



Enginyeria
UAB

VELDON

WE REACT. THE
WORLD BUILDS



PLANTA DE PRODUCCIÓ MDA

MARIA MARTORI CLARÀ
VÍCTOR SEBASTIÁN LÓPEZ
GERARDO M. RODRÍGUEZ CHUMPITAZ
LEO BENITO MOLINS
ALEJANDRO DELGADO SÁNCHEZ
DANIEL TORO ORTIZ
NAÍM RICO RODRÍGUEZ

TUTOR: ANTONI SÁNCHEZ FERRER

PROJECTE FI DE GRAU
ENGINYERIA QUÍMICA

JUNY - 2025



Enginyeria
UAB

V E L D O N

WE REACT. THE
WORLD BUILDS



PLANTA DE PRODUCCIÓ MDA

CAPÍTOL.11
MANUAL DE
CÀLCUL

PROJECTE FI DE GRAU
ENGINYERIA QUÍMICA

JUNY - 2025

Taula de Contingut

11.1 Introducció	6
11.2 Balanç de Matèria	6
11.3 Balanç d'Energia	9
11.3.1. Equacions del BE	10
11.3.2. Exemple de càlcul	12
11.4 Càlcul per equips	13
11.4.1. Tanques d'emmagatzematge	13
11.4.2. Reactors	17
11.4.3. Intercanviadors de calor	25
11.4.4. Cristallitzadors	32
11.4.5. Evaporadors	34
11.4.6. Centrífuga	38
11.4.7. Filtres	41
11.4.8. Assecadors	43
11.4.9. Condensador	44
11.4.10. Tanques de mescla	48
11.4.11. Torre de destil·lació	50
11.4.12. Compresors	52
11.4.13. Calderes	52
11.4.14. Torre de refrigeració	53
11.5. Bombes	53
11.5.1. Càlculs generals	53
11.5.1. Exemple de càlcul	56
11.6. Canonades	58
11.6.1 Disseny canonades	58
16.7 Annexos	60
16.7.1 Validació amb SuperPro Designer	60
16.7.2. Aplicació de Polymath 6.0 en la resolució del RCFP	62

11.1 Introducció

El present capítol constitueix una part fonamental del treball, ja que recull de manera sistemàtica i rigorosa totes les expressions matemàtiques i les equacions emprades en el desenvolupament del procés de fabricació de 4,4'-MDA a les instal·lacions de **Veldon**. Es tracta d'una eina essencial per a la comprensió detallada del disseny i de l'avaluació tècnica del procés, i permet a l'analista o enginyer interpretar amb claredat les decisions preses al llarg del projecte.

En aquest apartat s'hi exposen, amb la precisió requerida, les equacions de balanç de matèria i energia, les relacions cinètiques, els criteris de disseny d'equips i altres expressions matemàtiques que sustenten el dimensionament i la viabilitat operativa del sistema. A més, s'hi inclouen exemples de càlcul representatius, amb la finalitat de reforçar la comprensió dels conceptes i facilitar-ne la seva aplicació pràctica.

11.2 Balanç de Matèria

El balanç de matèria constitueix una etapa fonamental en el disseny i anàlisi del procés de producció de 4,4'-MDA a **Veldon**. Per a sistemes tancats, es compleix que la massa total entrant és igual a la massa total sortint. En canvi, en sistemes oberts, el balanç de massa s'expressa com la suma de la massa total entrant i la massa generada dins del sistema, que és igual a la suma de la massa total sortint i la massa acumulada en un període de temps determinat. En aquest cas no hi ha acumulació perquè treballem en continu i en estat estacionari.

Inicialment, es va recórrer a la utilització d'eines senzilles com fulls de càlcul d'**Excel** per obtenir una estimació preliminar de les quantitats aproximades de matèries primeres i productes finals requerits. Aquesta aproximació va permetre establir una base quantitativa inicial que facilitava la planificació i el dimensionament bàsic del procés.

Un cop obtingudes aquestes primeres dades, es va avançar cap a una simulació més detallada i precisa utilitzant el programari **SuperPro Designer**, que permet la integració completa dels balanços de massa i energia, així com la comprovació automàtica de la coherència entre tots els equips i fluxos del sistema. Aquesta eina va ser essencial per identificar les pèrdues associades al procés i visualitzar amb claredat les desviacions respecte als càlculs inicials.

Durant la fase de simulació, es va detectar que les quantitats inicials estimades de matèries primeres i productes finals no eren suficients per garantir els objectius de producció. En conseqüència, es va procedir a un segon ajust, amb un sobredimensionament d'aproximadament un **35%** en els balanços de matèries primeres i productes finals. Aquesta mesura va assegurar que es complissin els requisits mínims per a la planta adjacent de fabricació de MDI, evitant així possibles mancances i assegurant la continuïtat operativa.

La combinació de les dues eines, **Excel** per a l'estimació inicial i **SuperPro Designer** per a la simulació detallada, ha permès desenvolupar un balanç de matèria robust, coherent i alineat amb els criteris operatius de **Veldon**, garantint la integració efectiva amb els processos industrials existents i assegurant la viabilitat tècnica i econòmica del projecte.

A continuació, es presenta una taula exhaustiva que recull els cabals massics de tots els components implicats en el sistema de producció, per a cadascun dels corrents que intervenen al llarg del procés. Aquesta informació és essencial per a la traçabilitat del procés, l'avaluació d'eficiències parcials i totals, així com per al posterior dimensionament dels equips i la gestió integrada de matèries i residus.

Taula 11.1: Balanços de matèria de tots els corrents del procés de producció

Corrent	Composició (kg/h)									
	Anilina	A.Clorhídric 37%	Formaldehid 37%	H. Sòdic 30%	Aigua	Aire	C. Sòdic	MDA	H. Anilina	H. MDA
S-101	1253.9	-	-	-	16962.3	-	-	-	34828.3	-
S-102	-	-	4029.9	-	6861.6	-	-	-	-	-
S-103	1253.9	-	-	-	26241.8	-	-	-	67.3	36371.5
S-104	1253.9	-	4029.9	-	23824.0	-	-	-	34828.3	-
S-105	-	-	-	10746.3	25074.6	-	-	-	-	-
S-106	1277.4	-	-	-	56156.6	-	15702.3	26609.8	34.6	-
S-107	1253.9	-	4029.9	-	23824.0	-	-	-	34828.3	-
S-108	1021.9	-	-	-	673.9	-	12561.8	5322.0	27.7	-
S-109	-	-	-	10746.3	25074.6	-	-	-	-	-
S-110	26300.1	-	-	-	265.7	-	-	-	-	-
S-111	-	9806.0	-	-	16696.7	-	-	-	-	-
S-112	255.5	-	-	-	11231.3	-	3140.5	21287.9	6.9	-
S-113	1277.4	-	-	-	56156.6	-	15702.3	26609.8	34.6	-
S-114	127.7	-	-	-	5615.7	-	1570.2	20453.4	3.5	-
S-115	-	-	-	-	561.6	-	-	20240.4	-	-

S-116	20.4	-	-	-	13.5	-	12561.8	106.4	0.6	-
S-117	1021.9	-	-	-	6738.8	-	12561.8	5322.0	27.7	-
S-118	127.7	-	-	-	5615.7	-	1570.2	834.5	3.5	-
S-119	20.4	-	-	-	13.3	-	-	106.4	0.6	-
S-120	127.7	-	-	-	5054.1	-	1570.2	213.0	3.5	-
S-121	1021.9	-	-	-	44925.3	-	12561.8	5322.0	27.7	-
S-122	1001.5	-	-	-	22991.9	-	-	5215.5	27.1	-
S-123	1021.9	-	-	-	22462.7	-	12561.8	5322.0	27.7	-
S-124	20.4	-	-	-	13.3	-	-	106.4	0.6	-
S-125	1277.4	-	-	-	400.0	-	3140.5	6369.4	34.6	-
S-126	1277.4	-	-	-	400.0	-	3140.5	6369.4	34.6	-
S-127	1277.4	-	-	-	33675.0	-	3140.5	6369.4	-	-
S-128	20.4	-	-	-	13.3	703.9	-	106.4	0.6	-
S-129	-	-	-	-	5.6	-	-	20240.4	-	-
S-130	-	-	-	-	41354.0	-	-	-	-	-
S-131	-	-	-	-	-	2779.8	-	-	-	-
S-132	-	-	-	-	556.0	2779.8	-	-	-	-
S-133	-	-	-	-	33275.0	-	-	-	-	-
S-134	-	-	-	-	-	703.9	-	-	-	-
S-135	-	-	-	-	-	0.1	12561.8	-	-	-
S-136	-	-	-	-	22331.5	-	-	-	-	-
S-137	-	-	-	-	6064.9	-	-	-	-	-
S-138	-	-	-	-	15723.9	-	-	-	-	-
S-139	-	-	-	-	22462.7	-	-	-	-	-
S-140	-	-	-	-	34957.0	-	-	-	-	-
S-141	-	-	-	-	-	703.9	-	-	-	-
S-142	-	-	-	-	15723.9	-	-	-	-	-
S-143	-	-	-	-	82047.8	-	-	-	-	-
S-144	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S-145	-	-	-	-	1222.7	-	-	-	-	-
S-146	-	-	-	-	29363.3	-	-	-	-	-
S-147	-	-	-	-	29363.3	-	-	-	-	-
S-148	-	-	-	-	22462.7	-	-	-	-	-
S-149	-	-	-	-	1111.9	-	-	-	-	-
S-150	-	-	-	-	281.6	-	-	-	-	-
S-151	-	-	-	-	1222.7	-	-	-	-	-
S-152	-	-	-	-	780.9	-	-	-	-	-
S-153	-	-	-	-	34957.0	-	-	-	-	-
S-154	-	-	-	-	6686.0	-	-	-	-	-
S-155	-	-	-	-	55179.4	-	-	-	-	-
S-156	-	-	-	-	6686.0	-	-	-	-	-

S-157	-	-	-	-	22021.0	-	-	-	-	-
S-158	-	-	-	-	21140.6	-	-	-	-	-
S-159	-	-	-	-	21140.6	-	-	-	-	-
S-160	-	-	-	-	5095.0	-	-	-	-	-
S-161	-	-	-	-	5095.0	-	-	-	-	-
S-162	-	-	-	-	188.9	-	-	-	-	-
S-163	-	-	-	-	188.9	-	-	-	-	-
S-164	-	-	-	-	400.0	-	-	-	-	-
S-165	-	-	-	-	281.6	-	-	-	-	-
S-166	-	-	-	-	55129.4	-	-	-	-	-
S-167	-	-	-	-	47937.0	-	-	-	-	-
S-168	-	-	-	-	22021.0	-	-	-	-	-
S-169	-	-	-	-	55129.4	-	-	-	-	-
S-170	-	-	-	-	47937.0	-	-	-	-	-
S-171	-	-	-	-	45000.0	-	-	-	-	-

11.3 Balanç d'Energia

En el procés de producció de 4,4'-MDA a **Veldon**, la realització dels balanços d'energia ha estat un requisit indispensable per a l'anàlisi i l'optimització de cada unitat operativa de la planta. Aquesta etapa ha implicat l'aplicació d'una metodologia sistemàtica que combina diferents eines i tècniques per assegurar la coherència i l'eficiència tèrmica del sistema en el seu conjunt.

Inicialment, s'ha emprat la capacitat de càlcul i simulació del programari **SuperPro Designer**, gràcies a aquesta eina, s'ha pogut obtenir una visió completa i quantitativa dels fluxos energètics, identificant punts crítics on es produeixen pèrdues o necessitats addicionals de calor o fred.

Paral·lelament, s'ha dut a terme una anàlisi tèrmica específica dels processos endotèrmics i exotèrmics inherents a la reacció i a les diferents etapes de purificació, separació i condicionament amb l'ajuda d'un full de càlcul (**Excel**). Aquesta anàlisi ha estat clau per definir els requeriments exactes de sistemes de control tèrmic, així com per dimensionar adequadament els intercanviadors de calor i els sistemes auxiliars de calefacció i refrigeració. D'aquesta manera, s'ha garantit que la planta operi dins dels marges de seguretat i eficiència energètica establerts.

A més, s'ha explorat la integració tèrmica entre corrents calents i freds per tal de maximitzar la recuperació energètica i minimitzar el consum global. Aquesta estratègia d'optimització energètica, combinada amb una anàlisi detallada de les necessitats dels serveis auxiliars, ha permès garantir la compatibilitat amb la infraestructura energètica existent a **Veldon** i assegurar un funcionament estable i sostenible del procés.

Mitjançant l'aplicació d'aquest enfocament integral, s'ha obtingut un balanç d'energia rigorós i coherent que serveix com a base per a la presa de decisions tècniques orientades a la millora contínua i l'eficiència operativa de la planta.

11.3.1. Equacions del BE

- **Càlcul transferència de calor**

Per a l'elaboració dels balanços d'energia associats al procés, s'ha optat principalment per un enfocament simplificat, assumint condicions de pressió pràcticament constant i composició invariable durant l'escalfament o el refredament dels corrents. En aquest context, s'ha utilitzat de manera generalitzada l'expressió següent per al càlcul de la transferència de calor:

$$Q = m \cdot C_{p_{mitjana}} \cdot \Delta T \quad (E.11.1)$$

On:

- **Q**: potència tèrmica transferida (**kW**)
- **m**: cabal màssic del corrent (**kg/s**)
- **C_{p_{mitjana}}**: capacitat calorífica específica mitjana del corrent (**kJ/kg·K**)
- **ΔT**: diferència de temperatura entre els punts d'entrada i sortida (**K**)

S'ha escollit aquesta formulació en lloc de l'expressió general basada en entalpies específiques perquè en la majoria de les operacions unitàries del procés no es produeixen canvis de fase ni transformacions químiques que modifiquin substancialment la composició dels corrents. Així mateix, la manca de dades termodinàmiques completes per a algunes mescles ha fet preferible l'ús d'un model basat en el salt tèrmic i un valor mitjà de C_p , que ofereix una aproximació suficientment precisa per al dimensionament d'equips i l'anàlisi tèrmica en condicions estacionàries.

Tanmateix, en certes operacions unitàries específiques del procés com ara els assecadors o el condensador, **sí** que es produeixen canvis de fase. En aquests casos, l'equació (11.1) ja no és aplicable, ja que el canvi d'estat implica un intercanvi **d'energia latent** que no pot expressar-se mitjançant aquesta equació. Per tant, en aquestes unitats s'ha aplicat la formulació de l'equació (E.11.2), que contempla de manera precisa els efectes associats a les transicions de fase.

$$Q = m \cdot \lambda \quad (E.11.2)$$

On:

- **Q**: potència tèrmica transferida (**kW**)
- **m**: cabal màssic del corrent (**kg/s**)
- **λ** : calor latent específica del canvi de fase (**kJ/kg**)

Tanmateix, en alguns casos específics, com en el del **condensador**, s'ha considerat necessari combinar **ambdues** formulacions per tal de representar de manera més acurada el fenomen tèrmic que s'hi produeix. En situacions com aquesta, els vapors poden arribar a la unitat a una temperatura significativament superior a la del seu punt de condensació. Abans de produir-se el canvi d'estat, és imprescindible refredar el corrent fins assolir la temperatura de transició de fase, la qual s'ha fixat de manera conservadora per garantir la condensació completa. Aquest tram de refredament comporta una aportació addicional de calor a evacuar, associada al descens de temperatura, que es correspon amb **calor sensible**.

Per aquest motiu, la potència tèrmica total a dissipar s'ha obtingut com la suma de la calor sensible i la calor latent, mitjançant l'aplicació conjunta de les dues expressions presentades anteriorment, (**E.11.1** , **E.11.2**). Aquesta aproximació permet una estimació més rigorosa del requeriment de refrigeració i resulta especialment rellevant per al dimensionament dels equips implicats.

- Càlcul àrea de transferència de calor

Per al dimensionament adequat de les superfícies d'intercanvi tèrmic en les diferents operacions unitàries (com ara escalfadors, refredadors, evaporadors o condensadors), s'aplica la relació fonamental de transmissió de calor. Aquesta relació vincula la potència tèrmica transmesa amb l'àrea d'intercanvi, el coeficient global de transferència de calor i la diferència de temperatura mitjana logarítmica (**ΔT_{ml}**) entre els dos fluids implicats.

L'expressió general és la següent:

$$Q=U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (E.11.3)$$

on:

- **Q**: potència tèrmica transferida (**kW**)
- **U**: coeficient global de transferència de calor (**kW/m²·K**), que depèn de les característiques dels materials, la naturalesa dels fluids, els règims d'escolament i les condicions de les superfícies d'intercanvi
- **A**: àrea de transferència de calor (**m²**)
- **ΔT_{ml}**: diferència de temperatura mitjana logarítmica (**K**)

La diferència de temperatura mitjana logarítmica (ΔT_{ml}) s'expressa com:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{c,e}-T_{f,s})-(T_{c,s}-T_{f,e})}{\ln \left(\frac{T_{c,e}-T_{f,s}}{T_{c,s}-T_{f,e}} \right)} \quad (E.11.4)$$

on:

- **T_{c,e}/T_{c,s}**: temperatures d'entrada i sortida del fluid calent (**K**)
- **T_{f,e}/T_{f,s}**: temperatures d'entrada i sortida del fluid fred (**K**)

Aquest enfocament permet dimensionar adequadament l'àrea d'intercanvi (**A**) per garantir una transferència de calor eficient i segura, tenint en compte tant les propietats termodinàmiques dels fluids com les condicions operatives.

11.3.2. Exemple de càlcul

A continuació, es presenten diversos exemples representatius dels càlculs realitzats tant per a la potència tèrmica intercanviada (**Q**) com per a la determinació de l'àrea de transferència de calor (**A**) corresponent a tots els intercanviadors presents a **Veldon**. Per a aquests càlculs, s'han aplicat les expressions exposades prèviament (**E.11.1 – E.11.4**), seleccionant en cada cas la formulació més adequada segons les característiques termodinàmiques del procés i la naturalesa dels canvis físics implicats.

Taula 11.2: Balanços d'energia dels diferents intercanviadors

BALANÇOS D'ENERGIA		
Equip	Potència tèrmica q (kW)	Àrea transferència de calor a (m²)
IC-201	740.72	4.51
IC-202	473.12	2.64
IC-203	1423.70	29.96
IC-401	3.95	0.16
IC-701	450.30	23.95
IC-901	1280.20	97.20

11.4 Càlcul per equips

En aquest apartat es recullen totes les equacions i expressions matemàtiques utilitzades per al **disseny** dels diferents equips implicats en el procés de producció de **Veldon**.

Els càlculs s'han desenvolupat principalment mitjançant un full de càlcul **Excel**, que ha permès aplicar de manera sistemàtica les fórmules i iterar ràpidament entre diferents condicions de disseny.

Posteriorment, els valors numèrics obtinguts han estat revisats i ajustats utilitzant el programari **SuperPro Designer**, amb l'objectiu de validar els resultats i garantir-ne la consistència. Mitjançant la combinació d'ambdues eines, s'ha pogut assegurar que els valors finals de disseny presenten coherència interna.

Finalment, s'ha contrastat que les dimensions calculades, com ara **l'alçada, amplada, llargada, nombre de tubs...**, són raonables i comparables amb les especificacions d'equips industrials disponibles actualment al mercat.

11.4.1. Tancs d'emmagatzematge

11.4.1.1. Matèries primeres i residus

Per a la selecció i dimensionament dels tancs destinats a l'emmagatzematge de matèries primeres i residus del procés de producció de **Veldon**, es va partir de l'anàlisi dels cabals volumètrics corresponents a cada component. A partir d'aquestes dades, es va calcular la

quantitat total de substància necessària per garantir el funcionament ininterromput del procés durant un període de subministrament estimat de **2-4 dies** segons el component, considerat raonable des del punt de vista operatiu i logístic.

Els càlculs es van realitzar inicialment mitjançant un full de càlcul **Excel** a partir de les equacions (**E.11.5 – E.11.8**), que es descriuen detalladament més endavant.

A continuació, es van introduir els valors calculats al programari **SuperPro Designer**, des d'on es van comprovar els paràmetres geomètrics clau per al disseny: alçada, diàmetre i relació H/D. Aquestes dimensions es van revisar i validar novament amb Excel per assegurar la coherència dels resultats i verificar que complien amb criteris pràctics d'instal·lació i fabricació.

Finalment, com a criteri de seguretat habitual en enginyeria de procés, es va aplicar un marge de sobredimensionament del **10%** sobre el volum calculat per garantir robustesa davant fluctuacions en el consum o possibles desviacions en el subministrament.

A continuació es mostra l'exemple d'**HCl** que es va seguir per al dimensionament dels 5 tancs que es van dissenyar per aquest component:

- Càlcul del volum necessari d'HCl en 4 dies treballant en continu 24h:

$$24.98 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{24h}{1dia} \cdot 4 dies = 2398.08 \frac{m^3}{4 dies} \quad (C.11.1)$$

$$\frac{2398.08 m^3}{5 tancs} = 479.62 m^3 \quad (C.11.2)$$

Tenint en compte el sobredimensionament del **10%** ~ **528 m3**

11.4.1.2. Exemple de càlcul HCl

1. Definició del volum requerit:

S'aproxima el volum a un valor comercial i estandarditzat. **V=550 m3**

2. Elecció de la relació geomètrica H/D:

Per garantir un disseny estable, fàcil de fabricar i compatible amb pràctiques industrials, es selecciona una relació altura/diàmetre (H/D) típica. Valors entre **1** i **3** són habituals per tancs de líquids.

$$H/D=1.5$$

3. Expressió del volum d'un cilindre vertical:

L'equació que descriu el volum d'un tanc cilíndric és la següent:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot H \quad (E.11.5)$$

Tenint en compte que:

$$H = \frac{H}{D} \cdot D \quad (E.11.6)$$

Substituint **(E.11.6)**, l'expressió que queda és la següent:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{H}{D} \cdot D\right) = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot 1.5 \cdot D = \frac{3 \cdot \pi}{8} \cdot D^3 \quad (E.11.7)$$

4. Càlcul del diàmetre:

$$D = \left(\frac{8 \cdot V}{3 \cdot \pi}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (E.11.8)$$

Si es substitueix el valor de volum a **(E.11.8)**:

$$D = \left(\frac{8 \cdot 550}{3 \cdot \pi}\right)^{\frac{1}{3}} = (467.3)^{\frac{1}{3}} = 7.76m \quad (C.11.3)$$

5. Càlcul de l'alçada:

Es substitueix el valor del diàmetre en l'equació **(E.11.6)**:

$$H = 1.5 \cdot 7.76 = 11.65\text{m}$$

(C.11.4)

Taula 11.3: Dimensionament dels tancs d'HCl 37%

DIMENSIONS TANC Àcid Clorhídric 37%			
Volum del tanc (m ³)	Alçada (m)	Diàmetre (m)	H/D
550.00	11.65	7.76	1.50

Per als tancs de les altres matèries primeres i els residus, s'ha seguit el mateix procediment. S'ha calculat el volum requerit a partir dels cabals volumètrics, s'han aplicat les equacions esmentades anteriorment i s'ha comprovat la coherència amb **SuperPro Designer**. Els valors obtinguts en tots el casos es presenten a continuació:

Taula 11.4: Dimensionament dels tancs d'Anilina

DIMENSIONS TANC ANILINA			
Volum del tanc (m ³)	Alçada (m)	Diàmetre (m)	H/D
550.00	11.65	7.76	1.50

Taula 11.5: Dimensionament dels tancs de Formaldehid

DIMENSIONS TANC FORMALDEHID			
Volum del tanc (m ³)	Alçada (m)	Diàmetre (m)	H/D
450.00	10.88	7.26	1.50

Taula 11.6: Dimensionament dels tancs d'Hidròxid Sòdic

DIMENSIONS TANC HIDRÒXID SÒDIC			
Volum del tanc (m ³)	Alçada (m)	Diàmetre (m)	H/D
650.00	13.37	7.86	1.50

Taula 11.7: Dimensionament dels tancs de residus

DIMENSIONS TANC RESIDUS			
Volum del tanc (m ³)	Alçada (m)	Diàmetre (m)	H/D
325.00	9.76	6.51	1.50

11.4.1.3. Producte final i subproducte

Per al disseny de les sitges destinades a l'emmagatzematge dels productes i subproductes sòlids del procés, s'ha partit dels cabals màssics de cada component, tenint en compte la seva naturalesa i mode d'operació.

Un cop establerts els volums requerits, s'ha fet el procediment de dimensionament com a l'apartat anterior, seguint les mateixes equacions i posteriorment comprovant amb **SuperPro Designer** la coherència de les dades obtingudes.

Taula 11.8: Dimensionament dels tancs d'MDA

DIMENSIONS SITJA MDA			
Volum del tanc (m ³)	Alçada (m)	Diàmetre (m)	H/D
95.00	9.10	3.64	2.50

Taula 11.9: Dimensionament dels tancs de NaCl

DIMENSIONS SITJA NaCl			
Volum del tanc (m ³)	Alçada (m)	Diàmetre (m)	H/D
45.00	8.02	2.67	3.00

11.4.2. Reactors

11.4.2.1. Balanç de matèria total

Per al disseny i validació dels reactors, s'ha realitzat el balanç de matèria global i parcial basat en els cabals màssics d'entrada i sortida. Es considera una reacció en estat estacionari, per la qual cosa el balanç general és:

$$\Sigma m_{entrada} = \Sigma m_{sortida} + \Sigma m_{acumulació} \quad (E.11.9)$$

S'ha considerat un sistema en règim estacionari, on no hi ha acumulació neta de massa dins del reactor. Per tant, s'aplica el balanç de matèria total:

$$m_{entrada} = m_{sortida} \quad (E.11.10)$$

11.4.2.2. Balanç de matèria per component

Les equacions de defineixen el BM per component son les següents:

$$m_{entrada,i} - m_{sortida,i} + m_{generació,i} = 0 \quad (E.11.11)$$

On el terme de generació es defineix com:

$$m_{generació,i} = v_i \cdot r \cdot M_i \quad (E.11.12)$$

On:

- **v_i** : coeficient estequiomètric de l'espècie i (negatiu si és reactiu, positiu si és producte)
- **r** : velocitat molar de reacció (**mol/h**)
- **M_i** : massa molar (**kg/mol**)

11.4.2.3. Reacció i estequiometria

Atesa la manca de dades bibliogràfiques suficients relatives als paràmetres cinètics i termodinàmics de les reaccions, s'ha optat per simular els tres reactors del procés com a reactors en continu i estequiomètrics dins de **SuperPro Designer**.

Aquesta estratègia permet simplificar la modelització del comportament reactiu, ja que el programari només requereix com a entrada els coeficients estequiomètrics, l'entalpia de reacció i els cabals màssics d'entrada. A partir d'aquests paràmetres, **SuperPro Designer** genera la simulació basant-se en la seva pròpia base de dades integrada, permetent obtenir resultats coherents per al dimensionament i anàlisi del comportament dels reactors dins el conjunt del sistema productiu.

La formulació estequiomètrica permet calcular els fluxos màssics de productes segons:

$$m_{producte} = \frac{v_{producte}}{v_{reactiu}} \cdot m_{reactiu} \quad (E.11.13)$$

On:

- **m_{producte}**: cabal màssic producte (**kg/h**)
- **v_{producte}**: coeficient estequiomètric del producte
- **v_{reactiu}**: coeficient estequiomètric del reactiu
- **m_{reactiu}**: cabal màssic reactiu (**kg/h**)

11.4.2.4. Equació de disseny

Per al disseny del reactor, es fa servir la relació clàssica:

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (E.11.14)$$

On:

- **V**: volum del reactor (**m³**)
- **Q**: cabal volumètric d'entrada (**m³/h**)
- **τ**: temps de residència (**h**)

➤ RCTA

L'equació desenvolupada que descriu el disseny d'un RCTA és la següent:

$$V = \frac{F_{ae}}{-r_a} \cdot X \quad (E.11.15)$$

Com no es tenen els valors d'**r_A** degut a la manca de dades bibliogràfiques com s'ha esmentat anteriorment, s'ha optat per utilitzar la següent equació per obtenir la conversió:

$$X = \frac{F_{ae} - F_a}{F_{ae}} \quad (E.11.16)$$

On:

- **Fae**: Cabal molar d'entrada reactiu limitant (**kmol/h**)
- **Fa**: Cabal molar de sortida reactiu limitant (**kmol/h**)

➤ **RCFP**

L'equació que descriu el disseny d'un RCFP és la següent:

$$V = Fae \cdot \int_0^X \frac{dX}{-r_A} \quad (E.11.17)$$

En aquest cas degut a la complexitat de resoldre aquesta integral sense tenir dades cinètiques suficients, s'ha optat per fer un anàlisi iteratiu amb l'ajuda del programa **Polymath 6.0**, fins a obtenir uns resultats similars als obtinguts amb **SuperPro Designer**. D'aquesta manera s'han obtingut dades aproximades de la segona reacció que ens han permès continuar amb el projecte.

El codi de Polymath, està adjuntat a la part d'Annexos.

11.4.2.5. Disseny geomètric del reactor

Un cop calculat el volum total del reactor a partir de l'(**E.11.14**), es defineix la relació **H/D** en cas dels dos reactors RCTA i **L/D** en cas del RCFP.

En el cas dels RCTA es reutilitzen les equacions anteriors (**E.11.5 – E.11.8**) ja que es torna a tractar d'un cilindre i per tant, la resolució matemàtica segueix el mateix procediment.

No obstant, per al dimensionament del reactor tubular de flux pistó (RCFP), s'ha seguit el procediment habitual basat en la geometria cilíndrica i la relació entre el volum, la llargada i el diàmetre del reactor. Un cop obtingut el volum del reactor i fixada la relació **L/D** es procedeix a calcular els paràmetres de disseny amb les equacions següents:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot L \quad (E.11.18)$$

Sabent que;

$$L = \frac{L}{D} \cdot D \quad (E.11.19)$$

Es substitueix (E.11.19) en l'expressió (E.11.18):

I com el valor de **L/D** és conegut, es pot aïllar el Diàmetre en l'equació (E.11.20):

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{L}{D} \cdot D\right) \quad (E.11.20)$$

Finalment a partir del diàmetre es calcula la llargada del RCFP:

$$L = \frac{L}{D} \cdot D \quad (E.11.21)$$

11.4.2.6. Càlcul del nombre de Reynolds:

Aquest apartat té un procediment matemàtic diferents si es tracta dels RCTA o del RCFP, ja que els RCTA contenen agitadors integrats al seu interior i per calcular els Reynolds s'han de tenir en compte.

Pel que fa els RCTA, l'equació que descriu el càlcul del nombre de Reynolds és la següent:

$$Re = \frac{\rho \cdot N \cdot \text{Dimpulsor}^2}{\mu} \quad (E.11.22)$$

On:

- **ρ**= densitat mitjana de la mescla (**kg/m³**)
- **N**= velocitat de l'agitador (**rev/s**)
- **Dimpulsor**= diàmetre que té l'impulsor de l'agitador (**m**)
- **μ**= viscositat mitjana de la mescla (**kg/m·s**)

En el cas del RCFP l'equació que descriu el càlcul del nombre de Reynolds és la següent:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (E.11.23)$$

On:

- ρ = densitat mitjana de la mescla (**kg/m³**)
- v = velocitat de la mescla (**m/s**)
- D = diàmetre del tub (**m**)
- μ = viscositat mitjana de la mescla (**kg/m·s**)

11.4.2.7. Exemple de càlcul de disseny del R-201:

1. Balanç de matèria total:

Seguint l'(**E.11.9**) i comprova que es compleix el Balanç de Matèria:

- **mentrada**= 53.068.36 **kg/h**
- **msortida**= 53044.42 **kg/h**

Diferència:

$$\Delta m = (53.068.36 - 53.044.42) \text{ kg/h} = \mathbf{23.94 \text{ kg/h}} \quad (C.11.5)$$

En els processos reals mai serà exacte numèricament l'entrada de la sortida, però en aquest cas concret, la desviació representa menys del 0.05% i s'atribueix a pèrdues negligibles o aproximacions dins dels marges de seguretat acceptables.

2. Balanç de matèria component:

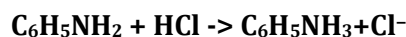
Per poder realitzar els balanços de matèria de component tal i com s'estableix en les equacions (**E.11.11**) i (**E.11.12**), seria necessari conèixer el valor de **r_j** en cada cas. Per conèixer els valors de velocitat, s'haurien de conèixer prèviament els valors de les **constants cinètiques** o com a mínim els valors de l'**energia d'activació** i el **factor preexponencial**, però com s'ha comentat anteriorment, les dades bibliogràfiques d'aquests compostos no

s'han pogut trobat. Per tant el balanç de component s'ha integrat directament en **SuperPro Designer**, al establir una simulació amb reacció estequiomètrica sense necessitat d'especificar les dades d'**rj**.

Al següent apartat queda més detallat com s'ha procedit a fer aquesta simulació.

3. Reacció i estequiometria:

En aquest cas concret, el reactor opera amb una reacció química principal de tipus estequiomètrica entre l'Àcid Clorhídric en dissolució al 37% i l'Anilina. La reacció proposada és la següent:



Aquesta reacció ha estat implementada al simulador, com a reacció irreversible estequiomètrica de primer ordre, especificant factors de conversió, percentatges de reacció i cabals màssics dels reactius.

En aquest cas:

- Reactiu limitant: **HCl**
- Reactiu en excés: **C₆H₅NH₂**

4. Equació de disseny:

- Cabal volumètric entrada: 51.12 m³/h
- Temps de residència: 8.40 min = 0.14h

$$V = 51.12 \cdot 0.14 = 7.16 \text{ m}^3 \quad (\text{C.11.6})$$

Per calcular la conversió esperada s'ha utilitzat l'(E.11.16):

$$X = \frac{1195.76 - 23.92}{1195.76} = 0.98 \sim 98\% \quad (\text{C.11.7})$$

5. Disseny geomètric del reactor:

5.1. Definició del volum requerit:

Després de realitzar els càlculs amb l'equació de disseny **(E.11.14)**, es troba un volum de RCTA de **7.15 m³**. Amb el sobredimensionament del **10%** es calcula un volum de **7.87m³**, i per seguir una coherència comercial, s'ha optat per un reactor de **7.95m³**.

5.2. Elecció de la relació geomètrica H/D:

Per garantir un disseny estable, fàcil de fabricar i compatible amb pràctiques industrials, es selecciona una relació altura/diàmetre (H/D) típica. Valors entre 1 i 3 són habituals per tancs de líquids.

$$H/D=2.5$$

5.3. Càlcul del diàmetre

Utilitzant les equacions **(E.11.5)** - **(E.11.7)**, s'obté el diàmetre següent:

$$D = \left(\frac{8 \cdot 7.95}{5 \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}} = (4.048)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{1.59 \text{ m}} \quad (\mathbf{C.11.8})$$

5.4. Càlcul de l'alçada:

Es substitueix el valor del diàmetre en **(C.11.8)**:

$$H = 2.5 \cdot 1.59 = \mathbf{3.98m} \quad (\mathbf{C.11.9})$$

6. Càlcul numero del Reynolds:

$$Re = \frac{1105.5 \cdot 2 \cdot (0.48)^2}{0.00315} = 1.6 \cdot 10^5 \quad (\mathbf{C.11.10})$$

Taula 11.10: Dimensionament del R-201:

DIMENSIONS R-201			
Volum reactor (m ³)	Alçada (m)	Diàmetre (m)	H/D
7.95	3.98	1.59	2.50

Taula 11.11: Dimensionament del R-202:

DIMENSIONS R-202			
Volum reactor (m ³)	Llargada (m)	Diàmetre (m)	L/D
118.83	72.31	1.45	50.00

Taula 11.12: Dimensionament del R-203:

DIMENSIONS R-203			
Volum reactor (m ³)	Alçada (m)	Diàmetre (m)	H/D
16.23	2.24	2.09	2.50

11.4.3. Intercanviadors de calor

Per al disseny dels intercanviadors de calor, en primer lloc s'han seleccionat aquells equips que compleixen amb els requisits tècnics i operatius establerts per a la planta de Veldon, garantint un equilibri òptim entre eficiència tèrmica i viabilitat econòmica. Els equips escollits han sigut en tots els casos Intercanviadors de **Marc i Plaques**.

11.4.3.1. Càlcul numero de plaques

Un cop realitzar el balanç d'energia i obtinguda l'àrea de bescanvi de calor, es procedeix a calcular el numero de plaques que necessitarà aquest bescanviador. Primerament es fixa l'intercanvi de calor en una única placa segons les necessitats i la viabilitat comercial, seguidament es calcula el numero de plaques amb l'equació mostrada a continuació:

$$Np = \frac{Atb}{Abp} \quad (E.11.24)$$

On:

- **Atb**= àrea total de bescanvi (**m²**)
- **Abp**= àrea de bescanvi una placa (**m²**)

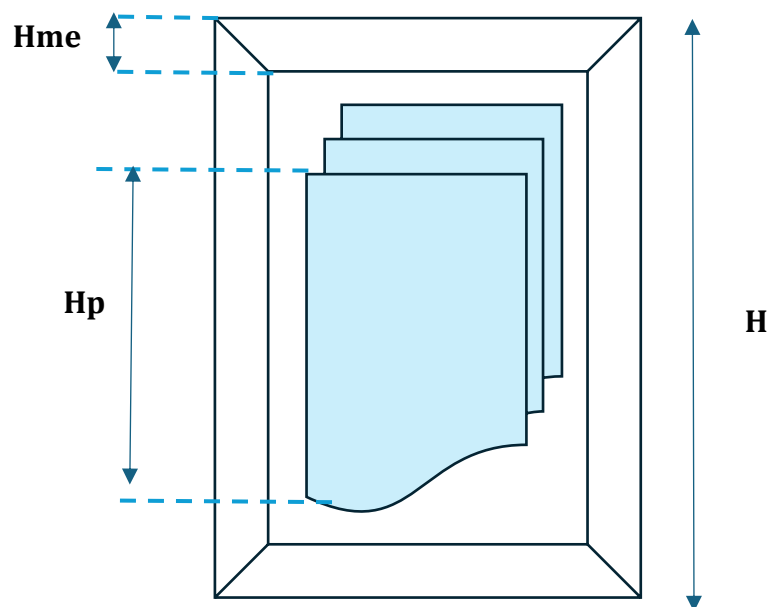
11.4.3.2. Càlcul alçada de l'equip

Per calcular l'alçada total de l'equip, s'ha de tenir en compte les mesures d'una placa, que sol ser un valor estàndard, i fixar uns valors considerables de marges i estructura. El càlcul s'esdevé amb la següent equació:

$$H = H_p + H_{me} \quad (E.11.25)$$

On:

- **H**= alçada total de l'intercanviador (**m**)
- **H_p**= alçada de les plaques (**m**)
- **H_{me}**= alçada marc i estructura (**m**)

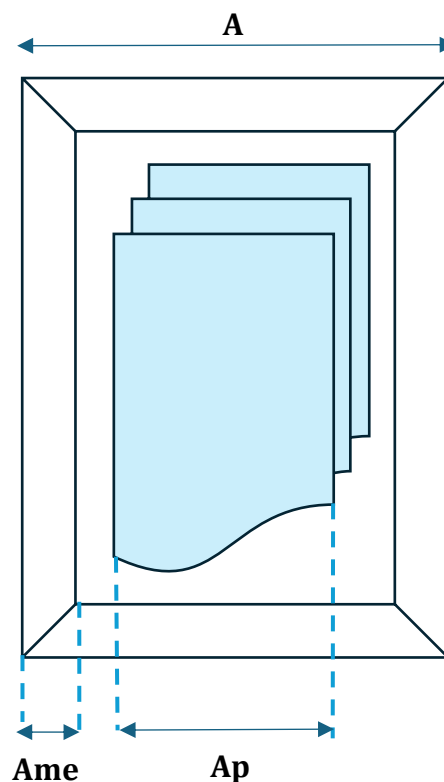


11.4.3.3. Càlcul amplada de l'equip

$$A = A_p + H_{me} \quad (E.11.26)$$

On:

- **A**= amplada total de l'intercanviador (**m**)
- **A_p**= amplada de les plaques (**m**)
- **A_{me}**= amplada marc i estructura (**m**)



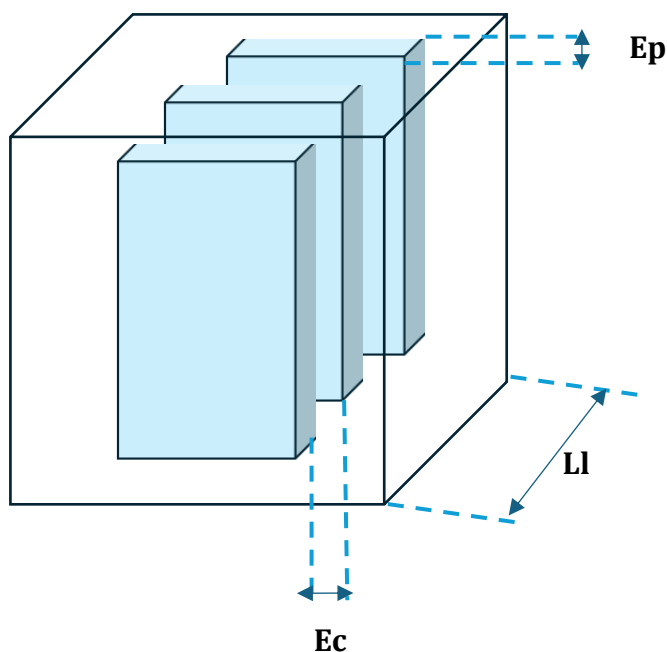
11.4.3.4. Càlcul llargada de l'equip

Per calcular la llargada total de l'equip s'han de tenir en compte diversos factors. En primer lloc la llargada que ocupa el marc i l'estructura, en segon lloc el numero de plaques que té l'equip, el gruix que té cada placa, el numero de canals i finalment el gruix de cada canal. Tots aquests requisits es demostren numèricament en l'equació següent:

$$Ll = ll_{me} + (N_p \cdot E_p) + (N_c \cdot E_c) \quad (E.11.27)$$

On:

- **Ll**= llargada total de l'intercanviador (**m**)
- **Llme**= llargada marc i estructura (**m**)
- **Np**= numero de plaques
- **Ep**=Espessor d'una placa (**m**)
- **Nc**= numero de canals
- **Ec**= espessor d'un canal (**m**)



11.4.3.5. Càlcul volum de l'equip

El càlcul del volum s'obté automàticament quan s'han trobat els valors d'H, Ll i A. Segons la següent equació:

$$V = H \cdot Ll \cdot A \quad (E.11.28)$$

On:

- **V**= volum total de l'intercanviador (**m³**)
- **H**= alçada total de l'intercanviador (**m**)
- **Ll**= llargada total de l'intercanviador (**m**)
- **A**= amplada total de l'intercanviador (**m**)

11.4.3.6. Càlcul temps de residència

Un cop calculat el volum requerit per a cada intercanviador, es procedeix a calcular el temps de residència requerit per aquest volum i amb un cabal volumètric conegut. L'equació emprada és la mencionada en l'apartat anterior **(E.11.14)**.

11.4.3.7. Exemple de càlcul

Es realitzaran tots els càlculs pertinents per l'intercanviador de calor **IC-701** aplicant totes les equacions mencionades anteriorment: **(E.11.24)** - **(E.11.28)** incloent l'**(E.11.14)** per al càlcul del temps de residència.

1. Numero de plaques:

Sabent que:

- L'àrea de bescanvi d'una placa (Abp) és **0.5m²**
- L'àrea de bescanvi total és **23.95m²**

$$Np = \frac{23.95\cancel{m^2}}{0.5\cancel{m^2}} = 47.9 \sim \mathbf{48 \text{ plaques}} \quad (\text{C.11.11})$$

2. Alçada:

Sabent que:

- L'alçada d'una placa és **1m**
- L'alçada del marc i estructura és **0.2m**

$$H = 1 + 0.2 = \mathbf{1.2m} \quad (\text{C.11.12})$$

3. Amplada:

Sabent que:

- L'amplada d'una placa és **0.5m**
- L'alçada del marc i estructura és **0.2m**

$$A = 0.5 + 0.2 = \mathbf{0.7m} \quad (\text{C.11.13})$$

4. Llargada:

Sabent que:

- La llargada de marc i estructura és **0.5m**
- El numero de plaques és 48
- L'espessor d'una placa és **0.002m ~2mm**
- El numero de canals és **Np-1**, per tant **47**
- L'espessor del canal és **0.01m ~ 1cm**

$$Ll = 0.5 + (48 \cdot 0.002) + (47 \cdot 0.01) = \mathbf{1.07m} \quad (C.11.14)$$

5. Volum del equip

Aplicant H, Ll i A trobades anteriorment:

$$V = (0.7 \cdot 1.07 \cdot 1.2)m = \mathbf{0.90 \text{ m}^3} \quad (C.11.15)$$

6. Temps de residència

$$\tau = \frac{0.90m^3}{7.902 \frac{m^3}{h}} = 0.11h \sim 6.83 \text{ min} \sim \mathbf{7 \text{ min}} \quad (C.11.16)$$

Taula 11.13: Dimensionament de l'IC-201:

DISSENY INTERCANVIADORS						
Equip	Nº plaques	Alçada (m)	Amplada (m)	Llargada (m)	Volum (m³)	Temps de residència (min)
IC-201	10	1.20	0.70	0.61	0.52	0.53

Taula 11.14: Dimensionament de l'IC-202:

DISSENY INTERCANVIADORS						
Equip	Nº plaques	Alçada (m)	Amplada (m)	Llargada (m)	Volum (m³)	Temps de residència (min)
IC-202	6	1.20	0.70	0.56	0.50	0.97

Taula 11.15: Dimensionament de l'IC-203:

DISSENY INTERCANVIADORS						
Equip	Nº plaques	Alçada (m)	Amplada (m)	Llargada (m)	Volum (m³)	Temps de residència (min)
IC-203	60	1.20	0.70	1.29	1.01	0.69

Taula 11.16: Dimensionament de l'IC-401:

DISSENY INTERCANVIADORS						
Equip	Nº plaques	Alçada (m)	Amplada (m)	Llargada (m)	Volum (m³)	Temps de residència (min)
IC-401	2	0.50	0.25	0.21	0.03	15.00

Taula 11.17: Dimensionament de l'IC-701:

DISSENY INTERCANVIADORS						
Equip	Nº plaques	Alçada (m)	Amplada (m)	Llargada (m)	Volum (m³)	Temps de residència (min)
IC-701	48	1.20	0.70	1.07	0.90	7.00

Taula 11.18: Dimensionament de l'IC-901:

DISSENY INTERCANVIADORS						
Equip	Nº plaques	Alçada (m)	Amplada (m)	Llargada (m)	Volum (m³)	Temps de residència (min)
IC-901	195	1.20	0.70	2.83	2.38	2.58

11.4.4. Cristallitzadors

11.4.4.1. Càlcul volum de l'equip

Per al disseny dels cristallitzadors primer s'ha suposat un temps de residència aproximat a les condicions operatives de l'equip. A partir del cabal volumètric d'entrada conegut i aquest temps suposat s'ha obtingut el volum útil de l'equip.

Aquest procés matemàtic es descriu a partir de l'(E.11.14).

Per seguretat i coherència operativa, s'ha optat per sobredimensionar en un **10%** la capacitat total del cristallitzador respecte al volum útil requerit. Aquesta pràctica és habitual en el disseny d'equips industrials, ja que permet compensar possibles variacions en les condicions de procés.

11.4.4.2. Disseny geomètric del cristallitzador

Un cop obtingut el volum de l'equip amb l'equació esmentada anteriorment, es fixa novament una relació **H/D** com en el cas de dos dels reactors i els tancs d'emmagatzematge.

Al ser un equip cilíndric es pot realitzar el càlcul matemàtic dels paràmetres de disseny a partir de les equacions (E.11.5 - E.11.8). Amb aquestes expressions s'obtenen el diàmetre de l'equip i l'alçada.

11.4.4.3. Exemple de càlcul

1. Càlcul del volum

Es procedeix a realitzar el càlcul del volum útil sabent que:

- El cabal volumètric d'entrada és **87.63 m³/h**
- El temps de residència fixat és de **59 min ~0.98h**

$$V = 0.98 \cancel{h} \cdot 87.63 \frac{m^3}{\cancel{h}} = 85.87 m^3 \quad (C.11.17)$$

Amb el sobredimensionament del 10% el volum és **94.5 m³ ~ 95 m³**

2. Càlcul del diàmetre

Sabent que:

- El volum de l'equip és de **95m³**
- La relació **H/D=2.5**

$$D = \left(\frac{8 \cdot V}{5 \cdot \pi}\right)^{\frac{1}{3}} = (48.38)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{3.64m} \quad (C.11.18)$$

3. Càlcul de l'alçada

Finalment, sabent que:

- La relació **H/D=2.5**
- El diàmetre obtingut és **D=3.64m**

$$H = 3.64 \cdot 2.5 = \mathbf{9.10m} \quad (C.11.19)$$

Taula 11.19: Dimensionament del cristallitzador C-301:

DISSENY CRISTALLITZADORS				
Equip	Volum (m ³)	Alçada (m)	Diàmetre intern (m)	Temps de residència (min)
C-301	95.00	9.10	3.64	59.00

Taula 11.20: Dimensionament del cristallitzador C-302:

DISSENY CRISTALLITZADORS				
Equip	Volum (m ³)	Alçada (m)	Diàmetre intern (m)	Temps de residència (min)
C-302	35.00	6.53	2.61	100.00

11.4.5. Evaporadors

Per al disseny dels evaporadors, s'ha adoptat una metodologia de càlcul coherent amb la utilitzada en altres equips de disposició vertical. No obstant això, aquest tipus d'equipament presenta una complexitat addicional derivada de la necessitat de dimensionar adequadament la disposició interna dels tubs. En aquest sentit, ha estat imprescindible considerar el balanç energètic del sistema, així com calcular l'àrea total de transferència tèrmica requerida, per tal de procedir amb el disseny detallat de la configuració interna de l'evaporador i garantir-ne tant l'eficiència operativa com la viabilitat constructiva.

11.4.5.1. Càlcul volum de l'equip

Prèviament es fixa un temps de residència coherent i amb el cabal volumètric conegut, es calcula el volum útil de l'equip. Com als casos anteriors l'equació utilitzada per aquest càlcul és la **(E.11.14)**.

A més cal tenir en compte el sobredimensionament del **10%** per seguretat i per si canviessin en algun moment les condicions d'operació establertes.

11.4.5.2. Disseny geomètric de la carcassa

La carcassa de l'evaporador es conceptualitza com un recipient de geometria cilíndrica vertical, fet que permet aplicar les equacions pròpies del disseny d'elements cilíndrics per al seu dimensionament. Així, mitjançant les expressions corresponents **(E.11.5 - E.11.8)**, s'obtenen de forma sistemàtica les dimensions principals de l'equip, concretament el diàmetre i l'alçada totals requerits, tot assegurant la coherència amb el volum útil establert i la relació geomètrica **H/D** predefinida.

11.4.5.3. Càlcul del numero de tubs

Un cop determinada l'àrea total de transferència tèrmica a partir del balanç d'energia, es procedeix al càlcul del nombre de tubs necessaris per al disseny intern de l'evaporador. En primer lloc, es calcula l'àrea de superfície d'un tub individual utilitzant les dimensions comercials predefinides (diàmetre i longitud), segons l'equació següent:

$$A_{tub} = \pi \cdot D \cdot L \quad (E.11.29)$$

On:

- **Atub**= àrea de calor transferida per un tub (**m²**)
- **D**= diàmetre intern d'un tub (**m**)
- **L**= longitud d'un tub (**m**)

Un cop obtinguda aquesta àrea, s'aplica l'equació (**E.11.30**), per determinar el nombre total de tubs requerits, mitjançant la divisió de l'àrea global de transferència per l'àrea d'un sol tub.

$$Nt = \frac{At}{Atub} \quad (\text{E.11.30})$$

On:

- **Nt**= número de tubs
- **At**= àrea de transferència de calor total (**m²**)
- **Atub**= àrea de transferència de calor d'un tub (**m²**)

11.4.5.4. Comprovació de l'àrea total

Un cop fet el disseny i dimensionament dels tubs, es comprova que l'àrea de transferència obtinguda en el balanç de d'energia coincideix amb la que haurien de complir els paràmetres de disseny del tubs. Aquesta comprovació es realitza a partir de l'equació (**E.11.31**):

$$At = N \cdot \pi \cdot D \cdot L \quad (\text{E.11.31})$$

11.4.5.5. Exemple de càlcul

Per tal de demostrar l'aplicació correcta de les equacions inherents al disseny d'un evaporador, es duu a terme un exemple de càlcul detallat emprant com a cas pràctic l'evaporador **E-301**.

1.Volum útil de l'equip

Es procedeix a realitzar el càlcul del volum útil sabent que:

- El cabal volumètric d'entrada és **57.54m³/h**
- El temps de residència fixat és de **20min ~0.336h**

$$V = 0.336h \cdot 57.54 \frac{m^3}{h} = 19.36 m^3 \quad (C.11.20)$$

Amb el sobredimensionament del **10%** el volum és **21.3m³**

2.Disseny de la carcassa

2.1. Diàmetre de la carcassa:

Sabent que:

- El volum de l'equip és de **21.3m³**
- La relació **H/D=2**

$$D = \left(\frac{2 \cdot 21.3}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} = (13.56)^{\frac{1}{3}} = 2.38m \quad (C.11.21)$$

2.2. Càlcul de l'alçada

Finalment, sabent que:

- La relació **H/D=2**
- El diàmetre obtingut és **D=2.38m**

$$H = 2.38 \cdot 2 = 4.76m \quad (C.11.22)$$

3.Disseny dels tubs

3.1. Àrea d'un tub

Sabent que:

- El diàmetre d'un tub és **0.025m³**
- La llargada d'un tub és **3m**

$$A_{tub} = \pi \cdot (0.025 \cdot 3)m = \mathbf{0.24m^2} \quad (C.11.23)$$

3.2. Número de tubs

Sabent que:

- L'àrea de transferència de calor d'un tub és **0.24m²**
- L'àrea total de transferència de calor és **32.4m²**

$$Nt = \frac{32.4}{0.24} = 135 \text{ tubs} \quad (C.11.24)$$

4.Comprovació àrea total de disseny amb l'àrea del BE

Sabent que:

- L'àrea total de transferència de calor calculada amb BE és **32.4m²**
- El número de tubs és **135**
- El diàmetre dels tubs és **0.025m**
- La longitud dels tubs és de **3m**

$$A_t = 135 \cdot \pi \cdot 0.025m \cdot 3m = \mathbf{31.8m^2} \quad (C.11.25)$$

$$\mathbf{31.8m^2 \sim 32.4m^2}$$

Taula 11.21: Dimensionament de l'evaporador E-301:

DISSENY EVAPORADORS							
Equip	Volum (m ³)	Temps de residència (min)	CARCASSA		TUBS		
			Diàmetre (m)	Alçada (m)	Diàmetre (m)	Llargada (m)	Nº de tubs
E-301	21.30	20.00	2.38	4.80	0.025	3.00	135

Taula 11. 22: Dimensionament de l'evaporador E-302:

DISSENY EVAPORADORS							
Equip	Volum (m ³)	Temps de residència (min)	CARCASSA		TUBS		
			Diàmetre (m)	Alçada (m)	Diàmetre (m)	Llargada (m)	Nº de tubs
E-302	19.32	30.00	1.92	6.70	0.025	3.00	590

11.4.6. Centrífuga

La centrífuga és un equip específic que dins del seu disseny requereix la incorporació d'equacions específiques i característiques d'aquest equip.

11.4.6.1 Càlcul volum de l'equip

Per calcular el volum útil de l'equip, es segueix la coherència anterior. Es fixa un temps de residència ajustat a les necessitats del procés de producció Veldon i a partir del cabal volumètric d'entrada es calcula el volum amb l'equació **(E.11.14)**.

11.4.6.2 Càlcul de les dimensions del tambor cilíndric

Per poder aplicar l'equació de disseny del tambor de la centrífuga, únicament s'ha de trobar l'equació volumètrica segons la geometria del cos. En aquest cas el tambor torna a ser un cilindre vertical, amb la petita diferència que en enginyeria encara que aquest tambor sigui vertical, es calcularà en funció de L (longitud) i no de H (altura), ja que està establert així per tots els **equips rotatoris**, com en aquest cas la centrífuga.

per tant es poden calcular el diàmetre i l'alçada a partir de les equacions **(E.11.18)** i **(E.11.19)**.

11.4.6.3 Càlcul GES (Força centrífuga equivalent)

La força centrífuga generada al tambor de la centrífuga és un paràmetre crític per garantir una separació sòlid-líquid eficient. Aquesta força s'expressa habitualment en forma de la

seva equivalència respecte a l'acceleració gravitatòria terrestre, donant lloc al concepte de **Força centrífuga equivalent (GES)**.

L'equació que descriu aquest paràmetre és la següent:

$$GES = \frac{\omega^2 \cdot r}{g} \quad (E.11.32)$$

On:

- ω = velocitat angular (**rad/s**)
- N = velocitat de rotació (**rpm**)
- r = radi mitjà (**m**)
- g = valor de gravetat 9.81 (**m/s²**)

11.4.6.4 Exemple de càlcul

1. Càlcul del volum del tambor

Es procedeix a realitzar el càlcul del volum útil sabent que:

- El cabal volumètric d'entrada és **31.83m³/h**
- El temps de residència fixat és de **3min ~0.05h**

$$V = 0.05 \cancel{h} \cdot 31.83 \frac{m^3}{\cancel{h}} = 1.59m^3 \quad (C.11.26)$$

Amb el sobredimensionament del **10%** el volum és **1.75m³**.

2. Càlcul diàmetre del tambor:

Sabent que:

- El volum de l'equip és de **1.75m³**
- La relació **L/D=1.7**

$$D = \left(\frac{4 \cdot 1.75}{\pi \cdot 1.7} \right)^{\frac{1}{3}} = (1.19)^{\frac{1}{3}} = 1.06m \quad (C.11.27)$$

3. Càlcul de la longitud del tambor ~alçada del cilindre

Finalment, sabent que:

- La relació $L/D=1.7$
- El diàmetre obtingut és $D=1.06m$

$$L = 1.7 \cdot 1.06 = 1.8m \quad (C.11.28)$$

1. Càlcul del GES**4.1. Ajust unitats de la velocitat angular**

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8000}{60} = 837.76 \text{ rad/s} \quad (C.11.29)$$

4.2. Càlcul del radi mitjà

$$r = \frac{D}{2} = \frac{1.06m}{2} = 0.53m \quad (C.11.30)$$

4.3. Càlcul GES:

$$GES = \frac{(837.76)^2 \cdot 0.53}{9.81} = 37920 \quad (C.11.31)$$

Taula 11. 23: Dimensionament de la centrífuga:

DISSENY CENTRÍFUGA						
Equip	Volum (m ³)	Temps de residència (min)	Diàmetre (m)	Alçada (m)	Llargada del tambor (m)	GES
CF-301	1.75	3.00	1.06	1.80	1.80	37920.00

11.4.7. Filtres

El filtre rotatori al buit és un equip destinat a la separació i rentat de sòlids cristal·litzats mitjançant una superfície filtrant en rotació contínua. El seu disseny implica el càlcul del volum útil, les dimensions geomètriques del tambor, i la superfície efectiva de filtració per garantir l'eficiència operativa del procés.

11.4.7.1. Càlcul volum de l'equip

Per calcular el volum útil del filtre, es parteix del cabal volumètric total d'entrada i del temps de residència necessari per mantenir el producte dins de l'equip. L'equació emprada és l'equació general de temps de residència **(E.11.14)**

11.4.7.2. Càlcul dimensions tambor cilíndric

Per al disseny del tambor del filtre, es considera un cilindre horitzontal. El càlcul de les seves dimensions (diàmetre i llargada) es fa mitjançant l'equació del volum del cilindre. Les equacions emprades són l'**(E.11.18)** i **(E.11.19)**.

11.4.7.3. Exemple de càlcul

1. Càlcul del volum del tambor

Es procedeix a realitzar el càlcul del volum útil sabent que:

- El cabal volumètric d'entrada és **65.82m³/h**
- El temps de residència fixat és de **29min ~0.49h**

$$V = 0.49\cancel{h} \cdot 65.82 \frac{m^3}{\cancel{h}} = 32.25m^3 \quad (C.11.32)$$

Amb el sobredimensionament del **10%** el volum és **36m³**

2. Càlcul diàmetre del tambor:

Sabent que:

- El volum de l'equip és de **36m³**
- La relació **L/D=3**

$$D = \left(\frac{4 \cdot 36}{\pi \cdot 3}\right)^{\frac{1}{3}} = (15.28)^{\frac{1}{3}} = \mathbf{2.48m} \quad (C.11.33)$$

3. Càlcul de la longitud del tambor ~alçada del cilindre

Finalment, sabent que:

- La relació **L/D=3**
- El diàmetre obtingut és **D=2.48m**

$$L = 3 \cdot 2.48 = \mathbf{7.44m} \quad (C.11.34)$$

Taula 11.24: Dimensionament del filtre FL-301:

DISSENY FILTRES				
Equip	Volum (m ³)	Temps de residència (min)	Diàmetre tambor (m)	Llargada del tambor (m)
FL-301	36.00	29.00	2.48	7.44

Taula 11. 25: Dimensionament del filtre FL-302:

DISSENY FILTRES				
Equip	Volum (m ³)	Temps de residència (min)	Diàmetre tambor (m)	Llargada del tambor (m)
FL-301	78.40	125.00	3.42	8.55

11.4.8. Assecadors

Per calcular els paràmetres de disseny dels assecadors, és segueixen exactament els mateixos plantejaments matemàtics anteriors i utilitzant les mateixes equacions. Encara que els filtres i els assecadors tinguin funcions diferents, l'estructura de disseny és pràcticament la **mateixa**.

11.4.8.1. Càlcul volum de l'equip

Per calcular el volum útil de l'assecador, es parteix del cabal volumètric total d'entrada i del temps de residència necessari per mantenir el producte dins de l'equip. L'equació emprada és l'equació general de temps de residència **(E.11.14)**

11.4.8.2. Càlcul dimensions tambor cilíndric

Per al disseny del tambor del filtre, es considera un cilindre horitzontal. El càlcul de les seves dimensions (diàmetre i llargada) es fa mitjançant l'equació del volum del cilindre. Les equacions emprades son l'**(E.11.18)** i **(E.11.19)**.

11.4.8.3. Exemple de càlcul

1. Càlcul del volum del tambor

Es procedeix a realitzar el càlcul del volum útil sabent que:

- El cabal volumètric d'entrada és **603.53m³/h**
- El temps de residència fixat és de **60min ~0.266h**

$$V = 0.266\cancel{h} \cdot 603.53 \frac{m^3}{\cancel{h}} = 161m^3 \quad (C.11.35)$$

Amb el sobredimensionament del **10%** el volum és **177m³**.

2. Càlcul diàmetre del tambor:

Sabent que:

- El volum de l'equip és de **177m³**

- La relació $L/D=3$

$$D = \left(\frac{4 \cdot 177}{\pi \cdot 3} \right)^{\frac{1}{3}} = (75.12)^{\frac{1}{3}} = 4.2m \quad (C.11.36)$$

3. Càlcul de la longitud del tambor ~alçada del cilindre

Finalment, sabent que:

- La relació $L/D=3$
- El diàmetre obtingut és $D=4.2m$

$$L = 3 \cdot 4.2 = 12.6m \quad (C.11.37)$$

Taula 11.26: Dimensionament de l'assecador A-401:

DISSENY ASSECADORS				
Equip	Volum (m³)	Temps de residència (min)	Diàmetre tambor (m)	Llargada del tambor (m)
A-401	177.00	16.00	4.20	12.60

Taula 11.27: Dimensionament de l'assecador A-402:

DISSENY ASSECADORS				
Equip	Volum (m³)	Temps de residència (min)	Diàmetre tambor (m)	Llargada del tambor (m)
A-402	291.70	7.00	4.90	14.70

11.4.9. Condensador

Per al disseny del condensador, s'han seguit els mateixos procediments matemàtics utilitzats en el dimensionament dels evaporadors, atès que ambdós són equips d'intercanvi tèrmic concebuts per optimitzar la transferència de calor.

Malgrat que la seva funció operativa difereix, és a dir un equip està destinat a la condensació i l'altre a l'evaporació, el disseny del feix tubular presenta una configuració tècnica similar.

Així mateix, ha estat fonamental incorporar el balanç energètic del sistema i determinar l'àrea total de transferència tèrmica necessària, amb l'objectiu de definir la configuració interna de l'equip i assegurar-ne tant l'eficiència operativa com la viabilitat constructiva.

11.4.9.1. Càlcul volum de l'equip

Prèviament es fixa un temps de residència coherent i amb el cabal volumètric conegut, es calcula el volum útil de l'equip. Com als casos anteriors l'equació utilitzada per aquest càlcul és la **(E.11.14)**.

A més cal tenir en compte el sobredimensionament del **10%** per seguretat i per si canviessin en algun moment les condicions d'operació establertes.

11.4.9.2. Disseny geomètric de la carcassa

Tal i com als evaporadors les dimensions del cilindre de la carcassa, s'obtenen mitjançant les expressions corresponents **(E.11.5 – E.11.8)**, que equivalen a la geometria d'un cilindre vertical. S'obtenen de forma sistemàtica les dimensions principals de l'equip, concretament el diàmetre i l'alçada totals requerits, tot assegurant la coherència amb el volum útil establert i la relació geomètrica **H/D** predefinida.

11.4.9.3. Càlcul del numero de tubs

Un cop determinada l'àrea total de transferència tèrmica a partir del balanç d'energia, es procedeix al càlcul del nombre de tubs necessaris per al disseny intern del condensador. En primer lloc, es calcula l'àrea de superfície d'un tub individual utilitzant les dimensions comercials predefinides (diàmetre i longitud), segons l'equació **(E.11.29)**.

Un cop obtinguda aquesta àrea, s'aplica l'equació **(E.11.30)**, per determinar el nombre total de tubs requerits, mitjançant la divisió de l'àrea global de transferència per l'àrea d'un sol tub.

11.4.9.4. Comprovació de l'àrea total

Un cop fet el disseny i dimensionament dels tubs, es comprova que l'àrea de transferència obtinguda en el balanç de d'energia coincideix amb la que haurien de complir els paràmetres de disseny del tubs. Aquesta comprovació es realitza a partir de l'equació **(E.11.31)**:

11.4.9.5. Exemple de càlcul

Per tal de demostrar l'aplicació correcta de les equacions inherents al disseny del condensador, es duu a terme un exemple de càlcul detallat emprant com a cas pràctic al **CN-401**:

1.Volum útil de l'equip

Es procedeix a realitzar el càlcul del volum útil sabent que:

- El cabal volumètric d'entrada és **747.16m³/h**
- El temps de residència fixat és de **7min ~ 0.11h**

$$V = 0.11\cancel{h} \cdot 747.16 \frac{m^3}{\cancel{h}} = 87.16 \text{ m}^3 \quad (C.11.38)$$

Amb el sobredimensionament del **10%** el volum és **96m³**.

2.Disseny de la carcassa

2.1. Diàmetre de la carcassa:

Sabent que:

- El volum de l'equip és de **96m³**
- La relació **H/D=2**

$$D = \left(\frac{4 \cdot 96}{\pi \cdot 2} \right)^{\frac{1}{3}} = (61.12)^{\frac{1}{3}} = 3.93m \quad (C.11.39)$$

2.2. Càlcul de l'alçada

Finalment, sabent que:

- La relació $H/D=2$
- El diàmetre obtingut és $D=3.93m$

$$H = 3.93 \cdot 2 = 7.86m \quad (C.11.40)$$

3. Disseny dels tubs

3.1. Àrea d'un tub

Sabent que:

- El diàmetre d'un tub és $0.025m$
- La llargada d'un tub és $3m$

$$A_{tub} = \pi \cdot (0.025 \cdot 3)m = 0.24m^2 \quad (C.11.41)$$

3.2. Número de tubs

Sabent que:

- L'àrea de transferència de calor d'un tub és $0.24m^2$
- L'àrea total de transferència de calor és $16.5m^2$

$$Nt = \frac{16.5}{0.24} = 68.75 \sim 69 \text{ tubs} \quad (C.11.42)$$

4. Comprovació àrea total de disseny amb l'àrea del BE

Sabent que:

- L'àrea total de transferència de calor calculada amb BE és $16.5m^2$
- El número de tubs és **69**
- El diàmetre dels tubs és $0.025m$
- La longitud dels tubs és de $3m$

$$At = 69 \cdot \pi \cdot 0.025m \cdot 3m = 16.25m^2 \quad (C.11.43)$$

$$16.25m^2 \sim 16.5m^2$$

Taula 11.28: Dimensionament del condensador

DISSENY CONDENSADOR							
Equip	Volum (m ³)	Temps de residència (min)	CARCASSA		TUBS		
			Diàmetre (m)	Alçada (m)	Diàmetre (m)	Llargada (m)	Nº de tubs
CN-401	96.00	7.00	3.93	7.86	0.025	3.00	69

11.4.10. Tancs de mescla

Els tancs de mescla considerats en aquest projecte corresponen a recipients de geometria cilíndrica amb disposició horitzontal i suportats sobre potes integrades. Aquests equips disposen d'un sistema d'agitació interna, el qual no es dimensiona específicament, ja que es tracta d'un component d'adquisició comercial adaptat a les necessitats del procés.

Donada la seva configuració geomètrica, el càlcul del volum i de les dimensions principals dels tancs es realitza seguint la mateixa metodologia establerta per a altres equips de tipus cilíndric horitzontal, aplicant les mateixes equacions geomètriques i criteris de disseny que assegurin la coherència del conjunt de la planta.

11.4.10.1. Càlcul volum de l'equip

Per calcular el volum útil els tancs de mescla, es parteix del cabal volumètric total d'entrada i del temps de residència necessari per mantenir el producte dins de l'equip. L'equació emprada és l'equació general de temps de residència **(E.11.14)**

11.4.10.2. Càlcul dimensions interior del tanc

Per al disseny dels paràmetres interns del tanc, com el diàmetre i la longitud, es procedeix a emprar les equacions **(E.11.18)** i **(E.11.19)**, típiques de la geometria cilíndrica.

11.4.10.3. Exemple de càlcul

1. Càlcul del volum del tanc

Es procedeix a realitzar el càlcul del volum útil sabent que:

- El cabal volumètric d'entrada és **59.13m³/h**
- El temps de residència fixat és de **9.22min ~0.155h**

$$V = 0.155 \cancel{h} \cdot 59.13 \frac{m^3}{\cancel{h}} = 9.16m^3 \quad (C.11.44)$$

Amb el sobredimensionament del **10%** el volum és **10m³**.

2. Càlcul diàmetre del tambor:

Sabent que:

- El volum de l'equip és de **10m³**
- La relació **L/D=3**

$$D = \left(\frac{4 \cdot 10}{\pi \cdot 3} \right)^{\frac{1}{3}} = (4.24)^{\frac{1}{3}} = 1.62m \quad (C.11.45)$$

3. Càlcul de la longitud del tambor ~alçada del cilindre

Finalment, sabent que:

- La relació **L/D=3**
- El diàmetre obtingut és **D=1.62m**

$$L = 3 \cdot 1.62 = 4.85m \quad (C.11.46)$$

Taula 11.29: Dimensionament del tanc de mescla TM-201:

DISSENY TANC DE MESCLA				
Equip	Volum (m ³)	Temps de residència (min)	Diàmetre tambor (m)	Llargada del tambor (m)
TM-201	10.00	9.09	1.62	4.85

Taula 11.30: Dimensionament del tanc de mescla TM-701:

DISSENY TANC DE MESCLA				
Equip	Volum (m ³)	Temps de residència (min)	Diàmetre tambor (m)	Llargada del tambor (m)
TM-201	14.20	9.28	1.82	5.46

11.4.11. Torre de destil·lació

En aquest equip, el disseny s'ha realitzat amb geometria cilíndrica vertical i criteris habituals de càlcul per a columnes de separació.

11.4.11.1. Càlcul volum de l'equip

Per al disseny de la torre primerament s'ha suposat un temps de residència aproximat a les condicions operatives de l'equip. A partir del cabal volumètric d'entrada conegut i aquest temps suposat s'ha obtingut el volum útil de l'equip.

Aquest procés matemàtic es descriu a partir de l'(E.11.14).

Per seguretat i coherència operativa, s'ha optat per sobredimensionar en un **10%**.

11.4.11.2. Disseny geomètric de la torre de destil·lació

Un cop obtingut el volum de l'equip amb l'equació esmentada anteriorment, es fixa novament una relació **H/D** com en els casos anteriors.

Al ser un equip cilíndric es pot realitzar el càlcul matemàtic dels paràmetres de disseny a partir de les equacions **(E.11.5 – E.11.8)**. Amb aquestes expressions s'obtenen el diàmetre de l'equip i l'alçada.

11.4.4.3. Exemple de càlcul

1. Càlcul del volum

Es procedeix a realitzar el càlcul del volum útil sabent que:

- El cabal volumètric d'entrada és **42.01m³/h**
- El temps de residència fixat és de **31 min ~0.52h**

$$V = 0.52 \cancel{h} \cdot 42.01 \frac{m^3}{\cancel{h}} = 21.84 m^3 \quad (C.11.47)$$

Amb el sobredimensionament del 10% el volum és **24.02m³ ~ 24m³**

2. Càlcul del diàmetre

Sabent que:

- El volum de l'equip és de **24m³**
- La relació **H/D=4**

$$D = \left(\frac{8 \cdot V}{4 \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}} = (1.28)^{\frac{1}{3}} = 2.48m \quad (C.11.48)$$

3. Càlcul de l'alçada

Finalment, sabent que:

- La relació **H/D=4**
- El diàmetre obtingut és **D=2.48m**

$$H = 2.48 \cdot 4 = 9.92m \quad (C.11.49)$$

Taula 11.31: Dimensionament de la torre de destil·lació

DISSENY TORRE DESTIL·LACIÓ				
Equip	Volum (m ³)	Alçada (m)	Diàmetre (m)	Temps de residència (min)
TD-701	24.00	9.92	2.48	31

11.4.12. Compressors

Els compressors utilitzats en el procés no han estat objecte de disseny específic dins aquest projecte, ja que es tracta d'equips altament estandarditzats i disponibles al mercat en un ampli rang de capacitats, materials i condicions d'operació.

A nivell industrial, els fabricants especialitzats ofereixen compressors adaptats a pràcticament qualsevol necessitat de pressió, cabal i tipus de gas, complint amb normatives internacionals i amb garanties de seguretat i eficiència energètica. Per aquest motiu, la selecció d'aquests equips es realitza mitjançant especificacions tècniques proporcionades al proveïdor, sense necessitat de procedir a un càlcul detallat de disseny mecànic o termodinàmic dins del marc del projecte.

11.4.13. Calderes

Les calderes de generació de vapor s'han considerat com a equips comercials subministrats per fabricants especialitzats, amb disseny intern ja optimitzat segons els criteris d'eficiència energètica, pressió de servei i compatibilitat amb el fluid utilitzat. El disseny tèrmic i estructural d'aquests equips inclou components sotmesos a normativa estricta (ASME, PED, etc.), i per tant no es realitza un càlcul detallat dins el projecte d'enginyeria bàsic. En conseqüència, la selecció de la caldera es limita a la definició de les condicions d'operació (pressió, temperatura, cabal de vapor) i a la seva integració en el sistema, deixant el dimensionat final en mans del fabricant.

11.4.14. Torre de refrigeració

La torre de refrigeració, com a element de dissipació de calor en el sistema, no s'ha dissenyat específicament dins el present projecte, ja que es tracta d'un equip modular i estandarditzat, altament comercialitzat per fabricants del sector. Aquest tipus d'equip es configura habitualment en funció de paràmetres operatius com ara el cabal d'aigua, el salt tèrmic i les condicions ambientals, sense requerir càlculs complexos de disseny per part de l'empresa d'enginyeria. Així doncs, s'ha optat per definir els requisits de servei i condicions d'entrada i sortida, mentre que el dimensionat i l'elecció del model concret es deixen en mans del proveïdor tecnològic.

11.5. Bombes

11.5.1. Càlculs generals

El càlcul de la potència requerida de les bombes es fa a partir de la seva ubicació als trams analitzats, utilitzant el balanç d'energia mecànica per determinar l'energia necessària per impulsar el fluid.

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + g \cdot (z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{\alpha} \right) = w - e_v \quad (E.11.33)$$

On:

- **P**: Pressió del fluid (**bar**)
- **ρ**: densitat del fluid (**kg/m³**)
- **g**: gravetat (**9,81m/s²**)
- **v**: velocitat del fluid (**m/s**)
- **w**: potència requerida (**m**)
- **e_v**: pèrdues de càrrega (**m²/s²**)

Pel càlcul de la diferència de pressions degut al cas en que en el sistema es treballa pràcticament en tots els casos a pressió atmosfèrica, aquest apartat gairebé ha sigut omès excepte on els evaporadors juguen un paper.

Sabent totes les dades d'alçada i velocitat, s'enfoca en calcular les pèrdues de càrrega de cada tram. Seguint les següents equacions, on la **(E.11.34)** tracta sobre els accidents en el tram estudiats i la **(E.11.35)** sobre la fricció produïda entre el fluid i la canonada.

$$e_{vacc} = k \cdot \frac{v^2}{2} \quad (E.11.34)$$

$$e_{vtram} = 4f \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \frac{L}{D} \quad (E.11.35)$$

On:

- **K**: coeficient que varia en funció de l'accident.
- **f**: factor de fricció de Fanning.
- **L**: llargada de la canonada (**m**)
- **D**: diàmetre de la canonada (**m**)

Els valors de K són teòrics, excepte per les reduccions de diàmetre.

Taula adaptada de Perry, Manual del Ingeniero Químico

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

Figura 11.1: Valors teòrics de k adaptada de Perry.

$$k = 1 - \frac{D_{\text{petit}}^2}{D_{\text{gran}}^2} \quad (\text{E.11.36})$$

Per a determinar el factor de fricció de Fanning s'utilitzarà la figura 11.2, on es pot trobar el valor de $4f$ en funció del Reynolds que s'ha calculat per a la canonada i la seva rugositat relativa.

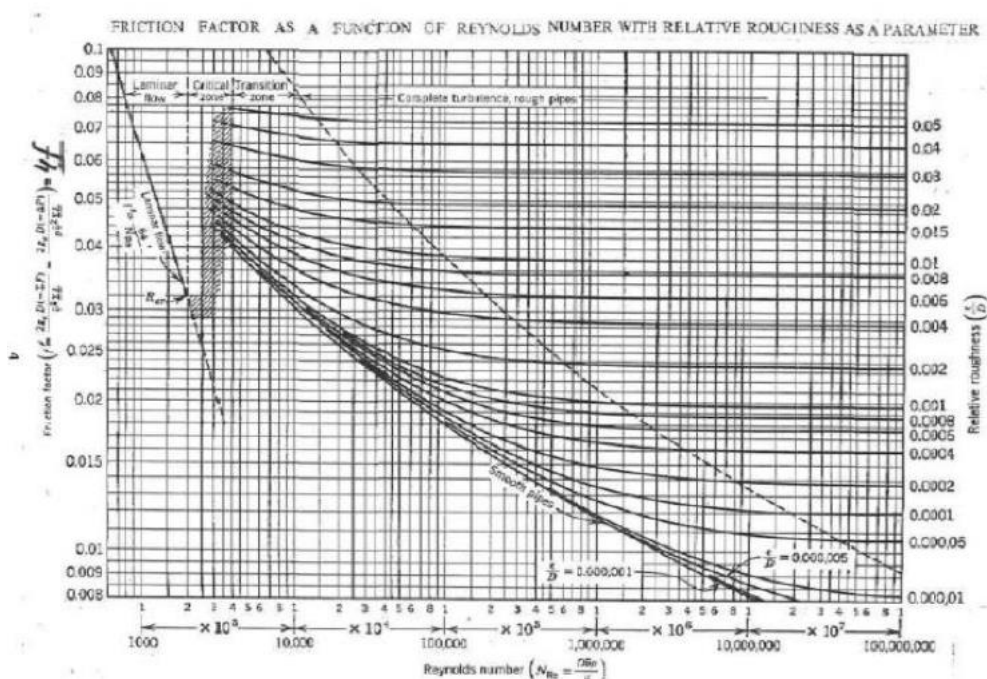


Figura 11.2: Gràfic del factor de Fanning en funció del valor de Reynolds

Mentre que la rugositat relativa és la relació entre la porositat del material i el diàmetre de la canonada.

$$\text{rugositat relativa: } \frac{\varepsilon}{D} \quad (\text{E.11.37})$$

On:

- ε : rugositat (m)
- D : diàmetre intern de la canonada (m)

El número de Reynolds a partir d'un valor superior a 2100 es considera de règim turbulent, per calcular aquest valor es fa amb la següent equació:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (E.11.38)$$

On:

- μ : viscositat (**kg/m·s**)
- ρ : densitat del fluid (**kg/m³**)
- v : velocitat del fluid (**m/s**)
- D : diàmetre intern de la canonada (**m**)

Una vegada obtinguts els valors de pèrdues de càrregues, i substituint els altres valors trobats, és possible calcular la potència requerida de la bomba amb l'equació (E.11.32).

Un cop obtinguda la potència total, es procedeix a multiplicar-la pel cabal volumètric, la densitat i la gravetat per a obtenir la potència en Watts. La potència que s'obté es dividirà entre el rendiment de la bomba, que ha estat suposat com un **75%**, així doncs obtenim la potència real.

$$W_{real} = \frac{W}{0.75} \quad (E.11.39)$$

11.5.1. Exemple de càlcul

S'adjunten dades del tram que es calcularà (**C-301 a E-301**):

Taula 32: Dades del tram de C-301 a E-301

	Aspiració	Impulsió
P (bar)	1.013	1.013
ρ (kg/m³)	1109.810	1109.810
Z (m)	0.000	4.420
v (m/s)	0.904	2.035
α	1.000	1.000
Dext (m)	0.125	0.100
L (m)	1.000	2.000
μ (kg/m·s)	0.0017	0.0017

Amb aquestes dades es procedeix a calcular Reynolds:

$$Re_{asp} = \frac{1109.81 \cdot 0.901 \cdot 0.103}{0.0017} = 88573.241 \quad (C.11.50)$$

$$Re_{imp} = \frac{1109.81 \cdot 2.034 \cdot 0.092}{0.0017} = 132859.900 \quad (C.11.51)$$

Una vegada es calculen els Reynolds, es calcula la rugositat relativa per tal d'obtenir mitjançant la figura 11.2 el valor de 4f.

$$\text{rugositat relativa aspiració: } \frac{4.6 \cdot 10^{-5}}{0.103} = 3.5 \cdot 10^{-4} \quad (C.11.52)$$

$$\text{rugositat relativa impulsió: } \frac{4.6 \cdot 10^{-5}}{0.092} = 5.0 \cdot 10^{-4} \quad (C.11.53)$$

Amb aquests valors s'obté el valor de 4f, que serà de 0.020 per la part d'aspiració i 0.019 per la part d'impulsió.

Així doncs, es poden calcular les pèrdues de càrrega de cada tram.

$$e_{vacc \text{ aspiració}} = 2.078 \cdot \frac{0.904^2}{2} = 0.850 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (C.11.54)$$

$$e_{vtram \text{ aspiració}} = 0.020 \cdot \frac{0.904^2}{2} \cdot \frac{1.000}{0.103} = 0.054 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (C.11.55)$$

$$e_{vacc \text{ impulsió}} = 2.209 \cdot \frac{2.035^2}{2} = 4.576 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (C.11.56)$$

$$e_{vtram \text{ impulsió}} = 0.019 \cdot \frac{2.035^2}{2} \cdot \frac{2.000}{0.092} = 0.814 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (C.11.57)$$

$$e_{total \text{ aspiració}} = 0.904 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (C.11.58)$$

$$e_{total \text{ impulsió}} = 5.389 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (C.11.59)$$

Amb les pèrdues de càrrega calculades de cada tram, es torna a l'equació (E.11.33), s'aïlla la w, es sumen les pèrdues de càrrega del tram d'aspiració i d'impulsió i així es troba la potència requerida de la bomba.

$$w = 9.81 \cdot (4.416 - 0) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2.035^2 - 0.904^2}{1} \right) + 0.904 + 5.389 = 44.983 \text{ J/Kg} \quad (C.11.60)$$

Multiplicant aquest valor per el caudal, la densitat i dividit per mil, s'obté el valor en kW, que en aquest cas, la bomba 301 té una potencia requerida de **0,798kW**.

Finalment per obtenir la potencia real s'assigna un rendiment del 75%, per tant:

$$W_{real} = \frac{0.798}{0.75} = 1.064 \text{ kW} \quad (C.11.61)$$

11.6. Canonades

11.6.1 Disseny canonades

El disseny d'una canonada consisteix en determinar principalment el diàmetre nominal, l'Schedule i el gruix d'aïllant en el cas que sigui necessari.

Primerament es calcula el diàmetre nominal a partir de l'Equació (E.11.40), amb els paràmetres de cabal obtinguts amb el programa de simulació i les velocitats típiques establertes en el **Capítol 4**.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} \quad (E.11.40)$$

Càlcul del diàmetre intern de la canonada

On:

- **v**= la velocitat de circulació del fluid (**m/s**).
- **Q**= és el cabal volumètric que circula (**m³/s**).
- **D**= és el diàmetre intern de la canonada (**mm**).

Una vegada s'obté el diàmetre intern, s'ha de determinar el diàmetre nominal i el Schedule. Tant el diàmetre nominal com el **Schedule** són paràmetres estandarditzats per a les canonades d'acer inoxidable com s'ha determinat al mateix **Capítol 4**.

Seguidament, es determina la pressió màxima que pot resistir una canonada mitjançant la següent fórmula. L'equació de **Barlow** permet conèixer la pressió que pot resistir una canonada en funció del seu gruix i diàmetre.

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot t}{D - t} \quad (E.11.41)$$

Pressió màxima permesa

On:

- **P**= la pressió màxima permesa (**bars**).
- **S**= l'esforç admissible del material (**MPa**). Per l'acer inoxidable 316L és de 137,9 MPa.
- **t**= el gruix de la canonada (**mm**).
- **D**= el diàmetre extern de la canonada (**mm**).

Per les canonades que requereixen d'aïllant, el seu gruix s'ha establert a través de l'Equació **(E.11.42)**.

$$d = \frac{D}{2} \cdot \left[\exp \left(\frac{\lambda}{\lambda_{ref}} \cdot \ln \left(\frac{D + 2 \cdot d_{ref}}{D} \right) - 1 \right) \right] \quad (E.11.42)$$

On:

- **d**= gruix mínim que ha de tenir l'aïllant (**mm**).
- **d_{ref}**=gruix mínim de referència de l'aïllant (**mm**).
- **D**= diàmetre intern de la canonada (**mm**).
- **λ**= conductivitat tèrmica de l'aïllant a la temperatura de treball (**W/m·K**).

16.7 Annexos

16.7.1 Validació amb SuperPro Designer

Com s'ha esmentat al llarg del present manual de càlcul, totes les equacions utilitzades i els càlculs desenvolupats han estat verificats mitjançant el programari **SuperPro Designer**. Aquesta eina ha permès contrastar els resultats obtinguts manualment amb una simulació de procés a escala industrial, assegurant així la coherència interna i la fiabilitat de les dades presentades. S'adjunten en aquest apartat diverses captures de pantalla del programari per evidenciar la viabilitat tècnica del procés dissenyat i la seva integració dins del Treball de Fi de Grau.

Reactants

	Component	Molar Coeff.	MW	Mass Coeff.
1	Aniline Hydroch	2.0000	129.500	259.0000
2	Formaldehyde	1.0000	30.026	30.0260

Total Mass

289.0260

Products

	Component	Molar Coeff.	MW	Mass Coeff.
1	Methulenedianil	1.0000	271.000	271.0000
2	Water	1.0000	18.015	18.0150

Total Mass

289.0150

Heating Specification

☒ Set Exit Temperature 40.00 °C

☐ Set Heating Duty 459428.01 kcal/h

Heating Agent

Name Steam

Inlet Temp. 152.00 °C

Outlet Temp. 152.00 °C

Rate 912.12 kg/h

Heat Transfer Coeff. 1500.00 Watt/m²-K

Heat Transfer Effic. 100.00 %

Description

Name IC- 202

Type Heat Exchanger

Number of Units 1

Max Heat Transfer Area 100.000 m²

Heat Transfer Area 2.983 m²

Exchanger Type (for Costing)

☒ Plate & Frame

☐ Spiral

☐ Shell & Tube

Figures 11.5 i 11.6: Balanç d'energia del IC-202

Volume 14.20 m³

Max Allowable Working/Vessel Volume 90.00 %

Length / Diameter 3.000

Length 5.459 m

Diameter 1.820 m

ASME Vessel ☒

Figura 11.7: Dimensions del tanc de mescla TM-701

16.7.2. Aplicació de Polymath 6.0 en la resolució del RCFP

A continuació es presenta el codi emprat en el programa **Polymath 6.0**, utilitzat per a la resolució numèrica del Reactor de Conversió de Fase Parcial (RCFP), identificat com a **R-202**.

Aquest programari ha servit per efectuar les iteracions necessàries per a l'ajust de les variables de disseny, així com per generar gràfiques representatives de la conversió i la temperatura en funció de la longitud del reactor, entre altres paràmetres rellevants per al dimensionament i l'anàlisi del comportament del sistema.

Codi:

```
d(X)/d(L) = -va * ra * S / Fae # Equació de disseny #m^-1
X(0) = 0
L(0) = 0
L(f) = 500 # m
d(T)/d(L) = (J * ((-va * ra * S) / Fae) + (U * (Tf - T) * As)) / sumFCpi # Balanç d'Energia K/m
S = (3.1416/4) * D ^ 2 # m^2 Àrea de secció transversal
D = sqrt(4 * V / (3.1416 * 500)) # valor fixe m (arrel quadrada de 4*Volum reactor en m^3 / pi*L)
V = 83.88 # m3
J = -((AHr * Fae) / sumFCpi) # nko*AHr constant/muA*sumCpi valor constant
As = 3.1416 * D # m Àrea d'intercanvi de calor
T(0) = 308 # K Ve del reactor 1 a aquesta T
ra = -(k * Ca) # kmol/m^3*h
Ca = Cae * (1 - X) # kmol/m^3
Cae = 2.37 # kmol/m^3
Fae = 99.48 # kmol/h
sumFCpi = 1090.21 # Kj/Kmol*K
ACp = -205.3 # Kj/Kmol*K
AHr = -133200 # Kj/Kmol l'hem trobat a una web
va = 1
U = 1080 # Kj/h-m^2*K #Perry's o apunts TDC
k = 10 # h^-1
d(Tf)/d(L) = (U * (Tf - T) * As) / (-mf * Cpf) # Balanç intercanviador en paral·lel K/m
Tf(0) = 304
mf = 50 # Kmol/h #cabal refrigerant
Cpf = 75.3 # Kj/Kmol*K
rate = -ra
LdivD = L / D
```