

Treball Final de Grau

Juny 2023

Planta de producció d'etilbenzè

ChemEBenz



Creating Endless
Breakthroughs

Grau en Enginyeria Química

Tutor del projecte: Rafael Bosch Palacios

UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA

Escola d'Enginyeria

Departament d'enginyeria química, biològica i ambiental

Lorente Puente, Aroa

Carreira Lopez, Pau

Aladid Pastor, Sergi

Durán Videra, Sergi

Sanchez Arco, Sergio

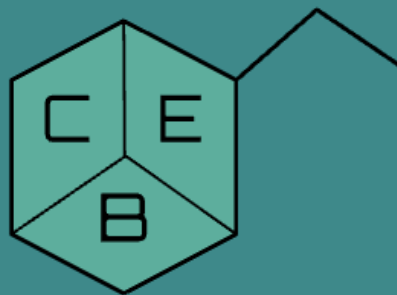
El Ballaoui El Bakkali, Dalil

Treball Final de Grau

Juny 2023

Planta de producció d'etilbenzè

ChemEBenz



Creating Endless
Breakthroughs

Capítol XI: Manual de Càlculs

Grau en Enginyeria Química

Tutor del projecte: Rafael Bosch Palacios

UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA

Escola d'Enginyeria

Departament d'enginyeria química, biològica i ambiental

Lorente Puente, Aroa

Carreira Lopez, Pau

Aladid Pastor, Sergi

Durán Videra, Sergi

Sanchez Arco, Sergio

El Ballaoui El Bakkali, Dalil



TAULA DE CONTINGUTS

11. Manual de càlculs	6
11.1 Tancs d'emmagatzematge de benzè	6
11.1.1 Càlcul del número de tancs d'emmagatzematge de benzè	6
11.1.2 Càlcul del gruix de la paret dels tancs d'emmagatzematge de benzè	7
11.1.3 Càlcul del gruix del fons i sostre dels tancs d'emmagatzematge de benzè	9
11.1.4 Càlcul del pes dels tancs d'emmagatzematge de benzè buits	10
11.1.5 Càlcul del pes dels tancs d'emmagatzematge de benzè plens	11
11.2 Tancs d'emmagatzematge d'etilbenzè	11
11.2.1 Càlcul del número de tancs d'emmagatzematge d'etilbenzè	11
11.2.2 Càlcul del gruix de la paret dels tancs d'emmagatzematge d'etilbenzè	12
11.2.3 Càlcul del gruix del fons i sostre dels tancs d'emmagatzematge d'etilbenzè	14
11.2.4 Càlcul del pes dels tancs d'emmagatzematge d'etilbenzè	14
11.2.5 Càlcul del pes dels tancs d'emmagatzematge d'etilbenzè plens	15
11.3 Seguretat	15
11.3.1 Cubeta de retenció de benzè	15
11.3.2 Cubeta de retenció d'etilbenzè	17
11.3.3 Cubeta de retenció reactors d'alquilació	18
11.3.4 Cubeta de retenció reactor de transalquilació	19
11.3.5 Ventilació	20
11.3.6 Simulació explosió	21
11.3.6.1 Límits pràctics de sobreescalfament del benzè	21
11.3.6.2 Límits pràctics de sobreescalfament de l'etilbenzè	23
11.3.6.3 BLEVE Benzè	24
11.3.6.4 BLEVE Etilbenzè	29
11.3.6.5 Sobrepressió i fragmentació Benzè	34
11.3.6.6 Sobrepressió i fragmentació Etilbenzè	40
11.3.7 Nitrogen a planta	46
11.4. Canonades i bombes	46
11.4.1 Canonades	46
11.4.2 Bombes	48
11.5 Mescladors	57
11.6 Serveis de planta	59
11.6.1 Caldera d'oli tèrmic	59
11.6.2 Torres de refrigeració	61
11.6.3 Aigua de xarxa	63
11.6.4 Electricitat	63
11.7 Medi Ambient	64
11.7.1 Cogeneració	64
11.7.2 Producció Diòxid de Carboni	66
11.8 Avaluació econòmica	68
11.8.1 Nombre d'operaris	68
11.8.2 Mètode Correlacions	69



11.8.3 Mètode Algorítmic	70
11.8.4 Estalvi cogeneració	71
11.8.5 NCFEq	71
11.9 Reactors	72
11.9.1 Disseny de reactors d'alquilació amb HYSYS	72
11.9.2 Disseny del reactor de transalquilació amb HYSYS	77
11.10 Columnes de rectificació	80
11.10.1 Gruix de les parets del reactor i columnes	86
11.11 Bescanviadors de calor	90
11.12 Bibliografia	95



11. Manual de càlculs

11.1 Tancs d'emmagatzematge de benzè

11.1.1 Càlcul del número de tancs d'emmagatzematge de benzè

Primer de tot, es calcula el volum de benzè que s'ha d'emmagatzemar als tancs per tal de garantir el subministrament a la planta durant aproximadament tres dies. El càlcul es mostra segons l'**Equació 11.1.1.E**:

$$V_{Benzè} = Q_{Benzè} \cdot \frac{24 h}{1 dia} \cdot Temps d'acumulació \quad (11.1.1.E)$$

On:

- $V_{Benzè} (m^3)$: Volum total de benzè que s'ha d'emmagatzemar. .
- $Q_{Benzè} (\frac{m^3}{h})$: Cabal de benzè que és subministrat a planta.
- *Temps d'acumulació (dies)*: Temps d'acumulació del benzè.

$$V_{Benzè} = 40,26 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{24 h}{1 dia} \cdot 3 dies = 2898,72 m^3$$

A més, per motius de seguretat el tanc no es pot omplir al 100%. S'ha establert que estarà un 75% ple. Es calcula el volum total dels tancs segons l'**Equació 11.1.1.2E**:

$$V_{Tancs} = \frac{V_{Benzè}}{0,75} = 3864,96 m^3 \quad (11.1.1.2E)$$

A continuació, s'estableixen les dimensions del tanc. S'ha proposat que cada tanc tingui 8 m de diàmetre i 10 m d'altura de paret. El motiu és que s'utilitzen xapes d'acer inoxidable AISI 304L de 4000 x 2000 mm¹ per tal d'aprofitar el màxim el material. Els tancs tenen, llavors, 5 anells compostos per 2 xapes per anell. El volum de cada tanc es calcula segons l'**Equació 11.1.1.3E** tenint en compte que té una paret cilíndrica:

¹ (Metalvin, 2023)



$$V_{1Tanc} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h = \frac{\pi}{4} \cdot 8^2 \cdot 10 = 502,65 \text{ m}^3 \text{ (11. 1. 1. 3E)}$$

Ara, es calcula el nombre de tancs segons l'**Equació 11.1.1.3E**:

$$n^{\circ}tancs = \frac{V_{Tancs}}{V_{1Tanc}} = \frac{3864,96}{502,65} = 7,69 \text{ tancs}$$

Per tal de sobredimensionar s'han escollit 9 tancs d'emmagatzematge de benzè. S'han escollit 9 en comptes de 8 per tal de tenir 3 tancs de subministrament per a cada línia de producció o reactor. Per tant, es torna a calcular el nou temps d'acumulació segons l'**Equació 11.1.1.4E** :

$$\text{Temps d'acumulació} = \frac{V_{Benzè}}{Q_{Benzè} \cdot 24h/1 \text{ dia}} = \frac{V_{1Tanc} \cdot n^{\circ}Tancs \cdot 0,75}{Q_{Benzè} \cdot 24h/1 \text{ dia}} = \frac{502,65 \text{ m}^3 \cdot 9 \cdot 0,75}{40,26 \text{ m}^3/h \cdot 24h/1 \text{ dia}} = 3,51 \text{ dies (11. 1. 1. 4E)}$$

11.1.2 Càlcul del gruix de la paret dels tancs d'emmagatzematge de benzè

Com que les condicions d'emmagatzematge són pressió atmosfèrica i temperatura ambient s'utilitza el criteri de disseny API 650 i concretament, per calcular el gruix de la paret, s'utilitza el mètode del peu (API 650 5.6.3) que es basa en el principi que la pressió màxima que exerceix el mateix fluid es troba a 1 peu dels fons del tanc. El gruix de la paret es calcula segons les **Equacions 11.1.2.1E-2E**, és dependent de l'altura del nivell de fluid i pot prendre dos valors diferents (el més elevat és el vàlid):

$$t_d = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H-0,3) \cdot G}{S_d} + CA \text{ (11. 1. 2. 1E)}; \quad t_t = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H-0,3) \cdot G}{S_t} \text{ (11. 1. 2. 2E)}$$

On:

- t_d (mm): Gruix de la paret de disseny (mm).
- t_t (mm): Gruix de la paret necessari per superar la prova hidrostàtica (mm).
- D (m): Diàmetre del tanc.
- H (m): Alçada del nivell de líquid per a cada anell (m).



- G : Gravetat específica del fluid o densitat relativa respecte l'aigua que és 0,876 pel benzè. .
- CA (mm): Factor de corrosió que depèn de la substància i del material el qual el fluid es troba en contacte.
- S_d (MPa) :Estrès permès en les condicions de disseny .
- S_t (MPa) és l'estrès permès en la prova hidrostàtica.

S_d i S_t depenen del material i es troben tabulats. No obstant això, existeixen equacions, en el cas que no ho estiguin, per calcular-los. Es mostren les **Equacions 11.1.2.3E-6E** i s'ha d'escollir els valors més petits. Els valors depenen de dues propietats físiques, el límit elàstic (E) i la tensió màxima (τ) que en el cas d'AIISI 304L són 220 MPa i 520 MPa respectivament²

$$S_d = \frac{2}{3} \cdot E = \frac{2}{3} \cdot 220 \text{ MPa} = 146,67 \text{ MPa} \quad (11.1.2.3E)$$

$$S_d = \frac{2}{5} \cdot \tau = \frac{2}{5} \cdot 520 \text{ MPa} = 208 \text{ MPa} \quad (11.1.2.4E)$$

$$S_t = \frac{3}{4} \cdot E = \frac{3}{4} \cdot 220 \text{ MPa} = 165 \text{ MPa} \quad (11.1.2.5E)$$

$$; S_d = \frac{3}{7} \cdot \tau = \frac{3}{7} \cdot 520 = 222,86 \text{ MPa} \quad (11.1.2.6E)$$

A continuació, en la **Taula 11.1.2.1T**, es mostren els valors del gruix de la paret en funció del nivell de líquid segons el mètode del peu:

Taula 11.1.2.1T: Valors de gruix de la paret segons el nivell de líquid

H (m) (líquid)	7,50	5,50	3,50	1,50	0,00
h (m) (tanc)	h=0-2 m	h=2-4 m	h=4-6 m	h=6-8 m	h=8-10 m
t_d (mm)	3,19	2,72	2,25	1,78	1,50
t_t (mm)	1,50	1,08	0,67	0,25	0,00

No obstant això, el criteri API 650, aconsella un gruix mínim de la paret en funció del diàmetre del tanc que s'ha de tenir en compte (API 650 5.6.1.1). En el nostre cas el gruix

² ("FICHAS TÉCNICA ACERO INOX.304/304L", 2023)



mínim de la paret ha de ser de 5,0 mm i per tant el gruix de tota la paret queda determinat pel criteri API 650 tal i com es mostra a la **Taula 11.1.2.2T**:

Taula 11.1.2.2T: Valors de gruix de la paret segons el criteri API 650

H (m)	7,50	5,50	3,50	1,50	0,00
h (m) (tanc)	h=0-2 m	h=2-4 m	h=4-6 m	h=6-8 m	h=8-10 m
t_D (mm)	3,19	2,72	2,25	1,78	1,50
t_t (mm)	1,50	1,08	0,67	0,25	0,00
Gruix (mm)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0

11.1.3 Càlcul del gruix del fons i sostre dels tancs d'emmagatzematge de benzè³

El gruix del fons s'ha escollit segons criteri API 650 (API 650 5.4.1) tenint en compte que el gruix mínim ha de ser de 6,0 mm per un fons pla.

El gruix del sostre depèn de la geometria. S'ha escollit un sostre cònic. El gruix es calcula segons l'equació 11.1.3.1E:

$$\Delta X_s = \frac{D}{4,8 \cdot \sin(\theta)} \quad (11.1.3.1E)$$

On:

- ΔX_s (mm) : Gruix del sostre (mm).
- D (m): Diàmetre del tanc (m).
- θ (°) : Angle d'inclinació del con (°) i està acotat.

$$\Delta X_s = \frac{8}{4,8 \cdot \sin(15)} = 6,44 \text{ mm}$$

Finalment, se sobredimensiona per a obtenir marge i s'agafa com a gruix del sostre 6,5 mm.

³ (American Petroleum Institute, 2021)

11.1.4 Càlcul del pes dels tancs d'emmagatzematge de benzè buits

Com s'ha esmentat anteriorment, s'ha escollit el material AISI 304L que té una densitat de 7900 kg/m³. Es calcula el volum de material de la paret, fons pla i sostre cònic i es multiplica per la densitat segons les **Equacions 11.1.4.1E-3E** per tal d'obtenir la massa.

$$M_{Paret} = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot ((D + 2 \cdot \Delta X p)^2 - D^2) \cdot \frac{\rho}{1000} = \frac{\pi}{4} \cdot 10 \cdot (8,01^2 - 8^2) \cdot \frac{7900}{1000} = 9,93 \text{ ton. (11.1.4.1E)}$$

$$M_{Fons} = \frac{\pi}{4} \cdot \Delta X f \cdot (D + 2 \cdot \Delta X p)^2 \cdot \frac{\rho}{1000} = \frac{\pi}{4} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 8,01^2 \cdot \frac{7900}{1000} = 2,39 \text{ ton. (11.1.4.2E)}$$

$$\begin{aligned} M_{Fons} &= \frac{\pi}{3} \cdot \left[\left(\frac{D}{2} + \Delta X c \right)^2 \cdot \left(\frac{D}{2} \cdot \tan(\theta) + \Delta X c \right) - \left(\frac{D}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{D}{2} \cdot \tan(\theta) \right) \right] \cdot \frac{\rho}{1000} = \\ &= \frac{\pi}{3} \cdot \left[\left(\frac{8}{2} + 6,5 \cdot 10^{-3} \right)^2 \cdot \left(\frac{8}{2} \cdot \tan(15) + 6,5 \cdot 10^{-3} \right) - \left(\frac{8}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{8}{2} \cdot \tan(15) \right) \right] \cdot \frac{7900}{1000} = \\ &= 1,33 \text{ ton. (11.1.4.3E)} \end{aligned}$$

On:

- $\frac{D}{2} \cdot \tan(\theta)$ (m): és l'altura h del con (1,07 m)
- $\left(\frac{D}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{D}{2} \cdot \tan(\theta) \right)$: és el volum del con buit del con (17,96 m³) que s'ha de sumar als 502,65 m³ per tal d'obtenir el volum real del tanc (520,6 m³) donant en realitat un 72,4% del volum del tanc ple.

La massa total del tanc d'emmagatzematge és la suma de les tres contribucions (11.1.4.4E) i la massa total de tots els tancs es calcula segons l'**Equació 11.1.4.5E**.

$$M_{1-Tanc} = M_{Paret} + M_{Fons} + M_{Sostre} = 9,93 + 2,39 + 1,325 = 13,65 \text{ ton. (11.1.4.4E)}$$

$$M_{Tancs} = n^a \text{ Tancs} \cdot M_{1-Tanc} = 9 \cdot 13,65 = 122,80 \text{ ton. (11.1.4.5E)}$$



11.1.5 Càlcul del pes dels tancs d'emmagatzematge de benzè plens

Pel càlcul del pes del tanc ple, només s'ha de tenir en compte el pes del fluid i sumar-lo al pes del tanc buit. Es calcula segons l'**Equació 11.1.5.1E**.

$$\begin{aligned} M_{1-Tanc\ Ple} &= M_{1-Tanc} + V_{Benzè\ emmagatzemat} \cdot \frac{\rho_{Benzè}}{1000} = 13,65 + 377m^3 \cdot \frac{876\ kg/m^3}{1000} = \\ &= 343,90\ ton. \quad (11.1.5.1E) \end{aligned}$$

11.2 Tancs d'emmagatzematge d'etilbenzè

11.2.1 Càlcul del número de tancs d'emmagatzematge d'etilbenzè

Primer de tot, es calcula el volum de benzè que s'ha d'emmagatzemar als tancs per tal de garantir el subministrament a la planta durant aproximadament tres dies. El càlcul es mostra segons l'**Equació 11.2.1.1E**:

$$V_{Etilbenzè} = Q_{Etilbenzè} \cdot \frac{24\ h}{1\ dia} \cdot Temps\ d'acumulació \quad (11.2.1.1E)$$

On:

- $V_{Etilbenzè}$ (m^3): Volum total d'etilbenzè que s'ha d'emmagatzemar. .
- $Q_{Etilbenzè}$ ($\frac{m^3}{h}$): Cabal de benzè que és subministrat a planta.
- *Temps d'acumulació* (*dies*): Temps d'acumulació de l'etilbenzè..

$$V_{Etilbenzè} = 54,98 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{24\ h}{1\ dia} \cdot 3\ dies = 3958,56\ m^3$$

A més, per motius de seguretat el tanc no es pot omplir al 100%. S'ha establert que estarà un 75% ple. Es calcula el volum total dels tancs segons l'**Equació 11.2.1.2E**:

$$V_{Tancs} = \frac{V_{Etilbenzè}}{0,75} = 5278,08\ m^3 \quad (11.2.1.2E)$$

A continuació, s'estableixen les dimensions del tanc. S'ha proposat que cada tanc tingui 8 m de diàmetre i 10 m d'altura de paret. El motiu és que s'utilitzen xapes d'acer inoxidable AISI 304L de 4000 x 2000 mm per tal d'aprofitar el màxim el material. Els tancs tenen, llavors, 5 anells compostos per 2 xapes per anell. El volum de cada tanc es calcula segons l'**Equació 11.2.1.3E** tenint en compte que té una paret cilíndrica:



$$V_{1Tanc} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h = \frac{\pi}{4} \cdot 8^2 \cdot 10 = 502,65 \text{ m}^3 \quad (11.2.1.2E)$$

Ara, es calcula el número de tancs segons l'**Equació 11.2.1.4E**:

$$n^{\circ}tancs = \frac{V_{Tancs}}{V_{1Tanc}} = \frac{5278,08}{502,65} = 10,50 \text{ tancs} \quad (11.2.1.4E)$$

Per tal de sobredimensionar s'han escollit 11 tancs d'emmagatzematge d'etilbenzè. Per tant, es torna a calcular el nou temps d'acumulació segons l'**Equació 11.2.1.5E** :

$$\text{Temps d'acumulació}' = \frac{V_{Etilbenzè}'}{Q_{Etilbenzè} \cdot 24h/1 \text{ dia}} = \frac{V_{1-Tanc} \cdot n^{\circ}Tancs'^{0,75}}{Q_{Etilbenzè} \cdot 24h/1 \text{ dia}} = \frac{502,65 \text{ m}^3 \cdot 11^{0,75}}{54,98 \text{ m}^3/h \cdot 24h/1 \text{ dia}} = 3,14 \text{ dies} \quad (11.2.1.5E)$$

11.2.2 Càlcul del gruix de la paret dels tancs d'emmagatzematge d'etilbenzè

Com que les condicions d'emmagatzematge són pressió atmosfèrica i temperatura ambient s'utilitza el criteri de disseny API 650 i concretament, per calcular el gruix de la paret, s'utilitza el mètode del peu (API 650 5.6.3) que es basa en el principi que la pressió màxima que exerceix el mateix fluid es troba a 1 peu dels fons del tanc. El gruix de la paret es calcula segons les **Equacions 11.2.2.1E-2E**, és dependent de l'altura del nivell de fluid i pot prendre dos valors diferents (el més elevat és el vàlid):

$$t_d = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H-0,3) \cdot G}{S_d} + CA \quad (11.2.2.1E); \quad t_t = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H-0,3) \cdot G}{S_t} \quad (11.2.2.2E)$$

On:

- t_d (mm): Gruix de la paret de disseny (mm).
- t_t (mm): Gruix de la paret necessari per superar la prova hidrostàtica (mm).
- D (m): Diàmetre del tanc.
- H (m): Alçada del nivell de líquid per a cada anell (m).
- G : Gravetat específica del fluid o densitat relativa respecte l'aigua que és 0,866 pel benzè. .
- CA (mm): Factor de corrosió que depèn de la substància i del material el qual el fluid es troba en contacte.
- S_d (MPa) :Estrès permès en les condicions de disseny .
- S_t (MPa) és l'estrès permès en la prova hidrostàtica.

S_d i S_t depenen del material i es troben tabulats. Això no obstant, existeixen equacions, en el cas que no ho estiguin, per calcular-los. Es mostren les **Equacions 11.2.2.3E-6E** i s'ha d'escollir els valors més petits. Els valors depenen de dues propietats físiques, el límit elàstic (E) i la tensió màxima (τ) que en el cas d'AISI 304L són 220 MPa i 520 MPa respectivament.

$$S_d = \frac{2}{3} \cdot E = \frac{2}{3} \cdot 220 \text{ MPa} = 146,67 \text{ MPa} \quad (11.2.2.3E)$$

$$S_d = \frac{2}{5} \cdot \tau = \frac{2}{5} \cdot 520 \text{ MPa} = 208,00 \text{ MPa} \quad (11.2.2.4E)$$

$$S_t = \frac{3}{4} \cdot E = \frac{3}{4} \cdot 220 \text{ MPa} = 165,00 \text{ MPa} \quad (11.2.2.5E)$$

$$S_d = \frac{3}{7} \cdot \tau = \frac{3}{7} \cdot 520 \text{ MPa} = 222,86 \text{ MPa} \quad (11.2.2.6E)$$

A continuació, en la **Taula 11.2.2.1T**, es mostren els valors del gruix de la paret en funció del nivell de líquid segons el mètode del peu:

Taula 11.2.2.1T: Gruix de la paret en funció del nivell de líquid

H (m)	7,50	5,50	3,50	1,50	0,00
h tanc (m)	h=0-2 m	h=2-4 m	h=4-6 m	h=6-8 m	h=8-10 m
t_d (mm)	3,17	2,70	2,24	1,78	1,50
t_t (mm)	1,48	1,07	0,66	0,25	0,00

Tanmateix, el criteri API 650, aconsella un gruix mínim de la paret en funció del diàmetre del tanc que s'ha de tenir en compte (API 650 5.6.1.1). En el nostre cas el gruix mínim de la paret ha de ser de 5,0 mm i, per tant, el gruix de tota la paret queda determinat pel criteri API 650 tal com es mostra a la **Taula 11.2.2.2T**:

Taula 11.2.2.2T: Gruix de la paret en funció de l'API 650

H (m)	7,50	5,50	3,50	1,50	0,00
h tanc (m)	h=0-2 m	h=2-4 m	h=4-6 m	h=6-8 m	h=8-10 m
t_d (mm)	3,17	2,70	2,24	1,78	1,50
t_t (mm)	1,48	1,07	0,66	0,25	0,00
Gruix (mm)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00



11.2.3 Càlcul del gruix del fons i sostre dels tancs d'emmagatzematge d'etilbenzè

El gruix del fons s'ha escollit segons criteri API 650 (API 650 5.4.1) tenint en compte que el gruix mínim ha de ser de 6,0 mm per un fons pla.

El gruix del sostre depèn de la geometria. S'ha escollit un sostre cònic. El gruix es calcula segons l'**Equació 11.2.3.1E**:

$$\Delta X_s = \frac{D}{4,8 \cdot \sin(\theta)} \quad (11.2.3.1E)$$

On:

- ΔX_s (mm) : Gruix del sostre (mm).
- D (m) : Diàmetre del tanc (m).
- θ (°) : Angle d'inclinació del con (°) i està acotat.

$$\Delta X_s = \frac{8}{4,8 \cdot \sin(15)} = 6,44 \text{ mm}$$

Finalment, es sobredimensiona i s'agafa com a gruix del sostre 6,5 mm.

11.2.4 Càlcul del pes dels tancs d'emmagatzematge d'etilbenzè

Com s'ha comentat anteriorment, s'ha escollit el material AISI 304L que té una densitat de 7900 kg/m³. Es calcula el volum de material de la paret, fons pla i sostre cònic i es multiplica per la densitat segons les equacions 11.2.4.1E-3E per tal d'obtenir la massa.

$$M_{Paret} = \frac{\pi}{4} \cdot H \cdot ((D + 2 \cdot \Delta X_p)^2 - D^2) \cdot \frac{\rho}{1000} = \frac{\pi}{4} \cdot 10 \cdot (8,01^2 - 8^2) \cdot \frac{7900}{1000} = 9,93 \text{ ton} \quad (11.2.4.1E)$$

$$M_{Fons} = \frac{\pi}{4} \cdot \Delta X_f \cdot (D + 2 \cdot \Delta X_p)^2 \cdot \frac{\rho}{1000} = \frac{\pi}{4} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 8,01^2 \cdot \frac{7900}{1000} = 2,39 \text{ ton.} \quad (11.2.4.2E)$$

$$\begin{aligned} M_{Fons} &= \frac{\pi}{3} \cdot \left[\left(\frac{D}{2} + \Delta X_c \right)^2 \cdot \left(\frac{D}{2} \cdot \tan(\theta) + \Delta X_c \right) - \left(\frac{D}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{D}{2} \cdot \tan(\theta) \right) \right] \cdot \frac{\rho}{1000} = \\ &= \frac{\pi}{3} \cdot \left[\left(\frac{8}{2} + 6,5 \cdot 10^{-3} \right)^2 \cdot \left(\frac{8}{2} \cdot \tan(15) + 6,5 \cdot 10^{-3} \right) - \left(\frac{8}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{8}{2} \cdot \tan(15) \right) \right] \cdot \frac{7900}{1000} = \\ &= 1,33 \text{ ton.} \quad (11.2.4.3E) \end{aligned}$$



On,

- $\frac{D}{2} \cdot \tan(\theta)$: Alçada h del con (1,07 m)
- $(\frac{D}{2})^2 \cdot (\frac{D}{2} \cdot \tan(\theta))$: Volum del con buit del con (17,96 m³) que s'ha de sumar als 502,65 m³ per tal d'obtenir el volum real del tanc (520,6 m³) donant en realitat un 72,4% del volum del tanc ple.

La massa total del tanc d'emmagatzematge és la suma de les tres contribucions (**Equació 11.2.4.4E**) i la massa total de tots els tancs es calcula segons l'**Equació 11.2.4.5E**.

$$M_{1-Tanc} = M_{Paret} + M_{Fons} + M_{Sostre} = 9,93 + 2,39 + 1,325 = 13,65 \text{ ton. (11.2.4.4E)}$$

$$M_{Tancs} = n^a \text{ Tancs} \cdot M_{1-Tanc} = 11 \cdot 13,65 = 150,10 \text{ ton. (11.2.4.5E)}$$

11.2.5 Càlcul del pes dels tancs d'emmagatzematge d'etilbenzè plens

Pel càlcul del pes del tanc ple, només s'ha de tenir en compte el pes del fluid i sumar-lo al pes del tanc buit. Es calcula segons l'**Equació 11.2.5.1E**.

$$\begin{aligned} M_{1-Tanc \text{ Ple}} &= M_{1-Tanc} + V_{Benzè \text{ emmagatzemat}} \cdot \frac{\rho_{Etilbenzè}}{1000} = 13,65 + 377 \text{ m}^3 \cdot \frac{866 \text{ kg/m}^3}{1000} = \\ &= 340,10 \text{ ton. (11.2.5.1E)} \end{aligned}$$

11.3 Seguretat

11.3.1 Cubeta de retenció de benzè

En primer lloc, s'ha de tenir en compte les següents condicions:

- Hi ha 9 tancs.
- La distància mínima entre els tancs i les parets és de 2 metres.

Així, amb l'**Equació 11.3.1.1E** hom pot calcular la distància mínima entre tancs:

$$D_{Mín-Tanc} = 0,5 \cdot (D(m) + \Delta X(m)) \text{ (11.3.1.1E)}$$



On:

- $D_{Min-Tanc}$ (m): Distància mínima entre tancs.
- D (m): És el diàmetre dels tancs, que són 8 metres.
- ΔX (m): És el gruix de la paret, fixat en 0,01 m.

D'aquesta manera:

$$D_{Min-Tanc} = 0,5 \cdot (8 + 0,01) = 4,01 \text{ m}$$

A continuació, amb l'equació 11.3.1.2E hom calcula el costat quadrat de la cubeta:

$$C_Q = D_{Min-Tanc} \cdot 2 + 3 \cdot (D(m) + \Delta X(m)) + 2 \cdot D_{Tancs} \quad (11.3.1.2E)$$

On:

- C_Q (m): Costat quadrat.
- $D_{Min-Tanc}$ (m): Distància mínima entre tancs.
- D (m): És el diàmetre dels tancs, que són 8 metres.
- ΔX (m): És el gruix de la paret, fixat en 0,01 m.
- D_{Tancs} (m): És la distància entre tancs, fixada en 5,4 m.

Així:

$$C_Q = 2 \cdot 2 + 3 \cdot (8 + 0,01) + 2 \cdot 5,4 = 38,8 \text{ m}$$

Després, s'eleva al quadrat el costat i s'obté l'àrea que és igual a 1507,77 m². Per obtenir el volum se segueix l'**Equació 11.3.1.3E**.

$$V_{Cub} = A_{Cub} \cdot h_{Cub} \quad (11.3.1.3E)$$

On:

- V_{Cub} (m³): Volum de la cubeta.
- A_{Cub} (m²): Àrea de la cubeta.
- h_{Cub} (m): Alçada de la cubeta, fixada en 2,5 metres.

Aleshores:



$$V_{Cub} = 1507,77 \cdot 2,5 = 3769,42 \text{ m}^3$$

11.3.2 Cubeta de retenció d'etilbenzè

En primer lloc, s'ha de tenir en compte les següents condicions:

- Hi ha 11 tancs.
- La distància mínima entre els tancs i les parets és de 1,2 metres.

Així, amb l'**Equació 11.3.2.1E** hom pot calcular la distància mínima entre tancs:

$$D_{\text{Mín-Tanc}} = 0,5 \cdot (D(m) + \Delta X(m)) \quad (11.3.2.1E)$$

On:

- $D_{\text{Mín-Tanc}}(m)$: Distància mínima entre tancs.
- $D(m)$: És el diàmetre dels tancs, que són 8 metres.
- $\Delta X(m)$: És el gruix de la paret, fixat en 0,01 m.

D'aquesta manera:

$$D_{\text{Mín-Tanc}} = 0,5 \cdot (8 + 0,01) = 4,01 \text{ m}$$

A continuació, amb l'**Equació 11.4.2.2E** hom calcula el costat llarg de la cubeta:

$$C_{QLl} = D_{\text{Par-Tanc}} \cdot 2 + 4 \cdot (D(m) + \Delta X(m)) + 3 \cdot D_{\text{Tancs}}(m) \quad (11.3.2.2E)$$

On:

- $C_{QLl}(m)$: Costat llarg.
- $D_{\text{Par-Tanc}}(m)$: Distància paret i tanc, fixada en 1,2 m.
- $D(m)$: És el diàmetre dels tancs, que són 8 metres.
- $\Delta X(m)$: És el gruix de la paret, fixat en 0,01 m.
- $D_{\text{Tancs}}(m)$: És la distància entre tancs, fixada en 5,2 m.

Així:

$$C_Q = 1,2 \cdot 2 + 3 \cdot (8 + 0,01) + 3 \cdot 5,2 = 50,04 \text{ m}$$

A continuació, amb l'**Equació 11.4.2.3E** hom calcula el costat llarg de la cubeta:



$$C_{QC} = D_{Par-Tanc} \cdot 2 + 3 \cdot (D(m) + \Delta X(m)) + 2 \cdot D_{Tancs}(m) \quad (11.3.2.3E)$$

On:

- $C_{QL}(m)$: Costat llarg.
- $D_{Par-Tanc}(m)$: Distància paret i tanc, fixada en 1,2 m.
- $D(m)$: És el diàmetre dels tancs, que són 8 metres.
- $\Delta X(m)$: És el gruix de la paret, fixat en 0,01 m.
- $D_{Tancs}(m)$: És la distància entre tancs, fixada en 5,2 m.

Així:

$$C_Q = 1,2 \cdot 2 + 3 \cdot (8 + 0,01) + 2 \cdot 5,2 = 36,83 \text{ m}$$

L'àrea de la cubeta es calcula multiplicant el costat llarg pel curt i surt 1842,97 m².
Per obtenir el volum se segueix l'**Equació 11.3.2.4E**.

$$V_{Cub} = A_{Cub} \cdot h_{Cub} \quad (11.3.2.4E)$$

On:

- $V_{Cub}(m^3)$: Volum de la cubeta.
- $A_{Cub}(m^2)$: Àrea de la cubeta.
- $h_{Cub}(m)$: Alçada de la cubeta, fixada en 2,5 metres.

De la mateixa manera:

$$V_{Cub} = 1842,97 \cdot 2,5 = 4607,43 \text{ m}^3$$

11.3.3 Cubeta de retenció reactors d'alquilació

En primer lloc, cal tenir en compte que el volum de cadascun dels tres reactors és aproximadament 149,60 m³, i el diàmetre del reactor és de 3 metres. Seguint l'**Equació 11.3.3.1E** hom pot calcular el costat de la cubeta:

$$\text{Costat}(m) = D_{Reactor}(m) + 2 \cdot D_{Min.Reactor-Paret} \quad (11.3.3.1E)$$



On:

- $Costat (m)$: Costat de la cubeta.
- $D_{Reactor} (m)$: Diàmetre del reactor, fixat en 3 metres.
- $D_{Min. Reactor-Paret} (m)$: Distància mínima entre el reactor i la paret. Fixada en 3,8 metres.

Així:

$$Costat (m) = 3 + 2 \cdot 3,8 = 10,6 m$$

Després per a calcular l'àrea s'eleva al quadrat el costat, i s'obté el valor de 112,36 m², amb una alçada de 1,5 m. Per a calcular el volum de la cubeta, s'ha de seguir l'**Equació 11.3.3.2E**, presentada a continuació:

$$V (m^3) = Àrea (m^2) \cdot h (m) \quad (11.3.3.2E)$$

On:

- $V (m^3)$: Volum de la cubeta de retenció del reactor d'alquilació.
- $Àrea (m^2)$: Àrea de la cubeta de retenció.
- $h (m)$: Alçada de la cubeta de retenció, fixada en 1,5 m.

Així, el volum de les cubetes de retenció dels reactors és:

$$V (m^3) = 112,36 m^2 \cdot 1,5 m = 168,54 m^3$$

Anàlogament, es fa el càlcul de la cubeta de retenció del reactor de transalquilació.

11.3.4 Cubeta de retenció reactor de transalquilació

En primer lloc, cal tenir en compte que el volum del reactor de transalquilació és de 23,46 m³ i el diàmetre del reactor és de 2 metres. Seguint l'**Equació 11.3.4.1E** hom pot calcular el costat de la cubeta:

$$Costat (m) = D_{Reactor} (m) + 2 \cdot D_{Min. Reactor-Paret} \quad (11.3.4.1E)$$

On:

- $Costat (m)$: Costat de la cubeta.
- $D_{Reactor} (m)$: Diàmetre del reactor, fixat en 2 metres.



- $D_{Min. Reactor-Paret}$ (m): Distància mínima entre el reactor i la paret. Fixada en 1,2 metres.

Així:

$$Costat (m) = 2 + 2 \cdot 1,2 = 4,40 m$$

Després per a calcular l'àrea s'eleva al quadrat el costat, i s'obté el valor de 19,36 m², amb una alçada de 1,5 m. Per a calcular el volum de la cubeta, s'ha de seguir l'**Equació 11.3.4.2E**, presentada a continuació:

$$V (m^3) = Àrea (m^2) \cdot h (m) \quad (11.3.4.2E)$$

On:

- $V (m^3)$: Volum de la cubeta de retenció del reactor d'alquilació.
- $Àrea (m^2)$: Àrea de la cubeta de retenció.
- $h (m)$: Alçada de la cubeta de retenció, fixada en 1,5 m.

Així, el volum de les cubetes de retenció dels reactors és:

$$V (m^3) = 19,36 m^2 \cdot 1,5 m = 29,04 m^3$$

11.3.5 Ventilació

La ventilació s'ha calculat amb els paràmetres indicats per la ITC MIE APQ-1 d'emmagatzematge de productes químics.

Primerament s'han calculat les àrees humides dels tancs d'emmagatzemament amb l'**Equació 11.3.5.1E**.

$$A_h = \pi \cdot D_{interior} \cdot h_l \quad (11.3.5.1E)$$

On:

- $A_h (m^2)$: Superfície humida del tanc (m²).
- $D_{interior} (m)$: Diàmetre interior del tanc (m).
- $h_l (m)$: Altura del líquid dins del tanc (m)

$$A_h = \pi \cdot 7,99 \cdot 7,5 = 188,26 m^2$$

A continuació es calcula la calor que es rebrà en cas d'un foc exterior amb l'**Equació 11.3.5.2E**:



$$Q = 139,7 \cdot F \cdot A_h^{0,82} \cdot 10^3 \quad (11.3.5.2E)$$

On:

- $Q \left(\frac{kJ}{h}\right)$ és la calor que es rebrà en cas d'un foc exterior (KJ/h).
- F és el factor de reducció.
- $A_h \left(m^2\right)$ és la superfície humida del tanc (m^2).

$$Q = 139,7 \cdot 1 \cdot 188,26^{0,82} \cdot 10^3 = 1,024 \cdot 10^7 \text{ kJ/h}$$

El cabal d'aire total que es farà servir per a la ventilació es calcula amb la següent

Equació 11.3.5.3E:

$$Q_{\text{aire}} = \frac{4,414 \cdot Q}{H \cdot \sqrt{PM}} \quad (11.3.5.3E)$$

On:

- $Q_{\text{aire}} \left(\frac{m^3}{h}\right)$: Cabal d'aire total que es farà servir per a la ventilació.
- $Q \left(\frac{kJ}{h}\right)$: Calor que es rebrà en cas d'un foc exterior.
- $H \left(\frac{kJ}{kg}\right)$: Calor latent mescla (KJ/Kg).
- $PM \left(\frac{g}{mol}\right)$; Pes molecular mescla (g/Mol).

$$Q_{\text{aire}} = \frac{4,414 \cdot 1,024 \cdot 10^7}{436,41 \cdot \sqrt{78,25}} = 11713,78 \frac{m^3}{h} \text{ per al tanc de Benzè}$$

$$Q_{\text{aire}} = \frac{4,414 \cdot 1,024 \cdot 10^7}{400,35 \cdot \sqrt{106,17}} = 10963,87 \frac{m^3}{h} \text{ per al tanc de d'Etilbenzè}$$

11.3.6 Simulació explosió

11.3.6.1 Límits pràctics de sobreescalfament del benzè

En primer lloc, es calculen els límits de seguretat de sobreescalfament del benzè amb l'**Equació 11.3.6.1.1E:**

$$\ln P = - \frac{A}{T} + B \quad (11.3.6.1.1E)$$

On:

- $P \text{ (atm)}$: Pressió de vapor.
- $T \text{ (K)}$: Temperatura absoluta.
- A i B : Constants de cada compost.

Així, es busca el valor de les constants A i B amb la pressió crítica i temperatura crítica del benzè, que són 48,35 atm i 562 K, respectivament. S'ha de fer un sistema



d'equacions amb la pressió de vapor a temperatura de 299 K, com hom pot veure seguidament:

$$\ln 0,132 \text{ atm} = -\frac{A}{299} + B$$

$$\ln 48,35 \text{ atm} = -\frac{A}{562} + B$$

Amb això s'obté: $A=3768,69$ i $B=10,58$.

Seguidament, s'ha d'obtenir la tangent al punt crític amb l'**Equació 11.3.6.1.2E**:

$$\text{tg } P_c = P_c \cdot \frac{A}{T_c^2} \text{ (11.3.6.1.2E)}$$

On:

- $\text{tg } P_c$: Tangent al punt crític.
- P_c (atm): Pressió crítica.
- A : Constant.
- T_c (K): Temperatura crítica.

D'aquesta manera:

$$\text{tg } P_c = 48,35 \cdot \frac{3768,69}{562^2} = 0,577$$

Després, amb l'**Equació 11.3.6.1.3E**, hom pot obtenir la constant b :

$$P = T \cdot \text{tg } P_c + b \text{ (11.3.6.1.3E)}$$

On:

- P (atm): Pressió de vapor.
- T (K): Temperatura absoluta.
- $\text{tg } P_c$: Tangent al punt crític.
- b : Constant.

Al punt crític hom pot obtenir el valor de b :

$$48,35 = 562 \cdot 0,577 + b = -275,92$$

Així, l'equació resta com:



$$P = T \cdot 0,577 - 275,92$$

Igualada al punt crític de 0 atmosferes, hom pot obtenir el valor de T de 478,20 K.

Així, es substitueix el valor de la temperatura límit inferior, que són 478,20 K a l'**Equació 11.3.6.1E** i s'obté el valor de la pressió límit inferior:

$$\ln P = - \frac{3768,69}{478,20K} + 10,58 = 14,82$$

11.3.6.2 Límits pràctics de sobreescalfament de l'etilbenzè

Com s'ha fet amb el benzè, es calculen els límits de seguretat de sobreescalfament de l'etilbenzè amb l'**Equació 11.3.6.2.1E**:

$$\ln P = - \frac{A}{T} + B \quad (11.3.6.2.1E)$$

On:

- P (atm): Pressió de vapor.
- T (K): Temperatura absoluta.
- A i B : Constants de cada compost.

Així, es busca el valor de les constants A i B amb la pressió crítica i temperatura crítica del etilbenzè, que són 36,12 atm i 617.7 K, respectivament. S'ha de fer un sistema d'equacions amb la pressió de vapor a temperatura de 293 K, com hom pot veure seguidament:

$$\ln 0,009 \text{ atm} = - \frac{A}{293} + B$$

$$\ln 36,12 \text{ atm} = - \frac{A}{617,7} + B$$

Amb això s'obté: A=4603,62 i B=11,03.

Seguidament, s'ha d'obtenir la tangent al punt crític amb l'**Equació 11.3.6.2.2E**:

$$tg P_c = P_c \cdot \frac{A}{T_c^2} \quad (11.3.6.2.2E)$$

On:

- $tg P_c$: Tangent al punt crític.
- P_c (atm): Pressió crítica.
- A : Constant.



- T_c (K): Temperatura crítica.

D'aquesta manera:

$$tg Pc = 36,12 \cdot \frac{4603,62}{617,7^2} = 0,44$$

Després, amb l'**Equació 11.3.6.2.3E**, hom pot obtenir la constant b:

$$P = T \cdot tg Pc + b \text{ (11.3.6.2.3E)}$$

On:

- P (atm): Pressió de vapor.
- T (K): Temperatura absoluta.
- $tg Pc$: Tangent al punt crític.
- b : Constant.

Al punt crític hom pot obtenir el valor de b:

$$36,12 = 617,7 \cdot 0,44 + b = -235,67$$

Així, l'equació resta com:

$$P = T \cdot 0,44 - 235,67$$

Igualada al punt crític de 0 atmosferes, hom pot obtenir el valor de T de 535,61 K.

Així, es substitueix el valor de la temperatura límit inferior, que són 535,61 K a l'**Equació 11.3.6.2.1E** i s'obté el valor de la pressió límit inferior:

$$\ln P = - \frac{4603,62}{535,61K} + 11,03 = 11,41 \text{ atm}$$

11.3.6.3 BLEVE Benzè

En cas de produir-se una *Bleve* (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*) a la zona d'emmagatzematge Z-100 quan hi ha màxima ocupació de benzè les conseqüències per a una persona que està a una distància de 30 metres seria la presentada a les següents equacions.

En primer lloc, es calcula el diàmetre de la bola de foc amb l'**Equació 11.3.6.3.1E**:

$$D = 6,48 \cdot W^{0,325} \text{ (11.3.6.3.1E)}$$



On:

- D (m): Diàmetre màxim de la bola de foc.
- W (kg): Massa total del combustible.

En aquest cas:

$$D = 6,48 \cdot (1,90 \cdot 10^6 \text{ kg})^{0,325} = 712,01 \text{ m}$$

L'alçada de la bola de foc es calcula amb l'**Equació 11.3.6.3.2E**:

$$H = 0,75 \cdot D \text{ (11.3.6.3.2E)}$$

On:

- H (m): Alçada de la bola de foc.
- D (m): Diàmetre màxim de la bola de foc.

Calculat per al benzè:

$$H = 0,75 \cdot 712,01 = 534,01 \text{ m}$$

També es calcula la duració de la bola de foc amb l'**Equació 11.3.6.3.3E**:

$$t = 0,852 \cdot W^{0,26} \text{ (11.3.6.3.3E)}$$

On:

- t (s): Temps de duració.
- W (kg): Massa total del combustible.

Fent servir l'equació, s'obté:

$$t = 0,852 \cdot (1,90 \cdot 10^6 \text{ kg})^{0,26} = 36,57 \text{ s}$$

A continuació, es calcula la distància al receptor, que com s'esmenta al capítol 5, és una persona a 30 metres de la zona d'emmagatzematge, com s'indica a la **Figura 11.3.6.3.1F**:

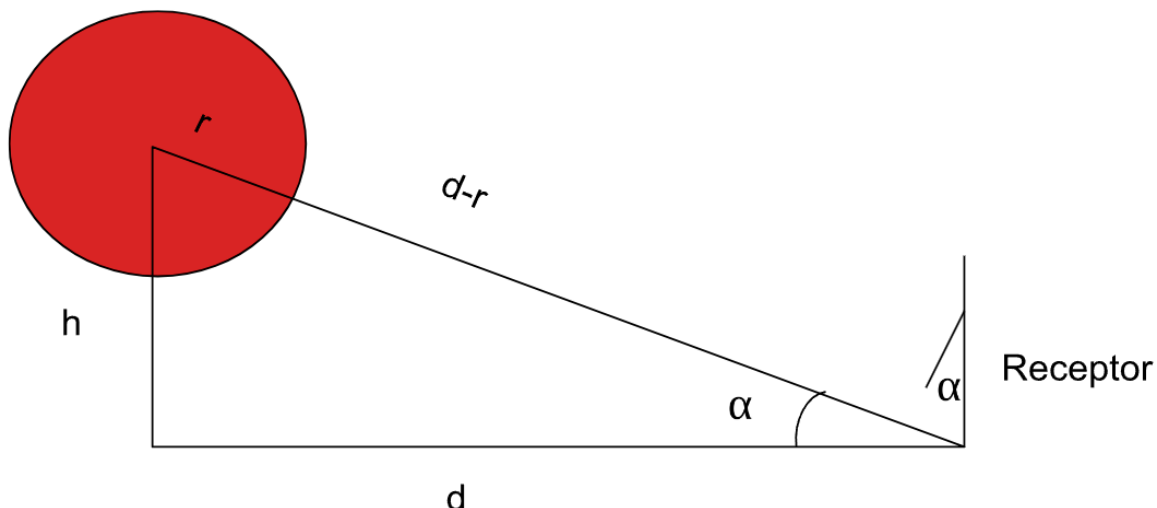


Figura 11.3.6.3.1F: Càlcul distàncies

Així, amb el teorema de Pitàgores hom pot calcular la distància d-r:

$$d - r = \sqrt{(534,01)^2 + (30)^2} - (356,01) = 178,84$$

A més, per a càlculs reals de radiació, hom a de saber l'angle α , que es pot saber de la següent manera:

$$\text{atan} = \frac{534,01}{30} = 1,51 \approx 86,78^\circ$$

Així, ara hom pot calcular la radiació rebuda pel receptor amb l'angle corresponent. La radiació rebuda es calcula amb l'**Equació 11.3.6.3.4E**:

$$I = d \cdot F \cdot E \cdot \cos \alpha \quad (11.3.6.3.4E)$$

On:

- $I \left(\frac{kW}{m^2}\right)$: Radiació rebuda.
- d : Coeficient de transmissió atmosfèrica.
- F : Factor geomètric de visió.
- $E \left(\frac{kW}{m^2}\right)$: Intensitat mitjana de radiació.

Així, pas per pas, es calculen les variables de l'**Equació 11.3.6.3.4E**.

El coeficient de transmissió atmosfèrica es calcula amb l'**Equació 11.3.6.3.5E**:

$$d = 2,02 \cdot (P_V \cdot x)^{-0,09} \quad (11.3.6.3.5E)$$



On:

- d : Coeficient de transmissió atmosfèrica.
- P_v (Pa): Pressió de vapor del component a l'aire ambient.
- x (m): Distància entre envoltant de la bola de foc i el punt considerat.

En aquest cas:

$$d = 2,02 \cdot (9960 \text{ Pa} \cdot 178,84 \text{ m})^{-0,09} = 0,55$$

Seguidament, el factor geomètric de visió es calcula amb l'**Equació 11.3.6.3.6E**:

$$F = \frac{D^2}{4 \cdot X^2} \text{ (11.3.6.3.6E)}$$

On:

- D (m): Diàmetre màxim de la bola de foc.
- X (m): Distància entre el centre de l'esfera i el receptor.

Calculat amb l'**Equació 11.3.6.3.6E**:

$$F = \frac{712,01^2}{4 \cdot (534,85)^2} = 0,11$$

A continuació es calcula la intensitat mitjana de radiació amb l'**Equació 11.3.6.3.7E**:

$$E = \frac{f_r \cdot W \cdot H_c}{\pi \cdot D^2 \cdot t} \text{ (11.3.6.3.7E)}$$

On:

- E ($\frac{kW}{m^2}$): Intensitat mitjana de radiació.
- f_r : Coeficient de radiació que pot estar entre 0,25 i 0,4.
- W (kg): Massa total del combustible.
- D (m): Diàmetre màxim de la bola de foc.
- H_c ($\frac{kJ}{kg}$): Calor de combustió.
- t (s): Temps de duració.

Fent servir l'equació, hom obté el següent:

$$E = \frac{0,4 \cdot 1,90 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot 32100 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{\pi \cdot 712,01 \text{ m}^2 \cdot 36,57 \text{ s}} = 419,76 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Ara, usant l'**Equació 11.3.6.3.4E** i tenint en compte el cosinus de l'angle, hom pot obtenir la radiació real:

$$I = 0,55 \cdot 0,11 \cdot 419,76 \cdot \cos(86,78^\circ) = 1,44 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Després, hom pot calcular la dosi de radiació rebuda amb l'**Equació 11.3.6.3.8E**:

$$Dosi = t \cdot I^{\frac{4}{3}} \quad (11.3.6.3.8E)$$

On:

- Dosi: Dosi de radiació tèrmica, plantejada per Eisenberg.
- t (s): Temps de duració.
- I ($\frac{W}{m^2}$): Radiació rebuda.

D'aquesta manera, la dosi rebuda és:

$$Dosi = 36,57 \text{ s} \cdot 1442,33 \frac{W}{m^2}^{\frac{4}{3}} = 5,96 \cdot 10^5 \frac{W}{m^2}$$

Per a calcular els percentatges de població afectats s'apliquen les equacions de Probit, que comparat el nombre obtingut amb els valors de la **Figura 11.3.6.3.2F**⁴ es pot obtenir el percentatge de població afectada:

Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%		
0	0	3,72	10	4,16	20	4,48	30	4,75	40	5,00	50	5,25	60	5,52	70	5,84	80	6,28	90	7,33	99,0
2,67	1	3,77	11	4,19	21	4,50	31	4,77	41	5,03	51	5,28	61	5,55	71	5,88	81	6,34	91	7,37	99,1
2,95	2	3,82	12	4,23	22	4,53	32	4,80	42	5,05	52	5,31	62	5,58	72	5,92	82	6,41	92	7,41	99,2
3,12	3	3,87	13	4,26	23	4,56	33	4,82	43	5,08	53	5,33	63	5,61	73	5,95	83	6,48	93	7,46	99,3
3,25	4	3,92	14	4,29	24	4,59	34	4,85	44	5,10	54	5,36	64	5,64	74	5,99	84	6,55	94	7,51	99,4
3,36	5	3,96	15	4,33	25	4,61	35	4,87	45	5,13	55	5,39	65	5,67	75	6,04	85	6,64	95	7,58	99,5
3,45	6	4,01	16	4,36	26	4,64	36	4,90	46	5,15	56	5,41	66	5,71	76	6,08	86	6,75	96	7,65	99,6
3,52	7	4,05	17	4,39	27	4,67	37	4,92	47	5,18	57	5,44	67	5,74	77	6,13	87	6,88	97	7,75	99,7
3,59	8	4,08	18	4,42	28	4,69	38	4,95	48	5,20	58	5,47	68	5,77	78	6,18	88	7,05	98	7,88	99,8
3,66	9	4,12	19	4,45	29	4,72	39	4,97	49	5,23	59	5,50	69	5,81	79	6,23	89	7,33	99	8,09	99,9

Figura 11.3.6.3.2F: Equivalència de valors "Probit" i percentatge de població afectada.

⁴ Figura extreta de: ("INSCR", s.d.)



Amb les **Equacions 11.3.6.3.9E-10E** hom pot calcular el percentatge de població amb cremades de primer grau, i la mortalitat, respectivament:

$$Pr = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(t \cdot I^{\frac{4}{3}}) \quad (11.3.6.3.9E)$$

$$Pr = -14,9 + 2,56 \cdot \ln\left(\frac{t \cdot I^{\frac{4}{3}}}{10000}\right) \quad (11.3.6.3.10E)$$

On:

- t (s): Temps de duració.
- I ($\frac{W}{m^2}$): Radiació rebuda.

Així, en aquest cas:

$$Pr = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(5,96 \cdot 10^5) = 0,31$$

$$Pr = -14,9 + 2,56 \cdot \ln\left(\frac{5,96 \cdot 10^5}{10000}\right) = -4,43$$

11.3.6.4 BLEVE Etilbenzè

En cas de produir-se una *Bleve (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)* a la zona d'emmagatzematge Z-400 quan hi ha màxima ocupació d'etilbenzè les conseqüències per a una persona que està a una distància de 30 metres seria la presentada a les següents equacions.

En primer lloc, es calcula el diàmetre de la bola de foc amb l'**Equació 11.3.6.4.1E**:

$$D = 6,48 \cdot W^{0,325} \quad (11.3.6.4.1E)$$

On:

- D (m): Diàmetre màxim de la bola de foc.
- W (kg): Massa total del combustible.

En aquest cas:

$$D = 6,48 \cdot (2,57 \cdot 10^6 \text{ kg})^{0,325} = 784,98 \text{ m}$$

L'alçada de la bola de foc es calcula amb l'**Equació 11.3.6.4.2E**:

$$H = 0,75 \cdot D \quad (11.3.6.4.2E)$$

On:

- H (m): Alçada de la bola de foc.
- D (m): Diàmetre màxim de la bola de foc.

Calculat per a l'etilbenzè:

$$H = 0,75 \cdot 784,98 = 588,74 \text{ m}$$

També es calcula la duració de la bola de foc amb l'**Equació 11.3.6.4.3E**:

$$t = 0,852 \cdot W^{0,26} \quad (11.3.6.4.3E)$$

On:

- t (s): Temps de duració.
- W (kg): Massa total del combustible.

Fent servir l'equació, s'obté:

$$t = 0,852 \cdot (2,57 \cdot 10^6 \text{ kg})^{0,26} = 39,54 \text{ s}$$

A continuació, es calcula la distància al receptor, que com s'esmenta al capítol 5, és una persona a 30 metres de la zona d'emmagatzematge, com s'indica a la **Figura 11.3.6.4.1F**:

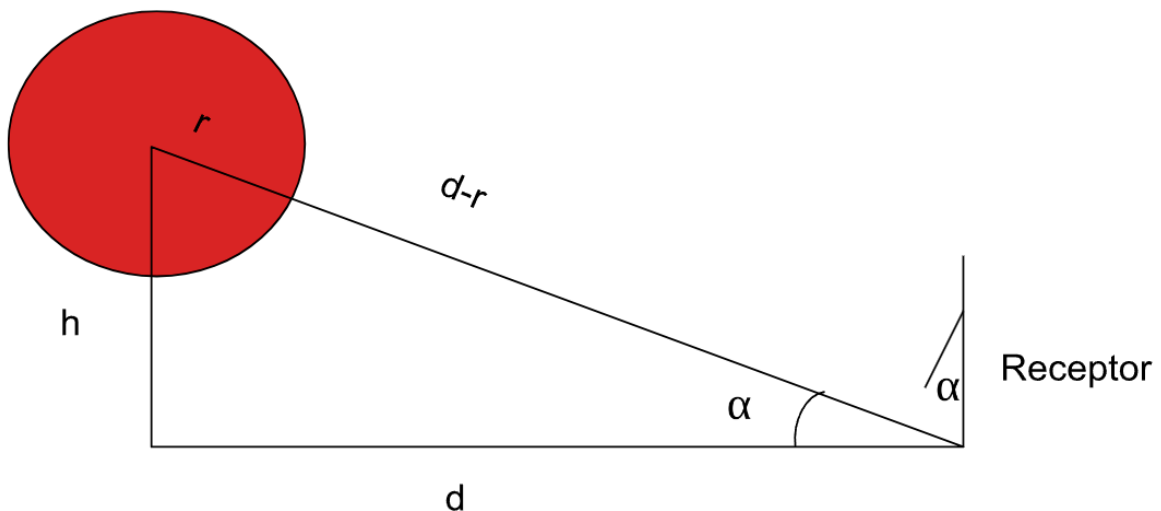


Figura 11.3.6.4.1F: Càlcul distàncies



Així, amb el teorema de Pitàgores hom pot calcular la distància d-r:

$$d - r = \sqrt{(588,74)^2 + (30)^2} - (392,49) = 197,01$$

A més, per a càlculs reals de radiació, hom a de saber l'angle α , que es pot saber de la següent manera:

$$\text{atan} = \frac{588,74}{30} = 1,929 \approx 87,08^\circ$$

Així, ara hom pot calcular la radiació rebuda pel receptor amb l'angle corresponent. La radiació rebuda es calcula amb l'**Equació 11.3.6.4.4E**:

$$I = d \cdot F \cdot E \cdot \cos \alpha \quad (11.3.6.4.4E)$$

On:

- $I \left(\frac{kW}{m^2}\right)$: Radiació rebuda.
- d : Coeficient de transmissió atmosfèrica.
- F : Factor geomètric de visió.
- $E \left(\frac{kW}{m^2}\right)$: Intensitat mitjana de radiació.

Així, pas per pas, es calculen les variables de l'**Equació 11.3.6.4.4E**.

El coeficient de transmissió atmosfèrica es calcula amb l'**Equació 11.3.6.4.5E**:

$$d = 2,02 \cdot (P_v \cdot x)^{-0,09} \quad (11.3.6.4.5E)$$

On:

- d : Coeficient de transmissió atmosfèrica.
- $P_v (Pa)$: Pressió de vapor del component a l'aire ambient.
- $x (m)$: Distància entre envoltant de la bola de foc i el punt considerat.

En aquest cas:

$$d = 2,02 \cdot (9000 Pa \cdot 197,01 m)^{-0,09} = 0,55$$

Seguidament, el factor geomètric de visió es calcula amb l'**Equació 11.3.6.3.6E**:



$$F = \frac{D^2}{4 \cdot X^2} \quad (11.3.6.4.6E)$$

On:

- D (m): Diàmetre màxim de la bola de foc.
- X (m): Distància entre el centre de l'esfera i el receptor.

Calculat amb l'**Equació 11.3.6.3.6E**:

$$F = \frac{784,98^2}{4 \cdot (589,5)^2} = 0,44$$

A continuació es calcula la intensitat mitjana de radiació amb l'**Equació 11.3.6.4.7E**:

$$E = \frac{f_r \cdot W \cdot H_c}{\pi \cdot D^2 \cdot t} \quad (11.3.6.4.7E)$$

On:

- E ($\frac{kW}{m^2}$): Intensitat mitjana de radiació.
- f_r : Coeficient de radiació que pot estar entre 0,25 i 0,4.
- W (kg): Massa total del combustible.
- D (m): Diàmetre màxim de la bola de foc.
- H_c ($\frac{kJ}{kg}$): Calor de combustió.
- t (s): Temps de duració.

Fent servir l'equació, hom obté el següent:

$$E = \frac{0,4 \cdot 2,57 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot 11665 \frac{kJ}{kg}}{\pi \cdot (784,98 \text{ m})^2 \cdot 39,54 \text{ s}} = 156,72 \frac{kW}{m^2}$$

Ara, usant l'**Equació 11.3.6.3.4E** i tenint en compte el cosinus de l'angle, hom pot obtenir la radiació real:

$$I = 0,55 \cdot 0,44 \cdot 156,72 \cdot \cos(87,08^\circ) = 1,96 \frac{kW}{m^2}$$

Després, hom pot calcular la dosi de radiació rebuda amb l'**Equació 11.3.6.4.8E**:

$$Dosi = t \cdot I^{\frac{4}{3}} \quad (11.3.6.4.8E)$$

On:

- Dosi: Dosi de radiació tèrmica, plantejada per Eisenberg.
- t (s): Temps de duració.
- I ($\frac{W}{m^2}$): Radiació rebuda.

D'aquesta manera, la dosi rebuda és:

$$Dosi = 39,54 \text{ s} \cdot 1956,20 \frac{W}{m^2}^{\frac{4}{3}} = 9,67 \cdot 10^5 \frac{W}{m^2}$$

Per a calcular els percentatges de població afectats s'apliquen les equacions de Probit, que comparat el nombre obtingut amb els valors de la **Figura 11.3.6.4.2F**⁵ es pot obtenir el percentatge de població afectada:

Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%		
0	0	3,72	10	4,16	20	4,48	30	4,75	40	5,00	50	5,25	60	5,52	70	5,84	80	6,28	90	7,33	99,0
2,67	1	3,77	11	4,19	21	4,50	31	4,77	41	5,03	51	5,28	61	5,55	71	5,88	81	6,34	91	7,37	99,1
2,95	2	3,82	12	4,23	22	4,53	32	4,80	42	5,05	52	5,31	62	5,58	72	5,92	82	6,41	92	7,41	99,2
3,12	3	3,87	13	4,26	23	4,56	33	4,82	43	5,08	53	5,33	63	5,61	73	5,95	83	6,48	93	7,46	99,3
3,25	4	3,92	14	4,29	24	4,59	34	4,85	44	5,10	54	5,36	64	5,64	74	5,99	84	6,55	94	7,51	99,4
3,36	5	3,96	15	4,33	25	4,61	35	4,87	45	5,13	55	5,39	65	5,67	75	6,04	85	6,64	95	7,58	99,5
3,45	6	4,01	16	4,36	26	4,64	36	4,90	46	5,15	56	5,41	66	5,71	76	6,08	86	6,75	96	7,65	99,6
3,52	7	4,05	17	4,39	27	4,67	37	4,92	47	5,18	57	5,44	67	5,74	77	6,13	87	6,88	97	7,75	99,7
3,59	8	4,08	18	4,42	28	4,69	38	4,95	48	5,20	58	5,47	68	5,77	78	6,18	88	7,05	98	7,88	99,8
3,66	9	4,12	19	4,45	29	4,72	39	4,97	49	5,23	59	5,50	69	5,81	79	6,23	89	7,33	99	8,09	99,9

Figura 11.3.6.4.2F: Equivalència de valors "Probit" i percentatge de població afectada.

Amb les **Equacions 11.3.6.4.9E-10E** hom pot calcular el percentatge de població amb cremades de primer grau, i la mortalitat, respectivament:

$$Pr = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(t \cdot I^{\frac{4}{3}}) \quad (11.3.6.4.9E)$$

$$Pr = -14,9 + 2,56 \cdot \ln\left(\frac{t \cdot I^{\frac{4}{3}}}{10000}\right) \quad (11.3.6.4.10E)$$

On:

- t (s): Temps de duració.

⁵ Figura extreta de: ("INSCR", s.d.)



- $I \left(\frac{W}{m^2} \right)$: Radiació rebuda.

Així, en aquest cas:

$$Pr = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln \left(9,67 \cdot 10^5 \frac{W}{m^2} \right) = 1,77$$

$$Pr = -14,9 + 2,56 \cdot \ln \left(\frac{9,67 \cdot 10^5 \frac{W}{m^2}}{10000} \right) = -3,20$$

11.3.6.5 Sobrepressió i fragmentació Benzè

En primer lloc, les condicions suposades de la simulació són les següents:

- V_{Liquid} : 377 m³
- T: 771 K (Autoignició del benzè)
- Pressió esclat: 4 atm, 4 vegades la dissenyada pel tanc.
- Pressió atmosfèrica: 1 atm.

Així, amb l'**Equació 11.3.6.5.1E** hom calcula la massa de TNT.

$$W_{TNT} = 0,0219 \cdot P_1 \cdot V_1 \cdot \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (11.3.6.5.1E)$$

On:

- $W_{TNT} (g)$: Massa de TNT equivalent.
- $P_1 (atm)$: Pressió d'esclat.
- $P_2 (atm)$: Pressió atmosfèrica
- $V_1 (L)$: Volum de líquid.

D'aquesta manera:

$$W_{TNT} = 0,0219 \cdot 4 \text{ atm} \cdot 3,77 \cdot 10^5 \text{ L} \cdot \ln \left(\frac{4 \text{ atm}}{1 \text{ atm}} \right) = 4,27 \cdot 10^6 \text{ g de TNT}$$

Després, es sap que un 20% de l'energia va a la ona, així:

$$W_{TNT} = 4,27 \cdot 10^6 \text{ g} \cdot 0,2 = 8,55 \cdot 10^5 \text{ g}$$

Amb l'**Equació 11.3.6.5.2E** hom pot calcular la pressió en superfície:

$$P_1 = P_s \cdot \left[1 - \frac{3,5 \cdot (1,4-1) \cdot (P_s-1)}{\left[(1,4 \cdot \frac{T}{M}) \cdot (1+5,9 \cdot P_s) \right]^{0,5}} \right]^{-2 \cdot \frac{1,4}{1,4-1}} \quad (11.3.6.5.2E)$$

On:

- P_1 (bar): Pressió d'esclat.
- P_s (bar): Pressió sobre superfície recipient.
- T (K): Temperatura d'operació.
- M : Massa molar.

$$4,053 \text{ bar} = P_s \cdot \left[1 - \frac{3,5 \cdot (1,4-1) \cdot (P_s-1)}{\left[(1,4 \cdot \frac{771 \text{ K}}{78,07}) \cdot (1+5,9 \cdot P_s) \right]^{0,5}} \right]^{-2 \cdot \frac{1,4}{1,4-1}}$$

Fent servir l'eina *Solver*, hom obté que la pressió sobre el recipient és de 1,93 bar.

D'aquesta manera, hom pot saber el valor de la sobrepressió:

$$\Delta P = 1,93 \text{ bar} - 1,01 \text{ bar} = 0,92 \text{ bar}$$

Així, usant la **Figura 11.3.6.5.1F** hom pot saber la distància normalitzada per a una sobrepressió 0,92 bar, i dóna una d_n de 3,5 m/kg^{1/3}.

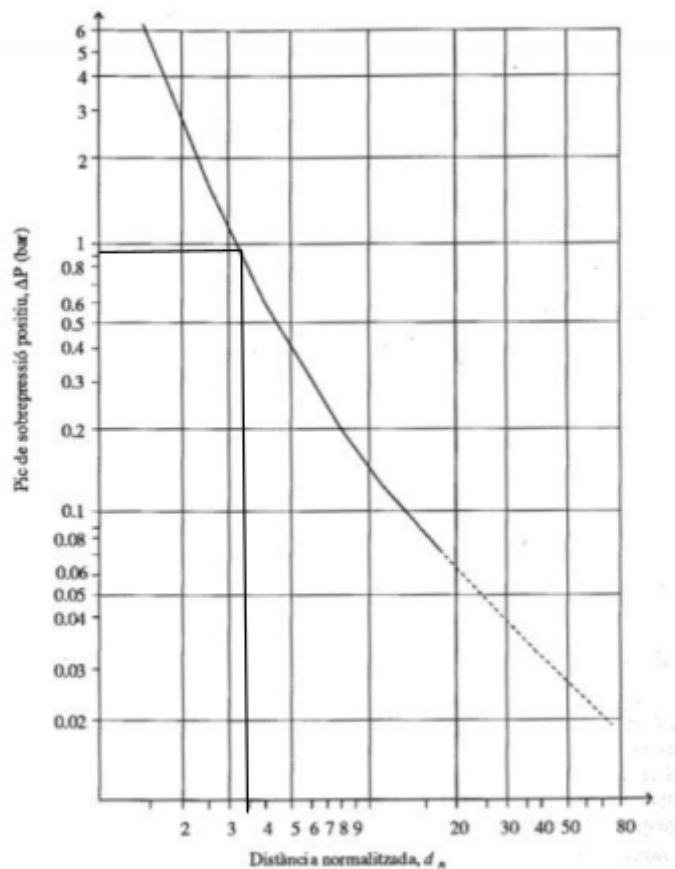


Figura 11.3.6.5.1F: Determinació distància normalitzada per a sobrepressió de 0,92 bar.



Amb l'**Equació 11.3.6.5.3E** hom pot calcular la distància d:

$$d = d_n \cdot \sqrt[3]{W_{TNT}} \quad (11.3.6.5.3E)$$

On:

- $d (m)$: Distància sobrepressió
- $d_n \left(\frac{m}{kg^3}\right)$: Distància normalitzada
- $W_{TNT} (kg)$: Massa equivalent de TNT.

En aquest cas:

$$d = 3,5 \frac{m}{kg^{\frac{1}{3}}} \cdot \sqrt[3]{854,81 \text{ kg}} = 33,21 \text{ m}$$

Aquesta distància és la que es produeixen 0,92 bar. No obstant això, aquesta distància no té en compte el recipient. Així, sabent que el radi dels tancs és de 4 metres, s'ha de calcular la anomenada d_v , que té en compte els tancs amb l'**Equació 11.3.6.5.4E**:

$$d_v = d - r \quad (11.3.6.5.4E)$$

On:

- $d_v (m)$: Distància virtual
- $d (m)$: Distància sobrepressió
- $r (m)$: Radi del recipient.

Per aquesta simulació:

$$d_v = 33,21 \text{ m} - 4 \text{ m} = 29,22 \text{ m}$$

Ara, es calculen els danys a 30 metres, com en el cas de la BLEVE, fent ús de la d_c , és a dir, la distància corregida que es defineix a l'**Equació 11.3.6.5.5E**:

$$d_c = d_v + 30 \quad (11.3.6.5.5E)$$

On:

- $d_c (m)$: Distància corregida.
- $d_v (m)$: Distància virtual

$$d_c = 29,22 \text{ m} + 30 \text{ m} = 59,21 \text{ m}$$

Seguidament, es calcula el valor de la d_n amb l'**Equació 11.3.6.5.6E**:

$$d_n = \frac{d_c}{\sqrt[3]{W_{TNT}}} \quad (11.3.6.5.6E)$$

On:

- $d_n \left(\frac{m}{kg^3}\right)$: Distància normalitzada
- $d_c (m)$: Distància corregida.
- $W_{TNT} (kg)$: Massa equivalent de TNT.

D'aquesta manera, en aquesta simulació:

$$d_n = \frac{59,21 \frac{m}{kg^3}}{\sqrt[3]{854,81 \text{ kg}}} = 6,24 \text{ m}$$

Fent servir el mateix gràfic de la **Figura 11.3.6.5.1F** hom pot obtenir el valor de sobrepressió, que correspon a 0,2 bar, que segons la **Figura 11.3.6.5.2F** correspon a una destrucció de cases al 50% a 30 metres.

<i>Dany</i>	<i>Sobrepressió, bar</i>
demolició total	0,8
destrucció de maquinària pesada	0,7
destrucció completa d'habitatges	0,48
danys irreversibles	0,4
destrucció de cases al 50%	0,17
danys greus reparables	0,15
destrucció parcial de murs	0,14
danys estructurals menors	0,05
vidres trencats en un 90%	0,04
vidres trencats en un 50%	0,01

Figura 11.3.6.5.2F: Determinació danys segons la sobrepressió.

Per a la simulació dels fragments s'ha suposat un fragment esfèric de 4 m de radi, amb una àrea de 50,27 m², i un volum de 33,51 m³. Amb les densitats, s'obté que el pes del fragment és de 29352,48 kg. Amb tot això, hom pot obtenir els valors de la velocitat dels fragments amb l'**Equació 11.3.6.5.7E**:

$$u = 2,05 \cdot \left(\frac{P \cdot D^3}{W} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11.3.6.5.7E)$$

On:

- u (ft/s): Velocitat inicial fragments.
- P (psig): Pressió de ruptura.
- D (inches): Diàmetre del fragment.
- W (lb): Pes del fragment.

La velocitat dels fragments en aquest cas són:

$$u = 2,05 \cdot \left(\frac{58,031 \text{ psig} \cdot (157,48 \text{ inches})^3}{64170,47 \text{ lb}} \right)^{\frac{1}{2}} = 121,32 \text{ ft/s} \approx 36,98 \text{ m/s}$$

Per a poder calcular el valor de la distància dels fragments, hom ha d'usar el gràfic de la **Figura 11.3.6.5.3F**:

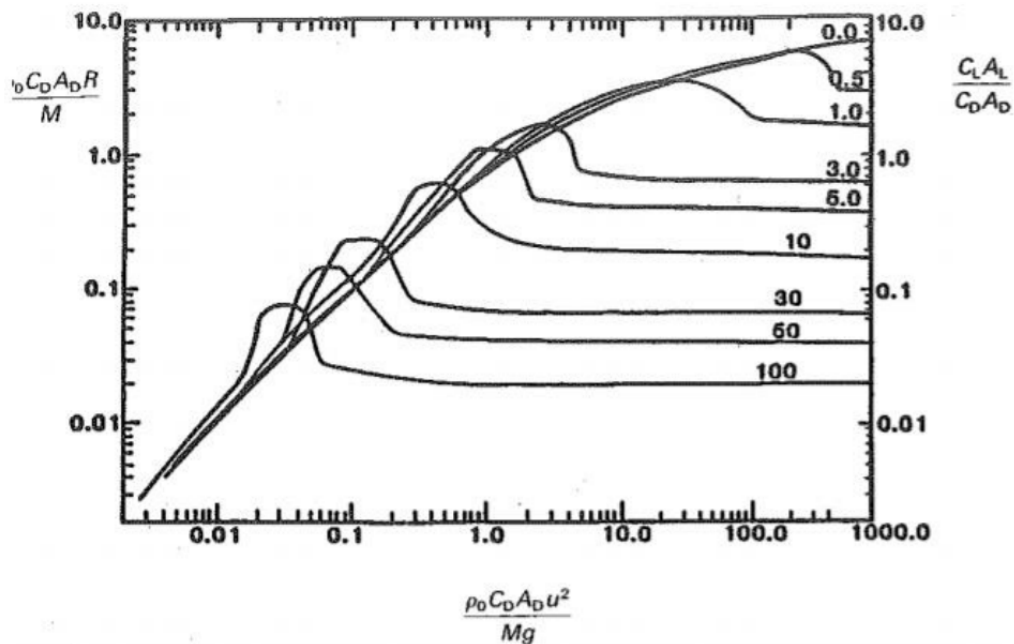


Figura 11.3.6.5.3F: Gràfic per a determinar distància de vol dels fragments.



Sabent que el valor de l'eix de la dreta és zero, ja que el fragment es voluminós, hom ha de calcular el valor de l'eix x amb l'**Equació 11.3.6.5.8E**:

$$Eix x = \frac{\rho_D \cdot C_D \cdot A_D \cdot u^2}{M \cdot g} \quad (11.3.6.5.8E)$$

On:

- ρ_D ($\frac{kg}{m^3}$): Densitat de l'aire.
- C_D : Coeficient de Drag.
- A_D (m^2): Àrea del fragment.
- u ($\frac{m}{s}$): Velocitat inicial fragments.
- M (kg): Massa del fragment.
- g ($\frac{m}{s^2}$): Gravetat.

Així, amb els valors escaients a la simulació, hom obté:

$$Eix x = \frac{1,293 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,47 \cdot 50,27 m^2 \cdot (36,98 \frac{m}{s})^2}{2,94 \cdot 10^4 kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2}} = 0,22$$

Després, l'**Equació 11.3.6.5.9E** descriu el valor de l'eix Y amb el qual es pot determinar el valor de la distància:

$$Eix y = \frac{\rho_D \cdot C_D \cdot A_D \cdot R}{M} \quad (11.3.6.5.9E)$$

On:

- ρ_D ($\frac{kg}{m^3}$): Densitat de l'aire.
- C_D : Coeficient de Drag.
- A_D (m^2): Àrea del fragment.
- M (kg): Massa del fragment.
- R (m): Distància de vol.

Amb la determinació gràfica, hom obté que el valor de l'eix y és igual a 0,2 aproximadament així, l'equació queda com:

$$0,20 = \frac{1,293 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,47 \cdot 50,27 m^2 \cdot R}{2,94 \cdot 10^4 kg} \rightarrow R = 192,18 m$$

11.3.6.6 Sobrepressió i fragmentació Etilbenzè

En primer lloc, les condicions suposades de la simulació són les següents:

- $V_{Líquid}$: 377 m³
- T: 703 K (Autoignició de l'etilbenzè)
- Pressió esclat: 4 atm, 4 vegades la dissenyada pel tanc.
- Pressió atmosfèrica: 1 atm.

Així, amb l'**Equació 11.3.6.6.1E** hom calcula la massa de TNT.

$$W_{TNT} = 0,0219 \cdot P_1 \cdot V_1 \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (11.3.6.6.1E)$$

On:

- W_{TNT} (g): Massa de TNT equivalent.
- P_1 (atm): Pressió d'esclat.
- P_2 (atm): Pressió atmosfèrica
- V_1 (L): Volum de líquid.

D'aquesta manera:

$$W_{TNT} = 0,0219 \cdot 4 atm \cdot 3,77 \cdot 10^5 L \cdot \ln\left(\frac{4 atm}{1 atm}\right) = 1,42 \cdot 10^6 de TNT$$

Després, es sap que un 20% de l'energia va a la ona, així:

$$W_{TNT} = 1,42 \cdot 10^6 g \cdot 0,2 = 8,55 \cdot 10^5 g$$

Amb l'**Equació 11.3.6.6.2E** hom pot calcular la pressió en superfície:

$$P_1 = P_s \cdot \left[1 - \frac{3,5 \cdot (1,4-1) \cdot (P_s-1)}{\left[(1,4 \cdot \frac{T}{M}) \cdot (1+5,9 \cdot P_s) \right]^{0,5}} \right]^{-2 \cdot \frac{1,4}{1,4-1}} \quad (11.3.6.6.2E)$$

On:

- P_1 (bar): Pressió d'esclat.
- P_s (bar): Pressió sobre superfície recipient.
- T (K): Temperatura d'operació.
- M : Massa molar.

$$4,053 \text{ bar} = P_s \cdot \left[1 - \frac{3,5 \cdot (1,4-1) \cdot (P_s-1)}{\left[(1,4 \cdot \frac{703 \text{ K}}{106,14}) \cdot (1+5,9 \cdot P_s) \right]^{0,5}} \right]^{-2 \cdot \frac{1,4}{1,4-1}}$$

Fent servir l'eina *Solver*, hom obté que la pressió sobre el recipient és de 1,93 bar.

D'aquesta manera, hom pot saber el valor de la sobrepressió:

$$\Delta P = 1,80 \text{ bar} - 1,01 \text{ bar} = 0,79 \text{ bar}$$

Així, usant la **Figura 11.3.6.6.1F** hom pot saber la distància normalitzada per a una sobrepressió 0,79 bar, i dóna una d_n de 3,8 m/kg^{1/3}.

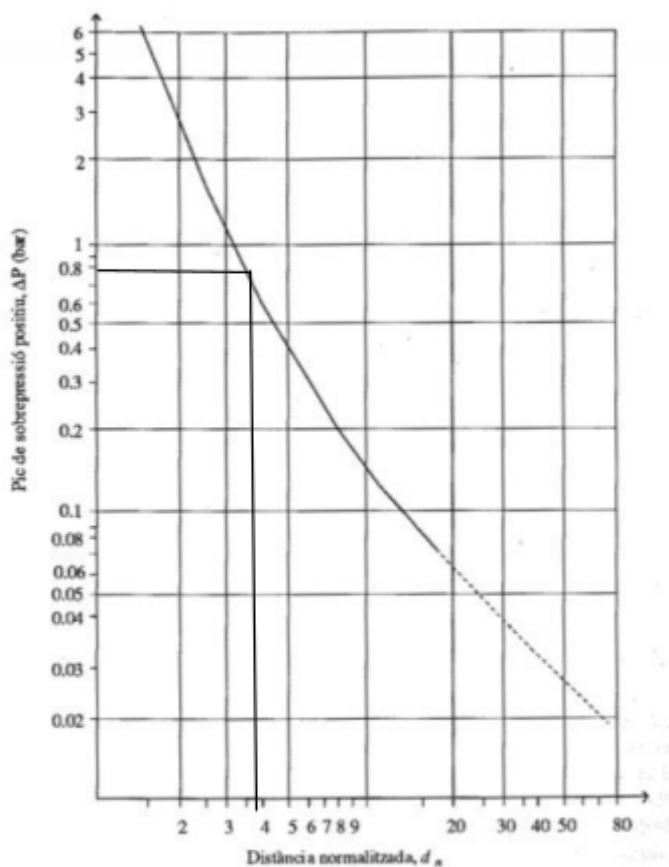


Figura 11.3.6.6.1F: Determinació distància normalitzada per a sobrepressió de 0,79 bar.



Amb l'**Equació 11.3.6.5.3E** hom pot calcular la distància d :

$$d = d_n \cdot \sqrt[3]{W_{TNT}} \quad (11.3.6.5.3E)$$

On:

- d (m): Distància sobrepressió
- d_n ($\frac{m}{kg^{\frac{1}{3}}}$): Distància normalitzada
- W_{TNT} (kg): Massa equivalent de TNT.

En aquest cas:

$$d = 3,8 \frac{m}{kg^{\frac{1}{3}}} \cdot \sqrt[3]{854,81 \text{ kg}} = 36,06 \text{ m}$$

Aquesta distància és la que es produeixen 0,79 bar. No obstant això, aquesta distància no té en compte el recipient. Així, sabent que el radi dels tancs és de 4 metres, s'ha de calcular la anomenada d_v , que té en compte els tancs amb l'**Equació 11.3.6.6.4E**:

$$d_v = d - r \quad (11.3.6.6.4E)$$

On:

- d_v (m): Distància virtual
- d (m): Distància sobrepressió
- r (m): Radi del recipient.

Per aquesta simulació:

$$d_v = 36,06 \text{ m} - 4,00 \text{ m} = 32,06 \text{ m}$$

Ara, es calculen els danys a 30 metres, com en el cas de la BLEVE, fent ús de la d_c , és a dir, la distància corregida que es defineix a l'**Equació 11.3.6.6.5E**:

$$d_c = d_v + 30 \quad (11.3.6.6.5E)$$

On:

- d_c (m): Distància corregida.
- d_v (m): Distància virtual

$$d_c = 32,06 \text{ m} + 30 \text{ m} = 62,06 \text{ m}$$

Seguidament, es calcula el valor de la d_n amb l'**Equació 11.3.6.6E**:

$$d_n = \frac{d_c}{\sqrt[3]{W_{TNT}}} \quad (11.3.6.6E)$$

On:

- $d_n \left(\frac{m}{kg^3}\right)$: Distància normalitzada
- $d_c (m)$: Distància corregida.
- $W_{TNT} (kg)$: Massa equivalent de TNT.

D'aquesta manera, en aquesta simulació:

$$d_n = \frac{62,06 \frac{m}{kg^3}}{\sqrt[3]{854,81 \text{ kg}}} = 6,54 \text{ m}$$

Fent servir el mateix gràfic de la **Figura 11.3.6.5.1F** hom pot obtenir el valor de sobrepressió, que correspon a 0,25 bar, que segons la **Figura 11.3.6.6.2F** correspon a una destrucció de cases al 50% a 30 metres.

<i>Dany</i>	<i>Sobrepressió, bar</i>
demolició total	0,8
destrucció de maquinària pesada	0,7
destrucció completa d'habitatges	0,48
danys irrecuperables	0,4
destrucció de cases al 50%	0,17
danys greus reparables	0,15
destrucció parcial de murs	0,14
danys estructurals menors	0,05
vidres trencats en un 90%	0,04
vidres trencats en un 50%	0,01

Figura 11.3.6.6.2F: Determinació danys segons la sobrepressió.

Per a la simulació dels fragments s'ha suposat un fragment esfèric de 4 m de radi, amb una àrea de 50,27 m², i un volum de 33,51 m³. Amb les densitats, s'obté que el pes del

fragment és de 29020,01 kg. Amb tot això, hom pot obtenir els valors de la velocitat dels fragments amb l'**Equació 11.3.6.5.7E**:

$$u = 2,05 \cdot \left(\frac{P \cdot D^3}{W} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11.3.6.5.7E)$$

On:

- u (ft/s): Velocitat inicial fragments.
- P (psig): Pressió de ruptura.
- D (inches): Diàmetre del fragment.
- W (lb): Pes del fragment.

La velocitat dels fragments en aquest cas són:

$$u = 2,05 \cdot \left(\frac{58,031 \text{ psig} \cdot (157,48 \text{ inches})^3}{63977,52 \text{ lb}} \right)^{\frac{1}{2}} = 122,01 \text{ ft/s} \approx 37,19 \text{ m/s}$$

Per a poder calcular el valor de la distància dels fragments, hom ha d'usar el gràfic de la **Figura 11.3.6.6.3F**:

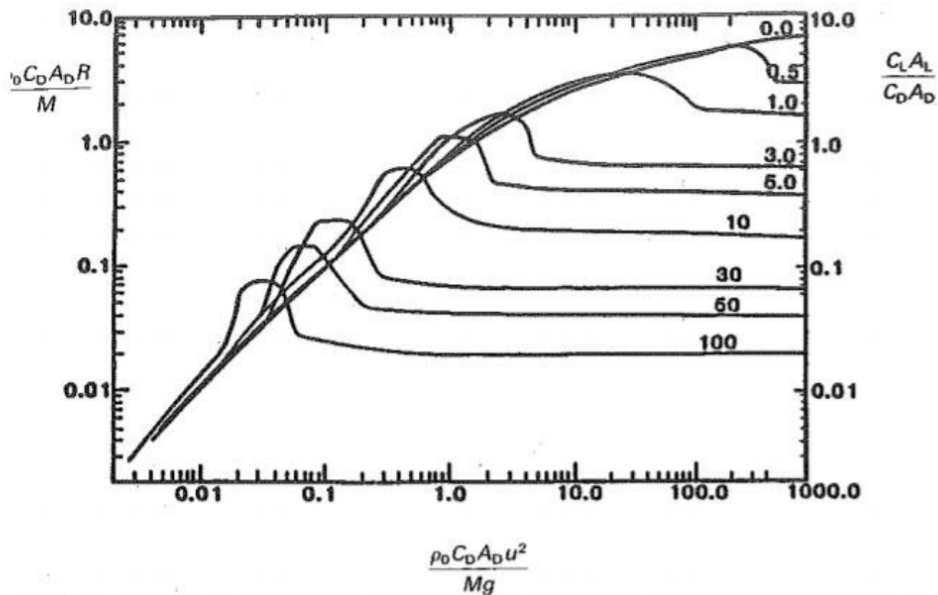


Figura 11.3.6.6.3F: Gràfic per a determinar distància de vol dels fragments.

Sabent que el valor de l'eix de la dreta és zero, ja que el fragment es voluminós, hom ha de calcular el valor de l'eix x amb l'**Equació 11.3.6.6.8E**:



$$Eix x = \frac{\rho_D \cdot C_D \cdot A_D \cdot u^2}{M \cdot g} \quad (11.3.6.6.8E)$$

On:

- ρ_D ($\frac{kg}{m^3}$): Densitat de l'aire.
- C_D : Coeficient de Drag.
- A_D (m^2): Àrea del fragment.
- u ($\frac{m}{s}$): Velocitat inicial fragments.
- M (kg): Massa del fragment.
- g ($\frac{m}{s^2}$): Gravetat.

Així, amb els valors escaients a la simulació, hom obté:

$$Eix x = \frac{1,293 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,47 \cdot 50,27 m^2 \cdot (37,12 \frac{m}{s})^2}{2,90 \cdot 10^5 kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2}} = 0,22$$

Després, l'**Equació 11.3.6.6.9E** descriu el valor de l'eix Y amb el qual es pot determinar el valor de la distància:

$$Eix y = \frac{\rho_D \cdot C_D \cdot A_D \cdot R}{M} \quad (11.3.6.6.9E)$$

On:

- ρ_D ($\frac{kg}{m^3}$): Densitat de l'aire.
- C_D : Coeficient de Drag.
- A_D (m^2): Àrea del fragment.
- M (kg): Massa del fragment.
- R (m): Distància de vol.

Amb la determinació gràfica, hom obté que el valor de l'eix y és igual a 0,2 aproximadament així, l'equació queda com:



$$0,20 = \frac{1,293 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,47 \cdot 50,27 m^2 \cdot R}{2,90 \cdot 10^5 kg} \rightarrow R = 190,00 m$$

11.3.7 Nitrogen a planta

Seguint les normes de seguretat i les indicacions del proveïdor⁶ s'ha calculat la necessitat de bombones per zona de la planta, tal i com mostra l'**Equació 11.3.7.1E**:

$$A (m^2) \cdot \frac{1 \text{ bombona}}{25 m^2} \quad (11.3.7.1E)$$

On:

- $A (m^2)$: Àrea de cada zona.

Per exemple, per a la zona Z-600:

$$5600 m^2 \cdot \frac{1 \text{ bombona}}{25 m^2} = 224 \text{ bombones}$$

11.4. Canonades i bombes

11.4.1 Canonades

El disseny del conjunt de canonades distribuïdes per la planta de producció ChemEBenz s'ha dut a terme segons el procediment explicat a continuació.

Primerament, es determina el diàmetre de cadascuna de les canonades. Per fer-ho, s'ha fixat el valor del terme de la velocitat en funció de l'estat físic del fluid circulant. Els valors han estat escollits segons el rang de velocitats típiques ja establert per la circulació de fluids en canonades i aquests es mostren a la **Taula 11.4.1.1T**.

Taula 11.4.1.1T: Velocitats de disseny de circulació

Estat físic del fluid	Velocitat (m/s)
Líquid	1
Líquid - Gas	5
Gas	15

Cal destacar que la possible generació de càrregues electroestàtiques a les canonades també ha estat un altre paràmetre a considerar a l'hora de triar els valors de la velocitat.

⁶ ("Zensitec", 2022)



Així doncs, tenint en compte el cabal volumètric de cada tram, es troba el valor estimat del diàmetre a partir de l'**Equació 11.4.1.1E**.

$$D = \sqrt{\frac{F}{\frac{\pi}{4} \cdot v}} \quad (11.4.1.1E)$$

On:

- D (m): Diàmetre estimat de la canonada.
- v ($\frac{m}{s}$): Velocitat de pas del fluid.
- F ($\frac{m^3}{s}$): Cabal volumètric del fluid.

El valor del diàmetre estimat s'associa un diàmetre nominal en polzades (NPS). A continuació, a partir del diàmetre nominal i del gruix de la canonada es realitza el procés de càlcul a la inversa per determinar la velocitat de treball real del fluid. És important mencionar que el gruix de la canonada ve predeterminat en funció del Schedule seleccionat: Schedule 80S a *ChemEbenz*. Es tracta d'un paràmetre d'alta importància ja que permet saber el valor real del diàmetre intern de la canonada. Aquest, es troba, doncs a partir de l'**Equació 11.4.1.2E**.

$$D_{int} = D_{ext} - 2 \cdot \Delta x \quad (11.4.1.2E)$$

On:

- D_{int} (m): Diàmetre interior de la canonada.
- D_{ext} (m): Diàmetre exterior de la canonada.
- Δx (m): Gruix de la canonada.

Seguidament, es presenta un exemple del procediment realitzat pel disseny d'una de les canonades de la zona dedicada a la producció de la reacció, la canonada 3-12L-201:

1. Càlcul del diàmetre estimat:

$$D = \sqrt{\frac{F}{\frac{\pi}{4} \cdot v}} = \sqrt{\frac{13,57 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1 h}{3600 s}}{\frac{\pi}{4} \cdot 1 \frac{m}{s}}} = 0,06927 m = 69,27 mm$$

2. Selecció del diàmetre nominal (NPS):

S'escull el diàmetre nominal de 3", el qual correspon a un diàmetre exterior de 88,90 mm i un gruix de 7,62 mm.



3. Càlcul del diàmetre interior:

$$D_{int} = D_{ext} - 2 \cdot \Delta x = 88,90 \text{ mm} - 2 \cdot 7,62 \text{ mm} = 73,66 \text{ mm}$$

4. Càlcul de la velocitat de treball:

$$D = \sqrt{\frac{F}{\frac{\pi}{4} \cdot v}} \rightarrow 73,66 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = \sqrt{\frac{13,57 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{\frac{\pi}{4} \cdot v}} \rightarrow$$
$$v = 0,88 \text{ m/s}$$

Per altra banda, s'ha determinat el valor de temperatura i pressió de disseny per cadascuna de les canonades instal·lades. El procediment ha consistit en sobredimensionar en un 15% els valors establerts per les condicions d'operació. Pel cas de l'exemple anterior on les condicions operatives són de 27,05 °C i 50 bar, les canonades s'han dissenyat per una temperatura de 31,11 °C i una pressió de 57,50 bar.

11.4.2 Bombes

La bomba proporciona energia al fluid per tal que aquest arribi al seu destí, normalment un equip, per a la seva selecció cal saber les pèrdues per fricció en el tram que estarà impulsant el fluid, la càrrega total, el NPSH disponible i finalment la potència de la bomba.

Les pèrdues per fricció corresponen a la pèrdua d'energia mecànica del corrent a causa del fregament amb les parets de les canonades (relacionat amb la rugositat del material de la canonada) i dels accessoris pels quals circula. Aquestes pèrdues estan directament relacionades amb, el número de Reynolds i, per tant, amb la velocitat, densitat, viscositat i diàmetre de la canonada. Depenent del Reynolds de circulació, el corrent pot considerar-se en règim laminar, règim de transició o règim turbulent.

Aquestes pèrdues per fricció estan compostes per dos termes:

1. **Pèrdues de fricció per tram recte** (e_{vr} o e_{vrecte}) es calcula segons l'equació següent (**Equació 11.4.2.1E**):

$$e_{v_{recte}} = 4f \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \frac{L}{D} \quad (11.4.2.1E)$$

On:

- $e_{v_{recte}}$ ($\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$ o $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$): Pèrdues per fricció amb la canonada.
- $4f$: 4 vegades el factor de Darcy f , és un paràmetre que serveix quantificar la resistència al flux de la canonada.



- $v \left(\frac{m}{s}\right)$: Velocitat del fluid que circula per aquell tram de canonada.
- $L (m)$: Longitud del tram de canonada pel qual circula el fluid.
- $D (m)$: Diàmetre interior de la canonada pel qual circula el fluid.

Per obtenir el factor de Darcy cal definir el nombre de Reynolds el qual es calcula amb l'equació (**Equació 11.4.2.2E**):

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (11.4.2.2E)$$

On:

- Re : és el nombre de Reynolds paràmetre que indica el tipus de flux que té un fluid en moviment per una canonada.
- $\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right)$: Densitat del fluid que circula per la canonada, si el fluid és una mescla de diferents components s'ha d'utilitzar percentatges molars.
- $-v \left(\frac{m}{s}\right)$: Velocitat del fluid que circula per aquell tram de canonada.
- $D (m)$: Diàmetre interior de la canonada pel qual circula el fluid.
- $\mu \left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)$: Viscositat del fluid que circula per la canonada, si el fluid és una mescla de diferents components s'ha d'utilitzar percentatges molars.

Per a règims laminars es pot utilitzar la següent equació (**Equació 11.4.2.3E**):

$$f = \frac{16}{Re} \quad (11.4.2.3E)$$

Per a règims turbulents s'utilitza l'àbac de Moody (**Figura 11.4.2.1F**), el qual s'obté el factor $4f$ a partir del número de Reynolds i de la rugositat relativa, la qual es calcula dividint la rugositat específica (m) inherent del material de la canonada entre el diàmetre interior (m) de la canonada.

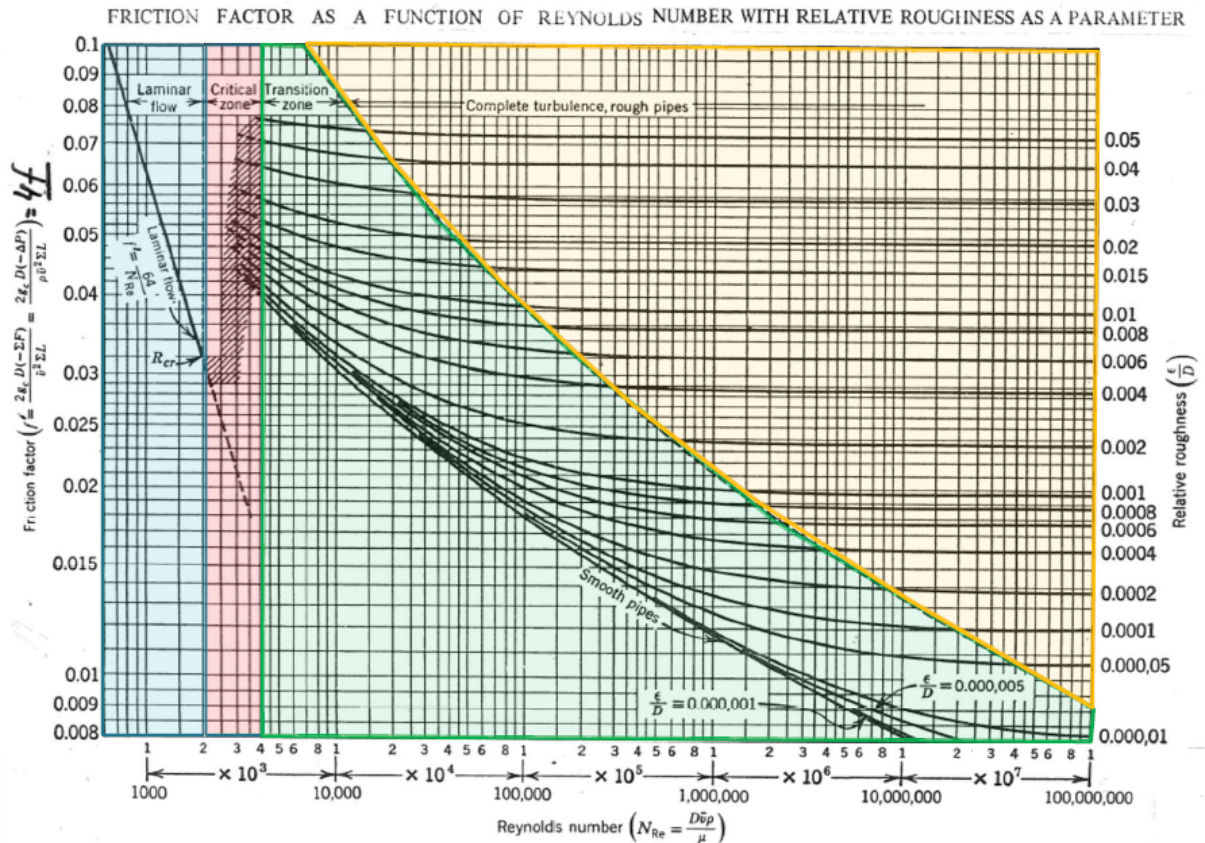


Figura 11.4.2.1F: Àbac de Moody

2. Pèrdues per fricció dels accidents en les canonades (ev acc), es calcula amb la següent equació (Equació 11.4.2.4E):

$$ev_{accidents} = K \cdot \frac{v^2}{2} \quad (11.4.2.4E) \text{ on:}$$

- $ev_{accidents}$ ($\frac{m^2}{s^2}$ o $\frac{J}{kg}$): Pèrdues per fricció pels accidents.
- K : Coeficient de pèrdua de l'accident, si en el tram hi ha més d'un accident es sumen totes les K dels accidents.
- v ($\frac{m}{s}$): Velocitat del fluid que circula per aquell tram de canonada.

Els coeficients de pèrdua per fricció venen tabulats i es presenten a la següent figura (Figura 11.4.2.2F)

ACCIDENT	K
Vàlvula de seient	
oberta	9,0
¾ oberta	13,0
½ oberta	36,0
¼ oberta	112,0
Vàlvula angular oberta	2,0
Vàlvula de retenció (oberta)	
de chamera (frontissa)	2,0
de bola	70,0
de disc	10,0
Cabalímetres mecànics	
de disc	7,0
de pistó	15,0
rotatori	10,0
de turbina	6,0
Canvi de diàmetre	
estretament	** (b)
eixamplament	** (b)

** $\left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right)^2$ essent D_1 el diàmetre del tub petit i D_2 el diàmetre del tub gran.

ACCIDENT	K
Entrada/sortida circuit	
Entrada encanonada	0,78
Entrada cantells vius	0,50
Entrada arrodonida	0,04
Sortida encanonada	1,00
Sortida cantells vius	1,00
Sortida arrodonida	1,00
Colzes/ Unions	
Colze de 45° standard	0,35
Colze de 45° gran curvatura	0,20
Colze de 90° standard	0,75
Colze de 90° gran curvatura	0,45
Colze de 90° petita curvatura	1,3
Corba de 180°	1,5
T standard ús com a colze	1,0
T standard amb bifurcació tancada	0,4
T standard amb divisió de cabal	1,0 (a)
Unió roscada	0,04
Maneguet d'unió	0,04
Vàlvula comporta	
oberta	0,17
¾ oberta	0,90
½ oberta	4,5
¼ oberta	24,0
Vàlvula de diafragma	
oberta	2,3
¾ oberta	2,6
½ oberta	4,3
¼ oberta	21,0

Figura 11.4.2.2F. Taula amb els coeficients de pèrdua K segons els accidents

Una vegada es tenen calculades les dues pèrdues es sumen i s'obtenen les pèrdues totals per fricció. Després, es pot anar al balanç d'energia mecànica (**Equació 11.4.2.5E**):

$$\frac{\Delta P}{\rho} + g \cdot \Delta z + \frac{1}{2} \frac{\Delta v^2}{\alpha} = w - ev \quad (11.4.2.5E)$$

On:

- ΔP (Pa): Diferència de pressions entre dos punts final menys inicial ($P_2 - P_1$).
- ρ ($\frac{kg}{m^3}$): Densitat del fluid que circula per la canonada.
- g ($\frac{m}{s^2}$): Gravetat a la terra.
- Δz (m): Diferència d'alçada entre dos punts final menys inicial ($z_2 - z_1$).
- Δv ($\frac{m}{s}$): Diferència de velocitat entre dos punts final menys inicial ($v_2 - v_1$)
- α : Factor de correcció de l'energia cinètica, normalment per règims turbulents pren un valor aproximat d'1, mentre que per a règims laminars té el valor de 0,5.



- $w \left(\frac{m^2}{s^2}\right)$: Treball que ha de fer la bomba en el tram on es fa el balanç d'energia.
- $ev \left(\frac{m^2}{s^2} \text{ o } \frac{J}{kg}\right)$: Pèrdues totals per fricció en el tram on es fa el balanç d'energia.

Sabent totes les dades excepte la del treball de la bomba s'aïlla i es calcula el treball de la bomba, llavors ja es pot calcular la potència de la bomba (**Equació 11.4.2.6E**):

$$W = w \cdot m \text{ (11.4.2.6E)}$$

On:

- $W \left(\frac{J}{s} \text{ o } W\right)$: Potència de la bomba.
- $w \left(\frac{m^2}{s^2}\right)$: Treball que ha de fer la bomba
- $m \left(\frac{Kg}{s}\right)$: Cabal màssic, calculat mitjançant la multiplicació del cabal volumètric per la densitat del corrent.

Per obtenir la potència real es divideix la potència obtinguda entre l'eficiència de la bomba, s'ha suposat en les bombes una eficiència del 75%.

Altre paràmetre característic per escollir una bomba és el NPSH disponible (**Equació 11.4.2.7E**) de la bomba, que fa referència a la energia en metres que pot perdre el fluid sense que la seva càrrega sigui inferior a la necessària per mantenir-se en estat líquid durant el recorregut fins l'entrada a la boca de succió, és a dir, en el tram d'aspiració.

$$NPSH_{disp} = (z_1 - z_3) + \frac{1}{g} \left(\frac{P_1 - P_v}{\rho} + \frac{v_1^2}{2\alpha} - (ev_{asp}) \right) \text{ (11.4.2.7E)}$$

On:

- $NPSH_{disp} (m)$: NPSH disponible de la bomba.
- $z (m)$: Alçada del punt escollit.
- $g \left(\frac{m}{s^2}\right)$: Gravetat a la terra.
- $P (Pa)$: Pressió del fluid.
- $P_v (Pa)$: Pressió de vapor del fluid.
 - $\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right)$: Densitat del fluid que circula per la canonada.
 - $v \left(\frac{m}{s}\right)$: Velocitat del fluid que circula per aquell tram de canonada.
- α : Factor de correcció de l'energia cinètica,
- $ev_{asp} \left(\frac{m^2}{s^2} \text{ o } \frac{J}{kg}\right)$: Pèrdues per fricció en el tram d'aspiració.



Altre paràmetre característic de la bomba és el $NPSH_{req}$ i s'ha de vigilar per tal d'evitar que la bomba caviti, i es pot calcula amb la següent equació (**Equació 11.4.2.8E**):

$$NPSH_{req} = \frac{0,1 \cdot P_v}{g \cdot \rho} \quad (11.4.2.8E)$$

On:

- $NPSH_{req} (m)$: és el NPSH requerit indica el valor en que la pressió absoluta en el punt de succió de la bomba ha de sobrepassar a la pressió vapor.
- $P_v (Pa)$: Pressió de vapor del fluid.
- $g (\frac{m}{s^2})$: Gravitat a la terra.
- $\rho (\frac{kg}{m^3})$: Densitat del fluid que circula per la canonada.

Si el $NPSH_{req} > NPSH_{disp}$ dona lloc al fenomen de cavitació de la bomba, és a dir, es vaporitza una part o tot el líquid formant bosses de gas a l'interior de la bomba que es dilaten i contrauen, augmentant la vibració i soroll, i arribant a fer malbé parts de la bomba reduint la seva vida útil.

I finalment altre paràmetre característic per la elecció de la bomba és la càrrega, un concepte que neix quan es manipula el BEM (**Equació 11.4.2.5E**) donant lloc a la mateixa fórmula dividint entre la gravetat a tots els termes (**Equació 11.4.2.9E**):

$$\frac{\Delta P}{g \cdot \rho} + \Delta z + \frac{1}{2 \cdot g} \frac{\Delta v^2}{\alpha} = \frac{w}{g} - \frac{ev}{g} \quad (11.4.2.9E)$$

On:

- $\Delta P (Pa)$: Diferència de pressions entre dos punts final menys inicial ($P_2 - P_1$).
 - $\rho (\frac{kg}{m^3})$: Densitat del fluid que circula per la canonada.
 - $g (\frac{m}{s^2})$: Gravitat a la terra.
 - $\Delta z (m)$: Diferència d'alçada entre dos punts final menys inicial ($z_2 - z_1$).
- $\Delta v (\frac{m}{s})$: Diferència de velocitat entre dos punts final menys inicial ($v_2 - v_1$)
- α : Factor de correcció de l'energia cinètica.
- $w (\frac{m^2}{s^2})$: Treball que ha de fer la bomba en el tram on es fa el balanç d'energia.
- $ev (\frac{m^2}{s^2} \text{ o } \frac{J}{kg})$: Pèrdues totals per fricció en el tram on es fa el balanç d'energia.
- $\frac{w}{g} (m)$: Concepte de càrrega h, és la energia en metres que ha de subministrar la bomba per superar les pèrdues d'energia.

Seguidament es fa un exemple de càlcul dels paràmetres abans esmentats per la bomba P-101A, encara que són dues bombes en paral·lel estan dissenyades per a que puguin impulsar el 100% del cabal individualment.

Primer s'ha de veure el diagrama i entendre quin és l'objectiu de la bomba, mirant el diagrama de l'àrea Z-100 es pot veure que la bomba agafa un caudal de la cisterna d'una mescla de benzè i toluè i el condueix a 10 m d'altura a través de les canonades pertinents fins a 3 tancs d'emmagatzematge, com el tanc més allunyat (TM-101C) és el que tindrà més pèrdues d'energia mecànica, el disseny de la bomba es farà amb un balanç entre aquests dos punts.

El següent punt seria saber les característiques de la mescla de fluids que es tenen i per on circula (**Taula 11.4.2.1T**):

11.4.2.1T. Característiques del fluid referents a la bomba

Temperatura del fluid (°C)	25
Pressió del fluid (Pa)	101.300
Densitat del fluid ($\frac{Kg}{m^3}$)	872,8
Viscositat del fluid ($\frac{Kg}{m \cdot s}$)	6.514E-04
Rugositat específica de la canonada (m)	4.6E-05
Cabal del fluid que ha d'impulsar la bomba ($\frac{m^3}{h}$)	106,067

Seguidament cal saber per quines canonades passa el fluid i les seves característiques també és important (**Taula 11.4.2.2T**):

Taula 11.4.2.2T. Característiques de les canonades fins al TM-101C

Canonada	Diàmetre intern (mm)	Cabal ($\frac{m^3}{h}$)	Velocitat ($\frac{m}{s}$)	Longitud (m)	Altura (m)
8-12L-101	193,68	106,067	1	5	0
8-12L-102	193,68	106,067	1	2,5	0
8-12L-103	19,68	70,71	0,667	25	10
8-12L104	122,26	35,35	0,836	15	10

Les canonades fins al tanc objectiu passen per diferents accidents per tal de fer un càlcul de les pèrdues s'ha de saber quin tipus d'accidents hi ha (**Taula 11.4.2.3T**):

Taula 11.4.2.3T. Llistat d'accidents de cada canonada i la seva K

Canonada	Accidents	K
8-12L-101	-Vàlvula de papallona	-4
	-Vàlvula de comporta	-0,17
	-Colze en forma de T	-1
	-Colze de 90°	-0,75
	-Vàlvula de comporta	-0,17
	-Colze de 90°	-0,75
	-Bomba	-
	-Vàlvula de retenció de clapeta	-2
	-Vàlvula de comporta	-0,17
	-Colze de 90°	-0,75
	-Total	-9,76
8-12L-102	-Colze en forma de T	-1
	-Total	-1
8-12L-103	-Colze en forma de T	-1
	-Vàlvula de control de seient	-9
	-Total	-10
8-12L-104	-Colze en forma de T	-1
	-Vàlvula de control de seient	-9
	-Estretament de 8" a 5"	-0,602
	-Colze de 90°	-0,75
	-Vàlvula de control de seient	-9
	-Total	-20,35

Una vegada es tenen totes aquestes dades ja es pot començar a calcular les pèrdues d'energia per fricció. Primerament es calcula el nombre de Reynolds amb la fórmula (**Equació 11.4.2.2E**), es faràn els exemples de càlcul amb el tram de canonada 8-12L-101:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{872,8 \frac{kg}{m^3} \cdot 1,0,19368 m}{6,514E-04 \frac{Kg}{m \cdot s}} = 259.514$$

Seguidament es calcula la rugositat relativa:

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{4,6E-05 m}{0,19 m} = 0,00024$$

Amb aquests dos valors i amb l'Àbac de Moody (**Figura 11.4.2.1F**) es pot trobar el factor 4f, el qual dona 0,017. Ara ja es pot calcular les pèrdues en tram recte i accidents amb les fórmules (**Equació 11.4.2.1E**) i (**Equació 11.4.2.4E**).

$$ev_{recte} = 4f \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \frac{L}{D} = 0.017 \cdot \frac{1^2}{2} \cdot \frac{5}{193.68E-0.3} = 0,22 \frac{J}{Kg}$$

$$ev_{accidents} = K \cdot \frac{v^2}{2} = 9.76 \cdot \frac{1^2}{2} = 4,88 \frac{J}{Kg}$$

$$ev_{total} = ev_{recte} + ev_{accidents} = 5,098 \frac{J}{Kg}$$

Una vegada es calculen les pèrdues de cada tram de canonada on es fa el BEM i es sumen ja es tenen les pèrdues de tot el recorregut, i ja es pot aplicar el balanç i calcular el treball fet per la bomba. El punt inicial és just a la entrada al sistema de canonadas (1) i el punt final just abans de la entrada del tanc d'emmagatzematge TM-101C (2), les dades dels dos punts estan en la taula següent (**Taula 11.4.2.4T**):

Taula 11.4.2.4T. Dades del punt inicial i final per a l'aplicació del BEM

Paràmetre	1	2
P (Pa)	101.300	101.300
z (m)	0	10
v ($\frac{m}{s}$)	1	0,84
e_v ($\frac{J}{Kg}$)	16,72	

$$\frac{\Delta P}{\rho} + g \cdot \Delta z + \frac{1}{2} \frac{\Delta v^2}{\alpha} = w - ev \rightarrow$$

$$\frac{101300-101300}{872,8} + 9,81 \cdot (10 - 0) + \frac{1}{2} \left(\frac{0,84^2}{1} - \frac{1^2}{1} \right) = w - 16,72$$

$$w = 114.666 \frac{J}{Kg}$$

A partir d'aquest valor es pot calcular la potència de la bomba multiplicant per el cabal màssic obtenint una potència de $W = 2984,67 W$. Es suposa una eficiència del 75% i s'acaba amb una potència real de $W_{real} = 3931.56 W$.

Per al càlcul de la càrrega total es fa una divisió del treball de la bomba entre la gravetat, obtenint així una càrrega de $h=11.69 m$.

Per al càlcul del $NPSH_{disp}$ s'utilitza l'equació (**Equació 11.4.2.7E**), donant un valor de 10,16 m.

11.5 Mescladors

Tal com s'ha mencionat al Capítol II. Equips, el paràmetre de disseny per a aquest tipus d'equip és el cabal resultant de la unió dels dos corrents a barrejar. En funció d'aquesta variable, es calcula el diàmetre del mesclador requerit partir de les propietats que el corrent presenta (velocitat de pas i densitat). La **Taula 11.5.1.T** mostra els requeriments de cabal de cadascun dels mescladors instal·lats a la planta *ChemEBenz*.

Taula 11.5.2.1.T: Requeriments dels mescladors

Ítem	Cabal (kg/h)
M-201	$8,60 \cdot 10^4$
M-202	$8,60 \cdot 10^4$
M-203	$8,60 \cdot 10^4$
M-204	34,52

L'obtenció dels diàmetres corresponents es duu a terme a partir de l'**Equació 11.5.1E**.

$$v = \frac{F}{\frac{\pi}{4} D^2} \quad (11.5.1E)$$

On:

- $v \left(\frac{m}{s}\right)$: Velocitat de pas del fluid.
- $F \left(\frac{m^3}{s}\right)$: Cabal volumètric del fluid.
- $D (m)$: Diàmetre del mesclador.

Així, doncs pel cas del mesclador M-201, el diàmetre requerit és el següent:

$$1 \frac{m}{s} = \frac{8,60 \cdot 10^4 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1 m^3}{520,1 kg} \cdot \frac{1 h}{3600 s}}{\frac{\pi}{4} D^2} \quad \rightarrow \quad D = 0,2418 m = 241,8 mm$$

Per la resta de mescladors, es segueix el mateix procediment i s'obtenen uns valors corresponents a: 186,70 mm (M-202), 239,40 mm (M-203) i 19,33 mm (M-204).

L'empresa Komax System, Inc. és l'encarregada de la provisió dels mescladors. Aquesta disposa d'equips de diferents diàmetres que van des de ½ " fins a 60". A *ChemEBenz* es fa ús dels mescladors de la gamma d'acer inoxidable de 10" pels ítems M-201 i M-203, els de 8" pel mesclador M-202 i els de 1" per l'equip M-204.

Un altre paràmetre de disseny a tenir en compte és el nombre d'elements mescladors que presenta cadascun dels equips esmentats. La determinació d'aquest valor es duu a terme a partir d'un gràfic proporcionat per la pròpia empresa proveïdora⁷, el qual es mostra a la **Figura 11.5.1.F**.

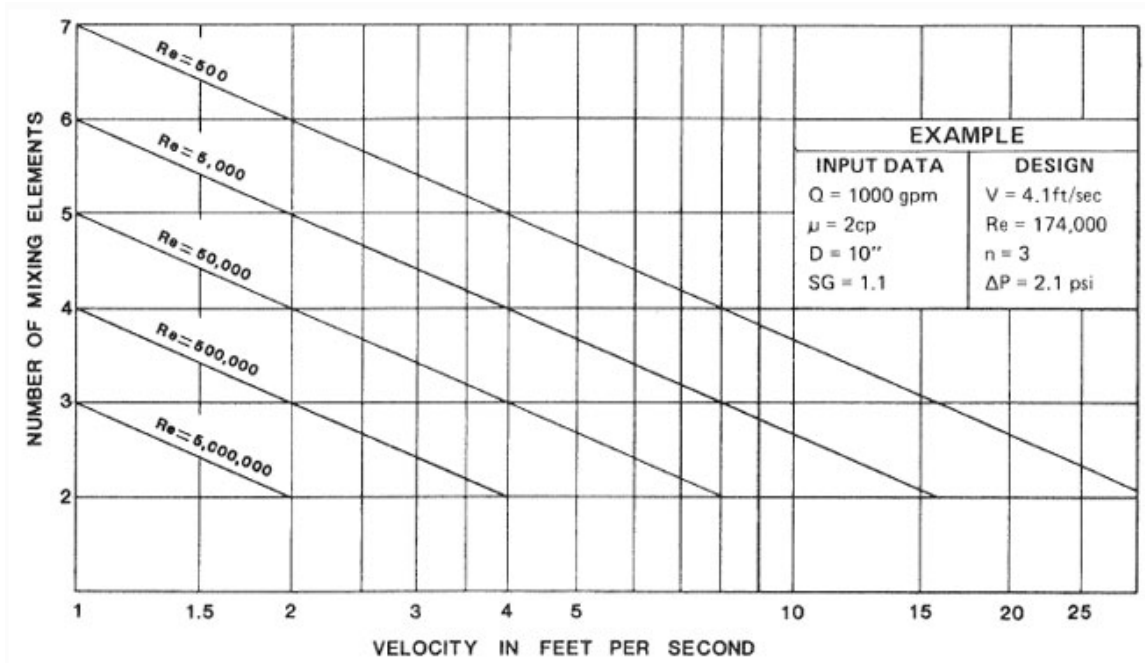


Figura 11.5.2.1.F: Relació entre el nombre d'elements mescladors, la velocitat de pas i el Reynolds.

La representació gràfica estableix una relació entre el nombre d'elements mescladors, la velocitat de pas (fixada a 1 m/s) i el número de Reynolds. A continuació, doncs, es calcula el nombre de Reynolds per cadascun dels tipus de mesclador a partir de l'**Equació 11.5.2E** i es troba el valor equivalent a la quantitat d'elements mescladors.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (11.5.2E)$$

On:

- Re (–): Nombre de Reynolds.
- ρ ($\frac{kg}{m^3}$): Densitat del fluid.
- v ($\frac{m}{s}$): Velocitat de pas del fluid.
- D (m): Diàmetre del mesclador.
- μ (Pa·s): Viscositat del fluid.

⁷(Triple Action Static Mixer - Komax Systems, 2020)



Pel mesclador M-201:

$$Re = \frac{520,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,25 \text{ m}}{1.553 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}} = 8295,47$$

Seguint la figura anterior, es troba que el nombre d'elements mescladors necessaris pel mesclador M-201 és 5. De la mateixa manera que amb el càlcul dels diàmetres, es repeteix el mateix procediment per la resta de mescladors i s'obtenen els següents resultats: 5 elements pels mescladors M-202 i M-203, i 7 elements pel mesclador M-204.

11.6 Serveis de planta

11.6.1 Caldera d'oli tèrmic

A la planta *ChemEBenz*, es requereix l'ús d'oli tèrmic com a fluid escalfador dels reboilers de les columnes de destil·lació i per l'escalfament d'alguns dels bescanviadors de planta. Per poder realitzar el disseny de les calderes d'oli tèrmic de la planta, és necessari determinar la producció tèrmica necessària dels diferents equips. A la **Taula 11.6.1.1.T** es recullen tots els equips que precisen d'aquest servei i els seus requeriments d'oli tèrmic corresponents.

Taula 11.6.1.1.T: Equips que fan ús d'oli tèrmic

Ítem	Cabal oli tèrmic (kg/s)
E-201	4,87
E-206	0,017
RB-301	129,19
RB-302	401,88
RB-303	68,029
TOTAL	603,99

La taula mostra que es precisa d'un cabal d'oli tèrmic equivalent a 604 kg/s. La potència necessària per poder subministrar aquesta producció de calor es determina a partir de l'**Equació 11.6.1.1E**. El càlcul es duu a terme tenint en compte que la les temperatures d'entrada i de sortida dels equips que precisen d'oli tèrmic tenen un valor de 330 i 200 °C, respectivament.

$$Q_{\text{caldera útil}} = m_{\text{oli tèrmic}} \cdot Cp \cdot \Delta T \quad (11.6.1.1E)$$



On:

- $Q_{caldera\ útil}$ (kW): Potència útil de la caldera.
- $m_{oli\ tèrmic}$ (kg/h): Cabal màssic d'oli tèrmic.
- Cp ($\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$): Calor específic de l'oli tèrmic.
- ΔT ($^\circ C$): Variació de temperatura requerida.

$$Q_{caldera\ útil} = 604 \frac{kg}{s} \cdot 2,326 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (330 - 200) ^\circ C = 1,83 \cdot 10^5 \frac{kJ}{s} = 1,83 \cdot 10^5 kW$$

Seguidament, s'estableix la potència de producció de la caldera de vapor, considerant un rendiment del 96%. Es determina aquest valor a partir de l'**Equació 11.5.2.2E**, presentada a continuació:

$$Q_{caldera\ prod} = \frac{Q_{caldera\ útil}}{\eta} \quad (11.6.1.2E)$$

On:

- $Q_{caldera\ prod}$ (kW): Potència de producció de la caldera.
- $Q_{caldera\ útil}$ (kW): Potència útil de la caldera.
- η : Rendiment de la caldera.

$$Q_{caldera\ cons} = \frac{1,83 \cdot 10^5 kW}{0,96} = 1,92 \cdot 10^5 kW$$

Tal com es pot observar, el valor obtingut de potència requerida és molt alt per a una única caldera. És per aquest motiu que es decideix que la planta *ChemEBenz* disposi d'un total de dotze calderes d'alta capacitat de producció (15.000 kW). Totes les calderes venen proporcionades per l'empresa VYC Industrial, SAU i les seves especificacions es troben al Capítol II. Equips.

A continuació, és determina el consum mensual de gas natural de cadascuna de les calderes. Primerament, és necessari calcular el valor d'energia consumida pels equips en unitats energètiques. Tenint en compte que la caldera està en funcionament durant 350 dies, es troba aquest paràmetre multiplicant la potència de cada caldera per 8400h. L'energia calorífica consumida anualment per cada caldera assoleix un valor equivalent a $1,26 \cdot 10^8$ kWh.



Finalment, es determina el consum de gas natural a partir del poder calorífic (quantitat d'energia alliberada per unitat de volum de gas) de la mescla gasosa d'hidrocarburs. Segons l'empresa proveïdora Naturgy, el poder calorífic del gas que aquesta proveeix equival a 10,67 kWh/Nm³.⁸ El càlcul es duu a terme a partir de l'**Equació 11.6.1.3E**.

$$C_{gas\ natural} = \frac{n^{\circ} \cdot C_{energia} - C_{energia\ calorífica\ cogeneració}}{PC} \quad (11.6.1.3E)$$

On:

- $C_{gas\ natural}$ (Nm³): Consum anual de gas natural.
- $C_{energia}$ (kWh): Consum anual energètic per cada caldera.
- $C_{energia\ calorífica\ cogeneració}$: Energia calorífica generada per la turbina de cogeneració.
- PC (kWh/Nm³): Poder calorífic del gas natural.

Així doncs, el consum anual de gas natural a *ChemEBenz* és de:

$$C_{gas\ natural} = \frac{12 \cdot 1,26 \cdot 10^8 - 4,82 \cdot 10^8 \text{ kWh/any}}{10,67 \text{ kWh/Nm}^3} = 9,65 \cdot 10^7 \text{ Nm}^3/\text{any}$$

11.6.2 Torres de refrigeració

L'ús de torres de refrigeració a la planta *ChemEBenz*, es deu a una necessitat d'aigua a temperatura ambient per part d'alguns dels equips de la instal·lació. Els equips que requereixen d'aquest servei són dos dels bescanviadors de calor del procés productiu i els condensadors presents a les tres columnes de destil·lació.

De la mateixa manera que en el cas de les calderes d'oli tèrmic, el disseny de les diferents torres de refrigeració es duu a terme tenint en compte el cabal d'aigua que precisen cadascun dels bescanviadors. El nombre d'equips que requereixen d'aigua de refrigeració i les necessitats corresponents es mostren a la **Taula 11.6.2.1T**

⁸ (Naturgy, s. d.)

Taula 11.6.2.1T: Equips que fan ús d'aigua de refrigeració

Ítem	Cabal aigua (kg/s)
E-204	108,15
E-205	0,021
E-302	17,52
CN-302	862,33
CN-303	0,28
TOTAL	988,30

Així doncs, a partir dels requeriments d'aigua calculats es troba la potència útil de les torres de refrigeració segons l'**Equació 11.6.2.1E** que es presenta a continuació. Cal fer esment específic en el fet que, per les torres de refrigeració, el salt tèrmic assoleix un valor de 30 °C.

$$Q_{torre\ útil} = m_{aigua} \cdot Cp \cdot \Delta T \quad (11.6.2.1E)$$

On:

- $Q_{torre\ útil}$ (kW): Potència útil de la torre de refrigeració.
- m_{aigua} (kg/h): Cabal màssic d'aigua.
- Cp ($\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$): Calor específic de l'aigua.
- ΔT (°C): Variació de temperatura requerida.

$$Q_{torre\ útil} = 988,3031 \frac{kg}{s} \cdot 4,186 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (50 - 20) ^\circ C = 1,24 \cdot 10^5 \frac{kJ}{s} = 1,24 \cdot 10^5 kW$$

A continuació es troba la potència de producció per part de la torre de refrigeració, suposant un rendiment del 92%. Es determina aquest valor a partir de l'**Equació 11.5.3.2E**, presentada a continuació:

$$Q_{torre\ prod} = \frac{Q_{torre\ útil}}{\eta} \quad (11.6.1.2E)$$

On:

- $Q_{torre\ prod}$ (kW): Potència dissipada per la torre de refrigeració.
- $Q_{torre\ útil}$ (kW): Potència útil de la torre de refrigeració.



- η : Rendiment de la torre de refrigeració.

$$Q_{\text{caldera cons}} = \frac{1.24 \cdot 10^5 \text{ kW}}{0.92} = 1,35 \cdot 10^5 \text{ kW}$$

Donat que el valor obtingut és molt elevat, és necessari la instal·lació de 10 torres de refrigeració. Cadascuna d'aquestes torres permet una potència equivalent a 14535 kW. L'empresa proveïdora és EWK Torres de Refrigeración S.A i les especificacions es troben en detall al Capítol II. Equips.

11.6.3 Aigua de xarxa

El consum d'aigua de xarxa s'estima tenint en compte que es perd el 2% del cabal d'aigua que entra a les torres de refrigeració tal i com es mostra a l'**Equació 11.6.3.1E**

$$F_{\text{aigua de xarxa}} = 0,02 \cdot 988,30 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 19,77 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 71.158 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 71,16 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (11.6.3.1E)$$

11.6.4 Electricitat

Pel càlcul de les necessitats elèctriques de la planta s'ha sumat la potència dels principals equips de la planta que funcionen amb energia elèctrica. Aquesta potència s'ha multiplicat per 0,7 degut a que s'ha tingut en compte que no tots els equips funcionen a la vegada i tot el temps.

Taula 11.6.4.1T: Energia elèctrica consumida

Equips	
Compresor (kW)	60
Bombes (kW)	1396
Torres de refrigeració (kW)	740
kW total	2213
kW total real	1549
kWh/any	1,3E+07

Tal i com es mostra a la **Taula 11.6.4.1T**, a partir dels kW, segons l'**Equació 11.6.4.1E**, es calculen els kWh necessaris per tot 1 any.

$$C_{\text{Elec cons.}} = P_{\text{Elec}} \cdot \text{temps} = 1549 \text{ kW} \cdot (24 \cdot 350) \text{ h} = 1,3 \cdot 10^7 \text{ kWh consumits} \quad (11.6.4.1E)$$

A partir del càlcul de la potència total requerida per tota la planta, es determina la potència aparent corresponent, amb la finalitat de poder seleccionar un transformador elèctric. El càlcul de la potència aparent es duu a terme a partir de l'**Equació 11.6.4.2E** i es pren com a factor de potència un valor típic equivalent a 0,70.⁹

⁹ (Andres, 2022)



$$P_{aparent} = \frac{P_{Elec}}{FP}$$

On:

- $P_{aparent}$ (kVA): Potència aparent.
- P_{Elec} (kW): Potència activa.
- FP (-): Factor de potència.

$$P_{aparent} = \frac{1549 \text{ kW}}{0,70} = 2212,86 \text{ kVA} = 2,22 \text{ MVA}$$

S'escull, doncs un transformador elèctric adient als requisits de la planta de producció. El model triat és proporcionat per l'empresa Eaton, la potència nominal del qual assoleix un valor de 2500 kVA. Cal destacar que, tenint en compte que ChemEBenz és considerat un sistema elèctric crític, la planta disposa de dos transformadors. Conseqüentment, s'assegura una major fiabilitat i continuïtat del servei.

De la mateixa manera que en el cas de les torres de refrigeració i les calderes de vapor, les especificacions de l'equip es troben en detall al Capítol II. Equips. Les especificacions han estat adequades segons el voltatge de línia descrit a l'objecte del treball.

Finalment, es calcula segons l'**Equació 11.6.4.3E**, l'energia elèctrica que es pot vendre, ja que, disposem d'un sistema de cogeneració que produeix una part important d'energia elèctrica. El càlcul de l'energia elèctrica produïda amb cogeneració es calcula a l'apartat 11.7.1 d'aquest capítol segons **Equació 11.7.1.4E**.

$$C_{Elec \text{ pagar}} = C_{Elec \text{ cogeneració}} - C_{Elec \text{ cons.}} = 4,82 \cdot 10^8 - 1,30 \cdot 10^7 = 4,69 \cdot 10^8 \text{ kWh} \quad (11.6.4.3E)$$

11.7 Medi Ambient

11.7.1 Cogeneració

Per a calcular la potència del motor de cogeneració s'ha seguit el següent procediment.

En primer lloc, amb l'**Equació 11.7.1.1E** s'ha calculat el poder calorífic inferior de la mescla del corrent gasós:

$$x_1 \cdot PCI_1 + \dots + x_n \cdot PCI_n = PCI_{mescla} \quad (11.7.1.1E)$$

On:



- x_1 : Percentatge màssic del component.
- $PCI(\frac{MJ}{kg})$: Poder calorífic inferior del component.
- $PCI_{Mescla}(\frac{MJ}{kg})$: Poder calorífic inferior de la mescla.

D'aquesta manera, amb la mescla que hi ha, el poder calorífic inferior de la mescla és:

$$0,25 \cdot 50 \frac{MJ}{kg} + 0,71 \cdot 46,4 \frac{MJ}{kg} + 0,038 \cdot 42 \frac{MJ}{kg} + 0,0015 \cdot 47,3 \frac{MJ}{kg} + 0,0001 \cdot 40,93 \frac{MJ}{kg} = 47,15 \frac{MJ}{kg}$$

Després, amb l'**Equació 11.7.1.2E** hom pot calcular la potència tèrmica:

$$Q_m \cdot PCI_{mescla} = P_{Tèrmica} \quad (11.7.1.2E)$$

On:

- $Q_m(\frac{kg}{h})$: Cabal màssic del corrent.
- $PCI_{Mescla}(\frac{MJ}{kg})$: Poder calorífic inferior de la mescla.
- $P_{Tèrmica}(\frac{MJ}{h})$: Potència tèrmica.

Així:

$$11460 \frac{kg}{h} \cdot 47,15 \frac{MJ}{kg} = 5,40 \cdot 10^5 \frac{MJ}{h}$$

Després aplicant factors de conversió, hom arriba a que la potència tèrmica en MW són 127,57 MW amb un rendiment de 0,85. En aquesta línia es pot calcular la generació elèctrica de la turbina amb l'**Equació 11.7.1.3E**:

$$P_{Tèrmica} \cdot \eta = G_{Elèctrica} \quad (11.7.1.3E)$$

On:

- $P_{Tèrmica}(MW)$: Potència tèrmica.
- η : Eficiència elèctrica.
- $G_{Elèctrica}(MWh)$: Generació elèctrica.

En aquest cas:

$$P_{Tèrmica} = 127,57 MW \cdot 0,55 = 70,16 MW$$

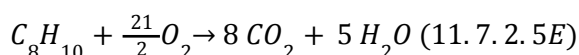
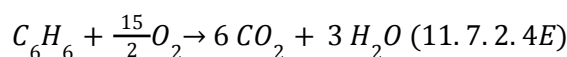
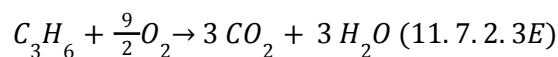
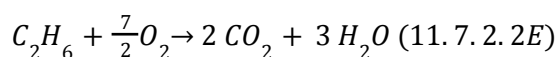
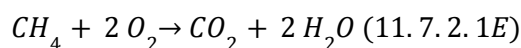


Aplicant-li un factor de 0,45 a la potència elèctrica, hom pot treure la generació tèrmica, que són 57,40 MW. L'energia elèctrica produïda en 1 any es calcula segons **Equació 11.7.1.4E**:

$$C_{Elec\ prod.} = P_{Elec\ prod.} \cdot temps = 57.400\ kW \cdot (24 \cdot 350)\ h = 4,82 \cdot 10^8\ kWh\ produïts\ (11.6.4.1E)$$

11.7.2 Producció Diòxid de Carboni

Com s'esmenta al *Capítol VI: Medi Ambient* d'aquesta memòria, cal calcular el CO₂ produït durant la combustió dels components del corrent gasós. En primer lloc, les **Equacions 11.7.2.1E-5E** descriuen les reaccions de combustió que hi ha:



Després amb l'**Equació 11.7.2.6E** hom pot treure el cabal màssic de cadascun dels components:

$$x_{m,component} \cdot Q_m = Q_{m,component}\ (11.7.2.6E)$$

On:

- Q_m ($\frac{kg}{h}$): Cabal màssic del corrent.
- x_m : Percentatge màssic del component.
- $Q_{m,component}$ ($\frac{kg}{h}$): Cabal màssic del component al corrent.

Per exemple, per al benzè:

$$0,038 \cdot 11460 \frac{kg}{h} = 436,63 \frac{kg}{h}$$

Després, amb el pes molecular hom pot treure el cabal molar seguint l'**Equació 11.7.2.7E**:

$$Q_{m,component} \cdot PM_{Component} = n_{Component}\ (11.7.2.7E)$$

On:



- $Q_{m, component} \left(\frac{kg}{h} \right)$: Cabal màssic del component al corrent.
- $PM_{Component} \left(\frac{kmol}{kg} \right)$: Pes molecular del component.
- $n_{Component} \left(\frac{kmol}{h} \right)$: Cabal molar del component.

Per al benzè:

$$436,63 \frac{kg}{h} \cdot 78,11 \frac{kmol}{kg} = 5,59 \frac{kmol}{h}$$

Amb aquest cabal molar, hom pot calcular seguint les relacions estequiomètriques el cabal de CO₂ produït, H₂O, i les necessitats d'O₂ i d'aire. En aquest cas, hom pot veure seguint l'**Equació 11.7.2.4E** les quantitats esmentades. No obstant això, la relació d'aire s'obté seguint l'**Equació 11.7.2.8E**:

$$n_{O_2} \cdot \frac{0,79 N_2}{0,21 O_2} = n_{aire} \quad (11.7.2.8E)$$

En aquest cas:

$$0,11 \frac{kmol O_2}{h} \cdot \frac{0,79 N_2}{0,21 O_2} = 0,43 \frac{kmol Aire}{h}$$

Després, per a saber els cabals en tonelles hores de cadascun dels components cal sumar les necessitats de cadascun, i aplicar el factor de conversió amb el pes molecular com descriu l'**Equació 11.2.7.9E**:

$$n_{component} \cdot PM_{Component} = Q_{m, component} \quad (11.7.2.9E)$$

Seguidament, amb l'aire s'obté:

$$5074,40 \frac{kmol Aire}{h} \cdot 28,96 \frac{kg}{kmol} \cdot \frac{1 tn}{1000 kg} = 146,96 \frac{tn}{h}$$

El càlcul del cabal màssic del CO₂, H₂O, O₂ i d'aire és important per a calcular el VFH (Volum de fums humits) i el VFS (Volum de fums secs) descrits per les **Equacions 11.7.2.10E-11E**:

$$VFH = (n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{Aire}) - n_{O_2} \quad (11.7.2.10E)$$

$$VFS = VFH - n_{H_2O} \quad (11.7.2.11E)$$

Seguint les equacions, hom obté que:



$$VFH = (33,21 + 21,39 + 146,95) - 43,16 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} = 158,39 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

$$VFS = (158,39 - 21,39) \frac{\text{kmol}}{\text{h}} = 137,00 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}$$

11.8 Avaluació econòmica

11.8.1 Nombre d'operaris

El nombre d'operaris (N_{OL}) s'ha calculat seguint la correlació d'Alkhatat i Gerrard¹⁰ (**Equació 11.8.1.1E**) que es basa en les dades de diferents companyies de química:

$$N_{OL} = (6,29 + 31,7 \cdot P^2 + 0,23 \cdot N_{NP})^{0,5} \quad (11.8.1.1E)$$

On:

- N_{OL} : Nombre d'operaris en un moment.
- P : Passos del procés on es tractin sòlids (transport, control de mida de partícula, eliminació de partícules)
- N_{NP} : Nombre de passos del procés en els quals no hi hagin sòlids, inclosos la compressió, escalfament, refredament, barreja, separació i reacció, però no bombes ni vàlvules.

El resultat s'ha d'arrodonir al nombre sencer més proper, sempre que s'excedeixi el nombre sencer anterior. En el cas de *ChemEBenz* el N_{OL} és el següent:

$$N_{OL} = (6,29 + 31,7 \cdot 0^2 + 0,23 \cdot 25)^{0,5} = 3,57 \approx 4$$

Així, es necessiten mínim 4 operaris per torn, després per a saber el nombre de torns operatius, s'ha de saber el nombre de torns per operador anuals (**Equació 11.8.1.2E**)

$$\# \text{ Tornos per operador} = 5 \frac{\text{Torns}}{\text{Setmana}} \cdot 50 \frac{\text{setmanes}}{\text{any}} = 250 \frac{\text{Torns}}{\text{any}} \quad (11.8.1.2E)$$

Després, amb l'**Equació 11.8.1.3E** hom pot saber el nombre de torns totals per any:

$$\# \text{ Tornos totals en un any} = 350 \text{ dies} \cdot 3 \frac{\text{Torns}}{\text{dia}} = 1050 \text{ Tornos} \quad (11.8.1.3E)$$

El nombre total d'operacions que necessiten un operador en un moment determinat es calcula amb l'**Equació 11.8.1.4E**:

¹⁰ ("Alkhatat et al.", 1984)



$$\frac{\# \text{ Torns totals en un any}}{\# \text{ Torns per operador}} = \frac{1050 \text{ tornes/any}}{250 \text{ tornes/any}} = 4,2 \quad (11.8.1.4E)$$

Així, cada torn necessita 4 operadors al lloc, multiplicant, queda (**Equació 11.8.1.5E**):

$$\# \text{ Operadors} = N_{OL} \cdot \frac{\# \text{ Torns totals en un any}}{\# \text{ Torns per operador}} \quad (11.8.1.5E)$$

D'aquesta manera el nombre d'operadors és:

$$\# \text{ Operadors} = 4,2 \cdot 4 = 16,8 \approx 17$$

En conclusió, el nombre mínim d'operadors necessaris a *ChemEBenz* és de 17 operadors/tècnics.

11.8.2 Mètode Correlacions

El mètode de les correlacions es el següent tal i com es mostra en l'**Equació 11.8.2.1E**:

$$\text{Cost 2007 (\$)} = a + b \cdot S^n \quad (11.8.2.1E)$$

On:

- a, b i n son paràmetres de la correlació que depenen de cada equip, es troben tabulats i son fixes.
- S és el paràmetre característic de cada equip es variable.

Finalment, s'actualitza a l'any 2023 (Abril) i es passa a euros tal i com es mostra a l'**Equació 11.8.2.2E**:

$$\text{Cost 2023 (€)} = \text{Cost 2007 (\$)} \cdot \frac{801,4}{525,4} \cdot \frac{0,93\text{€}}{1,00\$} \quad (11.8.2.2E)$$

Per exemple, per a calcular el cost dels tancs d'emmagatzematge de benzè, tal i com es presenta a continuació per a un tanc de benzè:

$$\text{Cost 2007 (\$)} = 5000 + 1400 \cdot (520,6 \text{ m}^3)^{0,7} = 116.604\$$$

Ara, s'actualitza:

$$116604 \$ \cdot \frac{801,4}{525,4} \cdot \frac{0,93\text{€}}{1,00\$} = 165.408\text{€}$$



11.8.3 Mètode Algorítmic

El mètode algorítmic es realitza seguint les indicacions de l'apèndix C de Couper, tenint en compte les equacions, els valors pels quals funciona i les unitats. A més, amb aquest mètode algorítmic es pot calcular tant el cost de l'equipament com el cost d'instal·lació.

Per exemple, s'explica el mètode algorítmic pel càlcul d'un reactor d'alquilació.

En primer lloc, amb l'**Equació 11.8.3.1E** hom pot calcular el cost del reactor:

$$C = F_M \cdot C_b + C_a \quad (11.8.3.1E)$$

On hom pot definir F_M com el factor de cost, i que és igual a 1,7, ja que el material de construcció del reactor d'alquilació és AISI 304L. Després, les **Equacions 11.8.3.2E-3E** defineixen C_b i C_a .

$$C_b = 1,218 \cdot e^{(9,100 - 0,28889 \cdot (\ln W) + 0,04576 (\ln W)^2)} \quad (11.8.3.2E)$$

$$C_a = 300 \cdot D^{0,7396} \cdot L^{0,7068} \quad (11.8.3.3E)$$

On:

- $W(lb)$: Pes de la carcassa.
- $D(ft)$: Diàmetre intern del reactor.
- $L(ft)$: Longitud de tangent a tangent del reactor, és a dir, el valor del diàmetre intern més el gruix.

En aquest cas:

$$C_b = 1,218 \cdot e^{(9,100 - 0,2889 \cdot (\ln 1,16 \cdot 10^5 lb) + 0,04576 (\ln 1,16 \cdot 10^5 lb)^2)} = 189.069,54$$

$$C_a = 300 \cdot (11,48 ft)^{0,7396} \cdot (12,20 ft)^{0,7068} = 10.688,92$$

D'aquesta manera, el cost de compra del reactor és:

$$C = 1,7 \cdot 189069,54 \cdot 10688,92 = 332.107,13 \$$$

Després, el cost de compra s'ha de multiplicar per un factor que s'indica d' 1,7, així el cost instal·lat és:

$$C = 332107,13 \$ \cdot 1,7 = 564.582,13 \$$$



Finalment, s'ha d'aplicar la conversió de CEPCI i del dolar al euro, que es fa amb l'**Equació 11.8.3.4E**:

$$Cost\ 2023\ (\text{€}) = Cost\ 2002\ (\text{\$}) \cdot \frac{801,4}{395,4} \cdot \frac{0,93\text{€}}{1,00\text{\$}} \quad (11.8.3.4E)$$

D'aquesta manera:

$$564582,13\ \$ \cdot \frac{801,4}{395,4} \cdot \frac{0,93\text{€}}{1,00\text{\$}} = 1.064.198,76\ \text{€}$$

11.8.4 Estalvi cogeneració

L'estalvi que produeix al cogeneració es pot calcular seguint l'**Equació 11.8.4.1E**:

$$G_{Elèctrica} \cdot C_{Energia} = E \quad (11.8.4.1E)$$

On:

- $G_{Elèctrica}$ (MWh): Generació elèctrica.
- $C_{Energia}$ ($\frac{\text{€}}{\text{MWh}}$): Cost energia a l'estat espanyol per a ús industrial¹¹.
- E (€): Estalvi total per hora.

En aquest cas:

$$70,16\ \text{MWh} \cdot \left(0,222\ \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot \frac{1000\ \text{kWh}}{\text{MWh}}\right) = 15.575,87\ \frac{\text{€}}{\text{h}}$$

Després, per 350 dies de funcionament:

$$15.575,87\ \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot \frac{24\ \text{h}}{1\ \text{dia}} \cdot 350\ \text{dies} = 130.837.826\text{€}$$

Aquesta és la suposició ideal, no obstant això, a ChemEBenz s'ha suposat un 0,7 de rendiment, així l'estalvi total és de 91.586.128€.

11.8.5 NCF_{Eq}

Per a comparar la rendibilitat de projectes de diferent temps de duració, hom ha de fer servir l'**Equació 11.8.5.1E**:

$$NCF_{Eq} = \frac{VAN}{\left(\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n}\right)} \quad (11.8.5.1E)$$

On:

- NCF_{Eq} (€): Valor de flux de caixa equivalent.

¹¹ ("Doméstico", s. d.)



- VAN (€): Valor Actual Net del projecte.
- n (Anys): Duració del projecte.
- i (%): Interès al qual es calcula el NCF.

Per al projecte a 20 anys amb el pla de viabilitat presentat al “Capítol 7: Avaluació Econòmica” el valor del NCF_{Eq} és:

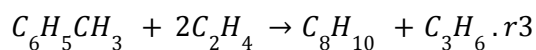
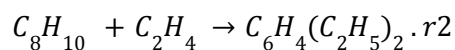
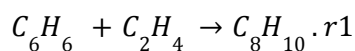
$$NCF_{Eq} = \frac{139.730.285 \text{ €}}{\left(\frac{(1+0,1)^{20}-1}{0,1 \cdot (1+0,1)^{20}}\right)} = 16.412.666 \text{ €}$$

11.9 Reactors

Els reactors usats a la planta de *ChemEBenz* s’han dissenyat mitjançant el programa Aspen HYSYS proporcionant-li les dades necessàries en cada cas.

11.9.1 Disseny de reactors d'alquilació amb HYSYS

Primerament s’han definit les reaccions pertinents per al funcionament del reactor. A continuació es presenten les reaccions d'alquilació definides:



A les **Figures 11.9.1.1.F**, **11.9.1.2.F** i **11.9.1.3.F** es pot veure la introducció dels paràmetres al HYSYS:

Heterogeneous Catalytic Reaction: Alquilació_1-1

Stoichiometry Reaction Rate

Stoichiometry

Component	Mole Wt.	Stoich Coeff
Benzene	78,110	-1,000
Ethylene	28,054	-1,000
E-Benzene	106,166	1,000
Add Comp		

Balance

Balance Error	0,00000
Reaction Heat (25 C)	-1,1e+05 kJ/kgmole

Basis

Basis	Molar Conc'n
Base Component	Benzene
Rxn Phase	LiquidPhase
Min. Temperature	-273,1 C
Max Temperature	3000 C

Basis Units: kgmole/m3

Rate Units: kgmole/m3-s

Ready Kinetics Help

Figura 11.9.1.1.F: Introducció de l'estequiometria de la primera reacció d'alquilació.

Heterogeneous Catalytic Reaction: Alquilació_2-1

Stoichiometry Reaction Rate

Stoichiometry

Component	Mole Wt.	Stoich Coeff
E-Benzene	106,166	-1,000
Ethylene	28,054	-1,000
14-E-Benzene	134,222	1,000
Add Comp		

Balance

Balance Error	0,00000
Reaction Heat (25 C)	-1,0e+05 kJ/kgmole

Basis

Basis	Molar Conc'n
Base Component	E-Benzene
Rxn Phase	LiquidPhase
Min. Temperature	-273,1 C
Max Temperature	3000 C

Basis Units: kgmole/m3

Rate Units: kgmole/m3-s

Ready Kinetics Help

Figura 11.9.1.2.F: Introducció de l'estequiometria de la segona reacció d'alquilació.

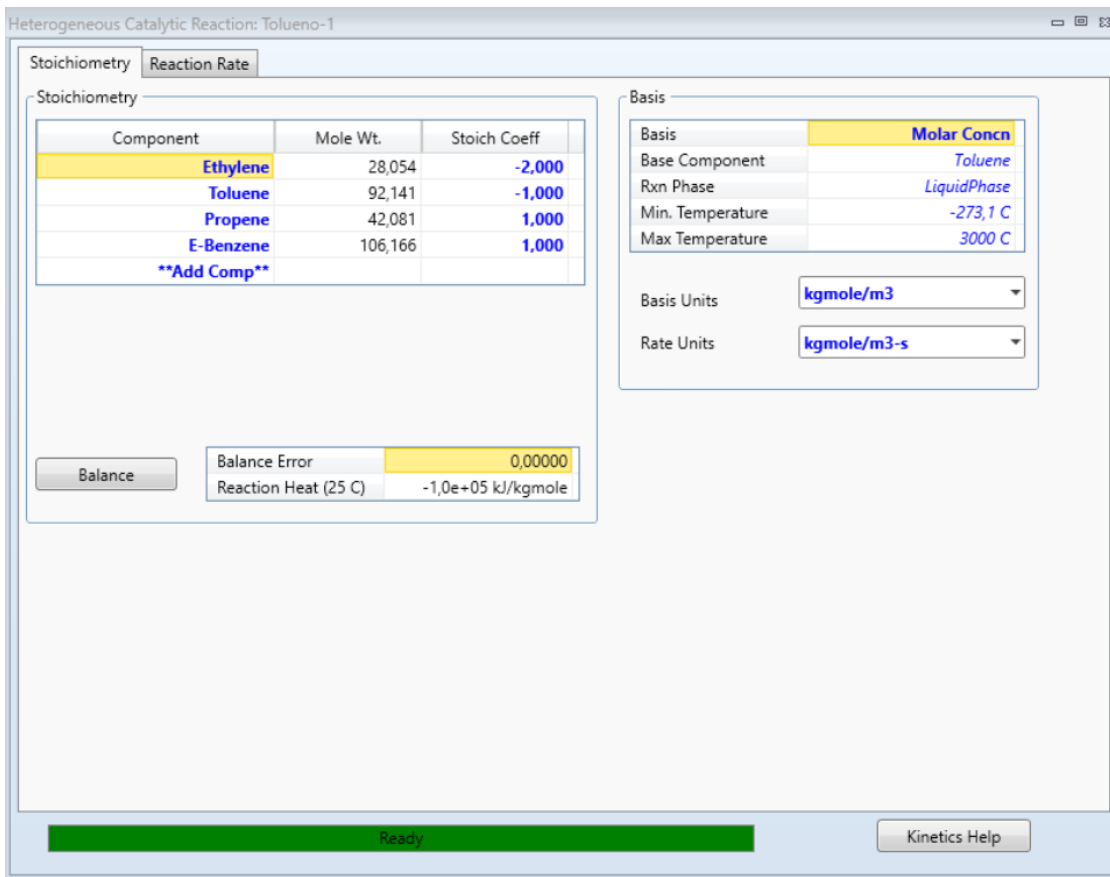


Figura 11.9.1.3.F: Introducció de l'estequiometria de la tercera reacció d'alquilació.

Seguidament s'han introduït els paràmetres cinètics de les tres reaccions al programa tal i com es veu en les **Figures 11.9.1.4.F, 11.9.1.5.F i 11.9.1.6.F** :

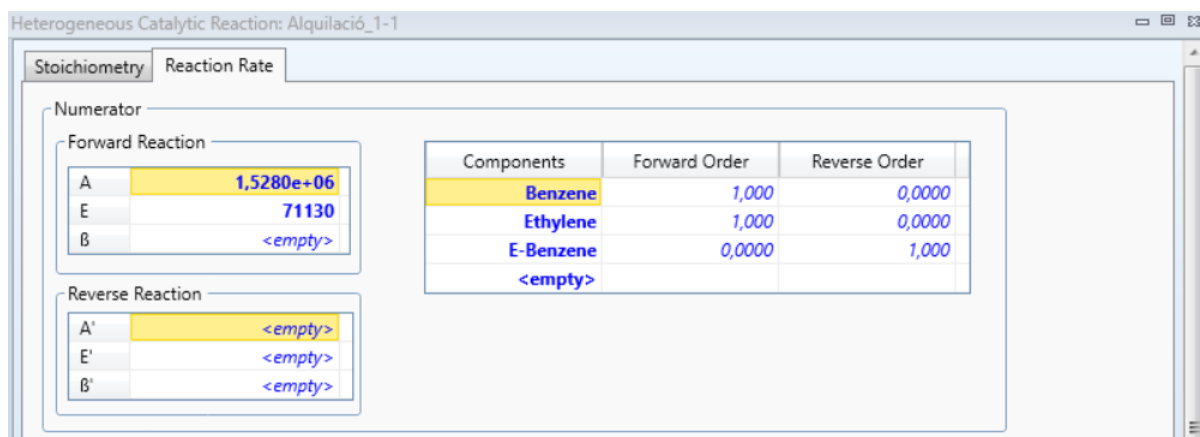


Figura 11.9.1.4.F: Introducció dels paràmetres cinètics de la primera reacció d'alquilació.

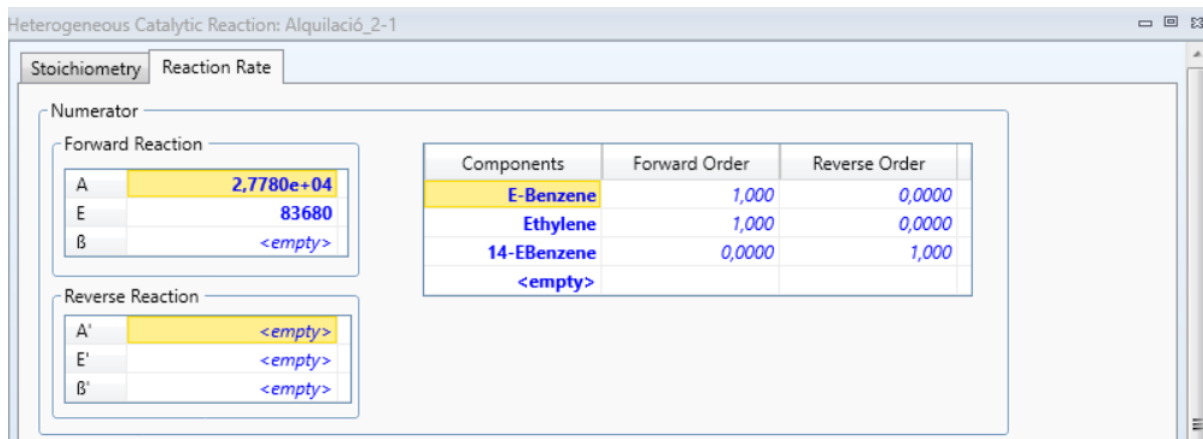


Figura 11.9.1.5.F: Introducció dels paràmetres cinètics de la segona reacció d'alquilació.

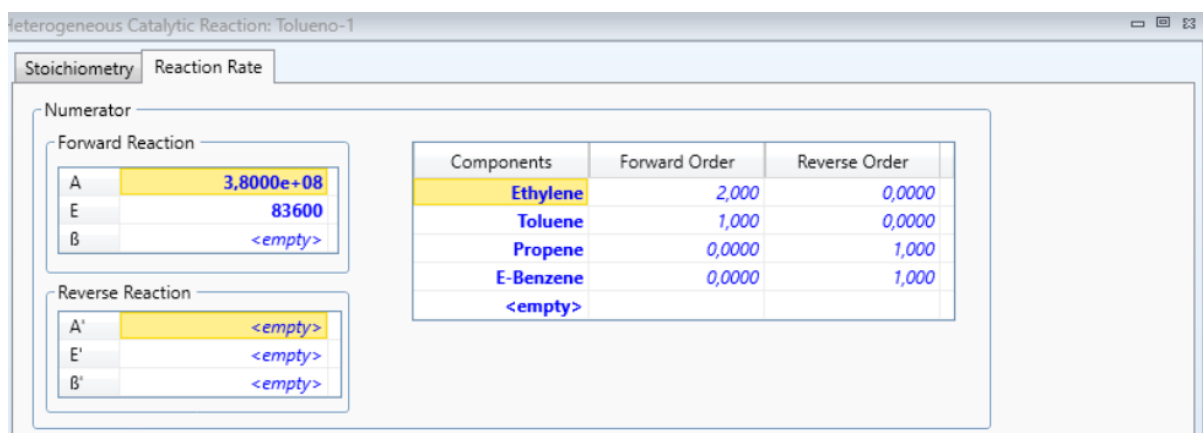


Figura 11.9.1.6.F: Introducció dels paràmetres cinètics de la tercera reacció d'alquilació.

Un cop definides les estequiometries i les cinètiques de les reaccions s'agrupen en un mateix paquet per a poder introduir-ho als reactors en HYSYS. En aquest cas el nom rebut al paquet del conjunt de reaccions ha estat Alquilació-2. També s'ha especificat el diàmetre de partícula del catalitzador tal i com es pot veure a la **Figura 11.9.1.7.F**. Aquest procediment s'ha repetit per als tres reactors d'alquilació.

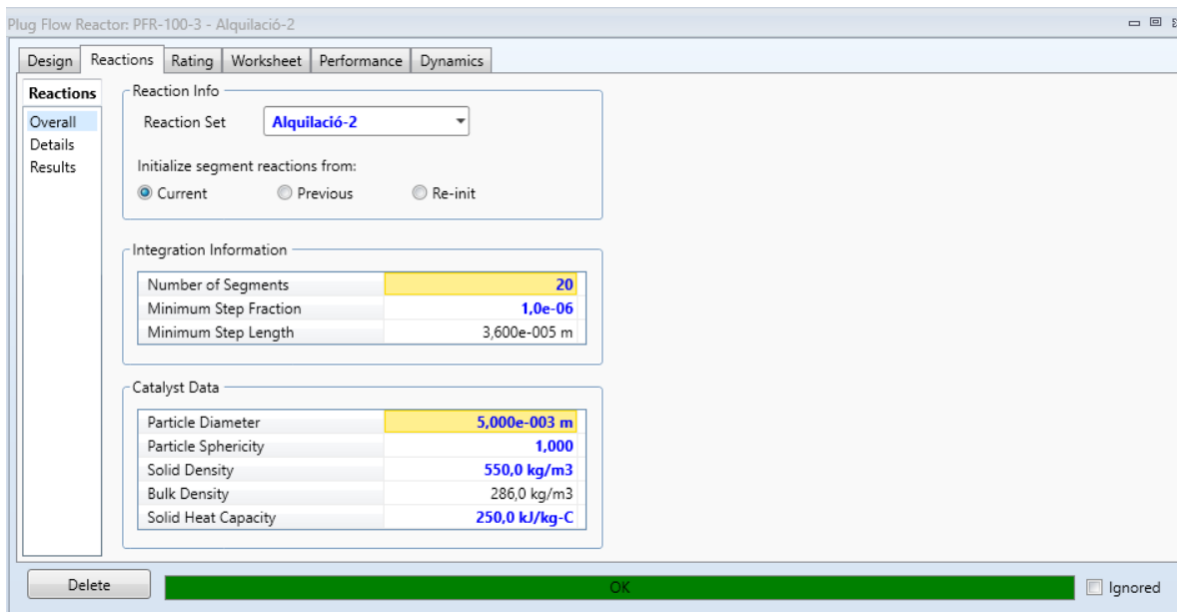


Figura 11.9.1.7.F: Selecció del paquet de reaccions i especificació del diàmetre de partícula de catalitzador .

Seguidament s'introdueix un cabal d'entrada amb els components d'interès a reaccionar i es connecta un de sortida, seguidament es defineix un volum de reactor i la seva fracció de buit. S'han iterat diferents valors de reactor fins a aconseguir una quantitat de productes satisfactòria. En el cas dels tres reactors s'han dissenyat de manera idèntica tal i com es veu en les **Figures 11.9.1.8.F, 11.9.1.9.F i 11.9.1.10.F.**

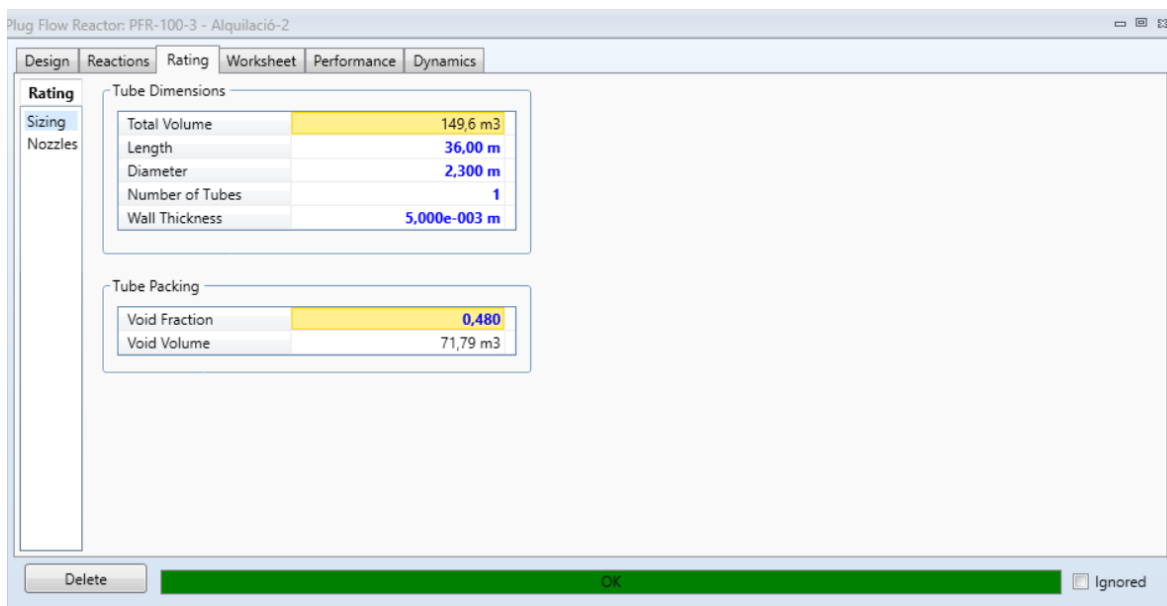


Figura 11.9.1.8.F: Dimensions i fracció de buit del reactor d'alquilació RA-201.

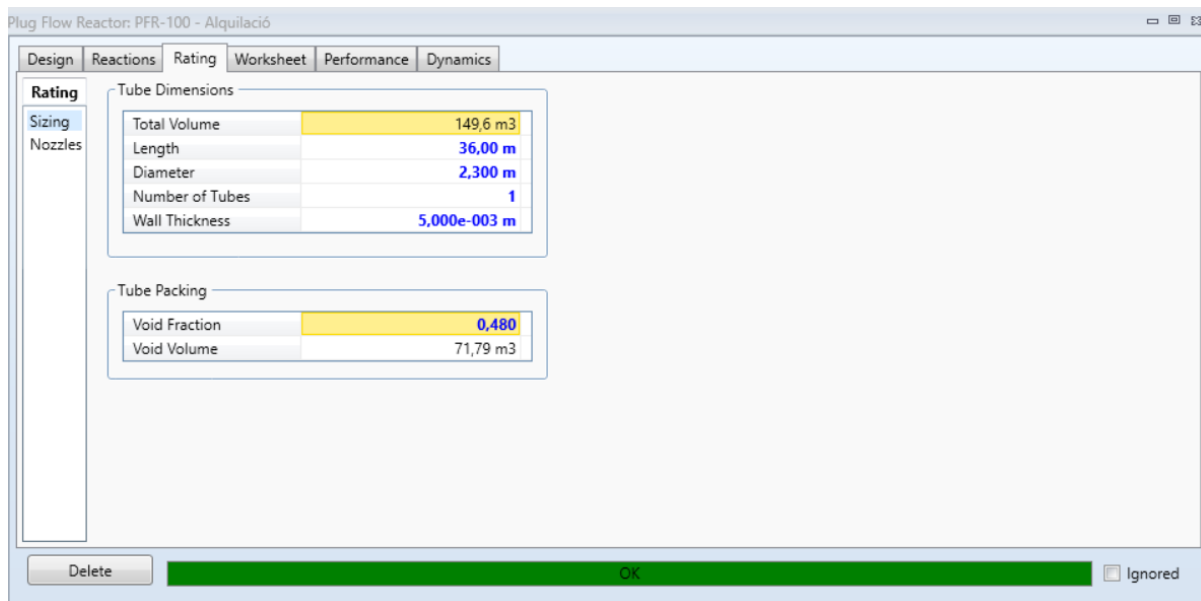


Figura 11.9.1.9.F: Dimensions i fracció de buit del reactor d'alquilació RA-202.

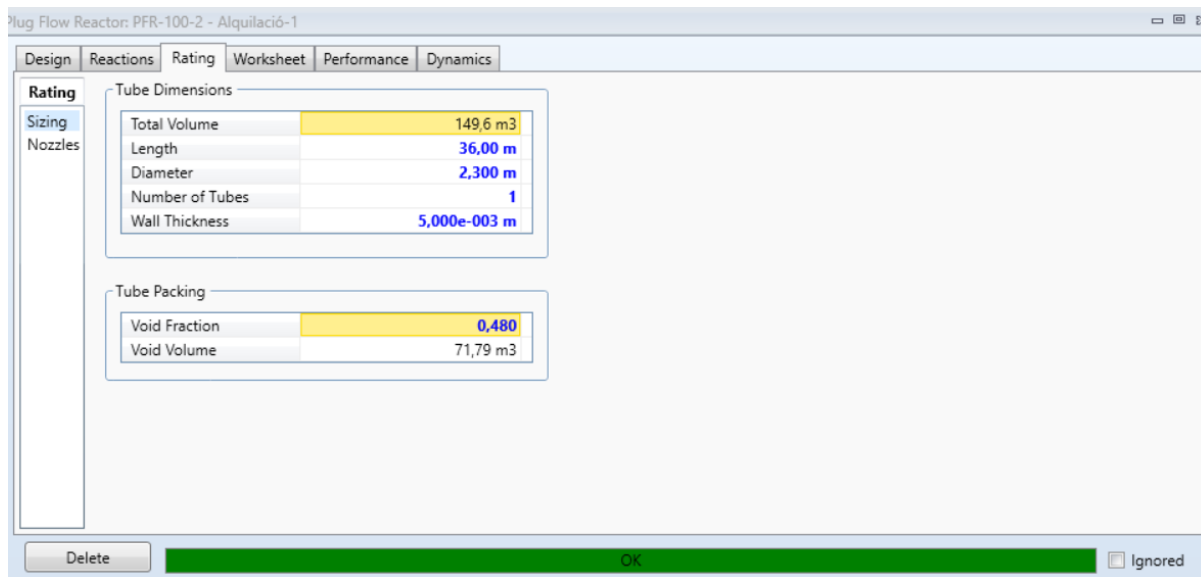
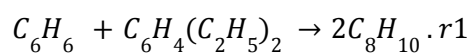


Figura 11.9.1.10.F: Dimensions i fracció de buit del reactor d'alquilació RA-203.

11.9.2 Disseny del reactor de transalquilació amb HYSYS

Primerament s'han definit les reaccions pertinents per al funcionament del reactor. A continuació es presenten les reaccions d'alquilació definides:



A la **Figura 11.9.2.1.F** es mostra la introducció dels paràmetres al HYSYS:

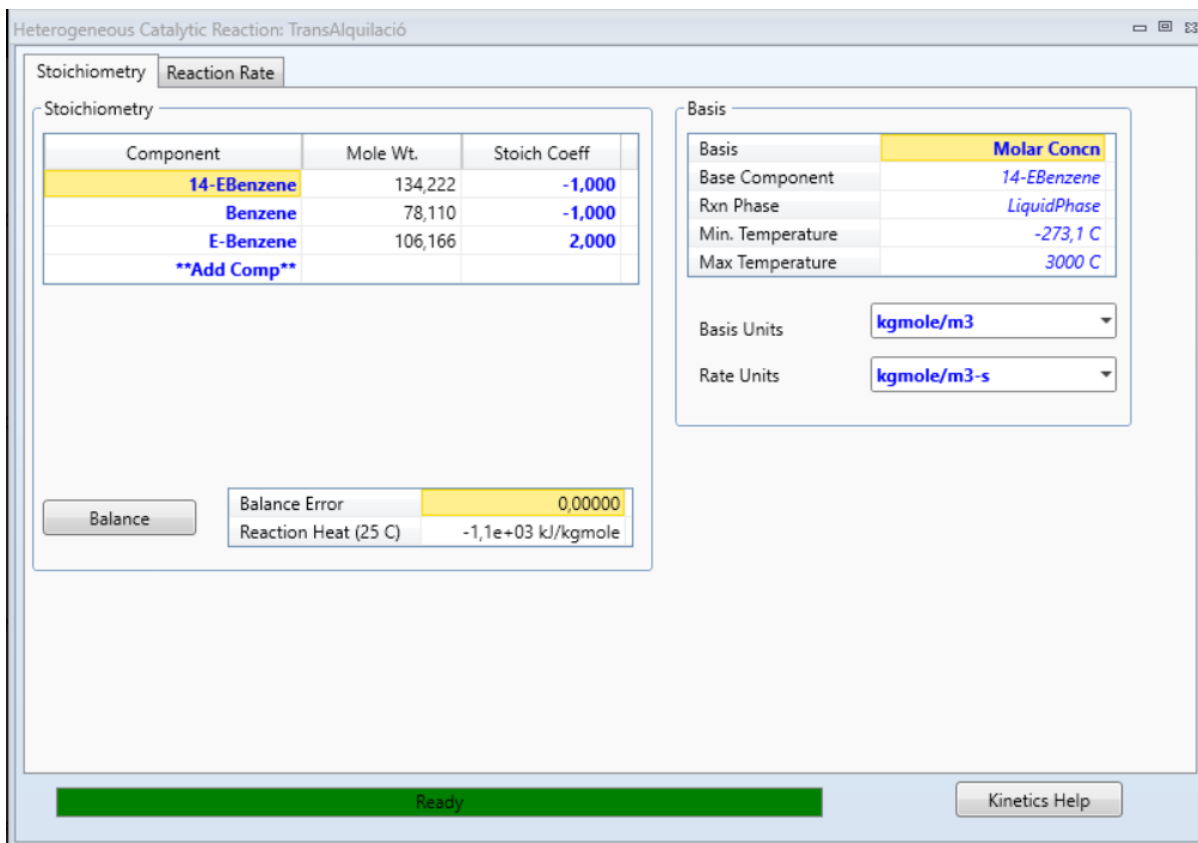


Figura 11.9.2.1.F: Introducció de l'estequiometria de la reacció de transalquilació.

Seguidament s'han introduït els paràmetres cinètics de la reacció al programa tal i com es veu a la **Figura 11.9.2.2.F** :

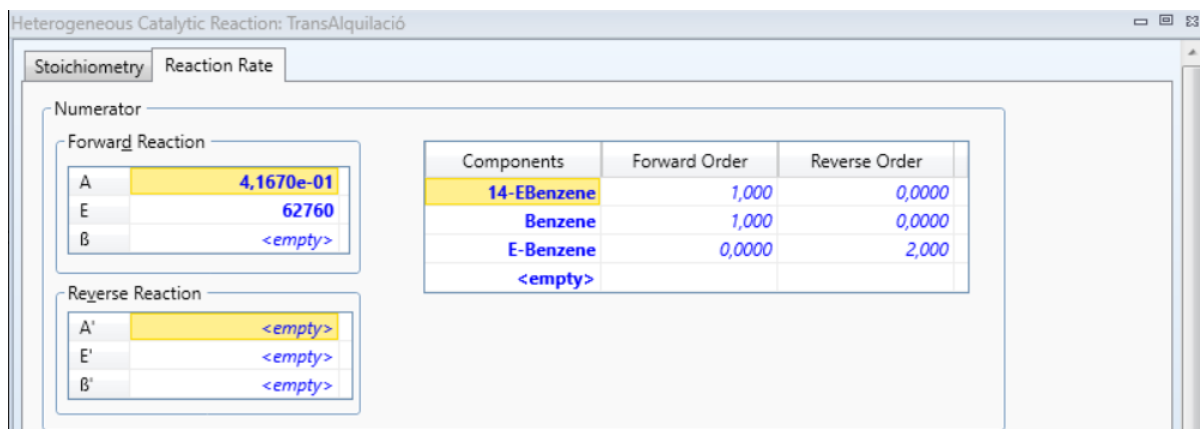


Figura 11.9.2.2.F: Introducció dels paràmetres cinètics de la reacció de transalquilació.

Un cop definides l'estequiometria i la cinètica de la reacció s'introdueix en un paquet per a poder introduir-ho al reactor de transalquilació en HYSYS. En aquest cas el nom rebut al paquet del de la reacció ha estat TransAlquilació. També s'ha especificat el diàmetre de partícula del catalitzador tal i com es pot veure a la **Figura 11.9.1.3.F.**

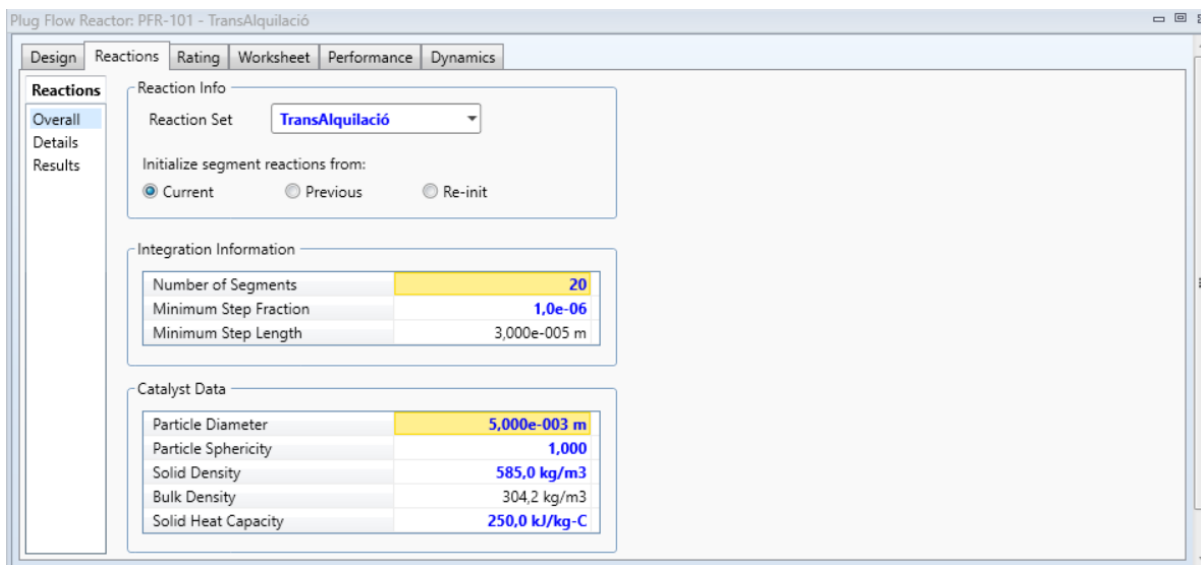


Figura 11.9.2.3.F: Selecció del paquet de reaccions i especificació del diàmetre de partícula de catalitzador .

De la mateixa manera que en els reactors d'alquilació s'introdueix un cabal d'entrada amb els components d'interès a reaccionar i es connecta un de sortida, seguidament es defineix un volum de reactor i la seva fracció de buit. S'han iterat diferents valors de reactor fins a aconseguir una quantitat de productes satisfactòria. Els valors seleccionats es veuen en la **Figura 11.9.2.4.F:**

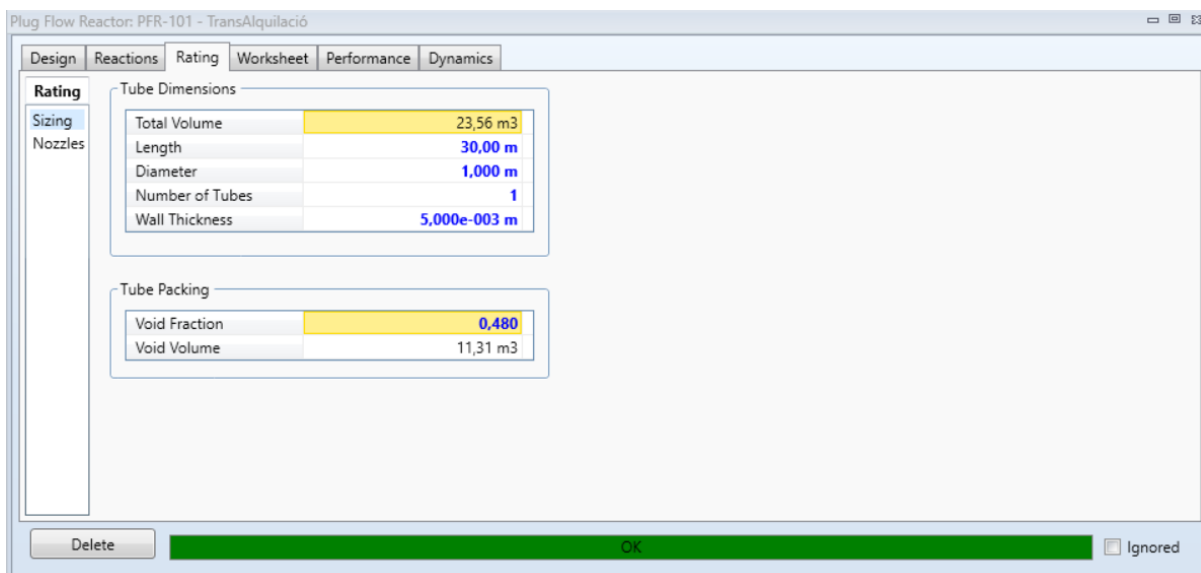


Figura 11.9.2.4.F: Dimensions i fracció de buit del reactor d'alquilació RT-201.

11.10 Columnes de rectificació

Les columnes de rectificació usades a la planta de *ChemEBenz* s'han dissenyat mitjançant el programa Aspen HYSYS proporcionant-li les dades necessàries en cada cas. En aquest cas es prendrà com a exemple la columna FC-302.

Per a definir la columna primerament s'han definit les seves pressions de treball i s'han fet iteracions amb el nombre de plats. Cal mencionar que per al nombre d'etapes s'ha tingut en compte una eficiència de plat de 0,6. A la **Figura 11.10.1.F** es mostra el resultat a la columna FC-302:

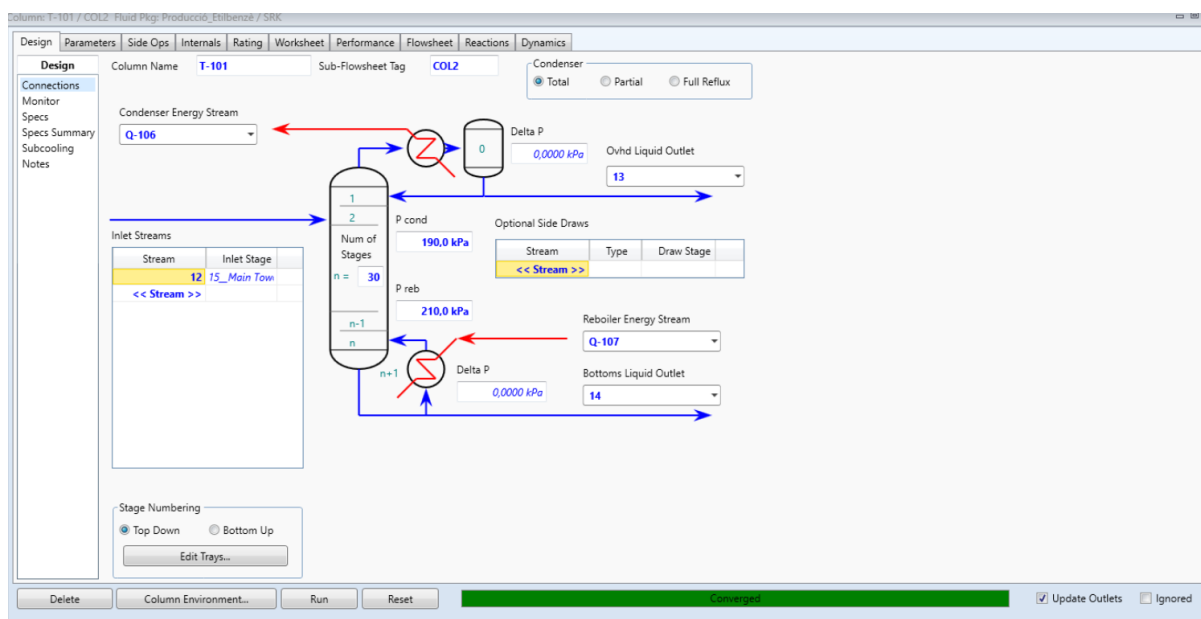


Figura 11.10.1.F: Pressions i número de plats de la columna (en aquest cas de la columna FC-302).

Seguidament s'ha fixat una relació de reflux iterant fins a obtenir valors desitjats. A la **Figura 11.10.2.F** es pot observar el cas de la columna FC-302 on aquesta s'ha fixat en 4.

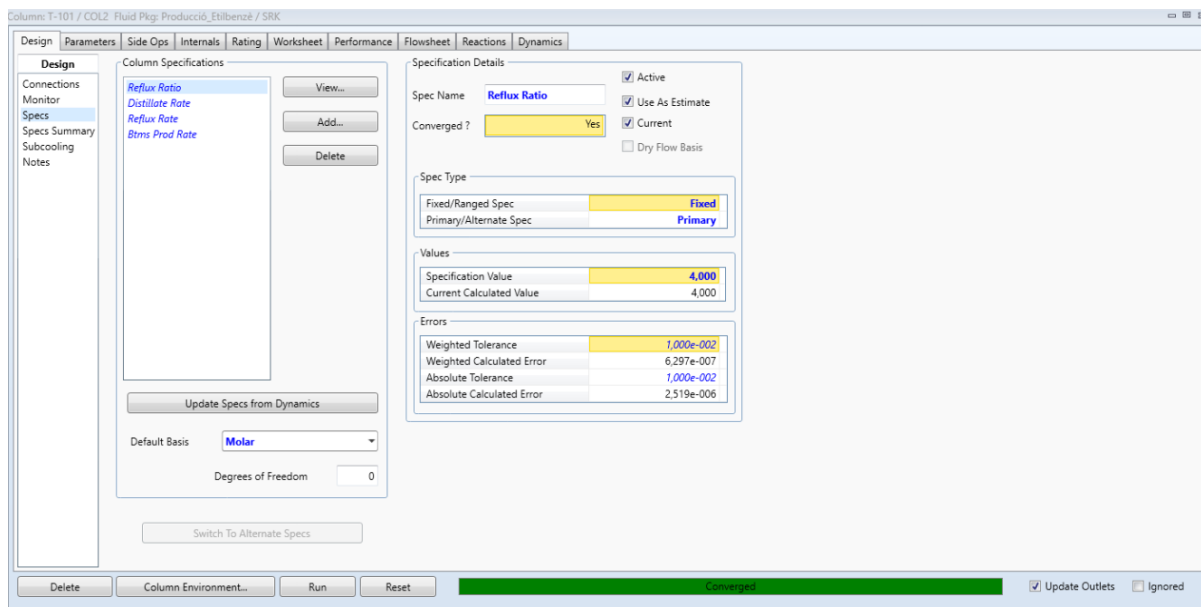


Figura 11.10.2.F: Relació de reflux de la columna FC-302.

Un cop especificada la relació de reflux es fixa també el cabal de caps, *Distillate Rate*, tal i com es veu a la **Figura 11.10.3.F** :

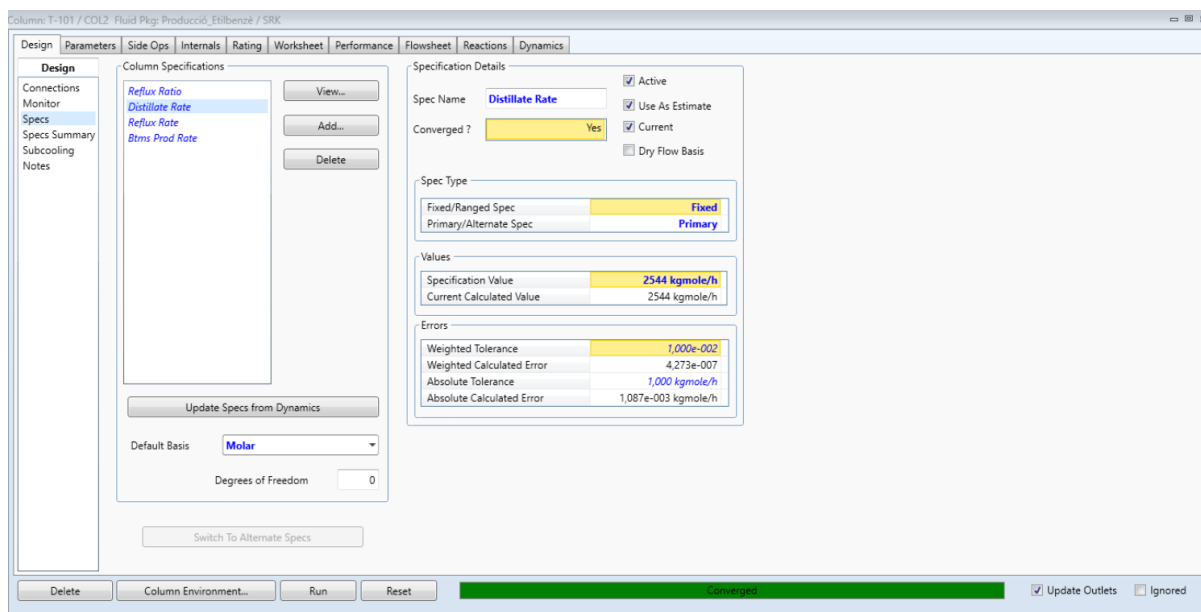


Figura 11.10.3.F: Cabal de destil·lat de la columna FC-302.

Un cop definides les pressions, el número de plats, la relació de reflux i el *Distillate rate* ja es pot procedir a fer convergir la columna. Per això s'acciona el comandament de *RUN* i s'espera a que convergeixi la columna. En cas afirmatiu sortirà un missatge verd que es pot veure en les figures anteriors que indica el correcte funcionament de la columna.

Un cop convergida la columna es revisarà el cabal del que surt del condensador (destil·lat) i es comprovarà que coincideix amb l'especificat al *Distillate rate*. A més també es podrà comprovar el cabal que retorna a la columna i les seves composicions. Es mostra a les **Figures 11.10.4.F** i **Figures 11.10.5.F** :

Worksheet	Name	To Condenser	13	Reflux	Q-106
Conditions	Vapour	1,0000	0,0000	0,0000	<empty>
Properties	Temperature [C]	102,4	102,4	102,4	<empty>
Composition	Pressure [kPa]	190,0	190,0	190,0	<empty>
PF Specs	Molar Flow [kgmole/h]	1,272e+004	2544	1,018e+004	<empty>
	Mass Flow [kg/h]	9,937e+005	1,987e+005	7,950e+005	<empty>
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1126	225,3	901,2	<empty>
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	8,983e+004	5,995e+004	5,995e+004	<empty>
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	-36,72	-116,3	-116,3	<empty>
	Heat Flow [kJ/h]	1,143e+009	1,525e+008	6,101e+008	3,800e+008

Figura 11.10.4.F: Cabals del condensador de la columna FC-302.

Worksheet		To Condenser	13	Reflux
Conditions	Benzene	0,99909	0,99909	0,99909
Properties	Ethylene	0,00000	0,00000	0,00000
Composition	Methane	0,00000	0,00000	0,00000
PF Specs	E-Benzene	0,00000	0,00000	0,00000
	H2O	0,00000	0,00000	0,00000
	Toluene	0,00091	0,00091	0,00091
	o-Xylene	0,00000	0,00000	0,00000
	Propene	0,00000	0,00000	0,00000
	Ethane	0,00000	0,00000	0,00000
	14-EBenzene	0,00000	0,00000	0,00000

Figura 11.10.5.F: Composició dels cabals del condensador de la columna FC-302.

Es farà el mateix amb el contingut del *reboiler* (cues) com es veu a les **Figures 11.10.6.F** i **Figures 11.10.7.F** :

Worksheet	Name	To Reboiler	14	Boilup	Q-107
Conditions	Vapour	0,0000	0,0000	1,0000	<empty>
Properties	Temperature [C]	165,1	165,2	165,2	<empty>
Composition	Pressure [kPa]	210,0	210,0	210,0	<empty>
PF Specs	Molar Flow [kgmole/h]	1,159e+004	450,8	1,114e+004	<empty>
	Mass Flow [kg/h]	1,230e+006	4,785e+004	1,182e+006	<empty>
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1414	55,00	1359	<empty>
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	1,709e+004	1,707e+004	5,137e+004	<empty>
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	-5,201	-5,144	72,99	<empty>
	Heat Flow [kJ/h]	1,982e+008	7,697e+006	5,724e+008	3,819e+008

Figura 11.10.6.F: Cabals del reboiler de la columna FC-302.

Worksheet		To Reboiler	14	Boilup
Conditions	Benzene	0,0000	0,0000	0,0000
Properties	Ethylene	0,0000	0,0000	0,0000
Composition	Methane	0,0000	0,0000	0,0000
	E-Benzene	0,9955	0,9973	0,9955
PF Specs	H2O	0,0000	0,0000	0,0000
	Toluene	0,0044	0,0025	0,0045
	o-Xylene	0,0000	0,0000	0,0000
	Propene	0,0000	0,0000	0,0000
	Ethane	0,0000	0,0000	0,0000
	14-EBenzene	0,0001	0,0002	0,0001

Figura 11.10.7.F: Composició dels cabals del reboiler de la columna FC-302.

Ara s'ha de comprovar la part no numèrica de la columna, degut a que s'han d'ajustar els *internals* de la columna per evitar que ocorri el fenomen conegut com a *weeping*, causat per l'escapament del líquid per les obertures dels plats de la columna. Per aconseguir-ho s'haurà d'iterar amb diferents factors com ara la distància entre plats, el diàmetre i la configuració interior de la columna tal i com es veu a la **Figura 11.10.8.F**. Un cop la columna sigui segura i sense risc de *weeping* s'indicarà perquè als *Hydraulic Plots* la columna sortirà d'un color blau completament i no es mostrarà cap avís de perill tal i com es veu a la **Figura 11.10.9.F**.

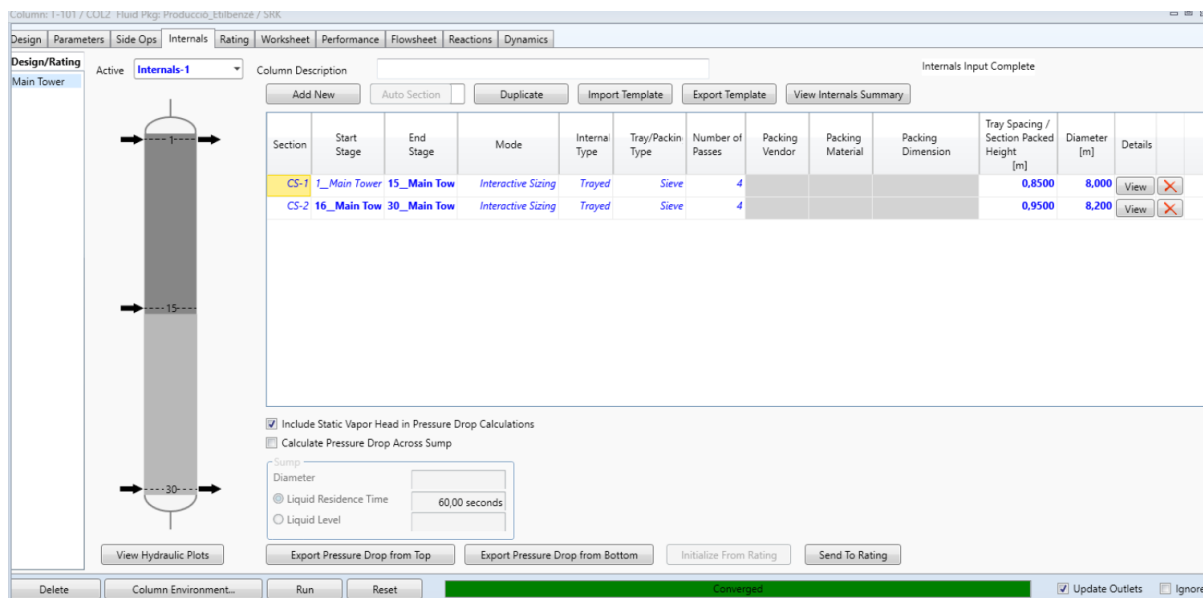
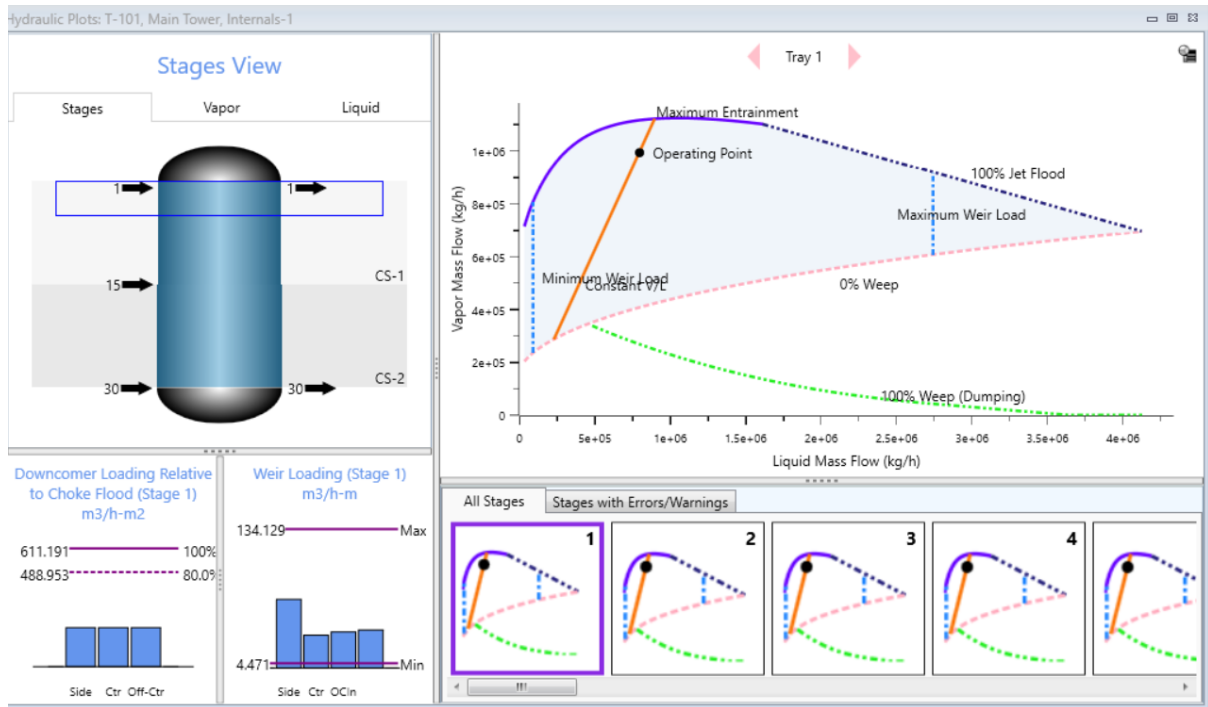


Figura 11.10.8.F: 'Internals' de la columna FC-302



.Figura 11.10.9.F: 'Hydraulic plots" de la columna FC-302.

Un cop especificada tota la columna es procedeix a observar quines són les dimensions de la columna tal i com es veu a la **Figura 11.10.10.F**.

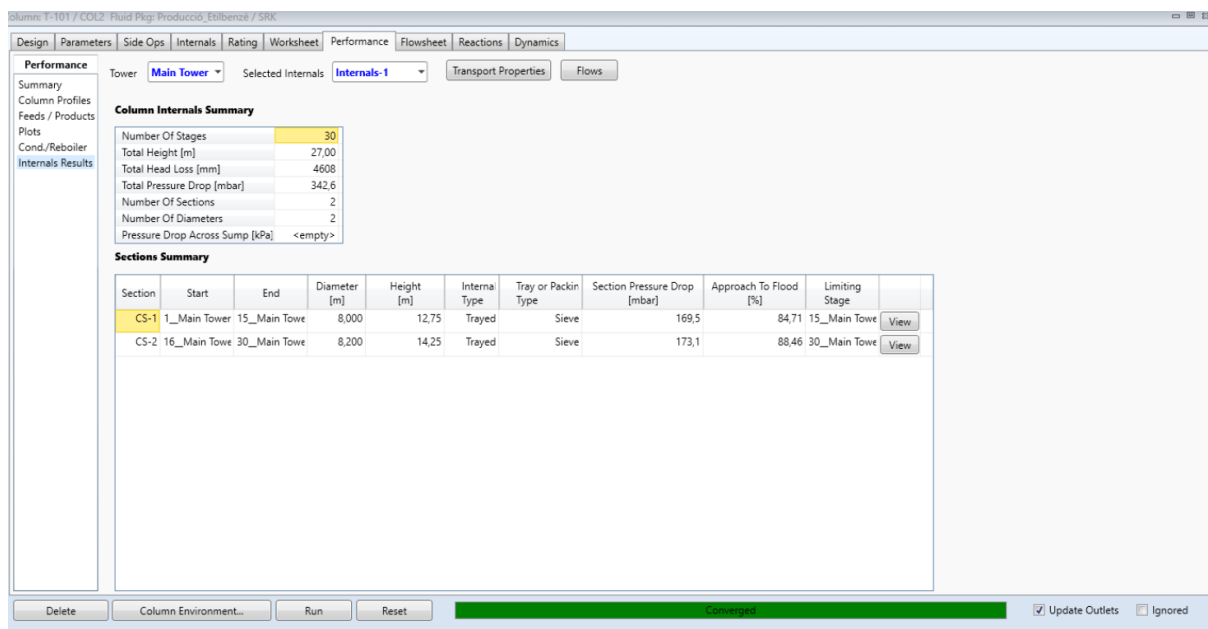


Figura 11.10.10.F: Dimensions de la columna FC-302.

Per al disseny de les columnes FC-301 i FC-303 s'ha seguit el mateix mètode pas per pas fins a obtenir els valors adequats.



11.10.1 Gruix de les parets del reactor i columnes

Per a calcular el gruix de les parets dels reactors i columnes s'ha dissenyat seguint les indicacions de l'apartat UG-27 de la norma ASME, que es pot trobar a la secció VIII Div.1. En primer lloc, cal tenir en ment que el gruix mínim (t_0) és de 1,5 mm. Després, per a calcular els diferents paràmetres cal definir E, P, R i S.

Així, es defineix l'eficiència (E) en 1 seguint les indicacions de soldadura (*Butt Joint i full*) a UW-12. Seguidament, es dissenya el gruix per a una pressió 1,3 vegades la del recipient i és la lletra P. A més, la R el és radi interior de cada recipient definit per a cadascun d'ells. Tot seguit, la S, que és l'estrès màxim, es considera igual $1,08 \cdot 10^8$ Pa, seguint les indicacions d'UG-23 i fent ús de calculadores al web¹² per a les condicions de treball dels recipients En darrer lloc, hi ha la t que és el gruix mínim de la carcassa, que es calcula amb l'**Equació 11.10.1.1E**:

$$t_c = \frac{P_i \cdot R}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_i} \quad (11.10.1.1E)$$

On:

- t_c (m): Gruix mínim de la carcassa circumferència.
- P_i (Pa): Pressió del recipient.
- S (Pa): Estrès màxim permès per a les condicions de treball.
- E : Eficiència de la soldadura.
- R (m): Radi del recipient.

Així, per al reactor RA-201, el gruix mínim seria:

$$t_c = \frac{6,5 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 1,75 \text{ m}}{1,08 \cdot 10^8 \text{ Pa} - 0,6 \cdot 6,5 \cdot 10^6 \text{ Pa}} = 0,11 \text{ m} = 109,27 \text{ mm}$$

Després, es calcula l'estrès longitudinal t_l seguint l'**Equació 11.10.1.2E**:

$$t_l = \frac{P_i \cdot R}{2(S \cdot E) + 0,4 \cdot P_i} \quad (11.10.1.2E)$$

On:

- t_l (m): Gruix mínim de la carcassa longitudinal.
- P_i (Pa): Pressió del recipient.

¹² ("Maximum Allowable Stress Values - ASME Code Section II, Table 1A, Part D", s.d.)



- $S (Pa)$: Estrès màxim permès per a les condicions de treball.
- E : Eficiència de la soldadura.
- $R (m)$: Radi del recipient.

Fent servir l'equació, hom obté:

$$t_l = \frac{6,5 \cdot 10^6 Pa \cdot 1,75 m}{2 \cdot (1,08 \cdot 10^8 Pa \cdot 1) + 0,4 \cdot 6,5 \cdot 10^6 Pa} = 0,052 m = 52,036 mm$$

A més, s'ha de calcular els coneguts com a MAWPC (*Maximum Allowed Working Pressure for Circumferential Stress*) i el MAWPL (*Maximum Allowed Working Pressure for Longitudinal Stress*) seguint les indicacions que hi ha a l'UG-27. Cal tenir en compte que el MAWP (*Maximum Allowed Working Pressure*) s'obté a partir d'escollir el nombre més petit entre el MAWPC i el MAWPL.

Pel que fa al MAWPC la definició matemàtica és la següent (**Equació 11.10.1.3E**):

$$MAWPC = \frac{S \cdot E \cdot t_c}{R + 0,6 \cdot t_c} \quad (11.10.1.3E)$$

On:

- $MAWPC (Pa)$: Maximum Allowed Working Pressure for Circumferential Stress.
- $t_c (m)$: Gruix mínim de la carcassa circumferència.
- $S (Pa)$: Estrès màxim permès per a les condicions de treball.
- E : Eficiència de la soldadura.
- $R (m)$: Radi del recipient.

Per una altra banda, el MAWPL es defineix com l'**Equació 11.10.1.4E**:

$$MAWPL = \frac{2 \cdot S \cdot E \cdot t_l}{R - 0,4 \cdot t_l} \quad (11.10.1.4E)$$

On:

- $MAWPL (Pa)$: Maximum Allowed Working Pressure for Longitudinal Stress.
- $t_l (m)$: Gruix mínim de la carcassa longitudinal.
- $S (Pa)$: Estrès màxim permès per a les condicions de treball.



- E : Eficiència de la soldadura.
- R (m): Radi del recipient.

Així:

$$MAWP \left(\frac{1,08 \cdot 10^8 \text{ Pa} \cdot 1,0,11 \text{ m}}{1,75 \text{ m} + 0,6 \cdot 0,11 \text{ m}}, \frac{2 \cdot 1,08 \cdot 10^8 \text{ Pa} \cdot 1,0,05 \text{ m}}{1,75 \text{ m} - 0,4 \cdot 0,05 \text{ m}} \right) = MAWP (6,5 \cdot 10^6 \text{ Pa}, 6,5 \cdot 10^6 \text{ Pa})$$

D'aquesta manera, la pressió màxima de treball és de 6500 kPa, ja que ambdues coincideixen. Després, hom defineix la β (*Aspect Ratio*) amb l'**Equació 11.10.1.5E**, que és la següent:

$$\beta = \frac{D}{2h} \quad (11.10.1.5E)$$

On:

- β : Aspect ratio.
- D (m): Diàmetre del cap el·lipsoïdal.
- h (m): Alçada del cap.

Sabent que en aquest cas l'*aspect ratio* és 2:1, i el diàmetre és igual a 3,5 metres hom obté que l'alçada és de 1,75 m. Amb aquests valors es pot calcular el factor K, descrit a l'**Equació 11.10.1.6E**:

$$K = \frac{1}{6} \cdot [2 + \beta^2] \quad (11.10.1.6E)$$

On:

- K : Factor K.
- β : Aspect ratio.

En aquest exemple:

$$K = \frac{1}{6} \cdot [2 + (1)^2] = 0,5$$

Amb aquests valors definits, hom pot calcular el gruix del reactor amb l'**Equació 11.10.1.7E**:

$$t = \frac{P_i \cdot D \cdot K}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P_i} \quad (11.10.1.7E)$$

On:

- t (m): Gruix de la carcassa al cap del recipient.



- $S (Pa)$: Estrès màxim permès per a les condicions de treball.
- E : Eficiència de la soldadura.
- $P_i (Pa)$: Pressió del recipient.
- $D (m)$: Diàmetre del cap el·lipsoïdal.
- K : Factor K.

Fent-la servir, hom obté:

$$t = \frac{6,5 \cdot 10^6 Pa \cdot 3,5 m \cdot 0,5}{2 \cdot 1,08 \cdot 10^8 Pa \cdot 1 - 0,2 \cdot 6,5 \cdot 10^6 Pa} = 0,053 m = 52,98 mm$$

La MAWP per al cap el·lipsoïdal es defineix amb la següent equació (**Equació 11.10.1.8E**):

$$MAWP = \frac{2 \cdot S \cdot E \cdot t}{KD + 0,2 t} \quad (11.10.1.8E)$$

On:

- $MAWP (Pa)$: Maximum Allowed Working Pressure.
- $t(m)$: Gruix de la carcassa al cap del recipient.
- $S (Pa)$: Estrès màxim permès per a les condicions de treball.
- E : Eficiència de la soldadura.
- $P_i (Pa)$: Pressió del recipient.
- $D (m)$: Diàmetre del cap el·lipsoïdal.

Així:

$$MAWP = \frac{2 \cdot 6,5 \cdot 10^6 Pa \cdot 3,5 m \cdot 0,5}{2 \cdot 0,5 \cdot 1,08 \cdot 10^8 Pa \cdot 1 + 0,2 \cdot 6,5 \cdot 10^6 Pa} = 6,5 \cdot 10^6 Pa$$

Seguidament, hom calcula el volum, tal i com es mostra a l'**Equació 11.10.1.9E**:

$$V = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h \quad (11.10.1.9E)$$

On:

- $V (m^3)$: Volum del cap del recipient.
- $R (m)$: Radi del recipient.



- $h(m)$: Alçada del cap del recipient.

D'aquesta manera:

$$V = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot (1,75)^2 \cdot 1,75 = 11,23 \text{ m}^3$$

Tanmateix, cal calcular el volum d'acer (V_m) amb l'**Equació 11.10.1.10E**:

$$V_m = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot (R_0^2 \cdot h_0 - R^2 \cdot h) \quad (11.10.1.10E)$$

On:

- $V_m (m^3)$: Volum d'acer necessari.
- $R_0(m)$: $R+t$.
- $R(m)$: Radi del recipient.
- $h_0(m)$: $h+t$.
- $h(m)$: Alçada del cap del recipient.

Utilitzant-la, hom obté que:

$$V_m = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot ((1,803m)^2 \cdot (1,803m)^2 - (1,75)^2 \cdot (1,75)) = 1,051 \text{ m}^3 \text{ d'acer}$$

Per a obtenir la massa total, cal seguir l'**Equació 11.10.1.11E**:

$$M_{Total} = M_{Paret} + M_{Cap} \quad (11.10.1.11E)$$

Així, en darrer lloc, la massa total és:

$$M_{Total} = \left[\left(\frac{\pi}{4} \cdot (3,5m + 0,05m)^2 - (3,5)^2 \right) \cdot 15,55m \cdot 7,9 \frac{tn}{m^3} \right] + \left[2 \cdot 1,051 \text{ m}^3_{acer} \cdot 7,9 \frac{tn}{m^3} \right] = 52,65 \text{ tn}$$

11.11 Bescanviadors de calor

Tots els bescanviadors de calor (inclosos condensadors i reboilers) usats a la planta de *ChemEBenz* s'han dissenyat mitjançant el programa Aspen HYSYS proporcionant-li les dades necessàries en cada cas. En aquest cas es pren com a exemple el condensador CN-302

Per dissenyar el bescanviador, primerament es seleccionarà el tipus de bescanviador desitjat i la localització del fluid calent. També es poden fixar altres valors com

per exemple la longitud dels tubs o el 'pitch' a conveniència per a obtenir les dimensions desitjades. Es pot veure a la **Figura 11.11.1.F**:



Figura 11.11.1.F: Configuració del condensador CN-302.

A continuació s'anirà a 'Process Data' on s'especificaran el cabal del fluid a escalfar o refredar, la pressió, el salt tèrmic dels fluids i es fixarà la 'Fouling Resistance', que és la resistència a l'embrutiment. Cal mencionar que en aquest exemple no hi ha salt tèrmic al cabal de fluid calent ja que al condensador CN-302 de la columna FC-302 es vol mantenir la temperatura a la que entra al condensador. Es pot veure a continuació a la **Figura 11.11.2.F**:

Process Data Shell & Tube

Process Data

	Hot Stream (1) Shell Side		Cold Stream (2) Tube Side	
	In	Out	In	Out
Fluid name				
Mass flow rate	kg/h	993723		
Mass flow rate multiplier	1		1	
Temperature	°C	102,4	20	50
Vapor mass fraction	1	0		
Pressure (absolute)	bar	1,9	1,01	0,8999
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	0,119	0,1101	
Allowable pressure drop	bar	0,18961	0,20684	
Fouling resistance	m ² -K/W	0,0001	0,0001	

Figura 11.11.2.F: Configuració del condensador CN-302.

Seguidament s'anirà a la carpeta 'Property Data' i es definiran les composicions del fluid calent (anant al subapartat 'Hot Stream (1) Composition') i el fluid fred (anant al subapartat 'Cold Stream (2) Composition') tal i com es veu a les **Figures 11.11.3.F** i **11.11.4.F** respectivament.

EDR Navigator

Hot Stream (1) Compositions
Shell & Tube

Physical property package: B-JAC

Hot side composition specification: Mole flowrate or %

	BJAC Components	BJAC Composition	Component type
1	Benzene	99,91	Program
2	Toluene	0,09	Program
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			

Search Databank... Delete Row

Figura 11.11.3.F: Composició del fluid calent del condensador CN-302.

EDR Navigator

Cold Stream (2) Compositions
Shell & Tube

Physical property package: B-JAC

Cold side composition specification: Weight flowrate or %

	BJAC Components	BJAC Composition	Component type
1	Water	100	Program
2			Program
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			

Search Databank... Delete Row

Figura 11.11.4.F: Composició del fluid fred del condensador CN-302.

Un cop que tot està definit ja es pot procedir a fer convergir el bescanviador. Per això s'acciona el comandament de 'RUN' i s'espera a que convergeixi. Un cop convergit s'ha de comprovar que no hi surtin alertes crítiques i ja es pot consultar el full d'especificacions del bescanviador tal i com es veu a la **Figura 11.11.5.F**:

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 :	610 - 3000 mm	Type:	BEM Horizontal	Connected in:	10 parallel	2 series								
7	Surf/unit(eff.)	1210,4	m ²	Shells/unit	20	Surf/shell(eff.)	60,5	m ²							
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT														
9	Fluid allocation			Shell Side			Tube Side								
10	Fluid name														
11	Fluid quantity, Total		276,0341			862,33									
12	Vapor (In/Out)		kg/s	276,0341	1,0141	0	0	0							
13	Liquid		kg/s	0	275,0201	862,33	862,33								
14	Noncondensable		kg/s	0	0	0	0								
15															
16	Temperature (In/Out)		°C	104,4	97,1	20	50								
17	Bubble / Dew point		°C	100,97 / 104,4	97,09 / 97,9	/	/								
18	Density Vapor/Liquid		kg/m ³	4,73 /	4,34 / 800,98	/ 998,8	/ 990,57								
19	Viscosity		mPa-s	0,0097 /	0,0095 / 0,2542	/ 1,017	/ 0,5514								
20	Molecular wt, Vap			78,11	78,11										
21	Molecular wt, NC														
22	Specific heat		kJ/(kg-K)	1,365 /	1,338 / 1,968	/ 4,194	/ 4,186								
23	Thermal conductivity		W/(m-K)	0,0197 /	0,0191 / 0,1221	/ 0,5937	/ 0,6319								
24	Latent heat		kJ/kg	384,6	384,1										
25	Pressure (abs)		bar	1,9	1,71039	1,01	0,85076								
26	Velocity (Mean/Max)		m/s	12,65 /	74,62	1,45 /	1,45								
27	Pressure drop, allow./calc.		bar	0,18961	1,45996	0,20684	0,15924								
28	Fouling resistance (min)		m ² -K/W	0,0001	0,0001	0,0001	0,00013	Ao based							
29	Heat exchanged		108368,7	kW		MTD (corrected)		63,72	°C						
30	Transfer rate, Service		1405,1	Dirty		1533,6	Clean	2360,5	W/(m ² -K)						
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL														
32				Shell Side			Tube Side								
33	Design/Vacuum/test pressure		bar	3,44738 /	/	3,44738 /	/								
34	Design temperature / MDMT		°C	137,78 /	/	87,78 /	/								
35	Number passes per shell			1		1									
36	Corrosion allowance		mm	3,18		3,18									
37	Connections		In	mm	1 457,2 /	- 1 304,8 /	-								
38	Size/Rating		Out	1 203,2 /	- 1 254 /	-									
39	Nominal		Intermediate	1 457,2 /	- 1 254 /	-									
40	Tube #:	347	OD:	19,05	Tks. Average	2,11	mm	Length:	3000	mm	Pitch:	23,81	mm	Tube pattern:	30
41	Tube type:		Plain	Insert:	None	Fin#:		#/m		Material:	Carbon Steel				
42	Shell		Carbon Steel	ID	600,08	OD	619,12	mm	Shell cover						

Figura 11.11.5.F: Full d'especificacions del condensador CN-302.

Com a addició també presenta un cost aproximat de la columna amb el que es pot valorar si s'adapta a les necessitats de la planta o si escau redissenyar-lo novament tal i com es veu a la **Figura 11.11.6.F:**

Cost / Weights Shell & Tube			
Costs/Weights			
Weights	kg	Cost data	Dollar(US)
Shell	643,5	Labor cost	450417
Front head	186,9	Tube material cost	50040
Rear head	189,7	Material cost (except tubes)	80275
Shell cover			
Bundle	1138,4		
Total weight - empty	2158,5	Total cost (1 shell)	29036
Total weight - filled with water	3192,1	Total cost (all shells)	580720

Per al disseny dels altres bescanviadors (inclosos reboilers i condensadors) s'ha seguit el mateix mètode pas per pas fins a obtenir els valors desitjats.



11.12 Bibliografia

Alkhatat, W. A., and A. M. Gerrard, Estimating Manning Levels for Process Plants, AACE Transactions, I.2.1–I.2.4, 1984.

American Petroleum Institute. (2022). API 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage (13th ed.). Recuperat el 26 de maig del 2023, de <https://www.api.org/products-and-services/standards/important-standards-announcements/standard650>

Andres. (2022). Que es el factor de potencia y cuales son los valores mas comunes. Electricaplicada. Recuperat el 7 de juny del 2023, de <https://www.electricaplicada.com/que-es-el-factor-de-potencia/#formula-para-determinar-el-factor-de-potencia>

Naturgy. (s. d.). Composición, ventajas y desventajas del gas natural - Naturgy. Recuperat el 29 de maig del 2023, de https://www.naturgy.es/empresas/blog/gas_natural_ventajas_y_desventajas

Doméstico, U. (s/f). IV.12. PRECIO NETO DE LA ELECTRICIDAD PARA USO DOMÉSTICO Y USO INDUSTRIAL. Gob.es. Recuperat el 7 de juny de 2023, de https://www.mincotur.gob.es/es-es/IndicadoresyEstadisticas/BoletinEstadistico/Energ%C3%ADa%20y%20emisiones/4_12.pdf

FICHAS TECNICA ACERO INOX.304/304L. (2023). Recuperat el 7 de maig de 2023, de <https://europer.cl/wp-content/uploads/2021/11/FICHAS-TECNICA-ACERO-INOX.304-304L.pdf>

Htt.de. (s.d.). Recuperat el 29 de maig del 2023, de https://www.htt.de/fileadmin/Bilder_Dokumente/Produkte/wtoe/01_wto_2018-06-04_EN.pdf

Instituto Nacional de Seguros de Costa Rica. (s.d.). Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores método Probit Recuperat de https://www.cso.go.cr/legislacion/notas_tecnicas_preventivas_insht/NTP%20291%20-%20Modelos%20de%20vulnerabilidad%20de%20las%20personas%20por%20accidentes%20mayores%20metodo%20Probit.pdf

Maximum Allowable Stress Values - ASME Code Section II, Table 1A, Part D. (s.d). Cis-inspector.com. Recuperat el 8 de juny del 2023, de <https://www.cis-inspector.com/asme-code-allowable-stresses-table-1a.htm>



Metalvin. (2023). Chapa de acero inoxidable. Recuperat el 7 de maig de <https://www.metalvin.com/inoxidable/chapa-acero-inoxidable/>

Triple Action Static Mixer - Komax Systems. (2020, 11 diciembre). Komax Systems. Recuperat el 20 de maig del 2023, de <https://komax.com/triple-action-static-mixer/>

ZENSITEC. (2022, 2 novembre). Sistemas de Extinción con Gases Inertes según NFPA | ZENSITEC. Zensitec. Recuperat el 28 de maig del 2023, de <https://zensitec.com/sistemas-contraincendios/extincion-por-gases/extincion-gases-inert>

