



PLANTA DE PRODUCCIÓ D'ETILBENZÈ

TREBALL DE FINAL DE GRAU

GRAU EN ENGINYERIA QUÍMICA

Jarod Enrique Erreyes Pilozo

Guillem Fajula López

Iván González Germán

Oriol Martínez Añó

Irene Sanchis Garcia

Pau Viedma Garcia

Tutor: Marc Peris Miras

CERDANYOLA DEL VALLÈS, JUNY 2023



PLANTA DE PRODUCCIÓ D'ETILBENZÈ

CAPÍTOL 11: MANUAL DE CÀLCULS

Índex

11 Manual de càlculs	4
11.1 Introducció	4
11.2 Tasques prèvies	4
11.2.1 Simulador Aspen HYSYS	4
11.2.1.1 Introducció de l'Aspen HYSYS	4
11.2.1.2 Selecció dels components de la simulació i el paquet termodinàmic	6
11.2.1.3 Definició de les reaccions químiques al simulador	9
11.2.1.4 Definició dels corrents, entorn de la simulació i figures d'equips	13
11.2.2 Aproximació dels balanços de matèria per obtenir valors inicials del procés	17
11.2.3 Introducció al mètode ASME	20
11.3 Disseny dels reactors	20
11.3.1 Balanços de matèria amb reacció química	20
11.3.2 Balanços de energia calorífica amb reacció química	21
11.3.3 Implementació dels balanços a la reacció d'alquilació – transalquilació	23
11.3.4 Primer llit del reactor d'alquilació	25
11.3.5 Segon llit del reactor d'alquilació	26
11.3.6 Tercer llit del reactor d'alquilació	28
11.3.7 Quart llit del reactor d'alquilació	29
11.3.8 Reactor de transalquilació	31
11.3.9 Simulació dels reactors amb el HYSYS	32
11.3.10 Codi de MATLAB	35
11.4 Tanc de separació flash	40
11.4.1 Dimensionament del tanc de separació flash	40
11.4.2 Simulació del tanc de separació flash amb el HYSYS	42
11.4.3 Càlcul dels paràmetres de disseny del tanc de separació flash	43
11.5 Columnes de rectificació	46
11.5.1 Short-Cut, càlcul aproximat del nombre d'etapes	46
11.5.1.1 Short-Cut de la columna C-0201	47
11.5.1.2 Short-Cut de la columna C-0202	52
11.5.2 Mètode rigorós pel càlcul de les columnes de rectificació	56
11.5.2.1 Mètode rigorós de la columna C-0201	56
11.5.2.2 Mètode rigorós de la columna C-0202	64
11.6 Bescanviadors de calor	71
11.6.1 Introducció	71
11.6.2 Exemple de disseny d'un bescanviador de calor	72
11.7 Tancs d'emmagatzematge, condensats i pulmó	78
11.7.1 Disseny tancs d'emmagatzematge	78

11.7.1.1 Volum emmagatzemat.....	79
11.7.1.2 Diàmetre intern i altura del cos	80
11.7.1.3 Disseny del fons	80
11.7.1.4 Disseny del cos	81
11.7.1.5 Disseny del sostre	82
11.7.1.6 Pes de tanc.....	82
11.7.1.7 Cubetes de retenció.....	83
11.7.1.8 Taula resum.....	85
11.7.2 Disseny tancs de condensats	87
11.7.2.1 Volum de l'equip	87
11.7.2.2 Diàmetre intern i altura del cos	87
11.7.2.3 Pressió de disseny.....	88
11.7.2.4 Temperatura de disseny	88
11.7.2.5 Espessor del tanc	88
11.7.2.6 Pes de tanc.....	92
11.7.1.7 Taula resum.....	92
11.8 Absorbidor.....	93
11.8.1 Introducció.....	93
11.8.2 Determinació del nombre d'etapes d'equilibri de l'absorbidor	97
11.8.3 Càlcul dels paràmetres de disseny de la columna d'absorció	99
11.8.4 Codi de MATLAB de la columna d'absorció.....	100
11.9 Determinació dels gasos de combustió de les calderes.....	103
11.9.1 Generació de CO ₂	103
11.9.2 Generació d'energia	105
11.10 Residus municipals.....	107
11.11 Canonades, accessoris, bombes, compressors i bufadors.....	108
11.11.1 Exemple d'un tram recte amb accessoris i equips extres amb pèrdues	111
11.11.2 Exemple d'un tram amb bifurcacions de connexions i reduccions de diàmetres	113
11.11.3 Recull de totes les canonades	115
11.11.3.1 Circuit principal de procés	116
11.11.3.2 Circuit d'oli tèrmic a 500°C	124
11.11.3.3 Circuit d'oli tèrmic a 400°C	126
11.11.3.4 Circuit de recollida d'oli tèrmic.....	129
11.11.3.5 Circuit d'aigua glicolada	130
11.11.3.6 Circuit d'aigua	133
11.11.3.7 Circuit de fuel	136
11.11.3.8 Circuit de CO ₂	140
11.11.3.9 Circuit de càrrega.....	141

11.11.3.10	Circuit de descàrrega	142
11.11.3.11	Circuit de la canonada de refrigeració d'emergència del reactor R-0201 ..	143
11.11.3.12	Canonada de transport de l'àcid carbònic	144
11.11.3.13	Circuit de la línia de vapor	145
11.11.4	Càlcul de bombes, expandors i bufadors	147
11.11.4.1	Bombes.....	147
11.11.4.2	Compressors i expandors.....	147
11.11.5	Càlcul del gruix d'aïllant de les canonades.	148
11.12	<i>Disseny mecànic dels equips a pressió</i>	149
11.12.1	Determinació del gruix de la paret cilíndrica.....	149
11.12.2	Determinació del gruix mínim de les tapes de l'equip	150
11.12.3	Determinació de la pressió màxima admissible	151
11.13	<i>Bibliografia</i>	152

11 Manual de càlculs

11.1 Introducció

L'objectiu d'aquest capítol consisteix a explicar pas a pas les metodologies de càlcul realitzades per a cadascun dels equips i corrents del projecte TARREB23.

Les explicacions estan fetes basant-se en múltiples referències bibliogràfiques així com amb el suport del programari Aspen HYSYS, d'ASPEN TECH. També s'utilitza el software de MATLAB per tal de realitzar simulacions en alguns equips, en el cas de TARREB23 s'ha utilitzat aquest programari per simular els reactors i l'absorbidor. Pel que fa a l'Aspen HYSYS s'ha d'utilitzar principalment per les columnes de rectificació i per fer comprovacions d'altres equips.

També s'ha fet servir el programari Aspen Exchanger Design & Rating de l'empresa ASPEN TECH.

11.2 Tasques prèvies

11.2.1 Simulador Aspen HYSYS

11.2.1.1 Introducció de l'Aspen HYSYS

El simulador Aspen HYSYS és un programari de simulació de processos d'enginyeria química àmpliament utilitzat en la indústria i acadèmia. És capaç de modelar i simular una àmplia varietat de processos químics i d'enginyeria, des de la refinació de petroli fins a la producció de productes farmacèutics.



Figura 11.1: Icona de la empresa del simulador Aspen HYSYS.

El programari permet crear models matemàtics detallats dels processos químics i d'enginyeria, que després poden ser simulats en un entorn virtual. Això permet als

enginyers i científics explorar diferents escenaris de processament i avaluar el rendiment del procés en diferents condicions d'operació.

Entre les funcionalitats de Aspen HYSYS s'inclouen:

- Creació de models: Aspen HYSYS permet crear models matemàtics de processos químics i d'enginyeria complexos, utilitzant una àmplia gamma de components químics, equips i operacions unitàries.
- Simulació i optimització: Una vegada creat el model, es pot simular el procés en un entorn virtual. Es poden explorar diferents escenaris de processament i avaluar el rendiment del procés en diferents condicions d'operació, la qual cosa permet optimitzar el procés per a millorar la seva eficiència i rendibilitat.
- Anàlisi de dades: Aspen HYSYS pot importar i exportar dades de diferents fonts, la qual cosa permet analitzar i visualitzar els resultats de la simulació en una varietat de formats. Això facilita la interpretació dels resultats i la presa de decisions informades.
- Disseny i optimització d'equips: Aspen HYSYS permet el disseny i optimització d'equips i operacions unitàries, com a torres de destil·lació, bescanviadors de calor i reactors químics. Això permet millorar l'eficiència i el rendiment del procés, reduir els costos i minimitzar els riscos operatius.
- Simulació de seguretat i riscos: Aspen HYSYS també pot simular i analitzar els riscos operatius i de seguretat associats amb els processos químics i d'enginyeria, la qual cosa ajuda a identificar i mitigar els possibles riscos abans que ocorrin.

En resum, Aspen HYSYS és una eina poderosa per a la simulació i optimització de processos químics i d'enginyeria, la qual cosa permet als enginyers i científics crear models detallats de processos complexos, explorar diferents escenaris de processament i millorar el rendiment del procés en termes d'eficiència, cost i seguretat.

A Ebsyn S.L.. suposa un gran avantatge utilitzar aquest software, ja que ens permet utilitzar els mètodes matemàtics a l'hora de calcular les columnes de rectificació, així com que el mateix software calculi tot el referent a la termodinàmica del procés. També serà d'utilitat per acabar d'afinar els càlculs que es realitzin i es puguin comprovar en aquesta eina informàtica.

11.2.1.2 Selecció dels components de la simulació i el paquet termodinàmic

Primerament, se seleccionen totes les substàncies que intervenen en el procés productiu de TARREB23, en el menú de “PROPIERTIES” del simulador:

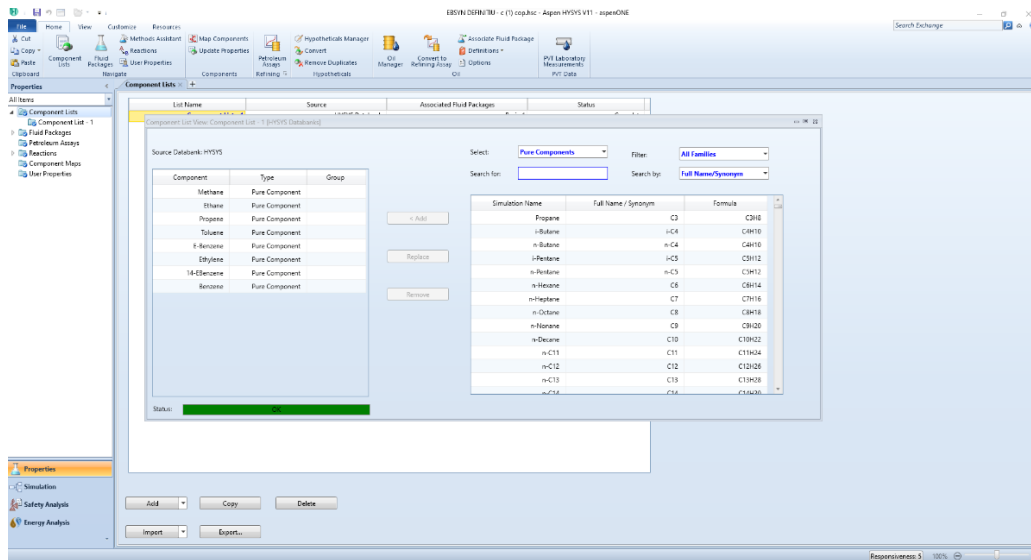


Figura 11.2: Selecció de components al simulador.

També s’han comprovat que els noms de les substàncies que hi ha al simulador es correspongui amb la fórmula química de cada espècie del procés, així com el número CAS. Encara que no s’ha adjunta aquesta comprovació en el manual de càlcul s’ha realitzat abans de començar tot el procediment de simulació.

Seguidament, s’ha seleccionat el paquet termodinàmic utilitzat per determinar les propietats que depenen de la termodinàmica tal com: densitat, viscositat...

El procediment utilitzat per determinar aquest paquet termodinàmic ha estat el proposat per l’algoritme Carlson [1]:

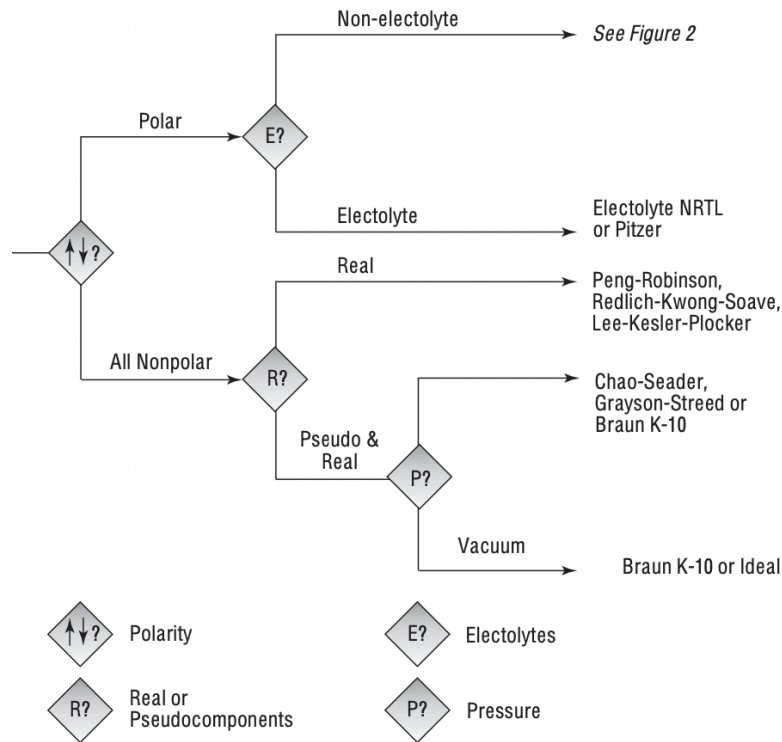


Figura 11.3: Primers passos per seleccionar el mètode de propietats físiques.

En aquest primer pas es tenen en compte el tipus de molècules que intervenen en el procés TARREB23, i com que totes són hidrocarburs, són de naturalesa polar. Seguidament com que no són electròlits, es procedeix a la següent etapa de la selecció del mètode:

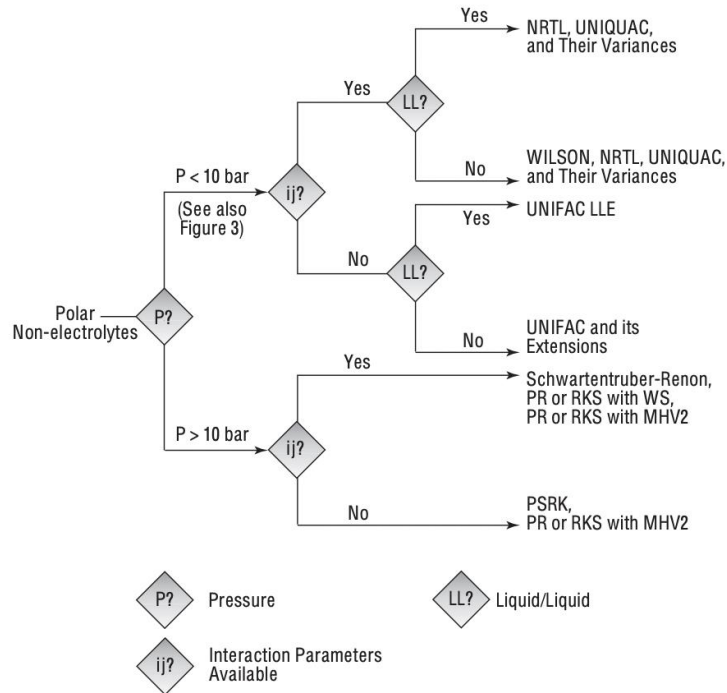


Figura 11.4: Procediment per a components polars i que no son electròlits.

Pel que fa a la pressió aquest procés treballa a pressions molt elevades superiors als 10 bar. Per tant, com que també el simulador Aspen HYSYS té els factors interacció binària ij, s'acaba escollint el mètode de propietats SRK (Soave Readlich Kwong).

Equation of State Interaction Parameters

	Methane	Ethane	Propene	Toluene	E-Benzene	Ethylene	14-EBenzene	Benzene
Methane	---	0,00224	0,00503	0,05470	0,02404	0,00097	0,03364	0,01281
Ethane	0,00224	---	0,00060	0,03000	0,01182	0,01230	0,01892	0,02800
Propene	0,00503	0,00060	---	0,00430	0,00728	0,00159	0,01307	0,00182
Toluene	0,05470	0,03000	0,00430	---	0,00039	0,01106	0,00242	0,00053
E-Benzene	0,02404	0,01182	0,00728	0,00039	---	0,01555	0,00086	0,00183
Ethylene	0,00097	0,01230	0,00159	0,01106	0,01555	---	0,02353	0,00679
14-EBenzene	0,03364	0,01892	0,01307	0,00242	0,00086	0,02353	---	0,00520
Benzene	0,01281	0,02800	0,00182	0,00053	0,00183	0,00679	0,00520	---

Treatment of Interaction Coefficients Unavailable from the Library
 Estimate HC-HC / Set Non HC-HC to 0.0 Set All to 0.0

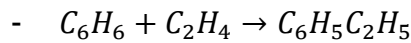
Figura 11.5: Paràmetres d'interacció binària de cada component del procés TARREB23.

11.2.1.3 Definició de les reaccions químiques al simulador

Per poder simular posteriorment els reactors cal definir prèviament al simulador les reaccions químiques, així com donar l'energia d'activació i el factor preexponencial de cada reacció.

Per fer-ho s'ha d'anar al menú de "PROPERTIES" i crear un "REACTION SET", i se selecciona les reaccions que siguin heterogènies. Pel projecte TARREB23, s'ha creat 2 conjunts de reaccions, un per l'alquilació i un altre per la transalquilació. En ambdós s'ha introduït també els límits inferior i superior de temperatura de treball de les zeolites ZSM-5.

En l'alquilació hi ha 3 reaccions simultànies:



S'introdueix la estequiometria d'aquesta reacció:

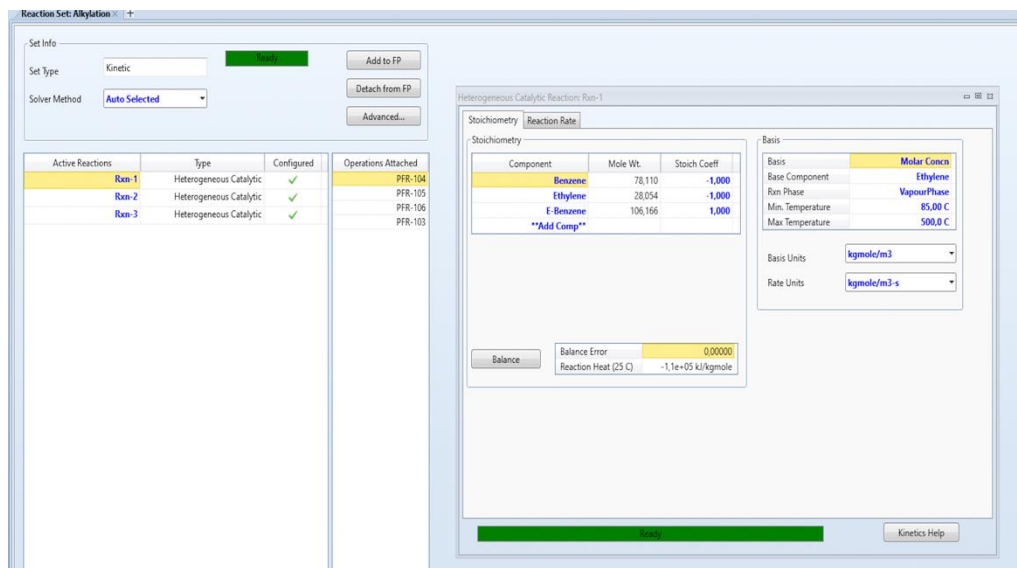


Figura 11.6: Estequiometria de la primera reacció d'alquilació.

A continuació s'introdueixen també les dades cinètiques de la reacció obtingudes de la bibliografia [2]:

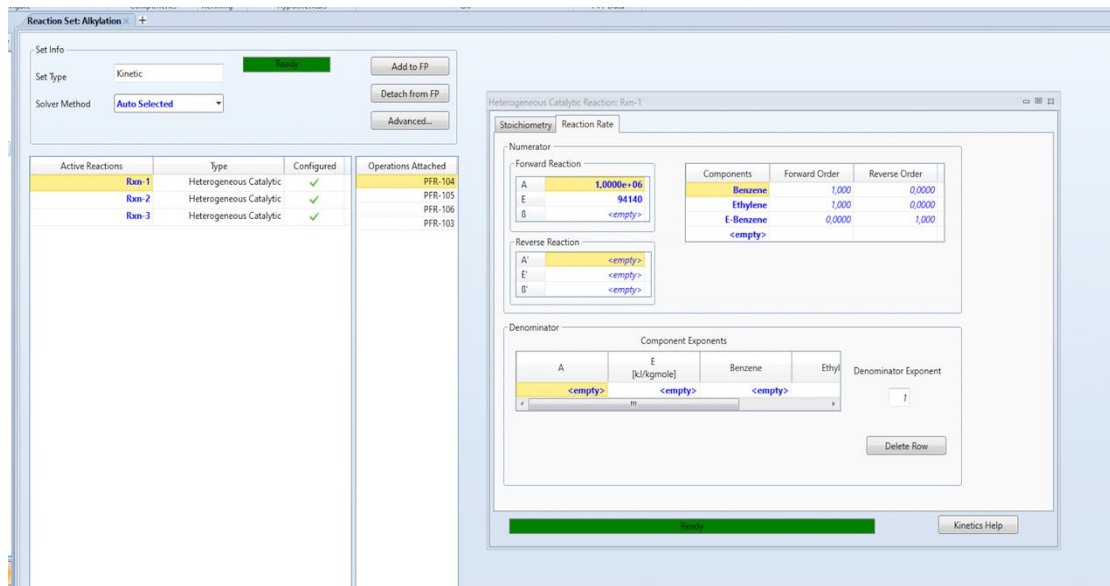
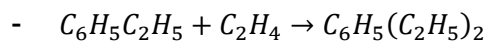


Figura 11.7: Paràmetres cinètics de la primera reacció d'alquilació.



S'introdueix la estequiometria d'aquesta reacció:

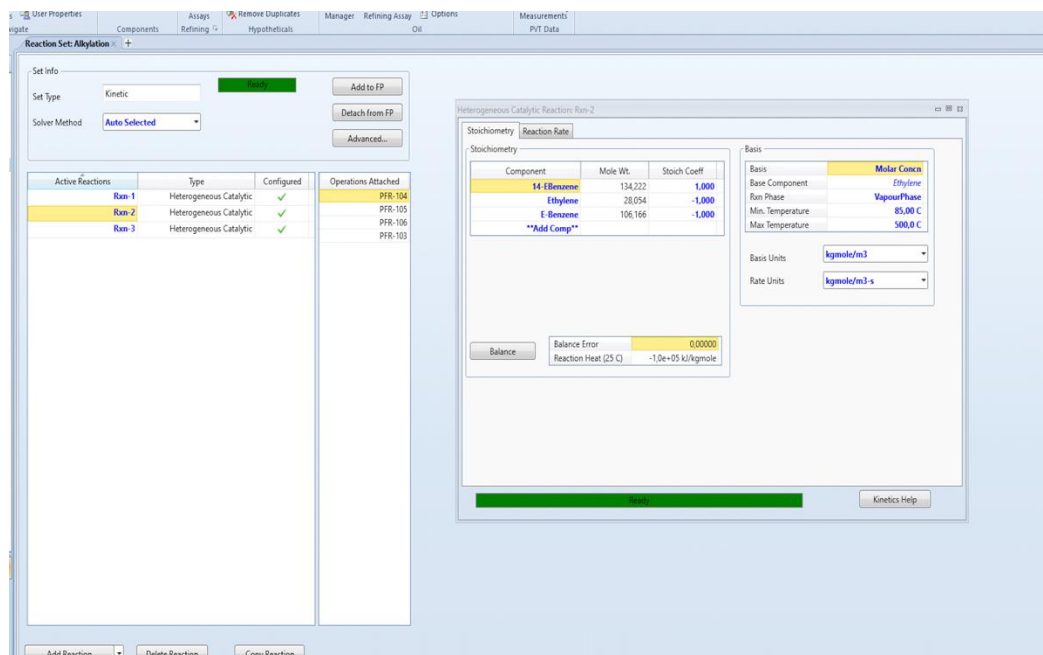


Figura 11.8: Estequiometria de la segona reacció d'alquilació.

A continuació s'introdueixen també les dades cinètiques de la reacció obtingudes de la bibliografia [2]:

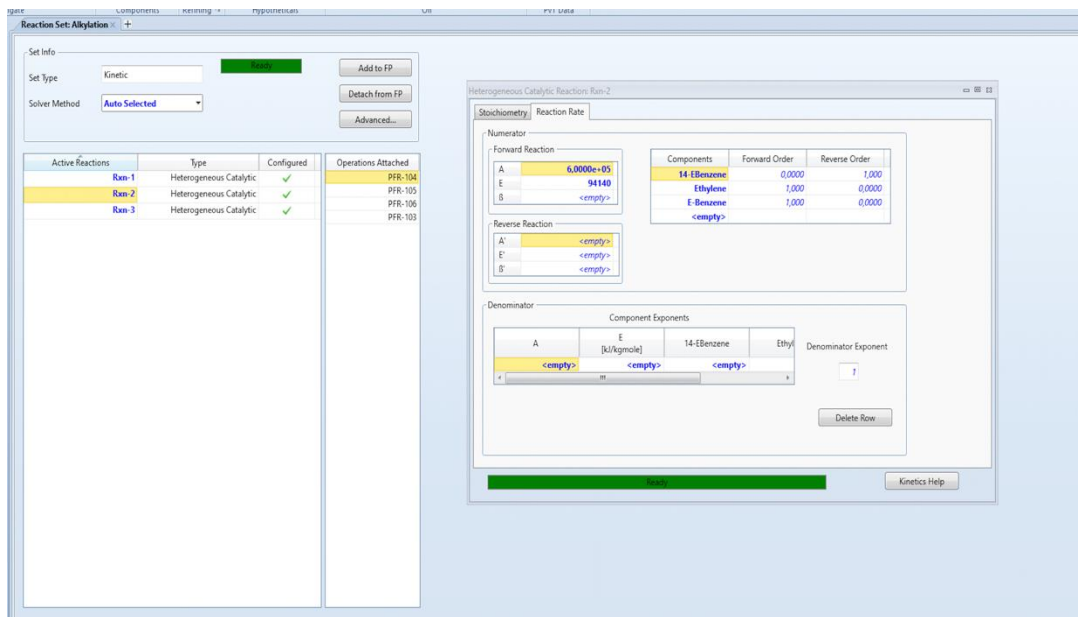
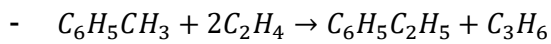


Figura 11.9: Paràmetres cinètics de la segona reacció d'alkilació.



S'introdueix la estequiometria d'aquesta reacció:

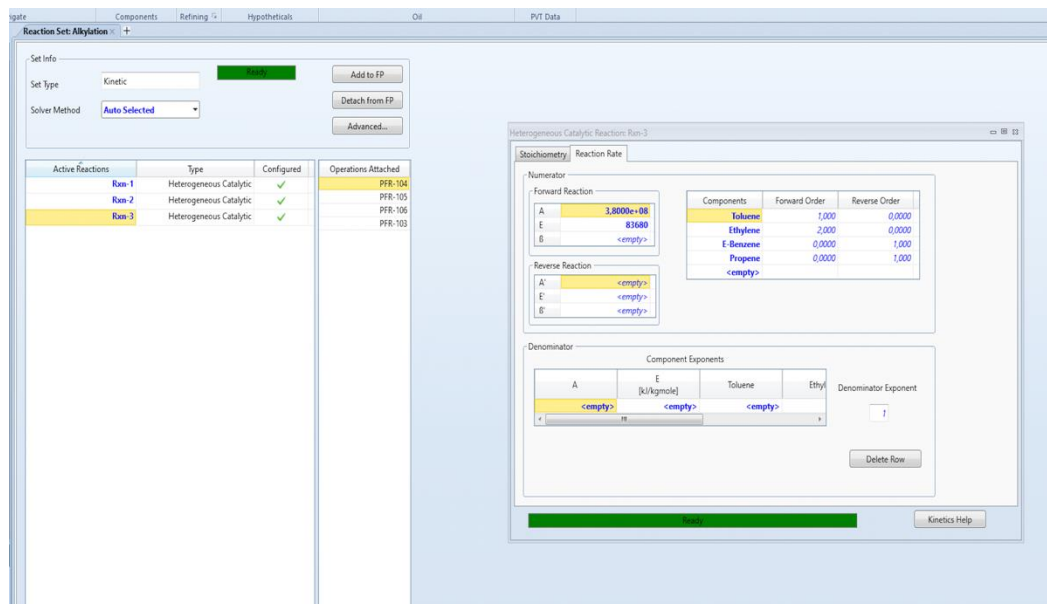


Figura 11.10: Estequiometria de la tercera reacció d'alkilació.

A continuació s'introdueixen també les dades cinètiques de la reacció obtingudes de la bibliografia [2]:

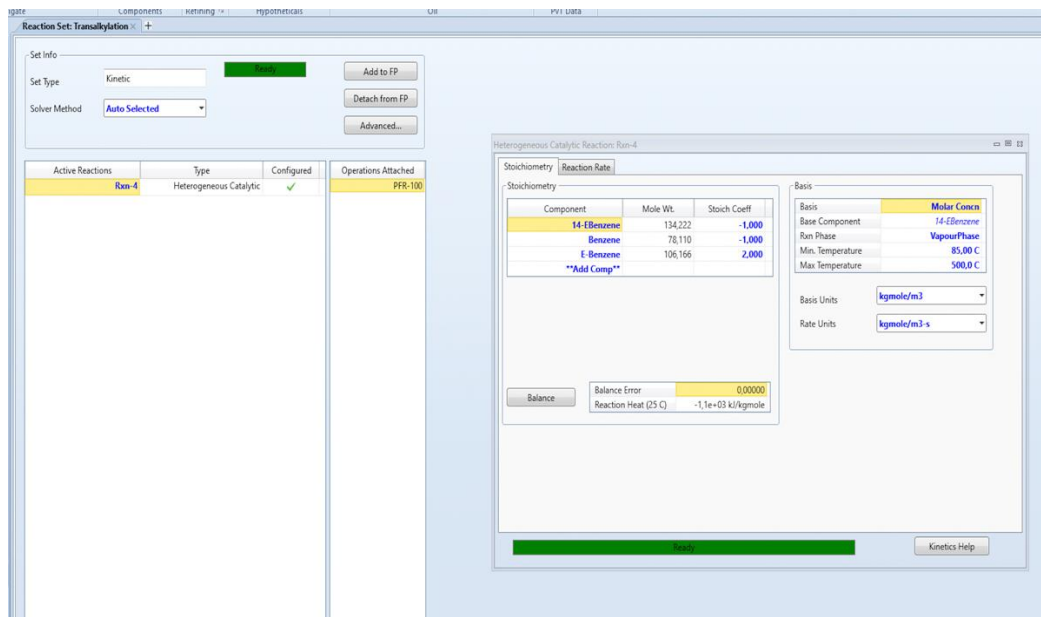
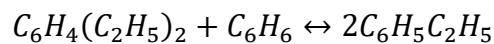


Figura 11.11: Paràmetres cinètics de la tercera reacció d'alquilació.

Pel que fa la transalquilació només es dona en una única reacció:



S'introdueix la estequiometria d'aquesta reacció:

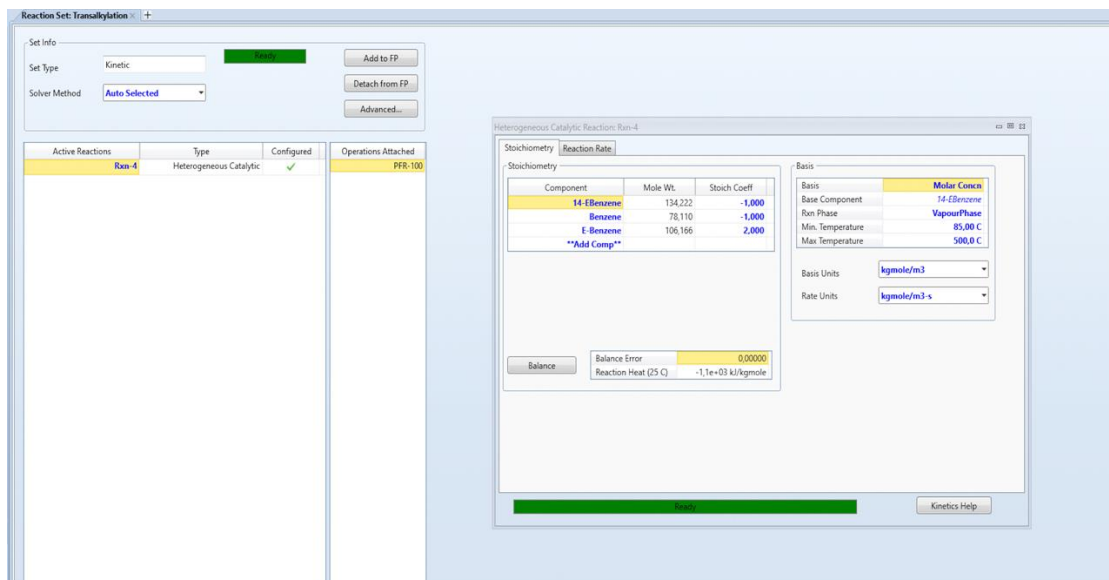


Figura 11.12: Estequiometria de la reacció de transalquilació.

A continuació s'introdueixen també les dades cinètiques de la reacció obtingudes de la bibliografia [2]:

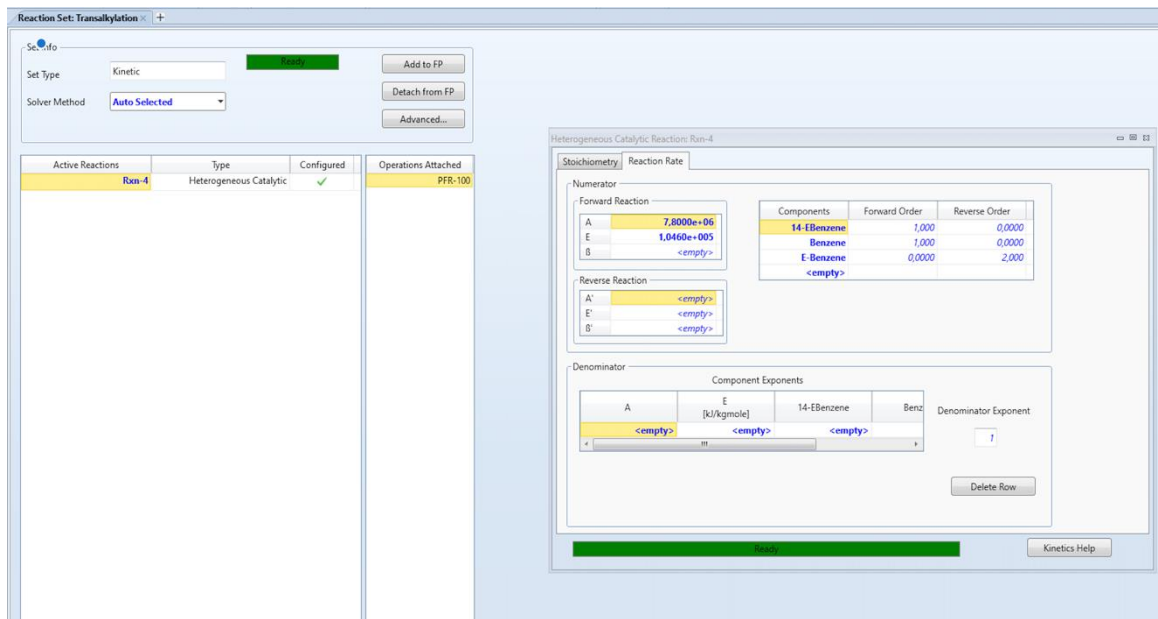


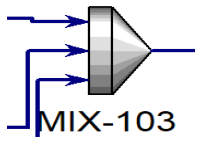
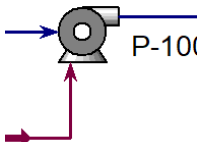
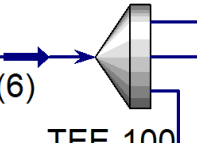
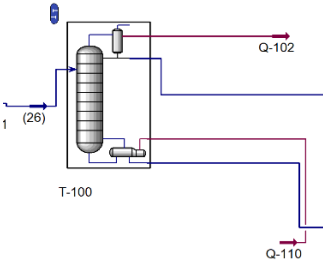
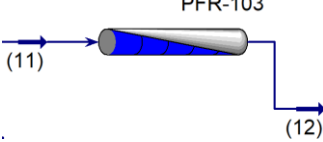
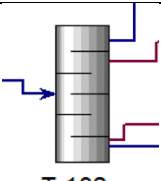

Figura 11.13: Paràmetres cinètics de la reacció de transalquilació.

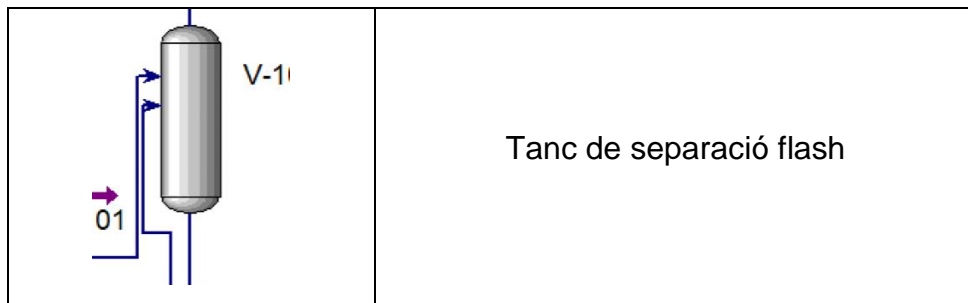
11.2.1.4 Definició dels corrents, entorn de la simulació i figures d'equips

Com que en els següents capítols es parlarà d'utilitzar segons que equips, es procedeix a introduir una taula amb les il·lustracions de cada equip del simulador amb el què és cada cosa:

Taula 11.1: Llegenda d'equips de la simulació.

	<p>Bescanviador de calor (Cooler)</p>
	<p>Expansor</p>
	<p>Bescanviador de calor (Heater)</p>

 <p>MIX-103</p>	<p>Mesclador</p>
 <p>P-101</p>	<p>Bomba hidràulica</p>
 <p>(6) TEE-100</p>	<p>Separador de cabal</p>
 <p>T-100</p> <p>Q-102</p> <p>Q-110</p>	<p>Columna de rectificació</p>
 <p>PFR-103</p> <p>(11)</p> <p>(12)</p>	<p>Reactor tubular</p>
 <p>T-102</p>	<p>Short-Cut</p>
 <p>RCY-2</p>	<p>Unitat de recirculació</p>



Hi ha d'altres equips que no s'han posat en aquesta llegenda, ja que són molt més intuïtiu com la vàlvula d'expansió, o bé el compressor que és la mateixa figura que l'expansor però canviada de sentit.

Per a definir un corrent només s'ha de donar dades de temperatura, pressió, cabal molar, i composicions. El simulador s'encarrega de calcular la resta de paràmetres:

Material Stream: (1)			
Worksheet Attachments Dynamics			
Worksheet	Stream Name	(1)	Liquid Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	25,00	25,00
Composition	Pressure [kPa]	101,3	101,3
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	500,0	500,0
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	3,911e+004	3,911e+004
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	44,34	44,34
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	4,909e+004	4,909e+004
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	-147,0	-147,0
Cost Parameters	Heat Flow [kJ/h]	2,455e+007	2,455e+007
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	44,31	44,31
Emissions	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		

Figura 11.14: Definició d'un corrent de matèria.

Quan hi ha bifurcacions de cabal, s'utilitza la unitat "TEE" la qual demana o bé que s'especifiquin cabals de sortida de cada ramal, o bé es pot donar proporcions de separació de cabal:

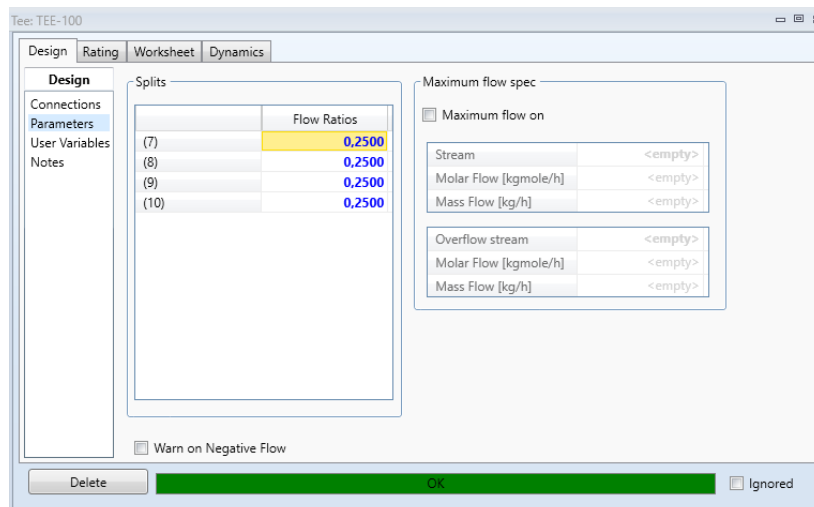


Figura 11.15: Definició dels paràmetres d'un separador de cabal.

Per les unions de cabal, només fa falta indicar els cabals d'entrada a mesclar, i el cabal de sortida ja mesclat:

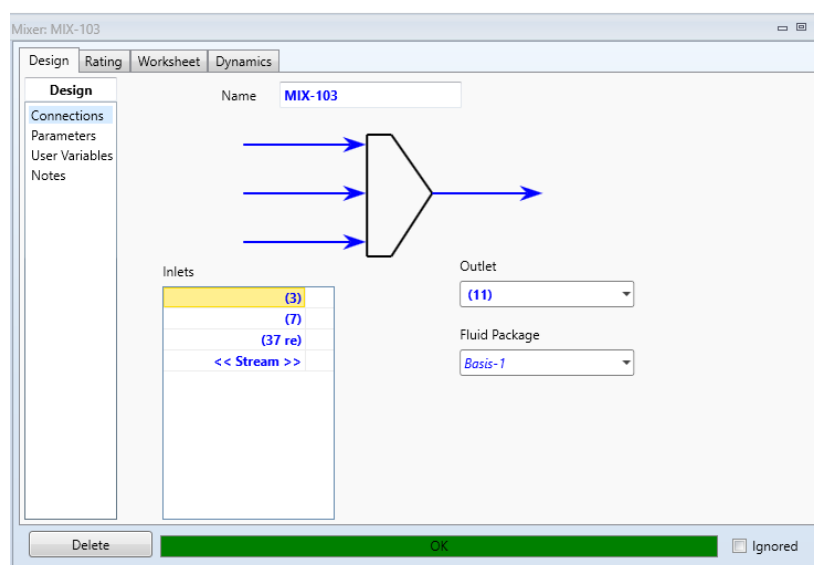


Figura 11.16: Definició de corrents d'un mesclador.

Una eina molt útil a l'Aspen HYSYS consisteix a fixar una variable de sortida de l'equip i el simulador s'encarrega de fer la resta. Aquesta eina ha estat utilitzada pels bescanviadors de calor, i sobretot per les bombes, compressors, expandors i vàlvules d'expansió. A continuació es posa un exemple de com s'ha fet per la vàlvula d'expansió abans del tanc de separació flash:

simular a partir de cap número. Primerament, s'han fet un seguit de balanços manualment per tal de conèixer valors, i ja finalment s'han acurat aquests amb el simulador.

L'única dada que és coneguda és la producció diària d'etilbenzè en massa, que és de 1000 tn/d. També es coneixen les especificacions de qualitat del producte, on pels càlculs fixarem que serà una mescla al 99,95% d'etilbenzè i l'altra 0,05% impureses de benzè, ambdós en fraccions màssiques.

$$m_{total \text{ (sortida 2na columna)}} = \frac{1000}{0,9995} = 1000,5 \frac{tn}{d}$$

A partir d'aquest valor es comença amb un seguit d'aproximacions i és que la segona columna de rectificació separi molt bé per evitar traces d'altres components, per tant, se suposa una separació del 99%, o sigui que es recupera el 99% del producte d'interès respecte del qual entra a la columna, per tant, el cabal màssic d'etilbenzè que entra a la columna és de:

$$m_{EB \text{ (entrada 2na columna)}} = \frac{1000,5}{0,99} = 1010,61 \frac{tn \text{ etilbenzè}}{d}$$

Es fa el mateix per a la primera columna i així s'obté el cabal d'etilbenzè a l'entrada de la primera columna de rectificació:

$$m_{EB \text{ (entrada 1a columna)}} = \frac{1010,61}{0,99} = 1020,82 \frac{tn \text{ etilbenzè}}{d}$$

Com que el següent pas serà anar al reactor, convé passar a cabals molars:

$$\begin{aligned} n_{EB \text{ (entrada 1a columna)}} &= \frac{1020,82 \text{ tn etilbenzè}}{d} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ tn}} \cdot \frac{1 \text{ kmol}}{106,16 \text{ kg}} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \\ &= 400,66 \frac{\text{kmol}}{d} \end{aligned}$$

Aquests seran els mols necessaris per aconseguir la producció desitjada, o sigui que son els que s'han de produir com a mínim contant alhora el reactor de transalquilació.

Per tant, per no treballar al mínim sobredimensionem uns $30 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$ d'etilbenzè que provenen de la transalquilació.

Només es té en compte aquest número per fer aproximacions, però no es recalcula res, ja que només es volen treure valors d'entrada d'etilè i de benzè. Per tant, es continua amb la reacció.

Segons la patent [3] la selectivitat de la reacció d'interès és del 90%, no diu res més de les altres dues reaccions, per tant, s'assumeix que la selectivitat de la reacció de dietilbenzè és del 8% i l'altre del 2%. Per tant, amb aquests valors de selectivitat es calcula els mols necessaris d'etilè tenint en compte la selectivitat i que l'estequiometria és 1 a 1 (per a la reacció d'interès):

$$n_{\text{etilè}} = \frac{400,66 \text{ kmol/h}}{0,9} = 445,18 \frac{\text{kmol etilè}}{\text{h}}$$

Es sobredimensiona una mica per assegurar que s'obté la quantitat desitjada i s'afegeixen uns $10 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$ d'etilè de més. Per tant, s'assoleix un corrent d'aliment fresc d'etilè d'uns $455,18 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$.

Hem de tenir en compte que el corrent que comprem com a matèria primera no és etilè pur, per tant cal aplicar les respectives composicions per tal d'obtenir el corrent d'alimentació. Per tant coneixent que la composició molar és de: 0,3 età, 0,2 metà i 0,5 etilè, obtenim que:

$$n_{\text{entrada fresc}} = \frac{455,18 \text{ kmol/h}}{0,5} = 910,36 \frac{\text{kmol etilè}}{\text{h}}$$

Ja tenim un valor aproximat d'entrada fresca del corrent d'etilè. Ara queda el de benzè, sabent que el benzè al reactor d'alquilació només intervé en la reacció d'interès, i que la seva estequiometria és 1 a 1 respecte al etilbenzè, tenim que directament hem d'alimentar:

$$n_{\text{benzè}} = 400,66 \frac{\text{kmol benzè}}{\text{h}}$$

Com que el corrent de benzè entra amb impureses de toluè apliquem la seva fracció molar corresponent, que és de: 99,85% benzè i la resta toluè:

$$n_{benzè\ fresc} = \frac{400,66 \text{ kmol/h}}{0,9985} = 401,26 \frac{\text{kmol benzè}}{h}$$

Aquests càlculs han ajudat a l'hora de fer simulacions a l'ASPEN HYSYS, obtenint així uns corrents d'aliment fresc de $900 \frac{\text{kmol}}{h}$ i $500 \frac{\text{kmol}}{h}$ d'etilè i benzè respectivament.

11.2.3 Introducció al mètode ASME

A l'hora de fer el dimensionament mecànic s'ha de tenir en compte principalment la pressió a la qual treballa l'equip. Aquest disseny mecànic de l'equip es realitza mitjançant les equacions i criteris que es troben a l'ASME Secció VIII.

El càlcul implica determinar el gruix necessari per assegurar que l'equip no es trenca o explota per causa de la pressió.

La determinació del gruix de l'equip és una prioritat per a Ebsyn S.L. ja que el correcte càlcul d'aquests paràmetres, i el seu respectiu sobre dimensionament, és una garantia que no hi haurà explosions a l'equip per causa de la sobrepressió. Això és vital per tal de garantir el funcionament del procés, i, més important, per protegir la vida de tot el personal de planta.

A l'hora d'abordar el dimensionament mecànic, es comença per determinar el gruix mínim del cos cilíndric de l'equip.

11.3 Disseny dels reactors

11.3.1 Balanços de matèria amb reacció química

A continuació es desenvolupen els balanços de matèria aplicats de manera genèrica en cadascun de les unitats reactives:

$$E + G = A + S$$

Com que estem en estat estacionari el terme d'acumulació (A) és 0. Per tant:

$$G = S - E$$

Substituint cada terme de balanç per unitats molars de $\left[\frac{\text{mols } j}{\text{temps}}\right]$:

$$r_j \cdot V = F_{jS} - F_{jE}$$

On:

- r_j és la velocitat de reacció del component j en unitats de $\left[\frac{\text{mols } j}{\text{temps} \cdot \text{volum}}\right]$.
- V és el volum del reactor.
- F_{jE} i F_{jS} el cabal molar del component j en unitats de $\left[\frac{\text{mols } j}{\text{temps}}\right]$ a la entrada i sortida respectivament.

Ebsyn S.L. ha escollit el mètode d'operació continu i que sigui un reactor de geometria tubular, fent que es modelitzi a un reactor de flux pistó:

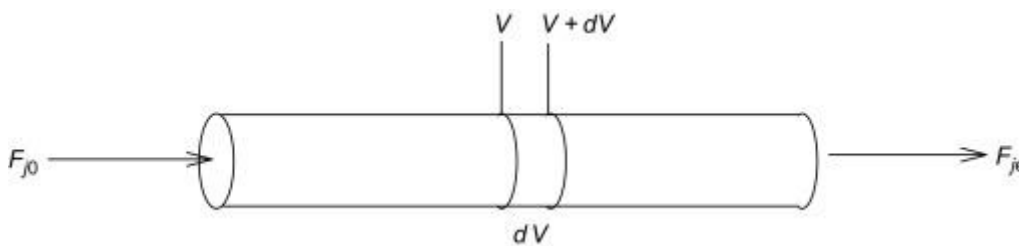


Figura 11.19: Modelització d'un flux pistó.

Si agafem tal com es veu en la figura 11.19 un diferencial de volum i aïllem en forma d'una equació diferencial obtenim l'expressió de balanç:

$$\frac{dF_j}{dV} = r_j$$

11.3.2 Balanços de energia calorífica amb reacció química

Partint de la mateixa expressió arribem a:

$$\Delta q + \left(\sum F_i \cdot H_i\right)_{\text{entrada}} - \left(\sum F_i \cdot H_i\right)_{\text{sortida}} = 0$$

On:

- Δq és la calor bescanviada en unitats de $\left[\frac{\text{energia}}{\text{temps}}\right]$.
- H_i és la entalpia del corrent, o bé la energia continguda en el corrent en unitats de $\left[\frac{\text{energia}}{\text{temps} \cdot \text{mols } i}\right]$.

Com que el mode d'operació escollit és l'operació adiabàtica el terme de bescanvi s'anul·la, si dividim entre el volum de reactor i diferenciem de la mateixa manera que en el balanç de matèria queda:

$$\frac{d \sum F_i \cdot H_i}{dV} = 0$$

Separant els termes aplicant derivades:

$$\sum \frac{dF_i}{dV} \cdot H_i - \sum \frac{dH_i}{dV} \cdot F_i = 0$$

Sabent que:

$$H_i = H_i^0 + \int_{T_R}^T C p_i \cdot dT$$

I derivant:

$$\frac{dH_i}{dV} = C p_i \cdot \frac{dT}{dV}$$

Substituïm tot això i la expressió del balanç de matèria treta anteriorment:

$$\sum r_j \cdot H_j - \sum F_i \cdot C p_i \cdot \frac{dT}{dV} = 0$$

Fem altra consideració:

$$\Delta H_R = \Delta C p_i \cdot (T - T_{ref}) + \Delta H_R^0$$

$$\frac{dT}{dV} = \frac{\sum r_j \cdot [-\Delta H_R]}{(\sum F_i \cdot C p_i)_{entrada}}$$

Substituïm la darrera expressió i obtenim finalment l'expressió de balanç:

$$\frac{dT}{dV} = \frac{\sum r_j \cdot [-(\Delta C p_j \cdot (T - T_{ref}) + \Delta H_{Rj}^0)]}{(\sum F_i \cdot C p_i)_{entrada}}$$

On:

- Cp_i és el calor específic del component i, en unitats de $\left[\frac{\text{energia}}{\text{mols } i \cdot ^\circ\text{C}}\right]$.
- El subíndex i fa referència a un component, i el subíndex j a una reacció, ja que en aquests reactors s'esdevenen més d'una reacció de manera simultània.
- T_{ref} és la temperatura de referència de les dades de entalpia i Cp, en aquest cas 0 graus.
- ΔH_{Rj}^0 és entalpia de la reacció j en unitats de $\left[\frac{\text{energia}}{\text{mols } i}\right]$.
- ΔCp_j és la variació de Cp de la reacció j, amb les mateixes unitats de la Cp. Aquest paràmetre es determina de la següent manera per a una reacció concreta:

$$\Delta Cp_j = \sum v_i \cdot Cp_i$$

11.3.3 Implementació dels balanços a la reacció d'alquilació – transalquilació

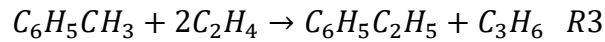
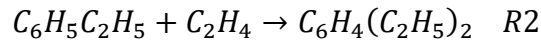
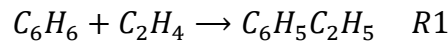
Segons la bibliografia s'ha estudiat el mecanisme de reacció pel qual es dona el procés que a Ebsyn S.L. s'ha dut a terme. El procés es dona en 2 grups de reaccions, la d'alquilació i la de transalquilació.

Abans de definir les reaccions es procedeix a nomenar cada molècula i donar també un subíndex numèric:

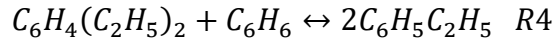
Taula 11.2: Llegenda de referència de components del procés de TARREB23.

Formula química	Nom	Subíndex
Metà	CH_4	1
Età	C_2H_6	2
Propilè	C_3H_6	3
Toluè	$C_6H_5CH_3$	4
Etilbenzè	$C_6H_5C_2H_5$	5
Etilè	C_2H_4	6
Dietilbenzè	$C_6H_4(C_2H_5)_2$	7
Benzè	C_6H_6	8

La reacció d'alquilació està conformada per 3 etapes o reaccions:



La reacció de transalquilació està conformada per una única reacció:



Segons la bibliografia [2] la velocitat de reacció j , es defineix de la següent manera:

$$r_j = k_{0j} \cdot \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right) \cdot C_6^a \cdot C_5^b \cdot C_4^c \cdot C_8^d \cdot C_7^e$$

On cada valor depèn de la reacció j en la que apareix:

Taula 11.3: Paràmetres cinètics de les reaccions.

Reacció	j	$E_j \left(\frac{kcal}{kmol}\right)$	k_{0j}	a	b	c	d	e	H_{Rj}^0
R1	1	22500	$1,00 \cdot 10^6$	1	0	0	1	0	-105497,8
R2	2	22500	$6,00 \cdot 10^5$	1	1	0	0	0	-104407,8
R3	3	20000	$3,80 \cdot 10^8$	2	0	1	0	0	-104450,6
R4	4	25000	$3,80 \cdot 10^6$	0	0	0	1	1	-1090,0

Coneixent ara com es determina la velocitat de reacció resta només aplicar el balanç de tots els components i fer l'únic balanç d'energia. Per exemple es procedeix a plantejar totes les equacions que simulen per a un reactor que té la reacció d'alquilació:

$$\frac{dF_1}{dV} = 0$$

$$\frac{dF_2}{dV} = 0$$

$$\frac{dF_3}{dV} = r_3$$

$$\frac{dF_4}{dV} = -r_3$$

$$\frac{dF_5}{dV} = r_1 - r_2 + r_3$$

$$\frac{dF_6}{dV} = -r_1 - r_2 - 2 \cdot r_3$$

$$\frac{dF_7}{dV} = r_2$$

$$\frac{dF_8}{dV} = -r_1$$

$$\frac{dT}{dV} = \frac{\sum r_j \cdot [-(\Delta C p_j \cdot (T - T_{ref}) + \Delta H_{Rj}^0)]}{(\sum F_i \cdot C p_i)_{entrada}}$$

Aquests termes de temperatura, com que és massa gran, es deixa només desenvolupat als codis de simulació de MATLAB. Pel que fa a els diferents valors de la Cp, aquests s'han extret del simulador Aspen HYSYS:

Taula 11.4: Capacitat calorífica de cada component.

Cp_1 (KJ/KmolC)	56,488
Cp_2 (KJ/KmolC)	98,02
Cp_3 (KJ/KmolC)	117,69
Cp_4 (KJ/KmolC)	236,23
Cp_5 (KJ/KmolC)	317,312
Cp_6 (KJ/KmolC)	76,41
Cp_7 (KJ/KmolC)	512,946
Cp_8 (KJ/KmolC)	182,736

11.3.4 Primer llit del reactor d'alquilació

S'ha dissenyat un codi de MATLAB per tal de trobar volums de reactor aproximats a l'hora d'introduir a la simulació, i així comprovar que el HYSYS funciona com s'ha d'esperar. Segons la simulació de l'ASPEN HYSYS tenim que a l'entrada del primer reactor entra:

Taula 11.5: Corrents de cada component a la entrada del primer llit del reactor d'alquilació.

Espècie	Cabal (Kmol/h)
Metà	71,8
Età	194,0
Propilè	3,9
Toluè	4,3
Etilbenzè	1,0
Etilè	128,1
Dietilbenzè	0,001
Benzè	2372,0

Ficant aquests valors al codi de MATLAB dissenyat, i fixant uns 30 m³ de reactor que és el que dona la simulació del HYSYS s'obté que:

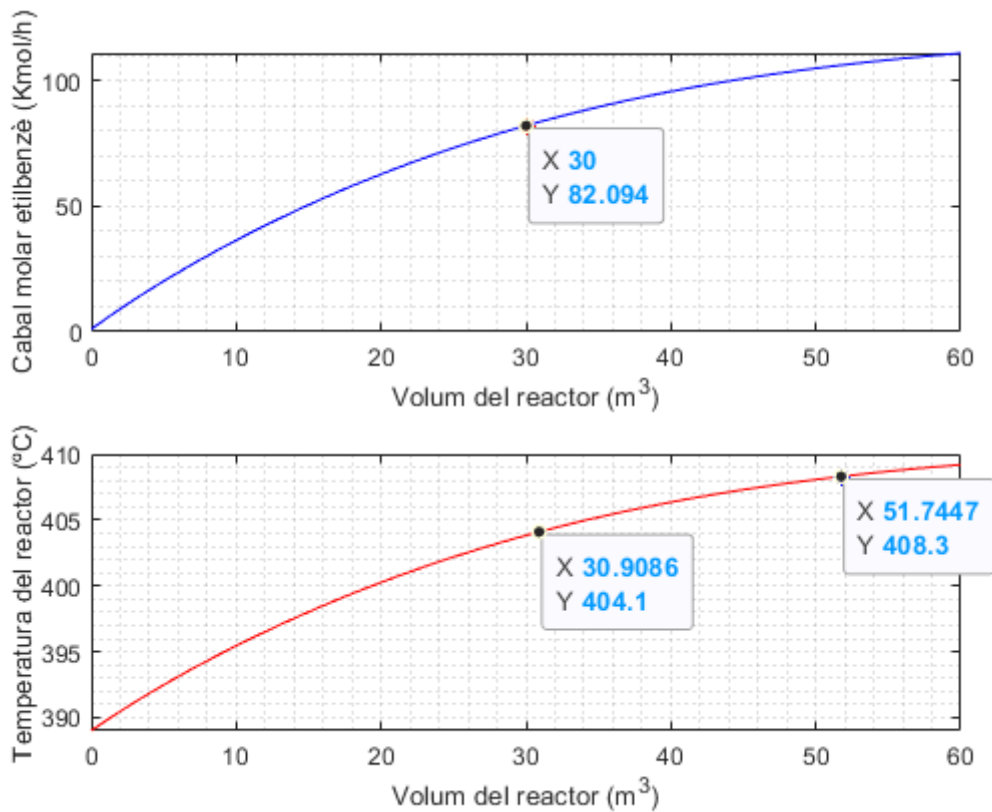


Figura 11.20: Perfils de cabal i temperatura al primer llit del reactor d'alquilació.

Es pot veure en la figura 11.20 com el corrent de sortida és aproximadament l'esperat per la simulació, uns 83,94 Kmol/h, a més a més la temperatura de sortida és de 404°C en vers a la de la simulació que és de 408°C. Segurament les diferències son degudes al fet que en el MATLAB no s'han integrat les pèrdues de pressió, i al HYSYS sí. Per tant, es dona per bona la simulació. S'aplica la fracció de buit de la patent [3] (0.75):

$$V_{reactor1} = \frac{30}{0.75} = 40 \text{ m}^3$$

11.3.5 Segon llit del reactor d'alquilació

Amb el mateix codi d'abans es treu el volum de reactor aproximat per a la simulació, i així comprovar que el HYSYS funciona com s'ha d'esperar. Segons la simulació de l'ASPEN HYSYS tenim que a l'entrada del segon reactor entra:

Taula 11.6: Corrents de cada component a la entrada del segon llit del reactor d'alquilació.

Espècie	Cabal (Kmol/h)
Metà	116,8
Età	261,5
Propilè	7,5
Toluè	0,6
Ètilbenzè	83,9
Etilè	152,1
Dietilbenzè	0,9
Benzè	2291,7

Ficant aquests valors al codi de MATLAB dissenyat, i fixant uns 37,50 m³ de reactor que és el que dona la simulació del HYSYS obtenim que:

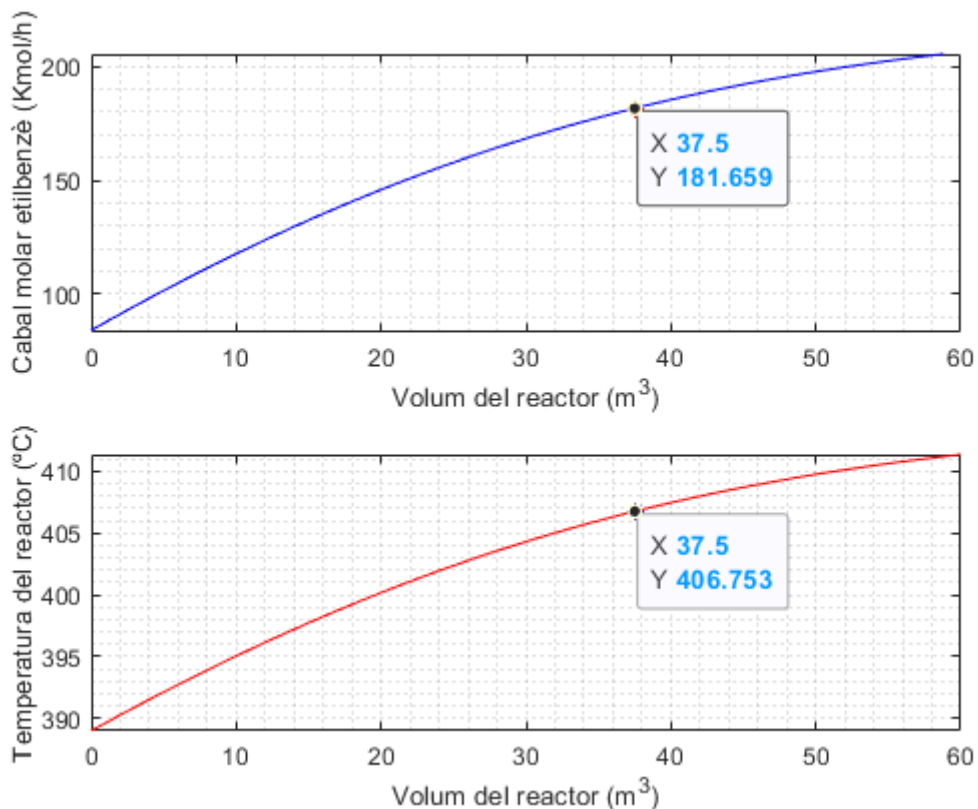


Figura 11.21: Perfils de cabal i temperatura al segon llit del reactor d'alquilació.

Es pot veure a la figura 11.21 com el corrent de sortida és aproximadament l'esperat per la simulació, uns 185,12 Kmol/h, a més a més la temperatura de sortida és de 407°C en vers a la de la simulació que és de 413°C. Segurament les diferències són degudes al fet en el MATLAB no s'han integrat les pèrdues de pressió, i al HYSYS si.

Per tant, es dona per bona la simulació. S'aplica la fracció de buit de la patent [3] (0.75):

$$V_{reactor2} = \frac{37,5}{0,75} = 50 \text{ m}^3$$

11.3.6 Tercer llit del reactor d'alquilació

Amb el mateix codi d'abans es treu el volum de reactor aproximat per a la simulació, i així comprovar que el HYSYS funciona com s'ha d'esperar. Segons la simulació de l'ASPEN HYSYS tenim que a l'entrada del tercer reactor entra:

Taula 11.7: Corrents de cada component a la entrada del tercer llit del reactor d'alquilació.

Espècie	Cabal (Kmol/h)
Metà	161,8
Età	329,0
Propilè	8,1
Toluè	0
Etilbenzè	185,1
Etilè	155,1
Dietilbenzè	4,8
Benzè	2187,3

Ficant aquests valors al codi de MATLAB dissenyat, i fixant uns 285,7 Kmol/h d'etilbenzè a la sortida ja que és el que dona la simulació del HYSYS s'obté que el volum és de 48 m³:

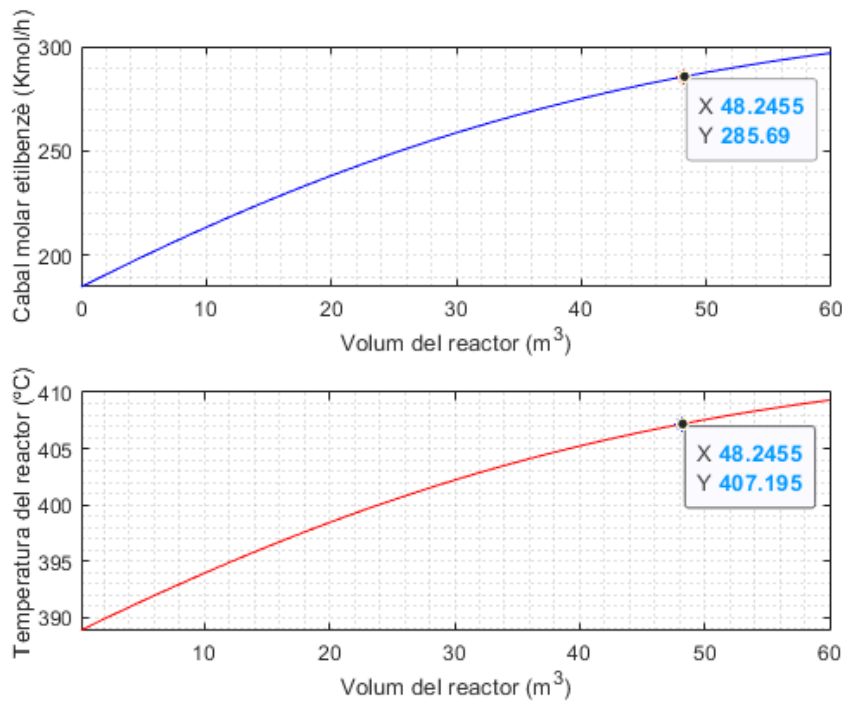


Figura 11.22: Perfils de cabal i temperatura al tercer llit del reactor d'alquilació.

Es pot veure a la Figura 11.22 com el volum és l'esperat aproximadament del de la simulació, uns 45 m³ a més a més la temperatura de sortida és de 407°C en vers a la de la simulació que és de 413°C. Segurament les diferències són degudes al fet que en el MATLAB no s'han integrat les pèrdues de pressió, i al HYSYS si. Per tant, es dona per bona la simulació. S'aplica la fracció de buit de la patent [3] (0.75):

$$V_{reactor3} = \frac{45}{0,75} = 60 \text{ m}^3$$

11.3.7 Quart llit del reactor d'alquilació

Amb el mateix codi d'abans es treu el volum de reactor aproximat per a la simulació, i així comprovar que el HYSYS funciona com s'ha d'esperar. Segons la simulació de l'ASPEN HYSYS tenim que a l'entrada del quart reactor entra:

Taula 11.8: Corrents de cada component a la entrada del quart llit del reactor d'alquilació.

Espècie	Cabal (Kmol/h)
Metà	206,8
Età	396,5
Propilè	8,1
Toluè	0
Ètilbenzè	285,7
Etilè	152,5
Dietilbenzè	12,1
Benzè	2079,5

Ficant aquests valors al codi de MATLAB dissenyat, i fixant uns 367 Kmol/h d'etilbenzè a la sortida, ja que és el que dona la simulació del HYSYS obtenim que el volum és de 44 m³:

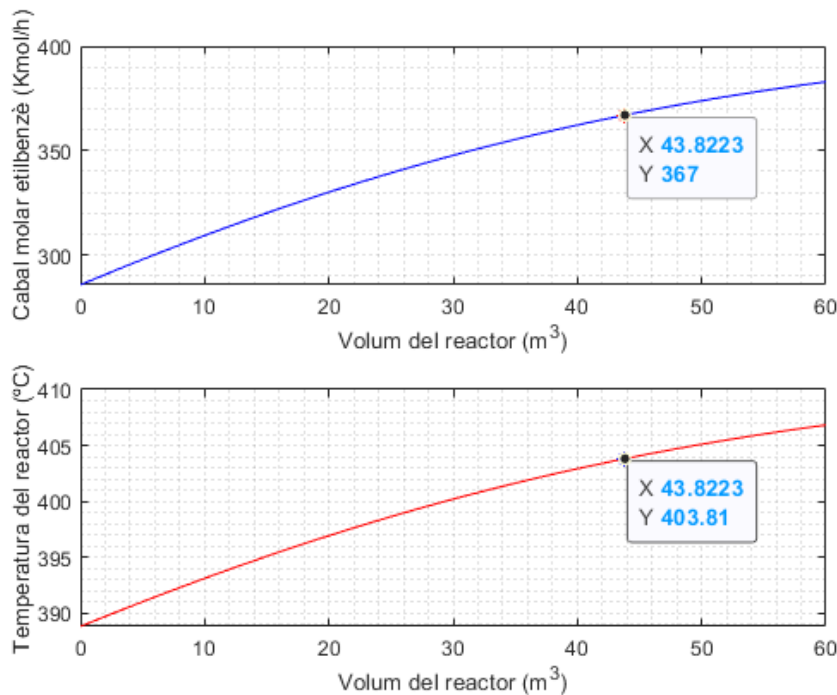


Figura 11.23: Perfils de cabal i temperatura al quart llit del reactor d'alquilació.

Es pot veure en la figura 11.23 com el volum és l'esperat aproximadament del de la simulació, uns 41,25 m³ a més a més la temperatura de sortida és de 403°C en vers a la de la simulació que és de 409,3°C. Segurament les diferències són degudes al fet que en el MATLAB no s'han integrat les pèrdues de pressió, i al HYSYS si. Per tant, es dona per bona la simulació. S'aplica la fracció de buit de la patent [3] (0.75):

$$V_{reactor4} = \frac{41,25}{0,75} = 55 \text{ m}^3$$

11.3.8 Reactor de transalquilació

Amb el mateix codi d'abans es treu el volum de reactor aproximat per a la simulació, i així comprovar que el HYSYS funciona com s'ha d'esperar. Segons la simulació de l'ASPEN HYSYS tenim que a l'entrada del reactor de transalquilació entra:

Taula 11.9: Corrents de cada component a la entrada del reactor de transalquilació.

Espècie	Cabal (Kmol/h)
Metà	4,2
Età	19,4
Propilè	0,6
Toluè	0
Etilbenzè	22,4
Etilè	2,3
Dietilbenzè	22,3
Benzè	290,3

Ficant aquests valors al codi de MATLAB dissenyat, i fixant uns 66 Kmol/h d'etilbenzè a la sortida ja que és el que dona la simulació del HYSYS obtenim que el volum és de 89 m³:

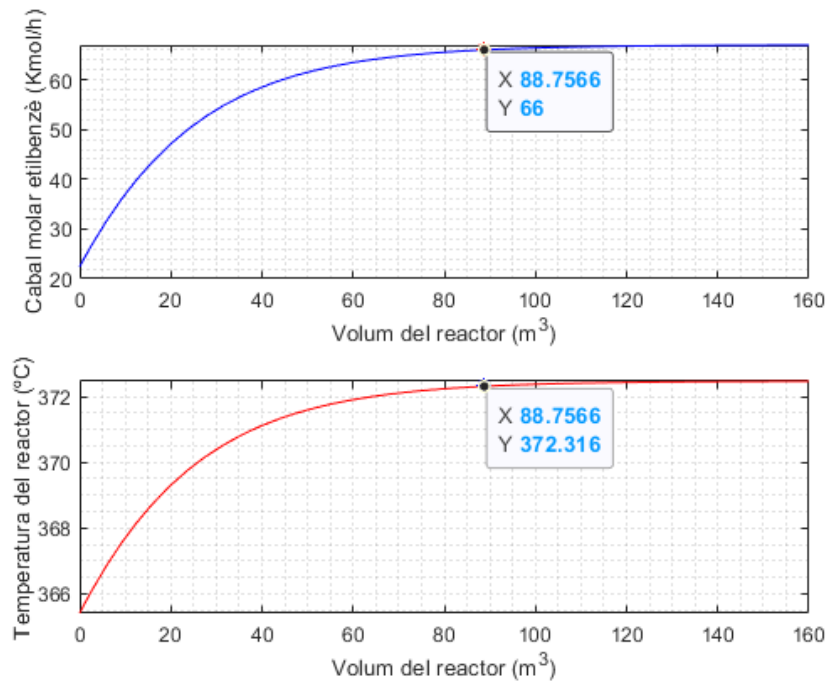


Figura 11.24: Perfils de cabal i temperatura al reactor de transalquilació.

Es pot veure en la figura 11.24 com el volum és l'esperat aproximadament del de la simulació, uns 97,50 m³, a més a més la temperatura de sortida és de 372°C en vers a la de la simulació que és de 365,7°C. Segurament les diferències són degudes al fet que en el MATLAB no s'han integrat les pèrdues de pressió, i al HYSYS si. Per tant, es dona per bona la simulació. S'aplica la fracció de buit de la patent [3] (0.75):

$$V_{reactor4} = \frac{97,50}{0,75} = 130 \text{ m}^3$$

11.3.9 Simulació dels reactors amb el HYSYS

Per tal de poder integrar tot el procés en la simulació, i sobretot, per poder fer un circuit tancat amb les columnes de destil·lació, encara que doni bons resultats el MATLAB, es decideix fer la simulació amb el simulador Aspen HYSYS. Abans de començar a fer els reactors, definim que la pèrdua de pressió d'aquest vingui calculada pel mateix simulador:

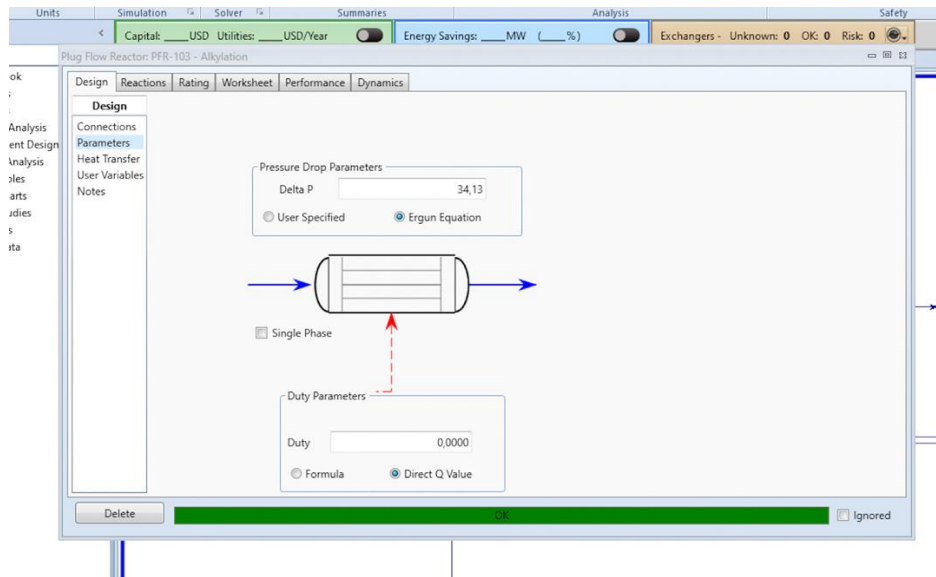


Figura 11.25: Càlcul de la pèrdua de pressió mitjançant la equació d'Ergun.

Seguidament, també se selecciona en el menú corresponent del reactor quin paquet de reaccions (que s'han definit prèviament) es donen en l'equip:

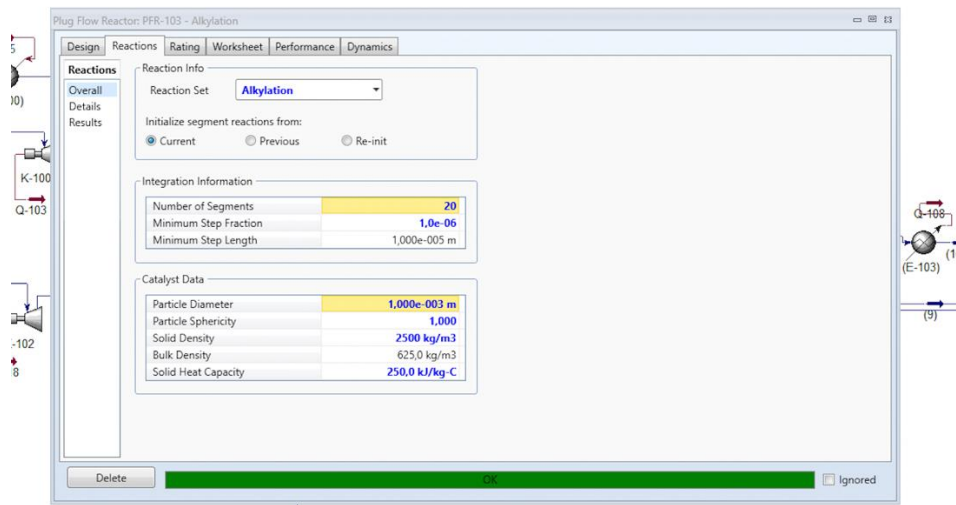


Figura 11.26: Selecció de les reaccions que es donen al reactor.

Un cop definit tot això, s'indiquen els corrents d'entrada i sortida i el simulador s'encarrega de fer tots els càlculs en indicar el volum de reacció. També s'ha d'introduir la fracció de buit. Pel primer llit del reactor d'alquilació:

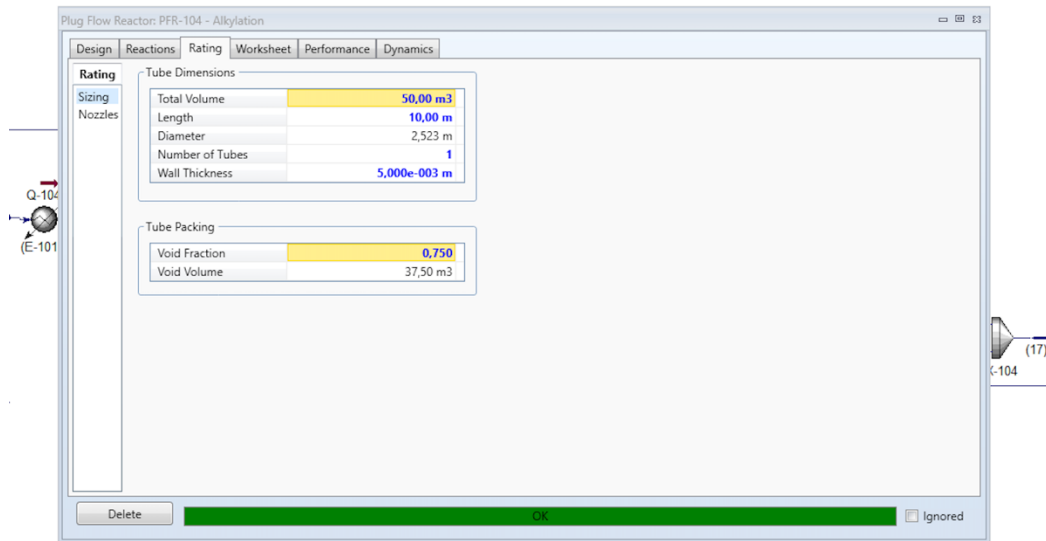


Figura 11.27: Paràmetres de disseny del primer llit del reactor d'alquilació.

Pel segon llit:

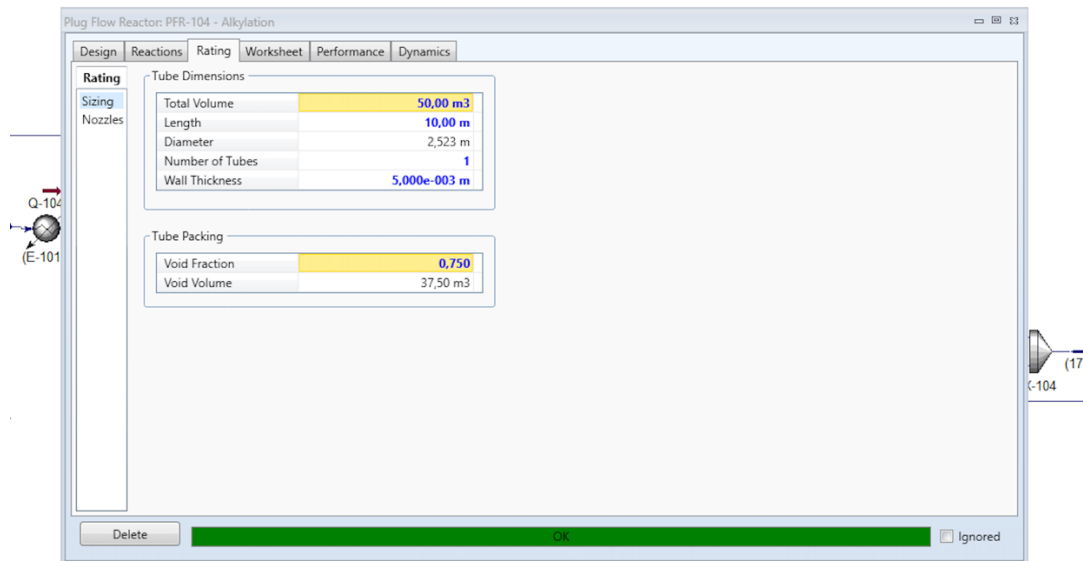


Figura 11.28: Paràmetres de disseny del segon llit del reactor d'alquilació.

Pel tercer llit:

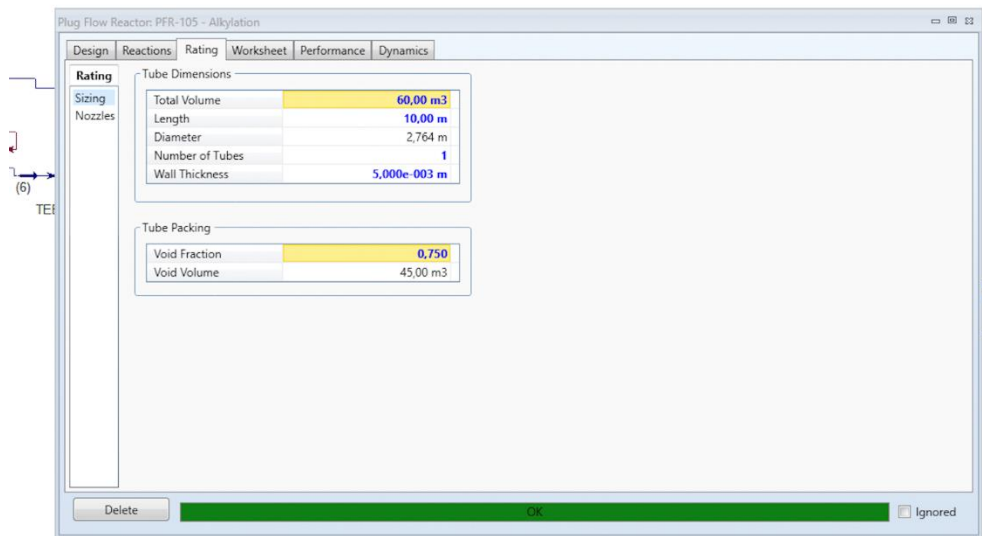


Figura 11.29: Paràmetres de disseny del tercer llit del reactor d'alquilació.

Pel quart llit:

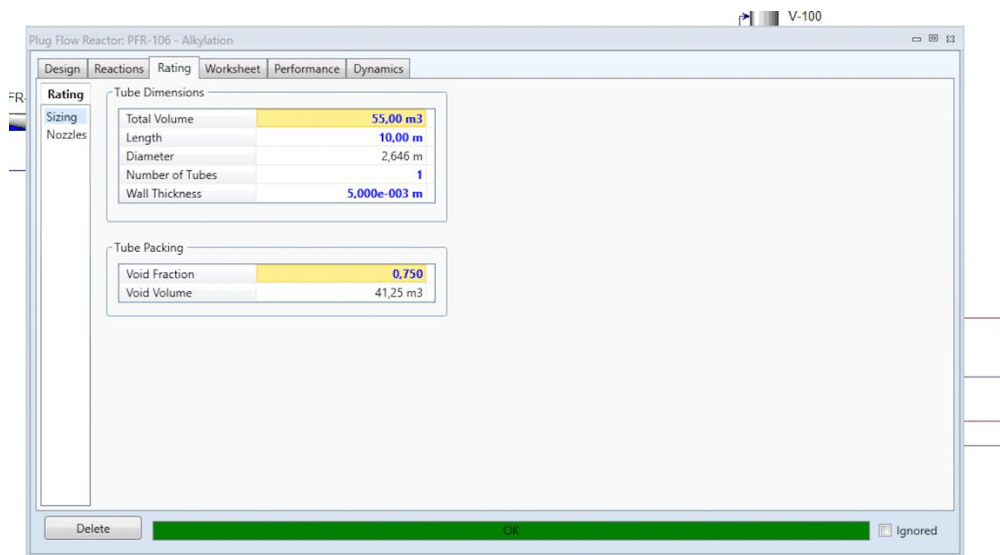


Figura 11.30: Paràmetres de disseny del quart llit del reactor d'alquilació.

Com que pel reactor de transalquilació la sistemàtica és la mateixa no es posarà com s'ha determinat els paràmetres del seu disseny, ja que és exactament igual que els anteriors.

11.3.10 Codi de MATLAB

function PFR_adiabatic_process_EBSYN

clc

%Densities of each compound in Kg/m³%

pmix=57.6 %Input%

%PM of each compound in Kg/Kmole%

PMmet=16

PMeb=106.167

PMetilene=28

PMbenzene=78.11

PMetane=30

PMpropilene=42

PMtoluene=92.14

%Cp of each compound in KJ/kmoleC%

Cpmet=56.488

Cpethb=317.312

Cpethane=98.02

Cppropilene=117.69

Cptoluene=236.23

Cpethylene=76.41

CpDethb=512.946

Cpbenzene=182.736

%Inlet flows kmole/h all mole flows are inputs%

Fmet=95.3470

Fethane=180.8063

Fpropilene=2.0169

Ftoluene=5.5386

Fethb=278.1441

Fethylene=206.0691

FDethb=0.0258

Fbenzene=1306.6992

Ftot=Fmet+Fethane+Fpropilene+Ftoluene+Fethb+Fethylene+FDethb+Fbenzene

%Kinetic parameters kJ/Kmol%

$$E1=22500*4.184$$

$$E2=22500*4.184$$

$$E3=25000*4.184$$

$$E4=20000*4.184$$

$$ko1=1e6*3600$$

$$ko2=6e5*3600$$

$$ko3=7.8e6*3600$$

$$ko4=3.8e8*3600$$

%Ethalphies KJ/kmol at 25°C%

$$H1=-105497.8$$

$$H2=-104407.8$$

$$H3=-1090.0 \text{ %Transalkylation%}$$

$$H4=-104450.6$$

$$DCP1=Cpethb-Cpbenzene-Cpethylene$$

$$DCP2=CpDethb-Cpethb-Cpethylene$$

$$DCP3=2*Cpethb-Cpbenzene-CpDethb$$

$$DCP4=Cpethb+Cppropilene-2*Cpethylene-Cptoluene$$

$$ENEent=(Fmet*Cpmet+Fethane*Cpethane+Fpropilene*Cppropilene+Ftoluene*Cptoluene+Fethb*Cpethb+Fethylene*Cpethylene+FDethb*Cpethb+Fbenzene*Cpbenzene)$$

$$Tent=387.5+273 \text{ %Inlet temperature%}$$

%OTHERS%

$$M=Fmet*PMmet+Fethane*PMetane+Fpropilene*PMpropilene+Ftoluene*PMtoluene+Fethb*PMeb+Fethylene*PMetilene+FDethb*PMeb+Fbenzene*PMbenzene$$

$$Q=M/pmix$$

[V,X]=ode45(@pfr,[0 30],[Fmet Fethane Fpropilene Ftoluene Fethb Fethylene FDethb Fbenzene Tent]);

%EDO's definition%

function EDO=pfr(V,X)

```

EDO=zeros(9,1);
F_1=X(1); %Definition of variables in EDO's%
F_2=X(2);
F_3=X(3);
F_4=X(4);
F_5=X(5);
F_6=X(6);
F_7=X(7);
F_8=X(8);
T=X(9);
r1=ko1*exp(-E1./(8.31.*T)).*(F_6./Q).*(F_8./Q);
r2=ko2*exp(-E2./(8.31.*T)).*(F_5./Q).*(F_6./Q);
r3=ko4*exp(-E4./(8.31.*T)).*(F_4./Q).*(F_6./Q).^2;
x1=(Fbenzene-F_8)/Fbenzene;
x2=(F_7-FDethb)/FDethb;
x4=(F_3-Fpropilene)/Fpropilene;
%Kmol/m3 of each compound%
r_1=0;
r_2=0;
r_3=r3;
r_4=-r3;
r_5=r1-r2+r3;
r_6=-r1-r2-2*r3;
r_7=r2;
r_8=-r1;
%Definition of each compound EDO%
EDO(1)=r_1;
EDO(2)=r_2;
EDO(3)=r_3;
EDO(4)=r_4;
EDO(5)=r_5;

```

```

EDO(6)=r_6;
EDO(7)=r_7;
EDO(8)=r_8;
%Definition of energy balance EDO%
ENE=r1.*(H1+DCP1.*(T-298))+r2.*(H2+DCP2.*(T-298))+r3.*(H4+DCP4.*(T-
298));
EDO(9)=(-ENE)./(ENEent);
end
Tgraf=(X(:,9)-273);
x1graf=(Fbenzene-X(:,8))./Fbenzene;
F_25=interp1(V,X(:,5),25)
figure()
subplot(2,1,1)
plot(V,X(:,5),'-b',25,F_25,'*r')
xlabel('Volum del reactor (m^3)')
ylabel('Cabal molar etilbenzè (Kmol/h)')
grid minor
subplot(2,1,2)
plot(V,Tgraf)
xlabel('Volum del reactor (m^3)')
ylabel('Temperatura del reactor (°C)')
grid minor
end

```

11.4 Tanc de separació flash

11.4.1 Dimensionament del tanc de separació flash

A causa de la dificultat de dur a terme els càlculs tenint en compte la termodinàmica, a Ebsyn S.L. s'ha escollit fer una combinació de l'Aspen HYSYS amb mètodes manuals per tal d'obtenir els corrents de sortida del tanc flash. Els valors que s'han pres del simulador han estat els valors de la constant d'equilibri. En la següent taula es presenta aquests valors així com les condicions del corrent d'entrada al separador flash:

Taula 11.10: Condicions d'operació del tanc de separació flash.

Pressió (kPa)	1500	
Temperatura (°C)	113,4	
Cabal molar de l'aliment (Kmol/h)	3403,9	
Paràmetres del corrent		
Component	Composició en l'aliment	Constant d'equilibri (K) [4]
Metà	0,062	27,13
Età	0,1222	8,857
Propilè	0,0026	3,844
Toluè	0	0,0009932
Etilbenzè	0,1263	0,05171
Etilè	0,0165	10,79
Dietilbenzè	0,0066	0,01446
Benzè	0,6639	0,2099

L'objectiu dels càlculs consisteix a determinar la relació V/F , la qual donarà directament el cabal de vapor i de líquid de sortida del tanc. Aquesta relació es pot obtenir a partir de les condicions d'aliment mitjançant l'equació de Rachford-Rice [5]:

$$\sum \frac{(K_i - 1) \cdot z_i}{1 + (K_i - 1) \cdot \frac{V}{F}} = 0$$

Es realitza un solver mitjançant l'eina informàtica Excel del paquet MS OFFICE de la següent manera:

Taula 11.11: Resolució de la equació de Rachford-Rice.

	z	K	Terme de Rachford-Rice
Metà	0,062	27,13	0,290979566
Età	0,1222	8,857	0,404530965
Propilè	0,0026	3,844	0,004939016
Toluè	0	0,0009932	0
Etilbenzè	0,1263	0,05171	-0,143567341
Etilè	0,0165	10,79	0,05957792
Dietilbenzè	0,0066	0,01446	-0,007858369
Benzè	0,6639	0,2099	-0,608602733
		Sumatori	-9,75045E-07

Amb aquests resultats del solver s'obté una relació:

$$\frac{V}{F} = 0,1748$$

Per tant, realitzant un balanç de matèria global s'obté els respectius cabals:

Taula 11.12: Cabals de sortida i entrada del tanc de separació flash.

Cabal d'aliment	Cabal de vapor	Cabal de líquid
3403,9	595	2808,9

Per determinar les composicions de la mescla de sortida de vapor i de líquid, utilitzarem la següent expressió:

$$x_i = \frac{z_i}{1 + (K_i - 1) \cdot \frac{V}{F}}$$

$$y_i = \frac{K_i \cdot z_i}{1 + (K_i - 1) \cdot \frac{V}{F}}$$

Com que l'equació de Rachford-Rice té en compte que el sumatori de x_i i y_i doni 1, no ho comprovarem. Fem un exemple de càlcul de les composicions pel metà tant en el líquid (x_i) com en el vapor (y_i):

$$x_{metà} = \frac{0,062}{1 + (27,13 - 1) \cdot 0,1748} = 0,011$$

$$y_{metà} = \frac{27,13 \cdot 0,062}{1 + (27,13 - 1) \cdot 0,1748} = 0,302$$

En la següent taula es presenten les composicions de totes les espècies en els tres corrents: aliment, líquid i vapor:

Taula 11.13: Composicions dels corrents de sortida del tanc de separació flash.

	z_i	x_i	y_i
Metà	0,062	0,011	0,302
Età	0,1222	0,051	0,456
Propilè	0,0026	0,002	0,007
Toluè	0	0	0
Etilbenzè	0,1263	0,151	0,008
Etilè	0,0165	0,006	0,066
Dietilbenzè	0,0066	0,008	0
Benzè	0,6639	0,770	0,162

11.4.2 Simulació del tanc de separació flash amb el HYSYS

A Ebsyn S.L.. s'ha volgut aprofitar el simulador Aspen HYSYS per comprovar els càlculs de dimensionament del tanc flash (a més d'haver agafat els valors termodinàmics).

El dimensionament el realitza el mateix simulador sense introduir cap dada. L'únic requisit perquè es doni la separació flash amb el simulador és que al corrent de l'aliment hi hagi una fracció vaporitzada, la qual s'anirà sencera al corrent de vapor del separador. Per tant, només s'ha hagut d'introduir les condicions de la taula 11.10. Primer s'ha de seleccionar l'equip de "SEPARATOR" i col·locar els corrents pertinents:

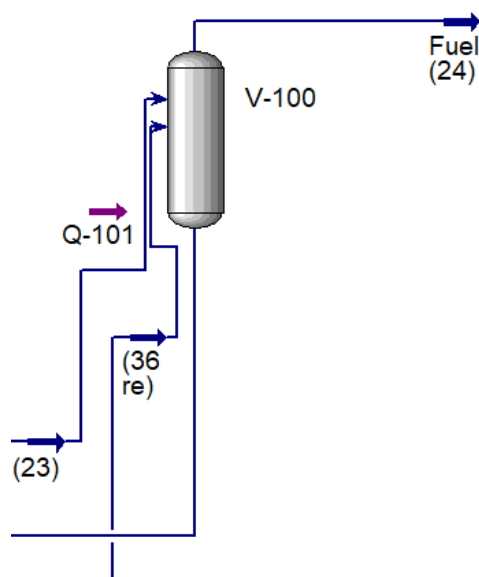


Figura 11,31: Entorn de simulació del tanc de separació flash.

Seguidament, com s'ha esmentat abans no cal introduir cap altra dada, ja que a Ebsyn S.L. s'ha encarregat de realitzar la resta de càlculs com el volum del tanc i l'altura de líquid, etc... Per tant, s'han deixat buits els paràmetres de disseny del tanc:

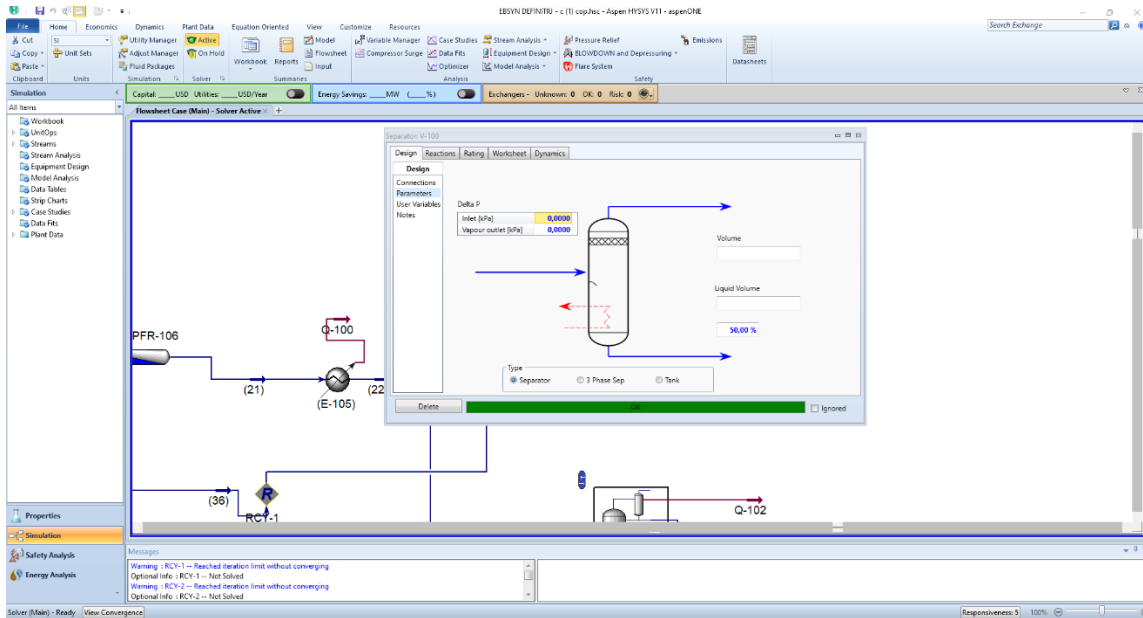


Figura 11.32: Inserció dels paràmetres de disseny del tanc de separació flash.

11.4.3 Càlcul dels paràmetres de disseny del tanc de separació flash

Ebsyn S.L. ha dimensionat el tanc TF-0201 seguint l'equació de Watkins [5] ajustada mitjançant el model de Blackwell:

$$K_{drum} = constant \cdot \exp(A + B \cdot \ln(F_{lv}) + C \cdot \ln(F_{lv})^2 + D \cdot \ln(F_{lv})^3 + E \cdot \ln(F_{lv})^4)$$

$$F_{lv} = \frac{W_L}{W_v} \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_L}}$$

On:

- La constant equival a 1 ft/s.
- W_L el cabal de líquid a la entrada del tanc flash en Kg/h.
- W_v el cabal de vapor a la entrada del tanc flash en Kg/h.
- ρ_v la densitat del vapor en la entrada del tanc flash en Kg/m³.
- ρ_L la densitat del líquid en la entrada del tanc flash en Kg/m³.
- A, B, C, D, E equivalen a les constants de l'ajust de Blackwell:

Taula 11.14: Constants de l'ajust de Blackwell [5].

A	-1,8774781
B	-0,81458046
C	-0,18707441
D	-0,01452287
E	-0,00101485

Amb aquestes dades es podrà determinar la velocitat permissibile de la següent manera:

$$u_{perm} = K_{drum} \cdot \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v}}$$

Amb aquesta dada es podrà determinar els paràmetres de disseny del tanc de separació flash, ara posem aquest mètode en context amb el que hem dissenyat a Ebsyn S.L.:

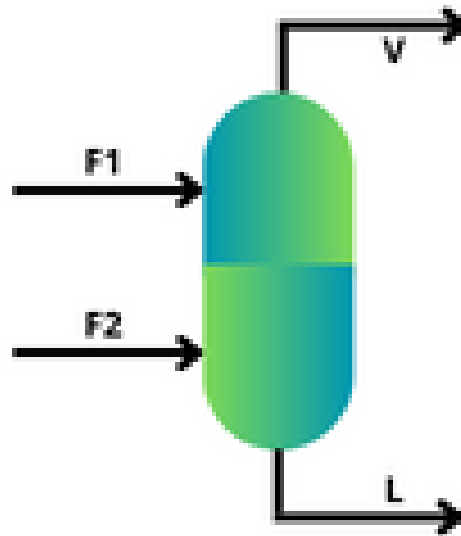


Figura 11.33: Esquema del tanc de separació flash.

A continuació es construeix una taula amb els valors necessaris per al càlcul:

Taula 11.15: Variables necessàries per a la realització dels càlculs del volum del tanc.

	F1 (corrent 23)	F2 (corrent 36)	F1+F2
Wtotal (Kg/h)	214238,4	28756,1	242994,5
WL (Kg/h)	203590,8	-	203590,8
Wv (Kg/h)	10647,6	28756,1	39403,7
PI (Kg/m3)	798,81	-	798,81
Pv (Kg/m3)	14,89	33,06	28,15
PM vap (Kg/Kmol)	70,42	79,52	74,72
V (Kmol/h)	403,71	361,62	765,33

Per determinar els valors de les propietats com la densitat i el pes molecular de la suma de corrents, s'ha fet mitjana ponderada, de tal manera que :

$$\rho_{(F1+F2)_L} = \rho_{F1L} \cdot \left(\frac{W_{F1L}}{W_{(F1+F2)_L}} \right) + \rho_{F2L} \cdot \left(\frac{W_{F2L}}{W_{(F1+F2)_L}} \right)$$

$$\rho_{(F1+F2)_L} = 798,81 \cdot \left(\frac{203590,8}{203590,8} \right) + 0 \cdot \left(\frac{0}{203590,8} \right) = 798,81$$

$$\rho_{(F1+F2)_V} = \rho_{F1V} \cdot \left(\frac{W_{F1V}}{W_{(F1+F2)_V}} \right) + \rho_{F2V} \cdot \left(\frac{W_{F2V}}{W_{(F1+F2)_V}} \right)$$

$$\rho_{(F1+F2)_L} = 14,89 \cdot \left(\frac{10647,6}{39403,7} \right) + 33,06 \cdot \left(\frac{28756,1}{39403,7} \right) = 28,15$$

$$PM_{(F1+F2)_{VAP}} = PM_{F1_{VAP}} \cdot \left(\frac{V_{F1}}{V_{F1+F2}} \right) + PM_{F2_{VAP}} \cdot \left(\frac{V_{F2}}{V_{F1+F2}} \right)$$

$$PM_{(F1+F2)_{VAP}} = 70,42 \cdot \left(\frac{403,71}{765,33} \right) + 79,52 \cdot \left(\frac{361,62}{765,33} \right) = 74,72$$

Amb els valors determinats a la taula 11.14 calculem la K_{drum} :

$$F_{lv} = \frac{203590,8}{39403,7} \cdot \sqrt{\frac{28,15}{798,81}} = 0,97$$

$$K_{drum} = 1 \frac{ft}{s} \cdot \exp(-1,8774781 - 0,81458046 \cdot \ln(0,97) - 0,18707441 \cdot \ln(0,97)^2 - 0,01452287$$

$$\cdot \ln(0,97)^3 - 0,00101485 \cdot \ln(0,97)^4) = 0,1568 \frac{ft}{s}$$

Segons la bibliografia [5] aquest valor de la K_{drum} es troba comprès entre $0,1 - 0,35 \frac{ft}{s}$.

Per tant estem dintre del rang. Amb aquest valor es calcula la velocitat permissible al tanc:

$$u_{perm} = 0,1568 \cdot \sqrt{\frac{798,81 - 28,15}{28,15}} = 0,82 \frac{ft}{s} \cdot \frac{0,3048 m}{1 ft} \cdot \frac{3600 s}{1 h} = 900,11 \frac{m}{s}$$

Podem determinar l'àrea del tanc de separació flash aïllant la següent expressió:

$$V_{F1+F2} = \frac{u_{perm} \cdot A_C \cdot \rho_{(F1+F2)V}}{PM_{(F1+F2)VAP}}$$

$$A_C = \frac{V_{F1+F2} \cdot PM_{(F1+F2)VAP}}{u_{perm} \cdot \rho_{(F1+F2)V}} = \frac{765,33 \cdot 74,72}{900,11 \cdot 28,15} = 2,2565 m^2$$

De la expressió matemàtica d'un cilindre és fàcil deduir que:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A_C}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,2565}{\pi}} = 1,695$$

Per l'altura, a Ebsyn S.L. seguim el consell que es dona al llibre de la bibliografia [5]:

$$h = 4 \cdot D = 4 \cdot 1,695 = 6,78 m$$

A Ebsyn S.L. s'ha decidit fer que el volum de líquid dintre del tanc sigui un 30% del volum total:

$$V_{TOTAL} = \pi \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^2 \cdot h = \pi \cdot \left(\frac{1,695}{4}\right)^2 \cdot 6,78 = 15,30 m^3$$

$$V_{liquid} = 0,3 \cdot 15,30 = 4,59 m^3$$

Per tant l'altura del líquid a dintre del tanc haurà de ser de:

$$h_L = \frac{V_{liquid}}{\pi \cdot D^2/4} = \frac{4,59}{\pi \cdot 1,695^2/4} = 2,03 m$$

11.5 Columnes de rectificació

11.5.1 Short-Cut, càlcul aproximat del nombre d'etapes

Abans de realitzar qualsevol disseny d'una columna de rectificació s'ha de partir d'un cert nombre d'etapes d'equilibri i altre paràmetre com la relació de reflux. Tot això s'obté mitjançant el mètode Short-Cut.

Aquest mètode comença amb la resolució de l'equació de Fenske [5] per a l'obtenció del nombre mínim d'etapes d'equilibri:

$$N_{min} = \frac{\ln\left(\frac{\left(\frac{x_{LK}}{x_{HK}}\right)_{destillat}}{\left(\frac{x_{LK}}{x_{HK}}\right)_{residu}}\right)}{\ln(\alpha_{LK/HK})}$$

Seguidament, s'aplica l'equació d'Underwood [5] per obtenir la relació de reflux externa mínima de la columna. Primer es determina un paràmetre ϕ :

$$\sum \frac{\alpha_i \cdot F \cdot z_i}{\alpha_i - \phi} = 0$$

Un cop es troba aquest paràmetre ϕ es procedeix a calcular la quantitat de vapor mínima:

$$V_{min} = \sum \frac{\alpha_i \cdot D \cdot x_{D_i}}{\alpha_i - \phi}$$

Amb aquest valor es determina les pertinents relacions de reflux intern i extern, respectivament:

$$L/V_{min} = (V_{min} - F)/V_{min}$$

$$L/D_{min} = \frac{V_{min}}{1 - V_{min}}$$

Amb la correlació de Gilliland [5], es determina el nombre d'etapes necessàries. Caldrà fixar una relació de reflux externa:

- Si $0.01 < x < 0.90$

$$\frac{N - N_{min}}{N + 1} = 0,545827 - 0,591422 \cdot x + \frac{0,002743}{x}$$

- Si $0.9 < x < 1$

$$\frac{N - N_{min}}{N + 1} = 0,16595 - 0,16595 \cdot x$$

On x es determina com:

$$x = \frac{\frac{L}{D} - \left(\frac{L}{D}\right)_{MIN}}{\frac{L}{D} + 1}$$

Finalment, el mètode de Kirkbride [5] es pot determinar l'etapa òptima d'entrada de l'aliment:

$$\log\left(\frac{N_f - 1}{N - N_f}\right) = 0,260 \cdot \log\left(\frac{B}{D} \cdot \left(\frac{z_{HK}}{z_{LK}}\right) \cdot \left(\frac{(x_{LK})_{residu}}{(x_{HK})_{destillat}}\right)^2\right)$$

11.5.1.2 Short-Cut de la columna C-0201

Abans de començar a realitzar qualsevol càlcul s'han de realitzar una sèrie de balanços basats en el fet que tots els compostos més pesats que el HK (etilbenzè) se

n'aniran tots a les cues de la columna, i els compostos més lleugers que els LK (benzè) se n'aniran tots pel corrent de caps. En la següent taula es presenten els corrents dels respectius corrents, així com les seves constants d'equilibri extrems de l'Aspen HYSYS [4]:

Taula 11.16: Balanços de matèria a la columna Short-Cut T-100.

	F_i	z_i	D_i	x_{D_i}	B_i	x_{B_i}	K_i	α_{ij}
Metà	31,27	0,011	31,27	0,013	0	0	45,43	645,44
Età	144,68	0,052	144,68	0,061	0	0	14,28	202,94
Propilè	4,80	0,002	4,80	0,002	0	0	6,03	85,64
Toluè	0	0	0	0	0	0	0,14	1,96
Etilbenzè	425,17	0,151	0,043	0,0001	425,13	0,950	0,07	1
Etilè	17,09	0,006	17,09	0,007	0	0	17,51	248,71
Dietilbenzè	22,29	0,008	0	0	22,29	0,050	0,019	0,27
Benzè	2163,76	0,770	2163,54	0,916	0,216	0,0001	0,30	4,26
Total	2809,05	1	2361,42	1	447,64	1	-	.

En la següent taula es presenten les dades necessàries per al càlcul dels diferents paràmetres del mètode del Short-Cut:

Taula 11.17: Especificacions per a la equació de Fenske.

Heavy Key	Etilbenzè
Light Key	Benzè
x_{LK} en el destil·lat	0,916
x_{LK} en el residu	0,0001
x_{HK} en el destil·lat	0,0001
x_{HK} en el residu	0,950
α_{LK}	4,26
α_{HK}	1

Amb aquestes dades es pot aplicar la equació de Fenske:

$$N_{min} = \frac{\ln\left(\frac{\left(\frac{0,916}{0,0001}\right)_{destillat}}{\left(\frac{0,0001}{0,950}\right)_{residu}}\right)}{\ln(4,25)} = 12,63$$

Es desenvolupa el sumatori de la equació de Underwood, per determinar la variable ϕ mitjançant un solver:

$$\frac{645,44 \cdot 31,27}{645,44 - \phi} + \frac{202,94 \cdot 144,68}{202,94 - \phi} + \frac{85,64 \cdot 4,80}{85,64 - \phi} + \frac{1 \cdot 425,17}{1 - \phi} + \frac{248,71 \cdot 17,09}{248,71 - \phi} + \frac{0,27 \cdot 22,29}{0,27 - \phi} + \frac{4,26 \cdot 2163,76}{4,26 - \phi} = 0$$

Obtenint $\phi = 1,135$

Doncs s'obté un volum mínim:

$$V_{min} = \frac{645,44 \cdot 31,27}{645,44 - 1,135} + \frac{202,94 \cdot 144,68}{202,94 - 1,135} + \frac{85,64 \cdot 4,80}{85,64 - 1,135} + \frac{1 \cdot 0,043}{1 - 1,135} + \frac{248,71 \cdot 17,09}{248,71 - 1,135} + \frac{0,27 \cdot 0}{0,27 - 1,135} + \frac{4,26 \cdot 2163,54}{4,26 - 1,135} = 2950,47 \text{ Kmol/h}$$

$$L/V_{min} = 0,108$$

$$L/D_{min} = \frac{0,108}{1 - 0,108} = 0,121$$

Un cop conegut el valor mínim de la relació de reflux externa, Ebsyn S.L. ha escollit treballar a una relació de reflux d'1,5. Ara es continua calculant el nombre d'etapes amb la correlació de Gilliland:

$$x = \frac{1,5 - 0,121}{1,5 + 1} = 0,552$$

$$\frac{N - 12,63}{N + 1} = 0,545827 - 0,591422 \cdot 0,552 + \frac{0,002743}{0,552}$$

$$N = 16,57$$

Si s'aplica l'eficàcia de plat a cada etapa (42%) tenim que aproximadament el nombre d'etapes reals és el següent:

$$N_{real} = \frac{16,57}{0,42} = 39,45 \approx 40$$

Per determinar l'etapa de l'aliment apliquem la correlació de Kirkbride:

$$\log\left(\frac{N_f - 1}{N - N_f}\right) = 0,260 \cdot \log\left(\frac{447,64}{2361,42} \cdot \left(\frac{0,151}{0,770}\right) \cdot \left(\frac{0,0001}{0,0001}\right)^2\right) = -0,372$$

$$\left(\frac{N_f - 1}{N - N_f}\right) = 10^{-0,372} = 0,425$$

$$N_f = 12,63 \approx 13$$

Seguidament, Ebsyn S.L. ha volgut realitzar una simulació amb el bloc de "SHORT-CUT" de l'Aspen HYSYS per tal d'afinar els valors d'aquest flash. Primerament, s'han introduït els blocs, i els corrents de matèria i energia pertinents:

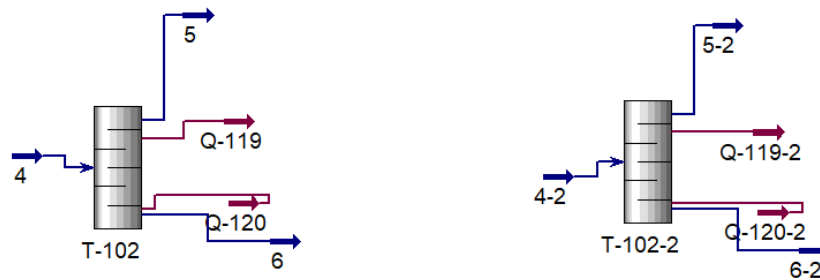


Figura 11.34: Entorn de simulació del Short-Cut.

Un cop s'han incorporat els blocs d'aquesta unitat (T-102 equival a la T-100) es procedeix a fer clic en aquesta i introduir dades com la composició del HK i el LK en el destil·lat i en el residu respectivament, així com la relació de reflux de treball:

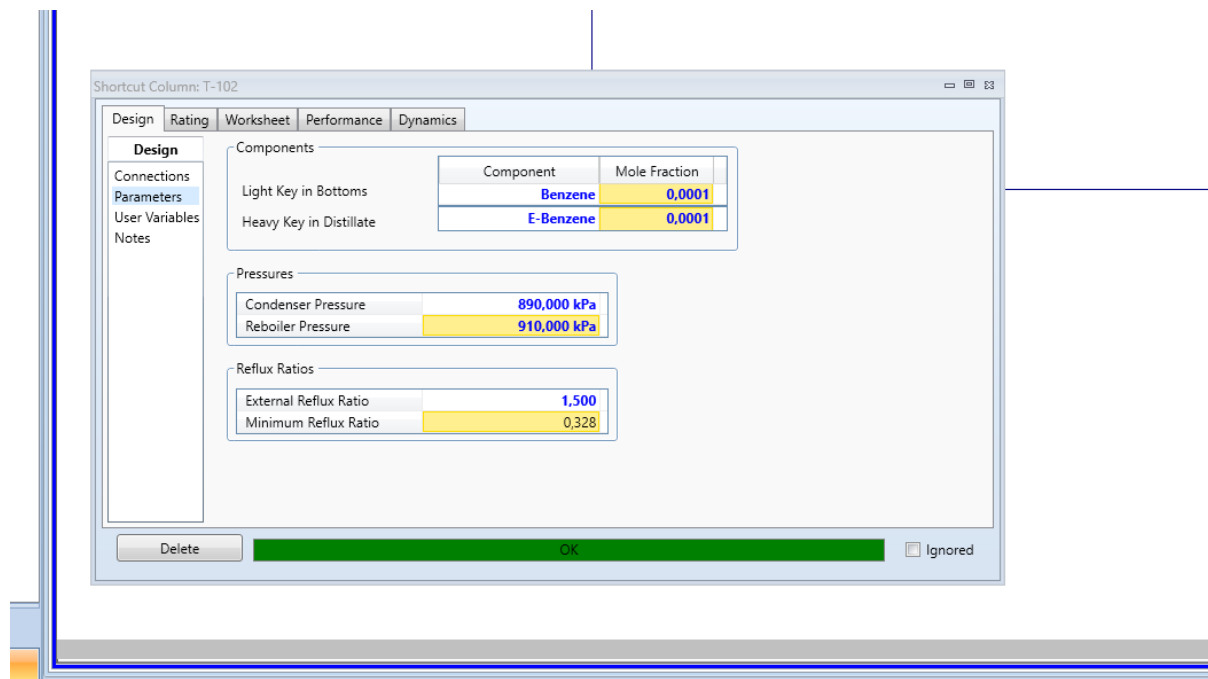


Figura 11.35: Definició de les condicions d'operació de la columna Short-Cut T-100.

Un cop introduïdes aquestes dades, el simulador calcula els mateixos càlculs que hem realitzat anteriorment, obtenint:

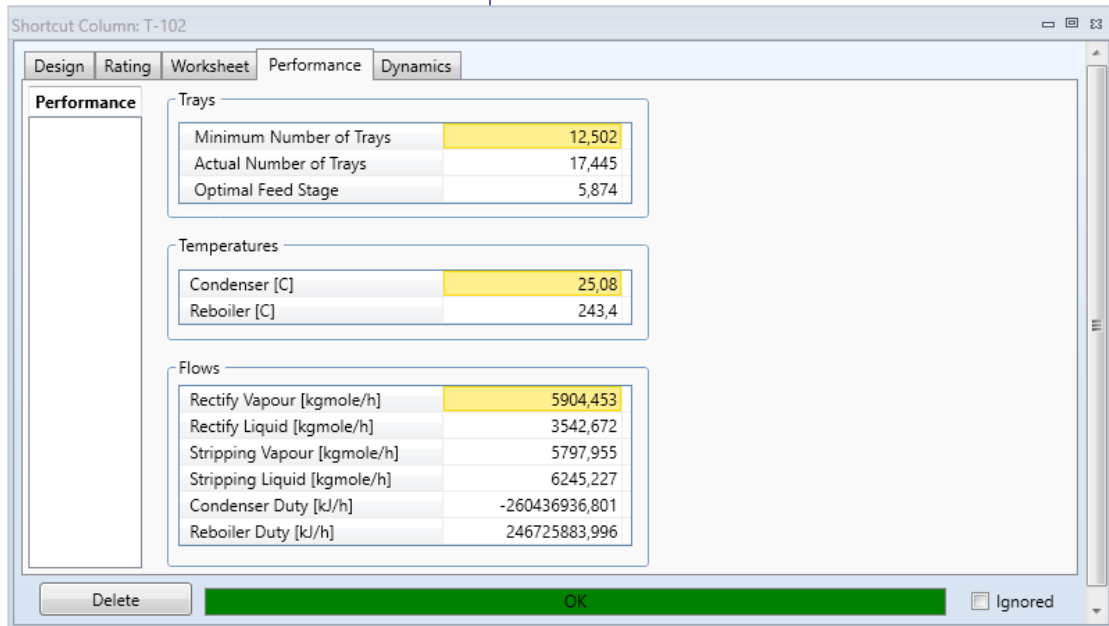


Figura 11.36: Resultats de la columna Short-Cut T-100.

Podem veure que hi ha diferències notòries, sobretot en l'etapa de l'aliment. Aquesta diferència és deguda al fet que al simulador no se li pot introduir l'eficàcia de plats, i calcula tot com si l'eficàcia del plat fos del 100%, en vers del 42% que és la real. Tot i això els valors donen al voltant bastant semblant al calculat. A continuació es procedeix a veure els corrents de sortida:

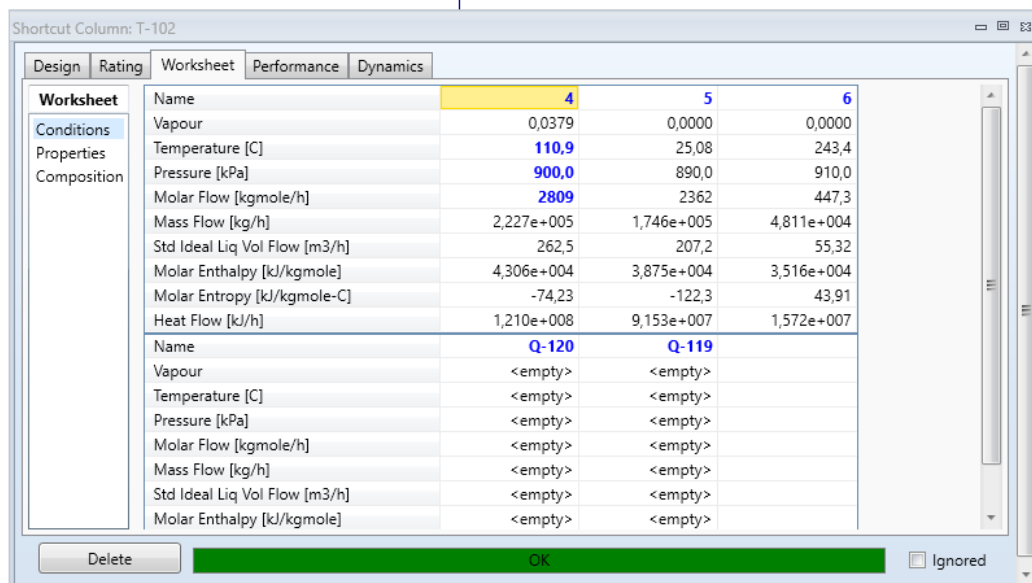
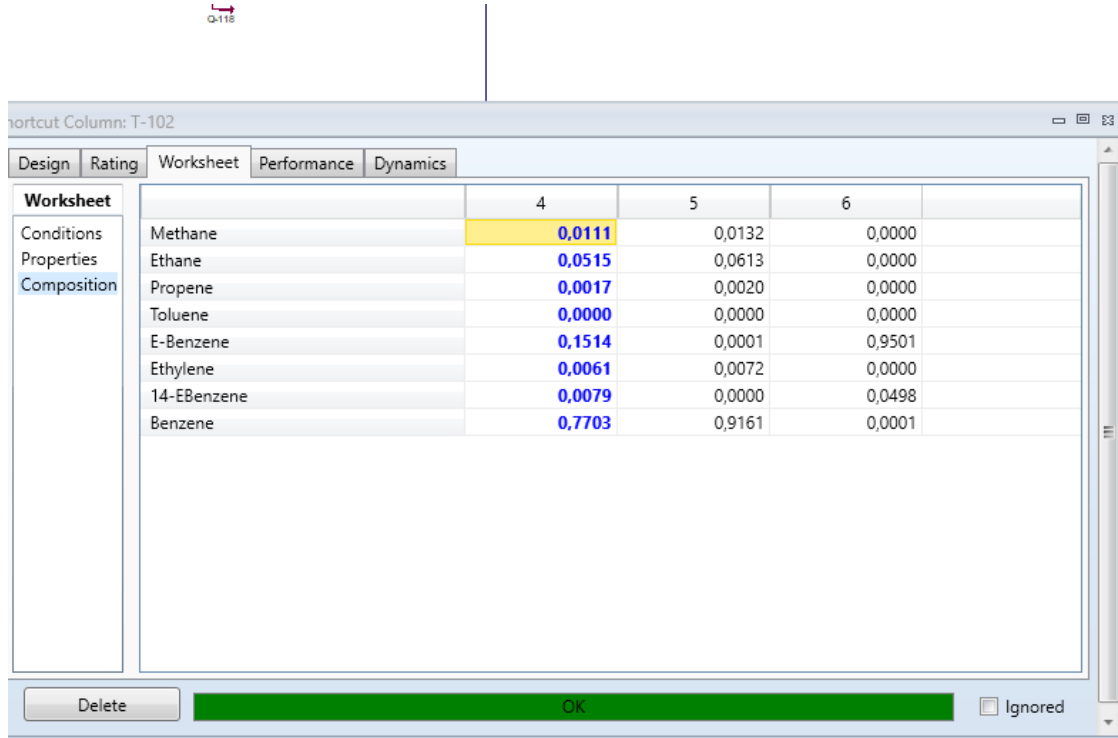


Figura 11.37: Cabals d'entrada i sortida de la columna Short-Cut T-100.

Es pot observar en la figura 11.37 com els balanços realitzats en la taula 11.16 són correctes, ja que dona quasi exactament el mateix que s'ha determinat manualment. Finalment, es dona un cop d'ull a les composicions del corrent de sortida:



	4	5	6
Methane	0,0111	0,0132	0,0000
Ethane	0,0515	0,0613	0,0000
Propene	0,0017	0,0020	0,0000
Toluene	0,0000	0,0000	0,0000
E-Benzene	0,1514	0,0001	0,9501
Ethylene	0,0061	0,0072	0,0000
14-EBenzene	0,0079	0,0000	0,0498
Benzene	0,7703	0,9161	0,0001

Figura 11.38: Composicions d'entrada i sortida de la columna Short-Cut T-100.

Aproximadament les composicions són les mateixes les de la figura 11.38 com els balanços realitzats en la taula 11.16

11.5.1.3 Short-Cut de la columna C-0202

Com que anteriorment ja s'ha fet una explicació al detall del procediment manual de càlcul, i a més s'ha decidit utilitzar el simulador Aspen HYSYS, només es mostrarà el procediment d'aquest Short-Cut realitzat al simulador.

Primerament, s'han introduït els blocs, i els corrents de matèria i energia pertinents:

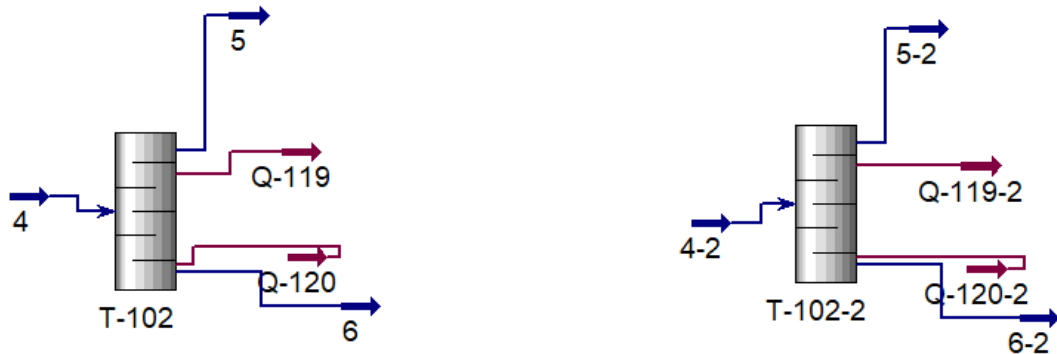


Figura 11.39: Entorn de la simulació del Short-Cut.

Un cop s'han incorporat els blocs d'aquesta unitat (T-102-2 equival a la T-101) es procedeix a fer clic en aquesta i introduir dades com la composició del HK i el LK en el destil·lat i en el residu respectivament, així com la relació de reflux de treball:

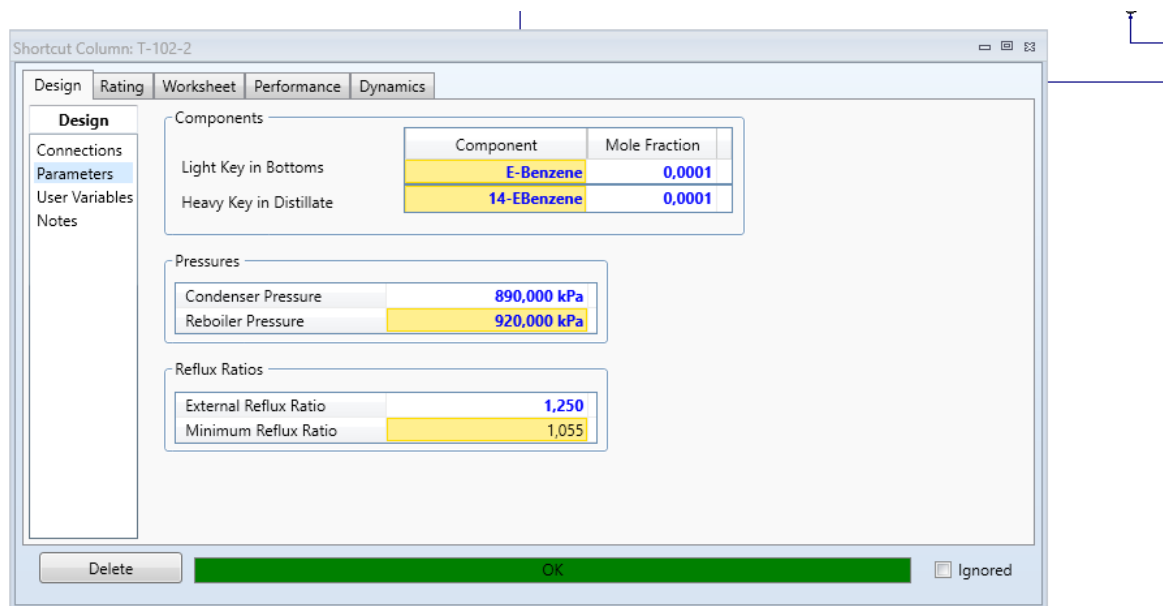


Figura 11.40: Definició de les condicions d'operació de la columna Short-Cut T-101.

Un cop introduïdes aquestes dades, el simulador calcula els mateixos càlculs que hem realitzat anteriorment, obtenint:

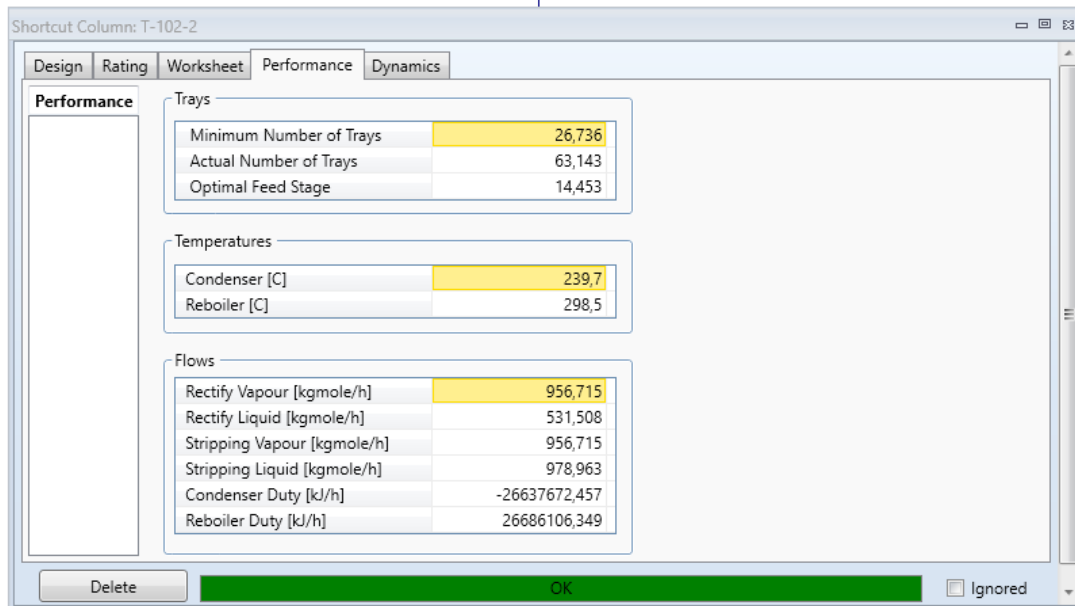


Figura 11.41: Resultats de la columna Short-Cut T-101.

Es pren el valor del nombre d'etapes, i es treu el nombre de plats reals en aquesta columna amb la seva eficàcia de plat (45%):

$$N_{real} = \frac{64}{0,45} = 143$$

Apliquem la correlació de Kirkbride per obtenir la etapa de l'aliment:

$$\log\left(\frac{N_f - 1}{N - N_f}\right) = 0,260 \cdot \log\left(\frac{22,25}{425,2} \cdot \left(\frac{0,0498}{0,9476}\right) \cdot \left(\frac{0,0001}{0,0001}\right)^2\right) = -0,6658$$

$$\frac{N_f - 1}{N - N_f} = 10^{-0,6658} = 0,216$$

$$N_f = 26,22 \approx 27$$

A continuació es procedeix a veure els corrents de sortida:

Worksheet	4-2	5-2	6-2
Name			
Vapour	0,0000	0,0000	0,0000
Temperature [C]	243,1	239,7	298,5
Pressure [kPa]	910,0	890,0	920,0
Molar Flow [kgmole/h]	447,5	425,2	22,25
Mass Flow [kg/h]	4,810e+004	4,511e+004	2986
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	55,30	51,85	3,453
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	3,519e+004	3,658e+004	1,071e+004
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	43,64	35,26	173,0
Heat Flow [kJ/h]	1,575e+007	1,556e+007	2,383e+005
Name	Q-120-2	Q-119-2	
Vapour	<empty>	<empty>	
Temperature [C]	<empty>	<empty>	
Pressure [kPa]	<empty>	<empty>	
Molar Flow [kgmole/h]	<empty>	<empty>	
Mass Flow [kg/h]	<empty>	<empty>	
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	<empty>	<empty>	
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	<empty>	<empty>	

Figura 11.42: Cabals d'entrada i sortida de la columna Short-Cut T-101.

Finalment, es fa un cop d'ull a les composicions del corrent de sortida:

	4-2	5-2	6-2
Methane	0,0000	0,0000	0,0000
Ethane	0,0000	0,0000	0,0000
Propene	0,0000	0,0000	0,0000
Toluene	0,0000	0,0000	0,0000
E-Benzene	0,9476	0,9972	0,0001
Ethylene	0,0000	0,0000	0,0000
14-EBenzene	0,0498	0,0001	0,9999
Benzene	0,0026	0,0027	0,0000

Figura 11.43: Composicions d'entrada i sortida de la columna Short-Cut T-101.

Es pot observar en la figura 11.43 com, segons el mètode del Short-Cut, s'arriba a les especificacions demanades pel projecte.

11.5.2 Mètode rigorós pel càlcul de les columnes de rectificació

A més d'haver fet el mètode Short-Cut, seguidament s'han realitzat el dimensionament final de les columnes de rectificació mitjançant el mètode rigorós. Aquest es basa a suposar temperatures de bombolla, i suposar cabals de vapor i líquid, fins que coincideixin els valors suposats amb els calculats seguint el mètode. A la següent figura es pot observar el diagrama de flux d'aquesta metodologia:

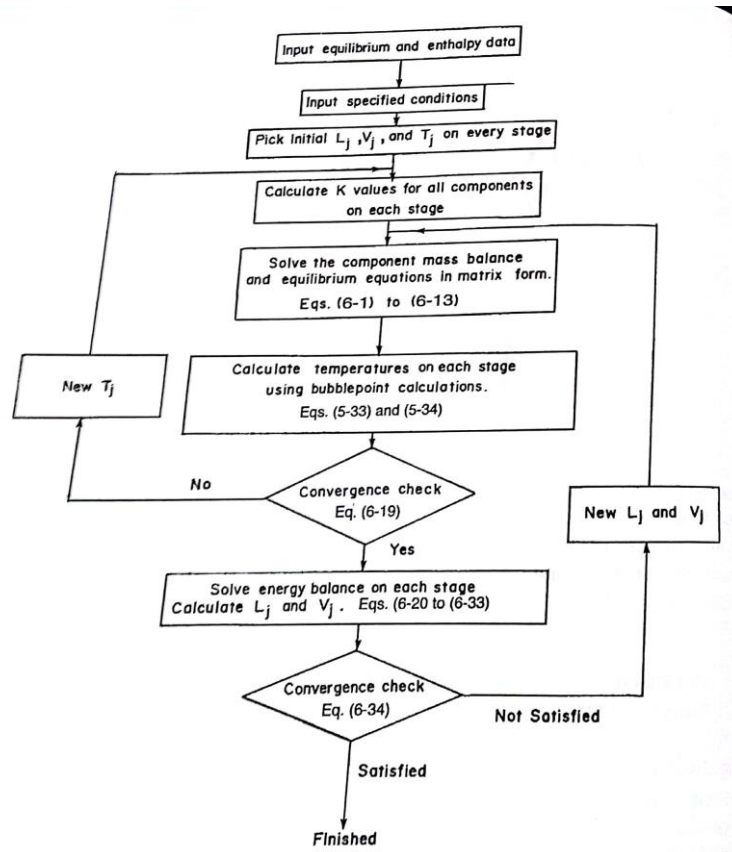


Figura 11.44: Diagrama de flux per a la determinació d'una columna de rectificació [5].

A causa de la complexitat de programar aquest mètode en l'eina del MATLAB, i la complexitat dels paquets termodinàmiques, ja que s'han d'utilitzar moltes propietats termodinàmiques pel que fa a la determinació de la temperatura de bombolla, Ebsyn S.L. ha decidit fer el dimensionament de la columna, en la seva totalitat, amb el software Aspen HYSYS.

11.5.2.1 Mètode rigorós de la columna C-0201

Primerament, s'han fet una sèrie d'iteracions provant el número d'etapes que s'adeqüi a la relació de reflux externa desitjada. Iterant etapes partint de la que s'ha

obtingut al mètode Short-Cut, s'ha arribat als següents paràmetres inicials de dimensionament:

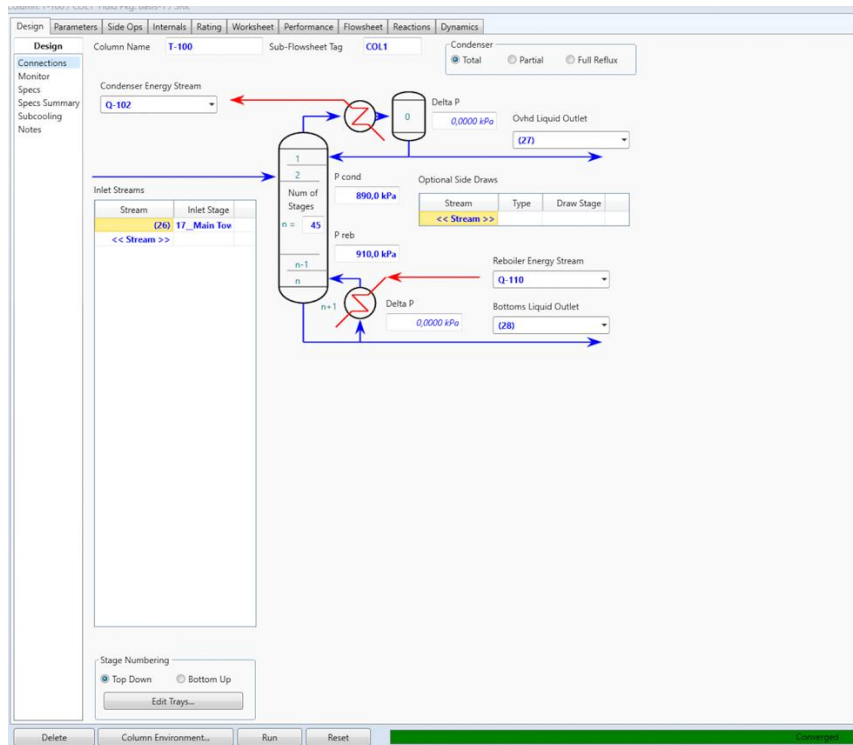


Figura 11.45: Paràmetres inicials de dimensionament de la columna T-100.

Es pot observar en la figura 11.45 com hi ha una desviació de les etapes que s'havien obtingut al mètode del Short-Cut, 5 etapes de més. Tot i això el mètode Short-Cut ha estat bastant útil per saber a partir de quina etapa començar. Aquestes etapes han d'estar condicionades pel factor d'eficàcia de plat, que també s'ha d'introduir en l'apartat de "PARAMETERS→EFFICIENCIES":

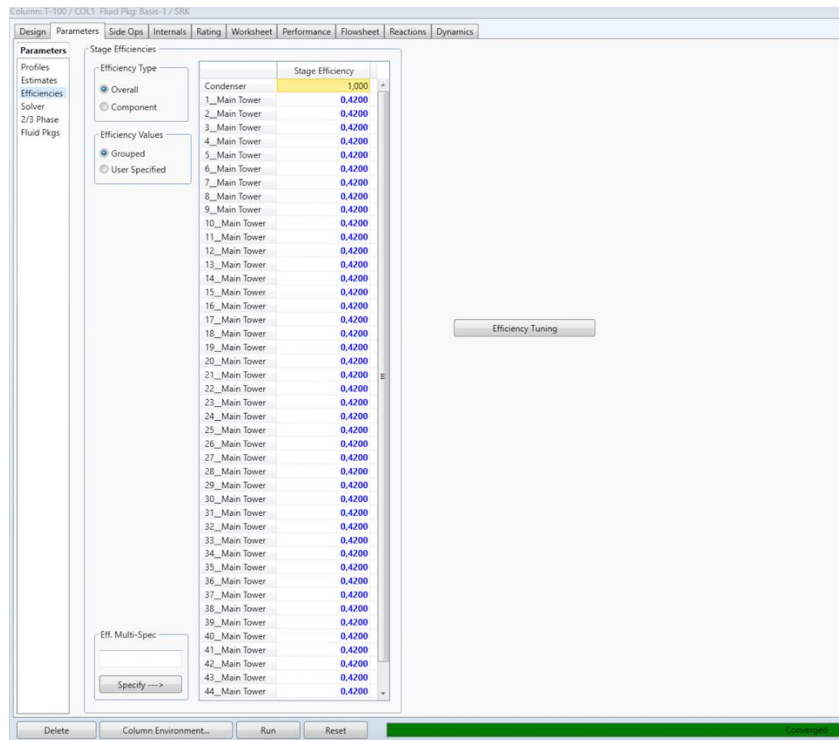


Figura 11.46: Eficiències de plat a la columna T-100.

Un cop definides les eficiències de plat s'introdueix la relació de reflux externa en l'apartat de "DESIGN→SPECS→REFLUX RATIO", i s'introdueix 1,5:

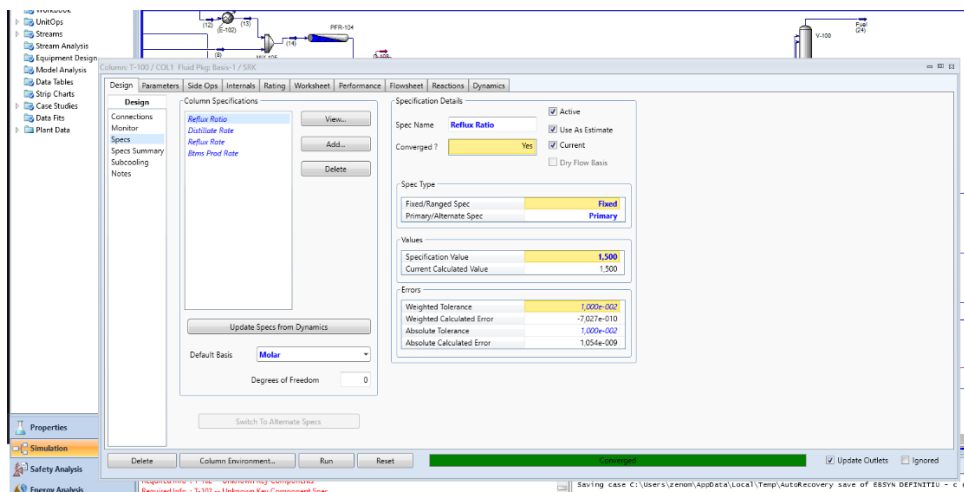


Figura 11.47: Relació de reflux externa a la columna T-100.

Seguidament s'introdueix el cabal de destil·lat desitjat. Així i tot s'ha decidit canviar aquest paràmetre, i en comptes de fixar el que surt per caps, s'ha fixat el que surt per cues, ja que aquest valor és el crític a l'hora de fer el disseny, perquè el cabal d'etilbenzè és el que sortirà per cues. Per tant, a continuació es fixa el cabal que surt per cues, tenint en compte les impureses de benzè i dietilbenzè:

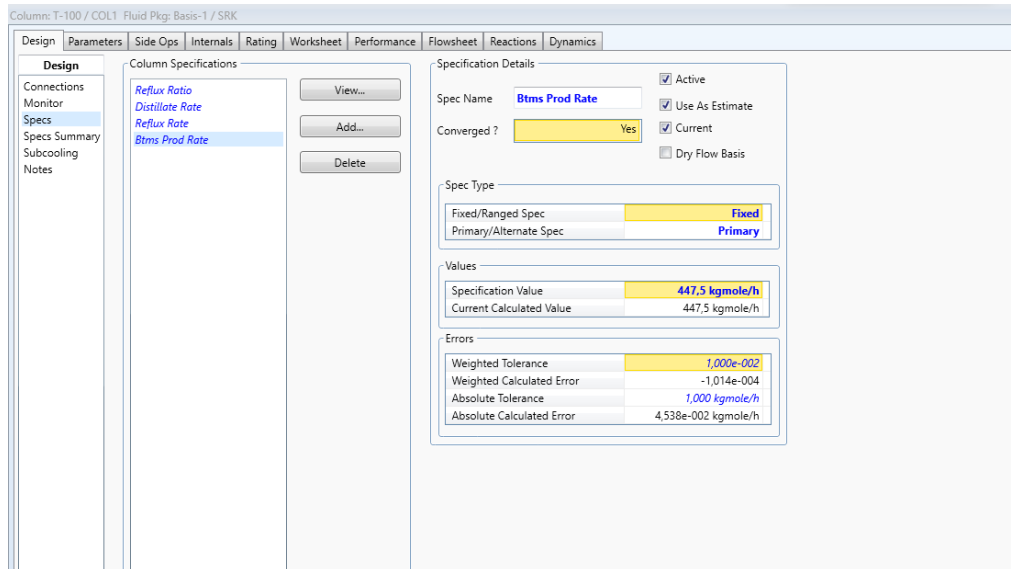


Figura 11.48: Cabal de sortida de cues a la columna T-100.

A partir d'aquest punt el simulador d'Aspen HYSYS pot començar a realitzar el seu càlculs respecte al mètode rigorós. Es prem el botó de "RUN" i s'espera al fet que surti en verd a sota el missatge de "CONVERGED". Si això passa el mètode de càlcul haurà convergit i el predimensionament de la columna serà correcte. Un cop convergida la columna es consulta el cabal de destil·lat obtingut, així com el líquid que retorna a la columna:

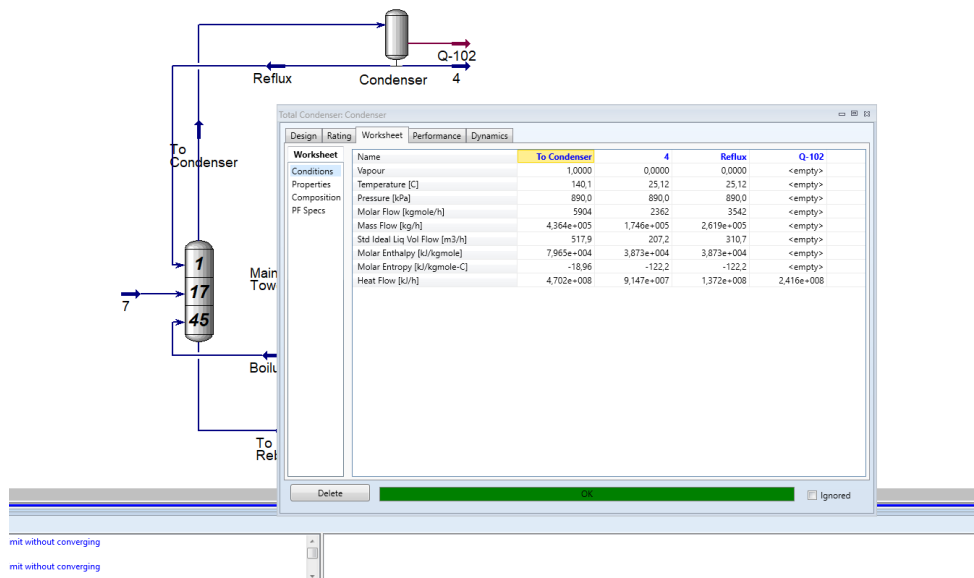


Figura 11.49: Cabals en l'entorn del condensador a la columna T-100.

També es comprova les composicions d'aquests corrents:

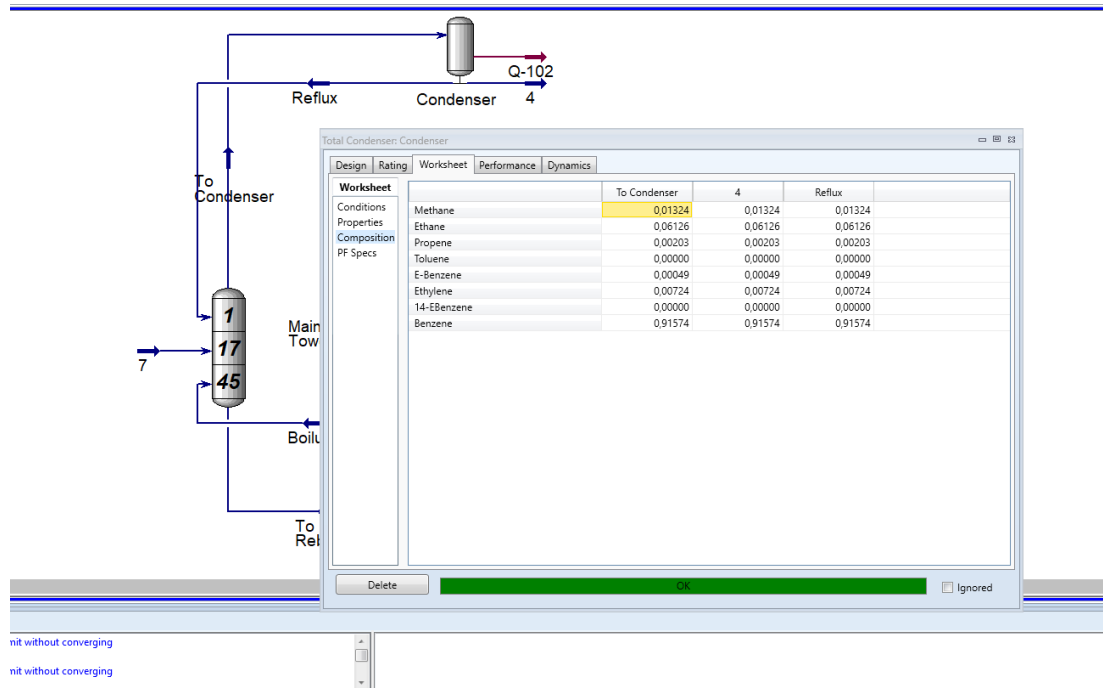


Figura 11.50: Composicions en l'entorn del condensador a la columna T-100.

Seguidament es comproven els cabals de producció de cues, així com el vapor que retorna a la columna al calderí:

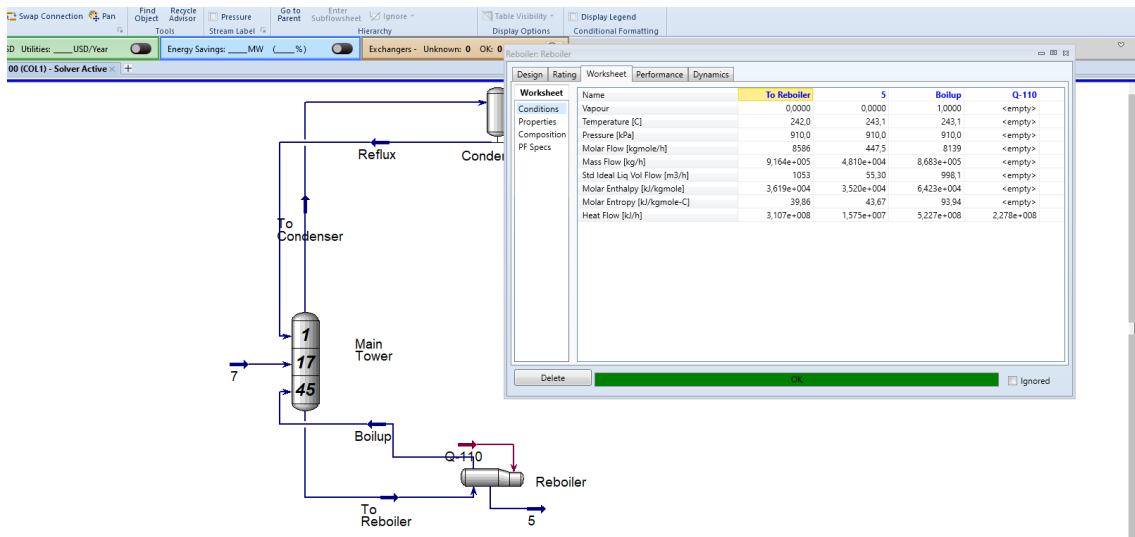


Figura 11.51: Cabals en l'entorn del calderí a la columna T-100.

També es comprova les composicions d'aquests corrents:

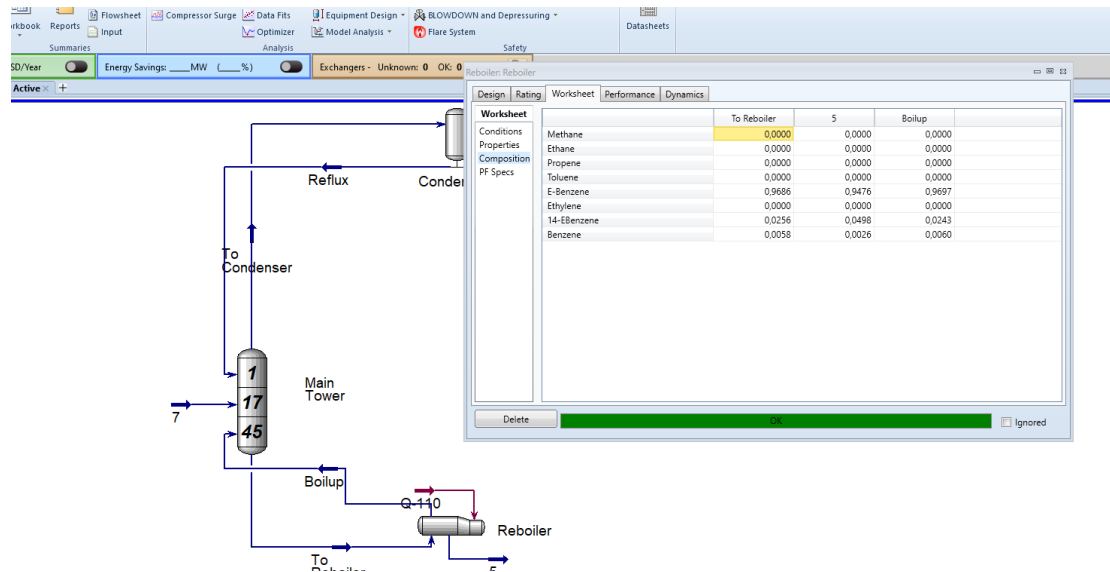


Figura 11.52: Composicions en l'entorn del calderí a la columna T-100.

A continuació d'aquesta comprovació s'ha de veure els "INTERNALS" de la columna. En aquest apartat s'han de definir la separació entre plats i el diàmetre d'aquests. Per fer-ho s'ha de tenir en compte el possible "weeping". Fent unes iteracions en els paràmetres de la separació entre plats i diàmetre s'ha obtingut el següent:

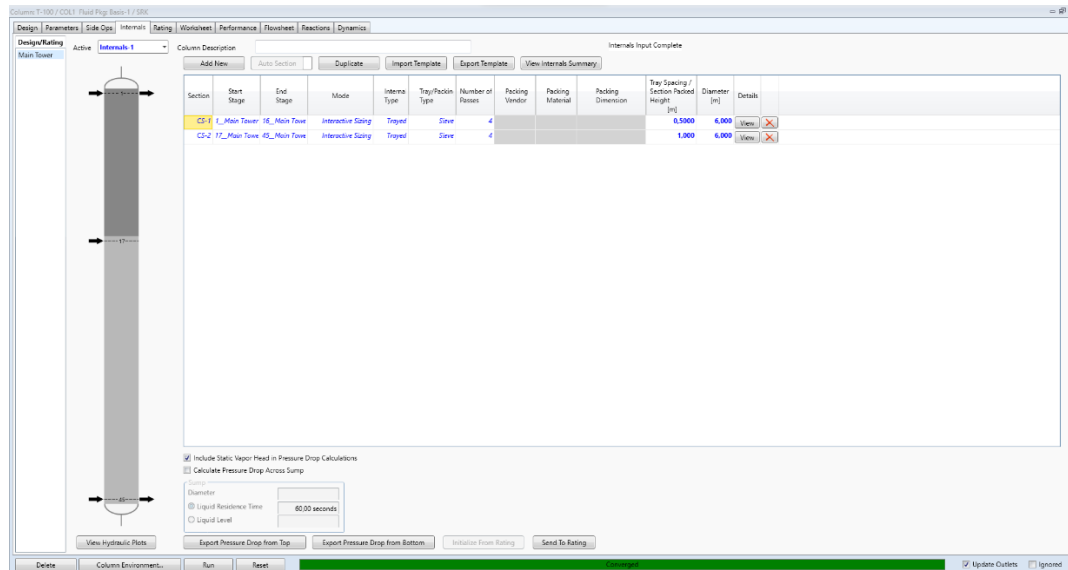


Figura 11.53: Definició dels paràmetres dels internals a la columna T-100.

Si no surt cap error dels internals, vol dir que no es produeix el fenomen del "weeping" i per tant, la columna ja està ben dimensionada, tot així es comprova als "HIDRAULIC PLOTS" la relació dels cabals de líquid-vapor per comprovar-ho, ja que encara que no es produeixi el fenomen pot haver-hi risc:

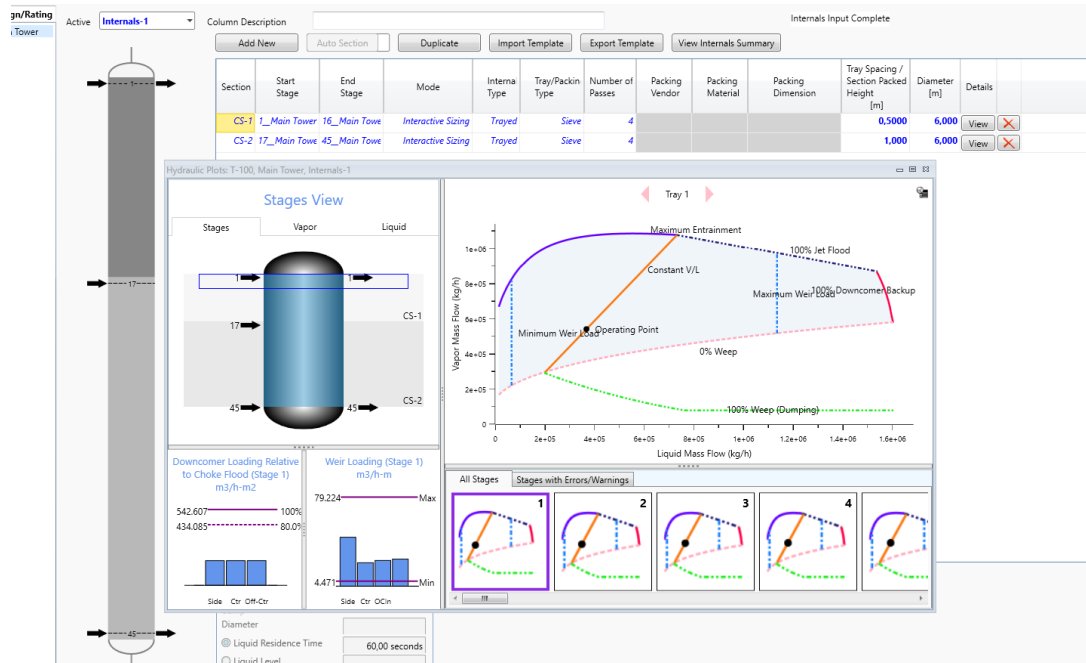


Figura 11.54: Gràfics de cabal de vapor respecte el de líquid a cada plat en la columna T-100.

Es pot observar en la figura 11.54 com en tota la columna es compleix que no succeeix aquest fenomen, i a més no hi ha zona de risc, per tant, es dona per bona aquest dimensionament de separació entra plants i diàmetre de la figura 11.53. Acabant amb el disseny de la columna, en la següent figura es pot veure el diàmetre d'aquesta i la seva altura total, així com altres dades d'interès:

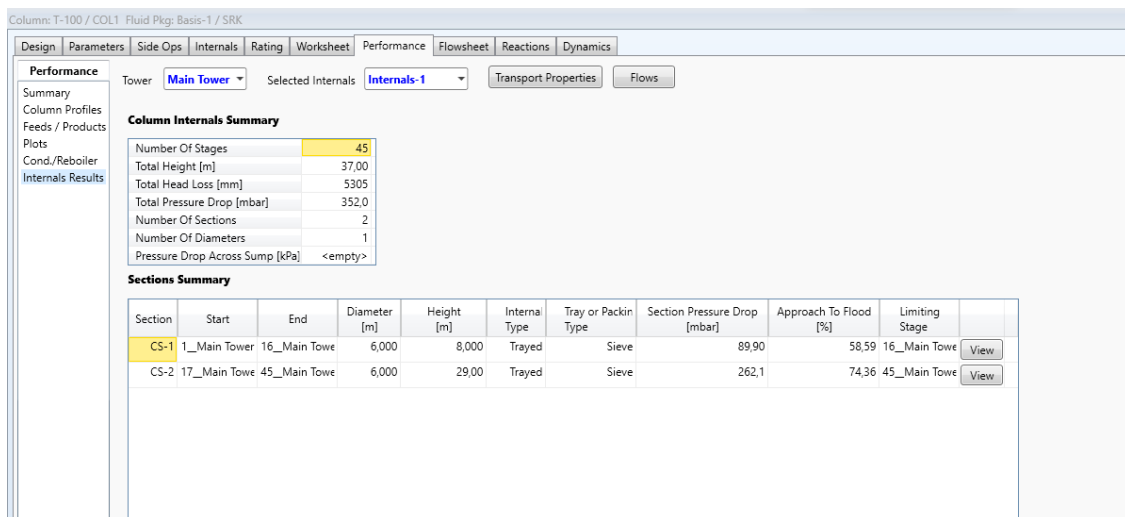


Figura 11.55: Resultats del dimensionament de la columna T-100.

Finalment, l'Aspen HYSYS també dona les especificacions de construcció dels plats. Primer es comprova els plats de la primera secció:

CS-1@Internals-1@Main Tower@COL1: Geometry

Geometry Results Messages

Tray Geometry

Name CS-1 Start Stage 1_Main Tower End Stage 16_Main Tower Status Active

Section

Tray Type	Sieve
Diameter [m]	6,000
Tray Spacing [m]	0,5000
Number Of Passes	4
Hole Diameter [mm]	12,70
Hole Area to Active Area	0,1000
Deck Gauge Thickness	10 Gauge
Deck Gauge Thickness Value [mm]	3,404
Cross-Sectional Area [m2]	28,27
Active Area [m2]	22,62
Net Area [m2]	25,45

Downcomer Geometry

Property	Side	Off-Center	Center
Downcomer Clearance (mm)	28,97	28,97	28,97
Downcomer Width Top (mm)	365,0	265,3	235,7
Downcomer Width Bottom (mm)	365,0	265,3	235,7
Downcomer Area Top (m2)	0,7069	1,414	1,414
Downcomer Area Bottom (m2)	0,7069	1,414	1,414
Downcomer Location (Dist. From Ctr.) (m)		1,376	

Weir Geometry

Property	Side	Off-Center Outside	Off-Center Inside	Center
Weir Height (mm)	41,67	41,67	41,67	41,67
Weir Length (m)	2,868	5,186	5,460	5,995

Panels

Property	Panel A	Panel B	Panel C	Panel D
Flow Path Length (m)	1,126	1,126	1,126	1,126
Bubbling Area (m2)	4,774	6,536	4,774	6,536

Figura 11.56: Especificacions de la primera secció de la columna T-100.

I per la segona secció:

CS-2@Internals-1@Main Tower@COL1: Geometry

Geometry Results Messages

Tray Geometry

Name CS-2 Start Stage 17_Main Tower End Stage 45_Main Tower Status Active

Section

Tray Type	Sieve
Diameter [m]	6,000
Tray Spacing [m]	1,000
Number Of Passes	4
Hole Diameter [mm]	12,70
Hole Area to Active Area	0,1000
Deck Gauge Thickness	10 Gauge
Deck Gauge Thickness Value [mm]	3,404
Cross-Sectional Area [m2]	28,27
Active Area [m2]	22,39
Net Area [m2]	25,33

Downcomer Geometry

Property	Side	Off-Center	Center
Downcomer Clearance (mm)	70,63	70,63	70,63
Downcomer Width Top (mm)	374,8	275,8	245,1
Downcomer Width Bottom (mm)	374,8	275,8	245,1
Downcomer Area Top (m2)	0,7351	1,470	1,470
Downcomer Area Bottom (m2)	0,7351	1,470	1,470
Downcomer Location (Dist. From Ctr.) (m)		1,374	

Weir Geometry

Property	Side	Off-Center Outside	Off-Center Inside	Center
Weir Height (mm)	83,33	83,33	83,33	83,33
Weir Length (m)	2,904	5,182	5,467	5,995

Panels

Property	Panel A	Panel B	Panel C	Panel D
Flow Path Length (m)	1,113	1,113	1,113	1,113
Bubbling Area (m2)	4,731	6,465	4,731	6,465

Figura 11.57: Especificacions de la segona secció de la columna T-100.

11.5.2.2 Mètode rigorós de la columna C-0202

Primerament, s'han fet una sèrie d'iteracions provant el número d'etapes que s'adeqüi a la relació de reflux externa desitjada. Iterant etapes partint de la que s'ha obtingut al mètode Short-Cut, s'ha arribat als següents paràmetres inicials de dimensionament:

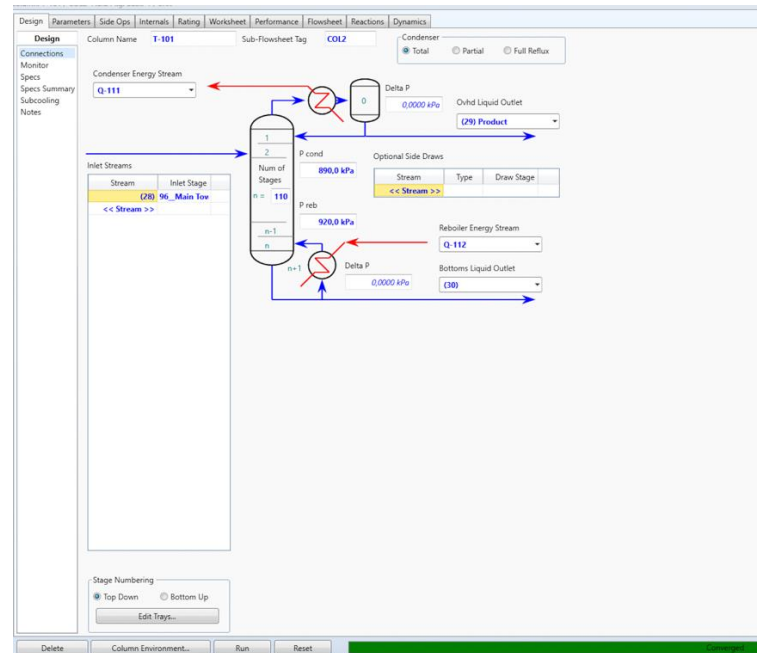


Figura 11.58: Paràmetres inicials de dimensionament de la columna T-101.

Es pot observar en la figura 11.58 com hi ha una desviació de les etapes que s'havien obtingut al mètode del Short-Cut, 33 etapes de menys, ja que s'ha volgut estalviar en etapes per no obtenir massa etapes. Així i tot el mètode Short-Cut ha estat bastant útil per saber a partir de quina etapa començar.

Aquestes etapes han d'estar condicionades pel factor d'eficàcia de plat, que també s'ha d'introduir en l'apartat de "PARAMETERS→EFFICIENCIES":

7_Main Tower	0,4500
8_Main Tower	0,4500
9_Main Tower	0,4500
10_Main Tower	0,4500
11_Main Tower	0,4500
12_Main Tower	0,4500
13_Main Tower	0,4500
14_Main Tower	0,4500
15_Main Tower	0,4500
16_Main Tower	0,4500
17_Main Tower	0,4500
18_Main Tower	0,4500
19_Main Tower	0,4500
20_Main Tower	0,4500
21_Main Tower	0,4500
22_Main Tower	0,4500
23_Main Tower	0,4500
24_Main Tower	0,4500
25_Main Tower	0,4500
26_Main Tower	0,4500
27_Main Tower	0,4500
28_Main Tower	0,4500
29_Main Tower	0,4500
30_Main Tower	0,4500
31_Main Tower	0,4500
32_Main Tower	0,4500
33_Main Tower	0,4500
34_Main Tower	0,4500
35_Main Tower	0,4500
36_Main Tower	0,4500
37_Main Tower	0,4500
38_Main Tower	0,4500
39_Main Tower	0,4500
40_Main Tower	0,4500
41_Main Tower	0,4500
42_Main Tower	0,4500
43_Main Tower	0,4500
44_Main Tower	0,4500

Figura 11.59: Eficiències de plat a la columna T-101.

Un cop definides les eficiències de plat s'introdueix la relació de reflux externa en l'apartat de "DESIGN→SPECS→REFLUX RATIO", i s'introdueix 1,25:

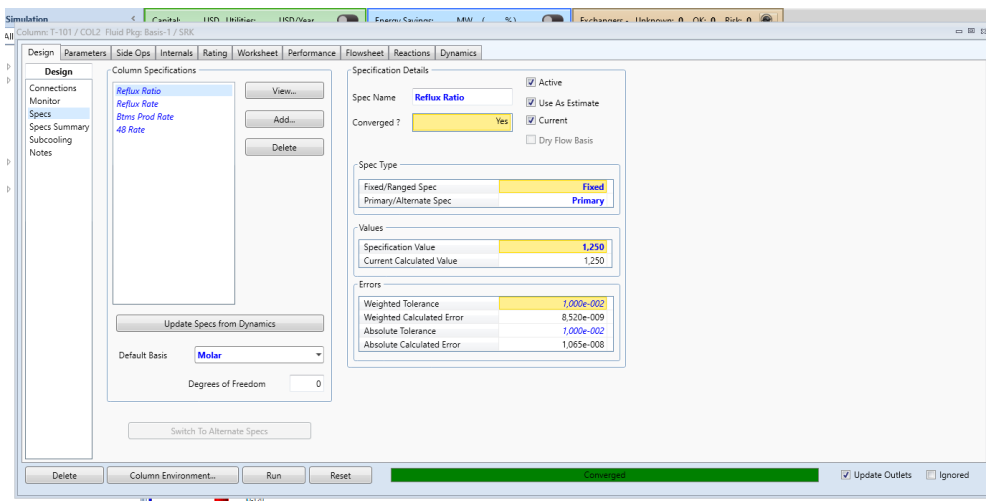


Figura 11.60: Relació de reflux externa a la columna T-101.

Seguidament s'introdueix el cabal de destil·lat desitjat:

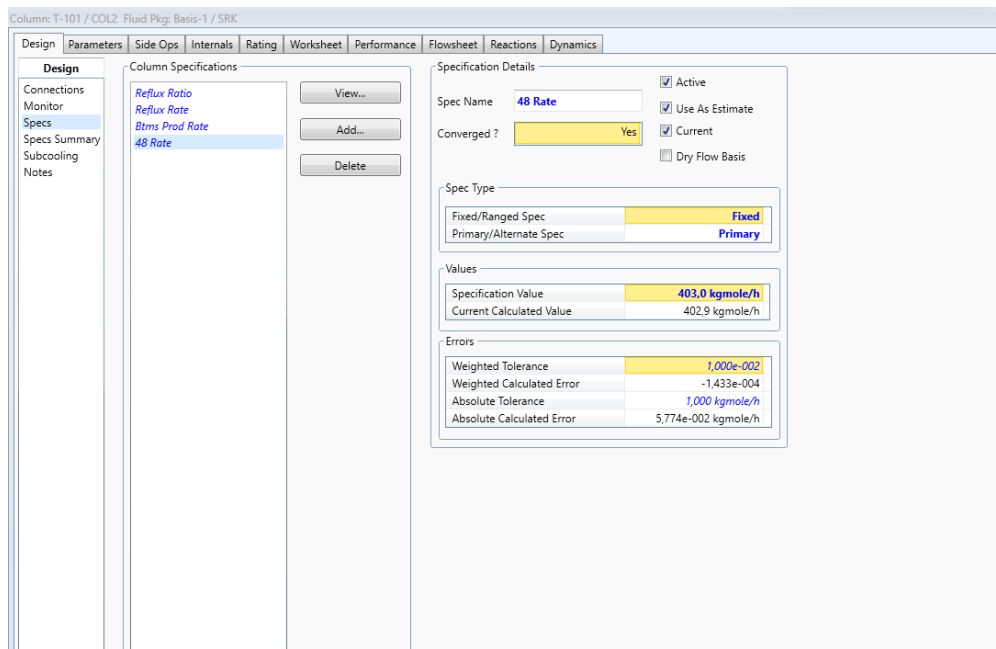


Figura 11.61: Cabal de sortida de caps a la columna T-101.

A partir d'aquest punt el simulador Aspen HYSYS pot començar a realitzar el seu càlcul respecte el mètode rigorós. Es prem el botó de "RUN" i s'espera que surti en verd a sota el missatge de "CONVERGED". Si això passa el mètode de càlcul haurà convergit i el predimensionament de la columna serà correcte.

Un cop convergida la columna es consulta el cabal de destil·lat obtingut, així com el líquid que retorna a la columna:

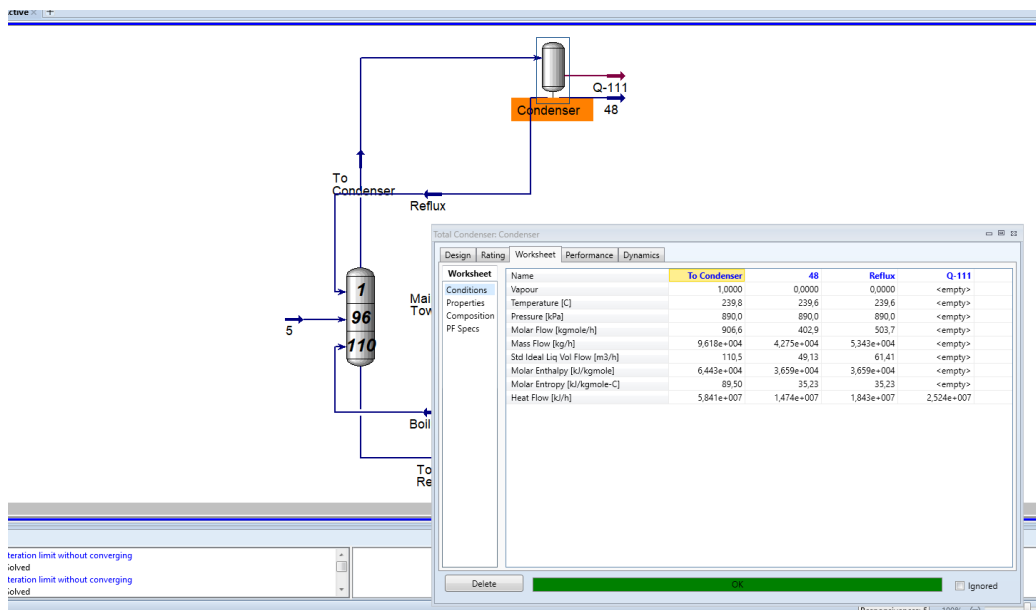


Figura 11.62: Cabals en l'entorn del condensador a la columna T-101.

També es comprova les composicions d'aquests corrents:

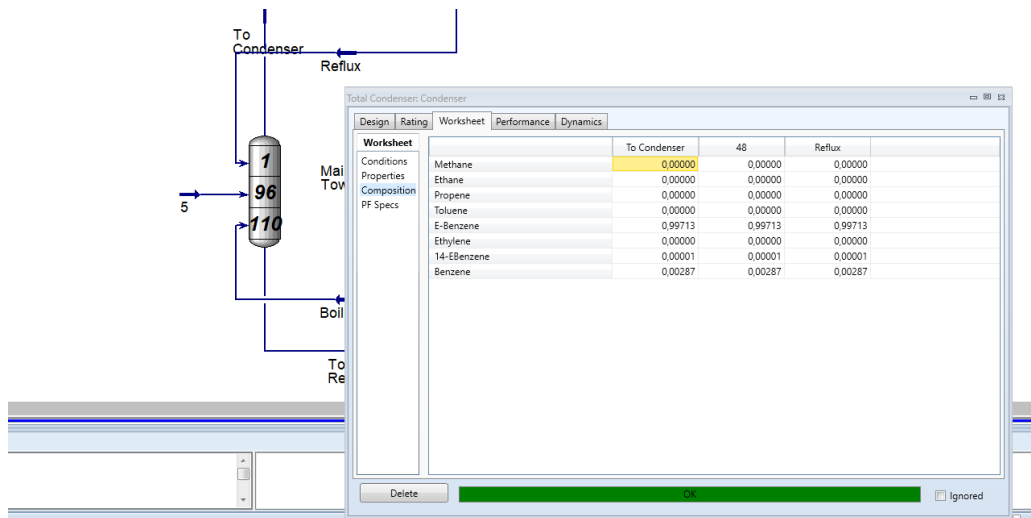


Figura 11.63: Composicions en l'entorn del condensador a la columna T-101.

Es pot observar en la figura 11.63 com s'obté producte d'interès a la sortida del condensador, seguint les especificacions desitjades. Seguidament, es comproven els cabals de producció de cues, així com el vapor que retorna a la columna al calderí:

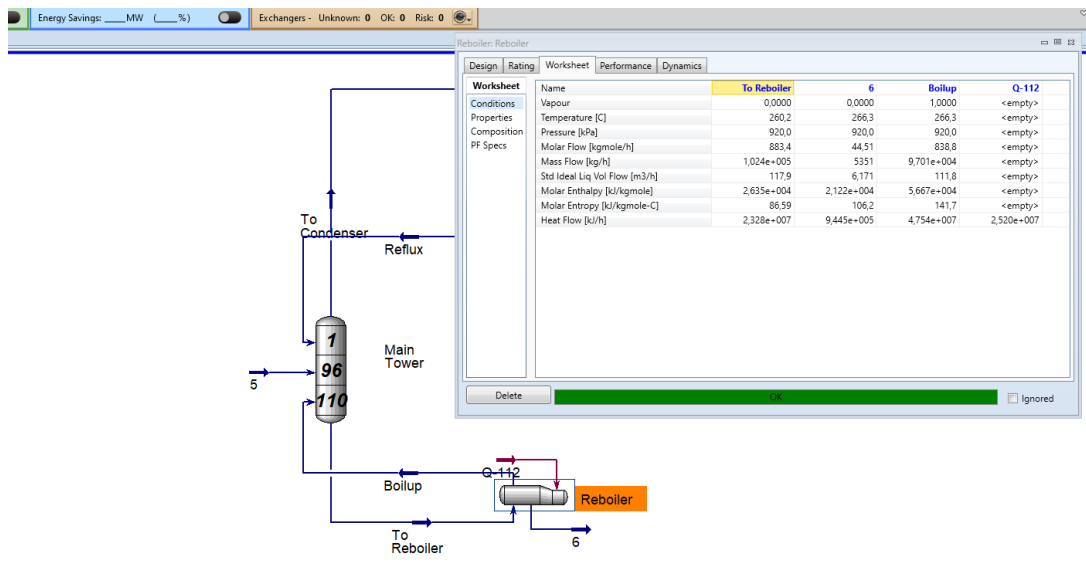


Figura 11.64: Cabals en l'entorn del calderí a la columna T-101.

També es comprova les composicions d'aquests corrents:

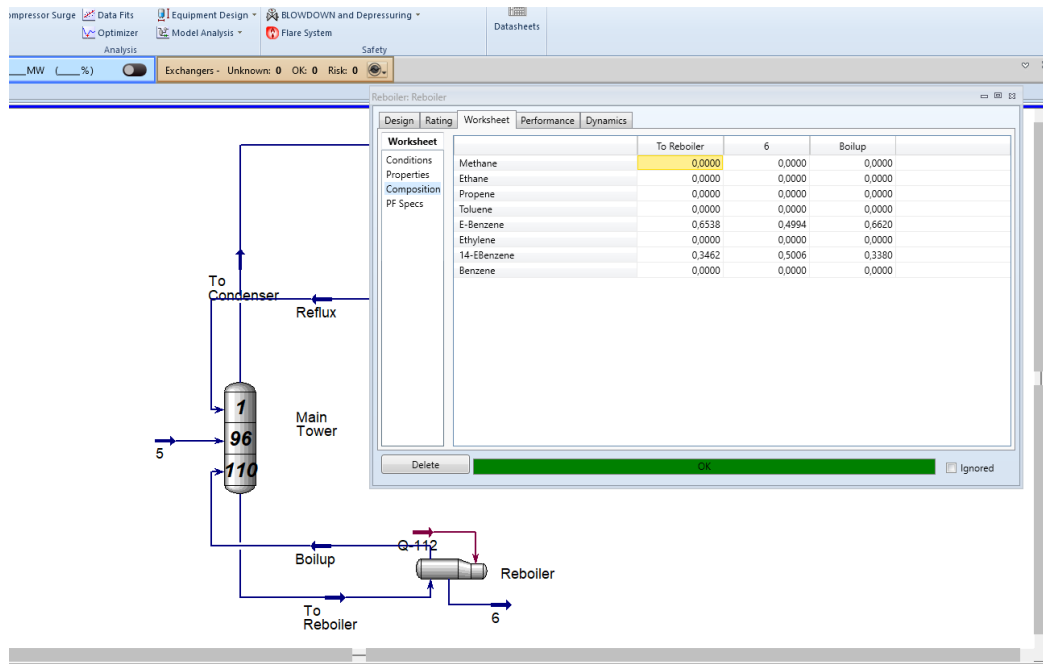


Figura 11.65: Composicions en l'entorn del calderí a la columna T-101.

A continuació d'aquesta comprovació s'ha de veure els "INTERNALS" de la columna. En aquest apartat s'han de definir la separació entre plats i el diàmetre d'aquests. Per fer-ho s'ha de tenir en compte el possible "weeping". Fent unes iteracions en els paràmetres de la separació entre plats i diàmetre s'ha obtingut el següent:

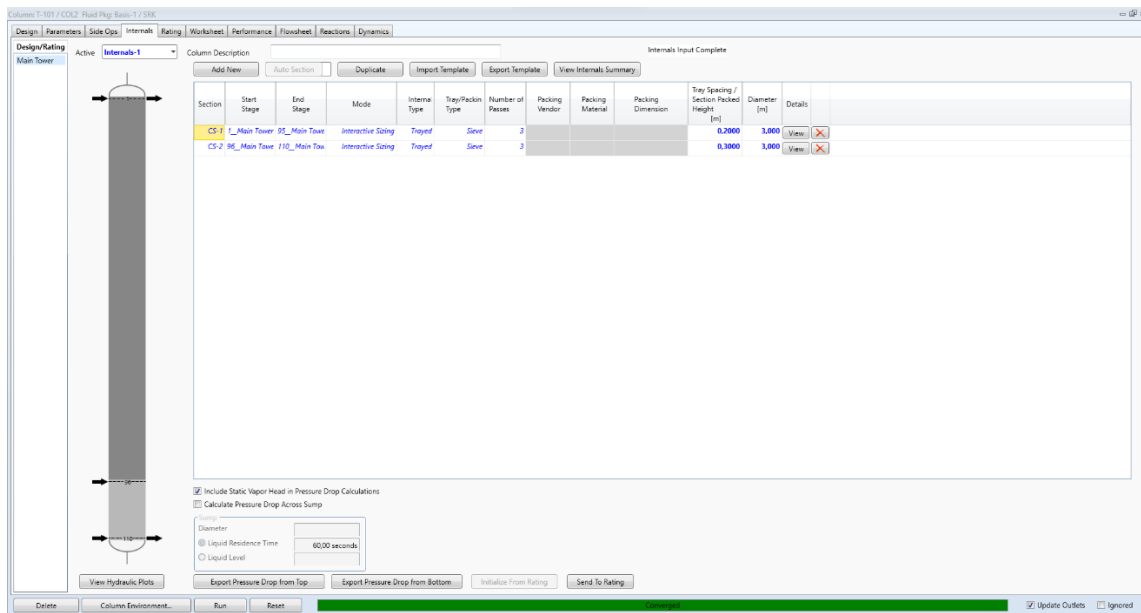


Figura 11.66: Definició dels paràmetres dels internals a la columna T-101.

Si no surt cap error dels internals, vol dir que no es produeix el fenomen del "weeping" i, per tant, la columna ja està ben dimensionada, tot així es comprova als "HIDRAULIC

PLOTS” la relació dels cabals de líquid-vapor per comprovar-ho, ja que encara que no es produeixi el fenomen pot haver-hi risc:

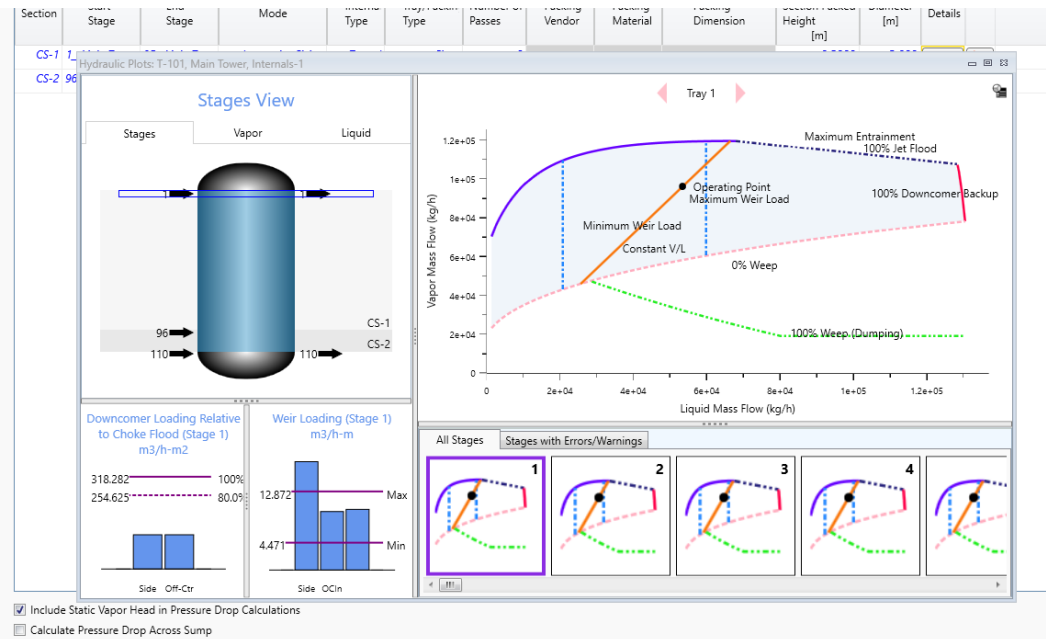


Figura 11.67: Gràfics de cabal de vapor respecte el de líquid a cada plat en la columna T-101.

Es pot observar en la figura 11.67 com en tota la columna es compleix que no succeeix aquest fenomen, i a més no hi ha zona de risc, per tant, es dona per bona aquest dimensionament de separació entra plants i diàmetre de la figura 11.66. Acabant amb el disseny de la columna, en la següent figura es pot veure el diàmetre d'aquesta i la seva altura total, així com altres dades d'interès:

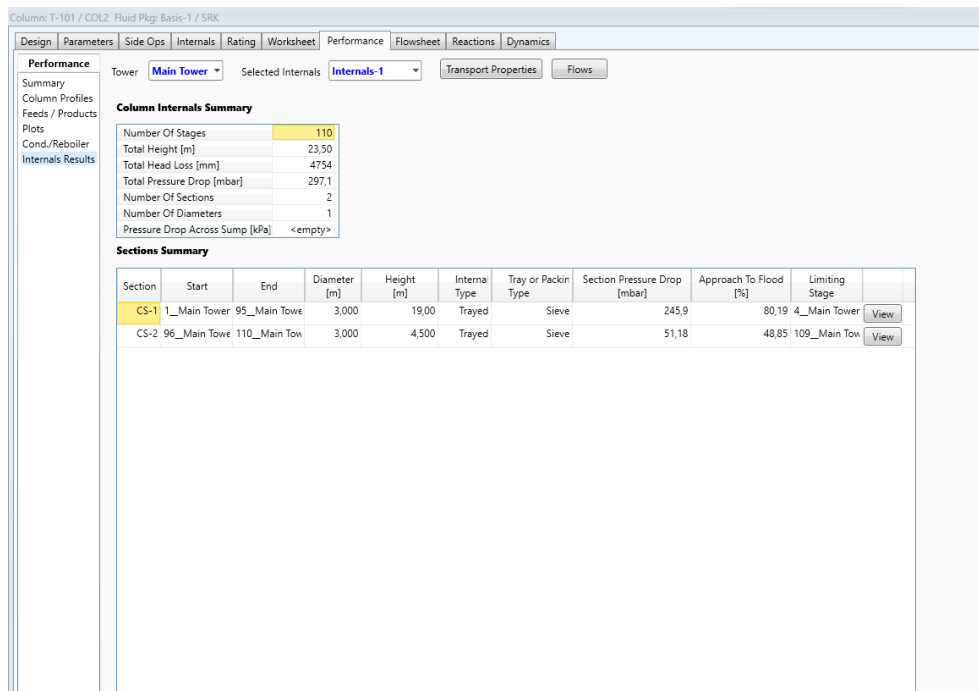


Figura 11.68: Resultats del dimensionament de la columna T-101.

Finalment l'Aspen HSYSYS també dona les especificacions de construcció dels plats. Primer es comprova els plats de la primera secció:

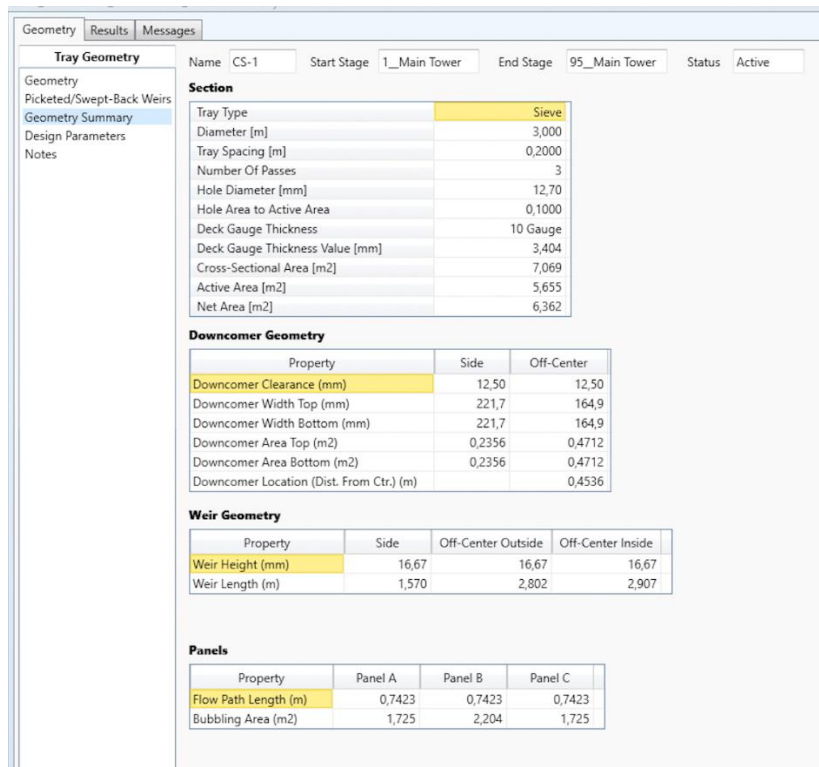


Figura 11.69: Especificacions de la primera secció de la columna T-101.

I per la segona secció:

Tray Geometry		Name	CS-2	Start Stage	96_Main Tower	End Stage	110_Main Tower	Status	Active
Section									
Tray Type		Sieve							
Diameter [m]		3,000							
Tray Spacing [m]		0,3000							
Number Of Passes		3							
Hole Diameter [mm]		12,70							
Hole Area to Active Area		0,1000							
Deck Gauge Thickness		10 Gauge							
Deck Gauge Thickness Value [mm]		3,404							
Cross-Sectional Area [m2]		7,069							
Active Area [m2]		5,655							
Net Area [m2]		6,362							
Downcomer Geometry									
	Property	Side	Off-Center						
	Downcomer Clearance (mm)	18,75	18,75						
	Downcomer Width Top (mm)	221,7	164,9						
	Downcomer Width Bottom (mm)	221,7	164,9						
	Downcomer Area Top (m2)	0,2356	0,4712						
	Downcomer Area Bottom (m2)	0,2356	0,4712						
	Downcomer Location (Dist. From Ctr.) (m)		0,4536						
Weir Geometry									
	Property	Side	Off-Center Outside	Off-Center Inside					
	Weir Height (mm)	25,00	25,00	25,00					
	Weir Length (m)	1,570	2,802	2,907					
Panels									
	Property	Panel A	Panel B	Panel C					
	Flow Path Length (m)	0,7423	0,7423	0,7423					
	Bubbling Area (m2)	1,725	2,204	1,725					

Figura 11.70: Especificacions de la segona secció de la columna T-101.

11.6 Bescanviadors de calor

11.6.1 Introducció

A causa de la gran complexitat que comporta realitzar el mètode KERN per al disseny de bescanviadors de calor, s'ha optat a Ebsyn S.L. dissenyar en la seva totalitat els bescanviadors amb el software Aspen Exchanger Design & Rating. Aquest software, dintre del paquet que incorpora l'Aspen HYSYS, permet fer de manera ràpida els dissenys dels bescanviadors, ja que compta amb les correlacions i dades de les diferents gràfiques que s'han de llegir per dimensionar l'equip. En aquest software únicament s'haurà de definir quin dels dos fluids és el fred i quin el calent. Amb això i altres dades com el cabal, salt tèrmic... el programa serà capaç de dimensionar amb tot el detall el bescanviador de calor. També es pot definir el tipus de geometria del bescanviador segons les aplicacions que es vulguin donar:

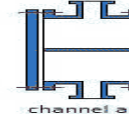

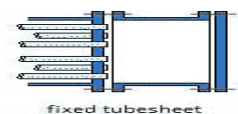


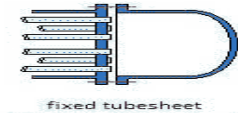
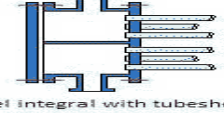

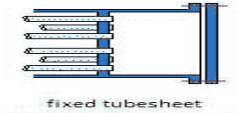
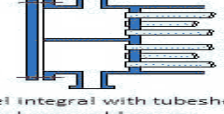





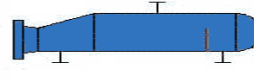
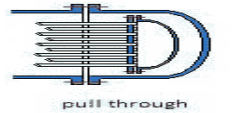



	Stationary Head Types		Shell Types		Rear Head Types
A	 channel and removable cover	E	 one pass shell	L	 fixed tubesheet like 'A' stationary head
B	 bonnet (integral cover)	F	 two pass shell with longitudinal baffle	M	 fixed tubesheet like 'B' stationary head
C	 channel integral with tubesheet and removable cover	G	 split flow	N	 fixed tubesheet like 'C' stationary head
N	 channel integral with tubesheet and removable cover	H	 double split flow	P	 outside packed floating head
D	 special high pressure closure	J	 divided flow	S	 floating head with backing device (split ring)
		K	 kettle type reboiler	T	 pull through floating head
		X	 cross flow	U	 u-tube bundle
				W	 packed floating tube sheet with lantern ring

Figura 11.71: Codificació dels diferents tipus de peces del bescanviador del TEMA.

A efectes pràctics a Ebsyn S.L., pel projecte TARREB23 només s'han dissenyat bescanviadors del tipus AKU pels calderins, i del tipus BEM per la resta de bescanviadors.

11.6.2 Exemple de disseny d'un bescanviador de calor

Per fer una demostració de la metodologia seguida a Ebsyn S.L. per al dimensionament dels bescanviadors, es procedeix a fer un exemple pas a pas d'aquesta metodologia amb el software esmentat anteriorment. Aquest exemple es farà amb el bescanviador BC-0205.

Primerament, s'ha de definir el tipus de bescanviador amb el qual es treballa, en aquest cas es treballa amb un bescanviador de tipus BEM:

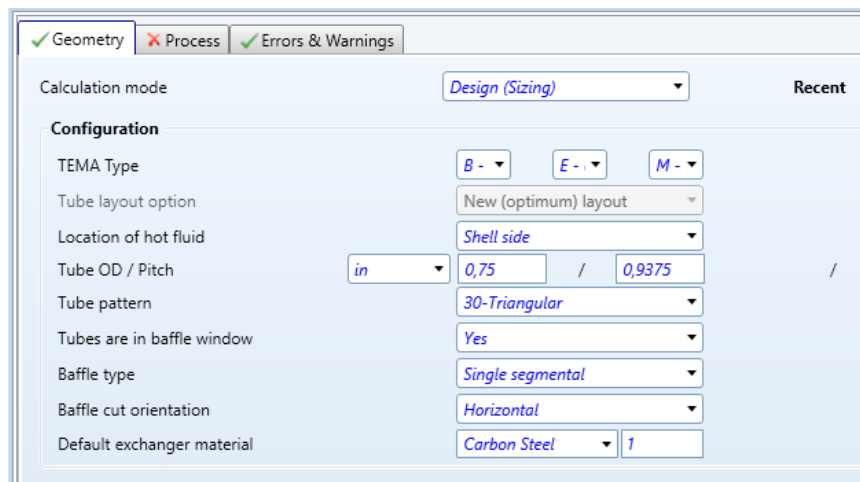


Figura 11.72: Definició del tipus de bescanviador.

A més a més es poden fixar paràmetres geomètrics del bescanviador si escau:

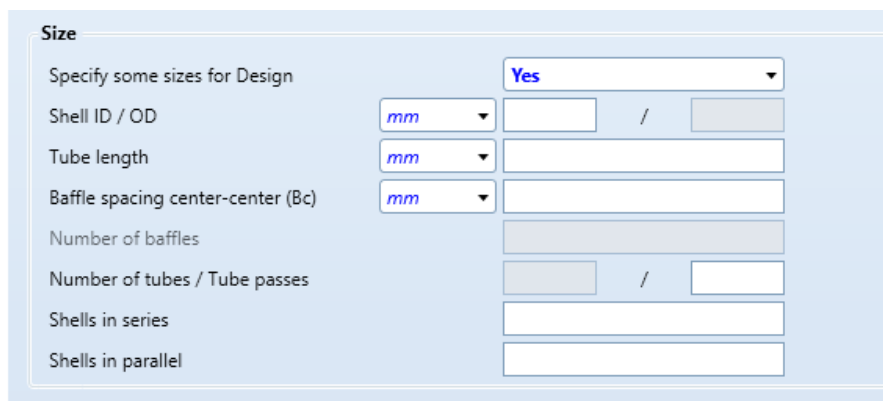


Figura 11.73: Definició de paràmetres geomètrics del bescanviador.

Seguidament ja es pot anar a la pestanya de "PROCESS DATA":

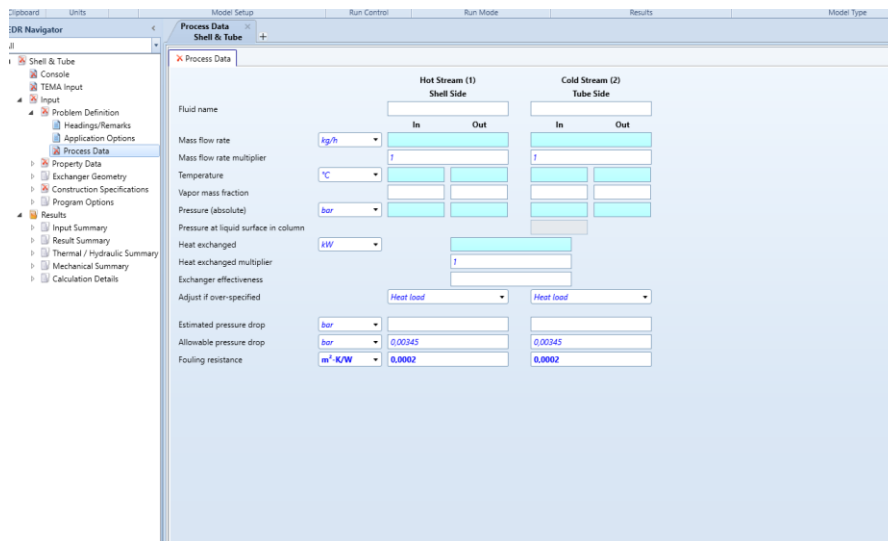
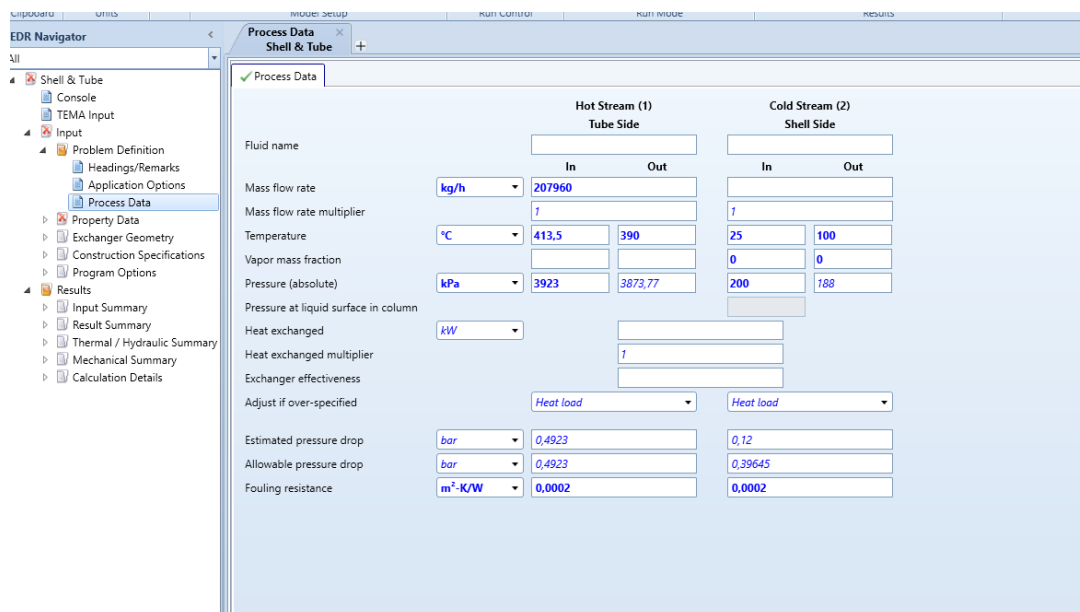


Figura 11.74: Entorn per a la introducció de les dades de disseny del bescanviador.

En aquesta pestanya s'introdueixen totes les dades de disseny del bescanviador, o sigui, el cabal a refrigerar/escalfar, i el salt tèrmic. A més es decideix a fixar una resistència d'embrutiment de $0,0002 \text{ m}^2\text{K/W}$, ja que és el que recomana [7]:



Parameter	Hot Stream (1) Tube Side		Cold Stream (2) Shell Side	
	In	Out	In	Out
Mass flow rate (kg/h)	207960			
Mass flow rate multiplier	1		1	
Temperature (°C)	413,5	390	25	100
Vapor mass fraction			0	0
Pressure (absolute) (kPa)	3923	3873,77	200	188
Pressure at liquid surface in column				
Heat exchanged (kW)				
Heat exchanged multiplier		1		
Exchanger effectiveness				
Adjust if over-specified	Heat load		Heat load	
Estimated pressure drop (bar)	0,4923		0,12	
Allowable pressure drop (bar)	0,4923		0,39645	
Fouling resistance (m²-K/W)	0,0002		0,0002	

Figura 11.75: Introducció de les dades de disseny del bescanviador.

A continuació s'ha d'anar a "PROPERTY DATA" i definir els corrents de fluid fred i calent. Primer es defineixen les espècies que intervenen en el corrent fred així com les seves composicions:

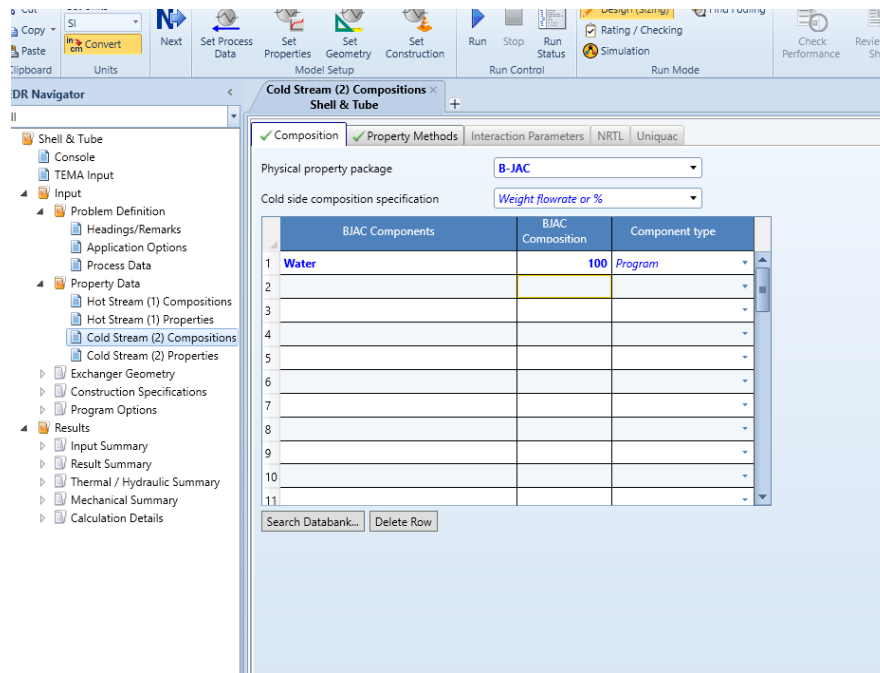


Figura 11.76: Components en el fluid fred.

Amb això, i les condicions fixades en la figura 11.76 el software dona les propietats del fluid, que utilitzarà per als càlculs del mètode KERN:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Temperature °C	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40
Liquid density kg/m ³	958.96	962.76	966.45	970.03	973.47	976.77	979.91	982.88	985.66	988.23	990.58	992.69	994.53
Liquid specific heat kJ/(kg-K)	4.195	4.193	4.191	4.189	4.188	4.187	4.186	4.186	4.186	4.186	4.186	4.187	4.188
Liquid viscosity mPa-s	0.2827	0.296	0.3082	0.3111	0.3154	0.32	0.4107	0.4413	0.4743	0.5106	0.5512	0.5981	0.6534
Liquid thermal cond. W/(m-K)	0.6774	0.6742	0.6707	0.6669	0.6627	0.6582	0.6535	0.6485	0.6432	0.6377	0.6319	0.626	0.6198
Liquid surface tension N/m	0.0587	0.0596	0.0606	0.0616	0.0625	0.0635	0.0644	0.0653	0.0662	0.0671	0.068	0.0688	0.0696
Liquid molecular weight	18.00999	18.00999	18.00999	18.00999	18.00999	18.00999	18.00999	18.00999	18.00999	18.00999	18.00999	18.00999	18.00999
Specific enthalpy kJ/kg	0	-21	-41.9	-62.9	-83.6	-104.8	-125.7	-146.6	-167.5	-188.5	-209.4	-230.3	-251.3
Vapor mass fraction	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vapor density kg/m ³													
Vapor specific heat kJ/(kg-K)													
Vapor viscosity mPa-s													
Vapor thermal cond. W/(m-K)													
Vapor molecular weight													
Liquid 2 mass fraction													
Liquid 2 density kg/m ³													
Liquid 2 specific heat kJ/(kg-K)													

Figura 11.77: Propietats del fluid fred.

A continuació s'introdueixen les espècies del fluid calent com les seves composicions:

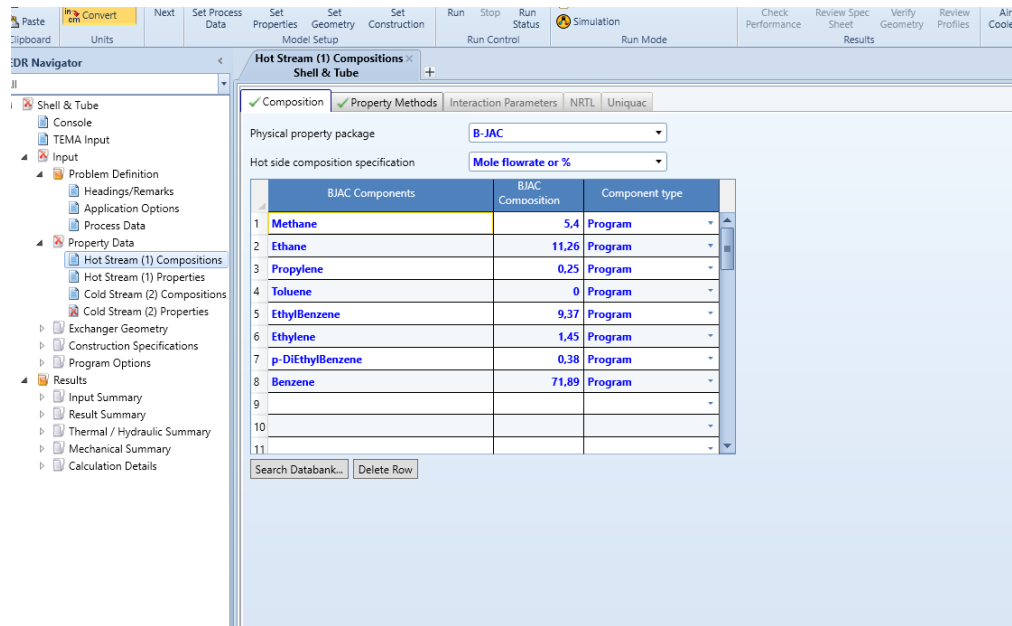


Figura 11.78: Components en el fluid calent.

Amb això, i les condicions fixades en la figura 11.78 el software dona les propietats del fluid, que utilitzarà per als càlculs del mètode KERN:

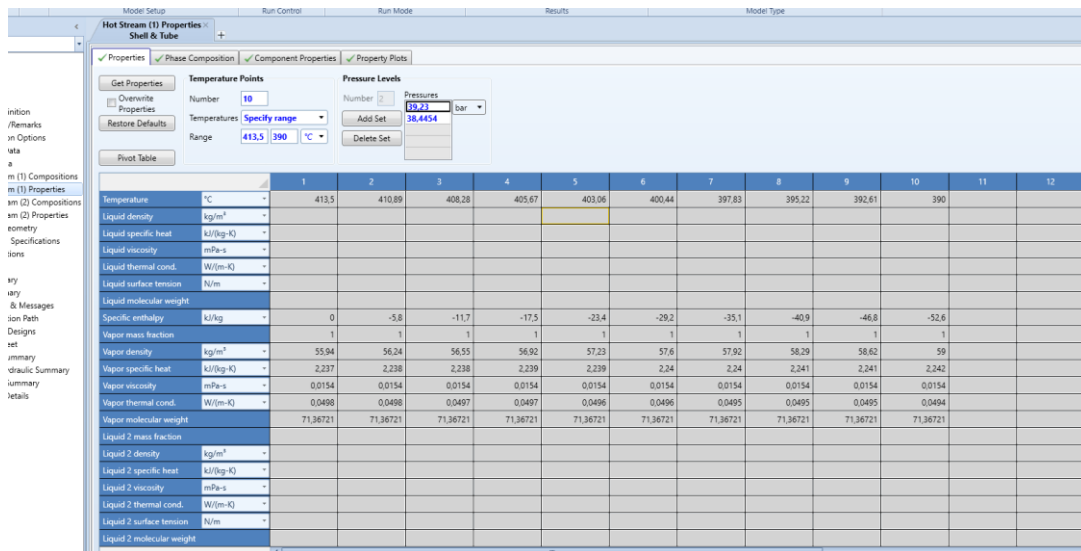


Figura 11.79: Propietats del fluid calent.

Un cop s'ha introduït i calculat tot l'anterior, es pot prémer el botó de "run". Un cop el programa ha acabat de calcular, aquest retorna totes les especificacions del bescanviador:

Heat Exchanger Specification Sheet	
1	Company:
2	Location:
3	Service of Unit: Our Reference:
4	Item No.: Your Reference:
5	Date: Rev No.: Job No.:
6	Size: 584 - 2438,4 mm Type: BEM Horizontal Connected in: 1 parallel 1 series
7	Surf/unit(eff.) 38,5 m ² Shells/unit 1 Surf/shell(eff.) 38,5 m ²
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT
9	Fluid allocation
10	Fluid name
11	Fluid quantity, Total kg/s 57,7667 9,6734
12	Vapor (In/Out) kg/s 57,7667 57,7667 0 0
13	Liquid kg/s 0 0 9,6734 9,6734
14	Noncondensable kg/s 0 0 0 0
15	
16	Temperature (In/Out) °C 413,5 390 25 100
17	Bubble / Dew point °C / / / /
18	Density Vapor/Liquid kg/m ³ 55,94 / 58,3 / / 998,27 / 958,96
19	Viscosity mPa-s 0,0154 / 0,0154 / / 0,8974 / 0,2837
20	Molecular wt, Vap 71,37 71,37
21	Molecular wt, NC
22	Specific heat kJ/(kg-K) 2,237 / 2,241 / / 4,192 / 4,195
23	Thermal conductivity W/(m-K) 0,0498 / 0,0494 / / 0,6004 / 0,6774
24	Latent heat kJ/kg
25	Pressure (abs) bar 39,23 38,82798 2 1,90052
26	Velocity (Mean/Max) m/s 10,3 / 11,49 0,83 / 0,89
27	Pressure drop, allow./calc. bar 0,4923 0,40202 0,39645 0,09948
28	Fouling resistance (min) m ² -K/W 0,0002 0,0002 0,0002 0,00026 Ao based
29	Heat exchanged 3038,4 kW MTD (corrected) 337,86 °C
30	Transfer rate, Service 233,5 Dirty 989,9 Clean 1807,3 W/(m ² -K)
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL
32	Design/Vacuum/test pressure bar 43,43699/ / 3,44738 / /
33	Design temperature / MDMT °C 448,89 / / 137,78 / /
34	Number passes per shell 1 4
35	Corrosion allowance mm 3,18 3,18
36	Connections In mm 1 457,2 / - 1 76,2 / -
37	Size/Rating Out mm 1 457,2 / - 1 76,2 / -
38	Nominal Intermediate / / / /
39	Tube #: 278 OD: 19,05 Tks. Average 2,11 mm Length: 2438,4 mm Pitch: 23,81 mm Tube pattern: 30
40	Tube type: Plain Insert: None Fin#: #/m Material: Carbon Steel
41	Shell Carbon Steel ID 584,2 OD 638,17 mm Shell cover

Figura 11.80: Full d'especificacions generat pel software.

També els software és capaç de generar plànols del bescanviador:

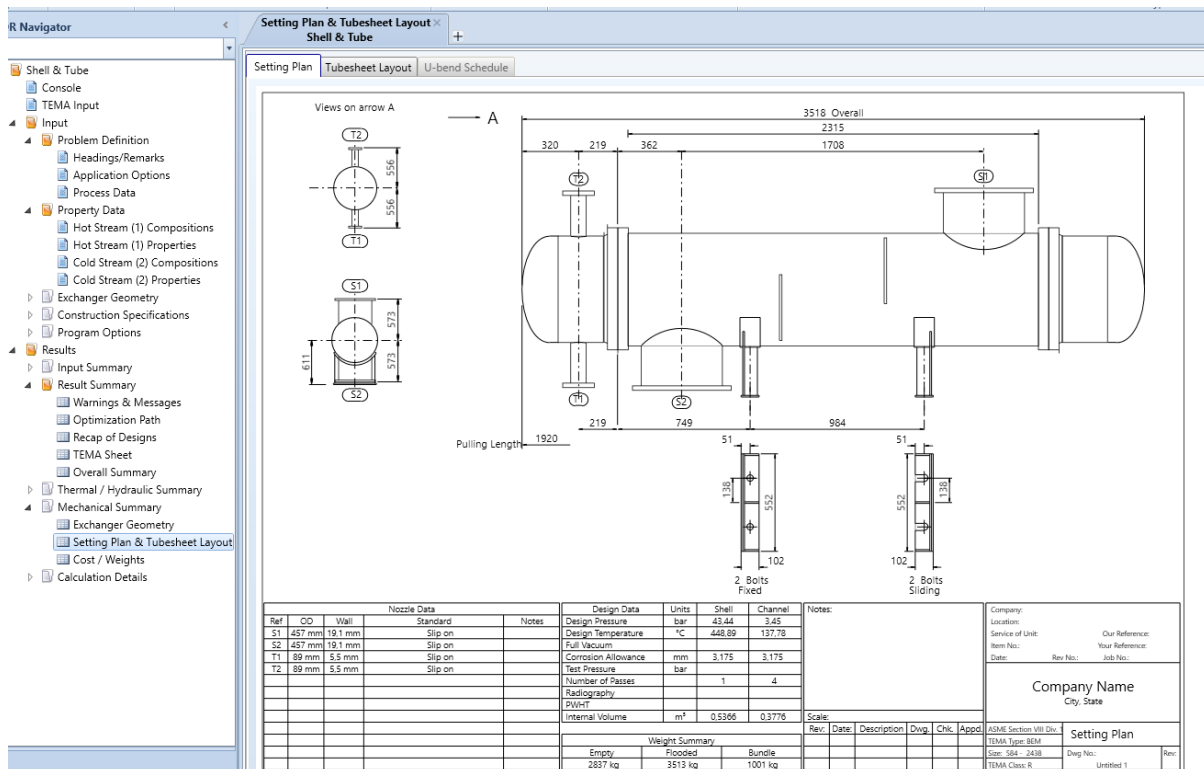


Figura 11.81: Plànols generats pel software.

Finalment, el programa també dona càlculs dels costos dels equips de manera aproximada:

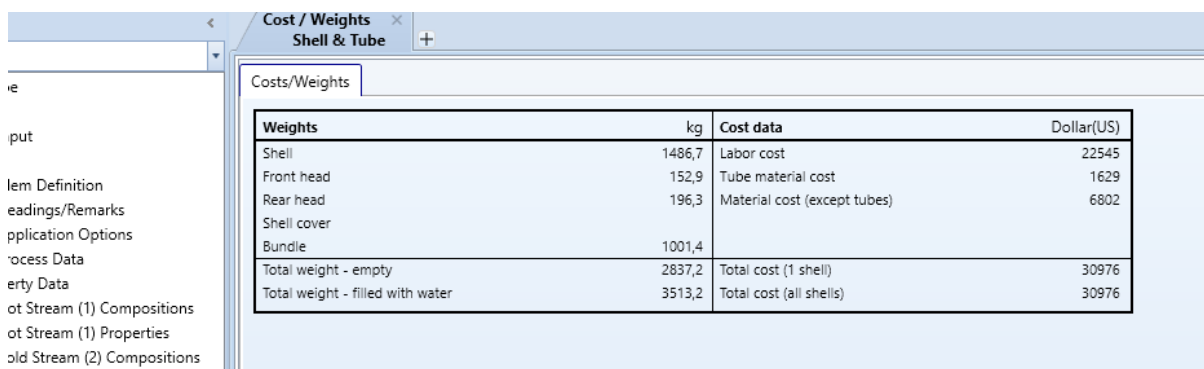


Figura 11.82: Costos determinats pel software.

11.7 Tancs d'emmagatzematge, condensats i pulmó

11.7.1 Disseny tancs d'emmagatzematge

Els tancs d'emmagatzematge de benzè i etilbenzè, així com dels serveis auxiliars que contenen aigua, aigua glicolada i oli tèrmic s'han dissenyat seguint la normativa per a tancs a pressió atmosfèrica descrita en el codi API 650 (American Petroleum Institute) [8].

Les condicions en les quals s'emmagatzemaran els fluids són de pressió atmosfèrica i a 25 °C. Aquests tancs, de forma cilíndrica amb un sostre de tipus cònic autosuportat, es disposaran de forma vertical sense agitació, ben ventilats i allunyats de qualsevol punt d'ignició.

11.7.1.1 Volum emmagatzemat

Per a calcular el volum necessari que es vol emmagatzemar de cada fluid, es calcula en funció del cabal que demana el procés i la densitat de la substància. L'equació és la següent:

$$V = \frac{Q \cdot D}{\rho}$$

On:

- V és el volum total a emmagatzemar [m³]
- Q és el cabal màssic de benzè demandat pel procés [kg·d]
- D son els dies que es volen abastir [d]
- ρ és la densitat del corrent de benzè [kg·m³]

El volum total a emmagatzemar de cada fluid és molt elevat i inviable emmagatzemar-ho tot en un mateix tanc. Per això, es divideix aquest volum entre un nombre determinat de tancs, per calcular el volum de líquid que hi haurà a cada tanc. S'aplica un sobre dimensionament del 20% al volum per qüestions de seguretat. El volum unitari de cada tanc és per tant:

$$V_t = \frac{V}{n} \cdot 1,2$$

On:

- V és el volum total a emmagatzemar [m³]
- V_t és el volum del tanc sobredimensionat

- n és el número de tancs

11.7.1.2 Diàmetre intern i altura del cos

Conegut el volum unitari de cada tanc i tenint en compte la seva forma cilíndrica, i fixant la proporció alçada/diàmetre en 1,3. Es pot calcular el diàmetre intern dels tancs a partir de la següent equació:

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

On:

- D_t és el diàmetre intern del tanc [m]
- V_t és el volum del tanc [m³]

A partir del diàmetre intern i de la relació alçada/diàmetre establerta prèviament es calcula l'alçada a partir de la següent equació:

$$H_t = D_t \cdot 1,3$$

On:

- H_t és l'alçada del cos del tanc [m]
- D_t és el diàmetre intern del tanc [m]

11.7.1.3 Disseny del fons

Per al disseny del fons del tanc s'ha de tenir certes consideracions en compte, la resistència del sòl ha de ser de com a mínim de 1,465 kg/cm² i el tanc es estarà situat a sobre d'una base de ciment de 30 cm d'alt.

El gruix mínim del fons serà de 6,35 mm sense tenir en compte la corrosió permissíble especificada. Per a l'acer inoxidable 316 L la tolerància mínima de corrosió típica a la indústria que s'aplica al acer inoxidable és de 0,8 mm [9], per tant el gruix mínim del fons del tanc serà 7,15 mm.

11.7.1.4 Disseny del cos

El gruix de la paret del cos requerit per resistir la càrrega hidroestàtica ha de ser major al gruix calculat per les condicions de disseny, però no pot ser menor el mínim establert en funció del diàmetre nominal del tanc. Tots els tancs d'emmagatzemament a dissenyar tenen un diàmetre nominal menor de 15 m, el gruix mínim sense tenir en compte la tolerància de corrosió ha de ser de 5 mm.

Nominal Tank Diameter		Nominal Plate Thickness	
(m)	(ft)	(mm)	(in.)
< 15	< 50	5	3/16
15 to < 36	50 to < 120	6	1/4
36 to 60	120 to 200	8	5/16
> 60	> 200	10	3/8

Figura 11.833: Espessor mínima segons diàmetre nominal del tanc

Per al càlcul del gruix requerit de la paret del tanc s'ha utilitzat el "1-Foot Method", aplicable a tancs amb un diàmetre igual o menor a 61 m. El gruix mínim de la paret del tanc ha de ser superior a l'espessor de disseny de la carcassa i al espessor de la carcassa de la prova hidroestàtica. Les dues equacions utilitzades són les següents:

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

$$t_t = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H - 0,3)}{S_t}$$

On:

- t_d és el gruix de disseny de la carcassa [mm]
- t_t és el gruix de la carcassa de la prova hidroestàtica [mm]
- D és el diàmetre nominal del tanc [m]
- H és el nivell del líquid de disseny [m]
- G és la gravetat específica del disseny del líquid
- CA és la tolerància de la corrosió [mm]
- S_d és la tensió admissible de disseny [MPa], que és 155 MPa
- S_t és la tensió admissible per la prova hidroestàtica [MPa], que és 117 MPa

11.7.1.5 Disseny del sostre

Per al càlcul de l'espessor del sostre de tipus cònic i autosuportat, el gruix del sostre no podrà ser superior a 12,7 mm ni inferior a 4,76 mm, a més a més, l'angle del sostre no pot sobrepassar els 37° d'inclinació ni estar per sota dels 9,5° respecte a l'horitzontal. Tots els tancs d'emmagatzematge tenen un angle de 15° respecte a l'horitzontal. L'equació per a calcular el gruix és la següent:

$$T_t = \frac{D}{4800 \text{ Sen}\theta}$$

On:

- T_t és l'espessor mínim requerit [cm]
- D és el diàmetre intern del tanc [cm]
- θ és l'angle respecte la horitzontal [graus]

11.7.1.6 Pes de tanc

Per conèixer el pes del tanc s'ha de calcular el pes del cos del cilindre i el del fons i el capçal cònic. L'equació per calcular el pes del cilindre és:

$$M_{cos} = \pi \cdot H_t \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \cdot \rho$$

On:

- M_{cos} és la massa del cos del tanc [kg]
- H_t és l'alçada del cos del cilindre [m]
- D_{ext} és el diàmetre extern del tanc [m]
- D_{int} és el diàmetre intern del tanc [m]
- ρ és la densitat del material del tanc [$\frac{kg}{m^3}$]

La massa del sostre cònic es calcula a partir del volum del con, l'equació és la següent:

$$M_{sostre} = \frac{1}{3} \cdot (h_{ext} - h_{int}) \pi (r_{ext}^2 - r_{int}^2) \cdot \rho$$

On:

- M_{sostre} és la massa del sostre del tanc [kg]
- h_{ext} és l'alçada exterior del sostre cònic [kg]
- h_{int} és l'alçada interior del sostre cònic [kg]
- r_{ext} és el radi exterior de la base del sostre cònic [kg]
- r_{int} és el radi interior de la base del sostre cònic [kg]
- ρ és la densitat del material del tanc [$\frac{kg}{m^3}$]

La massa del fons del tanc és calcula a partir de la següent equació:

$$M_{fons} = \pi \cdot h_f \cdot r_{ext}^2 \cdot \rho$$

On:

- M_{fons} és la massa del fons del tanc [kg]
- h_f és el gruix del fons del tanc [m]
- r_{ext} és el radi exterior de la base del tanc [kg]
- ρ és la densitat del material del tanc [$\frac{kg}{m^3}$]

La massa total del tanc és:

$$M_{equip} = M_{cos} + M_{sostre} + M_{fons}$$

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

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

11.7.1.7 Cubetes de retenció

Les cubetes de retenció són un sistema de contenció de possibles fuites i vessaments, és important complir tots els requisits de construcció per a protegir als

treballadors de la planta, la població de la zona i el medi ambient, ja que, en l'interior dels tancs situats en les cubetes de retenció s'emmagatzemen productes químics perillosos.

Per al seu disseny, concretament les distàncies de seguretat entre els tanc i la cubeta, s'ha de seguir el Reial Decret 656/2017 [10], de 23 de juny, en el que s'aprova el Reglament d'emmagatzematge de productes químics i les seves instruccions tècniques complementàries MIE APQ 0 a 10. Els recipients no poden estar disposats en més dues files, entre la paret del recipient i la vora interior de la cubeta hi ha d'haver mínim 1 metre, i la capacitat útil de la cubeta ha de ser més gran que la capacitat del recipient més gran o el 10% de la capacitat global dels recipients situats en el seu interior. A més a més, hi ha 2 accessos amb escales per entrar i sortir del seu interior. Per qüestions de seguretat, cada cubeta només conté un tipus de substància química i disposen d'un sistema contra incendis especialitzat.

La llargada de la cubeta és calcula a partir de la següent equació:

$$L = D_1 \cdot \frac{N \text{ tanc}}{2} + D_2 \cdot \left(\frac{N \text{ tanc}}{2} - 1 \right) + D_3 \cdot 2$$

On:

- D_1 és el diàmetre exterior del tanc
- D_2 és la distància de seguretat entre els tancs, $D_2 = 0,5 \cdot D_1$
- D_3 és la distància entre el tanc i el mur de la cubeta, que és 2 m
- $N \text{ tanc}$ és el nombre de tancs

Per calcular l'amplada s'utilitza la següent equació:

$$A = D_1 \cdot \left(\frac{N \text{ tanc}}{2} - 1 \right) + D_2 + D_3 \cdot 2$$

L'altura del mur de la cubeta és d'1,2 metre. Aquest valor s'ha escollit segons el rang establert al Real Decret 656/2017, de 23 de juny, del Reglament d'Emmagatzematge de Productes Químics i les seves instruccions tècniques complementàries MIE APQ 0 a 10, que fixa l'altura màxima de les parets en 1,8 m respecte al nivell interior.

El volum de la cubeta es calcula utilitzant la següent equació:

$$V_{\text{cubeta}} = A \cdot L \cdot H$$

On:

- A és l'amplada de la cubeta
- L és la longitud de la cubeta
- H és l'alçada de la cubeta

Per a calcular el volum ocupat de la cubeta s'ha de tenir en compte els criteris de l'Article 20 de les APQ 1 i 6. Els tancs descansen sobre fonamentacions de 30 cm d'alt per sobre del terra de la cubeta. L'equació és la següent:

$$V_{ocupat} = (D_1 \cdot D_1 \cdot h + \pi \cdot r^2 \cdot (H - h)) \cdot (N_{tanc} - 1)$$

On:

- D_1 és el diàmetre exterior del tanc
- r és el radi exterior del tanc
- h és l'alçada de la fonamentació on reposa el tanc
- H és l'alçada de la cubeta
- N_{tanc} és el nombre de tancs

Com ja s'ha comentat hi ha un capacitat mínima útil que ha de tenir la cubeta, el volum útil obtingut no pot ser menor que les condicions de volum establertes pel l'APQ 1 i 6. En cas contrari, s'haurà d'ampliar la distància entre el tanc i la paret del tanc o l'altura del mur. Per calcular el volum útil s'utilitza la següent equació:

$$V_{útil} = V_{cubeta} - V_{ocupat}$$

11.7.1.8 Taula resum

Taula 11.18: Especificacions dels tancs d'emmagatzematge.

	Benzè	Etilbenzè	Oli tèrmic 1	Oli tèrmic 2	Aigua glicolada 1	Aigua glicolada 2	Àcid carbònic	Aigua
Numero de tancs	8	6	1	1	1	1	1	3
Volum cos del tanc [m ³]	516,63	948	204	36	37,28	124,93	7948,11	942,72
Volum de líquid [m ³]	430,52	790	170	30	31,07	104,11	6623,42	785,6
Diàmetre intern [m]	7,97	9,75	5,85	3,28	3,32	4,96	19,82	9,74
Alçada cos del tanc [m]	10,36	12,68	7,6	4,26	4,31	6,45	25,76	12,66
Gruix del tanc [mm]	5	5	5	5	5	5	5	5
Diàmetre extern [m]	7,98	9,77	5,85	3,29	3,33	4,97	9,75	9,75
Alçada sostre [m]	1,07	1,31	0,73	0,44	0,41	0,66	3,42	1,68
Gruix del sostre [mm]	7,22	8,66	5,84	4,76	4,76	4,80	13,50	7,05
Volum del sostre [m ³]	17,81	32,66	6,55	1,24	1,20	4,31	352,66	42,00
Volum total [m ³]	543,44	980,67	210,55	37,28	38,48	129,25	8300,77	984,73
Alçada total [m]	11,43	14	8,33	4,70	4,73	7,12	29,182	14,34
Pes total (buit) [Kg]	46.066	69.036	8.822	7.809	7.988	17.888	904.252,38	202.571
Pes d'operació [Kg]	421.566	753.178	186.132	39.098	40.611	127.204	7.527.676,39	988.174
Volum total cubeta [m ³]	760	971	200	121			593	

11.7.2 Disseny tancs de condensats

Les dues columnes de destil·lació necessiten un tanc de condensat cadascuna per recollir i recuperar el condensat de vapor en forma d'aigua. Per al disseny d'aquests tancs s'ha seguit el codi ASME Section VIII (American Society of Mechanical Engineers) [11] que descriu els requisits per al disseny per als recipients que treballen a temperatures per sobre de la pressió atmosfèrica.

Per a aquests tancs s'ha escollit el capçal i el fons en forma toriesfèric, ja que presenten diversos avantatges: millor resistència estructural, una distribució uniforme de tensions, menor gruix requerit per la tapa i el fons i menor risc de fallades per fatiga.

11.7.2.1 Volum de l'equip

Per conèixer el volum necessari dels tancs de condensats, s'ha tingut en compte el cabal de condensats que genera cadascuna de les columnes per hora i s'ha calculat per a un 10% del cabal. Per qüestions de seguretat se li aplica un sobre dimensionament del 20% al volum. L'equació per a calcular el volum és:

$$V_{t,c} = Q \cdot 0,1 \cdot 1,2$$

On:

- $V_{t,c}$ és el volum del tanc de condensats [m^3]
- Q és el cabal per hora de condensat que genera la columna [m^3/h]

11.7.2.2 Diàmetre intern i altura del cos

Per a fer els càlculs del diàmetre intern i altura del cos del cilindre s'ha utilitzat les mateixes equacions descrites en l'apartat "11.7.1.2 Diàmetre intern i altura del cos". La relació diàmetre alçada és també la mateixa, 1,3.

11.7.2.3 Pressió de disseny

La pressió de disseny es sobredimensiona en un 20% per tal que el tanc tingui una resistència amplia més enllà de la estrictament necessària. Aquesta pressió de disseny es calcula tenint en compte la pressió d'operació i la pressió hidrostàtica, que variarà en funció de l'alçada dels tancs. L'equació és la següent:

$$P_d = 1,2 \cdot (P_{op} + P_h)$$

L'equació per calcular la pressió hidroestàtica és la següent:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h$$

On:

- P_d és la pressió de disseny [atm]
- P_{op} és la pressió d'operació [atm]
- P_h és la pressió hidrostàtica [atm]
- ρ és la densitat del fluid [$\frac{kg}{m^3}$]
- g és la gravetat [$\frac{m}{s^2}$]
- h és l'alçada del líquid [m]

11.7.2.4 Temperatura de disseny

La temperatura de disseny es calcula a partir de la temperatura d'operació. Per a la primera columna de destil·lació són 25°C i per a la segona 239,6 °C. A aquesta temperatura d'operació se li suma un marge de seguretat de 20 graus.

Obtenint així una temperatura de disseny per a la primera columna de 45 °C i de 259,6 °C per a la segona columna.

$$T_d = T_{op} + 20^\circ\text{C}$$

11.7.2.5 Espessor del tanc

L'equació utilitzada, calcula l'espessor mitjançant l'esforç tangencial del fluid sobre la paret del tanc. A l'hora de calcular el gruix del cos del tanc, s'ha de tenir en compte la corrosió del material al llarg de la seva vida útil. La tolerància mínima de corrosió típica a la indústria que s'aplica a l'acer inoxidable és de 0,8 mm. [9]

$$t_c = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} + C1$$

On:

- t_c és l'espessor del tanc [mm]
- P és la pressió interna de disseny [MPa]
- R és el radi intern [mm]
- S és la tensió màxima admissible [MPa]
- E és el factor de soldadura que és 0,75.
- C1 és la sobre espessor per corrosió [mm]

La tensió màxima admissible per a la xapa d'acer inoxidable 316L s'ha consultat a l'ASME II Part D. El valor s'ha escollit no només en funció del material però també en funció de la temperatura de treball. A les figures 11.83 i 11.84 es mostren les taules a partir de les quals s'ha agafat els valors. El valor és 115 MPa, ja que s'escull la línia 6 de la figura 11.83, que correspon a la xapa d'acer inoxidable 316L i el valor ve donat en la mateixa línia 6, però de la figura 11.84 segons la temperatura de disseny amb la que estarà el material en contacte.

Table 1A (Cont'd)
Section I; Section III, Classes 2 and 3; Section VIII, Division 1; and Section XII
Maximum Allowable Stress Values, S, for Ferrous Materials
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy Desig./ UNS No.	Class/ Condition/ Temper	Size/ Thickness, mm	P-No.	Group No.
1	16Cr-12Ni-2Mo	Bar	SA/JIS G4303	SUS316L	---	---	---	8	1
2	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316L	S31603	---	≤130	8	1
3	16Cr-12Ni-2Mo	Forgings	SA-182	F316L	S31603	---	≤130	8	1
4	16Cr-12Ni-2Mo	Smls. tube	SA-213	TP316L	S31603	---	---	8	1
5	16Cr-12Ni-2Mo	Smls. tube	SA-213	TP316L	S31603	---	---	8	1
6	16Cr-12Ni-2Mo	Plate	SA-240	316L	S31603	---	---	8	1
7	16Cr-12Ni-2Mo	Plate	SA-240	316L	S31603	---	---	8	1
8	16Cr-12Ni-2Mo	Wld. tube	SA-249	TP316L	S31603	---	---	8	1
9	16Cr-12Ni-2Mo	Wld. tube	SA-249	TP316L	S31603	---	---	8	1
10	16Cr-12Ni-2Mo	Wld. tube	SA-249	TP316L	S31603	---	---	8	1
11	16Cr-12Ni-2Mo	Smls. & wld. pipe	SA-312	TP316L	S31603	---	---	8	1
12	16Cr-12Ni-2Mo	Smls. pipe	SA-312	TP316L	S31603	---	---	8	1
13	16Cr-12Ni-2Mo	Wld. pipe	SA-312	TP316L	S31603	---	---	8	1
14	16Cr-12Ni-2Mo	Wld. pipe	SA-312	TP316L	S31603	---	---	8	1
15	16Cr-12Ni-2Mo	Wld. pipe	SA-358	316L	S31603	1	---	8	1
16	16Cr-12Ni-2Mo	Smls. & wld. fittings	SA-403	316L	S31603	---	---	8	1
17	16Cr-12Ni-2Mo	Wld. pipe	SA-409	TP316L	S31603	---	---	8	1
18	16Cr-12Ni-2Mo	Bar	SA-479	316L	S31603	---	---	8	1
19	16Cr-12Ni-2Mo	Bar	SA-479	316L	S31603	---	---	8	1

Figura 11.843: Tensió màxima admissible segons material i forma.

Table 1A (Cont'd)
Section I; Section III, Classes 2 and 3;* Section VIII, Division 1; and Section XII
Maximum Allowable Stress Values, S, for Ferrous Materials
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Maximum Allowable Stress, MPa (Multiply by 1000 to Obtain kPa), for Metal Temperature, °C, Not Exceeding														
	40	65	100	125	150	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475
1	115	115	115	115	115	109	103	98.0	95.7	94.1	92.8	90.9	89.0	87.8	86.6
2	115	115	115	115	115	109	103	98.0	95.7	94.1	92.8	90.9	89.0	87.8	86.6
3	115	106	96.3	91.3	87.4	81.2	76.0	72.5	71.2	70.0	68.8	67.5	66.3	65.0	63.8
4	115	115	115	115	115	109	103	98.0	95.7	94.1	92.8	90.9	89.0	87.8	86.6
5	115	106	96.3	91.3	87.4	81.2	76.0	72.5	71.2	70.0	68.8	67.5	66.3	65.0	63.8
6	115	115	115	115	115	109	103	98.0	95.7	94.1	92.8	90.9	89.0	87.8	86.6
7	115	106	96.3	91.3	87.4	81.2	76.0	72.5	71.2	70.0	68.8	67.5	66.3	65.0	63.8
8	115	115	115	115	115	109	103	98.0	95.7	94.1	92.8	90.9	89.0	87.8	...
9	97.9	97.9	97.9	97.9	97.9	93.0	87.2	82.9	81.6	80.2	78.4	77.2	75.9	74.7	73.4
10	97.9	90.3	82.1	77.8	74.3	68.7	64.8	61.4	60.4	59.7	58.4	57.2	55.9	55.2	54.7
11	115	115	115	115	115	109	103	98.0	95.7	94.1	92.8	90.9	89.0	87.8	86.6
12	115	106	96.3	91.3	87.4	81.2	76.0	72.5	71.2	70.0	68.8	67.5	66.3	65.0	63.8
13	97.9	97.9	97.9	97.9	97.9	93.0	87.2	82.9	81.6	80.2	78.4	77.2	75.9	74.7	73.4
14	97.9	90.3	82.1	77.8	74.3	68.7	64.8	61.4	60.4	59.7	58.4	57.2	55.9	55.2	54.7
15	115	115	115	115	115	109	103	98.0	95.7	94.1	92.8	90.9	89.0	87.8	...
16	115	115	115	115	115	109	103	98.0	95.7	94.1	92.8	90.9	89.0	87.8	86.6
17	115	115	115	115	115	109	103	98.0	95.7	94.1	92.8	90.9	89.0	87.8	...
18	115	115	115	115	115	109	103	98.0	95.7	94.1	92.8	90.9	89.0	87.8	86.6
19	115	106	96.3	91.3	87.4	81.2	76.0	72.5	71.2	70.0	68.8	67.5	66.3	65.0	63.8

Figura 11.854: Valor d'estrès màxim admissible segons temperatura

L'equació per calcular el gruix del capçal toriesfèric és:

$$t_t = \frac{P \cdot L \cdot M}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} + C1$$

On:

- t_t és l'espessor del tanc [mm]
- P és la pressió interna de disseny [MPa]
- L és el radi de corona, que equival al diàmetre exterior del cos del tanc [mm]
- M és factor característic
- S és la tensió màxima admissible [MPa]
- E és el factor de soldadura que és 0,75.
- C1 és el sobre espessor per corrosió [mm]

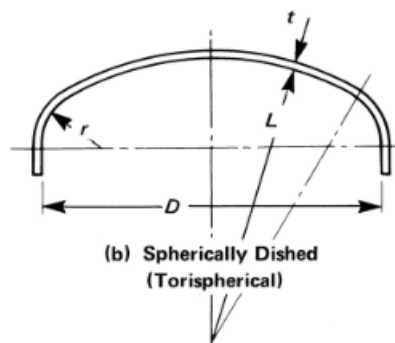


Figura 11.865: Capçal toriesfèric

Per trobar el factor característic M , es calcula la relació entre la relació L/r , on r és $0,10D$. A partir de la taula 1-4.2 de l'ASME es troba el valor més pròxim.

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

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

Figura 11.876: Valor del factor M

Obtinguts els valors de l'espessor dels capçal i fons i el diàmetre extern, s'utilitza una calculadora per dimensionar el fons toriesfèric de tipus Klopper segons el DIN-2011 per calcular el seu volum i el seu pes. [12]

Calculadora de fondos KLOPPER

Diàmetre exterior (mm)

Espesor (mm)

Resultados

Diàmetre disco (mm)	f (mm)
3153	497
R (mm)	H (mm)
2645	644
r (mm)	V (sin h) (litros)
264.5	1717
h (mm) >=	Peso (h mínima) (kg)
114.10000000000001	2036

Figura 11.887: Exemple càlcul fons toriesfèric

11.7.2.6 Pes de tanc

Per conèixer el pes del tanc s'ha de calcular el pes del cos del cilindre i el de les tapes del capçal i el fons. L'equació per calcular el pes del cos del cilindre és la mateixa que s'ha utilitzat en l'apartat "11.7.1.6 Pes del tanc".

Per calcular la massa del capçal toriesfèric es calcula a partir de la següent equació:

$$M_{capçal} = (0,0809 \cdot D_{ext}^3 - 0,0809 \cdot D_{int}^3) \cdot \rho$$

La massa total del tanc és:

$$M_{equip} = M_{cos} + 2 \cdot M_{capçal}$$

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

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

11.7.1.7 Taula resum

Taula 11.19: Especificacions dels tancs de condensat

	Columna 1	Columna 2
Volum del cilindre [m³]	61,93	18,03
Volum de líquid [m³]	51,61	15,03
Diàmetre intern [m]	3,93	2,60
Alçada cos del tanc [m]	5,11	3,39
Pressió de disseny [atm]	11,04	10,79
Temperatura de disseny [°C]	45	259,6
Gruix del tanc [mm]	26,4	20,3
Diàmetre extern [m]	3,98	2,65
Gruix del capçal [mm]	40,5	32,6
Alçada del capçal [m]	0,93	0,64
Volum del capçal [m³]	4,80	1,39
Volum total [m³]	71,53	20,81
Alçada total [m]	6,97	4,67
Pes total (buit) [Kg]	58.488	19.837
Pes d'operació [Kg]	102.130	29.455

11.8 Absorbidor

11.8.1 Introducció

Com s'ha definit anteriorment, l'absorció és el procés físic mitjançant el qual un solut en estat gas canvia de fase, a una fase aquosa, gràcies a un dissolvent líquid. El cas concret que vol tractar Ebsyn S.L. en el projecte TARREB23 és un contaminant gasós en l'aire, una quantitat considerable de CO₂. Per eliminar aquest solut, que es troba diluït en aire, Ebsyn S.L. disposa de l'aigua utilitzada per refrigerar els corrents de sortida del reactor, per tant, el dissolvent líquid per absorbir el contaminant serà aigua. Segons diferents fonts i la experiència en la indústria, com per exemple la empresa "The CocaCola Company", utilitzen el CO₂ per produir àcid carbònic, mitjançant l'absorció d'aquest en aigua. A Ebsyn S.L.. es farà el mateix per reduir les emissions de CO₂.

L'absorbidor doncs es dissenya en base a dos conceptes, en matèria d'equacions, el balanç de matèria a cada etapa i l'equilibri a cada etapa. Es parteix del concepte el qual diu que dos corrents que surten de la mateixa etapa es troben en equilibri, per

tant és aplicable a la columna d'absorció. Sabent que l'equilibri que regeix aquest fenomen és la solubilitat del solut en el dissolvent es pot expressar com:

$$X = H \cdot Y$$

On:

- X és la raó molar del solut en el dissolvent líquid, en el nostre cas l'aigua en unitats de $\left[\frac{\text{Kmol CO}_2}{\text{Kmol aigua}}\right]$.
- Y és la raó molar del solut en el gas portador, en el nostre cas l'aire en unitats de $\left[\frac{\text{Kmol CO}_2}{\text{Kmol aire}}\right]$.
- H és la constant de Henry obtinguda a partir d'una relació bàsica. $H = H_0 \cdot P$
 - o El valor de P és la pressió total del sistema en bar, i H_0 s'obté a partir de la següent expressió obtinguda a partir de NIST [13]:

$$H_0(T) = k_H^0 \cdot \exp\left(\frac{d(\ln(k_H))}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \cdot \left(\left(\frac{1}{T}\right) - \left(\frac{1}{298,15}\right)\right)\right)$$

- $k_H^0 = 0,034 \frac{\text{mol}}{\text{g} \cdot \text{bar}}$
- $\frac{d(\ln(k_H))}{d\left(\frac{1}{T}\right)} = 2400 \text{ (K)}$
- o Amb aquesta correlació del NIST [13] es pot obtenir els valor d'ela constant d'equilibri del sistema en funció de la temperatura i la pressió d'operació del sistema, l'inconvenient és que aquest paràmetre no és en els paràmetres de treball, per tant s'ha de passar. A continuació es procedeix a realitzar el càlcul per a la determinació del paràmetre d'equilibri a 70°C i a 9 bar:

$$H_0(T) = 0,034 \cdot \exp\left(2400 \cdot \left(\left(\frac{1}{343}\right) - \left(\frac{1}{298,15}\right)\right)\right) = 0,01187 \frac{\text{mol}}{\text{g} \cdot \text{bar}}$$

$$H = 0,01187 \frac{\text{mol}}{\text{g} \cdot \text{bar}} \cdot \frac{18 \text{ g H}_2\text{O}}{1 \text{ mol H}_2\text{O}} \cdot 9 \text{ bar} = 1,92 \frac{\text{Kmol}}{\text{Kmol}}$$

Un cop definit l'equilibri es pot passar a fer un balanç de matèria en una etapa N del absorbidor:

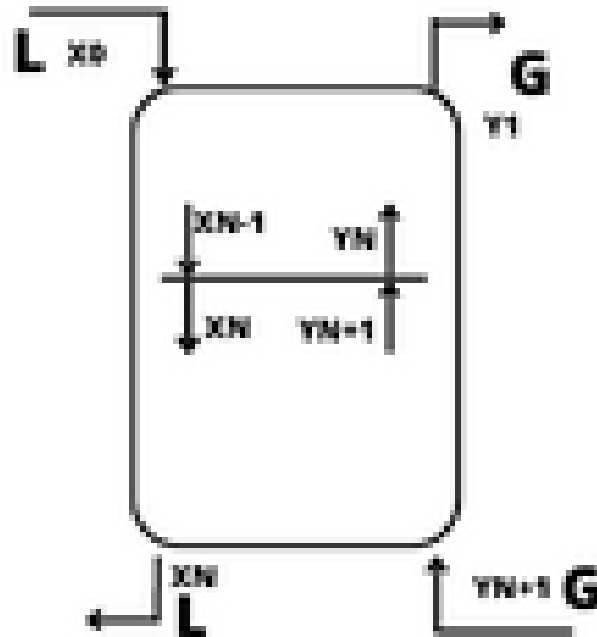


Figura 11.87: Esquema d'una columna d'absorció.

$$X_{N-1} \cdot L + Y_{N+1} \cdot G = X_N \cdot L + Y_N \cdot G$$

$$X_N = H \cdot Y_N$$

Aquestes dues equacions seran les que es modelitzin en el MATLAB que resoldrà la columna.

Pel que fa a la determinació del diàmetre de la columna es realitza el mètode proposat a la bibliografia [5] que utilitza el gràfic d'Eckert. En aquest punt s'ha de decidir seleccionar el tipus d'empacament de la columna, el qual és un empacament amb anells Rasching de ceràmica el que comporta uns paràmetres d'empacament associats a aquest tipus:

TABLE 10-3. Parameters for dumped packings (F is 1/f)

Packing Type		Nominal			
		1/4	3/8	1/2	3/8
Raschig rings (metal, 1/32" wall)	F	700	390	300	170
	α				1.20
	β				0.28
Raschig rings (metal, 1/16" wall)	F	—	—	410	290
	α				
	β				
Raschig rings (ceramic)	F	1600	1000	580	380
	α		4.70	3.10	2.35
	β		0.41	0.41	0.26
Pall rings (plastic)	F	—	—	—	97
Pall rings (metal)	F	—	—	—	70
	α				0.43
	β				0.17
Berl saddles (ceramic)	F	900	—	240	—
	α			1.2	
	β			0.21	
Intalox saddles (ceramic)	F	725	330	200	—
	α			1.04	
	β			0.37	
Intalox saddles (plastic)	F	—	—	—	—
Intalox saddles (metal)	F	—	—	—	—
Flexirings (plastic)	F	—	—	—	78
Ballast ring (plastic)	F	—	—	—	—
Cascade miniring (plastic)	F	—	—	—	—
Hy-Pak (plastic)	F	—	—	—	—

(continues)

Figura 11.8988: Paràmetres d'empacament [5].

El mètode es basa en calcular el flux màssic per unitat d'àrea segons el gràfic d'Eckert:

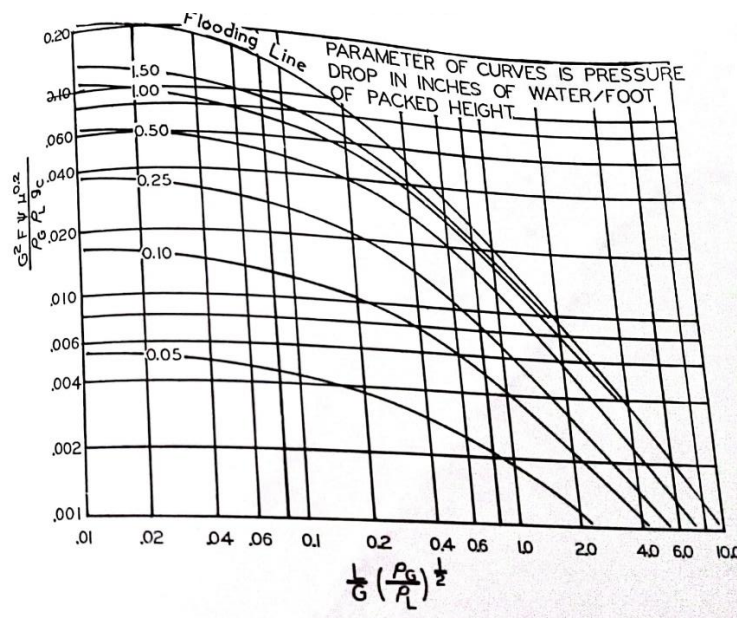


Figura 11.8909: Gràfic d'Eckert [5].

L'abscissa d'aquest gràfic es determina com:

$$\frac{L'}{V'} \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{1/2}$$

On:

- L' és el flux de líquid que circula per la columna en unitat de $\frac{lb}{s \cdot ft^2}$.
- V' és el flux de gas que circula per la columna en unitat de $\frac{lb}{s \cdot ft^2}$.
- ρ_G és la densitat del gas en unitats de $\frac{lb}{ft^3}$.
- ρ_L és la densitat del líquid en unitats de $\frac{lb}{ft^3}$.

La ordenada d'aquest gràfic es determina com:

$$\frac{V'^2 \cdot F \cdot \psi \cdot \mu^{0,2}}{\rho_G \cdot \rho_L \cdot g_c}$$

On:

- F és el factor d'empacament intrínsec al tipus d'empacament seleccionat, i és adimensional. Més endavant en la taula 11.20 es troben aquests paràmetres del empacament seleccionat.
- ψ és la relació de la densitat del líquid respecte la de l'aigua. Com que el líquid seleccionat per a l'absorció és aigua, aquest paràmetre pren un valor de 1.
- μ la viscositat dinàmica en unitats de cP .
- g_c una constant que pren valor de 32,2.

Realment fixarem en la corba de 0,5 i es llegirà l'ordenada corresponent a l'abscissa calculada, ja que la relació de fluxos és igual a la relació de cabals màssics. Un cop llegida l'abscissa es podrà determinar el flux màssic de gas que passa per la columna i conseqüentment l'àrea i diàmetre.

11.8.2 Determinació del nombre d'etapes d'equilibri de l'absorbidor

Abans de poder determinar el diàmetre de la columna d'absorció i la seva altura, s'han de determinar el número d'etapes d'equilibri necessàries per dur a terme el canvi de concentració fixat anteriorment. Aquest número depèn directament de la solubilitat del CO₂ en l'aigua, i a l'hora de la pressió i la temperatura, per tant s'han escollit les condicions de 70°C de treball i 9 bar de pressió.

S'ha dissenyat un codi de MATLAB específic per aquest equip que determini tant la relació líquid/gas portador d'operació, com les etapes necessàries per dur a terme la separació.

Poder observar en la figura 11.90 com la recta verda arriba 10 cops a la vermella que és la recta de l'equilibri des de la recta lila, la recta operativa. Per tant faran falta 10 etapes d'equilibri per dur a terme la separació desitjada.

Finalment es calcula la quantitat d'aigua necessària per dur a terme la separació:

$$L = \frac{L}{G} \cdot G = 0,8725 \cdot 13611 = 11875 \frac{\text{Kmol aigua}}{h}$$

11.8.3 Càlcul dels paràmetres de disseny de la columna d'absorció

Per dimensionar la columna d'absorció s'ha utilitzat mitjançant el flux màssic d'aire que passa per la columna. Aquest mètode utilitza el gràfic d'Eckert:

Fixem els paràmetres que s'han utilitzat per aquest mètode:

Taula 11.20.: Paràmetres escollits pel disseny de la columna d'absorció.

F	1000
Alpha	3,10
Betha	0,41
HETP (ft)	2
Gc	32,2
Pg (lb/ft3)	77,85
PI (lb/ft3)	77845,13
Phi	1
Mu (cP)	0.0139

Primer es calcula el cabal de vapor en les unitats corresponents, les màssiques. Sabent que la columna recorre un cabal total de $V = 15038 \frac{\text{Kmol}}{h}$. També s'ha de calcular el pes molecular del gas fent una mitjana ponderada entre el CO₂ i l'aire que hi ha en el gas:

$$PM_G = 0,0949 \cdot 44 + 29 \cdot (1 - 0,0949) = 30,4 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}$$

Ja es pot passar el cabal de gas total molar a màssic en unitats del sistema imperial, ja que el gràfic d'Eckert utilitza aquestes unitats:

$$V = 15038 \frac{\text{Kmol}}{h} \cdot \frac{30,42 \text{ Kg}}{\text{Kmol}} \cdot \frac{2,20462 \text{ lb}}{1 \text{ Kg}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 280,14 \frac{\text{lb}}{\text{s}}$$

Es calcula també el líquid que passa en unitats màssiques:

$$L = 11875 \frac{\text{Kmol}}{h} \cdot \frac{18 \text{ Kg}}{1 \text{ Kmol}} \cdot \frac{2,20462 \text{ lb}}{1 \text{ Kg}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 130,90 \frac{\text{lb}}{\text{s}}$$

Es determina doncs la relació líquid-gas en massa:

$$\frac{L}{V} = \frac{130,90}{280,14} = 0,467$$

Seguidament es calcula la abscissa de la gràfica d'Eckert:

$$\frac{L}{V} \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0,5} = 0,467 \cdot \left(\frac{77,85}{77845,13}\right)^{0,5} = 0,01477$$

Es llegeix la ordenada del gràfic fixant una pèrdua de pressió de 0,5, doncs es llegeix la respectiva corba. Aproximadament s'arriba a llegir un valor de:

$$\frac{V'^2 \cdot F \cdot \Phi \cdot \mu^{0,2}}{\rho_g \cdot \rho_L \cdot g_c} = 0,062$$

$$V' = \sqrt{\frac{0,062 \cdot \rho_G \cdot \rho_L \cdot g_c}{F \cdot \Phi \cdot \mu^{0,2}}} = \sqrt{\frac{0,062 \cdot 77,85 \cdot 77845,13 \cdot 32,2}{1000 \cdot 1 \cdot (0,0139)^{0,2}}} = 168,68 \frac{lb}{s \cdot ft^2}$$

Per tant l'àrea de la secció circular es pot determinar com:

$$A_c = \frac{V}{V'} = \frac{280,14}{168,68} = 1,66 ft^2 \cdot \frac{0,0929 m^2}{ft^2} = 0,1544 m^2$$

$$r = \sqrt{\frac{0,1544}{\pi}} = 0,22 m$$

El diàmetre de la columna és doncs: $\phi = 0,44 m$.

Pel que fa l'altura de la columna es determina com:

$$H = HETP \cdot N = 2 \cdot 10 = 20 ft \cdot \frac{0,3048 m}{1 ft} = 6,095 m$$

11.8.4 Codi de MATLAB de la columna d'absorció


```

function EBSYN_PACKED_ABSORBER
clc
factor=2400;
koh=0.034;
Toperacio=70+343; %Temperatura d'operació de la columna%
kh=koh*exp(factor*((1/Toperacio)-1/298.15))*9*18; %Constant d'equilibri a 9 bars%
H=kh;
yf=0.094942;%Concentració de CO2%
Gft=15038.6545; %Cabal total del corrent de gas kmol/h%
Gf=Gft*(1-yf); %Cabal d'aire kmol/h%
Yf=yf/(1-yf) %Raó molar de CO2%
xo=0;
Xo=xo/(1-xo);
y1=0.001; %Concentració de CO2 a la sortida%
Y1=y1/(1-y1); %Raó molar a la sortida%
Xf=Yf/H; %Raó molar en líquid a la sortida%
Xeqmax=Yf/H
Xeq=[0:0.001:Xeqmax];
Yeq=H.*Xeq;
Rmin=(Yf-Y1)/(Xf-Xo)
R=1.5*Rmin
Xp=[0:0.001:Xf];
Yp=R*Xp+(Y1-Xo);
Xa=interp1(Yp,Xp,Yf);
plot(Xeq,Yeq,'-b',Xf,Yf,'*m',Xp,Yp,'-m',[0 Xeqmax],[Yf Yf],'-r');
title('Equilibri CO_2-H_2O');
ylabel('Y (Kmols CO_2/Kmols aire)');
xlabel('X (Kmols CO_2/Kmols H_2O)');
grid minor;
set(line([Xo Xf],[Y1 Yf]),'Color',[1 0 0]);
Y(1)=Yf;
X(1)=Xa;

```

i=1;

while Y(i)>Y1

Y(i+1)=X(i).*H;

X(i+1)=(Y(i+1)-(Y1-Xo))/(R);

set(line([X(i) X(i)], [Y(i) Y(i+1)]), 'Color', [0.0549 0.8118 0.5098]);

set(line([X(i) X(i+1)], [Y(i+1) Y(i+1)]), 'Color', [0.0549 0.8118 0.5098]);

i=i+1;

end

Rmin

R

Lf=R*Gf

Gf

Etapas=i

End

11.9 Determinació dels gasos de combustió de les calderes

Per tal de no abocar el corrent gasós generat a la separació flash Ebsyn S.L. ha decidit realitzar una combustió d'aquests gasos en les calderes de regeneració de l'oli tèrmic, i la part restant es porta a una cogeneració. Aquesta combustió generarà una certa quantitat d'energia en total, i unes emissions de CO₂.

11.9.1 Generació de CO₂

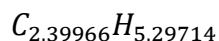
Aquestes emissions de CO₂ es determinen mitjançant el càlcul estequiomètric d'una reacció d'oxidació d'un hidrocarbur en CO₂ i aigua.

Primerament, es convenient fer un càlcul de la fórmula química del corrent gasós, prenent la mescla com una única substància a combustionar. Per fer-ho es faran proporcions dels carbonis i hidrògens de les molècules que hi ha en la mescla i aplicant les composicions molars que hi ha en el corrent dels gasos, de tal manera que:

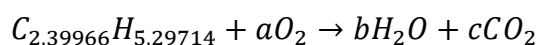
Taula 11.21: Carbonis i Hidrògens aportats per cada molècula del corrent gasós.

	Kmol/h	Composició	Numero de Carbonis	Numero de hidrògens	Carbonis aportats	Hidrògens aportats
Metà	179,7	0,302	1	4	0,302	1,208
Età	271,4	0,456	2	6	0,9123	2,737
Propilè	3,9	0,007	3	6	0,0197	0,0393
Toluè	0	0	0	0	0	0
Etilbenzè	4,7	0,008	8	10	0,063	0,079
Etilè	39	0,066	2	4	0,13109	0,262
Dietilbenzè	0,1	0,00017	8	10	0,0013	0,0017
Benzè	96,2	0,162	6	6	0,970	0,970
Total	595				2,39966	5,297

Per tant tenim una fórmula química del corrent de gas equivalent a:



Amb aquesta fórmula química treta, es procedeix a ajustar la reacció d'oxidació d'aquest combustible:



Sabent que el nombre de carbonis d'una banda ha de ser igual a la de l'altre, i el mateix que els hidrògens s'extrau directament que:

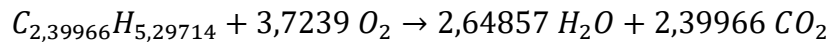
$$c = 2,39966$$

$$b = \frac{5,29714}{2} = 2,64857$$

Pel que fa el d'oxigen:

$$a = \frac{b + 2 \cdot c}{2} = \frac{2,64857 + 2 \cdot 2,39966}{2} = 3,7239$$

Per tant la reacció quedaria ajustada:



Amb aquest reacció es pot calcular tot el que sigui referent a la combustió. Sabent que l'aire té per composició $O_2 = 21\%$, $N_2 = 79\%$, es determina la quantitat d'aire necessària estequiomètricament per a que hi hagi un 50% en excés d'oxigen:

$$595 \frac{\text{kmol gas}}{h} \cdot \frac{3,7239 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol gas}} \cdot 1,5 = 3323,58 \frac{\text{kmol } O_2}{h}$$

$$\frac{3323,58}{0,21} = 15826,575 \frac{\text{kmol aire}}{h}$$

Seguidament ja es calcula la resta de corrents. Pel nitrogen que no reacciona:

$$15826,575 \cdot 0,79 = 12502,99 \frac{\text{kmol } N_2}{h}$$

Pel que fa la producció de diòxid de carboni:

$$575 \frac{\text{kmol gas}}{h} \cdot \frac{2,39966 \text{ kmol } CO_2}{1 \text{ kmol gas}} = 1427,8 \frac{\text{kmol } CO_2}{h}$$

Per l'aigua:

$$575 \frac{\text{kmol gas}}{h} \cdot \frac{2,64857 \text{ kmol } H_2O}{1 \text{ kmol gas}} = 1575,92 \frac{\text{kmol } H_2O}{h}$$

L'oxigen no reaccionat seria:

$$3323,58 - 575 \frac{\text{kmol gas}}{h} \cdot \frac{3,7239 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol gas}} = 1107,86 \frac{\text{kmol } O_2}{h}$$

Suposant que l'aigua generada condensa i es recull a sota deixant que els vapors de combustió ascendeixin es té un corrent de gas de sortida de:

$$V = 15039 \frac{\text{kmol}}{h}$$

On la composició molar de diòxid de carboni és:

$$y_{CO_2} = 0,094942$$

Amb una raó molar de:

$$Y_{CO_2} = \frac{y_{CO_2}}{1 - y_{CO_2}} = \frac{0,094942}{1 - 0,094942} = 0,1049$$

11.9.2 Generació d'energia

Pel que fa a l'energia que Ebsyn S.L. genera a partir d'aquest corrent gasós, s'ha determinat mitjançant el PCI estàndard per a compostos provinents del petroli segons la bibliografia [6]:

$$PCI = 9550 \frac{Kcal}{Kg}$$

Tenint en compte que es compta amb una producció de corrent de gas de $20374,7 \frac{Kg}{h}$. Al canvi son $5,660 \frac{Kg}{s}$. A continuació es procedeix a calcular la energia que és capaç de donar la crema d'aquest gas:

$$9550 \frac{Kcal}{Kg} \cdot \frac{4,18 KJ}{Kcal} \cdot \frac{5,660 Kg}{s} = 225941,54 kW$$

Abans de determinar la potència elèctrica que es pot obtenir en un motor de cogeneració es pensa en destinar aquesta energia en la regeneració de l'oli tèrmic així que primer es fa un balanç d'energia per determinar quanta energia és necessària. Es fa primer el càlcul del circuit que ha de regenerar a 500°C, a partir del següents paràmetres, on les propietats de l'oli han estat extretes del simulador Aspen HYSYS [4]:

Taula 11.22: Paràmetres del circuit d'oli a 500°C.

Cp oli (KJ/KgK)	1,905
T entrada (°C)	310,4
T sortida (°C)	500
Cabal màssic d'oli (Kg/s)	273,04

A partir d'aquestes dades es procedeix a calcular les necessitats energètiques, i les calderes necessàries sabent que tenen una eficiència del 70% i una capacitat màxima calorífica de 18605 kW:

$$Q_{eff} = m \cdot Cp \cdot \Delta T = \frac{273,04 \cdot 1,905 \cdot (500 - 310,4)}{0,7} = 140883,96 kW$$

$$N_{calderes} = \frac{140883,95}{18605} = 7,57 \approx 8$$

Es pot observar com la energia necessària per aquest circuit d'oli és suficient amb el que es crema. Es fa un càlcul a continuació per determinar el cabal necessari per cremar en les 7 calderes:

$$Q = PCI \cdot m_{gas}$$

$$m_{gas} = \frac{140883,96 \text{ kW}}{9550 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \cdot 4,18 \frac{\text{KJ}}{\text{Kcal}}} = 3,529 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Per tant es disposa per a la resta de $2,131 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$ de corrent de gas de crema. A continuació es repeteix l'anterior procediment pel circuit de 400°C:

Taula 11.23: Paràmetres del circuit d'oli a 400°C.

Cp oli (KJ/KgK)	1,905
T entrada (°C)	310,4
T sortida (°C)	400
Cabal màssic d'oli (Kg/s)	44,66

A partir d'aquestes dades es procedeix a calcular les necessitats energètiques, i les calderes necessàries sabent que tenen una eficiència del 70% i una capacitat màxima calorífica de 18605 kW:

$$Q_{eff} = m \cdot Cp \cdot \Delta T = \frac{44,66 \cdot 1,905 \cdot (400 - 310,4)}{0,7} = 10889,89 \text{ kW}$$

$$N_{calderes} = \frac{10889,89}{18605} = 0,59 \approx 1$$

Es pot observar com l'energia necessària per a aquest circuit d'oli és suficient amb el que es crema. Es fa un càlcul a continuació per determinar el cabal necessari per cremar en la caldera:

$$m_{gas} = \frac{10889,89 \text{ kW}}{9550 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \cdot 4,18 \frac{\text{KJ}}{\text{Kcal}}} = 0,2728 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Per tant es disposa per a la resta de $1,858 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$ de corrent de gas de crema.

Finalment, es calcula l'energia tèrmica que es pot obtenir en un motor de cogeneració, així com l'elèctrica, suposant que el motor escollit transforma el 37% de l'energia en elèctrica i es crema la resta del gas:

$$1,858 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \cdot 9550 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \cdot 4,18 \frac{\text{KJ}}{\text{Kcal}} = 74169,50 \text{ kW}$$

Obtenint doncs una potència elèctrica de:

$$74169,50 \text{ kW} \cdot 0,37 = 27436,7 \text{ kW}$$

l tèrmica de:

$$74169,50 \text{ kW} \cdot (1 - 0,37) = 46716,6 \text{ kW}$$

11.10 Residus municipals

Pel que fa la generació de residus assimilables a urbans s'ha pres com a indicador de referència l'índex de generació per habitant dia de residu a Catalunya més actualitzat, així com els percentatges de cada fracció de recollida selectiva [x]. Essent aquests:

Taula 11.24: Dades de generació de residus municipals.

Índex de generació per càpita (Kg/hab-dia)	1,36
% de plàstic	16,88
% de vidre	17,39
% de paper	24,09
% de fracció orgànica	41,64

També de les dades de la pròpia Generalitat de Catalunya s'ha pogut extreure les densitats de cada fracció:

Taula 11.25: Densitats de les diferents fraccions de recollida selectiva.

$\rho_{\text{plàstic}}$ (Kg/m³)	600
ρ_{paper} (Kg/m³)	71,5
ρ_{vidre} (Kg/m³)	330
$\rho_{\text{matèria orgànica}}$ (Kg/m³)	550

A partir d'aquestes dades es poden determinar els dies que trigant en omplir-se els tancs de deposició de residus entregats per la empresa municipal gestora. Pel còmput de generació Ebsyn S.L.. només té en compte 140 persones i 8 hores al dia per a la generació, fent que l'índex que hi ha la taula 11.24 sigui:

$$1,36 \frac{\text{Kg}}{\text{hab} \cdot \text{dia}} \cdot \frac{8 \text{ h}}{24 \text{ h}} = 0,453 \frac{\text{Kg}}{\text{hab} \cdot \text{dia}} \text{ (Per dia de treball)}$$

A partir d'aquest punt es pot calcular els dies que es triga en omplir cada tanc, per fer-ho es compta que cada tanc té 800 L de capacitat. A continuació es procedeix a

realitzar un exemple de càlcul per al dies que es triga en omplir el contenidor de la fracció orgànica.

Primer es determina la capacitat màxima en massa del contenidor:

$$800 L \cdot \frac{1 m^3}{1000 L} \cdot \frac{550 Kg}{1 m^3} = 440 Kg$$

Seguidament es calcula la massa de residu generada per dia:

$$0,453 \frac{Kg (total)}{hab \cdot dia} \cdot 0,4164 \cdot 140 hab = 24,41 \frac{Kg}{dia}$$

Es fa la ràtio de la massa màxima entre la generada i s'obté el numero de dies que triga en omplir-se el tanc:

$$\frac{440 Kg}{24,41 Kg/dia} = 18 dies$$

Per a la resta de contenidors es procedeix a reunir en la següent taula els resultats arrodonint en aquest cas a la baixa:

Taula 11.26: Dies que triguen en omplir-se els contenidors.

Contenidor	Massa màxima (Kg)	Massa generada (Kg/dia)	Dies en que s'omple
Plàstic	480	10,71	44
Paper	57,2	15,28	3
Vidre	264	11,03	23
Orgànica	440	24,41	18

11.11 Canonades, accessoris, bombes, compressors i bufadors

Per a dissenyar les canonades i els aparells que donen la pressió necessària, a Ebsyn S.L. hem decidit realitzar un balanç d'energia mecànica des d'un punt A fins un punt B de tal manera que:

$$g \cdot \Delta z + \frac{\Delta v^2}{2 \cdot \alpha} + \frac{\Delta P}{\rho} + \sum e_v = W_s$$

On:

- $g \cdot \Delta z$ es correspon a la energia potencial del fluid en unitats de $\left[\frac{\text{energia}}{\text{massa}}\right]$. g és la constant d'acceleració de la gravetat amb un valor de $9,81 \frac{m}{s^2}$. Δz és la variació d'altura en el tram sencer del punt A fins al punt B en unitats de m .

- $\frac{\Delta v^2}{2 \cdot \alpha}$ es correspon a la energia cinètica, la qual no la considerarem, ja que en comparació amb les pèrdues per fricció, i la energia associada a la pressió, aquest valor és molt inferior.
- $\frac{\Delta P}{\rho}$ és la energia associada a la pressió en unitats de $\left[\frac{\text{energia}}{\text{massa}}\right]$. ΔP és la variació de la pressió del fluid en el tram des de el punt A fins al punt B, amb unitats de Pa . ρ és la densitat del fluid en unitats de $\frac{Kg}{m^3}$.
- $\sum e_v$ és la suma de totes les pèrdues per fricció, tant la generada pels accessoris, com la generada per la fricció amb la canonada en el tram recte. Pren unitats de $\left[\frac{\text{energia}}{\text{massa}}\right]$. Aquest factor és desenvolupa molt més llarg i com que s'han de determinar, es farà una explicació d'aquest terme més endavant.
- W_s és la energia aportada per un equip com sigui: la bomba, el compressor o el bufador. En unitats de $\left[\frac{\text{energia}}{\text{massa}}\right]$.

Pel que fa a les pèrdues per fricció, el sumatori que s'ha comentat abans es desenvolupa en la següent expressió:

$$\sum e_v = e_{v_{tramrecte}} + e_{v_{accidents}}$$

Per les pèrdues per fricció generades pels accidents s'utilitzarà el mètode de la longitud equivalent a partir de les K respectives de cadascun:

$$e_v = 4f \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \frac{(L_{recte} + L_{equivalent})}{D}$$

On:

- v és la velocitat del fluid en la conducció en unitats de $\frac{m}{s}$.
- D és el diàmetre de la conducció en unitats de m .
- $4f$ és el factor de Fanning que es determina mitjançant la següent expressió:

$$4f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \cdot \left(\frac{D}{\epsilon}\right)} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2}$$

On:

- ϵ és el factor de rugositat que és intrínsec del material de la canonada. En el nostre cas en ser canonades d'acer aquest valor és de 0,000046.

- Re és el numero de Reynolds, el qual ve determinat per la següent expressió:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

- μ és la viscositat dinàmica en unitats de $Pa \cdot s$.

Per al càlcul de la longitud equivalent a partir de les K s'ha determinat de la següent manera:

$$L_{equivalent} = \frac{K \cdot D}{4f}$$

Els valors de la K es troben tabulats, i depenen de cada accessori:

Accident		L/D	K	Velocitat
Vàlvula d'assentament	(oberta)	350	9	La de la conducció
	(3/4 oberta)		13	La de la conducció
	(1/2 oberta)		36	La de la conducció
	(1/4 oberta)		112	La de la conducció
Vàlvula de comporta	(oberta)	7	0.17	La de la conducció
	(3/4 oberta)	40	0.9	La de la conducció
	(1/2 oberta)	200	4.5	La de la conducció
	(1/4 oberta)	900	24	La de la conducció
Vàlvula d'assentament en angle Vàlvula de papallona	(oberta)	170	2	La de la conducció
	(5° oberta)		0.24	La de la conducció
	(10° oberta)		0.52	La de la conducció
	(20° oberta)		1.54	La de la conducció
	(40° oberta)		10.8	La de la conducció
Vàlvula de bola	(60° oberta)		118	La de la conducció
	(5° oberta)		0.05	La de la conducció
	(10° oberta)		0.29	La de la conducció
	(20° oberta)		1.56	La de la conducció
	(40° oberta)		17.3	La de la conducció
Vàlvula de diafragma	(60° oberta)		206	La de la conducció
	(oberta)		2.3	La de la conducció
	(3/4 oberta)		2.6	La de la conducció
	(1/2 oberta)		4.3	La de la conducció
	(1/4 oberta)		21	La de la conducció
Vàlvula de retenció Colze	(oberta)	85		
	(estàndard de 90°)	30	0.75	La de la conducció
	(de gran radi 90°)	16	0.45	La de la conducció
	(de petit radi 90°)		1.3	La de la conducció
	(estàndard de 45°)	16	0.35	
	(de gran radi 45°)		0.20	
Derivació en T	(en angle recte)	60		
	(de 180°)	50	1.5	
		60	1	La del corrent principal
Unió roscada o de maneguet Contracció brusca	(utilitzada com a colze)	60	1	La de la conducció
	(amb derivació tancada)	20	0.4	La de la conducció
Eixamplament Entrada des d'un tanc a la conducció			0.04	La de la conducció
			$0.75[1-(D_1/D_2)^2]$	Mesurada en D_1
			si $1 > (D_1/D_2)^2 > 0.715$	
			$0.4[1.25 - ((D_1/D_2)^2)]$	Mesurada en D_1
Eixida des de la conducció a un tanc			si $(D_1/D_2)^2 < 0.715$	
			$[1 - (D_1/D_2)^2]^2$	Mesurada en D_1
	(acanonada)		0.78	La de la conducció
	(cantells vius)		0.50	La de la conducció
	(lleugerament arrodonida)		0.23	La de la conducció
	(molt arrodonida; broquet)		0.04	La de la conducció
			1	La de la conducció

Figura 11.91: Valors de la K per a diferents accessoris [14].

Quan hi ha un eixamplament o un estretament es fa un càlcul de la K de la següent manera:

$$K_{eix/estr} = \left(1 - \frac{D_{tubpetit}^2}{D_{tubgran}^2}\right)^2$$

Aquestes K es comptabilitzen a partir del tram on s'uneixen.

També intentar en la possible mesura que els fluids circulin a les velocitats típiques depenen de la seva fase:

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

Figura 11.92: Velocitats típiques dels fluids.

11.11.1 Exemple d'un tram recte amb accessoris i equips extrems amb pèrdues

A continuació es procedeix a fer pas a pas la metodologia de càlcul explicada anteriorment per un tram que només consta d'accessoris, sense canvis de diàmetres ni aportació/extracció d'energia mecànica. El tram escollit per aquest exemple ha estat el tram 10A-50G-13B (tram que surt per primer cop del reactor).

Primerament, s'han de seleccionar els paràmetres que afectaran a tot el càlcul. Aquests son: la longitud de tram recte, el cabal màssic del fluid, la velocitat del fluid aproximada desitjada, la densitat, la viscositat, l'altura de la canonada i el número d'accessoris en aquest tram:

Taula 11.27: Propietats del corrent 10A-50G-13B.

Longitud de tram recte (m)	5,33
Cabal màssic (Kg/s)	54,57
Velocitat del fluid (m/s)	18,5
Densitat (Kg/m ³)	57,9
Viscositat (cP)	0,01969
Altura de l'inici del tram (m)	3,33
Altura del final de tram (m)	0
K dels accessoris	2 colzes de 90° estàndard 1,5
Pressió d'entrada (kPa)	3899,97
Pèrdues d'equips (kPa)	41

Amb aquestes dades es pot començar a realitzar els càlculs. Primerament es calcula el diàmetre de canonada per tal de que fluid circuli a la velocitat fixada. Per això primer es fa un ajust de les unitats del cabal:

$$Q = 54,37 \frac{Kg}{s} \cdot \frac{1 m^3}{57,9 Kg} = 0,939 \frac{m^3}{s}$$

Ara es procedeix a calcular la secció de canonada necessària per garantir la velocitat que hi ha fixada a la taula 11.27:

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{0,939}{18,5} = 0,0508 m^2$$

Coneixent que la secció circular de la canonada es determina com:

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

Per tant el diàmetre queda calculat com:

$$D = \sqrt{\frac{A \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,0508 \cdot 4}{\pi}} = 0,254 m$$

S'escull doncs un diàmetre nominal de 10 polzades amb un diàmetre interior de canonada de 0,2545 metres. Es recalcula la velocitat del fluid en la canonada:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} = \frac{0,939}{\pi \cdot \frac{0,2545^2}{4}} = 18,46 m/s$$

Es procedeix a calcular el Reynolds de la conducció:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{57,9 \cdot 18,46 \cdot 0,2545}{0,01969/1000} = 1,38 \cdot 10^7$$

A partir d'aquest punt es calcula el valor de la K de tots els accessoris:

$$K = 2 \cdot 0,75 = 1,5$$

Amb aquest valor adimensional calculat del Reynolds es procedeix a determinar el factor de Fanning:

$$4f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \cdot \left(\frac{0,2545}{0,000046}\right)} + \frac{5,74}{1,38 \cdot 10^{7,9}} \right) \right]^2} = 0,01357$$

Seguidament es calcula la longitud equivalent dels accessoris com:

$$L_{equivalent} = \frac{K \cdot D}{4f} = \frac{1,5 \cdot 0,2545}{0,01357} = 28,13 m$$

Ara ja es pot determinar les pèrdues per fricció de tot el tram:

$$e_v = 4f \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \frac{(L_{recte} + L_{equivalent})}{D} = 0,01357 \cdot \frac{18,46^2}{2} \cdot \frac{5,33 + 28,13}{0,2545} = 303,98 \frac{J}{Kg}$$

Aplicuem el balanç de energia mecànica per treure la pèrdua de pressió en el tram:

$$\frac{\Delta P}{\rho} = -(g \cdot \Delta z + e_v) = -(9,81 \cdot (0 - 3,33) + 303,98) = -271,31 \frac{J}{Kg}$$

$$\Delta P = -271,31 \frac{J}{Kg} \cdot 57,9 \frac{Kg}{m^3} = -15708,85 Pa$$

Per tant ara es pot determinar la pressió a la sortida del tram:

$$\Delta P = P_{sortida} - P_{entrada}$$

$$P_{sortida} = \Delta P + P_{entrada} - \Delta P_{equips} = \frac{-15708,85}{1000} + 3899,97 - 41 = 3843,26 kPa$$

11.11.2 Exemple d'un tram amb bifurcacions de connexions i reduccions de diàmetres

A continuació es procedeix a fer pas a pas la metodologia de càlcul explicada anteriorment per un tram que només consta d'accessoris, sense canvis de diàmetres ni aportació/extracció d'energia mecànica. El tram escollit per aquest exemple ha estat el tram 8A-3L-S02/400B (primer tram que bifurca en el circuit d'oli tèrmic de 400°C).

Primerament s'han de seleccionar els paràmetres que afectaran a tot el càlcul. Aquests son: la longitud de tram recte, el cabal màssic del fluid, la velocitat del fluid aproximada desitjada, la densitat, la viscositat, l'altura de la canonada i el numero d'accessoris en aquest tram:

Taula 11.28: Propietats del corrent 8A-3L-S02/400B.

Longitud de tram recte (m)	33,635
Cabal màssic (Kg/s)	44,665
Velocitat del fluid (m/s)	1
Densitat (Kg/m³)	785,98
Viscositat (cP)	0,1765
Altura de l'inici del tram (m)	5
Altura del final de tram (m)	0
K dels accessoris	4 colzes de 90° estàndard +1 Te + Estretament
Pressió d'entrada (kPa)	209,69

Amb aquestes dades es pot començar a realitzar els càlculs. Primerament es calcula el diàmetre de canonada per tal de que fluid circuli a la velocitat fixada. Per això primer es fa un ajust de les unitats del cabal:

$$Q = 19,765 \frac{Kg}{s} \cdot \frac{1 m^3}{785,98 Kg} = 0,025 \frac{m^3}{s}$$

Ara es procedeix a calcular la secció de canonada necessària per garantir la velocitat que hi ha fixada a la taula 11.28:

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{0,025}{1} = 0,025 m^2$$

Coneixent que la secció circular de la canonada es determina com:

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

Per tant el diàmetre queda calculat com:

$$D = \sqrt{\frac{A \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,025 \cdot 4}{\pi}} = 0,178 m$$

S'escull doncs un diàmetre nominal de 8 polzades amb un diàmetre interior de canonada de 0,2026 metres. Es recalcula la velocitat del fluid en la canonada:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} = \frac{0,025}{\pi \cdot \frac{0,2026^2}{4}} = 0,775 m/s$$

Es procedeix a calcular el Reynolds de la conducció:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{785,98 \cdot 0,775 \cdot 0,2026}{0,1765/1000} = 6,99 \cdot 10^5$$

A partir d'aquest punt es calcula el valor de la K de tots els accessoris:

$$K = 4 \cdot 0,75 + 1 \cdot 1 + K_{estretament}$$

Per determinar la $K_{estretament}$ es determina a partir de la següent relació:

$$K_{estretament} = \left(1 - \left(\frac{D_{tubpetit}^2}{D_{tubgran}^2}\right)\right)^2 = \left(1 - \frac{0,2026^2}{0,2545^2}\right)^2 = 0,1342$$

Per tant:

$$K = 4 \cdot 0,75 + 1 \cdot 1 + 0,1342 = 4,1342$$

Amb aquest valor adimensional calculat del Reynolds es procedeix a determinar el factor de Fanning:

$$4f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \cdot \left(\frac{0,2026}{0,000046} \right)} + \frac{5,74}{6,99 \cdot 10^{5,9}} \right) \right]^2} = 0,01538$$

Seguidament es calcula la longitud equivalent dels accessoris com:

$$L_{equivalent} = \frac{K \cdot D}{4f} = \frac{4,1342 \cdot 0,2026}{0,01538} = 54,46 \text{ m}$$

Ara ja es pot determinar les pèrdues per fricció de tot el tram:

$$e_v = 4f \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \frac{(L_{recte} + L_{equivalent})}{D} = 0,01538 \cdot \frac{0,775^2}{2} \cdot \frac{33,635 + 54,46}{0,2026} = 2,008 \frac{J}{Kg}$$

Apliquem el balanç de energia mecànica per treure la pèrdua de pressió en el tram:

$$\frac{\Delta P}{\rho} = -(g \cdot \Delta z + e_v) = -(9,81 \cdot (0 - 5) + 2,008) = 47,042 \frac{J}{Kg}$$

$$\Delta P = 47,042 \frac{J}{Kg} \cdot 785,98 \frac{Kg}{m^3} = 36974,07 \text{ Pa}$$

Per tant ara es pot determinar la pressió a la sortida del tram:

$$\Delta P = P_{sortida} - P_{entrada}$$

$$P_{sortida} = \Delta P + P_{entrada} = \frac{36974,07}{1000} + 209,69 = 246,66 \text{ kPa}$$

11.11.3 Recull de totes les canonades

Ebsyn S.L. vol presentar en aquest punt unes taules amb tots els valors obtinguts a partir d'aquesta metodologia de càlcul explicada. El color groc en les graelles indica que és una variable calculada, i el color verd un input:

11.11.3.1 Circuit principal de procés

Reynolds	17874 5,74		14874 3,57		712325 6,36	141191 38,50	635461 6,34		228938 0,04		253339 3,77	125395 1,37	125395 1,37	125395 1,37	125420 21,64
Tram	Corrent 1	Bomba	Corrent 2	Bescanviadors	Corrent 3	Corrent 11	Corrent 4	Expansor	Corrent 5	Bescanviador	Corrent 6	Corrent 7	Corrent 8	Corrent 9	Corrent 10
Cabal (Kg/s)	10,87		10,87		10,87	54,58	6,55		6,55		6,55	1,64	1,64	1,64	1,64
Cabal(m ³ /s)	0,01		0,01		0,16	0,89	0,03		0,05		0,34	0,09	0,09	0,09	0,09
Longitud de tram	11,58		81,07		7,41	3	143,75		4,83		1	14,265	20,27	22,277	24,283
Densitat	872,2		872,2		67,95	61,34879	241,6		125,3		19	19	19	19	19
Vicositat	0,000604		0,000604		0,000019	0,000019339	0,000024997		0,000046746		0,000021369	0,000021369	0,000021369	0,000021369	2,13647E-06
P entrada tram (kPa)	101,3	66,010621	4000,00	3963,59	3863,59	3838,58	10000,00	8976,08	4082,68	4074,47	4074,47	4074,15	4061,68	4043,84	4023,45
4f	0,018370		0,018434		0,016425	0,013566	0,019101		0,017603		0,015295	0,017786	0,017786	0,017786	0,017397
Pèrdues extres (kPa)				100				93,4		100					
K enxamplament															
K total accessoris	0,75		1,5		0,75	3,772584	2,25		0		0	0,75	0,75	0,75	0,75
DN	5,00000		6,00000		4,00000	10,00000	2,000000		3,000000		6,000000	3,000000	3,000000	3,000000	3,000000

Dexterior	0,141 300		0,168 275		0,1143 00	0,27305	0,06032 5		0,0889		0,16827 5	0,0889	0,0889	0,0889	0,0889
gruix (mm)	6,553 200		7,112 000		6,0198 00	9,271	3,9116		5,4864		7,112	5,4864	5,4864	5,4864	5,4864
D interior	0,128 194		0,154 051		0,1022 60	0,25450 8	0,05250 2		0,07792 7		0,15405 1	0,07792 7	0,07792 7	0,07792 7	0,07792 7
AZ (altura en m)	4		4		0	0	-4		0		0	0	6	12	18
V (m/s)	0,965 583		0,668 643		19,477 590	17,4877 84	12,5229 34		10,9602 94		18,4956 15	18,0976 52	18,0976 52	18,0976 52	18,0976 52
g*z	39,24 0000		39,24 0000		0,0000 00	0,00000 0	- 39,2400 00		0,00000 0		0,00000 0	0,00000 0	58,8600 00	117,720 000	176,580 000
Leq	5,233 909		12,53 5078		4,6695 53	70,7749 03	6,18436 3		0,00000 0		0,00000 0	3,28604 9	3,28604 9	3,28604 9	3,35946 7
ev acc	0,349 631		0,335 313		142,26 6197	576,870 682	176,426 869		0,00000 0		0,00000 0	122,821 872	122,821 872	122,821 872	122,821 872
ev recte	0,773 558		2,168 620		225,75 8786	24,4523 41	4100,88 4969		65,5327 11		16,9826 42	533,179 443	757,626 871	832,642 023	887,784 810
ev tram	1,123 189		2,503 933		368,02 4983	601,323 022	4277,31 1838		65,5327 11		16,9826 42	656,001 315	880,448 743	955,463 895	1010,60 6682
AP (Pa)	35204 ,77		36409 ,06	100000, 00	25007, 30	36890,4 4	102391 8,16	489340 0,00	8211,25		322,67	12464,0 2	17846,8 7	20390,4 9	22556,5 5
P sortida tram (kPa)	66,10	4000, 00	3963, 59	3863,59	3838,5 8	3801,69	8976,08	4082,6 8	4074,47	4074,47	4074,15	4061,68	4043,84	4023,45	4000,89

Reynolds		13868582,36	14169903,06	14373971,41	14503348,98	14424509,31	14835052,58	14798372,80	872332,75
----------	--	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-----------

Tram	Pèrdua de pressió de tot el reactor R-0201	Primera sortida del reactor al bescanviador BC-0205	Bescanviador a la tornar al reactor	Segona sortida del reactor fins al bescanviador BC-0206	Bescanviador a retorn del reactor	Tercera sortida del reactor fins al bescanviador BC-0207	Tornada al reactor	Corrent de sortida del reactor fins als condensadors	Fins el tanc flash
Cabal (Kg/s)		54,57	54,57	56,18	56,18372222	57,76655556	57,76655556	59,33744444	59,33744444
Cabal(m3/s)		0,94	0,90	0,99	0,95	1,06	1,00	1,10	0,09
Longitud de tram (m)		5,330000	10,385000	11,120000	18,695000	19,710000	29,430000	26,740000	4,500000
Densitat (Kg/m3)		57,900000	60,590000	56,5	59,000000	54,700000	57,800000	53,790000	676,000000
Vicositat (Pas)		0,000020	0,000019	1,95543E-05	0,000019	0,000020	0,000019	0,000020	0,000257
P entrada tram (kPa)	4000,000000	3899,970000	3843,131028	3806,810938	3765,935327	3711,378760	3641,101046	3572,996342	3489,567898
4f		0,013568	0,013566	0,013564	0,013564	0,013564	0,013561	0,013562	0,014158
Pèrdues extres (kPa)	100,030000	41,000000		23,000000		48,000000		48,000000	
K enxamplament		0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,672955	0,000000
K total accessoris		1,500000	3,000000	1,500000	3,750000	1,500000	3,750000	2,172955	6051,750000
DN (in)		10,000000	10,000000	10,000000	10,000000	10,000000	10,000000	10,000000	14,000000
Dexterio (m)		0,273050	0,273050	0,273050	0,273050	0,273050	0,273050	0,273050	0,3556
gruix (mm)		9,271000	9,271000	9,271000	9,271000	9,271000	9,271000	9,271000	9,525
D interior (m)		0,254508	0,254508	0,254508	0,254508	0,254508	0,254508	0,254508	0,336550
AZ (altura en m)		-3,330000	4,330000	-8,500000	9,500000	-14,500000	15,500000	-19,080000	0,000000
V (m/s)		18,527616	17,705050	19,546513	18,718271	20,758520	19,645174	21,683757	0,986718
g*z		-32,667300	42,477300	-83,385000	93,195000	-142,245000	152,055000	-187,174800	0,000000

Leq		28,136661	56,282496	28,144253	70,365293	28,144985	70,376896	40,779493	143859,307438
ev acc		257,454426	470,203200	286,549641	656,950655	323,187117	723,624105	510,845804	2946,029730
ev recte		48,770253	86,759838	113,217858	174,541909	226,328709	302,602964	334,972696	0,092153
ev tram		306,224679	556,963038	399,767499	831,492563	549,515827	1026,227069	845,818500	2946,121883
AP (Pa)	100030,00	56838,97	36320,09	40875,61	54556,57	70277,71	68104,70	83428,44	1991578,39
P sortida tram (kPa)	3899,97	3843,13	3806,81	3765,94	3711,38	3641,10	3573,00	3489,57	1497,99

Reynolds	11185 86,91	769936,4 5		427994 9,75	3502837 23,54	80775 5,72		13456 74,55	121364 72,70	245500, 34		218769 4,39	32043 52,13		381758 8,41	
Tram	Flash - vàlvula	Valvula- columna C-0201	Colu mna C- 0201 (cues)	To reboiler (Colum na C- 0201)	Boil up (column a C- 0201)	Colum na C- 0201- Colum na C- 0202	Colu mna C- 0202 (cues)	To reboile r (Colum na C- 0202)	Boil up (colum na C- 0202)	Column a C- 0202 - Bescanv iador	Bescanv iador	Bescanv iador - T	T- Compr essor	Compr essor	Compr essor- Entrada reactor	Colu mna C- 0201 (caps)
Cabal (Kg/s)	61,68	61,68		254,56	241,19	13,19		28,44	26,95	1,31		1,31	7,82		7,82	
Cabal(m 3/s)	0,08	0,08		0,40	8,73	0,02		0,05	0,92	0,00		0,05	0,52		0,21	
Longitud de tram	3,2050 0	2,50000		3,5350 0	8,26000	9,770 00		8,2900 0	8,2900 0	5,00000		18,1050 0	2,8650 0		1,0000 0	
Densitat	753,20 0000	753,2000 00		637,38 00000	27,6300 000	636,6 0		621,15	29,27	617		25,5000 00	14,900 000		37,100 000	
Vicositat	0,0002 0861	0,000208 61		0,0001 019	0,00000 11	0,000 10		0,0001 06	0,0000 11	0,00010 8336		0,00001 2	0,0000 15		0,0000 17	
P entrada tram (kPa)	1497,9 9	1497,71	900,4 2	910,42	910,00	902,8 6	876,5 3	886,53	886,53	920,00	919,66	919,66	898,21	896,18	2000,0 0	900

4f	0,0139 09	0,013744		0,0116 12	0,01084 2	0,015 238		0,0143 21	0,0135 83	0,01979 1		0,01847 3	0,0144 53		0,0151 83	
Pèrdues extres (kPa)			-10				-10				6,22					10
K enxamplament																
K total accessoris	0,7500 00	5450,000 000		1,50	1,50	0,00		1,50	1,50	0,75000 0		0,75000 0	0,8228 57		0,0000 00	
DN	14,000 000	20,00000 0		30,000 000	32,0000 00	8,000 000		10	10,000 000	2,50000 0		2,50000 0	8,0000 00		6,0000 00	
Dexterio r	0,3556 00	0,508000		0,7620 00	0,81280 0	0,219 075		0,2730 5	0,2730 5	0,07302 5		0,07302 5	0,2190 75		0,1682 75	
gruix (mm)	9,5250 00	9,525		9,5250 00	9,52500 0	8,178 8		9,271	9,271	5,1562		5,1562	8,1788		7,112	
D interior	0,3365 50	0,488950		0,7429 50	0,79375 0	0,202 717	0,000 000	0,2545 08	0,2545 08	0,06271 3		0,06271 3	0,2027 17		0,1540 51	
AZ (altura en m)	0,0000 00	28,00000 0		0,00	0,75	4,20		0,00	0,75	0,00000 0		0,00000 0	0,0000 00		0,0000 00	
V (m/s)	0,9205 45	0,436129		0,9212 61	17,6409 13	0,641 957		0,8999 96	18,097 911	0,68736 4		16,6315 08	16,261 049		11,308 732	
g*z	0,0000 00	274,6800 00		0,0000 00	7,35750 0	41,20 2000	0,000 000	0,0000 00	7,3575 00	0,00000 0		0,00000 0	0,0000 00		0,0000 00	
Leq	18,147 479	193880,4 27299		95,972 564	109,814 428	0,000 000		26,658 370	28,106 221	2,37661 4		2,54608 2	11,541 316		0,0000 00	
ev acc	0,3177 76	518,3189 05		0,6365 41	233,401 355	0,000 000		0,6074 94	245,65 0791	0,17717 6		103,727 643	108,79 0624		0,0000 00	
ev recte	0,0561 22	0,006683		0,0234 46	17,5559 37	0,151 324		0,1889 13	72,455 313	0,37274 9		737,599 639	27,006 031		6,3023 30	

ev tram	0,3738 98	518,3255 88		0,6599 87	250,957 292	0,151 324		0,7964 07	318,10 6105	0,54992 4		841,327 282	135,79 6656		6,3023 30	
AP (Pa)	281,62	597291,8 1	- 1000 0,00	420,66	7137,24	26325 ,53	- 1000 0,00	494,69	9526,6 5	339,30	6220,00	21453,8 5	2023,3 7	0,00	233,82	1000 0,00
P sortida tram (kPa)	1497,7 1	900,42	910,4 2	910,00	902,86	876,5 3	886,5 3	886,04	877,01	919,66	913,44	898,21	896,18	2000,0 0	1999,7 7	890,0 0

Reynolds	24210573,5 4	530469,08	390386,96	337975,76		1642652,52		2747173,00		13752828,48
Tram	To condenser (Columna 1)	Reflux (Columna 1)	1a columna - Bifurcació (T)	Bifurcació (T)- Compressor	Compressor	Compressor - Bescanviador	Bescanviador 108 a	Bescanviador 108a - 108b	Bescanviador 108b	Bescanviador - Rectificació
Cabal (Kg/s)	121,22	72,75	48,49	41,98		41,98		39,47		41,98
Cabal(m3/s)	5,31	0,09	0,06	0,05		0,05		0,05		0,64
Longitud de tram	38,00000	43,15000	1,00000	8,48000		21,68500		10,49500		17,71000
Densitat	22,84	845,59	845,200000	845,200000		845,200000		794,65		65,400000
Vicositat	0,00	0,00	0,000519	0,000519		0,000519		0,00		0,000019
P entrada tram (kPa)	890,00	895,10	890,00	889,99	889,61	3771,00	2988,47	2954,38	2483,41	2479,41
4f	0,011558	0,014790	0,015420	0,015674		0,018542		0,018430		0,014191
Pèrdues extres (kPa)							34,09		4	
K enxamplament										

K total accessoris	0,00	0,00	0,000000	1,509496		0,750000		1,50		2,250000
DN	24,000000	14,000000	12,000000	12,000000		2,500000		2,500000		8
Dexterior	0,6096	0,3556	0,32385	0,32385		0,073025		0,073025		0,219075
gruix (mm)	9,525	9,525	9,525	9,525		5,1562		5,1562		8,1788
D interior	0,590550	0,336550	0,304800	0,304800		0,062713		0,062713	0,000000	0,202717
AZ (altura en m)	-37,00	37,00	0,000000	0,000000		0,000000		0,00		0,000000
V (m/s)	19,376483	0,967128	0,786272	0,680712		16,079904		16,080211		19,888075
g*z	- 362,970000	362,97000 0	0,000000	0,000000		0,000000		0,000000		0,000000
Leq	0,000000	0,000000	0,000000	29,354028		2,536632		5,104242		32,142133
ev acc	0,000000	0,000000	0,000000	0,349726		96,961242		193,929890		444,977469
ev recte	139,619929	0,886802	0,015638	0,101031		828,896323		398,745624		245,178217
ev tram	139,619929	0,886802	0,015638	0,450758		925,857565		592,675514		690,155687
AP (Pa)	-5101,32	307673,67	13,22	380,98	0,00	782534,81	34090,00	470969,60	4000,00	45136,18
P sortida tram (kPa)	895,10	587,43	889,99	889,61	3771,00	2988,47	2954,38	2483,41	2479,41	2434,27

Reynolds	599556,15		2408690,93		3108776,72	1522701,63	5717735,08
Tram	Bifurcació- Bescanviador inferior	Bescanviador 107	Bescanviador - T	Columna 2 (caps)	To condenser (C2)	Reflux (C2)	Segona columna - Tanc etilbenzè
Cabal (Kg/s)	6,51		6,51		26,72	26,72	11,87

Cabal(m3/s)	0,01		0,48		0,99	0,04	0,87
Longitud de tram	1,00000		1,43500		28,50000	28,50000	34,95500
Densitat	845,200000		13,700000		26,958	640,100	13,700000
Vicositat	0,000519		0,000016		0,000011	0,000102	0,000016
P entrada tram (kPa)	889,99	889,99	873,80	873,69	863,69	869,87	890,00
4f	0,022976		0,014360		0,011395	0,014589	0,014846
Pèrdues extres (kPa)		16,19		10			
K enxamplament							
K total accessoris	0,009496		0,000000		1,50	1,50	0,000000
DN	1		8		40	8	6
Dexterior	0,033401		0,219075		1,016	0,219075	0,168275
gruix (mm)	3,3782		0,219075		9,525	0,219075	0,168275
D interior	0,026645		0,218637		0,996950	0,218637	0,167938
AZ (altura en m)	0,000000		0,000000		-23,50	23,50	-23,500000
V (m/s)	13,813801		12,656797		1,269732	1,111865	39,114699
g*z	0,000000		0,000000		-230,535000	230,535000	-230,535000
Leq	0,011012		0,000000		131,234705	22,479443	0,000000
ev acc	0,906019		0,000000		1,209165	0,927183	0,000000
ev recte	82,275431		7,549116		0,262592	1,175505	2363,911949

ev tram	83,181450		7,549116		1,471757	2,102688	2363,911949
AP (Pa) algunes en kPa	70304,96	16190,00	103,42	10000,00	-6175,09	148911,38	29227,26
P sortida tram	819,68	873,80	873,69	863,69	869,87	720,96	860,77

11.11.3.2 Circuit d'oli tèrmic a 500°C

Reynolds	5323698,35		5323698,35	2866728,99	3045016,33	1365578,26	4060887,27	1044233,20	358906,40	865088,48	5323698,35
Tram	Tanc d'oli 500°C abans de la bomba	Bomba	Tram recte abans de la primer bifurcació	Tram que va al bescanviador BC-2061	Tram fins la bifurcació del reboiler de la colimna C-2042	Tram del reboiler C-2042	Tram del reboiler C-2041	Sortida del condensador BC-2061 (R)	Sortida del reboiler C-2042 (R)	Sortida del reboiler C-2041 (R)	Retorn de la caldera al tanc
Cabal (Kg/s)	273,04		273,04	116,87	156,17	19,10	137,07	116,87	19,10	137,07	273,04
Cabal(m3/s)	0,43		0,43	0,18	0,25	0,03	0,22	0,14	0,02	0,15	0,43
Longitud de tram (m)	22,410000		26,380000	56,085000	40,760000	3,455000	22,000000	14,925000	10,935000	11,360000	130,395000
Densitat	637,063747		637,063747	637,063747	637,063747	637,063747	637,063747	841,948109	891,116135	917,997507	637,063747
Vicositat	0,000088		0,000088	0,000088	0,000088	0,000088	0,000088	0,000241	0,000334	0,000413	0,000088
P entrada tram (kPa)	101,300000	100,958464	280,958464	249,116318	249,116318	248,897523	248,897523	279,393370	278,807395	279,151041	227,800879
4f	0,011506		0,011506	0,012214	0,011815	0,014840	0,012367	0,013114	0,016227	0,013593	0,011506
Pèrdues extres (kPa)	0,000000		0,000000					20,000000	13,800000	5,360000	6,360000

K enxamplament				0,13555565 1		0,85674533 9	0,321351				
K total accessoris	0,750000		1,500000	5,635556	1,500000	4,606745	1,821351	3,750000	1,500000	3,000000	4,500000
DN	28,000000		28,000000	24,000000	28,000000	8,000000	20,000000	24,000000	8,000000	20,000000	28,000000
Dexterior gruix (mm)	0,762000		0,762000	0,609600	0,762000	0,219000	0,508000	0,609600	0,219000	0,508000	0,762000
D interior	0,742950		0,742950	0,590550	0,742950	0,202642	0,488950	0,590550	0,202642	0,488950	0,742950
AZ (altura en m)	0,000000		5,000000	-5,000000	0,000000	-5,000000	-5,000000	5,000000	5,000000	5,000000	5,000000
V (m/s)	0,988619		0,988619	0,669738	0,565464	0,929740	1,145860	0,506760	0,664676	0,795194	0,988619
g*z	0,000000		49,050000	-49,050000	0,000000	-49,050000	- 49,050000	49,050000	49,050000	49,050000	49,050000
Leq	48,429772		96,859545	272,481554	94,322485	62,907710	72,012828	168,872793	18,732053	107,90947 8	290,57863 4
ev acc	0,366513		0,733026	1,263912	0,239812	1,991072	1,195713	0,481511	0,331346	0,948500	2,199077
ev recte	0,169597		0,199642	0,260152	0,103631	0,109353	0,365292	0,042556	0,193426	0,099852	0,986819
ev tram	0,536110		0,932667	1,524063	0,343443	2,100425	1,561004	0,524067	0,524771	1,048351	3,185896
AP (Pa)	341,54		31842,15	-30277,05	218,80	-29909,87	-30253,52	61738,79	57976,88	51350,16	39637,60
P sortida tram (kPa)	100,96	280,96	249,12	279,39	248,90	278,81	279,15	217,65	220,83	227,80	188,16

11.11.3.3 Circuit d'oli tèrmic a 400°C

Reynolds	1266426,5 8		1266426,5 8	703717,26	259243,55	109051,49	115851,81	886534,21	647647,20	333418,21	10367,04
Tram	Sortida del tanc fins la bomba	Bomba	Tram rectes abans de la primea bifurcació	Tram de la bifurcacó fins BC-2011	Sortida de BC-2011 fins bifurcació	Bifurcació fins el circuit de recollida BC-2020 inclòs (R)	Petit tram de purga abans de BC-2020 (R)	Tram cap a BC-2021	BC-2021 fins bifurcació	Tram que va al BC-2060	Sortida BC-2060 (Aqui comença el circuit de recollida R)
Cabal (Kg/s)	44,66		44,66	19,77	19,77	15,84	3,93	24,90	24,90	5,70	5,70
Cabal(m3/s)	0,06		0,06	0,03	0,02	0,02	0,00	0,03	0,03	0,01	0,01
Longitud de tram	9,570000		34,470000	33,635000	14,440000	20,825000	6,480000	22,715000	6,330000	21,375000	13,260000
Densitat	785,97639 2		785,97639 2	785,97639 2	935,86967 3	1014,4723 79	935,86967 3	785,97639 2	843,36949 4	843,36949 4	1099,9009 98
Vicositat	0,000176		0,000176	0,000176	0,000479	0,001202	0,000479	0,000176	0,000242	0,000242	0,007769
P entrada tram (kPa)	101,30000 0	100,29878 2	250,29878 2	209,68756 4	246,64249 3	238,52049 3	238,52049 3	209,68756 4	246,36316 3	237,07253 8	233,17809 8
4f	0,014365		0,014365	0,015371	0,016788	0,019245	0,020093	0,015156	0,015457	0,018258	0,031566
Pèrdues extres (kPa)	0,000000		0,000000	0,000000	7,280000	2,460000	0,000000	0,000000	9,120000	0,000000	1,000000
K enxamplament				0,1338073 06			0,6435574 01	0,000000	0,000000	0,6435574 01	0,000000
K total accessoris	1,500000		2,250000	4,133807	3,000000	1,500000	3,143557	3,250000	0,000000	3,893557	2,250000
DN	10,000000		10,000000	8,000000	8,000000	6,000000	3,500000	8,000000	8,000000	3,500000	3,500000
Dexterior	0,273000		0,273000	0,219000	0,219000	0,168000	0,101600	0,219000	0,219000	0,101600	0,101600
gruix	9,271000		9,271000	8,178800	8,178800	7,112000	5,740000	8,178800	8,178800	5,740000	5,740000

D interior	0,254458		0,254458	0,202642	0,202642	0,153776	0,090120	0,202642	0,202642	0,090120	0,090120
AZ (altura en m)	0,000000		5,000000	-5,000000	0,000000	5,000000	5,000000	-5,000000	0,000000	0,000000	5,000000
V (m/s)	1,117462		1,117462	0,779717	0,654834	0,840549	0,658014	0,982277	0,915431	1,059707	0,812550
g*z	0,000000		49,050000	-49,050000	0,000000	49,050000	49,050000	-	49,050000	0,000000	0,000000
Leq	26,570978		39,856467	54,497559	36,212138	11,985844	14,099044	43,453221	0,000000	19,218315	6,423733
ev acc	0,936541		1,404812	1,256591	0,643210	0,529892	0,680552	1,567912	0,000000	2,186190	0,742767
ev recte	0,337312		1,214956	0,775547	0,256487	0,920669	0,312785	0,819620	0,202313	2,431525	1,533234
ev tram	1,273853		2,619768	2,032138	0,899698	1,450561	0,993337	2,387531	0,202313	4,617715	2,276001
AP (Pa) algunes en kPa	1001,22		40611,22	-36954,93	8122,00	53691,42	46834,04	-36675,60	9290,62	3894,44	57453,52
P sortida tram	100,30	250,30	209,69	246,64	238,52	184,83	191,69	246,36	237,07	233,18	175,72

Reynolds	499368,02	119648,74	70010,00	475222,45	426138,78	117525,40	189528,05	1266426,58
Tram	Bifurcació d'abans fins la seogna bifurcació	Segona bifurcació fins BC-2041	BC-2041 fins canonada de circuit de recollida (R)	Segona bifurcació fins la tercera bifurcació	Tercera bifurcació BC-2050	BC-2050 fins circuit de reocllida (R)	Tercera bifurcació corrent de purga fins circuit de recollida (R)	Retorn de la caldera al tanc
Cabal (Kg/s)	19,20	0,93	0,93	18,27	16,38	16,38	1,89	44,66
Cabal(m3/s)	0,02	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,00	0,06
Longitud de tram	11,575000	9,785000	13,850000	16,735000	8,940000	8,935000	8,985000	129,630000
Densitat	843,369494	843,369494	918,838295	843,369494	843,369494	991,822533	843,369494	785,976392
Vicositat	0,000242	0,000242	0,000413	0,000242	0,000242	0,000876	0,000242	0,000176

P entrada tram (kPa)	237,072538	236,358185	232,867493	236,358185	235,919279	235,658484	235,919279	235,658484
4f	0,015760	0,022428	0,023577	0,015824	0,015972	0,018653	0,020765	0,014365
Pèrdues extres (kPa)	0,000000	0,000000	3,040000	0,000000	0,000000	1,010000	0,000000	0,000000
K enxamplament	0	0,920208984	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,870358758	0,000000
K total accessoris	2,500000	6,420209	1,500000	1,000000	1,000000	1,500000	3,370359	3,700000
DN	8,000000	1,500000	1,500000	8,000000	8,000000	8,000000	2,000000	10,000000
Dexterior	0,219000	0,048260	0,048260	0,219000	0,219000	0,219000	0,060300	0,273000
gruix	8,178800	3,683000	3,683000	8,178800	8,178800	8,178800	3,910000	9,271000
D interior	0,202642	0,040894	0,040894	0,202642	0,202642	0,202642	0,052480	0,254458
AZ (altura en m)	0,000000	0,000000	5,000000	0,000000	0,000000	5,000000	5,000000	5,000000
V (m/s)	0,705843	0,838043	0,769210	0,671714	0,602335	0,512180	1,034421	1,117462
g*z	0,000000	0,000000	49,050000	0,000000	0,000000	49,050000	49,050000	49,050000
Leq	32,144388	11,706339	2,601762	12,805811	12,687151	16,295289	8,518064	65,541745
ev acc	0,622767	2,254506	0,443763	0,225600	0,181404	0,196746	1,803186	2,310135
ev recte	0,224255	1,884478	2,362290	0,294820	0,127826	0,107879	1,902031	4,569039
ev tram	0,847022	4,138984	2,806053	0,520420	0,309230	0,304625	3,705217	6,879174
AP (Pa)	714,35	3490,69	50687,33	438,91	260,80	49961,03	44492,14	43959,01
P sortida tram (kPa)	236,36	232,87	182,18	235,92	235,66	185,70	191,43	191,70

11.11.3.4 Circuit de recollida d'oli tèrmic

Reynolds	974595,50	1005829,77	1039351,21	1053131,25	1109458,42	1241421,25	1247834,09	2194703,50
Tram	Unió de corrents que venen de BC-2061 i BC-2060	Unio de corrents de l'anterior amb la purga abans del BC-2020 fins la unio amb el que surt de BC-2020	El que segueix fins el de la tercera bofircació	El que segueix fins la unio amb BC-2050	El que segueix fins la unio amb Reboiler C-2042	El que segueix fins BC-2041	eEl que segueix fins reboiler C-2041	Unio final fins separació de control
Cabal (Kg/s)	122,57	126,50	142,33	144,22	160,60	179,71	180,63	317,70
Cabal(m3/s)	0,14	0,15	0,16	0,16	0,18	0,20	0,20	0,36
Longitud de tram	10,870000	28,860000	18,245000	21,870000	7,870000	7,260000	4,330000	3,100000
Densitat	861,757563	861,757563	874,509013	874,509013	882,471585	883,471585	884,471585	885,471585
Vicositat	0,000271	0,000271	0,000295	0,000295	0,000312	0,000312	0,000312	0,000312
P entrada tram (kPa)	217,654577	217,399342	217,226954	216,894202	216,539896	216,311247	216,028954	215,759825
4f	0,013198	0,013159	0,013119	0,013104	0,013042	0,012917	0,012911	0,012398
Pèrdues extres (kPa)	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
K enxamplament	0,953966663	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
K total accessoris	1,953967	0,750000	1,750000	1,750000	1,000000	1,000000	1,000000	1,750000
DN	24,000000	24,000000	24,000000	24,000000	24,000000	24,000000	24,000000	24,000000
Dexterior	0,609600	0,609600	0,609600	0,609600	0,609600	0,609600	0,609600	0,609600
gruix	9,525000	9,525000	9,525000	9,525000	9,525000	9,525000	9,525000	9,525000
D interior	0,590550	0,590550	0,590550	0,590550	0,590550	0,590550	0,590550	0,590550
AZ (altura en m)	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

V (m/s)	0,519263	0,535905	0,594206	0,602084	0,664431	0,742620	0,745612	1,309909
g*z	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Leq	87,429610	33,657976	78,773500	78,868350	45,279264	45,720545	45,740275	83,360550
ev acc	0,263428	0,107698	0,308945	0,317192	0,220735	0,275742	0,277969	1,501379
ev recte	0,032752	0,092345	0,071556	0,087957	0,038366	0,043785	0,026314	0,055833
ev tram	0,296180	0,200043	0,380501	0,405148	0,259101	0,319527	0,304282	1,557212
AP (Pa)	255,23	172,39	332,75	354,31	228,65	282,29	269,13	1378,87
P sortida tram (kPa)	217,40	217,23	216,89	216,54	216,31	216,03	215,76	214,38

11.11.3.5 Circuit d'aigua glicolada

Reynolds	104165,32		104165,32		360416,84		104165,32
Tram	Tanc aigua glicolada - Bomba	Bomba	Bomba-Condensador	Condensador	Condensador - Chiller	Chiller	Chiller-Tanc
Cabal (Kg/s)	162,5833333		162,5833333		162,5833333		162,5833333
Cabal(m3/s)	0,15		0,15		0,16		0,15
Longitud de tram	4,185000		63,340000		36,245000		52,075000
Densitat	1080		1080		1041		1080
Vicositat	0,004535657		0,004535657		0,001310866		0,004535657
P entrada tram (kPa)	101,400000		154,00	151,36	142,56	140,61	135,61
4f	0,018343		0,018343		0,015112		0,018343
Pèrdues extres (kPa)	0,000000			8,8		5	
K enxamplament							
K total accessoris	0,750000		2,250000		2,250000		0,750000
DN	18,000000		18,000000		18,000000		18,000000
Dexterior	0,457200		0,457200		0,457200		0,4572
gruix (mm)	9,525000		9,525000		9,525000		9,525000
D interior	0,438150		0,438150		0,438150		0,438150
AZ (altura en m)	0,000000		0		0		0,000000

V (m/s)	0,998428		0,998428		1,035833		0,998428
g*z	0,000000		0,000000		0,000000		0,000000
Leq	17,914847		53,744542		65,237523		17,914847
ev acc	0,373822		1,121466		1,207069		0,373822
ev recte	0,087327		1,321690		0,670630		1,086628
ev tram	0,461149		2,443156		1,877699		1,460450
AP (Pa)	498,04		2638,61	8800,00	1954,68	5000,00	1577,29
P sortida tram (kPa)	100,90	154,00	151,36	142,56	140,61	135,61	134,03

Reynolds	46625,34		46625,34		161325,85		135697,03
Tram	Tanc aigua glicolada - Bomba	Bomba	Bomba-Bescanviador 0213	Bescanviador 0213	Bescanviador 0213 - Unió		Tanc aigua glicolada - Bomba MA
Cabal (Kg/s)	33,67		33,67		33,67		285,4677778
Cabal(m3/s)	0,03		0,03		0,03		0,26
Longitud de tram	0,415		51,605		35,395		1
Densitat	1080		1080		1041		1080
Vicositat	0,004535657		0,004535657		0,001310866		0,004535657
P entrada tram (kPa)	101,400000	101,38	190,00	186,43	186,43		184,02
4f	0,021952		0,021952		0,017813		0,017325
Pèrdues extrems (kPa)	0,000000			4,046			
K enxamplament							
K total accessoris	0		1,5		1,5		0
DN	8,000000		8,000000		8,000000		24,000000
Dexterior	0,219075		0,219075		0,219075		0,6096
gruix (mm)	8,178800		8,178800		8,178800		9,525
D interior	0,202717		0,202717		0,202717		0,590550
AZ (altura en m)	0,000000		0		0		0
V (m/s)	0,965934		0,965934		1,002122		0,965006

g*z	0,000000		0,000000		0,000000	0,000000
Leq	0,000000		13,851617		17,070421	0,000000
ev acc	0,000000		0,699771		0,753186	0,000000
ev recte	0,020965		2,607038		1,561708	0,013660
ev tram	0,020965		3,306810		2,314894	0,013660
AP (Pa)	22,64		3571,35		2409,80	14,75
P sortida tram (kPa)	101,38	190,00	186,43	186,43	184,02	184,00

Reynolds		135697,03		469518,04	483278,17		139673,89
Tram	Bomba MA	Bomba-Bescanviador 0401	Bescanviador 0401	Bescanviador 0401 - Unió	Unió - chiler	Chiller	Chiller-Tanc pulmó
Cabal (Kg/s)		285,4677778		285,4677778	319,11		319,11
Cabal(m3/s)		0,26	#¡DIV/0!	0,27	0,31		0,30
Longitud de tram		146,305		36,245	0,6		57,075
Densitat		1080		1041	1041		1080
Vicositat		0,004535657		0,001310866	0,001310866		0,004535657
P entrada tram (kPa)	184,00	275,00	271,71	191,00	189,37	188,58	188,58
4f		0,017325		0,014313	0,014184		0,017194
Pèrdues extres (kPa)			111,5			5	
K enxamplament							
K total accessoris		2,25		2,25	1,677057		0,75
DN		24,000000		24,000000	26,000000		26,000000
Dexterior		0,6096		0,6096	0,6604		0,6604
gruix (mm)		9,525		9,525	9,525		9,525

D interior		0,590550		0,590550	0,641350		0,641350
AZ (altura en m)		0		0	0		0
V (m/s)		0,965006		1,001159	0,948876		0,914611
g*z		0,000000		0,000000	0,000000		0,000000
Leq		76,695514		92,833201	75,829219		27,976143
ev acc		1,047642		1,127610	0,754983		0,313693
ev recte		1,998490		0,440254	0,005974		0,639974
ev tram		3,046131		1,567864	0,760957		0,953667
AP (Pa)		3289,82		1632,15	792,16		1029,96
P sortida tram (kPa)	275,00	271,71	191,00	189,37	188,58	188,58	187,55

11.11.3.6 Circuit d'aigua

Reynolds	837978,69		838392,03	837978,69		862965,91	838392,03		838392,03		1031872,41	215084,52	37328,72
Tram	aigua entrada bomba	Bomba	bomba-besc	bifurcació	Bescanviador	sortida 65°	aigua-segona T	Bomba	bomba-besc	bescanviador	sortida 100°	besc 2034	besc 2032
Cabal (Kg/s)	90,28		90,28	90,28		44,88	90,28		90,28		34,83	7,26	1,26
Cabal(m3/s)	0,09		0,09	0,09		0,05	0,09		0,09		0,04	0,01	0,00
Longitud de tram	2,00		20,70	2,70		23,105	54,22		2,00		0,67	2,45	3,61
Densitat	1007,00		1007,00	1007,00		976,5	1007,00		1007,00		947,9	947,9	947,9

Vicositat	0,00		0,00	0,00		0,000429 84	0,00		0,00		0,000278 98	0,000278 98	0,000278 98
P entrada tram (kPa)	101,5000 00	90,36	210,00	135,76	173,18	168,56	157,05	65,76	202,00	199,60	193,60	190,71	190,69
4f	0,015873		0,01587 3	0,01587 3		0,015850	0,01587 3		0,01587 3		0,015723	0,017637	0,023197
Pèrdues extres (kPa)					4,62					6			
K enxamplament													
K total accessoris	0,75		0,00	0,75		1,5	2,25		0,00		1,5	0,00	2,25
DN	6,000000	6,0000 00	6,00000 0	6,00000 0	6,000000	6,000000	6,00000 0		6,00000 0		6,000000	6,000000	6,000000
Dexterior	0,168275		0,16827 5	0,16827 5		0,168275	0,16827 5		0,16827 5		0,168275	0,168275	0,168275
gruix (mm)	7,112000		7,11200 0	7,11200 0		7,112	7,11200 0		7,112		7,112	7,112	7,112
D interior	0,154051	0,0000 00	0,15405 1	0,15405 1	0,000000	0,154051	0,15405 1		0,15405 1		0,154051	0,154051	0,154051
AZ (altura en m)	0,00		5,00	-5,00		0	0,00		0,00		0	0,00	0,00
V (m/s)	4,809979		4,80997 9	4,80997 9		2,465822	4,80997 9		4,80997 9		1,971388	0,410918	0,071316
g*z	0,000000		49,0500 00	- 49,0500 00	0,000000	0,000000	0,00000 0		0,00000 0		0,000000	0,000000	0,000000
Leq	7,278851		0,00000 0	7,27885 1		14,57850 2	21,8370 82		0,00000 0		14,69665 9	0,000000	14,94233 4
ev acc	8,675961		0,00000 0	8,67596 1		4,560208	26,0278 82		0,00000 0		2,914777	0,000000	0,005722

ev recte	2,383882		24,6725 80	3,21824 0		7,227327	64,6195 13		2,38382 4		0,132881	0,023633	0,001382
ev tram	11,05984 3		24,6725 80	11,8942 01		11,78753 4	90,6473 95		2,38382 4		3,047657	0,023633	0,007104
AP (Pa)	11137,26	0,00	74238,6 4	- 37415,8 9	4620,00	11510,53	91281,9 3	0,00	2400,51	6000,00	2888,87	22,40	6,73
P sortida tram (kPa)	90,36	210,00	135,76	173,18	168,56	157,05	65,76	202,0 0	199,60	193,60	190,71	190,69	190,68

Reynolds	28737,19	751018,25	1145200,57	838392,03		838392,03	#iDIV/0!	5494,61	1150174,51
Tram	besc 2031	sobra	junts 65º y 100º	aigua- primera T	bomba	bomba- condensador	Condensador	sortida 30º	tot junt fins mediambient
Cabal (Kg/s)	0,97	25,35	54,55	90,28		90,28		0,53	55,08
Cabal(m3/s)	0,00	0,03	0,06	0,09		0,09		0,00	0,06
Longitud de tram	2,46	13,40	25,455	63,00		52,00		4,45	203,45
Densitat	947,9	947,9	971,5	1007,00		1007,00		1004	971,8
Vicositat	0,00027898	0,00027898	0,000393694	0,00		0,00		0,00079723	0,0003958
P entrada tram (kPa)	190,68	190,68	187,86	169,84	85,49	1125,00	1062,59	1053,79	1053,79
4f	0,024491	0,015962	0,015656	0,015873		0,015873		0,037180	0,015654
Pèrdues extres (kPa)							8,8		
K enxamplament									
K total accessoris	0,75	1,50	1,5	0,75		0,00		0	1,5

DN	6,000000	6,000000	6,000000	6,000000		6,000000		6,000000	6,000000
Dexterior	0,168275	0,168275	0,168275	0,168275		0,168275		0,168275	0,168275
gruix (mm)	7,112	7,112	7,112	7,112		7,112		7,112	7,112
D interior	0,154051	0,154051	0,154051	0,154051		0,154051		0,154051	0,154051
AZ (altura en m)	0,00	0,00	0	0,00		0,00		0	5
V (m/s)	0,054902	1,434817	3,012541	4,809979		4,809979		0,028322	3,040872
g*z	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000		0,000000		0,000000	49,050000
Leq	4,717617	14,476565	14,759191	7,279027		0,000000		0,000000	14,761695
ev acc	0,001130	1,544025	6,806554	8,675961		0,000000		0,000000	6,935176
ev recte	0,000589	1,429202	11,739183	75,090460		61,979428		0,000431	95,582624
ev tram	0,001720	2,973227	18,545737	83,766421		61,979428		0,000431	102,517800
AP (Pa)	1,63	2818,32	18017,18	84352,79	0,00	62413,28	8800,00	0,43	147293,59
P sortida tram (kPa)	190,68	187,86	169,84	85,49	1125,00	1062,59	1053,79	1053,79	906,49

11.11.3.7 Circuit de fuel

Reynolds	222266,14	126648,26		126648,26	178065,40		178065,40	82236,95	161877,64
Tram	Tanc flash - Bifurc	Bifurc CG - Bomba	Bomba (cogeneració)	Bomba-CG	Bifurc Calderes-Bomba	Bomba (calderes)	Bomba-Bifurc 1	Bifurc 1 - Caldera 1	Bifurc 1 - Bifurc 2
Cabal (Kg/s)	5,61	1,87		1,87	3,74		3,74	0,551	3,4
Cabal(m3/s)	0,33	0,11		0,11	0,22		0,22	0,03	0,20

Longitud de tram	0,665	1		222,86	1		16,555	1,36	6,4
Densitat	17	17		17	17		17	17	17
Vicositat	0,00020861	0,00020861		0,00020861	0,00020861		0,00020861	0,00020861	0,00020861
P entrada tram (kPa)	1500,000000	1500,965260	1497,879564	1710,000000	1500,965260	1500,611233	1720,000000	1714,055700	1714,055700
4f	0,017574	0,019887		0,019887	0,018378		0,018378	0,023187	0,018579
Pèrdues extres (kPa)									
K enxamplament									
K total accessoris	0,000000	1,000000		0,750000	0,000000		0,000000	1,000000	1,000000
DN	6,000000	3,500000		3,500000	5,000000		5,000000	1,500000	5,000000
Dexterior	0,168275	0,101600		0,101600	0,141300		0,1413002	0,04826	0,1413002
gruix (mm)	7,112000	5,7404		5,740400	6,553200		6,5532	3,683	6,5532
D interior	0,154051	0,090119	0,000000	0,090119	0,128194		0,128194	0,040894	0,128194
AZ (altura en m)	-7,000000	0,000000		0,000000	0,000000		0,500000	0,000000	0,000000
V (m/s)	17,704963	17,245197		17,245197	17,045069		17,045069	24,677071	15,495517
g*z	-68,670000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000		4,905000	0,000000	0,000000
Leq	0,000000	4,531673		3,398755	0,000000		0,000000	1,763692	6,900038
ev acc	0,000000	148,698402		111,523801	0,000000		0,000000	304,478917	120,055524
ev recte	11,889999	32,813138		7312,735882	20,825112		344,759734	234,786646	111,355228
ev tram	11,889999	181,511540		7424,259683	20,825112		344,759734	539,265562	231,410752
AP (Pa)	-965,26	3085,70		126212,41	354,03		5944,30	9167,51	3933,98

P sortida tram (kPa)	1500,97	1497,88	1710,00	1583,79	1500,61	1720,00	1714,06	1704,89	1710,12
----------------------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

Reynolds	161877,64	76117,68	172490,55	76117,68	152197,55	76117,68	138161,74	76117,68	119833,25	76117,68	93203,64	59202,64	82725,44	76117,68	34540,44
Tram	Bifurc 1 - Bifurc 2	Bifurc 2 - Caldera 2	Bifurc 2 - Bifurc 3	Bifurc 3 - Caldera 3	Bifurc 3 - Bifurc 4	Bifurc 4 - Caldera 4	Bifurc 4 - Bifurc 5	Bifurc 5 - Caldera 5	Bifurc 5 - Bifurc 6	Bifurc 6 - Caldera 6	Bifurc 6 - Bifurc 7	Bifurc 7 - Caldera 7	Bifurc 7 - Bifurc 8	Bifurc 8 - Caldera 8	Bifurc 8 - Caldera 9
Cabal (Kg/s)	3,4	0,51	2,89	0,51	2,55	0,51	2,04	0,51	1,53	0,51	1,19	0,34	0,85	0,51	0,51
Cabal(m ³ /s)	0,20	0,03	0,17	0,03	0,15	0,03	0,12	0,03	0,09	0,03	0,07	0,02	0,05	0,03	0,03
Longitud de tram	6,4	1,36	6,4	1,36	6,4	1,36	6,4	1,36	15,12	0,98	6,4	0,98	6,4	0,98	7,38
Densitat	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Vicositat	0,00020861	0,00020861	0,00020861	0,00020861	0,00020861	0,00020861	0,00020861	0,00020861	0,00020861	0,00020861	0,00020861	0,00020861	0,00020861	0,00020861	0,00020861
P entrada tram (kPa)	1714,055700	1710,121717	1710,121717	1702,163391	1702,163391	1695,922524	1695,922524	1688,706385	1688,706385	1669,177861	1669,177861	1664,192710	1664,192710	1657,001897	1657,001897
4f	0,018579	0,023369	0,018939	0,023369	0,019192	0,023369	0,019695	0,023369	0,020369	0,023369	0,020976	0,024567	0,021838	0,023369	0,024197

Pèrdues extres (kPa)																
K enxamplament																
K total accessoris	1,00000 0	1,00000 0	1,00000 0	1,00000 0	1,00000 0	1,00000 0	1,00000 0	1,00000 0	2,50000 0	1,00000 0	1,00000 0	1,00000 0	1,00000 0	1,00000 0	1,75000 0	
DN	5,00000 0	1,50000 0	4,00000 0	1,50000 0	4,00000 0	1,50000 0	3,50000 0	1,50000 0	3,00000 0	1,50000 0	3,00000 0	1,25000 0	2,50000 0	1,50000 0	3,50000 0	
Dexterior	0,14130 02	0,04826	0,1143	0,04826	0,1143	0,04826	0,1016	0,04826	0,0889	0,04826	0,0889	0,04216 4	0,07302 5	0,04826	0,1016	
gruix (mm)	6,5532	3,683	6,0198	3,683	6,0198	3,683	5,7404	3,683	5,4864	3,683	5,4864	3,556	5,1562	3,683	5,7404	
D interior	0,12819 4	0,04089 4	0,10226 0	0,04089 4	0,10226 0	0,04089 4	0,09011 9	0,04089 4	0,07792 7	0,04089 4	0,07792 7	0,03505 2	0,06271 3	0,04089 4	0,09011 9	
AZ (altura en m)	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	
V (m/s)	15,4955 17	22,8408 46	20,6987 47	22,8408 46	18,2636 01	22,8408 46	18,8129 42	22,8408 46	18,8701 12	22,8408 46	14,6767 54	20,7259 53	16,1871 54	22,8408 46	4,70323 5	
g*z	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	0,00000 0	
Leq	6,90003 8	1,74994 1	5,39939 5	1,74994 1	5,32814 6	1,74994 1	4,57573 9	1,74994 1	9,56452 0	1,74994 1	3,71510 3	1,42678 7	2,87172 2	1,74994 1	6,51774 7	

ev acc	120,055 524	260,852 126	214,219 073	260,852 126	166,779 555	260,852 126	176,963 387	260,852 126	445,101 422	260,852 126	107,703 554	214,782 563	131,011 984	260,852 126	19,3553 70
ev recte	111,355 228	202,726 172	253,917 709	202,726 172	200,330 301	202,726 172	247,515 344	202,726 172	703,635 294	146,082 095	185,540 667	147,525 073	291,976 966	146,082 095	21,9159 54
ev tram	231,410 752	463,578 298	468,136 782	463,578 298	367,109 856	463,578 298	424,478 732	463,578 298	1148,73 6716	406,934 221	293,244 220	362,307 636	422,988 950	406,934 221	41,2713 24
AP (Pa)	3933,98	7880,83	7958,33	7880,83	6240,87	7880,83	7216,14	7880,83	19528,5 2	6917,88	4985,15	6159,23	7190,81	6917,88	701,61
P sortida tram (kPa)	1710,12	1702,24	1702,16	1694,28	1695,92	1688,04	1688,71	1680,83	1669,18	1662,26	1664,19	1658,03	1657,00	1650,08	1656,30

11.11.3.8 Circuit de CO2

Reynolds	324904,32	212777,87	483643,37
Tram	Colector de CO2 fins unió amb cogeneració	El que arriba de cogeneració	Compressor
Cabal (Kg/s)	11,77	5,75	17,52
Cabal(m3/s)	24,59	12,01	36,60
Longitud de tram	233,570000	2,210000	9,720000
Densitat	0,478600	0,478600	0,478600
Vicositat	0,000038	0,000038	0,000038
P entrada tram (kPa)	101,300000	101,300000	900,000000
4f	0,014618	0,015821	0,013742
Pèrdues extres (kPa)	0,000000	0,000000	0,000000
K enxamplament		0,196636	0,000000
K total accessoris	3,750000	1,196636	3,250000
DN	48,000000	36,000000	48,000000

Dexterior	1,219200	0,914400		1,219200
gruix	9,525000	9,525000		9,525000
D interior	1,200150	0,895350		1,200150
AZ (altura en m)	0,000000	0,000000		3,650000
V (m/s)	21,737316	19,081811		32,357554
g*z	0,000000	0,000000		35,806500
Leq	307,867898	67,721521		283,832864
ev acc	885,957989	217,856876		1701,393312
ev recte	672,149351	7,109464		58,265075
ev tram	1558,107339	224,966340		1759,658387
AP (Pa)	745,71	107,67	#¡VALOR!	859,31
P sortida tram (kPa)	100,55	101,19	900	899,14

11.11.3.9 Circuit de càrrega

Reynolds	115279,35		115279,35
Tram	Tram abans de la bomba que va als tancs	Bomba	Tram fins arribar al dosificador dels tancs
Cabal (Kg/s)	10,87		10,87
Cabal(m3/s)	0,01		0,01
Longitud de tram	5,400000		107,395000
Densitat	872,200000		872,200000
Vicositat	0,000592		0,000592
P entrada tram (kPa)	101,300000	101,267624	120,000000
4f	0,018709		0,018709
Pèrdues extres (kPa)	0,000000		0,000000
K enxamplament			
K total accessoris	0,000000		4,500000
DN	8,000000		8,000000

Dexterior	0,219075		0,219075
gruix (mm)	8,178800		8,178800
D interior	0,202717		0,202717
AZ (altura en m)	0,000000		0,000000
V (m/s)	0,385966		0,385966
g*z	0,000000		0,000000
Leq	0,000000		48,760030
ev acc	0,000000		0,335181
ev recte	0,037120		0,738244
ev tram	0,037120		1,073425
AP (Pa)	32,38		936,24
P sortida tram (kPa)	101,27	120,00	119,06

11.11.3.10 Circuit de descàrrega

Reynolds	124105,62		124105,62
Tram	Tram abans de la bomba que va als tancs	Bomba	Tram fins arribar al dosificador dels tancs
Cabal (Kg/s)	11,87		11,87
Cabal(m3/s)	0,01		0,01
Longitud de tram	5,400000		90,695000
Densitat	863,609674		863,609674
Vicositat	0,000557		0,000557
P entrada tram (kPa)	101,300000	101,273693	120,000000
4f	0,018406		0,018406
Pèrdues extres (kPa)	0,000000		0,000000
K enxamplament			
K total accessoris	0,000000		4,500000
DN	8,000000		8,000000

Dexteror	0,219075		0,219075
gruix (mm)	0,202717		0,202717
D interior	0,218670		0,218670
AZ (altura en m)	0,000000		0,000000
V (m/s)	0,366115		0,366115
g*z	0,000000		0,000000
Leq	0,000000		53,462690
ev acc	0,000000		0,301590
ev recte	0,030462		0,511622
ev tram	0,030462		0,813212
AP (Pa)	26,31		702,30
P sortida tram (kPa)	101,27	120,00	119,30

11.11.3.11 Circuit de la canonada de refrigeració d'emergència del reactor R-0201

Reynolds	185639,94		185639,94	185639,94
Tram	Abans de la bomba	bomba	Circuit sencer	Retorn
Cabal (Kg/s)	20,00		20,00	20,00
Cabal(m3/s)	0,02		0,02	0,02
Longitud de tram	11,360000		177,050000	176,000000
Densitat	1007,00		1007,00	1007,00
Vicositat	0,00		0,00	0,00
P entrada tram (kPa)	101,300000	100,543885	150,000000	136,071802
4f	0,017935		0,017935	0,017935

Pèrdues extres (kPa)	0,000000		0,000000	0,000000
K enxamplament				
K total accessoris			3,750000	3,750000
DN	6,000000		6,000000	6,000000
Dexterior	0,168275		0,168275	0,168275
gruix	7,112000		7,112000	7,112000
D interior	0,154051		0,154051	0,154051
AZ (altura en m)	0,000000		0,000000	0,000000
V (m/s)	1,065569		1,065569	1,065569
g*z	0,000000		0,000000	0,000000
Leq	0,000000		32,209518	32,209518
ev acc	0,000000		2,128945	2,128945
ev recte	0,750859		11,702433	11,633032
ev tram	0,750859		13,831378	13,761977
AP (Pa)	756,12	0,00	13928,20	13858,31
P sortida tram (kPa)	100,54	150,00	136,07	122,21

11.11.3.12 Canonada de transport de l'àcid carbònic

Reynolds	222769,70
----------	-----------

Tram	El que surt de l'absorbidor fins el tanc
Cabal (Kg/s)	76,66
Cabal(m3/s)	0,08
Longitud de tram	44,715000
Densitat	1000,000000
Vicositat	0,001000
P entrada tram (kPa)	900,000000
4f	0,016161
Pèrdues extres (kPa)	0,000000
K enxamplament	
K total accessoris	2,250000
DN	18,000000
Dexterior	0,457200
gruix (mm)	9,525000
D interior	0,438150
AZ (altura en m)	29,000000
V (m/s)	0,508432
g*z	284,490000
Leq	61,001175
ev acc	0,290817
ev recte	0,213174
ev tram	0,503991
AP (Pa)	284993,99
P sortida tram (kPa)	615,01

11.11.3.13 Circuit de la línia de vapor

Reynolds	7276,65	8543,73	9521,19	1787,34	8917,82		8917,82
----------	---------	---------	---------	---------	---------	--	---------

Tram	BC-2034	BC-2032	BC-2031	BC-2010	fins la bomba	compressor	estacio electrica
Cabal (Kg/s)	7,236	8,496	9,468	0,6	8,868		8,868
Cabal(m3/s)	8,66	10,17	11,33	0,72	10,61		10,56
Longitud de tram	20,57	2,30	28,15	6,91	50,00		
Densitat	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84		0,84
Vicositat	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00
P entrada tram (kPa)	101,500000	101,39	101,38	101,20	101,19	96,44	160,00
4f	0,033940	0,032434	0,031474	0,053301	0,032049		0,032049
Pèrdues extrems (kPa)					4,62		
K enxamplament							
K total accessoris	1,50	0,00	0,75	0,75	0,00		2,25
DN	40,000000	40,000000	40,000000	14,000000	40,000000		40,000000
Dexterior	1,016000	1,016000	1,016000	0,355600	1,016000		1,016
gruix (mm)	9,525000	9,525	9,525000	9,525000	9,525000		9,525000
D interior	0,996950	0,996950	0,996950	0,336550	0,996950		0,996950
AZ (altura en m)	0,00		5,00	-5,00			
V (m/s)	11,092042	13,023493	14,513468	8,070711	13,593730		13,524143
g*z	0,000000	0,000000	49,050000	-49,050000	0,000000		0,000000
Leq	44,060439	0,000000	23,756291	4,735602	0,000000		69,990788
ev acc	92,275053	0,000000	78,990286	24,426139	0,000000		205,765256
ev recte	43,068942	6,345699	93,599482	35,641641	148,511106		0,000000
ev tram	135,343994	6,345699	172,589768	60,067780	148,511106		205,765256
AP (Pa)	113,11	5,30	185,22	9,21	4744,11	0,00	172,84
P sortida tram (kPa)	101,39	101,38	101,20	101,19	96,44	160,00	159,83

11.11.4 Càlcul de bombes, expandors i bufadors

Per determinar la potència dels equips d'impulsió s'ha fet de manera diferent depenent de la fase del corrent.

11.11.4.1 Bombes

Equips d'impulsió utilitzats per donar pressió a líquids. La seva potència s'ha determinat a partir d'un balanç d'energia mecànica tenint en compte només la variació de pressió:

$$\frac{\Delta P}{\rho} = W_s$$

$$kW \text{ de bomba} = W_s \cdot \rho \cdot F$$

A continuació es procedeix a realitzar un exemple de càlcul de la bomba BM-101:

$$kW \text{ de bomba} = \frac{(4000 - 66,01) \cdot 1000}{872,2} \cdot 872,2 \cdot \frac{0,012}{1000} = 47,2 \text{ kW}$$

11.11.4.2 Compressors i expandors

Equips d'impulsió utilitzats per donar pressió a gasos. La seva potència s'ha determinat a partir de la següent expressió:

$$W_s = N \cdot \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{R \cdot T}{PM} \cdot \left(\left(\frac{P_N}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma \cdot N}} - 1 \right)$$

On:

- N és el nombre d'etapes de compressió expansió.
- γ és el coeficient de relació adiabàtic.
- PM és el pes molecular del gas.
- R la constant dels gasos ideals 8314,5.

A continuació es procedeix a realitzar un exemple de càlcul del compressor CP-203:

$$kW = 1 \cdot \frac{1,067}{1,067 - 1} \cdot \frac{8314,5 \cdot (329,6 + 273)}{79,62} \cdot \left(\left(\frac{1971,87}{837,87} \right)^{\frac{1,067-1}{1,067 \cdot 1}} - 1 \right) \cdot 8 \frac{Kg}{s} \cdot \frac{1}{1000}$$
$$= 442,42 \text{ kW}$$

11.11.5 Càlcul del gruix d'aïllant de les canonades.

Tal i com s'indica al capítol 4 de canonades, per tal de determinar el gruix per les canonades s'ha utilitzat la taula 11.29 proporcionada per l'empresa d'aïllants Rockwool.

Taula 11.29: Gruix d'aïllant de llana de roca (mm) per a diferents diàmetres i rangs de temperatura.

DN (mm)	Temperatura (°C)					
	40 a 65	66 a 100	101 a 150	151 a 200	201 a 250	251 a 300
D<35	20	20	30	40	50	60
35<D<60	20	30	40	40	50	60
60<D<90	30	30	40	50	60	70
90<D<140	30	40	50	50	60	70
140<D	30	40	50	60	70	80

No obstant això, determinades canonades tant de procés com de serveis, operen a temperatures superiors i inferiors a les que ofereix la taula. Es per això que, veient que segueix una tendència lineal, s'ha decidit aproximar-ho a una recta, fent una regressió lineal per a cada interval de diàmetre de canonades. Obtenint així una equació que relaciona la Temperatura i el diàmetre de les mateixes amb el gruix que li correspon, com s'indica a la Taula 11.30:

Taula 11.30 Regressió lineal per intervals de diàmetre

Diàmetre Nominal	Equació del gruix en f(T)
D<35	$\Delta x = 0,1863x + 7,942$
35<D<60	$\Delta x = 0,1578x + 15,671$
60<D<90	$\Delta x = 0,1863x + 17,945$
90<D<140	$\Delta x = 0,1578x + 25,671$
140<D	$\Delta x = 0,2137x + 22,055$

No obstant això, aquestes equacions no son valides quan en les canonades hi circulen fluids a temperatures sota zero, ja que podrien arribar a donar gruixos negatius i això no és físicament possible. Per tant, en canonades en les que hi circulaven fluids en aquest rang de temperatures

el que s'ha fet ha estat mirar el salt tèrmic, respecte la temperatura ambient, associar-lo al rang de temperatures amb el mateix salt tèrmic que proporciona la taula i utilitzar els respectius gruixos.

11.12 Disseny mecànic dels equips a pressió

11.12.1 Determinació del gruix de la paret cilíndrica

Per determinar el gruix mínim de la paret cilíndrica, es calcula de dues maneres diferents. Per una banda, tenint en compte l'estrès radial i per altra el longitudinal.

D'aquesta manera s'obtenen dos valors pel gruix mínim, pel moment es seleccionaria el valor més gran.

Pel que fa a l'efecte radial l'equació és la següent, tal i com està definida al codi ASME:

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

A aquesta equació:

- P : Pressió del recipient, tenint en compte que en, cas de haver líquid, també s'ha de considerar la pressió provocada per la columna de líquid.
- R : Radi intern del tanc
- S : Límit elàstic del material, en aquest cas d'ha utilitzat acer AISI 316L.
- E : Coeficient d'eficiència de la soldadura, en aquest cas s'ha agafat un valor de 0.75.

Per altra banda, el gruix mínim per l'estrès longitudinal es calcula de la següent manera, també segons el codi ASME Secció VIII:

$$t = \frac{PR}{2SE + 0.4P}$$

Un exemple de càlcul del gruix mínim de la paret cilíndrica seria:

Primer de tot és calculada la pressió de la columna de líquid per tenir la pressió amb la que s'ha de dissenyar.

$$P = P_{op} + P_{líquid} = P_{op} + \rho g \Delta h = 2 \text{ MPa} + \frac{845.6 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 6.78 \text{ m}}{10^6} = 2.053 \text{ MPa}$$

Es podria sobredimensionar aquesta pressió en un 10-20% per tenir una pressió disseny més elevada, però en aquest cas s'agafarà un gruix significativament més gran que el mínim per defecte, ja que s'afegiran uns 5mm addicionals als mínim per

evitar la corrosió del material i uns altres 5mm més com a marge de seguretat i, en cas que s'obtingui una pressió màxima admissible que no doni un marge que es consideri raonable, per temes de seguretat s'afegiria més.

Ara com a exemple de càlcul del gruix mínim per l'estrès radial es realitza el càlcul pel flash:

$$t = \frac{2.053 \text{ MPa} \cdot 847.5 \text{ mm}}{115 \text{ MPa} \cdot 0.75 - 0.6 \cdot 2.053 \text{ MPa}} = 20.47 \text{ mm}$$

Ara s'haurà de calcular el gruix segons l'estrès longitudinal.

$$t = \frac{2.053 \text{ MPa} \cdot 847.5 \text{ mm}}{2 \cdot 115 \text{ MPa} \cdot 0.75 + 0.4 \cdot 2.053 \text{ MPa}} = 10.0 \text{ mm}$$

Segons aquest càlcul el gruix mínim seria de 20.47mm. Però abans, s'ha de determinar el gruix de les tapes de l'equip; i això depèn de la forma de les mateixes.

11.12.2 Determinació del gruix mínim de les tapes de l'equip

Per realitzar aquest càlcul, el primer de tot es determinar la forma de les tapes del tanc. A Ebsyn S.L. s'ha optat per les tapes toriesfèriques ja que, a causa de la seva bona resistència a la pressió, són àmpliament utilitzades a la indústria.

Venen definides per un arc exterior de radi L i dos arcs més petits per radis petits r que són el 10% del radi gran. De fet es defineix un paràmetre M que es fa servir per relacionar aquests valors:

$$M = \frac{1}{4} \left(3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right)$$

Una vegada es defineixen els dos radis desitjats ja es pot procedir a calcular el gruix mínim per la tapa toriesfèrica, s'utilitzaria la següent equació.

$$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P}$$

Continuant amb l'exemple de càlcul anterior, es faria el càlcul de la següent manera:

$$t = \frac{2.053 \text{ MPa} \cdot 1600 \text{ mm} \cdot 1.541}{2 \cdot 0.75 \cdot 115 \text{ MPa} - 0.2 \cdot 2.053 \text{ MPa}} = 29.41 \text{ mm}$$

Com aquest és el valor més gran de gruix mínim, seria el gruix mínim de l'equip.

Tenint en compte el marge de 5 mm de corrosió que s'ha volgut deixar, i que es vol tenir un ampli marge de seguretat, s'augmenta el gruix cap als 45mm per tenir el gruix final de l'equip.

11.12.3 Determinació de la pressió màxima admissible

Una vegada es decideix el valor del gruix final de l'equip es poden utilitzar una sèrie d'equacions per determinar la màxima pressió admissible per l'equip. S'han de comparar el valor per la paret cilíndrica i per la tapa torisfèrica.

$$MAWP_p = t \cdot \frac{SE}{R + 0.6t}$$

$$MAWP_t = t \frac{2SE}{LM + 0.2t}$$

Una vegada es tinguin tots dos valors, s'hauria de donar com a definitiu el valor més baix per seguretat.

$$MAWP_p = 40mm \frac{0.75 \cdot 115MPa}{847.5mm + 0.6 \cdot 40mm} = 3.96MPa$$

$$MAWP_t = 40mm \frac{2 \cdot 0.75 \cdot 115MPa}{1600mm \cdot 1.541 + 0.2 \cdot 40mm} = 2.79MPa$$

Per tant, en aquest cas, la pressió màxima admissible és de 2.79 MPa

En la següent taula es procedeix a presentar els valors de dels gruixos per a cada equip aplicant la metodologia explicada:

Taula 11.31: Gruixos dels equips a pressió de la planta TARREB23.

Equip	S (MPa)	Gruix (mm)	MAWP (KPa)
R-0202	86,6	165	5020
R-0201	86,6	160	5070
C-0201	98	85	2050
C-0202	98	45	2170
TF-0201	115	40	2790
A-0401	115	10	3720

11.13 Bibliografia

- [1] Carlson, E. C. (1996). Don't gamble with physical properties for simulations. *Chemical engineering progress*, 92(10), 35-46.
- [2] Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., & Shaeiwitz, J. A. (2008). *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. Pearson Education.
- [3] Abichandani, J. S., Beck, J. S., McCullen, S. B., & Olson, D. H. (1997). *U.S. Patent No. 5,689,025*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [4] Software de Aspen HYSYS.
- [5] Wankat, P. C. (2006). *Separation process engineering*. Pearson Education.
- [6] Poder Calorífico. (s. f.). Recuperats de: https://ingemecanica.com/tutoriales/poder_calorifico.html Data consulta 12/05/2023.
- [7] Page, E. (s. f.). *Engineering Page > Heat Exchangers > Typical Fouling Factors*. Recuperat de: https://www.engineeringpage.com/technology/thermal/fouling_factors.html Data consulta 12/05/2023.
- [8] American Petroleum Institute. (2007). *API 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage* (11th ed.). Washington D.C: API Publishing Services.
- [9] Stainless Steel World. (2017). *Metallurgical selection for piping in the process industry*. Recuperat de <https://stainless-steel-world.net/metallurgical-selection-for-piping-in-the-process-industry/> Data de consulta 04/06/2023.
- [10] Reial decret 656/2017, de 23 de juliol, pel qual s'aprova el Reglament d'emmagatzematge de productes químics i les seves instruccions tècniques complementàries MIE APQ 0 a 10, 176 § 8755 (2017).
- [11] The American Society of Mechanical Engineers. (2015). *ASME Boiler & Pressure Vessel Code: VIII Rules for construction of pressure vessels, Divison 1*. (2015 ed.). New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- [12] CAISA Metal Solutions. (2014). *Herramientas, calculadora para dimensionar un fondo toriesferico tipo Klopper*. Recuperat de <http://www.caisasl.com/es/herramientas> Data de consulta 03/06/2023.

[13] National Institute of Standards and Technology. (s. f.). *Carbon dioxide*. Recuperat de: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C124389&Mask=10> Data consulta 12/05/2023.

[14] Orchillés, A. V., Balbastre, A. V. O., & Sanchotello, M. (2007). *Mecànica de fluids* (Vol. 95). Universitat de València.