,43
<b>310</b>	0,95	1	1,52	1,76
<b>316</b>	1,04	1,18	1,85	2,1
<b>347</b>	1,17	1,3	2	2,28

El disseny mecànic de l'equip s'ha realitzat segons els criteris ASME.

### 11.9.3.1.2. Dimensionament de la columna

#### **Càlcul de la pressió de disseny:**

En primer lloc, es calcula la pressió de disseny segons l'Equació 11.58, amb un resultat de  $P_{DISSENY} = 1165,53 \text{ kPa}$

$$P_{DISSENY} = P_{OPERACIÓ} + \Delta P + (P_{OPERACIÓ} + \Delta P) \cdot 0,15 \quad \text{Equació 11.58}$$

$P_{OPERACIÓ}$ : Pressió d'operació de la columna (1000 kPa) [ kPa ]

$\Delta P$ : Pèrdua de pressió a la columna [ kPa ]

El valor de la pèrdua de pressió és:

$$\Delta P = 135 \text{ mbars} = 13,5 \text{ kPa}$$

Pel que fa a la temperatura de disseny, es calcula aplicant un factor de seguretat del 15% a la temperatura d'operació màxima de la columna, que en aquest cas correspondrà a la temperatura és baixa, ja que es treballa a temperatures criogèniques. A partir de l'Equació 11.59, s'obté un resultat de  $T_{DISSENY} = -61,51 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

$$T_{DISSENY} = T_{MAX OPERACIÓ} \cdot (1 + 0,15) \quad \text{Equació 11.59}$$

#### **Càlcul del gruix del cos de la columna:**

En aquest cas, la columna disposa de dues seccions. Es realitzarà el disseny per cada una d'elles per separat i s'escollirà el gruix major entre els resultats obtinguts.

A partir de l'Equació 11.60 es calcula el gruix del cos de la columna segons els paràmetres corresponents descrits a continuació.

$$\tau = \frac{P_{DISSENY} \cdot D}{2 \cdot S \cdot E - 1,2 \cdot P_{DISSENY}} \quad \text{Equació 11.60}$$

$\tau$ : Gruix del cos de la columna [ inch ]

$P_{DISSENY}$ : Pressió de disseny (169,05 psi) [ psi ]

$D$ : Diàmetre intern (Secció 1: 70,35 inch; Secció 2: 73,86 inch) [ inch ]

$S$ : Tensió del material [psi] ;

Per acer inoxidable 304 ( $S = 1,7 \cdot 10^5$  psi) segons la Figura 11.18

$E$ : Valor d'Eficàcia ; per l'acer inoxidable 304L ( $E = 0,8$ )

S'obté un resultat del gruix del cos de la torre de  $\tau_{SECCIÓ 1} = 8,94$  mm i  $\tau_{SECCIÓ 2} = 9,38$  mm.

Entre els dos valors de gruix de les seccions de la columna, s'escull el gruix més elevat, corresponent a  $\tau = 9,38$  mm.

Per tal de facilitar la construcció de l'equip s'ha escollit un valor unificat de gruix de l'acer inoxidable de  $\tau = 10$  mm.

### **Càlcul del gruix segons pressió interna, dels caps toriesfèrics:**

Per al disseny dels caps toriesfèrics, es realitza el disseny d'un d'ells per cada secció, ja la secció 1 correspon al cap de la columna, i la secció 2 al fons d'aquesta. Primerament, es comprova que la relació  $L/r$  sigui igual o inferior que  $16^{2/3}$ , on  $L$  fa referència al radi intern, i  $r$  suposa un 10% d'aquest radi de l'equip.

Coneixent per la secció 1,  $L_{SECCIÓ 1} = 1,787/2$ ;  $r_{SECCIÓ 1} = 0,10 \cdot L_{SECCIÓ 1} = 0,08935$ m, i per la secció 2,  $L_{SECCIÓ 2} = 1,876/2$ ;  $r_{SECCIÓ 2} = 0,10 \cdot L_{SECCIÓ 2} = 0,0938$ m, s'obté que la relació  $L/r$  és igual a 10 per cada secció, i per tant inferior a  $16^{2/3}$  en els dos casos. Per tant, l'equació necessària per el càlcul del gruix dels caps toriesfèrics segons la pressió interna és la següent:

Per  $L/r=10$ , a partir de la Figura 11.49, s'obté un valor del factor  $M=1,54$

$$t = \frac{P_D \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_D} \quad \text{Equació 11.61}$$

$t$ : Gruix dels caps toriesfèrics [mm]

$L$ : Radi intern [inch]

$M$ : Factor tabulat que depèn del factor  $L/r$

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

Figura 11.49: Valors del factor M

Per tant, a partir dels anteriors valors, s'obté un gruix dels caps toriesfèrics corresponents a cada secció de  $t_{CAP S1} = 4,45 \text{ mm}$  i  $t_{CAP S1} = 4,67 \text{ mm}$ .

A l'obtenir un resultat pel gruix dels caps toriesfèrics inferior al gruix del cos del reactor, s'escull el gruix del cos per a la construcció de totes les parts de l'equip com a mesura de seguretat.

### Alçades i Dimensionament del cap toriesfèric, segons pressió interna:

El dimensionament del cap toriesfèric es realitza mitjançant la nomenclatura de la Figura 11.50.

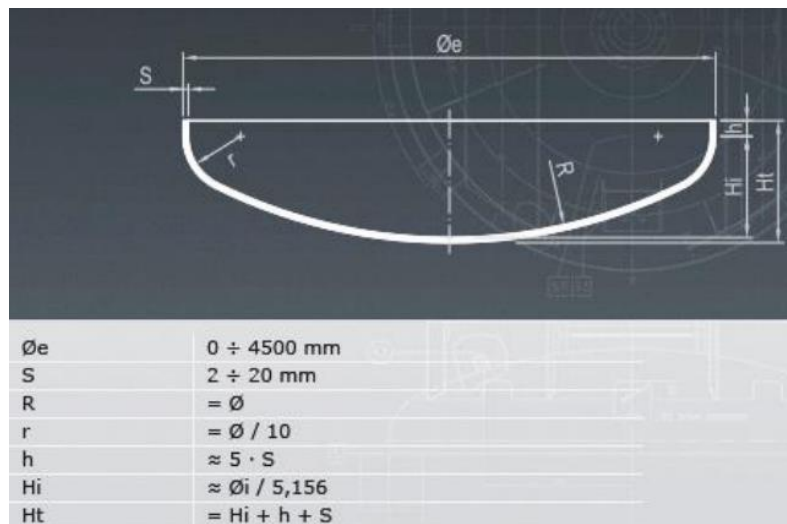


Figura 11.50: Dimensionament capçal toriesfèric

Les anteriors variables corresponen a:

S: Gruix del capçal toriesfèric [inch]; (S=9,38 mm = 0,3693 inch)

Øe: Radi intern inch

$\phi_{eS1} = 0,8935m = 35,18inch$  ; ;  $\phi_{eS2} = 0,938m = 36,93inch$

Per tant, a partir de la Figura 11.50, obtenim un resultat  $H_{t S1} = 9,04inch = 0,2296m$ ;  
 $H_{t S2} = 9,38inch = 0,2383m$ .

### **Càlcul de l'alçada total de la columna:**

Tenint en compte l'alçada del cos de la columna, que és de 31,41m segons el disseny del simulador HYSYS, i l'alçada dels capçals toriesfèrics, la llargada total de l'equip es calcula com:

$$L_{COLUMNA ETÀ} = 31,41 + (0,2383 + 0,2296) = 31,88m$$

### **11.9.3.1.3. Volum i pes del material**

#### ***Volum de Material:***

Es calcula per cada una de les parts de l'equip, el volum i pes de material que serà necessari per a la construcció de la columna.

#### ***Volum dels capçals:***

Primerament, es calcula el volum intern dels capçals, en aquest cas, són de diferent mida cada un dels dos:

$$V_{Int. Capçal 1} = 0,1 \cdot (D_{Int.1 D-1403})^3 = 0,1 \cdot (1,787)^3 = 0,5707 m^3$$

$$V_{Int. Capçal 2} = 0,1 \cdot (D_{Int.2 D-1403})^3 = 0,1 \cdot (1,876)^3 = 0,6602 m^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{Int. Capçals}: \text{Volum intern dels capçals [ m ]}$$

$$D_{Int. D-1403}: \text{Diàmetre intern de la columna [ m ]}$$

Seguidament es calcula el volum exterior d'aquests:

$$V_{Ext. Capçal 1} = 0,1 \cdot (D_{Ext.1 D-1403})^3 = 0,1 \cdot (1,787 + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3})^3 = 0,5900 m^3$$

$$V_{Ext. Capçal 2} = 0,1 \cdot (D_{Ext.2 D-1403})^3 = 0,1 \cdot (1,876 + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3})^3 = 0,6816 m^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{Ext. Capçals}: \text{Volum extern dels capçals [ m ]}$$

$$D_{Ext. D-1403}: \text{Diàmetre extern de la columna [ m ]}$$

A partir de la diferència entre el volum intern i extern s'obté el volum necessari de material:

$$V_{Material\ Capçal\ 1} = V_{Ext.Capçal\ 1} - V_{Int.\ Capçal\ 1} = 0,5900 - 0,5707 = 0,0193\ m^3$$

$$V_{Material\ Capçal\ 2} = V_{Ext.Capçal\ 2} - V_{Int.\ Capçal\ 2} = 0,6816 - 0,6602 = 0,0214\ m^3$$

### ***Volum de la Columna:***

A continuació es realitza el mateix procediment pel cos de la columna. Es calcula el volum intern d'aquesta:

$$V_{Int.\ D-1403} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Int.\ D-1403})^2 \cdot H_{TOT.\ D-1403} \quad \text{Equació 11.62}$$

$$V_{Int.2\ D-1403} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,787)^2 \cdot 13,41 = 33,63\ m^3$$

$$V_{Int.1\ D-1403} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,876)^2 \cdot 18,00 = 49,75\ m^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{Int.\ D-1403}: \text{Volum interior de la columna [ m}^3 \text{ ]}$$

$$D_{Int.\ D-1403}: \text{Diàmetre interior de la columna [ m ]}$$

$$H_{TOT.\ D-1403}: \text{Alçada total de la columna [ m ]}$$

Seguidament, es calcula el volum extern del cos de l'equip:

$$V_{Ext.\ D-1403} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Ext.\ D-1403})^2 \cdot H_{TOT.\ D-1403} \quad \text{Equació 11.63}$$

$$V_{Ext.1\ D-1403} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,787 + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 13,41 = 34,39\ m^3$$

$$V_{Ext.2\ D-1403} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,876 + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 18,00 = 50,82\ m^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{Ext.\ D-1403}: \text{Volum exterior de la columna [ m}^3 \text{ ]}$$

$$D_{Ext.\ D-1403}: \text{Diàmetre exterior de la columna [ m ]}$$

$$H_{TOT.\ D-1403}: \text{Alçada total de la columna [ m ]}$$

Finalment, a partir de la diferència entre el volum interior i exterior del cos de la columna, s'obté la necessitat de material per a la construcció:

$$\begin{aligned}
 V_{Material\ Columna\ D-1403} &= (V_{Ext.\ D-1403} - V_{Int.\ D-1403}) + V_{Material\ Capçals} && \text{Equació 11.64} \\
 V_{Material\ Columna\ D-1403} &= (34,39 - 33,63) + (50,82 - 49,75) + (0,0193 + 0,0214) \\
 V_{Material\ Columna\ D-1403} &= 1,83\ m^3
 \end{aligned}$$

### **Pes de la columna:**

Es procedeix a calcular el pes de la columna en les situacions següents:

### **Pes columna Buida:**

En aquest cas es calcula el pes de la columna buida, aplicant per això un sobredimensionant del 10%, tenint en compte la densitat del material en qüestió:

$$\begin{aligned}
 M_{D-1403,buida} &= (V_{Material\ Columna\ D-1403} \cdot \rho_{acer\ 304L}) \cdot 1,1 && \text{Equació 11.65} \\
 M_{D-1403,buida} &= (1,83 \cdot 8000) \cdot 1,1 = 16104\ kg
 \end{aligned}$$

En què les variables corresponen a:

$$\begin{aligned}
 M_{D-1403,buida}: & \text{Massa de la columna buida [ kg ]} \\
 \rho_{acer\ 304L}: & \text{Densitat de l'acer inoxidable 304L } \left( 8000 \frac{kg}{m^3} \right)
 \end{aligned}$$

### **Pes de la columna en proves:**

En aquest cas es calcula el pes total de la columna si aquesta estigués plena d'aigua. Es realitza el càlcul a partir del volum total de la columna i la densitat de l'aigua.

$$\begin{aligned}
 M_{D-1403,aigua} &= M_{D-1403,buida} + ((V_{Int.\ 1\ D-1403} + V_{Int.\ Capçals-1403}) \cdot \rho_{aigua}) \\
 & \text{Equació 11.66} \\
 M_{D-1403,aigua} &= 16104 + (((33,63 + 49,75) + (0,5707 + 0,6602)) \cdot 1000) = 100714,9\ kg
 \end{aligned}$$

En què les variables corresponen a:

$$\begin{aligned}
 M_{D-1403,aigua}: & \text{Pes de la columna plena d'aigua [ kg ]} \\
 \rho_{aigua}: & \text{Densitat de l'aigua } \left( 1000 \frac{kg}{m^3} \right)
 \end{aligned}$$

### **Pes de la columna en operació:**

Per últim, es realitza el càlcul del pes de la columna en condicions d'operació, a partir de la densitat de la mescla d'entrada a l'equip.

$$M_{D-1403,op} = M_{D-1403,buida} + ((V_{Int. D-1403} + 2 \cdot V_{Int. Capçals-1403}) \cdot \rho_{mescla})$$

**Equació 11.67**

$$M_{D-1403,buida} = 16104 + (((33,63 + 49,75) + (0,5707 + 0,6602)) \cdot 371,53) = 47538 \text{ kg}$$

En què les variables corresponen a:

$$M_{D-1403,op}: \text{Pes de la columna en condicions d'operació [ kg ]}$$

$$\rho_{mescla}: \text{Densitat del corrent d'entrada } \left( 371,53 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

*La densitat del corrent correspon a la proporcionada pel simulador "HYSYS"*

#### **11.9.3.1.4. Aïllament de la columna**

Degut a les condicions d'operació de la columna, s'ha tingut en compte la necessitat d'aïllar l'equip per mantenir aquestes condicions constants. S'ha escollit la llana de roca com a aïllant per l'equip, ja que les seves propietats són adients per aquestes condicions.

A continuació es calcula el gruix necessari per a aquest aïllant, considerant que les dues seccions de la columna són del diàmetre major entre elles:

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left( \frac{\Delta T}{D_{Ext, D-1401}} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad \text{Equació 11.68}$$

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left( \frac{\text{abs}(-53,49 - 25)}{(1,876 + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3}) \cdot 100} \right)^{\frac{1}{4}}} = 10,39 \text{ cm}$$

En què les variables corresponen a:

$$t_{aïllant}: \text{Gruix de l'aïllant de llana de roca [ cm ]}$$

$$\Delta T: \text{Diferència de temperatura entre l'interior i l'exterior de la columna [ °C ]}$$

$$D_{Ext, D-1403}: \text{Diàmetre extern de la columna [ cm ]}$$



Pel que fa als valors típics per gruixos d'aïllants, s'ha escollit  $t_{aïllant} = 12 \text{ cm}$ , per tal d'utilitzar un valor unificat i facilitar la construcció de l'equip [9].

Per últim, es calcula el volum de material aïllant que serà necessari per a la construcció de l'equip. Primerament, es calculen les superfícies exteriors del cos de la columna i dels capçals:

$$S_{Ext. C} = \pi \cdot D_{Ext. C} \cdot H_{TOT. D-1403} = \pi \cdot (1,876 + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3}) \cdot (13,41 + 18,00) = 187,09 \text{ m}^2$$

$$S_{Ext. Capçals} = 0,931 \cdot D_{Ext. C}^2 = 0,931 \cdot (1,876 + 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3})^2 = 3,35 \text{ m}^2$$

$$S_{Ext. TOT} = S_{Ext. C} + 2 \cdot S_{Capçals} = 187,09 + 2 \cdot 3,35 = 193,79 \text{ m}^2$$

A partir del càlcul de les superfícies, es calcula el valor del volum de material:

$$V_{aïllant} = S_{Ext. TOT} \cdot t_{aïllant} \quad \text{Equació 11.69}$$

$$V_{aïllant} = 193,79 \text{ m}^2 \cdot 0,12 \text{ m} = 23,25 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{aïllant}$ : Volum del material aïllant [  $\text{m}^3$  ]

$S_{Ext. TOT}$ : Secció externa del cos de la columna [  $\text{m}^2$  ]

$t_{aïllant}$ : Gruix de l'aïllant [  $\text{m}$  ]

## 11.10. Disseny columnes de destil·lació del post-tractament

### 11.10.1. Columna de tractament del benzè (D-1601)

En l'àrea de purificació de l'etilbenzè, la primera columna s'encarrega de recuperar el benzè en excés per tal de recircular-lo al procés.

A la Taula 11.19 es troba un recull de les principals condicions d'operació de la columna. En la Taula 11.20 les característiques dels diferents corrents, i en la Taula 11.21 les característiques dels plats.

**Taula 11.19: Condicions d'operació de la columna D-1601**

Temperatura d'entrada [ °C ]	137,4
Pressió [ kPa ]	275,8
Relació de reflux	1,5
Cabal màssic [ kg/h ]	146500
Nombre d'etapes teòriques	33
Plat d'aliment	16

Taula 11.20: Característiques dels corrents de la columna D-1601

	Aliment	Destil·lat 1	Destil·lat 2	Residu
nº Corrent	22	23	26	38
Fracció de Vapor	0,5679	1	0	0
Temperatura [ °C ]	137,40	71,14	71,14	139,90
Pressió [ kPa ]	275,8	101,3	101,3	101,3
Cabal molar [ kmols/h ]	1673	19,99	1150	503,1
Cabal màssic [ kg/h ]	146500	1279	89750	55490
Entalpia molar [ KJ/kmol ]	6,30E+04	4,78E+04	5,59E+04	4,02E+03
Cabal de calor [ KJ/h ]	1,05E+08	9,55E+05	6,42E+07	2,02E+06
<b>Composicions màssiques</b>				
Metà	0,0025	0,1817	0,0004	0,0000
Età	0,0012	0,0594	0,0007	0,0000
Benzè	0,6957	0,7589	0,9989	0,0000
Etilbenzè	0,2600	0,0000	0,0000	0,8645
Dietilbenzè	0,0370	0,0000	0,0000	0,1232
Trietilbenzè	0,0032	0,0000	0,0000	0,0105
Tetraetilbenzè	0,0004	0,0000	0,0000	0,0012
Toluè	0,0002	0,0000	0,0000	0,0007

Taula 11.21: Característiques dels plats de la columna D-1601

	Secció 1	Secció 2
<b>Geometria</b>		
Diàmetre [ m ]	5,7	5,7
Distància entre plats [ m ]	0,6096	0,6096
Altura [ m ]	9,144	18
Àrea transversal [ m <sup>2</sup> ]	25,52	20,41
Àrea activa [ m <sup>2</sup> ]	20,41	2,1523
<b>Característiques dels plats</b>		
Tipus de plat	"Sieve" ( Perforat )	"Bubble cap"
Número del passos del flux	1	1
Mètode d'inundació	GLITSCH	GLITSCH
Nombre de forats / cascs	16115	1021
Diàmetre dels forats / cascs [ mm ]	12,7	76,2
Altura de l'abocador [ mm ]	50,8	50,8
<b>Paràmetres Hidràulics</b>		
Màxima pèrdua de pressió per plat [ kPa ]	2,5	2,5
Càrrega màxima de l'abocador [ m <sup>3</sup> /h·m ]	117,4	117,4
Càrrega mínima de l'abocador [ m <sup>3</sup> /h·m ]	4,471	4,471

### 11.10.1.1. Disseny mecànic de la columna

#### 11.10.1.1.1. Selecció del material

El disseny de la columna de destil·lació del corrent procedent dels alquiladors i transalquilador, s'ha dut a terme amb acer inoxidable 316L, ja que es considera el material més òptim per les condicions d'operació i productes a tractar.

El disseny mecànic de l'equip s'ha realitzat segons els criteris ASME.

#### 11.10.1.1.2. Dimensionament de la columna

##### **Càlcul de la pressió de disseny:**

En primer lloc, es calcula la pressió de disseny segons l'Equació 11.70, amb un resultat de  $P_{DISSENY} = 357,60 \text{ kPa}$

$$P_{DISSENY} = P_{OPERACIÓ} + \Delta P + (P_{OPERACIÓ} + \Delta P) \cdot 0,15 \quad \text{Equació 11.70}$$

$\Delta P$ : Pèrdua de pressió a la columna [ kPa ]

El valor de la pèrdua de pressió s'observa a la figura X i és

$P_{OPERACIÓ}$ : Pressió d'operació de la columna [ kPa ]

$$\Delta P = 99,62 + 252,0 \text{ mbars} = 35,16 \text{ kPa}$$

##### **Càlcul de la temperatura de disseny:**

Pel que fa a la temperatura de disseny, es calcula aplicant un factor de seguretat del 15% a la temperatura d'operació màxima de la columna a partir de l'Equació 11.71, obtenint un resultat de  $T_{DISSENY} = 160,89 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

$$T_{DISSENY} = T_{MAX OPERACIÓ} \cdot (1 + 0,15) \quad \text{Equació 11.71}$$

##### **Càlcul del gruix del cos de la columna:**

A partir de l'Equació 11.72 es calcula el gruix del cos de la columna segons els paràmetres corresponents descrits a continuació. S'obté un resultat del gruix del cos de la torre de  $\tau = 14,95 \text{ mm}$ , igual per les dues seccions, ja que tenen el mateix diàmetre.

Per tal de facilitar la construcció de l'equip s'ha escollit un valor unificat de gruix de l'acer inoxidable de  $\tau = 15 \text{ mm}$ .

$$\tau = \frac{P_{DISSENY} \cdot D}{2 \cdot S \cdot E - 1,2 \cdot P_{DISSENY}} \quad \text{Equació 11.72}$$

$\tau$ : Gruix del cos de la columna [inch]

$P_{DISSENY}$ : Presió de disseny (51,87 psi) [psi]

$D$ : Diàmetre intern (224,41 inch) [inch]

$S$ : Tensió del material [psi] ;

Per acer inoxidable 316L que no supera els 427°C ( $S = 12.400$  psi)

$E$ : Valor d'Eficàcia ; per l'acer inoxidable 316L ( $E = 0,8$ )

### Càlcul del gruix segons pressió interna, dels caps toriesfèrics:

Primerament, es comprova que la relació  $L/r$  sigui igual o inferior que  $16^{2/3}$ , on  $L$  fa referència al radi intern, i  $r$  suposa un 10% d'aquest radi de l'equip.

Coneixent  $L=5,7/2$  m ;  $r=0,10 \cdot (5,7/2) = 0,285$  m , s'obté que la relació  $L/r$  és igual a 10, i per tant inferior a  $16^{2/3}$ . Per tant, l'equació necessària pel càlcul del gruix dels caps toriesfèrics segons la pressió interna és la següent:

Per  $L/r=10$ , a partir de la Figura 11.51, s'obté un valor del factor  $M=1,54$

$$t = \frac{P_D \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P_D} \quad \text{Equació 11.73}$$

$t$ : Gruix dels caps toriesfèrics [mm]

$L$ : Radi intern [inch]

$M$ : Factor tabulat que depèn del factor  $L/r$

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

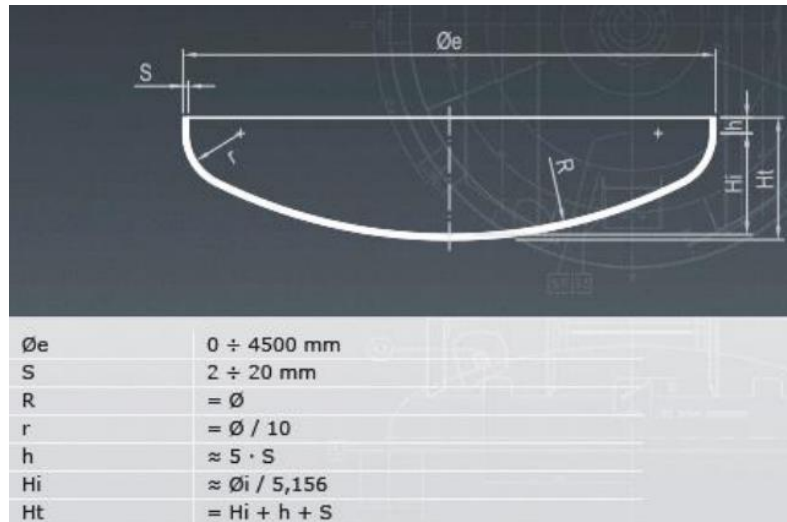
Figura 11.51: Valors del factor M

Per tant, a partir dels anteriors valors, s'obté un gruix dels caps toriesfèrics de  $t=11,46$  mm.

A l'obtenir un resultat pel gruix dels caps toriesfèrics inferior al gruix del cos del reactor, s'escull el gruix del cos per a la construcció de totes les parts de l'equip.

**Alçades i Dimensionament del cap toriesfèric, segons pressió interna:**

El dimensionament del cap toriesfèric es realitza mitjançant la nomenclatura de la Figura 11.52.



**Figura 11.52: Dimensionament capçal toriesfèric**

Les anteriors variables corresponen a:

S: Gruix del capçal toriesfèric [inch]; (S=14,95 mm = 0,5886 inch)

Øe: Radi intern [ inch ]; (Øe=2,85m=112,20inch)

Per tant, a partir de la Figura 11.52, obtenim un resultat de h=2,943 inch i Hi=21,76 inch, per tant, finalment obtenim un resultat de l'alçada del cap de Ht=25,29 inch=0,6424 m

**Càlcul de l'alçada total de la columna:**

Tenint en compte l'alçada del cos de la columna, que és de 9,14m per la primera secció i de 18m per la segona, segons el disseny del simulador HYSYS, que té en compte els plats teòrics i la separació entre aquests, i l'alçada dels capçals toriesfèrics, la llargada total de l'equip es calcula com:

$$L_{COLUMNA\ BENZÈ} = 9,14 + 18 + (0,6424 \cdot 2) = 10,90m$$

### 11.10.1.1.3. Volum i pes del material

#### ***Volum de Material:***

Es calcula per cada una de les parts de l'equip, el volum i pes de material que serà necessari per a la construcció de la columna. En aquest cas, la columna disposa de dues seccions, però el mateix diàmetre.

#### ***Volum dels capçals:***

Primerament, es calcula el volum intern dels capçals:

$$V_{Int. Capçals} = 0,1 \cdot (D_{Int. D-1601})^3 = 0,1 \cdot (5,7)^3 = 18,53 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{Int. Capçals}: \text{Volum intern dels capçals [ m ]}$$

$$D_{Int. D-1601}: \text{Diàmetre intern de la columna [ m ]}$$

Seguidament es calcula el volum exterior d'aquests:

$$V_{Ext. Capçals} = 0,1 \cdot (D_{Ext. D-1601})^3 = 0,1 \cdot (5,7 + 2 \cdot 15 \cdot 10^{-3})^3 = 18,81 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{Ext. Capçals}: \text{Volum extern dels capçals [ m ]}$$

$$D_{Ext. D-1601}: \text{Diàmetre extern de la columna [ m ]}$$

A partir de la diferència entre el volum intern i extern s'obté el volum necessari de material:

$$V_{Material Capçals} = V_{Ext. Capçals} - V_{Int. Capçals} = 18,81 - 18,53 = 0,28 \text{ m}^3$$

#### ***Volum de la Columna:***

A continuació es realitza el mateix procediment pel cos de la columna. Es calcula el volum intern d'aquesta:

$$V_{Int. D-1601} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Int. D-1601})^2 \cdot H_{TOT. D-1601} \quad \text{Equació 11.74}$$

$$V_{Int. D-1601} = \frac{\pi}{4} \cdot (5,7)^2 \cdot (9,14 + 18,00) = 692,55 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{Int. D-1601}$ : Volum interior de la columna [ m<sup>3</sup> ]

$D_{Int. D-1601}$ : Diàmetre interior de la columna [ m ]

$H_{TOT. D-1601}$ : Alçada total de la columna [ m ]

Seguidament, es calcula el volum extern del cos de l'equip:

$$V_{Ext. D-1601} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Ext. D-1601})^2 \cdot H_{TOT. D-1601} \quad \text{Equació 11.75}$$

$$V_{Ext. D-1601} = \frac{\pi}{4} \cdot (5,7 + 2 \cdot 15 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (9,14 + 18,00) = 699,86 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{Ext. D-1601}$ : Volum exterior de la columna [ m<sup>3</sup> ]

$D_{Ext. D-1601}$ : Diàmetre exterior de la columna [ m ]

$H_{TOT. D-1601}$ : Alçada total de la columna [ m ]

Finalment, a partir de la diferència entre el volum interior i exterior del cos de la columna, s'obté la necessitat de material per a la construcció:

$$V_{Material Columna D-1601} = (V_{Ext. D-1601} - V_{Int. D-1601}) + V_{Material Capçals} \quad \text{Equació 11.76}$$

$$V_{Material Columna D-1601} = (699,86 - 692,55) = 7,31 \text{ m}^3$$

### **Pes de la columna:**

Es procedeix a calcular el pes de la columna en les situacions següents:

### **Pes columna buida:**

En aquest cas es calcula el pes de la columna buida, aplicant per això un sobredimensionant del 10%, tenint en compte la densitat del material en qüestió:

$$M_{D-1601,buida} = (V_{Material\ Columna\ D-1601} \cdot \rho_{acer\ 316L}) \cdot 1,1 \quad \text{Equació 11.77}$$

$$M_{D-1601,buida} = (7,31 \cdot 8000) \cdot 1,1 = 64318\ kg$$

En què les variables corresponen a:

$M_{D-1601,buida}$ : Massa de la columna buida [ kg ]

$\rho_{acer\ 316L}$ : Densitat de l'acer inoxidable 316L  $\left(8000 \frac{kg}{m^3}\right)$

#### **Pes de la columna en proves:**

En aquest cas es calcula el pes total de la columna si aquesta estigués plena d'aigua. Es realitza el càlcul a partir del volum total de la columna i la densitat de l'aigua.

$$M_{D-1601,aigua} = M_{D-1601,buida} + ((V_{Int.\ D-1601} + 2 \cdot V_{Int.\ Capçals-1601}) \cdot \rho_{aigua}) \quad \text{Equació 11.78}$$

$$M_{D-1601,aigua} = 64328 + ((692,55 + 2 \cdot 18,53) \cdot 1000) = 783388\ kg$$

En què les variables corresponen a:

$M_{D-1601,aigua}$ : Pes de la columna plena d'aigua [ kg ]

$\rho_{aigua}$ : Densitat de l'aigua  $\left(1000 \frac{kg}{m^3}\right)$

#### **Pes de la columna en operació:**

Per últim, es realitza el càlcul del pes de la columna en condicions d'operació, a partir de la densitat de la mescla d'entrada a l'equip.

$$M_{D-1601,op} = M_{D-1601,buida} + ((V_{Int.\ D-1601} + 2 \cdot V_{Int.\ Capçals-1601}) \cdot \rho_{mescla}) \quad \text{Equació 11.79}$$

$$M_{D-1601,op} = 64328 + ((692,55 + 2 \cdot 18,53) \cdot 875,95) = 703429\ kg$$

En què les variables corresponen a:

$M_{D-1601,op}$ : Pes de la columna en condicions d'operació [ kg ]



$$\rho_{mescla}: \text{Densitat del corrent d'entrada} \left( 875,95 \frac{kg}{m^3} \right)$$

La densitat del corrent correspon a la proporcionada per el simulador "HYSYS"

#### 11.10.1.1.4. Aïllament de la columna

Degut a les condicions d'operació de la columna, s'ha tingut en compte la necessitat d'aïllar l'equip per mantenir aquestes condicions constants. S'ha escollit la llana de roca com a aïllant per l'equip, ja que les seves propietats són adients per aquestes condicions.

A continuació es calcula el gruix necessari per a aquest aïllant:

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left( \frac{\Delta T}{D_{Ext, D-1401}} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad \text{Equació 11.80}$$

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left( \frac{(139,90 - 25)}{(5,7 + 2 \cdot 15 \cdot 10^{-3}) \cdot 100} \right)^{\frac{1}{4}}} = 12,45 \text{ cm}$$

En què les variables corresponen a:

$t_{aïllant}$ : Gruix de l'aïllant de llana de roca [ cm ]

$\Delta T$ : Diferència de temperatura entre l'interior i l'exterior de la columna [ °C ]

$D_{Ext, D-1601}$ : Diàmetre extern de la columna [ cm ]

Pel que fa als valors típics per gruixos d'aïllants, s'ha escollit 14cm, per tal d'utilitzar un valor unificat i facilitar la construcció de l'equip <sup>[9]</sup>.

Per últim, es calcula el volum de material aïllant que serà necessari per a la construcció de l'equip. Primerament, es calculen les superfícies exteriors del cos de la columna i dels capçals:

$$S_{Ext. C} = \pi \cdot D_{Ext. C} \cdot H_{TOT. D-1601} = \pi \cdot (5,7 + 2 \cdot 15 \cdot 10^{-3}) \cdot (9,14 + 18,00) = 488,56 \text{ m}^2$$

$$S_{Ext. Capçals} = 0,931 \cdot D_{Ext. C}^2 = 0,931 \cdot (5,7 + 2 \cdot 15 \cdot 10^{-3})^2 = 32,83 \text{ m}^2$$

$$S_{Ext. TOT} = S_{Ext. C} + 2 \cdot S_{Capçals} = 488,56 + 2 \cdot 32,83 = 554,22 \text{ m}^2$$

A partir del càlcul de les superfícies, es calcula el valor del volum de material:

$$V_{aïllant} = S_{Ext. TOT} \cdot t_{aïllant} \quad \text{Equació 11.81}$$

$$V_{aïllant} = 554,22 \text{ m}^2 \cdot 0,14 \text{ m} = 77,59 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{aïllant}$ : Volum del material aïllant [ m<sup>3</sup> ]

$S_{Ext. TOT}$ : Secció externa del cos cos de la columna [ m<sup>2</sup> ]

$t_{aïllant}$ : Gruix de l'aïllant [ m ]

### 11.10.2. Columna de tractament de l'etilbenzè (D-1602)

A l'àrea de purificació de l'etilbenzè, la segona columna s'encarrega d'extreure per caps el producte pur, i per cues el corrent que entra a la tercera i última columna.

A la Taula 11.22 es troba un recull de les principals condicions d'operació de la columna. En la Taula 11.23 les característiques dels diferents corrents, i en la Taula 11.24 les característiques dels plats.

**Taula 11.22: Condicions d'operació de la columna D-1602**

Temperatura d'entrada [ °C ]	139,9
Pressió [ kPa ]	101,3
Relació de reflux	0,8
Cabal màssic [ kg/h ]	55490
Nombre d'etapes teòriques	33
Plat d'aliment	16

Taula 11.23: Característiques dels corrents de la columna D-1602

	Aliment	Destil·lat	Residu
<b>nº Corrent</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>
Fracció de Vapor	0	0	0
Temperatura [ °C ]	139,90	135,9	175,30
Pressió [ kPa ]	101,3	101,3	101,3
Cabal molar [ kmols/h ]	503,1	427	76,08
Cabal màssic [ kg/h ]	55490	45330	10160
Entalpia molar [ KJ/kmol ]	4,02E+03	1,07E+04	-2,84E+04
Cabal de calor [ KJ/h ]	2,02E+06	4,59E+06	-2,16E+06
<b>Composicions màssiques</b>			
Etilbenzè	0,8645	0,9991	0,1087
Dietilbenzè	0,1232	0,0001	0,8139
Trietilbenzè	0,0105	0,0000	0,0694
Tetraetilbenzè	0,0012	0,0000	0,0079
Toluè	0,0007	0,0008	0,0000

Taula 11.24: Característiques dels plats de la columna D-1602

	Secció 1	Secció 2
<b>Geometria</b>		
Diàmetre [ m ]	2,646	2,819
Distància entre plats [ m ]	0,6096	0,75
Altura [ m ]	9,144	10,97
Àrea transversal [ m <sup>2</sup> ]	5,498	6,24
Àrea activa [ m <sup>2</sup> ]	4,398	4,992
<b>Característiques dels plats</b>		
Tipus de plat	"Sieve" ( Perforat )	"Sieve" ( Perforat )
Nombre del passos del flux	1	1
Mètode d'inundació	GLITSCH	GLITSCH
Nombre de forats	3472	3941
Diàmetre dels forats [ mm ]	12,7	12,7
Altura de l'abocador	50,8	50,8
<b>Paràmetres Hidràulics</b>		
Màxima pèrdua de pressió per plat [ kPa ]	2,5	2,5
Càrrega màxima de l'abocador [ m <sup>3</sup> /h·m ]	117,4	117,4
Càrrega mínima de l'abocador [ m <sup>3</sup> /h·m ]	4,471	4,471

### 11.10.2.1. Disseny mecànic de la columna

#### 11.10.2.1.1. Selecció del material

En aquest cas, el corrent procedent de la primera de les torres de destil·lació, es destil·la per obtenir com a producte de caps l'etilbenzè amb una puresa molt elevada, per comercialitzar directament, i per cues la resta de productes del corrent. El material amb el qual es realitzarà la construcció de l'equip és l'acer inoxidable 316L, ja que per les condicions d'operació i productes tractats es considera el material més òptim.

El disseny mecànic de l'equip s'ha realitzat segons els criteris ASME.

#### 11.10.2.1.2. Dimensionament de la columna

##### ***Càlcul de la pressió de disseny:***

En primer lloc, es calcula la pressió de disseny segons l'Equació 11.82, amb un resultat de  $P_{DISSENY} = 150,42 \text{ kPa}$

$$P_{DISSENY} = P_{OPERACIÓ} + \Delta P + (P_{OPERACIÓ} + \Delta P) \cdot 0,15 \quad \text{Equació 11.82}$$

$$P_{OPERACIÓ}: \text{Pressió d'operació de la columna (101,3 kPa) [ kPa ]}$$

$$\Delta P: \text{Pèrdua de pressió a la columna [ kPa ]}$$

*El valor de la pèrdua de pressió és:*

$$\Delta P = 295,7 \text{ mbars} = 29,5 \text{ kPa}$$

##### ***Càlcul de la temperatura de disseny:***

Pel que fa a la temperatura de disseny, es calcula aplicant un factor de seguretat del 15% a la temperatura d'operació màxima de la columna. A partir de l'Equació 11.83, s'obté un resultat de  $T_{DISSENY} = 201,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

$$T_{DISSENY} = T_{MAX OPERACIÓ} \cdot (1 + 0,15) \quad \text{Equació 11.83}$$

##### ***Càlcul del gruix del cos de la columna:***

En aquest cas, la columna disposa de dues seccions. Es realitzarà el disseny per cada una d'elles per separat i s'escollirà el gruix major entre els resultats obtinguts.

A partir de l'Equació 11.84 es calcula el gruix del cos de la columna segons els paràmetres corresponents descrits a continuació.

$$\tau = \frac{P_{DISSENY} \cdot D}{2 \cdot S \cdot E - 1,2 \cdot P_{DISSENY}} \quad \text{Equació 11.84}$$

$\tau$ : Gruix del cos de la columna [inch]

$P_{DISSENY}$ : Pressió de disseny (14,69 psi) [psi]

$D$ : Diàmetre intern (Secció 1: 104,17 inch; Secció 2: 110,98 inch) [inch]

$S$ : Tensió del material [psi] ;

Per acer inoxidable 316L que no supera els 427°C ( $S = 12.400$  psi)

$E$ : Valor d'Eficàcia ; per l'acer inoxidable 316L ( $E = 0,8$ )

S'obté un resultat del gruix del cos de la torre de  $\tau_{SECCIÓ 1} = 2,00$  mm i  $\tau_{SECCIÓ 2} = 2,13$  mm.

Entre els dos valors de gruix de les seccions de la columna, s'escull el gruix més elevat, corresponent a  $\tau = 2,13$  mm.

Per tal de facilitar la construcció de l'equip s'ha escollit un valor unificat de gruix de l'acer inoxidable de  $\tau = 3$  mm.

### **Càlcul del gruix segons pressió interna, dels caps toriesfèrics:**

Per al disseny dels caps toriesfèrics, es realitza el disseny d'un d'ells per cada secció, ja la secció 1 correspon al cap de la columna, i la secció 2 al fons d'aquesta. Primerament, es comprova que la relació  $L/r$  sigui igual o inferior que  $16^{2/3}$ , on  $L$  fa referència al radi intern, i  $r$  suposa un 10% d'aquest radi de l'equip.

Coneixent per la secció 1,  $L_{SECCIÓ 1} = 2,646/2$ ;  $r_{SECCIÓ 1} = 0,10 \cdot L_{SECCIÓ 1} = 0,1323$ m, i per la secció 2,  $L_{SECCIÓ 2} = 2,819/2$ ;  $r_{SECCIÓ 2} = 0,10 \cdot L_{SECCIÓ 2} = 0,141$ m, s'obté que la relació  $L/r$  és igual a 10 per cada secció, i per tant inferior a  $16^{2/3}$  en els dos casos. Per tant, l'equació necessària pel càlcul del gruix dels caps toriesfèrics segons la pressió interna és la següent:

Per  $L/r=10$ , a partir de la Figura 11.53, s'obté un valor del factor  $M=1,54$

$$t = \frac{P_D \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P_D} \quad \text{Equació 11.85}$$

$t$ : Gruix dels caps toriesfèrics [mm]

$L$ : Radi intern [inch]

$M$ : Factor tabulat que depèn del factor  $L/r$

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

Figura 11.53: Valors del factor M

Per tant, a partir dels anteriors valors, s'obté un gruix dels caps toriesfèrics corresponents a cada secció de  $t_{CAP S1} = 1,51 \text{ mm}$  i  $t_{CAP S1} = 1,61 \text{ mm}$ .

A l'obtenir un resultat pel gruix dels caps toriesfèrics inferior al gruix del cos del reactor, s'escull el gruix del cos per a la construcció de totes les parts de l'equip com a mesura de seguretat.

### Alçades i Dimensionament del cap toriesfèric, segons pressió interna:

El dimensionament del cap toriesfèric es realitza mitjançant la nomenclatura de la Figura 11.54.

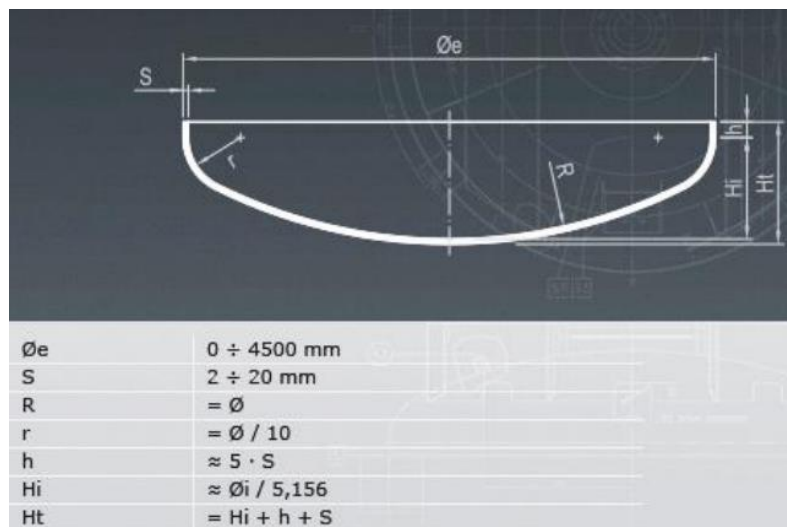


Figura 11.54: Dimensionament capçal toriesfèric

Les anteriors variables corresponen a:

S: Gruix del capçal toriesfèric [inch]; ( $S=2,13 \text{ mm} = 0,08386 \text{ inch}$ )

$\text{Øe}$ : Radi intern [inch]

$\text{Øe}_{S1} = 1,323 \text{ m} = 52,09 \text{ inch}$  ; ;  $\text{Øe}_{S2} = 1,41 \text{ m} = 55,49 \text{ inch}$

Per tant, a partir de la Figura 11.54, obtenim un resultat  $H_{t S1} = 10,61inch = 0,2695m$ ;

$$H_{t S2} = 10,76inch = 0,2736m.$$

### **Càlcul de l'alçada total de la columna:**

Tenint en compte l'alçada del cos de la columna, que és de 31,41m segons el disseny del simulador HYSYS, i l'alçada dels capçals toriesfèrics, la llargada total de l'equip es calcula com:

$$L_{COLUMNA ETÀ} = 9,14 + 10,97 + (0,2695 + 0,2736) = 20,65m$$

### **11.10.2.1.3. Volum i pes del material**

#### **Volum de Material:**

Es calcula per cada una de les parts de l'equip, el volum i pes de material que serà necessari per a la construcció de la columna.

#### **Volum dels capçals:**

Primerament, es calcula el volum intern dels capçals, en aquest cas, són de diferent mida cada un dels dos:

$$V_{Int. Capçal 1} = 0,1 \cdot (D_{Int.1 D-1602})^3 = 0,1 \cdot (2,646)^3 = 1,8525 m^3$$

$$V_{Int. Capçal 2} = 0,1 \cdot (D_{Int.2 D-1602})^3 = 0,1 \cdot (2,819)^3 = 2,2402 m^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{Int. Capçals}: \text{Volum intern dels capçals [ m ]}$$

$$D_{Int. D-1602}: \text{Diàmetre intern de la columna [ m ]}$$

Seguidament es calcula el volum exterior d'aquests:

$$V_{Ext. Capçal 1} = 0,1 \cdot (D_{Ext.1 D-1602})^3 = 0,1 \cdot (2,646 + 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3})^3 = 1,8652 m^3$$

$$V_{Ext. Capçal 2} = 0,1 \cdot (D_{Ext.2 D-1602})^3 = 0,1 \cdot (2,819 + 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3})^3 = 2,2545 m^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{Ext. Capçals}$ : Volum extern dels capçals [ m ]

$D_{Ext. D-1602}$ : Diàmetre extern de la columna [ m ]

A partir de la diferència entre el volum intern i extern s'obté el volum necessari de material:

$$V_{Material Capçal 1} = V_{Ext. Capçal 1} - V_{Int. Capçal 1} = 1,865 - 1,8525 = 0,0125 \text{ m}^3$$

$$V_{Material Capçal 2} = V_{Ext. Capçal 2} - V_{Int. Capçal 2} = 2,2545 - 2,2402 = 0,0143 \text{ m}^3$$

### **Volum de la Columna:**

A continuació es realitza el mateix procediment pel cos de la columna. Es calcula el volum intern d'aquesta:

$$V_{Int. D-1602} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Int. D-1602})^2 \cdot H_{TOT. D-1602} \quad \text{Equació 11.86}$$

$$V_{Int.2 D-1602} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,646)^2 \cdot 9,14 = 50,26 \text{ m}^3$$

$$V_{Int.1 D-1602} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,819)^2 \cdot 10,97 = 68,47 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{Int. D-1602}$ : Volum interior de la columna [ m<sup>3</sup> ]

$D_{Int. D-1602}$ : Diàmetre interior de la columna [ m ]

$H_{TOT. D-1602}$ : Alçada total de la columna [ m ]

Seguidament, es calcula el volum extern del cos de l'equip:

$$V_{Ext. D-1602} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Ext. D-1602})^2 \cdot H_{TOT. D-1602} \quad \text{Equació 11.87}$$

$$V_{Ext.1 D-1602} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,646 + 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 9,14 = 50,49 \text{ m}^3$$

$$V_{Ext.2 D-1602} = \frac{\pi}{4} \cdot (2,819 + 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10,97 = 68,76 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:



$V_{Ext. D-1602}$ : Volum exterior de la columna [ m<sup>3</sup> ]

$D_{Ext. D-1602}$ : Diàmetre exterior de la columna [ m ]

$H_{TOT. D-1602}$ : Alçada total de la columna [ m ]

Finalment, a partir de la diferència entre el volum interior i exterior del cos de la columna, s'obté la necessitat de material per a la construcció:

$$V_{Material Columna D-1602} = (V_{Ext. D-1602} - V_{Int. D-1602}) + V_{Material Capçals} \quad \text{Equació 11.88}$$

$$V_{Material Columna D-1602} = (50,49 - 50,26) + (68,76 - 68,47) + (0,0125 + 0,0143)$$

$$V_{Material Columna D-1602} = 0,5468 \text{ m}^3$$

### **Pes de la columna:**

Es procedeix a calcular el pes de la columna en les situacions següents:

### **Pes columna buida:**

En aquest cas es calcula el pes de la columna buida, aplicant per això un sobredimensionant del 10%, tenint en compte la densitat del material en qüestió:

$$M_{D-1602,buida} = (V_{Material Columna D-1602} \cdot \rho_{acer 316L}) \cdot 1,1 \quad \text{Equació 11.89}$$

$$M_{D-1602,buida} = (0,5468 \cdot 8000) \cdot 1,1 = 4811,84 \text{ kg}$$

En què les variables corresponen a:

$M_{D-1602,buida}$ : Massa de la columna buida [ kg ]

$\rho_{acer 316L}$ : Densitat de l'acer inoxidable 316L  $\left(8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

### **Pes de la columna en proves:**

En aquest cas es calcula el pes total de la columna si aquesta estigués plena d'aigua. Es realitza el càlcul a partir del volum total de la columna i la densitat de l'aigua.

$$M_{D-1602,aigua} = M_{D-1602,buida} + ((V_{Int. 1 D-1602} + V_{Int. Capçals-1602}) \cdot \rho_{aigua})$$

**Equació 11.90**

$$M_{D-1602,buida} = 4811,84 + (((50,26 + 68,47) + (1,8524 + 2,2402)) \cdot 1000) = 127634 \text{ kg}$$

En què les variables corresponen a:

$M_{D-1602,aigua}$ : Pes de la columna plena d'aigua [ kg ]

$\rho_{aigua}$ : Densitat de l'aigua  $\left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

#### **Pes de la columna en operació:**

Per últim, es realitza el càlcul del pes de la columna en condicions d'operació, a partir de la densitat de la mescla d'entrada a l'equip.

$$M_{D-1602,op} = M_{D-1602,buida} + ((V_{Int. D-1602} + 2 \cdot V_{Int. Capçals-1602}) \cdot \rho_{mescla})$$

**Equació 11.91**

$$M_{D-1602,buida} = 4811,84 + ((50,26 + 68,47) + (1,8524 + 2,2402)) \cdot 869,20$$

$$= 111569 \text{ kg}$$

En què les variables corresponen a:

$M_{D-1602,op}$ : Pes de la columna en condicions d'operació [ kg ]

$\rho_{mescla}$ : Densitat del corrent d'entrada  $\left(869,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

La densitat del corrent correspon a la proporcionada per el simulador "HYSYS"

#### **11.10.2.1.4. Aïllament de la columna**

Degut a les condicions d'operació de la columna, s'ha tingut en compte la necessitat d'aïllar l'equip per mantenir aquestes condicions constants. S'ha escollit la llana de roca com a aïllant per l'equip, ja que les seves propietats són adients per aquestes condicions.

A continuació es calcula el gruix necessari per a aquest aïllant, considerant que les dues seccions de la columna són del diàmetre major entre elles:

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left( \frac{\Delta T}{D_{Ext, D-1401}} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad \text{Equació 11.92}$$

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left( \frac{(175,30 - 25)}{(2,819 + 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}) \cdot 100} \right)^{\frac{1}{4}}} = 9,76 \text{ cm}$$

En què les variables corresponen a:

$t_{aïllant}$ : Gruix de l'aïllant de llana de roca [ cm ]

$\Delta T$ : Diferència de temperatura entre l'interior i l'exterior de la columna [ °C ]

$D_{Ext, D-1602}$ : Diàmetre extern de la columna [ cm ]

Pel que fa a els valors típics per gruixos d'aïllants, s'ha escollit  $t_{aïllant} = 10 \text{ cm}$ , per tal d'utilitzar un valor unificat i facilitar la construcció de l'equip<sup>[9]</sup>.

Per últim, es calcula el volum de material aïllant que serà necessari per a la construcció de l'equip. Primerament, es calculen les superfícies exteriors del cos de la columna i dels capçals:

$$S_{Ext. C} = \pi \cdot D_{Ext. C} \cdot H_{TOT. D-1403} = \pi \cdot (2,819 + 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}) \cdot (9,14 + 10,97) = 178,48 \text{ m}^2$$

$$S_{Ext. Capçals} = 0,931 \cdot D_{Ext. C}^2 = 0,931 \cdot (2,819 + 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3})^2 = 7,43 \text{ m}^2$$

$$S_{Ext. TOT} = S_{Ext. C} + 2 \cdot S_{Capçals} = 178,48 + 2 \cdot 7,43 = 193,34 \text{ m}^2$$

A partir del càlcul de les superfícies, es calcula el valor del volum de material:

$$V_{aïllant} = S_{Ext. TOT} \cdot t_{aïllant} \quad \text{Equació 11.93}$$

$$V_{aïllant} = 193,34 \text{ m}^2 \cdot 0,10 \text{ m} = 19,34 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{aïllant}$ : Volum del material aïllant [ m<sup>3</sup> ]

$S_{Ext. TOT}$ : Secció externa del cos de la columna [ m<sup>2</sup> ]

$t_{aïllant}$ : Gruix de l'aïllant [ m ]

### 11.10.3. Columna de tractament del dietilbenzè (D-1603)

Finalment, l'última columna de l'àrea de purificació, s'encarrega d'extreure el dietilbenzè per tal de recircular-lo cap al transalquilador.

A la Taula 11.25 es troba un recull de les principals condicions d'operació de la columna. En la Taula 11.26 les característiques dels diferents corrents, i en la Taula 11.27 les característiques dels plats.

*Taula 11.25: condicions d'operació de la columna D-1603*

Temperatura d'entrada [ °C ]	175,3
Pressió [ kPa ]	101,3
Relació de reflux	1,3
Cabal màssic [ kg/h ]	10160
Número d'etapes teòriques	43
Plat d'aliment	21

*Taula 11.26: Característiques dels corrents de la columna D-1603*

	Aliment	Destil·lat	Residu
nº Corrent	40	41	61
Fracció de Vapor	0	0	0
Temperatura [ °C ]	175,30	173	217,80
Pressió [ kPa ]	101,3	101,3	101,3
Cabal molar [ kmols/h ]	76,08	70	6,08
Cabal màssic [ kg/h ]	10160	9163	998,1
Entalpia molar [ KJ/kmol ]	-2,84E+04	-2,45E+04	-6,37E+04
Cabal de calor [ KJ/h ]	-2,16E+06	-1,72E+06	-3,87E+05
<b>Composicions màssiques</b>			
Etilbenzè	0,1087	0,1181	0,0000
Dietilbenzè	0,8139	0,8818	0,0321
Trietilbenzè	0,0694	0	0,8686
Tetraetilbenzè	0,0079	0	0,0994

**Taula 11.27: Característiques dels plats de la columna D-1603**

	Secció 1	Secció 2
<b>Geometria</b>		
Diàmetre [ m ]	1,320	1,383
Distància entre plats [ m ]	0,6096	0,75
Altura [ m ]	12,19	14,02
Àrea transversal [ m <sup>2</sup> ]	1,369	1,502
Àrea activa [ m <sup>2</sup> ]	1,096	1,201
<b>Característiques dels plats</b>		
Tipus de plat	"Sieve" ( Perforat )	"Sieve" ( Perforat )
Número del passos del flux	1	1
Mètode d'inundació	GLITSCH	GLITSCH
Número de forats	865	948
Diàmetre dels forats [ mm ]	12,7	12,7
Altura de l'abocador	50,8	50,8
<b>Paràmetres Hidràulics</b>		
Màxima pèrdua de pressió per plat [ kPa ]	2,5	2,5
Càrrega màxima de l'abocador [ m <sup>3</sup> /h·m ]	117,4	117,4
Càrrega mínima de l'abocador [ m <sup>3</sup> /h·m ]	4,471	4,471

### 11.10.3.1. Disseny mecànic de la columna

#### 11.10.3.1.1. Selecció del material

En l'última torre de destil·lació del procés, el corrent procedent de la segona de les torres es destil·la per obtenir com a producte de caps el dietilbenzè per tal de recircular-lo al transalquilador, i per cues la resta de productes pesats del corrent. El material amb el qual es realitzarà la construcció de l'equip és l'acer inoxidable 316L, ja que per les condicions d'operació i productes tractats es considera el material més òptim.

El disseny mecànic de l'equip s'ha realitzat segons els criteris ASME.

#### 11.10.3.1.2. Dimensionament de la columna

##### **Càlcul de la pressió de disseny:**

En primer lloc, es calcula la pressió de disseny segons l'Equació 11.94, amb un resultat de  $P_{DISSENY} = 159,98 \text{ kPa}$

$$P_{DISSENY} = P_{OPERACIÓ} + \Delta P + (P_{OPERACIÓ} + \Delta P) \cdot 0,15 \quad \text{Equació 11.94}$$

$P_{OPERACIÓ}$ : Pressió d'operació de la columna (101,3 kPa) [ kPa ]

$\Delta P$ : Pèrdua de pressió a la columna [ kPa ]

El valor de la pèrdua de pressió és:

$$\Delta P = 378,2 \text{ mbars} = 37,82 \text{ kPa}$$

### **Càlcul de la temperatura de disseny:**

Pel que fa a la temperatura de disseny, es calcula aplicant un factor de seguretat del 15% a la temperatura d'operació màxima de la columna. A partir de l'Equació 11.95, s'obté un resultat de  $T_{DISSENY} = 250,47 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$T_{DISSENY} = T_{MAX OPERACIÓ} \cdot (1 + 0,15) \quad \text{Equació 11.95}$$

### **Càlcul del gruix del cos de la columna:**

En aquest cas, la columna disposa de dues seccions. Es realitzarà el disseny per cada una d'elles per separat i s'escollirà el gruix major entre els resultats obtinguts.

A partir de l'Equació 11.96 es calcula el gruix del cos de la columna segons els paràmetres corresponents descrits a continuació.

$$\tau = \frac{P_{DISSENY} \cdot D}{2 \cdot S \cdot E - 1,2 \cdot P_{DISSENY}} \quad \text{Equació 11.96}$$

$\tau$ : Gruix del cos de la columna [inch]

$P_{DISSENY}$ : Pressió de disseny (23,20 psi) [psi]

$D$ : Diàmetre intern (Secció 1: 51,96 inch; Secció 2: 54,45 inch) [inch]

$S$ : Tensió del material [psi] ;

Per acer inoxidable 316L que no supera els  $427^\circ\text{C}$  ( $S = 12.400 \text{ psi}$ )

$E$ : Valor d'Eficàcia ; per l'acer inoxidable 316L ( $E = 0,8$ )

S'obté un resultat del gruix del cos de la torre de  $\tau_{SECCIÓ 1} = 1,74 \text{ mm}$  i  $\tau_{SECCIÓ 2} = 1,62 \text{ mm}$ .

Entre els dos valors de gruix de les seccions de la columna, s'escull el gruix més elevat, corresponent a  $\tau = 1,74 \text{ mm}$ .

Per tal de facilitar la construcció de l'equip s'ha escollit un valor unificat de gruix de l'acer inoxidable de  $\tau = 2 \text{ mm}$ .

### ***Càlcul del gruix segons pressió interna, dels caps toriesfèrics:***

Per al disseny dels caps toriesfèrics, es realitza el disseny d'un d'ells per cada secció, ja la secció 1 correspon al cap de la columna, i la secció 2 al fons d'aquesta. Primerament, es comprova que la relació  $L/r$  sigui igual o inferior que  $16^{2/3}$ , on  $L$  fa referència al radi intern, i  $r$  suposa un 10% d'aquest radi de l'equip.

Coneixent per la secció 1,  $L_{SECCIÓ 1} = 1,320/2$ ;  $r_{SECCIÓ 1} = 0,10 \cdot L_{SECCIÓ 1} = 0,066m$ , i per la secció 2,  $L_{SECCIÓ 2} = 1,383/2$ ;  $r_{SECCIÓ 2} = 0,10 \cdot L_{SECCIÓ 2} = 0,069m$ , s'obté que la relació  $L/r$  és igual a 10 per cada secció, i per tant inferior a  $16^{2/3}$  en els dos casos. Per tant, l'equació necessària pel càlcul del gruix dels caps toriesfèrics segons la pressió interna és la següent:

Per  $L/r=10$ , a partir de la Figura 11.55, s'obté un valor del factor  $M=1,54$

$$t = \frac{P_D \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_D} \quad \text{Equació 11.97}$$

$t$ : Gruix dels caps toriesfèrics [mm]

$L$ : Radi intern [inch]

$M$ : Factor tabulat que depèn del factor  $L/r$

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

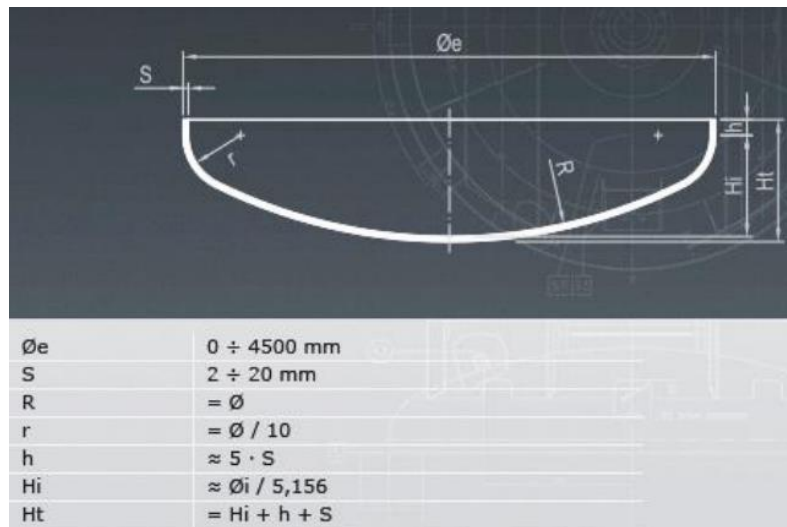
Figura 11.55: Valors del factor  $M$

Per tant, a partir dels anteriors valors, s'obté un gruix dels caps toriesfèrics corresponents a cada secció de  $t_{CAP S1} = 1,19 \text{ mm}$  i  $t_{CAP S1} = 1,24 \text{ mm}$ .

A l'obtenir un resultat pel gruix dels caps toriesfèrics inferior al gruix del cos del reactor, s'escull el gruix del cos per a la construcció de totes les parts de l'equip com a mesura de seguretat.

### ***Alçades i Dimensionament del cap toriesfèric, segons pressió interna:***

El dimensionament del cap toriesfèric es realitza mitjançant la nomenclatura de la Figura 11.56.



**Figura 11.56: Dimensionament capçal torièsfèric**

Les anteriors variables corresponen a:

$S$ : Gruix del capçal torièsfèric [inch]; ( $S=1,74 \text{ mm} = 0,06850 \text{ inch}$ )

$\varnothing_e$ : Radi intern [inch]

$\varnothing_{e_{S1}} = 0,66\text{m} = 25,98\text{inch}$  ; ;  $\varnothing_{e_{S2}} = 0,69\text{m} = 27,17\text{inch}$

Per tant, a partir de la Figura 11.56, obtenim un resultat  $H_{t_{S1}} = 5,45\text{inch} = 0,138\text{m}$ ;

$H_{t_{S2}} = 5,68\text{inch} = 0,144\text{m}$ .

#### **Càlcul de l'alçada total de la columna:**

Tenint en compte l'alçada del cos de la columna, que és de 31,41m segons el disseny del simulador HYSYS, i l'alçada dels capçals torièsfèrics, la llargada total de l'equip es calcula com:

$$L_{COLUMNA ETÀ} = 12,19 + 14,02 + (0,138 + 0,144) = 26,49\text{m}$$

#### **11.10.3.1.3. Volum i pes del material**

##### **Volum de Material:**

Es calcula per cada una de les parts de l'equip, el volum i pes de material que serà necessari per a la construcció de la columna.



### ***Volum dels capçals:***

Primerament, es calcula el volum intern dels capçals, en aquest cas, són de diferent mida cada un dels dos:

$$V_{Int. Capçal 1} = 0,1 \cdot (D_{Int.1 D-1603})^3 = 0,1 \cdot (1,320)^3 = 0,2299 m^3$$

$$V_{Int. Capçal 2} = 0,1 \cdot (D_{Int.2 D-1603})^3 = 0,1 \cdot (1,383)^3 = 0,2645 m^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{Int. Capçals}: \text{Volum intern dels capçals [ m ]}$$

$$D_{Int. D-1603}: \text{Diàmetre intern de la columna [ m ]}$$

Seguidament es calcula el volum exterior d'aquests:

$$V_{Ext. Capçal 1} = 0,1 \cdot (D_{Ext.1 D-1603})^3 = 0,1 \cdot (1,320 + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^3 = 0,2321 m^3$$

$$V_{Ext. Capçal 2} = 0,1 \cdot (D_{Ext.2 D-1603})^3 = 0,1 \cdot (1,383 + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^3 = 0,2668 m^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{Ext. Capçals}: \text{Volum extern dels capçals [ m ]}$$

$$D_{Ext. D-1603}: \text{Diàmetre extern de la columna [ m ]}$$

A partir de la diferència entre el volum intern i extern s'obté el volum necessari de material:

$$V_{Material Capçal 1} = V_{Ext. Capçal 1} - V_{Int. Capçal 1} = 0,2321 - 0,2299 = 0,0022 m^3$$

$$V_{Material Capçal 2} = V_{Ext. Capçal 2} - V_{Int. Capçal 2} = 0,2668 - 0,2645 = 0,0023 m^3$$

### ***Volum de la Columna:***

A continuació es realitza el mateix procediment pel cos de la columna. Es calcula el volum intern d'aquesta:

$$V_{Int. D-1603} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Int. D-1603})^2 \cdot H_{TOT. D-1603} \quad \text{Equació 11.98}$$

$$V_{Int.2 D-1603} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,320)^2 \cdot 12,19 = 16,68 m^3$$

$$V_{Int.1 D-1603} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,383)^2 \cdot 14,02 = 21,06 m^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{Int. D-1603}$ : Volum interior de la columna [ m<sup>3</sup> ]

$D_{Int. D-1603}$ : Diàmetre interior de la columna [ m ]

$H_{TOT. D-1603}$ : Alçada total de la columna [ m ]

Seguidament, es calcula el volum extern del cos de l'equip:

$$V_{Ext. D-1603} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Ext. D-1603})^2 \cdot H_{TOT. D-1603} \quad \text{Equació 11.99}$$

$$V_{Ext.1 D-1603} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,320 + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 12,19 = 16,78 \text{ m}^3$$

$$V_{Ext.2 D-1603} = \frac{\pi}{4} \cdot (1,383 + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 14,02 = 21,18 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$V_{Ext. D-1603}$ : Volum exterior de la columna [ m<sup>3</sup> ]

$D_{Ext. D-1603}$ : Diàmetre exterior de la columna [ m ]

$H_{TOT. D-1603}$ : Alçada total de la columna [ m ]

Finalment, a partir de la diferència entre el volum interior i exterior del cos de la columna, s'obté la necessitat de material per a la construcció:

$$V_{Material Columna D-1603} = (V_{Ext. D-1603} - V_{Int. D-1603}) + V_{Material Capçals} \quad \text{Equació 11.100}$$

$$V_{Material Columna D-1603} = (16,79 - 16,68) + (21,18 - 21,06) + (0,0022 + 0,0023)$$

$$V_{Material Columna D-1603} = 0,2345 \text{ m}^3$$

### **Pes de la columna:**

Es procedeix a calcular el pes de la columna en les situacions següents:

### **Pes columna Buida:**

En aquest cas es calcula el pes de la columna buida, aplicant per això un sobredimensionant del 10%, tenint en compte la densitat del material en qüestió:

$$M_{D-1603,buida} = (V_{Material\ Columna\ D-1603} \cdot \rho_{acer\ 316L}) \cdot 1,1 \quad \text{Equació 11.101}$$

$$M_{D-1603,buida} = (0,2345 \cdot 8000) \cdot 1,1 = 2063,6\ kg$$

En què les variables corresponen a:

$M_{D-1603,buida}$ : Massa de la columna buida [ kg ]

$\rho_{acer\ 316L}$ : Densitat de l'acer inoxidable 316L  $\left(8000 \frac{kg}{m^3}\right)$

### **Pes de la columna en proves**

En aquest cas es calcula el pes total de la columna si aquesta estigués plena d'aigua. Es realitza el càlcul a partir del volum total de la columna i la densitat de l'aigua.

$$M_{D-1603,aigua} = M_{D-1603,buida} + ((V_{Int.\ 1\ D-1603} + V_{Int.\ Capçals-1603}) \cdot \rho_{aigua})$$

**Equació 11.102**

$$M_{D-1603,buida} = 2063,6 + (((18,68 + 21,06) + (0,2299 + 0,2645)) \cdot 1000) = 42298\ kg$$

En què les variables corresponen a:

$M_{D-1603,aigua}$ : Pes de la columna plena d'aigua [ kg ]

$\rho_{aigua}$ : Densitat de l'aigua  $\left(1000 \frac{kg}{m^3}\right)$

### **Pes de la columna en operació:**

Per últim, es realitza el càlcul del pes de la columna en condicions d'operació, a partir de la densitat de la mescla d'entrada a l'equip.

$$M_{D-1603,op} = M_{D-1603,buida} + ((V_{Int.\ D-1603} + 2 \cdot V_{Int.\ Capçals-1603}) \cdot \rho_{mescla})$$

**Equació 11.103**

$$M_{D-1603,buida} = 2063,6 + ((18,68 + 21,06) + (0,2299 + 0,2645)) \cdot 865,5 = 36886,5\ kg$$

En què les variables corresponen a:

$M_{D-1603,op}$ : Pes de la columna en condicions d'operació [ kg ]

$$\rho_{mescla}: \text{Densitat del corrent d'entrada} \left( 865,50 \frac{kg}{m^3} \right)$$

La densitat del corrent correspon a la proporcionada per el simulador "HYSYS"

#### 11.10.3.1.4. Aïllament de la columna

Degut a les condicions d'operació de la columna, s'ha tingut en compte la necessitat d'aïllar l'equip per mantenir aquestes condicions constants. S'ha escollit la llana de roca com a aïllant per l'equip, ja que les seves propietats són adients per aquestes condicions.

A continuació es calcula el gruix necessari per a aquest aïllant, considerant que les dues seccions de la columna són del diàmetre major entre elles:

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left( \frac{\Delta T}{D_{Ext.} \cdot D-1401} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad \text{Equació 11.104}$$

$$t_{aïllant} = \frac{30}{3,6 \cdot \left( \frac{(217,80 - 25)}{(1,383 + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}) \cdot 100} \right)^{\frac{1}{4}}} = 7,67 \text{ cm}$$

En què les variables corresponen a:

$t_{aïllant}$ : Gruix de l'aïllant de llana de roca [ cm ]

$\Delta T$ : Diferència de temperatura entre l'interior i l'exterior de la columna [ °C ]

$D_{Ext.} \cdot D-1603$ : Diàmetre extern de la columna [ cm ]

Pel que fa als valors típics per gruixos d'aïllants, s'ha escollit  $t_{aïllant} = 8 \text{ cm}$ , per tal d'utilitzar un valor unificat i facilitar la construcció de l'equip <sup>[9]</sup>.

Per últim es calcula el volum de material aïllant que serà necessari per a la construcció de l'equip. Primerament, es calculen les superfícies exteriors del cos de la columna i dels capçals:

$$S_{Ext. \text{ c}} = \pi \cdot D_{Ext. \text{ c}} \cdot H_{TOT. \text{ D-1403}} = \pi \cdot (1,383 + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}) \cdot (12,19 + 14,02) = 114,21 \text{ m}^2$$

$$S_{Ext. \text{ Capçals}} = 0,931 \cdot D_{Ext. \text{ c}}^2 = 0,931 \cdot (1,383 + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^2 = 1,79 \text{ m}^2$$

$$S_{Ext. \text{ TOT}} = S_{Ext. \text{ c}} + 2 \cdot S_{Capçals} = 114,21 + 2 \cdot 1,79 = 117,79 \text{ m}^2$$

A partir del càlcul de les superfícies, es calcula el valor del volum de material:

$$V_{aïllant} = S_{Ext. TOT} \cdot t_{aïllant} \quad \text{Equació 11.105}$$

$$V_{aïllant} = 117,79 \text{ m}^2 \cdot 0,08 \text{ m} = 9,42 \text{ m}^3$$

En què les variables corresponen a:

$$V_{aïllant}: \text{Volum del material aïllant [ m}^3 \text{ ]}$$

$$S_{Ext. TOT}: \text{Secció externa del cos cos de la columna [ m}^2 \text{ ]}$$

$$t_{aïllant}: \text{Gruix de l'aïllant [ m ]}$$

### 11.11. Tancs d'emmagatzematge

Els dissenys dels tancs d'emmagatzematge dels reactius i productes de la planta de ProQject s'han realitzat segons dues normatives, en funció de les característiques de l'emmagatzemament. Pel que fa a l'emmagatzemament a pressió atmosfèrica, característic del benzè, toluè i etilbenzè, es realitza mitjançant la normativa API 650 <sup>[1]</sup>. Quant a l'emmagatzematge a pressió, s'utilitzarà la normativa ASME vista anteriorment. Llavors, a continuació es realitzarà una demostració de cadascun dels dissenys implementats.

#### 11.11.1. Tancs d'emmagatzematge segons API 650

##### 11.11.1.1. Càlcul del volum del cos

Primerament, abans de dimensionar els tancs, és necessari conèixer el volum de producte que serà necessari emmagatzemar. Per això, s'utilitzarà l'Equació 11.106:

$$V_{líquid} = \frac{Q_m \cdot PM \cdot t_{stock}}{\rho} \quad \text{Equació 11.106}$$

On:

$$Q_m: \text{Cabal molar del producte a emmagatzemar} \left[ \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \right]$$

$$PM: \text{Pes molecular del producte a emmagatzemar} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$$

$$t_{stock}: \text{temps de estoc del producte [h]}$$

$$\rho: \text{Densitat del producte a emmagatzemar} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Llavors, s'analitzarà un cas de disseny d'un tanc per emmagatzemar benzè que s'alimentarà al procés. Seguint amb els valors calculats durant la simulació, es necessitaran al voltant de 437,4 kmol/h d'aliment. A més a més, s'ha establert un temps de estoc que sigui suficient per a poder abastir al procés en cas de fallada en la logística dels camions cisterna. Per aquest cas, serà al voltant de 82 hores. Llavors, conjuntament amb les propietats característiques d'aquest compost, es pot conèixer el valor del volum total a emmagatzemar:

$$V_{líquid} = \frac{437,42 \cdot 78,2 \cdot 81,92}{875,93} = 3200 \text{ m}^3 \text{ de benzè}$$

Llavors, partint d'aquest valor i mitjançant una recerca de les mides dels tancs més comuns per a diferents proveïdors, s'ha decidit dividir el volum total en 4 tancs amb les mateixes característiques. Per tant, el volum d'un tanc individual serà:

$$V = \frac{V_{líquid \text{ total}}}{n \text{ tancs}} \quad \text{Equació 11.107}$$

$$V = \frac{3200}{4} = 800 \text{ m}^3$$

Una vegada es coneix els volums de cadascun dels tancs, es dimensionarà el tanc segons aquest volum i d'acord amb els diàmetres i altures suggerides per l'estàndard API 650. També, un del factor que ha sigut influent a l'hora de decidir el temps de estoc ha sigut el dimensionament envers aquesta taula, degut a que es busca tenir un 20% de sobredimensionament. Llavors, a la Taula 11.28 es troben les altures i diàmetres típics per tancs amb viroles de 2.5 metres.

**Taula 11.28: Mesures típiques de disseny i capacitat nominal corresponent per tancs amb anells de 96 polzades d'alt per planxa**

WELDED TANKS FOR OIL STORAGE A-7

Table A-3b—(USC) Typical Sizes and Corresponding Nominal Capacities (barrels)  
for Tanks with 96-in. Courses

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8	Column 9
Tank Diameter ft	Capacity per ft of Height barrels	Tank Height (ft) / Number of Courses in Completed Tank						
		16 / 2	24 / 3	32 / 4	40 / 5	48 / 6	56 / 7	64 / 8
10	14.0	225	335	450	—	—	—	—
15	31.5	505	755	1,010	1,260	—	—	—
20	56.0	900	1,340	1,790	2,240	2,690	—	—
25	87.4	1,400	2,100	2,800	3,500	4,200	4,900	5,600
30	126	2,020	3,020	4,030	5,040	6,040	7,050	8,060
35	171	2,740	4,110	5,480	6,850	8,230	9,600	10,980
40	224	3,580	5,370	7,160	8,950	10,740	12,540	14,340
45	283	4,530	6,800	9,060	11,340	13,600	15,880	18,140
50	350	5,600	8,400	11,200	14,000	16,800	19,600	22,400
60	504	8,060	12,100	16,130	20,160	24,190	28,220	32,250
								<i>D = 54</i>
70	685	10,960	16,450	21,950	27,440	32,930	38,420	—
80	895	14,320	21,500	28,670	35,840	42,310	48,780	—
90	1,133	18,130	27,220	36,290	45,360	53,830	62,300	—
100	1,399	22,380	33,600	44,800	55,360	66,320	77,280	—
120	2,014	32,250	48,380	64,200	80,160	96,120	112,080	—
				<i>D = 110</i>				
140	2,742	43,900	65,860	—	—	—	—	—
160	3,581	57,340	84,600	—	—	—	—	—
180	4,532	72,570	105,140	—	—	—	—	—
200	5,595	89,600	—	—	—	—	—	—
220	6,770	108,410	—	—	—	—	—	—

D'aquesta taula es pot extreure la següent informació:

Diàmetre suggerit: 9,14 metres (30 ft)

Altura: 14,63 metres (48 ft)

Nombre d'anells: 6

Per tant, amb aquesta informació extreta de la Taula 11.28, es pot calcular el volum del cos cilíndric dimensionat, mitjançant l'Equació 11.108:

$$V_{cilindre} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h \quad \text{Equació 11.108}$$

On:

*D*: Diàmetre del tanc [m]

$h$ : altura del tanc [m]

Llavors, pels tancs de benzè el volum serà:

$$V_{cilindre} = \frac{\pi}{4} \cdot 9,14^2 \cdot 14,63 = 960 \text{ m}^3$$

Tot seguit, es realitza la comprovació de si el sobredimensionament del tanc és del 20 % fixat per ProQject:

$$\% \text{Sobredimensionat} = \frac{960 - 800}{800} \cdot 100 = 20\%$$

Per tant, es compleix amb la premissa establerta. Per una altra banda, també serà necessari per a futurs càlculs la determinació de l'altura del líquid dins del tanc. Per aconseguir-ho s'aïllarà l'alçada en l'equació del volum del cilindre i s'utilitzarà el volum de líquid calculat anteriorment com a valor del volum:

$$h = \frac{4 \cdot V_{líquid}}{\pi \cdot D^2} \quad \text{Equació 11.109}$$

On:

$D$ : Diàmetre del tanc [m]

$V_{líquid}$ : Volum del líquid en un tanc individual [ $\text{m}^3$ ]

Llavors:

$$h = \frac{4 \cdot 800}{\pi \cdot 9,14^2} = 12,19 \text{ m}$$

### 11.11.1.2. Espessor del cos

Pel càlcul de l'espessor del tanc, es calcularà el valor per a cadascun dels anells que hi ha al tanc. Per això, primerament s'ha de definir els materials de construcció dels tancs. Per tant, pel cas dels tancs dissenyats per la normativa API 650, s'utilitzarà un tipus de metall característic per a cada producte. Pel cas del benzè, s'utilitzarà acer ASTM A516 G70; pel toluè acer AISI 304L; i per l'etilbenzè acer AISI 316L. Tot seguit es mostren taules característiques de cada tipus d'acer on es troben propietats mecàniques i de disseny.



*Taula 11.29: Propietats de l'acer ASTM A516 G70*

<b>Acer ASTM A516 G70</b>	
Densitat (kg/m <sup>3</sup> )	7800
Mínima tensió de ruptura (Mpa)	485
Límit elàstic (Mpa)	260
CA (espessor de sobre corrosió) (mm)	2,5
Màxim espessor de la placa (mm)	40
Sd (MPa)	173,3
St (MPa)	195

*Taula 11.30: Propietats de l'acer AISI 304L*

<b>Acer AISI 304L</b>	
Densitat (kg/m <sup>3</sup> )	8000
Mínima tensió de ruptura (Mpa)	564
Límit elàstic (Mpa)	210
CA (espessor de sobre corrosió) (mm)	2,5
Màxim espessor de la placa (mm)	40
Sd (MPa)	140
St (MPa)	157,5

*Taula 11.31: Propietats de l'acer AISI 316L*

<b>Acer AISI 316L</b>	
<b>Densitat (kg/m<sup>3</sup>)</b>	8000
<b>Mínima tensió de ruptura (Mpa)</b>	550
<b>Límit elàstic (Mpa)</b>	240
<b>CA (espessor de sobre corrosió) (mm)</b>	2.5
<b>Màxim espessor de la placa (mm)</b>	40
<b>Sd (MPa)</b>	160
<b>St (MPa)</b>	180

Aquests valors de les taules s'utilitzaran per conèixer l'espessor necessari. Per, abans de realitzar el càlcul, s'haurà de conèixer l'espessor mínim en funció del diàmetre del tanc per a anells de 96 polzades. Per això, s'utilitzarà la Taula 11.32 extreta de la normativa API 650.

**Taula 11.32: Espessor de placa mínims per mesures típiques de tancs amb anells de 96 polzades d'alt**

WELDED TANKS FOR OIL STORAGE A-9

**Table A-4b—(USC) Shell-Plate Thicknesses (in.) for Typical Sizes of Tanks with 96-in. Courses**

Column 1	Column 2	Column 3	Column 4	Column 5	Column 6	Column 7	Column 8	Column 9	Column 10
Tank Height Diameter ft	Tank Height (ft) / Number of Courses in Completed Tank								Maximum Allowable Height for Diameter <sup>a</sup> ft
	8 / 1	16 / 2	24 / 3	32 / 4	40 / 5	48 / 6	56 / 7	64 / 8	
10	3/16	3/16	3/16	3/16	—	—	—	—	—
15	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	—	—	—	—
20	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	—	—	—
25	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	0.20	0.23	—
30	3/16	3/16	3/16	3/16	3/16	0.21	0.24	0.28	—
35	3/16	3/16	3/16	3/16	0.20	0.24	0.28	0.33	—
40	3/16	3/16	3/16	3/16	0.23	0.28	0.32	0.37	—
45	3/16	3/16	3/16	0.21	0.26	0.31	0.36	0.42	—
50	1/4	1/4	1/4	0.25	0.29	0.35	0.40	0.46	—
60	1/4	1/4	1/4	0.27	0.34	0.41	0.48	—	58.2
70	1/4	1/4	1/4	0.32	0.40	0.48	—	—	50.0
80	1/4	1/4	0.27	0.37	0.46	—	—	—	43.9
90	1/4	1/4	0.31	0.41	—	—	—	—	39.1
100	1/4	1/4	0.34	0.46	—	—	—	—	35.3
120	5/16	5/16	0.41	—	—	—	—	—	29.6
140	5/16	5/16	0.47	—	—	—	—	—	25.5
160	5/16	0.35	—	—	—	—	—	—	22.5
180	5/16	0.40	—	—	—	—	—	—	20.1
200	5/16	0.44	—	—	—	—	—	—	18.2
220	3/8	0.48	—	—	—	—	—	—	16.6

Llavors, per a tancs amb un diàmetre de 9,14 metres (30 polzades) el valor mínim d'espessor serà de 4,76 mil·límetres (3/16 polzades). Per tant, l'espessor dels anells no podrà ser inferior a aquest per assegurar una seguretat i estabilitat correcta pels tancs.

Seguidament, es calcularà l'espessor de disseny de l'anell i l'espessor en prova hidroestàtica de l'anell i es compararà amb el valor mínim vist a la taula. Per aconseguir-ho s'utilitzaran les següents dues equacions <sup>[2]</sup> :

Per disseny:

$$td = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H - 0,3) \cdot G}{Sd} + CA \quad \text{Equació 11.110}$$

Per prova hidrostàtica:

$$tt = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H - 0,3)}{St} \quad \text{Equació 11.111}$$

On:

*td*: Espesor de disseny de l'anell [mm]

*td*: Espesor en prova hidrostàtica de l'anell [mm]

*D*: Diàmetre del tanc [m]

*H*: Nivell del líquid de disseny [m]

*G*: Densitat del fluid respecte la de l'aigua

*CA*: Corrosió admissible, especificada per ProQject [mm]

*Sd*: Esforç admissible per la condició de disseny [MPa]

*St*: Esforç admissible per la condició de prova hidrostàtica [MPa]

Llavors els càlculs per a cada anell seran:

$$td1 = \frac{4,9 \cdot 9,14 \cdot (12,19 - 0,3) \cdot 0,866}{173} + 2,5 = 5,4 \text{ mm}$$

$$tt1 = \frac{4,9 \cdot 9,14 \cdot (12,19 - 0,3)}{195} = 2,96 \text{ mm}$$

$$td2 = \frac{4,9 \cdot 9,14 \cdot (12,19 - 2,5 - 0,3) \cdot 0,866}{173} + 2,5 = 4,8 \text{ mm}$$

$$tt2 = \frac{4,9 \cdot 9,14 \cdot (12,19 - 2,5 - 0,3)}{195} = 2,35 \text{ mm}$$

$$td3 = \frac{4,9 \cdot 9,14 \cdot (12,19 - 2 \cdot 2,5 - 0,3) \cdot 0,866}{173} + 2,5 = 4,2 \text{ mm}$$

$$tt3 = \frac{4,9 \cdot 9,14 \cdot (12,19 - 2 \cdot 2,5 - 0,3)}{195} = 1,75 \text{ mm}$$

$$td4 = \frac{4,9 \cdot 9,14 \cdot (12,19 - 3 \cdot 2,5 - 0,3) \cdot 0,866}{173} + 2,5 = 3,6 \text{ mm}$$

$$tt4 = \frac{4,9 \cdot 9,14 \cdot (12,19 - 3 \cdot 2,5 - 0,3)}{195} = 1,14 \text{ mm}$$

$$td5 = \frac{4,9 \cdot 9,14 \cdot (12,19 - 4 \cdot 2,5 - 0,3) \cdot 0,866}{173} + 2,5 = 3 \text{ mm}$$

$$tt5 = \frac{4,9 \cdot 9,14 \cdot (12,19 - 4 \cdot 2,5 - 0,3)}{195} = 0,53 \text{ mm}$$

$$td6 = \frac{4,9 \cdot 9,14 \cdot (12,19 - 5 \cdot 2,5 - 0,3) \cdot 0,866}{173} + 2,5 = 2,42 \text{ mm}$$

$$tt6 = \frac{4,9 \cdot 9,14 \cdot (12,19 - 5 \cdot 2,5 - 0,3)}{195} = 0 \text{ mm}$$

**Taula 11.33: Taula resum dels espessors calculats per a cada anell.**

	Espessor mínim (mm)	Espessor de disseny (mm)	Espessor per prova hidrostàtica (mm)	Espessor definitiu sobredimensionat (mm)
1r anell	5	5,4	2,96	6,5
2n anell	5	4,8	2,35	6,6
3r anell	5	4,2	1,75	6,7
4t anell	5	3,6	1,14	6,8
5è anell	5	3	0,53	6,9
6è anell	5	2,43	0	6,10

A continuació, en la Taula 11.33 es mostra un resum, on es presenten els valors dels espessors calculats i el mínim. També, aquest espessor es sobredimensionarà per tenir més marge de seguretat, per tant, també es presentarà l'espessor final adoptat per dimensionar el tanc.

### 11.11.1.3. Espessor del fons

En aquest cas, el fons del tanc serà pla. Llavors, per calcular el fons del tanc s'utilitzarà la Taula 11.34 per veure el mínim espessor de disseny a considerar per les làmines del fons, tenint en compte l'esforç de prova hidroestàtica i l'espessor del primer anell.

**Taula 11.34: Espessor mínim del fons segons API 650**

Espesor Mínimo (mm) del Primer Anillo del Cuerpo	Esfuerzo Calculado para Prueba Hidrostática en el Primer Anillo del Cuerpo (Kg/cm <sup>2</sup> )			
	<1989	<2109	<2320	<2530
t < 19.05	6.35	6.35	7.14	8.73
09.05 < 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

Per tant, segons els valors coneguts d'espessor del primer anell i el Sd, l'espessor mínim del fons serà 6,35 mil·límetres. Tal com s'ha fet en el cas de l'espessor del cos, es sobredimensionarà per tenir més marge de seguretat, sent el valor final 8 mil·límetres.

#### 11.11.1.4. Espessor del sostre

En els tancs dissenyats per la normativa API 650, s'utilitzarà un sostre cònic autosoportat. Aquests sostres s'utilitzen en tancs relativament petits. Aquests consisteixen en un con d'una placa soldada, el qual, gràcies a la seva forma física, a més de confirmar mitjançant un anàlisi de flexió basat en la teoria de plaques, és capaç de suportar-se sense cap element estructural i només suportat a la seva perifèria pel perfil de coronament. Aquests sostres es dissenyen i es calculen per a tanques que no excedeixen un diàmetre de 18.288 m.

Els sostres cònics autosoportats tindran com a màxima un pendent de 37º i com a mínima de 9.5º respecte a l'horitzontal. L'espessor estarà determinada per l'expressió següent, però no haurà de ser inferior a 4.76 mm ni superior a 12.7 mm.

Llavors, des de ProQject s'ha decidit utilitzar un angle respecte l'horitzontal d'uns 17º. Amb aquest valor, es pot procedir al càlcul de l'espessor, mitjançant l'Equació 11.112.

$$e = \frac{D}{400 \cdot \sin\theta} \quad \text{Equació 11.112}$$

On:

*D*: diàmetre del tanc [m]

*θ*: angle respecte a l'horitzontal [º]

Llavors:

$$e = \frac{9,14}{400 \cdot \sin 17} = 6,51 \text{ mm}$$

Si s'arrodoneix per donar un valor més estàndard, l'espessor serà de 7 mil·límetres al sostre del tanc .

### 11.11.1.5. Pressió de disseny

La pressió de disseny del tanc serà la suma de l'operacional i la hidroestàtica, amb un marge d'un 15% per augmentar la seguretat en cas de variacions en la pressió per culpa d'un mal funcionament de la vàlvula de seguretat. Respecte a la pressió d'operació, pel cas del benzè, serà de 1 atmosfera. Pel que fa a la pressió hidroestàtica, que es la pressió a la qual se sotmetrà un cos submergit en un fluid es calcula mitjançant l'Equació 11.113.

$$P_{hidroestàtica} = \rho \cdot g \cdot h \quad \text{Equació 11.113}$$

On:

$$\rho: \text{Densitat del fluid} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$g: \text{gravetat} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$$h: \text{Altura del fluid} [m]$$

Llavors:

$$P_{hidroestàtica} = 876 \cdot 9,8 \cdot 12,19 \cdot \left( \frac{1}{101325} \right) = 1,033 \text{ atm}$$

Per tant la pressió de disseny amb un sobredimensionament del 15% serà:

$$P_{disseny} = (1 + 1,033) \cdot 1,15 = 2,34 \text{ atm}$$

### 11.11.1.6. Temperatura de disseny

Segons l'estàndard API 650, els tancs dissenyats segons les recomanacions d'aquesta normativa es poden dissenyar per a una temperatura màxima de funcionament de 93°C. Llavors, per assegurar que es realitza un emmagatzematge segur, se sobredimensionarà 15°C respecte de la temperatura atmosfèrica.

$$T_{disseny} = T_{ambient} + 15 = 25 + 15 = 40^{\circ}C$$

### 11.11.1.7. Pes del tanc

El càlcul del pes de l'equip es dividirà en tres zones: el cos, capçal i fons. Aquests tres casos tenen en comú que calcularan el volum que ocupa i, posteriorment, es multiplicaran per la densitat. Per tant, a continuació es presenten les tres fórmules que caracteritzaran el pes del tanc buit.

Pel capçal:

$$M_{\text{capçal}} = \frac{\pi}{3} \cdot \left( \left( \frac{De}{2} \right)^2 - \left( \frac{Di}{2} \right)^2 \right) \cdot h_{\text{capçal}} \cdot \rho_{\text{metall}} \quad \text{Equació 11.114}$$

Pel cos:

$$M_{\text{cos}} = \pi \cdot \left( \left( \frac{De}{2} \right)^2 - \left( \frac{Di}{2} \right)^2 \right) \cdot h_{\text{cos}} \cdot \rho_{\text{metall}} \quad \text{Equació 11.115}$$

Pel fons:

$$M_{\text{fons}} = \pi \cdot \left( \frac{De}{2} \right)^2 \cdot \tau_{\text{fons}} \cdot \rho_{\text{metall}} \quad \text{Equació 11.116}$$

On:

*De*: Diàmetre exterior [m]

*Di*: Diàmetre intern [m]

*hcapçal*: Alçada del capçal [m]

*hcos*: Alçada del cos [m]

*τfons*: Espessor del fons [m]

*ρmetall*: Densitat del metall de construcció  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

Llavors:

$$M_{\text{capçal}} = \frac{\pi}{3} \cdot \left( \left( \frac{9,154 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 - \left( \frac{9,14 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \right) \cdot 1,42 \cdot 7800 = 742,7 \text{ kg}$$

$$M_{\text{cos}} = \pi \cdot \left( \left( \frac{9,153 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 - \left( \frac{9,14 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \right) \cdot 14,63 \cdot 7800 = 21314 \text{ kg}$$

$$M_{\text{fons}} = \pi \cdot \left( \frac{9,153 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 7800 = 4105,8 \text{ kg}$$

El sumatori del pes de les tres zones, afegides al pes de fluid que hi ha dins del tanc, donen com a resultat el pes del tanc ple:

$$M_{\text{total}} = 742,7 + 21314 + 4105,8 + 800 \cdot 875 = 726828 \text{ kg}$$

### 11.11.2 Tancs d'emmagatzematge segons ASME

En el Projecte Atenea, alguns tancs s'han dissenyat seguint la normativa ASME, acord a les necessitats d'aquests i de la planta.



Els tancs que s'han dissenyat segons la normativa ASME són els tancs d'emmagatzematge de metà, età i els tancs agitats. Segons la seva nomenclatura: T-906; T-907; T-908; T909; TA-1501; TA-1502; TA-1503.

A continuació es mostra els càlculs realitzats amb l'exemple dels càlculs del tanc T-908. També s'afegirà un exemple de càlcul de l'agitador pel tanc TA-1501 al final de l'apartat.

### 11.11.2.1. Càlcul del volum del cos

Primerament, abans de dimensionar els tancs, és necessari conèixer el volum de producte que serà necessari emmagatzemar. Per això, s'utilitzarà la mateixa equació que al disseny mitjançant API 650.

$$V_{líquid} = \frac{Q_m \cdot PM \cdot t_{stock}}{\rho} \quad \text{Equació 11.117}$$

Llavors, aquest emmagatzematge serà característic de fluids altament volàtils com són el metà i età. Per demostrar un exemple de càlcul, es mostrarà el càlcul d'un dels tancs d'età. Llavors, fixant un temps de stock, coneixent el cabal volumètric que sortirà de la torres de destil·lació D-1402, i la densitat de l'età líquid a -32°C i 10 atmosferes de pressió, es calcula el volum total a emmagatzemar.

$$V_{líquid} = \frac{276 \cdot 30 \cdot 85}{465,4} = 1516 \text{ m}^3$$

Llavors, partint d'aquest valor i mitjançant una recerca de les mides dels tancs més comuns per a diferents proveïdors, s'ha decidit dividir el volum total en 2 tancs amb les mateixes característiques. Per tant, el volum d'un tanc individual es calcularà de la mateixa forma que amb API 650:

$$V_{individual} = \frac{1516}{2} = 758 \text{ m}^3$$

Una vegada es coneix el volum individual del tanc, ProQject proposa una relació de 1,5 entre el diàmetre i l'alçada del tanc, per poder dimensionar el cos del tanc. Llavors, amb aquesta relació, i aplicant la mateixa fórmula de càlcul del volum que mitjançant API 650 es realitza amb l'eina d'Excel solver la resolució per aconseguir un volum que sigui un 20% superior a la del fluid al tanc. Els valors es presenten a la Taula 11.35.

**Taula 11.35: Volum, alçada i diàmetre del cos del tanc**

<b>Volum del cos (m<sup>3</sup>)</b>	909
<b>Diàmetre (m)</b>	12
<b>Alçada (m)</b>	8

Quant a l'alçada del líquid al tanc, es calcula de la mateixa forma que al disseny anterior:

$$h_{líquid} = \frac{4 \cdot 758}{\pi \cdot 12^2} = 6,68 \text{ m}$$

### 11.11.2.2. Espessor del cos

El material que s'utilitzarà tant en l'emmagatzematge de l'età com del metà serà metall AISI 304L, el qual té la taula d'especificacions a l'apartat anterior. Coneixent el material de construcció, es pot calcular l'espessor del tanc mitjançant l'Equació 11.118.

$$t_{cos} = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} + CA \quad \text{Equació 11.118}$$

On:

*P*: Pressió de disseny [psi]

*R*: radi interior del tanc [inches]

*S*: Esforç màxim admissible del material [psi]

*E*: Eficiència de soldadura (0,85)

*CA*: Sobreessessor per corrosió [mm]

Llavors:

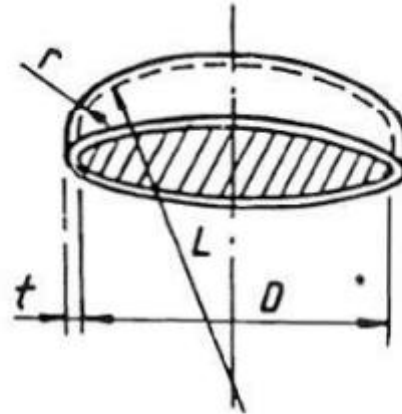
$$t_{cos} = \frac{169 \cdot 236,6}{30458,4 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 169} + 2,5 = 3,28 \text{ mm}$$

L'espessor final es sobredimensionarà fins a 3,78 mm.

### 11.11.2.3. Espessor dels extrems

En aquests tipus de tancs, els dos extrems tindran una mateixa forma toriesfèrica. Llavors, abans de calcular l'espessor, s'haurà de conèixer el factor M que més tard serà necessari. Aquest es

calcula mitjançant dues equacions que es mostren a la següent figura on es representa la forma d'aquests tipus d'extrems.



f

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

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

Figura 11.57: Equacions superfície tori esfèrica

Per tant, els valors dependrà del diàmetre calculat anteriorment:

$$L = 0,9 \cdot 12 = 10,81m$$

$$r = 0,085 \cdot 10,81 = 0,92m$$

Amb aquests valors i mitjançant la Taula 11.36 que mostra el valor del factor M en funció de la relació dels dos paràmetres, es pot conèixer el valor d'aquest.

Taula 11.36: Factor M en funció de L/r

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

\* THE MAXIMUM ALLOWED RATIO : L = D + 2t (see note 2 on facing page)

El valor del factor M pels tancs d'età serà 1,62.

Llavors, per calcular l'espessor dels extrems toriesfèrics , s'utilitzarà l'Equació 11.119.

$$t_{\text{capçal}} = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} + CA \quad \text{Equació 11.119}$$

On:

*P*: Pressió de disseny [psi]

*L*: Longitud del capçal [inches]

*S*: Esforç màxim admissible del material [psi]

*E*: Eficiència de soldadura (0,85)

*CA*: Sobreessessor per corrosió [mm]

*M*: Factor *M* (1,62)

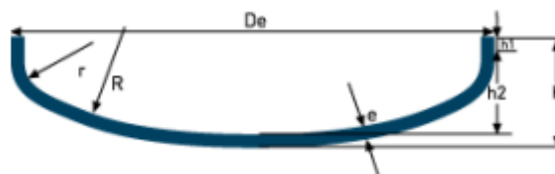
Llavors:

$$t_{\text{capçal}} = \frac{169,5 \cdot 425,95 \cdot 1,62}{2 \cdot 169,5 \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 169,5} + 2,5 = 5,24 \text{ mm}$$

L'essessor final es sobredimensionarà fins a 6 mm

#### 11.11.2.4. Càlcul de l'altura del capçal tori esfèric

Pel càlcul de l'alçada del capçal tori esfèric, utilitzat a l'anterior apartat, s'utilitzarà com a referència la següent figura que mostra un fragment del document de suport per a la realització d'aquest apartat <sup>[3]</sup>.



R:  $De$

$r$ :  $R/10$

$h1$ :  $3.5e$

$h2$ :  $0.1935De - 0.455e$

$h_{\text{cabecal toriesfèric}}$ :  $h2 + h1 + e$

Figura 11.58: Equacions pel càlcul de les superfícies tori esfèriques dels tancs

Llavors:

$$R = 12m$$

$$r = \frac{12}{10} = 1,2 m$$

$$h1 = 3,5 \cdot 0,00524 = 0,021m$$

$$h2 = 0,1935 \cdot 12 - 0,455 \cdot 0,00524 = 2,32m$$

$$h_{capçal} = 0,021 + 2,32 = 2,35 m$$

### 11.11.2.5. Aïllament del tanc

Tant l'età com el metà són emmagatzemats a temperatures extremadament baixes, per aquest motiu s'aplicarà un aïllament del recipient conjuntament amb un sistema de mitja canya o camisa per mantenir la temperatura interior constant. Pel cas de l'aïllament, s'utilitzarà Foamglass per aïllar els extrems i perlita expandida pel cos. Les seves propietats pel càlcul de l'aïllament es troben a les següents taules:

**Taula 11.37: Propietats perlita expandida**

Perlita expandida (cos)	
Densitat (kg/m <sup>3</sup> )	87.5
Conductivitat tèrmica (W/mK)	0.03

**Taula 11.38: Propietats Foamglass**

Foamglass (capçals)	
Conductivitat tèrmica (W/mK)	0.045
Densitat (kg/m <sup>3</sup> )	165

El càlcul de l'espessor de l'aïllament es fa a partir de la taxa de vaporització diària admissible del fluid a emmagatzemar. Des de ProQject s'ha decidit que aquesta taxa serà d'un 0,2% diari, per tant, la quantitat de producte evaporat per dia serà:

$$Volum\ evaporat\ diari = 758 m^3 \cdot 0,002 = 1,51 \frac{m^3}{dia}$$

Si passem a quilograms:

$$Kg\ evaporat\ diari = 1,51 \frac{m^3}{dia} \cdot 465,4 \frac{kg}{m^3} = 706 \frac{kg\ età}{dia}$$

A partir de la quantitat total de quilograms evaporats per dia i coneixent que la calor de vaporització de l'età és 488 kJ/Kg, es pot conèixer la calor màxima a aportar per complir amb la taxa de vaporització fixada, en kW:

$$Q_{m\grave{a}x} = 706 \frac{kg \text{ età}}{dia} \cdot 488 \frac{kJ}{kg} \cdot \frac{1 \text{ dia}}{24 \cdot 3600 \text{ s}} = 3,98 \text{ kW}$$

Seguidament, una vegada es coneix la calor màxim que es pot intercanviar al tanc, es pot procedir al càlcul de l'espessor de l'aïllant mitjançant un l'Equació 11.120 que s'utilitza per mesurar la conducció de calor a través de materials. S'ha de remarcar que posteriorment a aquest aïllant, hi haurà una capa exterior d'acer AISI 304L amb una espessor de 6 mil·límetres.

$$Q_{m\grave{a}x} = \frac{T_{m\grave{a}x. \text{exterior}} - T_{\text{interior}}}{\frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_{int}}\right)}{2\pi K_{304L} \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K_{P.E.} \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_2}\right)}{2\pi K_{304L} \cdot L}} \quad \text{Equació 11.120}$$

On:

$Q_{m\grave{a}x}$ : Calor màxima bescanviada [W]

$T_{m\grave{a}x. \text{exterior}}$ : Temperatura màxima possible [°C]

$T_{\text{interior}}$ : Temperatura interior [°C]

$K_{304L}$ : Conductivitat tèrmica de l'acer AISI 304L  $\left[\frac{W}{mK}\right]$

$K_{P.E.}$ : Conductivitat tèrmica de la perlita expandida  $\left[\frac{W}{mK}\right]$

$r_{int}$ : radi interior [m]

$r_{ext}$ : radi exterior [m]

Llavors:

$$3980 = \frac{65 - (-32)}{\frac{\ln\left(\frac{6 + 0,0037}{6}\right)}{2\pi \cdot 16,2 \cdot 8} + \frac{\ln\left(\frac{6 + 0,0037 + e}{6 + 0,0037}\right)}{2\pi \cdot 0,03 \cdot 8} + \frac{\ln\left(\frac{6 + 0,0037 + 0,006 + e}{6 + 0,0037 + e}\right)}{2\pi \cdot 16,2 \cdot 8}}$$

$$e = 0,234 \text{ m}$$

Llavors per la capa d'aïllant del cos serà necessari una espessor de 234 mil·límetres de perlita expandida.

Pel cas dels capçals tori esfèrics, l'espessor es calcularà de la mateixa forma però aplicant la longitud del capçal calculat anteriorment i la conductivitat del Foamglass. Donant com a resultat, una espessor de 283 mil·límetres de Foamglass.

### 11.11.2.6. Pressió de disseny

La pressió de disseny del tanc serà la suma de l'operacional i la hidroestàtica, amb un marge d'un 15% per augmentar la seguretat en cas de variacions en la pressió per culpa d'un mal funcionament de la vàlvula de seguretat. Respecte a la pressió d'operació, pel cas del metà, serà de 9,87 atmosferes. Pel que fa a la pressió hidroestàtica, que és la pressió a la qual se sotmetrà un cos submergit en un fluid es calcula mitjançant l'equació utilitzada anteriorment.

$$P_{hidrostàtica} = \rho \cdot g \cdot h \quad \text{Equació 11.121}$$

Llavors:

$$P_{hidrostàtica} = 465 \cdot 9,8 \cdot 8 \cdot \left(\frac{1}{101325}\right) = 0,3 \text{ atm}$$

Per tant, la pressió de disseny amb un sobredimensionament del 15% serà:

$$P_{disseny} = (9,87 + 0,3) \cdot 1,15 = 11,7 \text{ atm}$$

### 11.11.2.7. Temperatura de disseny

Pel cas dels tancs dissenyats segons el codi ASME, igual que pes del codi API 650, la temperatura de disseny del tanc serà 15°C superior a la que es trobarà el líquid emmagatzemat. Llavors, pel cas de l'età:

$$T_{disseny} = -37 + 15 = -22^{\circ}\text{C}$$

### 11.11.2.8. Pes de l'equip

El càlcul del pes de l'equip es dividirà en dues zones: el cos i els extrems toricsfèrics. Aquests dos casos tenen en comú que calcularan el volum que ocupa i, posteriorment, es multiplicaran per la densitat. A més a més, com s'ha esmentat anteriorment, hi haurà tres capes al tanc, dues de metall i una d'aïllant.

Llavors partint de l'equació vista al codi API 650, es calcularà el pes de les tres capes pel cos del tanc:

$$M_{cos} = \pi \cdot \left(\left(\frac{D_e}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_i}{2}\right)^2\right) \cdot h_{cil} \cdot \rho_{material} \quad \text{Equació 11.122}$$

$$M_{capa interior} = \pi \cdot \left(\left(\frac{12,03}{2}\right)^2 - \left(\frac{12}{2}\right)^2\right) \cdot 8 \cdot 8000 = 9124 \text{ kg}$$

$$M_{aïllant} = \pi \cdot \left(\left(\frac{12,49}{2}\right)^2 - \left(\frac{12,03}{2}\right)^2\right) \cdot 8 \cdot 87,5 = 6344 \text{ kg}$$

$$M_{\text{capa exterior}} = \pi \cdot \left( \left( \frac{12,5}{2} \right)^2 - \left( \frac{12,49}{2} \right)^2 \right) \cdot 8 \cdot 800 = 14735 \text{ kg}$$

$$M_{\text{total. cos}} = 9124 + 6344 + 14735 = 30203 \text{ kg}$$

I, pel cas dels extrems, s'utilitzarà la següent equació, que es característica pel volum de superfícies tori esfèriques.

$$M_{\text{capçal tori esfèric}} = 0,008089 \cdot e^3 \cdot \rho_{\text{material}}$$

On:

*D*: espessor de la capa [m]

$\rho_{\text{material}}$ : densitat del material  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

Llavors:

$$M_{\text{capa interior}} = 0,008089 \cdot 0,006^3 \cdot 8000 = 42,3 \text{ kg}$$

$$M_{\text{aïllant}} = 0,008089 \cdot 0,283^3 \cdot 165 = 43 \text{ kg}$$

$$M_{\text{capa exterior}} = 0,008089 \cdot 0,165^3 \cdot 8000 = 133 \text{ kg}$$

$$M_{\text{total. extrems}} = 42,3 + 43 + 133 = 218,3 \text{ kg}$$

$$M_{\text{total. buit}} = 218,3 + 30203 = 30641 \text{ kg}$$

Llavors, sumant el pes de les dues zones buides i la quantitat de fluid emmagatzemat, es pot conèixer el pes del tanc ple:

$$M_{\text{total}} = 30641 + 758 \cdot 465,4 = 383493 \text{ kg}$$

### 11.11.2.9. Agitació del tanc

Pel que fa a l'agitació dels mescladors, primerament és fan els càlculs dels requisits físics d'aquest, segons les correlacions estàndards que tenen per objectiu l'excel·lència operacional:

$$Da = E = \frac{D_{\text{int}}}{3} = \frac{4,76}{3} = 1,59 \text{ m}$$

$$J = \frac{D_{\text{int}}}{12} = \frac{4,76}{12} = 0,4 \text{ m}$$

$$W = \frac{D_{\text{int}}}{5} = \frac{4,76}{5} = 0,952 \text{ m}$$

$$f = 0,1 \cdot D_{\text{int}} = 0,1 \cdot 4,76 = 0,476 \text{ m}$$

$$L = \frac{Da}{4} = \frac{1,59}{4} = 0,396 \text{ m}$$

$$Ha = 7,14 + 0,952 - 1,59 = 6,5 \text{ m}$$



On:

*Da*: Diàmetre de la turbina de l'agitador [m]

*E*: distància al fons del tanc [m]

*Dint*: Diametre intern del tanc [m]

*J* = Amplada del deflector [m]

*W*: Amplada de les pales [m]

*f*: Espai entre els deflectors i les parets del tanc [m]

*L*: Alçada de les pales [m]

*Ha*: Alçada de l'agitador [m]

*H*: Alçada del tanc [m]

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

$$\left(\frac{N \cdot Da^2 \cdot \mu}{\sigma \cdot Dint}\right) \cdot \left(\frac{\rho \cdot \sigma^3}{g \cdot \mu^4}\right) = 2 \cdot \left(\frac{H}{Dint}\right)^{0,5} \quad \text{Equació 11.123}$$

On:

*N*: Velocitat angular de l'agitador [rps]

*ρ*: Densitat de la mescla  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

*μ*: Viscositat de la mescla [Pa · s]

*σ*: Constant (0,3)

*g*: gravetat  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

Llavors:

$$\left(\frac{N \cdot 1,59^2 \cdot 0,001}{0,3 \cdot 4,76}\right) \cdot \left(\frac{876 \cdot 0,3^3}{9,8 \cdot 0,001^4}\right) = 2 \cdot \left(\frac{7,14}{4,76}\right)^{0,5}$$

$$N = 1,08 \text{ rps} = 64,7 \text{ rpm}$$

Coneixent el valor de N i determinant que el nombre de pales planes serà 4, es pot calcular la potència disponible:

$$P = Np \cdot \rho \cdot N^3 \cdot Da^5 \quad \text{Equació 11.124}$$

On:

*Np*: Nombre de pales planes

*N*: Velocitat de l'agitador [rps]

$$\rho: \text{Densitat de la mescla} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

*Da*: Diàmetre de la turbina de l'agitador [m]

Llavors:

$$P = 4 \cdot 876 \cdot 1,08^3 \cdot 1,59^5$$

$$P = 50491 \text{ W}$$

Coneixent que el rendiment de l'agitador serà del 80%, la potència necessària serà:

$$P = \frac{50491}{0,8} = 63114 \text{ W} = 63,11 \text{ kW}$$

## 11.12. Tanc pulmó

A la planta de ProQject es construirà un tanc pulmó amb la finalitat de condicionar l'etilè diluït que arriba des de canonades per assegurar que entra al procés amb les condicions i cabal desitjat. Llavors, per poder dimensionar-ho, s'hauran de fer alguns càlculs que es mostren tot seguit.

### 11.12.1. Volum del tanc

El volum del tanc pulmó es calcularà de la mateixa forma que s'ha calculat als tancs d'emmagatzematge. Però, a diferència dels tancs d'emmagatzematge, el temps de estoc o temps de residència del fluid al tanc serà molt inferior a les vistes anteriorment. Llavors, des de ProQject s'ha decidit implementar un temps de residència d'una hora i mitja. També, un altre tret diferencial serà la densitat del fluid, ja que aquest estarà en fase gas, fent que la densitat disminueixi de forma exponencial. Llavors, utilitzant la fórmula del volum utilitzat tant en el disseny dels tancs amb codi API 650 com ASME, es coneixerà el volum del tanc:

$$V_{\text{gas}} = \frac{Q_m \cdot PM \cdot t_{\text{stock}}}{\rho} \quad \text{Equació 11.125}$$

$$V_{\text{gas}} = \frac{920 \cdot 26,2 \cdot 1,5}{6} = 6026 \text{ m}^3$$

Amb aquest volum de gas a emmagatzemar, es pot passar al dimensionament del tanc. Per fer-ho, s'ha de conèixer que aquest tanc, en tenir un fluid gasós a dins, serà de tipus esfèric. Llavors, si suposem que el volum de gas serà igual al del recipient, es pot conèixer el diàmetre mitjançant l'Equació 11.126.

$$V_{\text{esfera}} = \frac{4}{3} \pi \cdot \left( \frac{D}{2} \right)^3 \quad \text{Equació 11.126}$$

On:

*D*: Diàmetre de l'esfera [m]

$$6026 = \frac{4}{3}\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^3$$

$$D = 22,57 \text{ m}$$

### 11.12.2. Material i espessor del recipient

El tanc pulmó utilitzarà com a material de construcció l'acer AISI 304L, que constà de les següents propietats:

**Taula 11.39: Propietats de l'acer AISI 304L.**

Acer AISI 304L	
Densitat (kg/m <sup>3</sup> )	8000
Mínima tensió de ruptura (Mpa)	564
Límit elàstic (Mpa)	210
CA (espessor de sobre corrosió) (mm)	2,5
Máxim espessor de la placa (mm)	40
Sd (MPa)	140
St (MPa)	157,5

Llavors, al no tenir un càlcul de referència per tancs esfèrics a pressió, s'utilitzarà la fórmula vista al codi ASME per mesurar l'espessor del cos, sense tenir en compte el factor de corrosió.

$$t_{cos} = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} \quad \text{Equació 11.127}$$

On:

*P*: Pressió de disseny [psi]

*R*: Radi interior del tanc [inches]

*S*: Esforç màxim admissible del material [psi]

*E*: Eficiència de soldadura (0,85)

Llavors:

$$tesfera = \frac{1450 \cdot 688,9}{22771 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 1450} = 26 \text{ mm}$$

L'espessor calculada serà de 26 mil·límetres, però en ser aquest una aproximació a la possible necessitat d'aquest tipus de recipient a pressió, es sobredimensionarà fins al valor màxim admissible, vist a la taula, de 40 mil·límetres. D'aquesta manera, ProQject s'assegura que el recipient suportarà pressions superiors a les 100 atmosferes.

### 11.12.3. Pressió de disseny

Pel cas de les pressions de disseny d'aquest recipient, s'haurà de deixar un marge respecte a la teòricament operacional. Això es deu al fet que a l'arribar-hi per canonada, es poden produir fluctuacions en les condicions del gas. Per tant, des de ProQject s'ha decidit deixar un marge de 15 atmosferes:

$$P_{disseny} = P_{operació} + 15 = 100 + 15 = 115 \text{ atmosferes}$$

#### 11.12.1.4. Temperatura de disseny

Pel cas de la temperatura de disseny, tot i no ser crítica en aspectes de condensació, s'haurà de deixar un marge respecte a la d'arribada del producte. Per tant, la temperatura establerta per ProQject serà:

$$T_{disseny} = 25 + 15 = 40^{\circ}\text{C}$$

#### 11.12.1.5. Pes de l'equip

Pel càlcul del pes del recipient buit, s'utilitzarà la següent expressió característica per tancs esfèrics:

$$M_{esfera} = \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \left(\frac{e}{2}\right)^3 \cdot \rho_{304L} \quad \text{Equació 11.128}$$

On:

$e$ : espessor de l'esfera [m]

$\rho_{304L}$ : Densitat metall AISI 304L

Llavors:

$$M_{esfera} = \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \left(\frac{0,04}{2}\right)^3 \cdot 8000 = 2145 \text{ kg}$$

Comptant el tanc ple de gas, el pes total serà:

$$M_{total} = 2145 + 6026 \cdot 6 = 38301 \text{ kg}$$

### 11.13. Seguretat i Higiene

Al llarg del Capítol 5 del Projecte Atenea, corresponent les diferents qüestions de Seguretat i Higiene, s'han realitzat diversos càlculs seguint les diferents normatives vigents i que, per tant,

són necessaris perquè ProQject pugui garantir la màxima seguretat a la seva planta de producció d'etilbenzè.

A continuació, s'exposa els principis i metodologies claus utilitzades en els càlculs referents en el disseny de la seguretat de la planta.

### **11.13.1. Emmagatzematge de substàncies de la planta**

#### **11.13.1.1. Distància de seguretat productes inflamables**

Els càlculs de les distàncies de seguretat s'ha fet seguint l'article 17 de la ITC-MIE APQ 1 d'acord amb el Reial Decret 656/2017 <sup>[x]</sup>.

Aquest RD ens permet determinar les distàncies entre les diverses àrees que componen un emmagatzematge de substàncies químiques inflamables, així com les distàncies a elements externes, tant de la mateixa planta, com lluny de la planta i inclòs els diferents elements que componen un magatzem de productes químics.

El procediment per determinar la distància es compon de cinc passos i són els següents:

1. Determinar distància base (Figura 11.59)
2. Aplicar el coeficient de reducció per capacitat global d'emmagatzematge (Figura 11.59)
3. Aplicar coeficient multiplicador per les característiques dels productes i els d'emmagatzematge (Figura 11.59)
4. Aplicar coeficient reductor per proteccions addicionals (Figura 11.59)
5. Verificació dels requisits mínims.

A continuació, es realitza els càlculs per determinar les distàncies de seguretat per a productes inflamables de la planta ProQject que segons Art.4 ITC-MIE-APQ-1 pertany a la Classe B.

En primer lloc, determinació de la distància base (Quadre II.1 <sup>[6]</sup>) mitjançant la Figura 11.59. Es pot observar que és una taula de doble entrada, en la primera fila i última columna hi ha diferents números que correspon amb els diferents elements que pot i haver-hi en un emmagatzematge de substàncies químiques, com en les parts exteriors d'aquest emmagatzematge.

1	(1)									
2	(3) 20	(2)								
3.1	60	(4) 30	(6)							
3.2	30	(4) 15	(6)	(6)						
3.3	30	(4) 15	(6)	(6)	(6)					
4.1	60	(5) 30	(7) 30	(7) 30	(7) 30	(7) 30	(2)			
4.2	30	(5) 20	(7) 30	(7) 20	(7) 15	(7) 30	(11) 30	(2)		
4.3	20	(5) 15	(7) 25	(7) 20	(7) 15	(7) 15	(2)	(2)	(2)	
5	30	(5) 15	30	20	15	30	20	15	(1)	
6	(1)	30	60	30	20	60	20	15	30	(1)
7	(1)	20	60	30	20	40	20	15	20	(8)
8	(1)	20	60	30	25	30	30	25	20	20
9	(1)	15	30	20	15	30	20	15	(9) 20	(8)
10	(1)	20	60	30	25	60	(10) 40	(10) 20	20	(8)
11	(1)	30	100	60	40	100	60	30	40	(8)
	1	2	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	5	6

**Figura 11.59: Distància en metres entre instal·lacions fixes de superfície.**

Distància des del dipòsit (3.2) a:

(1) Unitat de procés → 30 m

(4.2) Carregadors Classe B → 20 m

(7) Edificis administratius i socials → 30 m

(8) Estacions bombeig d'aigua contra incendi → 30

(9) Barrat de la planta → 20 m

(10) Via de comunicació pública → 30 m

Una vegada determinada la distància base es passaria al següent pas, que es basa a determinar el coeficient reductor per la quantitat d'emmagatzematge segons la Figura 11.60.

1. Unitats de procés.
2. Estacions de bombatge i compressors.
- 3.1 Recipients d'emmagatzematge. Classe A (Parets del tanc).
- 3.2 Recipients d'emmagatzematge. Classe B (Parets del tanc).
- 3.3 Recipients d'emmagatzematge. Classe C (Parets del tanc).
- 4.1 Carregadors. Classe A.
- 4.2 Carregadors. Classe B.
- 4.3 Carregadors. Classes C.
5. Basses separadores.
6. Zones de foc obert.
7. Edificis administratius i socials, laboratoris, tallers, magatzems i altres edificis independents.
8. Estacions de bombeig d'aigua contra incendis.
9. Barrat de la planta.
10. Límits de propietats exteriors en les quals pugui edificar-se i vies de comunicació públiques.
11. Locals i establiments exteriors de pública concurrència

Cuadro III-2. Coeficientes de reducción por capacidad

Capacidad global de almacenamiento de la instalación m <sup>3</sup>	Coeficiente para reducción de distancias del cuadro III-1
Q ≥ 50.000	1
50.000 >Q ≥ 20.000	0,95
20.000 >Q ≥ 10.000	0,90
10.000 >Q ≥ 7.500	0,85
7.500 >Q ≥ 5.000	0,80
5.000 >Q ≥ 2.500	0,75
2.500 >Q ≥ 1.000	0,70
1.000 >Q ≥ 500	0,65
500 >Q ≥ 250	0,60
250 >Q ≥ 100	0,50
100 >Q ≥ 50	0,40
50 >Q ≥ 5	0,30
5 >Q	0,20

**Figura 11.60: Coeficients de reducció segons la capacitat**

Com es pot observar a la Figura 11.60, correspon a la capacitat global d'emmagatzematge de la instal·lació i un coeficient reductor. La capacitat global d'emmagatzematge a la planta ProQject 6539'2 m<sup>3</sup>. Així doncs, el coeficient reductor és 0'80.

Distància reduïda per la capacitat des del dipòsit (3.2) a:

- (1) Unitat de procés → 24 m
- (4.2) Carregadors Classe B → 16 m
- (7) Edificis administratius i socials → 24 m
- (8) Estacions bombeig d'aigua contra incendi → 24 m
- (9) Barrat de la planta → 16 m
- (10) Via de comunicació pública → 24 m

Amb aquestes dades s'acaba el pas 2, i llavors es passa al pas 3, al coeficient multiplicador que es tracta del tipus d'emmagatzematge com es pot veure a la Figura 11.61.

Cuadro III-3. Coeficientes multiplicadores

Características de los productos y/o de los almacenamientos	Coeficiente	Clases de líquidos a los que es aplicable
Líquidos inestables. . . . .	2,0	A, B y C
Almacenamiento con venteos de emergencia que permitan el desarrollo de presiones superiores a 0,15 bares . . . . .	1,5	B y C

**Figura 11.61: Coeficients multiplicadors segons les característiques dels productes.**

Les substàncies del projecte Atenea no són inestables i s'emmagatzemen en tancs a pressió atmosfèrica, per tant, no es requereix cap coeficient multiplicador. Per tant, es passa al següent pas 4.

En aquest pas, seria la multiplicació per un coeficient reductor en el cas que es disposi de mesures i sistemes addicionals de proteccions contra incendis.

Cuadro III-4. Reducciones de las distancias entre instalaciones fijas de superficie por protecciones adicionales a las obligatorias señaladas en el capítulo IV

Medidas o sistemas de protección adoptados		Coeficiente de reducción
Nivel	Cantidad	
0	–	No hay reducción
1	Una	0,75
1	Dos o más	0,50
2	Una	0,50
2	Dos o más	0,40

**Figura 11.62: Coeficients de reducció segons les mesures de seguretat addicionals.**

Com es pot observar a la Figura 11.62, la taula ens defineix les mesures de protecció adoptades amb tres nivells i una quantitat de mesures adoptades i el coeficient reductor.

ProQject considera important les mesures addicionals, per tant, hi ha més de dues mesures de protecció que correspon amb el nivell 2 amb un coeficient de reducció del 0'4.

Distància reduïda segons les mesures addicionals des del dipòsit (3.2) a:

- (1) Unitat de procés → 9,6 m
- (4.2) Carregadors Classe B → 6,4 m
- (7) Edificis administratius i socials → 9,6 m
- (8) Estacions bombeig d'aigua contra incendi → 9,6
- (9) Barrat de la planta → 6,4 m
- (10) Via de comunicació pública → 9,6 m

Finalment es fa una verificació per comprovar que es compleix els requisits mínims. Fent l'anàlisi es veu que la distància de la via pública menor al que ens indica reglament MIE APQ-1<sup>[13]</sup>. Per tant, seguint el reglament la distància mínima per la via de comunicació (10) és:

- (10) Via de comunicació pública → 12 m

Per altra banda, la distància entre tancs, correspon als 0'5 pel diàmetre amb una reducció del 0'65. A la taula següent es mostra els resultats obtinguts, cal remarcar que la distància mínima és de 1,5 m



**Taula 11.40: Distàncies entre recipients.**

Substàncies	Diàmetres tancs (m)	Distància entre recipients reduïda (m)
Benzè	9,15	2,97
Toluè	3,35	1,50
Metà	9,28	3,02
Età	12,02	3,91
Etilbenzè	9,14	2,97

### 11.13.1.2. Distància de seguretat productes tòxics

Els càlculs de les distàncies de seguretat s'ha fet seguint l'article 13 de la ITC-MIE APQ 7 d'acord amb el Reial Decret 656/2017 <sup>[14]</sup>.

Amb respecte a altres instal·lacions indicades a la Figura 11.41 següent:

**Taula 11.41: - Instal·lacions segons la classe d'emmagatzematge.**

	Clase de almacenamiento		
	1	2	3
Unidades de proceso, edificios propios, hornos, calderas, estaciones contra incendios, bombas, balsas separadoras de inflamables y cargadero de inflamables (clases A y B). . . . .	15	8	4
Vallado de la planta. . . . .	10	5	3
Límites de propiedades exteriores en las que puedan edificarse y vías de comunicación pública (ver nota). . . . .	20	10	5
Locales y establecimientos exteriores de pública concurrencia (ver nota). . . . .	30	15	10

Les instal·lacions d'emmagatzematge de líquids tòxics es situen com a mínim a les distàncies que resulten aplicant el següent procediment:

$$\text{Distància (en metres)} = d \times FA \times FB \times FC \qquad \text{Equació 11.129}$$

d= Distància base en metres

En cap cas la distància serà inferior a 1,5 m.

Exemple del càlcul de distància de l'etilbenzè.

La classe d'emmagatzematge de l'etilbenzè és 3, per tant, la distància base:

Unitat de procés → 4 m

Barrat de la planta → 3 m

Via de comunicació pública → 5 m

A aquestes distàncies bàsiques es modifiquen en funció del punt d'ebullició de l'etilbenzè.

- A) Punt d'ebullició (FA): el punt d'ebullició de l'etilbenzè està per sota de 38 °C, per tant, té un factor reductor de 2.
- B) Construcció preventiva d'emissions (FB), no hi ha mesures preventives, llavors  $F_b=1$
- C) Protecció d'emissions en cas d'incendi pròxim (FC), es conta amb mesures preventives de nivell 2, per tant,  $F_c=0,5$

Finalment els resultats obtinguts són:

Unitat de procés → 4 m

Barrat de la planta → 3 m

Via de comunicació pública → 5 m

Com es pot veure totes les distàncies calcules, es troben per sobre de la mínima, llavors es dona per vàlides aquestes distàncies.

### 11.13.2. Risc d'incendi

#### 11.13.2.1. Establiments industrials segons el seu risc intrínsec

Segons el Reial Decret 2267/2004<sup>[X]</sup>, es poden caracteritzar els establiments industrials pel seu nivell de risc intrínsec d'incendi.

ProQject ha quantificat la densitat de càrrega de foc d'aquelles àrees presents a la planta que presenten un risc d'incendi associat. Segons el RD, es calcula segons l'activitat que es realitzi a l'establiment: activitats de producció o bé d'emmagatzematge. Així doncs, els valors numèrics obtinguts són d'aquestes àrees mencionades.

Pel que fa a les activitats de producció, la densitat de càrrega de foc es calcula segons l'Equació 11.130:

$$Q_s = \frac{\sum_i q_{si} \cdot S_i \cdot C_i}{A} \cdot R_a \quad \text{Equació 11.130}$$

$Q_s$ : densitat de càrrega de foc, ponderada i corregida, de l'àrea d'incendi ( $MJ/m^2$ )

$q_{si}$ : densitat de càrrega de foc de cada zona segons el procés que es realitza (valor tabulat) ( $MJ/m^2$ )

$S_i$ : superfície de cada zona amb procés diferent i  $q_{si}$  diferent ( $m^2$ )

$C_i$ : coeficient adimensional que pondera el grau de perillositat de cada combustible (valor tabulat)

$R_a$ : coeficient adimensional que corregeix el grau de perillositat segons l'activitat (valor tabulat)

Quant a les activitats d'emmagatzematge, la densitat de càrrega de foc es calcula segons l'Equació 131:

$$Q_s = \frac{\sum_i^l q_{vi} \cdot s_i \cdot h_i \cdot C_i}{A} \cdot R_a \quad \text{Equació 11.131}$$

$Q_s, C_i, R_a, i A$  tenen el mateix significat que a l'Equació 130

$q_{vi}$ : densitat de càrrega de foc de cada zona segons el procés que es realitza (valor tabulat) (MJ/m<sup>3</sup>)

$s_i$ : superfície ocupada a la planta per cada emmagatzematge (m<sup>2</sup>)

$h_i$ : alçada del tanc d'emmagatzematge de cada combustible (m)

Tal com s'explica a la llegenda de les equacions, hi ha certs paràmetres que estan tabulats.

Pel que fa al coeficient que pondera el grau de perillositat, la Llei adjunta diferents valors ponderats segons la perillositat de cada combustible. A la Figura 11.63 es poden observar els valors dels diferents coeficients segons la perillositat i el criteri a seguir per escollir.

VALORES DEL COEFICIENTE DE PELIGROSIDAD POR COMBUSTIBILIDAD, C <sub>i</sub>		
ALTA	MEDIA	BAJA
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Líquidos clasificados como clase A en la ITC MIE-APQ1</li> <li>- Líquidos clasificados como subclase B<sub>1</sub>, en la ITC MIE-APQ1.</li> <li>- Sólidos capaces de iniciar su combustión a una temperatura inferior a 100 °C.</li> <li>- Productos que pueden formar mezclas explosivas con el aire a temperatura ambiente.</li> <li>- Productos que pueden iniciar combustión espontánea en el aire a temperatura ambiente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Líquidos clasificados como subclase B<sub>2</sub> en la ITC MIE-APQ1.</li> <li>- Líquidos clasificados como clase C en la ITC MIE-APQ1.</li> <li>- Sólidos que comienzan su ignición a una temperatura comprendida entre 100 °C y 200 °C.</li> <li>- Sólidos que emiten gases inflamables.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Líquidos clasificados como clase D en la ITC MIE-APQ1.</li> <li>- Sólidos que comienzan su ignición a una temperatura superior a 200 °C.</li> </ul>
C <sub>i</sub> = 1,60	C <sub>i</sub> = 1,30	C <sub>i</sub> = 1,00

**Figura 11.63: Valors del coeficient de perillositat per combustibilitat C<sub>i</sub>.**

Aquest coeficient C<sub>i</sub> està basat en la normativa ITC MIE-APQ1 i si es consulta el Capítol 5, de Seguretat i Higiene, es determina que totes les substàncies químiques presents a la planta de ProQject, es classifiquen en el tipus B1 a la MIE-APQ1. Així doncs, els càlculs estan fets tots amb un valor de C<sub>i</sub>=1'6.

Ara, tant els valors de  $q_{si}$ ,  $q_{vi}$  com  $R_a$ , estan relacionats amb el tipus d'activitat industrial que es realitza a l'establiment amb risc associat d'incendi. El RD 2267/2004, disposa d'un llistat d'activitats i els seus valors corresponents. ProQject ha fet servir els valors establerts per la categoria **Productos químicos combustibles**. Aquests són:  $R_a=2$ ;  $q_{si}=300\text{MJ}/\text{m}^2$ ,  $q_{vi}=1.000\text{MJ}/\text{m}^3$ .

A continuació, es mostra un exemple de càlcul. Aquest fa referència en concret al tanc pulmó d'etilè, ja que és el que condiciona que la zona de producció de la planta sigui crítica quant al risc d'incendi. Això és degut a les seves dimensions.

Es destaca, que la densitat de càrrega de foc total de cada àrea és la suma dels valors de cada aparell i tanc, tal com es pot observar a les Equacions 11.130 i 11.13.

$$Q_s = \frac{\sum_1^i q_{vi} \cdot s_i \cdot h_i \cdot C_i}{A} \cdot R_a = \frac{1000 \cdot 400.1 \cdot 22.57 \cdot 1.6}{1253.5} \cdot 2 = 23052.08\text{MJ}/\text{m}^3$$

Es destaca que  $s_i$  es calcula com l'àrea de la base del tanc i es suposa per a tots, que és circular. Per tant,  $s_i=\pi \cdot r^2$ .

#### 11.14. Canonades

Respecte del capítol de canonades, s'ha determinat el diàmetre de totes les canonades mitjançant l'Equació 11.132:

$$v = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} \quad \text{Equació 11.132}$$

On:

$$v: \text{velocitat típica del fluid} \left[ \frac{\text{m}}{\text{h}} \right]$$

$$Q: \text{cabal volumètric} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

$$D: \text{Diàmetre intern de la canonada} [\text{m}]$$

Pel que fa a la velocitat, aquesta es determina mitjançant la Taula 11.42 que recull les velocitats típiques per fluids amb diferents característiques:

**Taula 11.42: Velocitats típiques dels diferents fluids a través de les canonades**

TIPUS DE FLUID	TRAM DE CIRCULACIÓ	VELOCITAT (m/s)
LIQUIDS NO VISCOSOS	Canonada d'aspiració (abans de la bomba)	0,6-0,9
	Canonada d'impulsió o línia de procés	1,5-2,5
LIQUIDS VISCOSOS	Canonada d'aspiració (abans de la bomba)	0,06-0,25
	Canonada d'impulsió o línia de procés	0,15-0,6
GASOS		9-36
VAPOR		9-23

Llavors, per líquids incompressibles s'utilitzarà 2.5 m/s, per vapor 20 m/s i per gasos 36 m/s.

Coneixent aquests valors es pot calcular el diàmetre intern de la canonada. Al següent exemple es presenta el càlcul de tram que va de la columna D-1401 al bescanviador B-1401, on es transporta benzè:

$$2,5 \cdot 3600 = \frac{38}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2}$$

$$D = 73 \text{ mm}$$

### 11.15. Bombes

A la planta de ProQject hi ha instal·lades bombes en les diferents àrees del procés, amb la finalitat de mantenir el cabal constant i per les condicions del fluid segons els requisits establerts per la simulació de Hysys. Llavors, tot seguit es presenta el càlcul dels paràmetres característics de la bomba i es presenta un exemple per la bomba P1401 A que transporta benzè del bescanviador B-1401 al mesclador TA-1501.

#### 11.15.1. Càrrega total

La càrrega total d'una bomba és la diferència entre la càrrega d'aspiració i la d'impulsió. Aquestes dues es calculen mitjançant les següents equacions:

Per aspiració:

$$h_{asp} = \left(\frac{1}{9,8}\right) \cdot \left(\frac{P_e}{\rho} + \frac{v_{asp}^2}{2}\right) \quad \text{Equació 11.133}$$

Per impulsió:

$$h_{imp} = \left(\frac{1}{9,8}\right) \cdot \left(\frac{P_s}{\rho} + \frac{v_{imp}^2}{2}\right) \quad \text{Equació 11.134}$$

On:

*Pe*: Pressió d'entrada del líquid [Pa]

*Ps*: Pressió de sortida del líquid [Pa]

*vasp*: Velocitat d'aspiració  $\left[\frac{m}{s}\right]$

*vimp*: Velocitat d'impulsió  $\left[\frac{m}{s}\right]$

Llavors:

$$hasp = \left(\frac{1}{9,8}\right) \cdot \left(\frac{101325}{876} + \frac{0,9^2}{2}\right) = 11,84 \text{ m}$$

$$himp = \left(\frac{1}{9,8}\right) \cdot \left(\frac{3546375}{876} + \frac{2,5^2}{2}\right) = 413 \text{ m}$$

Coneixent la càrrega d'aspiració i la d'impulsió, es pot conèixer la càrrega total del sistema.

$$h = himp - hasp = 401,16 \text{ m}$$

### 11.15.2. NPSH disponible

El NPSH disponible és un paràmetre que mesura l'energia neta disponible en el punt d'aspiració d'una bomba. Serveix com una indicació de la quantitat d'energia disponible per a la bomba a fi d'evitar la cavitació, un fenomen indesitjable que pot causar danys a la bomba i afectar el seu rendiment.

Tot seguit, es mostra un exemple pel càlcul del tram vist anteriorment amb l'Equació 11.135 característica del NPSH disponible.

$$\mathbf{NPSHdisponible = ha - \frac{Pv}{g \cdot \rho}} \quad \mathbf{Equació 11.135}$$

On:

*ha*: Càrrega d'aspiració[m]

*Pv*: Pressió de vapor del fluid[Pa]

*g*: Gravetat  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

*ρ*: Densitat del fluid  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Llavors, coneixent la pressió de vapor calculada per Hysys, es calcula el NPSH disponible:

$$NPSH_{disponible} = 11,84 - \frac{12488}{9,8 \cdot 876} = 10,39 \text{ m}$$

Aquest valor s'haurà de comparar amb el NPSH requerit per la bomba especificada pel proveïdor, i s'haurà d'escollir una que tingui un valor inferior a la disponible.

### 11.15.3. Potència total

Finalment, l'últim paràmetre característic de les bombes serà la potència total de la bomba. Per tant, en primer lloc, s'haurà de calcular la potència disponible mitjançant l'Equació 11.136:

$$P_{disponible} = Q \cdot \rho \cdot g \cdot h \quad \text{Equació 11.136}$$

On:

$$Q: \text{Cabal volumetric} \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

$$\rho: \text{Densitat del fluid} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$g: \text{gravetat} \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$h: \text{Càrrega total [m]}$$

Llavors:

$$P_{disponible} = \left( \frac{38,37}{3600} \right) \cdot 876 \cdot 9,81 \cdot 401,57 = 36743 \text{ W} = 36,7 \text{ kW}$$

Una vegada es coneix la potència disponible, s'ha de conèixer el rendiment de la bomba. S'ha de consultar la Taula 11.43, que mostra els rendiments de la bomba establerts per RITE <sup>[15]</sup>, en funció de la potència disponible.

**Taula 11.43: % de rendiment en funció de la potència disponible**

<b>Ph (KW)</b>	1,1	1,5	2,2	3	4	5	7,5	11	15	18,5	22	30	37	45	55	75	90
<b>Rendiment (%)</b>	76,2	78,5	81	82,6	84,2	85,7	87	88,4	89,4	90	90,5	91,4	92	92,5	93	93,6	93,9

Per tant, el rendiment de la bomba serà d'un 92%. Amb aquest valor ja es pot calcular la potència necessària.

$$P_{requerida} = \frac{P_{disponible}}{\%rendiment} = \frac{36,7}{0,92} = 39,94 \text{ kW}$$

## 11.16. Avaluació econòmica

### 11.16.1. Estimació del cost dels tancs d'emmagatzematge

El disseny dels tancs d'emmagatzematge de la planta de ProQject s'ha realitzar pel mètode algorítmic de *Couper*, a continuació es mostra un exemple de càlcul de l'estimació d'un tanc.

Exemple d'estimació del cost del tanc T-901:

$$C = 1,218 \cdot F_M \cdot \exp[11,662 - 0,6104 \cdot (\ln V) + 0,04536 \cdot (\ln V)^2]$$

En què les variables corresponen a:

$C$ : Cost de l'equip [€]

$F_M$ : Constant del material de construcció

(2,1 per l'acer inoxidable 316L)

$V$ : Volum del tanc [ $m^3$ ]; (959,9  $m^3$ )

$$C = 1,218 \cdot F_M \cdot \exp[11,662 - 0,6104 \cdot (\ln(959,9)) + 0,04536 \cdot (\ln(959,9))^2]$$

$$C = 215.450\text{€} \cdot \frac{806,3 (2022)}{395,6 (2002)} = 439.123\text{€} \cdot \frac{1\text{€}}{1.0442\text{€}} = 420.535\text{€}$$

### 11.16.2. Estimació del cost dels intercanviadors de calor

El disseny dels intercanviadors de calor s'ha realitzat amb el mètode algorítmic de *Couper*, a continuació es mostra un exemple de l'estimació d'un dels equips.

Exemple d'estimació del cost del tanc B-1401:

$$C = 1,218 \cdot f_d \cdot f_m \cdot f_P \cdot C_b$$

$$C_b = \exp[8,821 - 0,30863 \cdot (\ln A) + 0,0681 \cdot (\ln A)^2]$$



$$f_d = \exp[-0,9816 + 0,0830 \cdot (\ln A)] \quad \text{Per U-Tube}$$

$$f_P = 1,035 + 0,07140 \cdot (\ln A) \quad \text{Per pressió rang 300-600 psig}$$

$$f_m = g_1 + g_2 \cdot (\ln A)$$

En què les variables corresponen a:

*A*: Àrea de bescanvi de l'equip (97,09 m<sup>2</sup>)

$$g_1 = 0,8193; \quad g_2 = 0,15984$$

$$C_b = 21.302,79 \quad f_d = 0,67 \quad f_P = 1,53 \quad f_m = 1,93$$

$$C = 51.181\$ \cdot \frac{806,3(2002)}{395,6(2002)} = 104.316\$ \cdot \frac{1\text{€}}{1.0442\$} = 99.901\text{€}$$

### 11.16.3. Estimació del cost de les columnes de destil·lació

En el cas de l'estimació del cost de les columnes de destil·lació, s'ha realitzat amb el mètode de *Sinnot & Towler*. Es calcula per separat el recipient a pressió i els plats.

A continuació es mostra un exemple de càlcul per l'equip D-1401:

$$C = a + b \cdot S^n$$

En què les variables corresponen a:

*a, b, n*: Constants

*S*: Paràmetre característic

Per el recipient a pressió:

$$S = 1663,9 \text{ kg}; \quad a = 15000; \quad b = 68; \quad n = 0,85$$

$$C = 52.194\$ \cdot \frac{806,3(2022)}{509,7(2006)} = 82.565\$ \cdot \frac{1\text{€}}{1.0442\$} = 79.071\text{€}$$

Pels plats de la columna:

$$S = 2,638 \text{ kg}; \quad a = 110; \quad b = 380; \quad n = 1,8$$

$$C = 17 \text{ plats} \cdot 2.288\$ \cdot \frac{806,3(2022)}{509,7(2006)} = 61.533\$ \cdot \frac{1\text{€}}{1.0442\$} = 58.928\text{€}$$

#### 11.16.4. Estimació del cost dels reactors

En el cas dels reactors, tant els d'alquilació com transalquilació, s'han calculat pel mètode de *Sinnot & Towler*. S'ha estimat el cost a partir del càlcul del recipient a pressió, ja que el catalitzador serà calculat com a cost de matèries primeres.

A continuació es mostra un exemple de càlcul per l'equip R-1501:

$$C = a + b \cdot S^n$$

En què les variables corresponen a:

*a, b, n: Constants*

*S: Paràmetre característic*

Per el recipient a pressió:

$$S = 8.888 \text{ kg}; \quad a = 15000; \quad b = 68; \quad n = 0,85$$

$$C = 169.522\$ \cdot \frac{806,3(2022)}{509,7 (2006)} = 268.538\$ \cdot \frac{1\text{€}}{1.0442\$} = 257.172\text{€}$$

#### 11.16.5. Estimació del cost de les bombes

En el cas de les bombes, s'hancalculat pel mètode de *Sinnot & Towler*. S'ha estimat el cost per bombes centrífugues. A continuació es mostra un exemple de càlcul d'un dels equips.

Exemple d'estimació del cost del compressor P-701A:

$$C = a + b \cdot S^n$$

En què les variables corresponen a:

*a, b, n: Constants*

*S: Paràmetre característic*

$$S = 11,67 \frac{L}{s}; \quad a = 6900; \quad b = 206; \quad n = 0,9$$

$$C = 8.780\$ \cdot \frac{806,3(2022)}{509,7 (2006)} = 13.889\$ \cdot \frac{1\text{€}}{1.0442\$} = 13.301\text{€}$$

### 11.16.6. Estimació del cost de les torres de refrigeració

El disseny de les torres de refrigeració s'ha realitzat amb el mètode algorítmic de *Couper*, a continuació es mostra un exemple de l'estimació d'un dels equips.

Exemple d'estimació del cost de la torre TR-1301:

$$C = 164 \cdot f \cdot Q^{0,61}$$

En què les variables corresponen a:

$$Q: \text{Cabal} \left(60 \frac{\text{kgal}}{\text{min}}\right) \quad f = 2$$

$$C = 8.705\$ \cdot \frac{806,3 (2002)}{395,6(2002)} = 17.742\$ \cdot \frac{1\text{€}}{1.0442\$} = 16.991\text{€}$$

### 11.16.7. Estimació del cost dels compressors

El disseny dels compressors de la planta s'ha realitzat amb el mètode algorítmic de *Couper*, a continuació es mostra un exemple de l'estimació d'un dels equips.

Exemple d'estimació del cost del compressor K-1301:

$$C = 7,90 \cdot (HP)^{0,62}$$

En què les variables corresponen a:

*C*: Cost de l'equip[\$]

*HP*: Potència de l'equip (10,05 HP)

$$C = 33.035\$ \cdot \frac{806,3 (2002)}{395,6(2002)} = 67.330\$ \cdot \frac{1\text{€}}{1.0442\$} = 64.480\text{€}$$

### 11.16.8. Estimació del cost del cooler

El disseny del cooler s'ha realitzat amb el mètode algorítmic de *Couper*, a continuació es mostra un exemple de l'estimació d'un dels equips.

Exemple d'estimació del cost del compressor CO-1601:

$$C = 178 \cdot F \cdot Q^{0.65}$$

En què les variables corresponen a:

*C*: Cost de l'equip[\$]

*F*: Constant temperatura d'operació (4)

*Q*: Cabal de calor d'operació  $\left(4,32E6 \frac{KJ}{h}\right)$

$$C = 35.498\$ \cdot \frac{806,3 (2002)}{395,6(2002)} = 72.352\$ \cdot \frac{1\text{€}}{1.0442\$} = 69.289\text{€}$$

### 11.16.9. Estimació del cost de la caldera

En el cas de la caldera, s'ha calculat pel mètode de *Sinnot & Towler*. A continuació es mostra un exemple de càlcul d'un dels equips.

Exemple d'estimació del cost de la caldera C-1301:

$$C = a + b \cdot S^n$$

En què les variables corresponen a:

*a, b, n*: Constants

*S*: Paràmetre característic

$$S = 13000 \frac{m^3}{h}; \quad a = 110000; \quad b = 4,5; \quad n = 0,9$$

$$C = 132.686\$ \cdot \frac{806,3(2022)}{509,7 (2006)} = 270.437\$ \cdot \frac{1\text{€}}{1.0442\$} = 258.990\text{€}$$

### 11.17. Bibliografia

[1]: W. L. Luyben, *Plant-wide Dynamic Simulators in Chemical Processing and Control 2002*, New York, Marcel Dekker.

[2]: W. L. Luyben, *Així Journal* 2010, 57(3), 655-670.

[3]: Ng, Q. H., Sharma, S., & Rangaiah, G. P. (2017). Design and analysis of an ethyl benzene production process using conventional distillation columns and dividing-wall column for multiple objectives. *Chemical engineering research & design*, 118, 142-157. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.10.046>

[4]: Cadena, J. U. (2013). BALANCE DE ENERGÍA EN UN REACTOR DE PRODUCCIÓN DE ETILBENCENO. *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/publication/236982659\\_BALANCE\\_DE\\_ENERGIA\\_EN\\_UN\\_REACTOR\\_DE\\_PRODUCCION\\_DE\\_ETILBENCENO](https://www.researchgate.net/publication/236982659_BALANCE_DE_ENERGIA_EN_UN_REACTOR_DE_PRODUCCION_DE_ETILBENCENO)

[5]: *NORMAS DE CONSTRUCCION DE RECIPIENTES A PRESION. Guía del Código ASME. Sección VIII. División 1 - BelliscoVirtual*. (s. f.). BelliscoVirtual. <https://belliscovirtual.com/caldereria/683-normas-de-construccion-de-recipientes-a-presion-guia-del-codigo-asme-seccion-viii-division-1-9788496486737.html>

[6]: *API Std 650*. (2023, 1 marzo). [https://www.techstreet.com/standards/api-std-650?gclid=CjwKCAjwhJukBhBPEiwAnilcNVsXOT7oOdvzNHp2nPGxeMJB5ApoJj8Ry3z7-7xxRdcN\\_5TDch2xoCUn0QAvD\\_BwE&product\\_id=2106344](https://www.techstreet.com/standards/api-std-650?gclid=CjwKCAjwhJukBhBPEiwAnilcNVsXOT7oOdvzNHp2nPGxeMJB5ApoJj8Ry3z7-7xxRdcN_5TDch2xoCUn0QAvD_BwE&product_id=2106344)

[7]: Allow Wire International. Propiedades físicas del acero 316L. Última consulta: 16/05/2023. Obtenido de: <https://www.alloywire.es/products/stainless-steel-316>

[8]: Hierros y Transformados S.A, "Ficha técnica: lana de roca", última consulta: 16/05/2023; [https://www.metalpanel.com/wp-content/uploads/2018/02/lana\\_roca.pdf](https://www.metalpanel.com/wp-content/uploads/2018/02/lana_roca.pdf)

[9]: Hierros y Transformados S.A, "Ficha técnica: lana de roca", última consulta: 16/04/2020; [https://www.metalpanel.com/wp-content/uploads/2018/02/lana\\_roca.pdf](https://www.metalpanel.com/wp-content/uploads/2018/02/lana_roca.pdf)

[10]: Dominguez Toribio, J. C., & Alonso Rubio, M. V. (2020). *Diseño de la unidad de destilación criogénica para la obtención de helio a partir de gas natural*.

[11]: Agrawal, R., Herron, D. M., Rowles, H. C., y Kinard, G. E. "Cryogenic technology" en: Kirk-Othmer, Ed lit., *Encyclopedia of Chemical Technology*, Vol. 8, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, (2003).

[12]: ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Sección VIII, División 1 "Rules for Construction of Pressure Vessels"

[13]: *Almacenamiento de productos químicos Inflamables y Combustibles (APQ-1)*. (2014, noviembre 26). ADEGI. <https://www.adegi.es/adegi/almacenamiento-productos-quimicos-inflamables-combustibles-apq-1-201411/>

[14]: *BOE-A-2017-8755 Real Decreto 656/2017, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones técnicas Complementarias MIE APQ 0 a 10*. (s. f.). Boe.es. Consultat 14 d'abril de 2023, de <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2017-8755>

[15]: *Documento reconocido del RITE*. (s. f.). Codigotecnico.org. Consultat 5 de juny del 2023, de <https://www.codigotecnico.org/Guias/DR-RITE.html>