

Treball de Fi de Grau

## Grau en Enginyeria Química

# Disseny dels equips d'una planta de reciclatge de PVC per dissolució

## MEMÒRIA

**Autors:** Tatiana Cruz Aguiló  
Nil Lobato Albiol  
**Director:** Alfonso Rodríguez Galán  
**Convocatòria:** Gener 2018



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## RESUM

---

Avui en dia els plàstics estan substituint materials com els metalls, el vidre, la fusta o la llana, fent-los indispensables per a la vida quotidiana. La diversitat d'aquests dificulta molt el seu reciclatge ja sigui pel cost o per la identificació del plàstic. A més, la majoria dels plàstics no son biodegradables amb la qual cosa afectaran al medi ambient si aquests no són reciclats de manera correcta.

El present projecte consisteix en dissenyar una planta de reciclatge de cicle tancat de policlorur de vinil, d'ara en endavant PVC, mitjançant un procés anomenat Vinyloop en el qual el dissolvent emprat per dissoldre el PVC es reutilitzable.

La selecció dels equips del procés consisteix d'una banda en el disseny dels diferents reactors que es necessiten a la planta per tal de reciclar un volum concret de PVC, on inicialment s'han caracteritzat i posteriorment s'han dissenyat de forma tridimensional i bidimensional mitjançant el programa SolidWorks, i d'altra banda en la selecció per catàleg dels altres equips mitjançant una primera selecció i una decisió final mitjançant una matriu de filtratge amb els paràmetres més importants.

S'ha estructurat el projecte de manera que a part d'explicar el procés Vinyloop, centrat únicament amb el PVC, també s'han citat de manera general els diferents tipus de reciclatge que existeixen. A més a més també s'han descrit les diferents tècniques de separació de plàstics que permetran assegurar que tot el material que es processa a la planta Vinyloop sigui PVC.

Finalment s'ha realitzat una avaluació econòmica sobre el cost de la realització d'aquest projecte i un estudi del impacte mediambiental que ocasionaria la planta.

Durant el desenvolupament del projecte, s'ha anat realitzant un annex on es detallen característiques generals dels polímers, la seva classificació segons diferents aspectes, així com els processos d'obtenció d'aquets, totes les vistes dels diferents equips dissenyats a partir del programa SolidWorks i les fitxes de seguretat química de les substàncies que intervenen a la planta.





## SUMARI

---

RESUM.....	3
GLOSSARI .....	8
1. PERFACI .....	10
1.1. Origen .....	10
1.2. Motivació del projecte.....	10
1.3. Abast del projecte.....	11
2. OBJECTIUS.....	12
2.1. Objectius generals.....	12
2.2. Objectius particulars .....	12
3. INTRODUCCIÓ.....	13
3.1. El PVC.....	13
3.2. Mètode d'obtenció .....	13
3.2.1. Craqueig tèrmic i catalític del petroli .....	14
3.2.2. Craqueig tèrmic .....	14
3.2.3. Craqueig catalític .....	15
3.2.4. Extracció de NaCl de l'aigua de mar .....	16
3.2.5. Descomposició electrolítica via aquosa del NaCl.....	17
3.2.6. Halogenació de l'etilè.....	19
3.2.7. Formació del clorur de vinil .....	19
3.2.8. Polimerització .....	20
3.3. Característiques i propietats fisicoquímiques del material.....	20
3.4. Aplicacions del PVC .....	21
3.5. Indústria i mercat del PVC.....	21
4. RECICLATGE DE POLÍMERS .....	23
4.1. Tipus de reciclatge .....	25
4.1.1. Reciclatge mecànic.....	25
4.1.2. Reciclatge químic .....	26
4.1.3. Reciclatge energètic .....	29
4.1.4. Procés Vinyloop.....	29
4.2. Tècniques de separació i identificació de les diferents famílies de plàstics.....	29
4.2.1. Separació manual.....	30
4.2.2. Mètode de flotació .....	30
4.2.3. Separació basada en utilització de dissolvents .....	31
4.2.4. Tècniques espectroscòpiques.....	32
4.2.5. Tècniques electrostàtiques .....	36
4.2.6. Utilització de marcadors químics .....	36



4.2.7.	Tècniques basades en la incorporació de codis.....	37
5.	EL PROCÉS VINYLOOP .....	38
5.1.	Història.....	38
5.2.	Descripció del procés .....	38
6.	DIMENSIONAT I SELECCIÓ DELS EQUIPS DEL PROCÉS .....	43
6.1.	Trituradora.....	43
6.1.1.	Trituradora de mandíbula.....	43
6.1.2.	Trituradora d'un eix.....	45
6.1.3.	Comparativa i selecció de la trituradora .....	46
6.2.	Reactor de dissolució .....	48
6.2.1.	Selecció del material.....	48
6.2.2.	Dimensionat.....	50
6.2.3.	Parts del reactor de dissolució .....	59
6.3.	Filtre .....	61
6.4.	Reactor de precipitació.....	62
6.4.1.	Selecció del material.....	62
6.4.2.	Dimensionat.....	62
6.4.3.	Parts del reactor de precipitació.....	67
6.5.	Assecador o centrifugadora.....	68
6.5.1.	Model 1: AC1500.....	68
6.5.2.	Model 2: SC o RC120VxDEC .....	69
6.5.3.	Comparativa i selecció de la centrifugadora.....	70
6.6.	Decantador.....	71
6.6.1.	Selecció del material.....	71
6.6.2.	Dimensionat.....	71
6.6.3.	Parts del decantador.....	76
7.	DISSENY 3D I PLÀNOLS DELS EQUIPS DIMENSIONATS .....	78
7.1.	Reactor de dissolució .....	78
7.1.1.	Disseny en 3D .....	78
7.1.2.	Plànols del disseny .....	79
7.2.	Reactor de precipitació .....	82
7.2.1.	Disseny en 3D .....	82
7.2.2.	Plànols del disseny .....	83
7.3.	Decantador.....	86
7.3.1.	Disseny en 3D .....	86
7.3.2.	Plànols del disseny .....	87
8.	ESTUDI ECONÒMIC DE LA REALITZACIÓ DEL PROJECTE .....	89
8.1.	Costos personal.....	89



8.2.	Costos Software i hardware.....	89
8.3.	Costos materials fungibles.....	90
8.4.	Cost Total.....	91
9.	ESTUDI DE L'IMPACTE AMBIENTAL DE LA PLANTA .....	92
10.	PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE.....	94
11.	CONCLUSIONS.....	95
12.	AGRAÏMENTS .....	97
13.	BIBLIOGRAFIA .....	98
	ANNEXES .....	100



**GLOSSARI**

<b>Símbol</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unitats</b>
a	Alçada dels casquets	m
D	Diàmetre de la part cilíndrica del reactor	m
E	Eficàcia de la soldadura	-
Factor A	Factor A	-
Factor B o B	Factor B	ksi
h	Alçada de la part cilíndrica del reactor	m
$h_{TOTAL}$	Alçada total que ocupa el líquid a l'interior del reactor	m
L	Distància entre anells de reforç	m
nº anells	Numero d'anells de reforç del reactor	-
OD	Diàmetre exterior del reactor	M
P	Pressió interna de disseny	MPa
Pa	Màxima pressió admissible pel reactor	MPa
$P_{imax}$	Pressió interna màxima	MPa
r	Radi dels casquets	m
$R_i$	Radi intern	m
S	Tensió admissible	MPa
t	Gruix de les parets	mm
$t_{casquet}$	Gruix dels casquets	mm
$t_{casquet}$	Gruix total dels casquets	mm
$t_{cilindre}$	Gruix de la paret de la part cilíndrica	mm
$t_{Tcilindre}$	Gruix total de la paret de la part cilíndrica	mm
$V_B$	Volum de la barreja a l'entrada del reactor	$m^3$
$V_{BS}$	Volum barreja més el del solvent	$m^3$
$V_{cilindre}$	Volum del cilindre	$m^3$
$V_{cúpula}$	Volum de casquet	$m^3$
$V_D$	Volum decantador inicial	$m^3$





$V_{\text{restant de líquid}}$	Volum que ocupa el líquid a la part cilíndrica del reactor	$m^3$
$V_S$	Volum total solvent	$m^3$
$V_{TD}$	Volum total del decantador	$m^3$
$V_{TR}$	Volum total del reactor	$m^3$
$\gamma_s$	Coefficient de seguretat	-
$\sigma_{\text{admissible}}$	Tensió màxima admissible	MPa
$\sigma_e$	Tensió de límit elàstic	MPa
$\sigma_{eq}$	Tensió equivalent	MPa



## 1. PERFACI

---

### 1.1. Origen

La font principal del projecte ve donada com a conseqüència de l'evolució de la indústria del PVC en els darrers anys, sent un dels plàstics de major consum, és per això que s'urgeix l'interès de crear un procés de reciclatge eficient per a aquest plàstic. Actualment la quantitat de residus plàstics és tan elevada que l'objectiu és minimitzar el volum i pes dels residus per a resoldre el problema global dels mateixos tenint en compte l'alta resistència d'aquets a la degradació.

Avui dia, existeix un mercat d'empreses de reciclatge monopolitzat per grans companyies, sent una de les més importants a nivell europeu VinyLoop Ferrara SpA, situada el nord d'Itàlia a la ciutat de Ferrara. La seva importància rau en que aquesta empresa realitza el reciclatge de residus de PVC mitjançant un procés innovador que implica la seva dissolució i la posterior separació d'altres plàstics contaminants no dissolts. En el procés és clau la utilització d'un dissolvent orgànic recuperat pràcticament en la seva totalitat a partir d'un circuit tancat.

Aquest mètode és molt important ja que a part d'obtenir PVC reciclat pràcticament amb la mateixa qualitat que un de completament verge, utilitza un procés poc contaminant al medi ambient. Per aquests motius, el disseny i implementació d'aquest procés a petita escala pot ser de gran interès per a la societat.

### 1.2. Motivació del projecte

Actualment, la reutilització així com el reciclatge de plàstics és un tema de gran interès per la societat. Per aquesta raó la creació de processos de reciclatge a petita escala esdevé molt important per tal d'aconseguir un menor impacte ambiental. Així doncs dissenyar nous mètodes de reciclatge de plàstics a petita escala esdevé molt important.

La realització d'aquest projecte és una bona oportunitat per a profunditzar en aquelles assignatures que ens han cridat més l'atenció al llarg del grau i poder donar-hi una aplicació real.

Després d'haver cursat l'assignatura de reciclatge de plàstics s'ha pensat que es una bona oportunitat per aplicar els coneixements d'aquesta amb els obtinguts amb d'altres com serien; expressió gràfica, materials, tecnologia del medi ambient i sostenibilitat, cinètica i reactors, operacions bàsiques o química industrial, per tal de poder dissenyar un bon procés.



### 1.3. Abast del projecte

A la introducció del present projecte es descriu el procés d'obtenció del PVC des del cru fins al producte final, algunes de les seves característiques més importants així com les principals aplicacions. També es fa especial èmfasi en descriure i comparar els principals mètodes de reciclatge de PVC posant especial interès en el procés VinyLoop.

El cos del projecte abasta el disseny d'una instal·lació de reciclatge de PVC centrada en el procés VinyLoop, fent especial atenció a cadascun dels equips que componen el procés ja sigui dissenyant els equips amb les mesures i capacitats corresponents per un cert volum de PVC o fent una recerca de dispositius ja dissenyats y que es poden adaptar a la perfecció al disseny de la planta per les prestacions que proporcionen.

Un cop dissenyats els equips per a la planta, el projecte presenta una segona part de realització dels equips en tres dimensions així com els plànols corresponents amb l'ajuda del programa SolidWorks.

Finalment es realitza un estudi econòmic tenint en compte els costos de la realització del projecte, així com la realització d'un estudi que determini l'impacte ambiental que ocasionaria la posada en marxa de la planta de reciclatge en el cas que fos construïda.



## **2. OBJECTIUS**

---

### **2.1. Objectius generals**

L'objectiu general d'aquest treball és dissenyar i seleccionar els equips necessaris per a la construcció d'una planta de reciclatge de PVC seguint el procés Vinyloop per tal que el sistema sigui capaç de reciclar 1,5 tones de PVC diàries.

### **2.2. Objectius particulars**

Amb la finalitat d'arribar a l'objectiu final, a continuació es presenten alguns dels objectius que s'han d'assolir per tal de poder arribar a l'objectiu principal.

- Estudi i recerca d'informació de les diferents subunitats que componen el procés.
- Definir les condicions d'operació per a cada subunitat del sistema.
- Dimensionar els equips del procés.
- Dissenyar en 3D els equips del procés.
- Elaborar els plànols en 2D.
- Determinar la viscositat de la solució a les condicions d'operació.
- Establir el cost econòmic del projecte així com la seva viabilitat econòmica.
- Analitzar l'impacte ambiental del projecte.



### 3. INTRODUCCIÓ

#### 3.1. El PVC

El PVC és un termoplàstic, a l'annex A es pot trobar una descripció detallada dels diferents tipus de polímers i de les seves classificacions, compost per la combinació química de carboni, hidrogen i clor, els components dels quals provenen del petroli i de la sal.

Les excepcionals propietats del PVC juntament amb la seva gran versatilitat fan que sigui un dels plàstics de major consum avui dia a Espanya, a més, segons el Centre d'Ecologia i Toxicologia de la Indústria Química Europea (ECETOC) la producció de PVC no comporta un risc pel medi ambient. La diversitat de formulacions possibles que existeixen permeten doncs que pugui proporcionar múltiples aplicacions amb diverses exigències.

#### 3.2. Mètode d'obtenció

El PVC és un polímer obtingut principalment a partir de dos matèries primes, la sal (NaCl) i el petroli, amb un 57% i 43% respectivament. A diferència d'altres polímers es caracteritza per no dependre únicament del petroli. A la Figura 3.1, es mostra el diagrama de flux de la preparació del PVC, on a partir del craqueig tèrmic del petroli s'obté l'etilè que a través d'un procés d'halogenació amb clor, obtingut a partir d'un procés d'electròlisi, formarà 1,2-dicloroetilè. El 1,2-dicloroetilè reaccionarà amb l'àcid clorhídric produint clorur de vinil, compost que amb un procés de polimerització de tipus vinílic generarà el producte final, és a dir, el PVC.

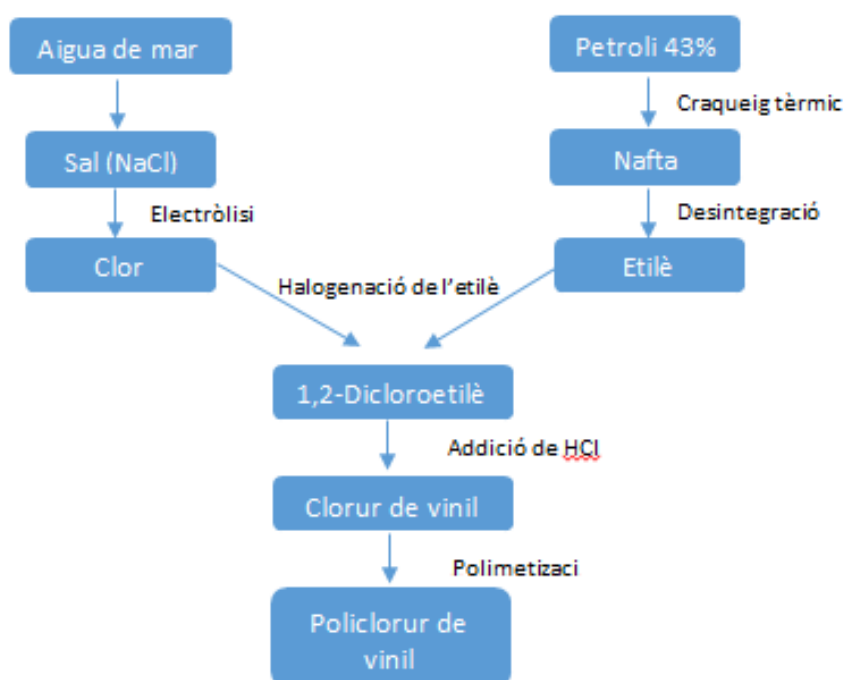


Figura 3.1. Diagrama de flux que mostra la producció del PVC



A la Figura 3.2 es mostren algunes de les reaccions químiques que tenen lloc durant el procés, així com els compostos que es produeixen en cadascuna d'elles. Durant el procés es creen compostos secundaris, alguns dels quals es reutilitzen en el mateix procés i la resta s'utilitzen amb altres aplicacions.

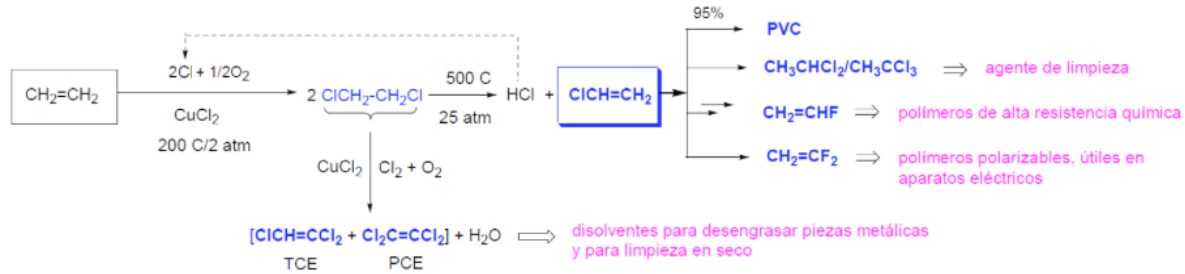


Figura 3.2. Reaccions químiques implicades a la preparació del PVC a partir de l'etilè[1]

A continuació es descriuen cadascuna de les etapes representades el diagrama de flux de la preparació del PVC, Figura 3.1.

### 3.2.1. Craqueig tèrmic i catalític del petroli

Mitjançant el procés de craqueig tèrmic o catalític es transformarà el petroli en fraccions simples, sent les fraccions de nafta les del nostre interès. Un cop obtingudes aquestes fraccions de nafta mitjançant una descomposició tèrmica s'obtindrà l'etilè una de les dos matèries primeres principals per a l'obtenció de PVC.

### 3.2.2. Craqueig tèrmic

El craqueig tèrmic és un procés que a partir de l'acció de la temperatura s'aconsegueix transformar els hidrocarburs. Les fraccions més pesades es descomponen tèrmicament, per tal d'obtenir hidrocarburs amb menor pes molecular i punt d'ebullició com la benzina o les olefines. El fet d'obtenir aquest productes té molta importància ja que no es poden obtenir directament del petroli i a més a més tenen un alt valor econòmic.

Inicialment el cru s'introdueix a l'interior d'un forn, tal i com s'observa a la Figura 3.3, ja que es tracta d'un procés endotèrmic. A continuació entrarà a un reactor, una cambra flash i una columna de fraccionament, tots tres equips treballaran a temperatures i pressions elevades fet que limitarà l'eficiència del procés, entre el 40% i el 80%, ja que aquestes condicions generen grans quantitats de combustible sòlid a l'interior dels equips.[2]



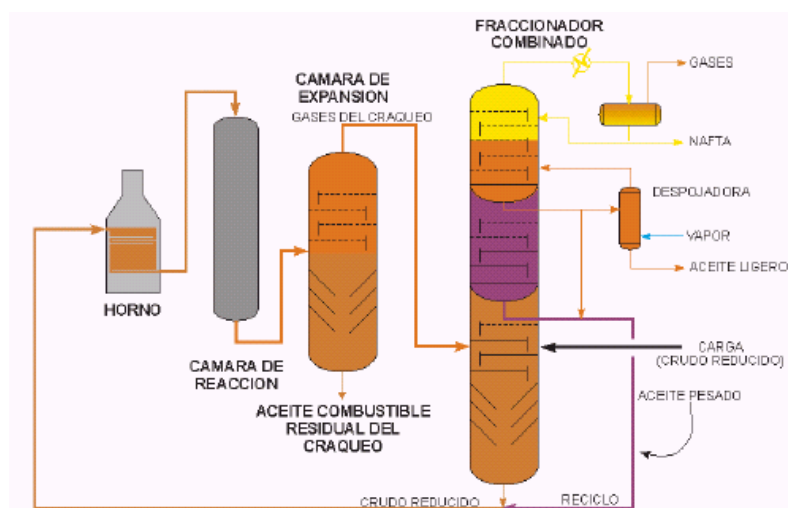


Figura 3.3. Esquema del craqueig tèrmic[2]

Un exemple de craqueig tèrmic poc sever és el visbreaking, representat a la Figura 3.4. A aquest procés s'escalfen els residus a uns 460 – 480°C durant curts períodes de temps. Un cop realitzar el craqueig es refreden els residus i es disminueix la viscositat de les fraccions pesades tipus fuel-oil. Aquest procés té lloc a la columna de destil·lació d'on s'obté un gasoil més pesat que la nafta i més lleuger que els residus, podent-se ajustar la viscositat dels residus amb el gasoil lleuger extret prèviament. [3]

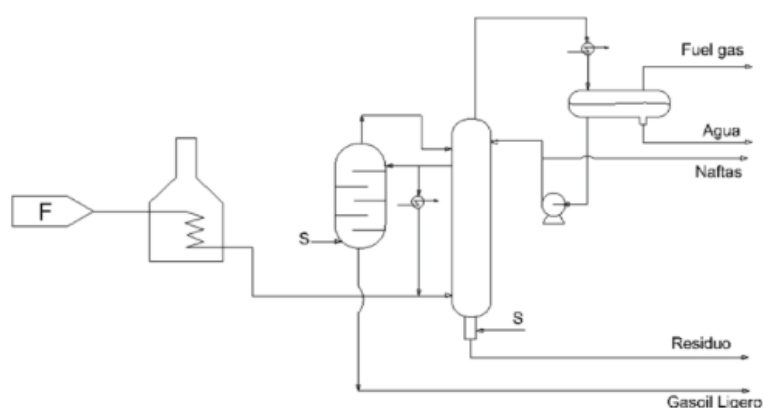


Figura 3.4. Esquema procés visbreaking[3]

### 3.2.3. Craqueig catalític

El craqueig catalític és un procés que a partir de l'acció de la temperatura i la pressió com l'acció d'un catalitzador, generalment una barreja de sílice i alumina, s'aconsegueixen transformar els hidrocarburs més pesats en molècules més simples com per exemple el querosè, la gasolina o GPL.

A diferència del craqueig tèrmic el craqueig catalític gràcies a l'acció del catalitzador, s'obté menys olefines i residus de coc i augmenta la velocitat d'operació a més a més de poder treballar a temperatures més baixes.



Actualment més d'un 80% del craqueig catalític que es duu a terme té lloc mitjançant un llit fluiditzat, esquema del procés representat a la Figura 3.5. La descomposició de les molècules més pesades es realitza a partir d'un catalitzador que s'incorpora als hidrocarburs a l'interior d'un reactor tubular amb flux ascendent. A continuació el producte es dirigeix a la columna de fraccionament on s'obtenen les fraccions més lleugeres. Finalment mitjançant els ciclons, el catalitzador es dirigeix cap a l'equip de regeneració per a la seva reutilització.[2]

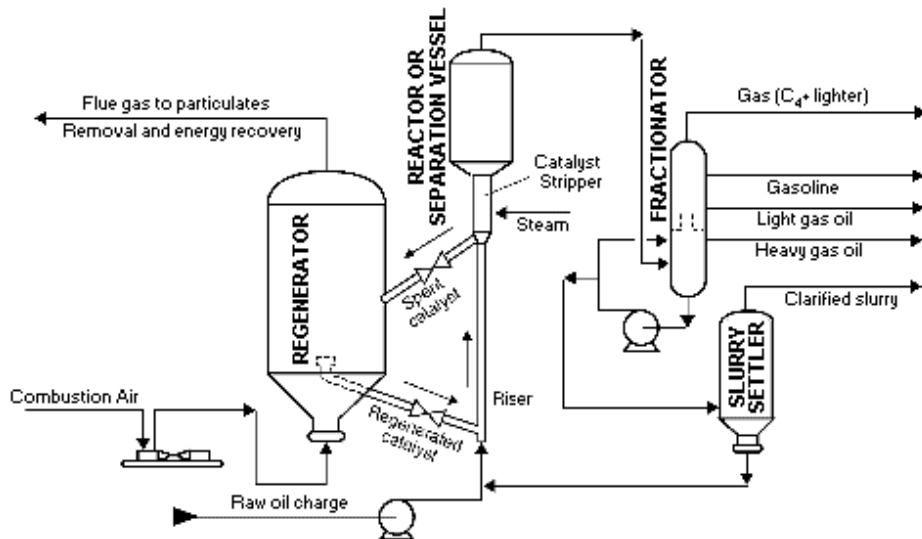


Figura 3.5. Esquema d'un procés de craqueig catalític[4]

### 3.2.4. Extracció de NaCl de l'aigua de mar

Tal i com s'observa a la Figura 3.6 l'aigua marina és una font inesgotable de sal, l'extracció d'aquesta es realitza a partir de l'evaporació de l'aigua marina que es va concentrant poc a poc mitjançant el sol i l'aire.

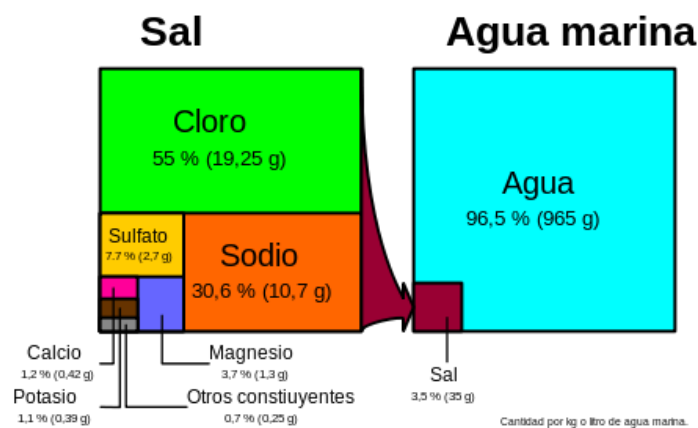


Figura 3.6. Composició mitjana de l'aigua marina[5]

El procés d'extracció de la sal a partir de l'aigua marina consisteix principalment en tres etapes:[6]





En primer lloc l'aigua marina s'introdueix a l'interior de les basses d'evaporació, on es decantaran els materials en suspensió i s'evaporarà una gran quantitat de l'aigua present, aconseguint augmentar la concentració inicial de sal. Al llarg d'aquesta etapa s'aconseguirà precipitar tots els òxids de ferro ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), els carbonats càlcics ( $\text{CaCO}_3$ ) i aproximadament un 60% dels sulfats ( $\text{CaSO}_4$ ).

A continuació es passa a les basses escalfadores, on s'aconseguirà evaporar fins a un 88% de l'aigua inicial i precipitar tots els sulfats ( $\text{CaSO}_4$ ).

Finalment, es passa a la part més important del procés, les basses cristal·litzadores, on s'evaporarà aproximadament un 6% de l'aigua i precipitarà el clorur de sodi juntament amb petites quantitats de sals magnèsiques i bromur sòdic, sent aquests dos últims els encarregats de donar el color blanc-mate a la sal. A aquesta etapa i segons la funció final del producte, s'extraurà la sal a diferents concentracions, tal i com mostra la Taula 3.1.

Taula 3.1. Concentracions segons la funció final de producte

Producte desitjat	Concentració (°Bé)
Alimentació	25 – 27
Indústria	27 – 29
Encurtits	29 – 32

Un cop s'ha obtingut la sal, aquesta es neteja amb aigües mare (aigües residuals amb petites quantitats de  $\text{Cl}_2^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  i alguns bromurs) ja que tenen una elevada concentració sense que es produeixin pèrdues per dissolució.

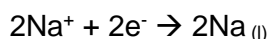
### 3.2.5. Descomposició electrolítica via aquosa del NaCl

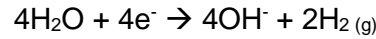
L'obtenció del clor a partir del clorur sòdic de l'aigua marina actualment a l'indústria química es realitza via descomposició electrolítica.

El procés de descomposició electrolítica via aquosa té com a unitat bàsica de treball la cel·la electrolítica. Aquesta està formada per dos elèctrodes, d'un material inert com per exemple el grafit, submergits a una solució de clorur de sodi.

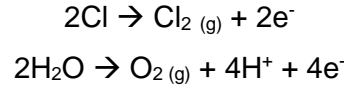
Els elèctrodes es connecten a una font de tensió continua produint un corrent elèctric continu a través de la solució, d'aquesta manera un dels elèctrodes es carregarà negativament, atraient els ions de sodi, i l'altre positivament, atraient els ions de clor.

A l'elèctrode carregat negativament o càtode es produeix la reacció de reducció, on els ions de sodi capten un electró i passen a sodi, formant sodi metàl·lic. A continuació es representen les reaccions que tenen lloc el càtode.

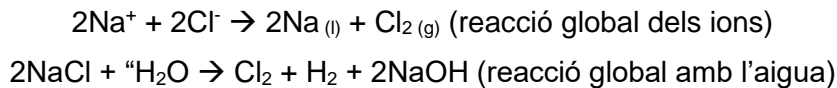




A l'elèctrode carregat positivament o ànode es produeix la reacció d'oxidació, on els ions de clor desprenen un electró cap a l'elèctrode i passen a clor gas. A continuació es representen les reaccions que tenen lloc a l'ànode.



Finalment la reacció global que té lloc a la cel·la electrolítica és la següent:



A la Figura 3.7 es representa tot el procés químic dut a terme a l'interior de la cel·la electrolítica.

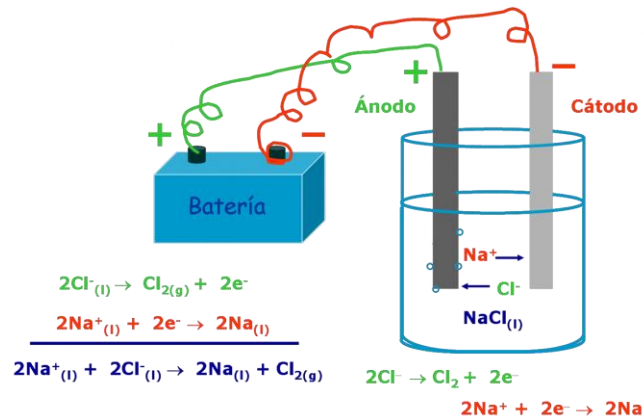


Figura 3.7. Reaccions que es donen durant la electròlisi del NaCl

Per tal d'evitar reaccions secundàries entre l'hidròxid de sodi i el clor i com a conseqüència subproductes com l'hipoclorit sòdic ( $\text{NaClO}$ ) o el clorat de sodi ( $\text{NaClO}_3$ ) existeixen tres tipus de cel·les electrolítiques:

- De diafragma
- D'amalgama de mercuri
- De membrana

Actualment els dos primers tipus de cel·les no s'utilitzen, ja que la primera contenia un diafragma d'asbest i la segona mercuri, dos productes cancerígens i molt contaminants pel medi ambient. Per aquest motiu a l'actualitat les noves plantes tenen implementat el procés d'electròlisi amb cel·les de membrana.



La cel·la de la Figura 3.8 està dividida en dos compartiments separats per una membrana d'intercanvi d'ions, fabricades generalment amb polímers perfluorsulfonato o perfluorcarboxilats, permeable únicament els ions de sodi.

Tal i com s'observa a la Figura 3.8, la solució de clorur de sodi entra per la part inferior de l'ànode, on els ions de clor desprendran l'electró a la superfície de l'ànode i l'ió sodi es dirigirà cap el càtode. D'aquesta manera es produirà una separació total dels ions podent produir una solució de NaOH amb concentracions d'un 35%. [7]

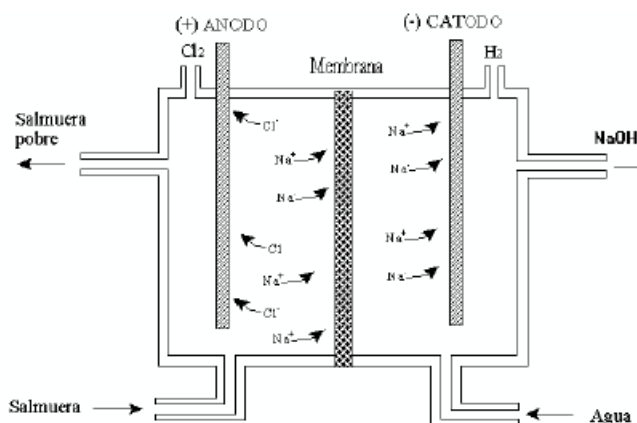
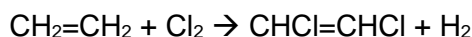


Figura 3.8. Cel·la de membrana [7]

### 3.2.6. Halogenació de l'etilè

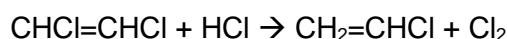
Un cop obtingut l'etilè a partir del craqueig i el clor mitjançant el procés de descomposició electrolítica, es duu a terme una reacció d'halogenació a una temperatura d'entre 220 i 240°C i de 2 a 4 atm amb el  $\text{CuCl}_2$  com a catalitzador, ja que és un reactiu volàtil a les condicions d'operació.

La reacció consisteix en la cloració de la molècula d'etilè donant una gran varietat de productes, sent el 1,2-dicloroetilè un dels més importants i el de major interès pel procés de producció del PVC. A continuació es representa la reacció d'halogenació de l'etilè amb una selectivitat aproximadament del 96%.



### 3.2.7. Formació del clorur de vinil

La transformació del 1,2-dicloroetilè a clorur de vinil té lloc a l'interior de reactors tubulars, de níquel o crom amb una resistència a la calor i una velocitat de flux molt elevada, que mitjançant una reacció endotèrmica amb presència d'HCl, amb unes condicions de 500°C de temperatura i una pressió d'entre 25 i 30 atm. A continuació es representa la reacció de formació del clorur de vinil amb una selectivitat aproximadament el 98%



### 3.2.8. Polimerització

Finalment un cop obtinguda la molècula de clorur de vinil, aquesta reacciona mitjançant un procés de polimerització produint el PVC.

Tal i com s'ha descrit a l'annex A el PVC es produeix principalment mitjançant polimeritzacions per addició (poliaddició), que generalment tenen lloc mitjançant processos en suspensió i en emulsió.

### 3.3. Característiques i propietats fisicoquímiques del material

Com qualsevol polímer, el PVC presenta unes propietats i característiques que el diferencien de la resta de polímers. A la següent taula, Taula 3.2, s'hi presenten les propietats més importants.

Taula 3.2. Propietats del PVC [8][9][10]

Tipus de propietat	Propietat	Valor
<b>Química</b>	Densitat	1,34 - 1,42 kg·dm <sup>-3</sup>
	Temperatura d'estovament	>80 °C
	Inflamabilitat	Autoextingible
	Resistència a hidrocarburs	Baixa
	Resistència a àcids i alcalins dèbils	Molt bona a T <sub>ambient</sub>
	Comportament a la combustió	Crema amb dificultat
	Propagació de la flama	Auto extingible
	Comportament el cremar-se	Es torna tou i es descompon
	Color de la flama	Els costats verds
	Olor el cremar-se	Clor
<b>Mecànica</b>	Mòdul elàstic	2,14 – 4,14 GPa
	Coefficient de Poisson	0,383 – 0,407
	Resistència mecànica a la compressió	42,5 – 89,6 MPa
	Resistència mecànica a la tracció	40,7 – 65,1 MPa
	Elongació fins a ruptura	15%
	Duresa	80 – 83 (Shore D)
<b>Elèctrica</b>	Resistència dielèctrica	20 kW·mm <sup>-1</sup>
	Constants dialèctiques	3,2 – 3,6 (60 HZ)
		3,0 – 3,3 (1 KHZ)
		2,8 – 3,1 (1 MHZ)
	Absorció d'humitat a l'aire	0,05 – 0,4 %
	Resistència superficial	> 10 a 13 Ohm
	Resistència volumètrica	> 10 a 15 Ohm·cm
Rigidesa dialèctica	12 Kv·mm <sup>-1</sup>	
<b>Tèrmica</b>	Calor específic	1000 – 1500 J·K <sup>-1</sup> ·kg <sup>-1</sup>
	Coefficient d'expansió tèrmica	75 – 100 x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
	Conductivitat tèrmica a 23°C	0,12 – 0,23 W·m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
	TMAX d'utilització	50 – 75 °C
	T <sub>min</sub> d'utilització	-30 °C



	Temperatura de fusió	150 °C
Òptica	Índex de refracció	1,54 – 1,56
	Tipus de material	Material translúcid

### 3.4. Aplicacions del PVC

A la indústria química el policlorur de vinil al llarg dels últims anys ha esdevingut un dels polímers amb major interès. Aquest fet ha donat lloc a que sigui un producte amb una gran versatilitat, és a dir, és un producte amb un ampli ventall d'aplicacions.

A Europa tal i com s'observa a la Figura 3.9, dos tercers parts del PVC que es produeix, s'utilitza en aplicacions del camp de la construcció com són per exemple els marcs de les finestres, els recobriments de cables o teles i fins i tot en terres. A més a més, altres aplicacions importants engloben alguns dispositius mèdics, accessoris interiors o exteriors dels vehicles o les ampolles i safates.

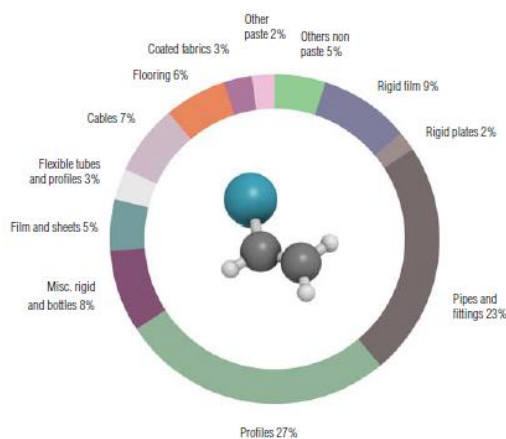


Figura 3.9. Aplicacions del PVC

El 64% de les aplicacions té una vida útil de uns 100-115 anys aproximadament, com són per exemple els tubs, les persianes o alguns mobles. Un 24% té una vida útil entre 2 i 15 anys, com algunes peces de automòbils, mànegues o joguines. La resta del PVC, és a dir, el 12% és usat en aplicacions de curta duració com per exemple ampolles o films.

### 3.5. Indústria i mercat del PVC

El mercat de la producció de matèries primeres plàstiques està creixent considerablement a nivell mundial els darrers anys, segons l'informe "Plastics: the Facts 2016" la producció mundial va créixer l'any 2015 un 4% respecte l'any anterior, passant d'una producció de 311 milions de tones a 322 milions, mentre que a nivell europeu les dades mostren una producció estable els últims anys al voltant de 58 milions de tones. La indústria europea és la segona potència productora de plàstics produint el 18% de la producció global, mentre que Xina ocupa el primer lloc amb més d'un 27% de la producció total.



En quan a la distribució geografia l'any 2015 a Europa el país que més demanda va presentar va ser Alemanya amb una demanda del 24,6% de la producció europea seguida d'Itàlia i França amb una demanda del 14% i del 10% respectivament.[11]

Tot i que existeixen diferents plàstics en el mercat, n'hi ha quatre que destaquen respecte els altres i són: el polietilè (PE), el poliester (PET), el polipropilè (PP) i el clorur de polivinil (PVC). El PVC ocupa el segon lloc en el ranking dels plàstics més demandats amb aproximadament un 20% del total.

L'any 2010 al món es van produir 36,5 tonelades de PVC, on Europa va realitzar una demanada d'aproximadament el 15%. A nivell mundial el PVC ha sofert una gran demanda a la regió de l'Àsia-Pacífic, sent aquest el mercat més gran, consumint més de la meitat del total de PVC demandat a nivell mundial, que es utilitza principalment per la indústria de la construcció i l'envasat. [12]

Pel que fa més concretament a les empreses productores de resines de PVC a nivell mundial al 2015, com es pot veure en la Taula 3.3, destaca en primer lloc l'empresa SHINTECH (USA) produint 3640 milions de tones anuals tenint per tant un 10,3% de la capacitat total, seguides de INEOS Chlor Vinyls (UK), FPC (Taiwan) i Mexichem (Mèxic), cal destacar que Mexichem a Europa és un dels majors productors de canonades i líder en la producció de resina de PVC. [13]

Taula 3.3. Productors mundials de resina de PVC l'any 2015

Companyia	Capacitat (Tn)
<b>SHINTECH</b>	3640
<b>INEOS Chlor Vinyls</b>	3521
<b>FPC</b>	3237
<b>Mexichem</b>	1812
<b>Westlake</b>	1744
<b>Oxy Vinyls LP</b>	1683
<b>Xinjiang Zhongtai</b>	1525
<b>LG Chem</b>	1300








Referent a Espanya, l'empresa multinacional Cortizo, amb més de 2000 llocs de treball per tot Europa, s'encarrega de la producció de sistemes de finestres i portes en PVC, presenta 9 centres productius repartits per Europa i l'any 2014 va obrir a Padrón (A Coruña) una nova fabrica la qual va ser la primera empresa en fabricar PVC a Espanya. L'empresa ubicada a Padrón va proporcionar 40 nous llocs de treball i té una capacitat de producció de 3000 Kg per hora, consta de deu línies de extrusió on es fabrica el PVC i posteriorment es tracta amb diferents acabats segons la finalitat del client. [14]



## 4. RECICLATGE DE POLÍMERS

El present projecte està centrat en el reciclatge del PVC, no obstant, existeixen una gran varietat de plàstics però no tots ells són aptes per a poder ser reciclats. Per tal de facilitar la separació dels plàstics que si que són reciclables, es fa ús d'una identificació mitjançant un codi o RIC (Resin Identification Code), aquest codi presenta un triangle amb fletxes en el interior del qual hi ha un número que és una simple numeració, sota del triangles hi ha unes lletres que corresponen a les sigles del tipus plàstic que és. A la *Taula 4.1* es troben les propietats més importants de cadascun d'aquests plàstics reciclables i les seves principals aplicacions, així com, el símbol que els identifica.

*Taula 4.1. Classificació dels plàstics*

Símbol	Tipus de plàstic	Propietats	Usos comuns
 PET	Tereftalat de polietilè	Contacte alimentari, resistència física, propietats tèrmiques, lleuger i resistent químic.	Begudes, refrescos, aigua, envasos per aliments.
 HDPE	Polietilè d'alta densitat	Poca flexibilitat, resistència a químics, opac, fàcil de pigmentar.	Algunes bosses de supermercats o de congelats, envasos de llet, gelats, tapes, detergents.
 PVC	Policlorur de vinil	Dur, resistent, clar, es pot utilitzar amb solvents, flexible, clar, elàstic.	Tubàries, paquets de blister, envasos en general, margueres, soles de les sabates, cables.
 LDPE	Polietilè de baixa densitat	Suau, flexible, translúcid, es ralla fàcilment.	Bosses de brossa, envasos de laboratori.
 PP	Polipropilè	Una mica flexible, translúcid, suporta solvents, versàtil.	Equips de jardineria, caixes per aliments, cintes per empaquetar, envasos d'ús veterinari i farmacèutic.
 PS	Poliestirè	Clar, rígid, opac, es trenca amb facilitat.	Caixes per discs, cobertes de plàstic, imitació de vidre, joguines, envasos cosmètics.
 Otros	Les altres resines de plàstic o barreges	Inclou moltes altres resines i materials. Les seves propietats depenen de la combinació de plàstics.	Parts del cotxe, electrònica.

La producció de plàstics està incrementant de manera exponencial en els darrers anys, i com a conseqüència de la mala gestió dels residus i de l'abandonament de fins a 8 milions de tones de plàstics als mars i oceans cada any a nivell mundial, el que suposa una contaminació marina d'aproximadament del 70%, es tracta d'un problema global que està augmentant perillosament ja que es preveu un augment de la producció de plàstics en els següents anys. Els plàstics que es troben en mars o oceans el temps de degradació només dependrà de la radiació UV procedent de la llum solar tot. Tot aquest temps en que el plàstic no es troba en



l'última fase de degradació aquests poden ocasionar problemes com l'asfíxia, l'estrangulació o la desnutrició d'algun animal que l'ingereixi. A la Taula 4.2 s'observa els temps de degradació de diferents plàstics ja que cadascun suposa un temps diferent. Les ampolles de plàstic són difícils de descompondre, ja que un cop llençades al medi es fragmenten i dispersen amb la qual cosa es poden ensorrar i així perduren més.[15]

Taula 4.2. Temps de degradació d'alguns plàstics. [16]

Material	Temps de degradació
<b>Ampolla PET</b>	de 100 a 1000 anys
<b>Got de plàstic de PET</b>	1000 anys
<b>Bosses de plàstic</b>	150 anys
<b>Joguina de plàstic</b>	300 anys

A Espanya cada dia es generen 30 milions de llaunes i ampolles buides i només el 50% dels plàstics arriben als sistemes de gestió de residus. L'any 2015 es van recollir una mitjana de 320 objectes de brossa per cada 100 metres de platja, sent el 75% d'ells objectes plàstics.

Segons un estudi d'hàbits de reciclatge dels espanyols que va fer l'Institut Apolda per a Ecoembres, l'any 2016 el 72,5% d'espanyols afirmava que disposava d'un espai per al reciclatge de residus i un dels contenidors estava destinat als envasos domèstics en els que es llencen plàstics. L'estudi també demostra que hi ha diferències en el reciclatge segons l'àrea de residència i el nombre d'integrants de les famílies, el reciclatge incrementa en nuclis urbans de major mida així com en les llars on només resideixen dues persones, per altra banda, es recicla menys en municipis on hi ha menys de 5000 habitants i en aquelles cases on hi ha 5 membres o més.

Com a conseqüència de la crisi els darrers anys a Espanya ha disminuït moltíssim el número d'empreses i amb ell el número d'empleats el sector de la indústria dels plàstics, a la Taula 4.3, s'observa a més a més que actualment el nombre d'importacions i exportacions ha augmentat considerablement i la inversió en I+D ha patit un fort descens.

Taula 4.3. Producció i transformació de plàstic en milions d'euros

	2007	2009	2011	2013	2015
<b>Treballadors</b>	92795	74996	71086	67018	67358
<b>Número de treballadors</b>	5284	4734	4436	4171	3940
<b>Ingressos d'exportacions</b>	17529	12371	13742	13412	14636
<b>Exportacions</b>	3217	2708	3278	3633	4248
<b>Importacions</b>	4339	3722	3887	3917	5046
<b>Balança comercial</b>	-1182	-1014	-609	-283	-798
<b>Inversió amb I+D</b>	72	44	48	35	37
<b>Inversió amb actius materials</b>	998	478	521	424	573

Font: Secretaria d'estat de comerç exterior, ANAIP, INE, AIMPLAS i CEP





## 4.1. Tipus de reciclatge

En el present punt es realitza una descripció general dels tres grans processos de reciclatge de plàstics :

- 1) **El mecànic** que serveix per a un tipus de plàstic concret, en el que no s'utilitzen reaccions químiques que modifiquin o degradin la molècula
- 2) **El químic**, en el que es donen reaccions químiques en processos que impliquen la reducció progressiva de la mida de les molècules polimèriques fins arribar als monòmers inicials. Aquests són polimeritzats de nou, produint un material pràcticament idèntic al inicial.
- 3) **Valoració energètica** (Reciclatge energètic), són tractaments que s'empren per a plàstics molt contaminats o amb barreges complexes, molt difícils i costoses de separar, és a dir, amb residus que no poden ser sotmesos a alguns dels dos processos de reciclatge citats anteriorment. En aquests casos els plàstics són utilitzats com a combustibles (piròlisis) per així recuperar l'energia acumulada en els seus enllaços. Amb aquesta estratègia, es redueix el volum de residus plàstics i, simultàniament es produeix un estalvi de combustibles fòssils. També reben el mateix nombre de processos de tractaments tèrmics de residus polimèrics en presència d'hidrogen i catalitzadors, amb els que s'aconsegueix reduir la mida de les molècules i convertir-les en combustibles líquids anàlegs al gasoil.

### 4.1.1. Reciclatge mecànic

Per a donar a terme el procediment del reciclatge mecànic, caracteritzat per no alterar l'estructura química del polímer, es parteix dels plàstics ja usats els qual són sotmesos a una sèrie d'etapes amb el que s'acaba obtenint un nou material per a la fabricació d'un nou producte. S'ha de considerar que un plàstic que ja ha estat usat amb anterioritat perd una part de les seves propietats, ja sigui per la degradació que ha patit o per la presència de substàncies externes dels productes que va contenir.

Tot i que aquest procediment pot utilitzar-se per a qualsevol tipus de plàstic (per addició o condensació), s'han de complir certes condicions per tal de poder fer ús del reciclatge mecànic, han de ser plàstics no molts degradats a causa de la seva utilització, hi ha d'haver una prèvia separació dels plàstics segons el tipus, és a dir, hi ha d'haver una recollida selectiva d'aquests, han d'estar nets, no poden contenir partícules de brutícia que puguin fer malbé els equips que transformen les característiques físiques d'aquests i finalment hi ha d'haver una quantitat suficient per a la viabilitat econòmica a nivell industrial.

Les etapes consisteixen en una primera neteja per a obtenir els plàstics sense brutícia o altres substàncies adherides, una posterior classificació i separació emprant diferents tècniques d'identificació, trituració per tal d'obtenir una mida més petita dels plàstics, finalment s'obté la



gransa mitjançant un procés de extrusió que consisteix en homogeneïtzar per fosa i emmotllament en forma de filaments que tornen a ser rentats per eliminar restes de contaminants que hagin pogut quedar i es tallen en trossos petits amb una hèlix per obtenir el nou material.

Aquest es el tipus de reciclatge més simple, més econòmic i el més utilitzat. Generalment és la primera opció a tenir en compte sempre que es disposi d'un residu que contingui pocs colorant, pocs additius i que en el seu primer és no hagi patit una degradació important.[17][18] Un desavantatge importat d'aquest procediment és que al no haver procés químic, no hi ha eliminació dels colorants i additius que porta cadascun dels components de la mescla a reciclar. En conseqüència, la qualitat del plàstic reciclat és molt menor del que tindria inicialment el material que es recicla. Per això, el plàstic reciclat no s'utilitza pur, sinó que s'afegeix en una determinada proporció a plàstic de primera generació.

#### **4.1.2. Reciclatge químic**

El reciclatge químic o també conegut com a feed stock recycling, caracteritzat per alterar l'estructura química del polímer, va començar a ser desenvolupat per la indústria petroquímica amb l'objectiu d'aconseguir les metes proposades per a la optimització de recursos i recuperació de residus.

A diferència del reciclatge mecànic és un procediment que es pot aplicar a barreges de diferents polímers o a polímers que no estan en bones condicions, donant lloc a productes finals de bona qualitat. Consisteix en la descomposició de les molècules de polímers (craqueig del polímer) per tal d'obtenir els seus monòmers (molècules de partida) o matèries primeres de baix pes molecular com gas de síntesi per exemple i a partir d'aquests poder obtenir nous materials polimèrics.

El resultat és el trencament progressiu de la cadena polimèrica, que es dona pels grups funcionals existents en ella. El procés continua fins la recuperació del monòmer o monòmers emprats en la reparació química del polímer. Aquests monòmers es purifiquen i es tornen a sotmetre al procés de polimerització del que resulta un polímer idèntic al original. Un aspecte important d'aquesta metodologia es que en el procés de purificació dels monòmers s'eliminen els colorants i additius que portava el polímer a reciclar.

Existeixen diversos processos mitjançant els quals els polímers es poden descompondre.

##### **4.1.2.1. Mètodes de reciclatge per polímers obtinguts per condensació**

En el cas de polímers obtinguts per condensació com són polièsters, nylon o poliuretans s'utilitzen mètodes de descomposició química en els que es produeix el trencament de la cadena del polímer degut a un atac d'un agent químic, alguns d'aquets mètodes són la



hidròlisi, la metanòlisi o la glicòlisi que utilitza metanol, etilenglicol y aigua en el procés. Aquests processos poden aconseguir un nivell de reutilització del 90%.

- **Hidròlisi:** És un procés de despolimerització total per acció d'aigua, Figura 4.1, el procés es pot donar a terme en medi àcid o bàsic, però és necessari que el polímer tingui grups hidrolitzables, l'hidrogen s'uneix a un monòmer y el grup hidroxil al monòmer adjacent. Els polímers més susceptibles a la hidròlisi són aquells polímers de condensació com polièsters, policarbonats i poliamides. Aquest procés és contrari al de deshidratació.

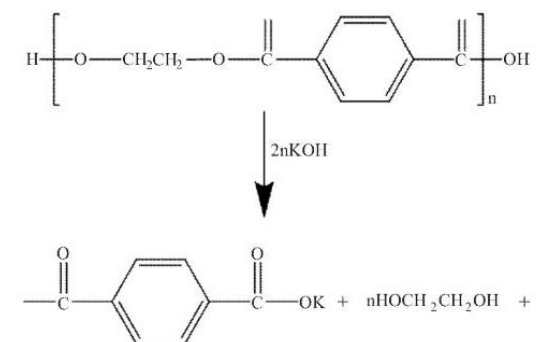


Figura 4.1. Hidròlisi alcalina del PET

- **Metanòlisi:** És un procés complex, representat a la Figura 4.2, que consisteix amb la reacció del metanol amb el PET, el PET es descompon en les seves molècules bàsiques, inclòs el dimetilterftalat i etilenglicol, els quals mes tard es poden tornar a polimeritzar per a produir resines verges. Empreses com Hoechst-Celanese, DuPont e Eastman han demostrat que els monòmers resultants del reciclatge químic son suficientment purs per a ser reutilitzats en la fabricació de només ampolles de PET. És un procés capaç de treure els colorants i impureses tot i tenir plàstics de baixa qualitat.

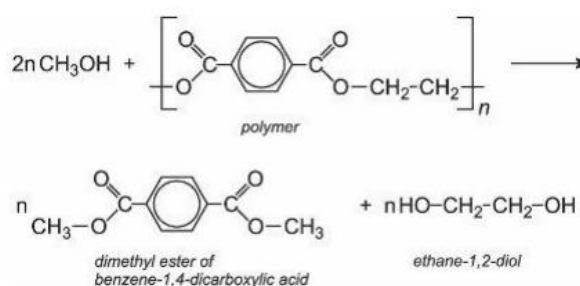


Figura 4.2. Reacció de metanolisis del PET

- **Glicòlisi:** Es fa ús de glicols que condueixen a una despolimerització parcial. En presència de catalitzadors es trenquen les llargues cadenes de polímers en cadenes de més curtes, tal i com es mostra el procés de despolimerització del PET de la Figura 4.3, que es podran tornar a ser polimeritzades en polímers verges. És un procediment poc eficaç per al tractament de residus amb colorants o barrejats.



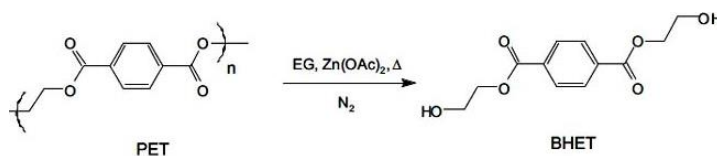


Figura 4.3. Despolimerització del PET amb etilenglicol

#### 4.1.2.2. Mètodes de reciclatge per polímers obtinguts per addició

Les tècniques emprades per a polímers d'addició es classifiquen en tècniques per via catalítica mitjançant ús de catalitzador que es solen usar en el cas de polímers com olefines, vinílics, acrílics... o per via tèrmica quan s'aplica calor per degradar la molècula sense l'aplicació de cap reactiu químic per trencar la molècula.

Els tractaments de descomposició mitjançant altes temperatures poden ser la piròlisi si es duu a terme en una atmosfera inert o gasificació si la descomposició es dona en una atmosfera oxidant, els dos tractaments es poden donar només per via tèrmica o per via catalítica utilitzant catalitzadors (hidrogenació i craqueig tèrmic).

- **Gasificació:** És un procés termoquímic que a partir d'una molècula carbonada com és un polímer es transformat en un gas mitjançant una sèrie de reaccions a una determinada temperatura amb la presència d'un agent gasificant com pot ser aire oxigen o vapor d'aigua. Depenent del agent gasificant que s'empri s'obté una barreja de gasos amb unes utilitats o altre. Aquest gas pot ser aprofitat energèticament cremant-lo en una cambra de combustió o introduint-lo directament en una turbina de gas o motor de combustió interna.
- **Hidrogenació o hidro-craqueig:** Es tracta d'un procés en els plàstics són sotmesos a energia tèrmica en presència d'hidrogen, les cadenes dels polímers es trenquen donant lloc a combustibles líquids, que habitualment són utilitzat en plantes químiques. Les macromolècules es trenquen i es saturen d'hidrogen. És una de les tècniques més desenvolupada.
- **Piròlisis:** Consisteix en un craqueig de les molècules, amb zeolita com a catalitzador, mitjançant un escalfament en el buit, és a dir, es dona una descomposició tèrmica, es posen tots els plàstics sense diferenciar els tipus en una càmera cilíndrica sense presència d'oxigen i es sotmet a temperatures entorn els 370-420°C, es produeixen gasos anomenats gasos pirolítics que son condensats en dos etapes per tal de poder destil·lar un hidrocarburs. D'aquest procés se'n extreuen hidrocarburs líquids o sòlids que posteriorment poden ser processats en refineries. Per cada tona de plàstic s'obté aproximadament uns 750 litres de dièsel i 250 de querosè. [20]



Tot i que aquest procés té un gran inconvenient i és que suposa un alt cost en quant a instal·lacions. Avui dia a Espanya hi ha una planta pilot per tal de provar aquest mètode mentre que al Canadà aquest procés ja està totalment implantat. [19]

#### 4.1.3. Reciclatge energètic

Consisteix en la incineració controlada dels residus per tal de poder recuperar i aprofitar l'energia continguda en el material, Figura 4.4. No tots els residus plàstics són reciclats químicament o mecànicament. Aquells plàstics que tenen un alt poder calorífic són molt bons combustibles al barrejar-se amb altres residus. Per tal de que es doni aquest procés són necessàries altes temperatures i temps de residència per a potenciar al màxim l'energia dels combustibles i garantir la fracció total dels components nocius produïts

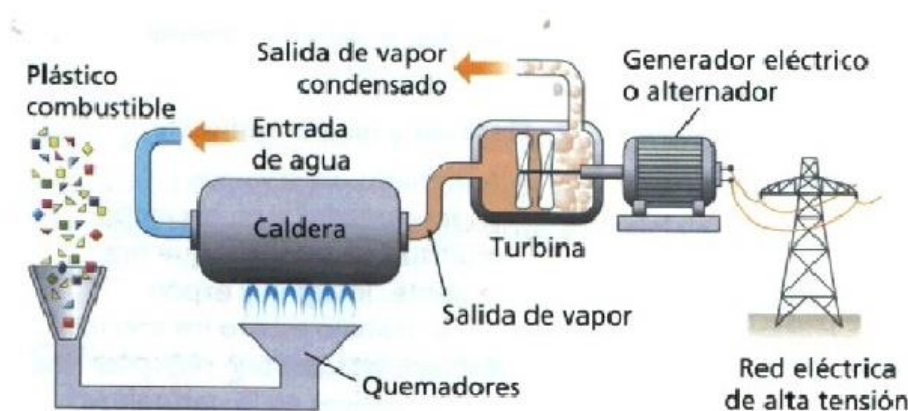


Figura 4.4. Sistema de combustió de plàstics per a l'obtenció d'energia elèctrica

#### 4.1.4. Procés Vinyloop

Aquest procés és exclusiu per al PVC i inclou la trituració d'aquest prèviament a la seva dissolució per tal d'aïllar el PVC d'altres compostos mitjançant precipitació, separació i assecat.

Aquest procediment està descrit específicament al punt 5.2, on s'explica que existeix una recirculació del dissolvent per tal de reutilitzar-lo i estalviar costos, que aquesta planta s'ha dut a terme en primer lloc a la ciutat de Ferrara (Itàlia) i permet obtenir un PVC d'alta qualitat a partir d'un PVC contaminat amb altres materials.

### 4.2. Tècniques de separació i identificació de les diferents famílies de plàstics.

La separació dels plàstics representa una part important en el procés de reciclatge, actualment existeixen diversos mètodes però cada tècnica presenta les seves limitacions, algunes tècniques poder tardar molt de temps en identificar un gran volum de plàstics i d'altres no són capaces d'identificar la presència d'additius.[21][22]



### 4.2.1. Separació manual

La tècnica de classificació manual es basa en la identificació de plàstics mitjançant l'experiència dels operaris observant els plàstics segons el seu color, l'aparença, la forma o fins i tot la marca que els identifica. Aquesta tècnica no es sempre útil ja que es necessari que els plàstics siguin el suficientment grans per tal que el treballador pugui identificar el tipus de plàstic amb la major rapidesa i certesa possible a més el material no ha de trobar-se en molt mal estat, tot i que s'ha de tenir en compte que l'error humà sempre està present en el procés. Una avantatge respecte altres mètodes es que suposa un cost relativament baix ja que no es necessari uns equips ni materials específics, seria suficient amb una cinta transportadora per tal que els plàstics es vagin desplaçant com es veu a la Figura 4.5.



Figura 4.5. Separació dels plàstics mitjançant la classificació manual

### 4.2.2. Mètode de flotació

Per al mètode de flotació o també anomenada tècnica de flotació-enfonsament, la densitat és un factor molt important ja que gràcies a la diferència d'aquesta en els diferents plàstics es poden separar aquests segons la flotació o no en dissolvents amb diferents densitats.

El procediment d'aquest mètode comença en trossejar els diferents plàstics en trossos homogenis i introduir-los a un recipient amb un dissolvent d'una densitat concreta i posteriorment en altres dissolvents de densitats diferents, al abocar els polímers al dissolvent, quedaran flotant aquells la densitat del qual es més petita que la de la dissolució i s'enfonsaran aquells trossos en que la densitat del polímer es més gran de manera que es pugui anar classificant els polímers la flotació per les densitats.

A partir de les densitats dels polímers podríem saber que en el cas de que un tros de plàstic floti en una dissolució de  $0,94 \text{ g/cm}^3$  es podria tractar de polietilè de mitja/baixa densitat o polietilè ja que la densitat d'aquests es inferior que el de la dissolució i per tant flota, si una mostra flota en una dissolució de densitat  $0,92 \text{ g/cm}^3$  podria tractar-se de polietilè de baixa



densitat. A partir de la Taula 4.4 es pot extreure un esquema de classificació com el de la Figura 4.6.

Taula 4.4. Densitats dels polímers [23]

Polímer	Densitat [g/cm <sup>3</sup> ]
Polietilè d'alta densitat	0,94 – 0,97
Polietilè de baixa densitat	0,91 – 0,93
Polipropilè	0,93 – 0,94
Policlorur de vinil	1,39 – 1,40
Polimetraquilat de metil	1,19 – 1,20
Poliestirè	1,04 – 1,10
Nylon 6,6	1,20 – 1,30
Poliacrilonitril	1,17 – 1,18

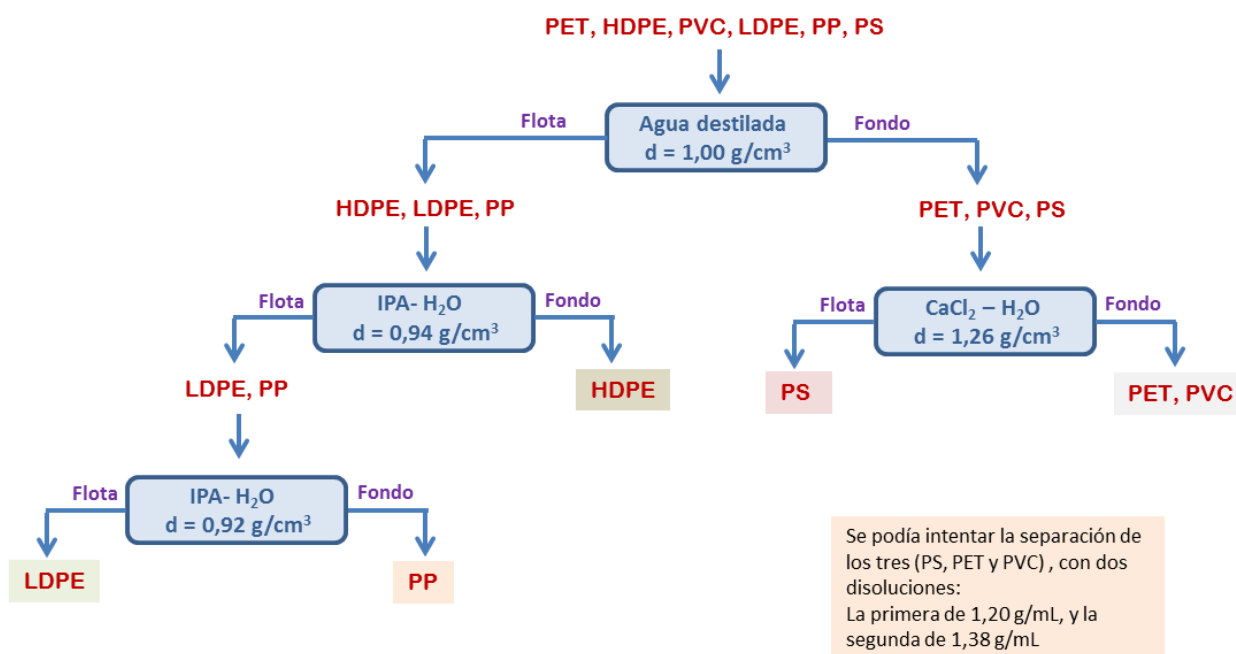


Figura 4.6. Diagrama de separació de polímers en funció de la densitat[23]

#### 4.2.3. Separació basada en utilització de dissolvents

Aquest mètode basat en utilitzar dissolvents va ser desenvolupat per Seymour i Stahl a la Universitat de Houston. És un mètode creat per dissoldre una barreja de plàstics mitjançant dissolvents orgànics, per exemple, per separar una barreja de PE, PVC, PS i PVA (polivinil d'acetat) s'utilitzaria toluè a temperatura ambient, en aquest cas el toluè no dissoldria el PE ni el PVC que es pot separar mitjançant filtració, pel que fa al PS i al PVA dissolts en el toluè es posen amb metanol que fa que el PS precipiti i el PVA quedi en dissolució.



#### 4.2.4. Tècniques espectroscòpiques

Existeixen diverses tècniques espectroscòpiques, les més importants són la fluorescència de raig X i l'espectroscòpia IR, descrites a continuació. A més a més pel cas de l'espectroscòpia IR s'han analitzat tres mostres diferents de PVC i el present punt s'analitzen els resultats.

##### 4.2.4.1. Fluorescència de raig X

El mètode de fluorescència de raig X s'utilitza per tal de separar PVC de PET i és un procediment que s'efectua irradiant els plàstics amb els raigs per tal de detectar la radiació secundària que emeten els àtoms de clor del PVC, Figura 4.7, tot i que no és un procediment molt eficaç ja que la fluorescència es proporcional als àtoms de clor que conte la substància i el PVC té poc àtoms. Els raigs exciten els electrons de les capes mes internes fent-los mobilitzar cap a les capes externes dissipant energia en forma de fotons.

És útil per a detectar diferents additius dels polímers com per exemple pigments o estabilitzants però cal destacar que és un procediment molt costós ja que són necessaris equips addicionals i accessoris cars.

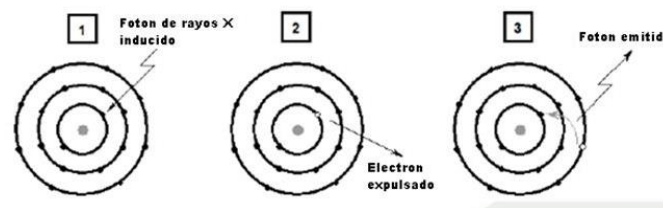


Figura 4.7. Mètode de fluorescència de raig X

##### 4.2.4.2. Espectroscòpia IR

A la indústria del reciclatge, una de les tècniques que s'utilitza per una identificació inequívoca dels fragments de polímer procedents de la neteja i separació l'espectrometria IR.

Les tècniques de determinació estructural espectroscòpiques presenten bastants avantatges respecte altres tècniques de caracterització de compostos, en el cas de l'espectroscòpia IR és una tècnica molt ràpida a més de garantir una bona qualitat de la informació que proporciona, amb aquesta tècnica es pot obtenir tant l'espectre com dades concretes d'aquest, un punt molt a favor és que no es necessària una quantitat molt gran de mostra per a la realització de l'espectre ja que es tracta d'una tècnica no destructiva amb la qual cosa no es perd el material de la mostra. A la següent figura, Figura 4.8, es mostra una instal·lació de reciclatge de polímers en la qual s'utilitza aquesta tècnica.





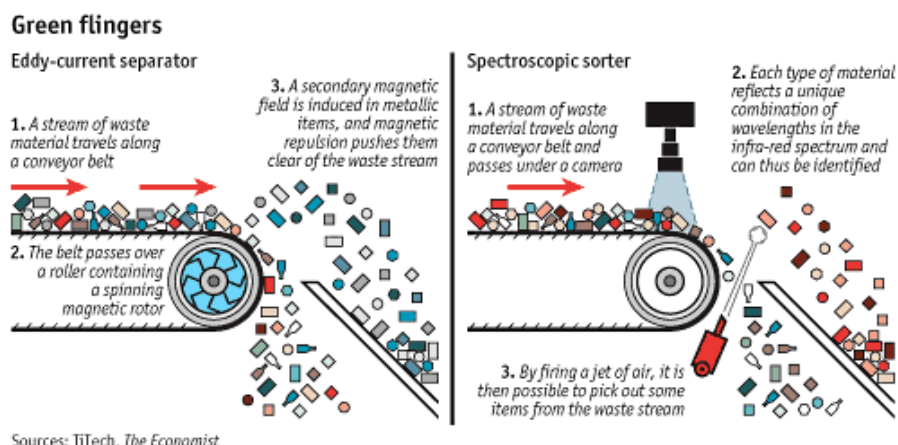


Figura 4.8. Sensors basats amb l'espectroscòpia IR d'una instal·lació de reciclatge

L'espectroscòpia infraroja o IR està basada en l'absorció de radiació infraroja per les molècules en vibració, cada tipus d'enllaç absorbirà a una freqüència diferent la qual cosa permetrà caracteritzar els diferents grups funcionals que presenti la molècula.

Una molècula absorbirà l'energia proporcionada per un feix de llum infraroja, en el cas dels espectròmetres de infraroig treballen amb un infraroig mitjà i fan un escombrat des de els  $4000\text{cm}^{-1}$  fins els  $600\text{cm}^{-1}$ , quan aquesta energia incident coincideixi amb l'energia necessària per a que es doni una transició vibracional de la molècula, és a dir, que la molècula presenti unes certes vibracions ocasionades per l'energia rebuda pel feix de llum.

Les vibracions moleculars depenen de les masses dels àtoms, els àtoms pesats vibren més lentament cosa que fa que presentin una freqüència més baixa que un àtom més lleuger, és a dir, la freqüència vibracional és inversament proporcional a la massa dels àtoms. Per altra banda, la freqüència d'absorció també està relacionada amb l'energia d'enllaç augmentant proporcionalment, per tant un doble enllaç tindrà una freqüència més alta que un enllaç simple. [24]

A més, poden distingir-se dos tipus de vibració que són flexió (bending) i tensió (stretching), les vibracions de tensió són aquelles vibracions degudes a canvis en la distància interatòmica en els enllaços entre dos àtoms, a més aquestes es classifiquen en simètriques i asimètriques, mentre que les vibracions de flexió són aquelles que han estat causades per canvis en l'angle que formen els enllaços i d'aquest tipus hi ha quatre modes de vibració diferents: tissoreig (scissoring), balanceig (rocking), aleteig (wagging) i torsió (twisting). [25]

#### 4.2.4.2.1. Identificació de diferents mostres de PVC mitjançant IR

Al laboratori, s'han analitzat mitjançant aquesta tècnica tres mostres de PVC comercials de diferent origen. Aquestes mostres es poden veure en la Figura 4.9, fotografia realitzada prèviament a les experiències.





Figura 4.9. Mostres de PVC de les quals s'ha realitzat l'espectre IR

La Figura 4.10 mostra l'espectre infraroig d'una mostra de PVC pura, sense presència d'additius, adquirida en forma de pols gràcies a l'empresa Solvay, mentre que la Figura 4.11 i la Figura 4.12 són espectres de PVC comercials és a dir amb presència d'additius, corresponen respectivament a pèl·let per a la fabricació d'ampolles de plàstic també proporcionats gràcies a l'empresa Solvay i a un tros de film de color violeta de papereria.

Pel que fa als eixos de les imatges, l'eix d'ordenades correspon a la transmitància, que representa el percentatge de radiació transmesa i l'eix d'abscisses representa el nombre d'ona "v", o el que és el mateix l'invers de la longitud de ona  $\nu = \frac{1}{\lambda}$ , finalment les bandes que s'observen a les imatges representen les zones on els enllaços de la molècula absorbeixen la radiació infraroja.

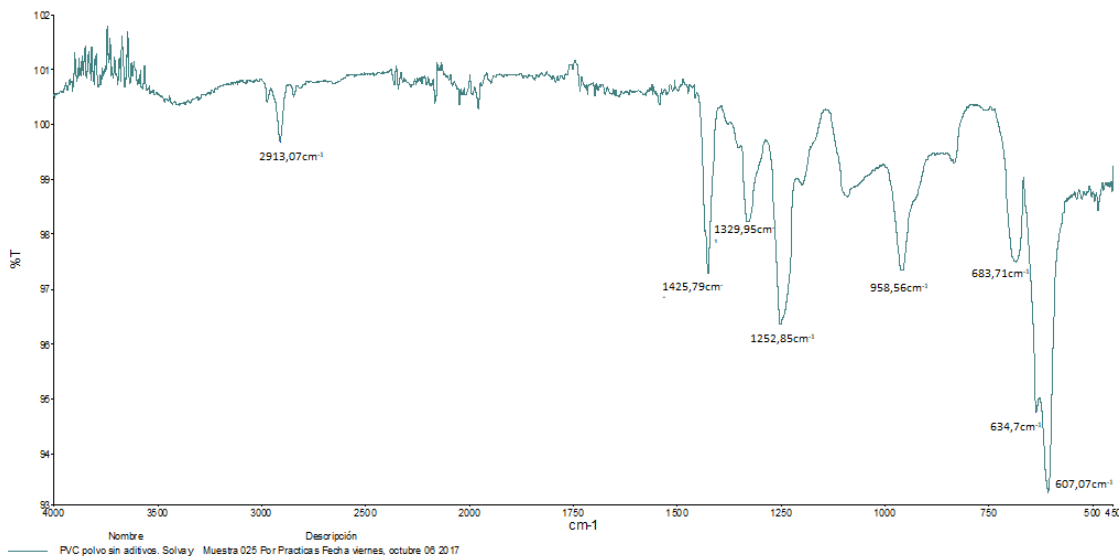


Figura 4.10. Espectre IR d'una mostra de PVC pur sense additius



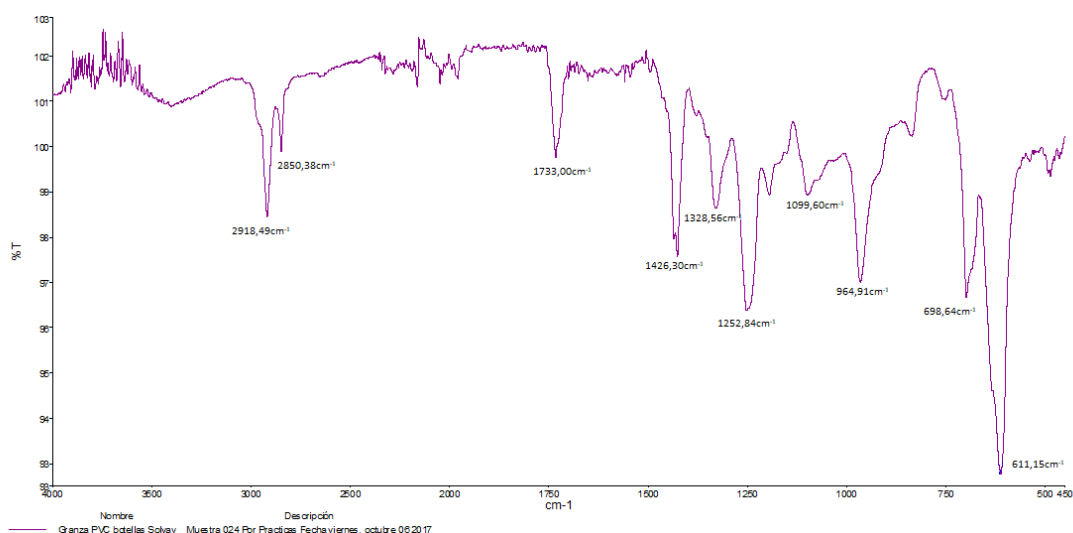


Figura 4.11. Espectre IR d'una mostra de PVC amb additius (pèl·let)

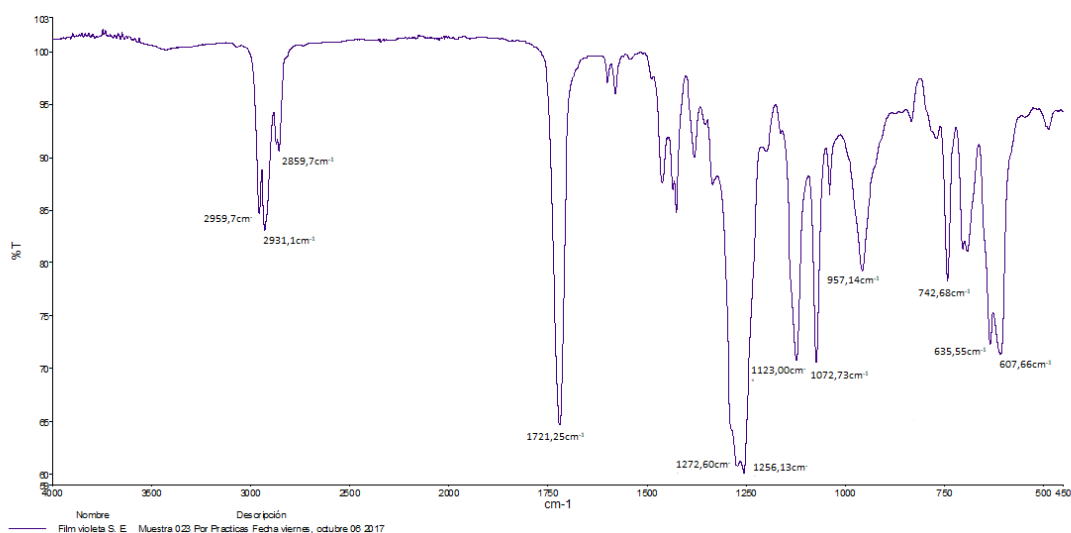


Figura 4.12. Espectre IR d'una mostra de PVC amb additius (tros de film violeta)

Pel que fa a la Figura 4.10 que correspon a la base del PVC sense cap tipus de substància afegida com a additiu, presenta diverses zones d'absorció durant l'espectre IR, la banda d'absorció situada en el rang de  $2800 - 3000\text{cm}^{-1}$  correspon a un enllaç C-H, el pic de nombre d'ona superior correspon a un enllaç C-H asimètric mentre que el pic amb nombre d'ona inferior correspon al enllaç C-H asimètric. Pel que fa al pic situat als  $1250\text{cm}^{-1}$  s'atribueix al vincle de flexió associat al C-H que està a prop del àtom de Cl. La connexió entre àtoms de carboni C-C de la cadena troncal es veu en els pics que apareixen en el rang de  $1000 - 1100\text{cm}^{-1}$ . Finalment els pics que es troben entre els  $600 - 650\text{cm}^{-1}$  són indicatius del enllaç entre l'halogen de clor i l'àtom de carboni C-Cl. [26]

Comparant la Figura 4.10 amb la Figura 4.11 i la Figura 4.12 es pot observar que les diferències són degudes a la presència d'additius, ja que el PVC sol presentar plastificants, antioxidants, estabilitzants o emulsionants entre d'altres. En els dos espectres es veu un pic



al voltant dels  $1700\text{ cm}^{-1}$  podria atribuir-se per exemple a un plastificant com pot ser el DINP (Diiso-nonil-ftalat) que és un ftalat que conté una cetona l'enllaç del qual absorbeix en aquella zona, en el cas d'estabilitzants i emulsificants solen ser àcids grassos. [27]

Algunes de les diferències en les intensitats d'absorció de les bandes també poden ser degudes a causa de la sensibilitat del instrument emprat per tal d'obtenir l'espectre o per l'entorn del laboratori en aquell moment.

#### 4.2.5. Tècniques electrostàtiques

En aquest mètode també anomenat separació triboelèctrica s'utilitzen carregues electrostàtiques per separar polímers que es troben tallats en forma d'escames. Es basa en la interacció dels plàstics que es posen en un corrent d'aire carregant-se amb electricitat estàtica mitjançant fricció en el interior d'un hidro-cicló com el de la Figura 4.13 que presenta una secció cilíndrica a la part superior per on el material s'alimenta de forma tangencial. Els plàstics presenten diferents propietats ja sigui degut a les seves propietats químiques o als additius que presentes, així doncs al aplicar-se un camp elèctric en el cilindre del hidro-cicló algunes de les partícules son atretes i altres repel·lides.

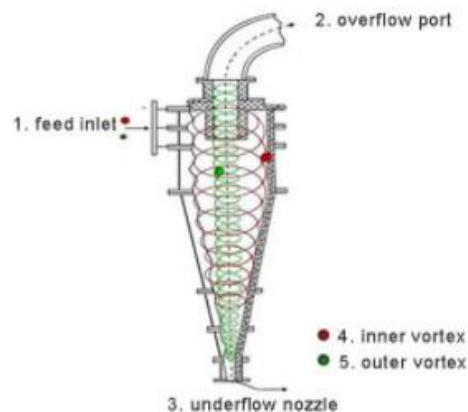


Figura 4.13. Hidro-cicló[28]

#### 4.2.6. Utilització de marcadors químics

Aquest mètode està basat en la incorporació de marcadors químics que proporcionen al material una certa propietat física que els fa fàcil d'identificar per a la classificació, per exemple una marca podria ser la resposta fluorescent que s'observa al irradiar un plàstic amb radiació ultraviolada. En aquest mètode s'ha d'incorporar de manera específica una marca identificadora diferent a cada tipus de polímer, de manera que es un mètode molt ràpid de classificació però que necessita d'un tractament previ de marcació.



#### 4.2.7. Tècniques basades en la incorporació de codis

Aquesta tècnica consta de marcar els polímers amb un codi identificador per a cada tipus de plàstic, aquests codis ja estan estipulats i es representen amb uns números a l'interior d'un triangle de fletxes corbes. Els números identificadors per als plàstics reciclables són els que es troben en la Taula 4.5.

Taula 4.5. Codi identificador dels polímers

Número	Abreviatura	Nombre completo
1	PET, PETE	Polietilè tereftalat
2	HDPE	Polietilè d'alta densitat
3	V, PVC	Clorur de polivinil
4	LDPE	Polietilè de baixa densitat
5	PP	Polipropilè
6	PS	Poliestirè
7	Altres	



## 5. EL PROCÉS VINYLOOP

---

Tot seguit es descriuran els antecedents que han donat lloc al procés Vinyloop així com algunes de les principals dades que s'han tingut en compte a l'hora de dur a terme el projecte de Ferrera i una descripció detallada del procés, des de la matèria primera fins al producte final ja reciclat.

### 5.1. Història

A finals de 1997, la companyia francesa Ferrara es va posar en contacte amb Solvay, ja que ens els darrers anys hi havia hagut un fort increment en la producció de productes amb una vida útil molt baixa generats a partir de PVC.

Al llarg del següent any, entre les dos companyies van redactar les primeres patents, del que en un futur no molt llunyà en sortiria el procés Vinyloop. A finals del 1998, es va aconseguir dissenyar la primera planta pilot amb un reactor principal amb una capacitat d'aproximadament 250 litres.

Degut al gran èxit de la planta pilot, a mitjans del 1999, Solvay va fer pública la introducció a la indústria de reciclatge de polímers del procés Vinyloop per reutilitzar els residus de PVC. Aquest procés constava de la trituració de la matèria a reciclar, seguida de la dissolució, separació per filtració, precipitació i assecat. Solvay va caracteritzar el procés pel control i l'eficiència de les solucions que intervenen, però principalment per la precipitació selectiva del PVC.

El següent any, es va crear la primera i fins a l'actualitat única planta de reciclatge que utilitza aquest procés, que té el nom de Vinyloop Ferrara SpA. Un cop creada la companyia, abans de posar-se en funcionament, es va dur a terme l'última planta pilot amb un reactor de 400 litres, i degut als bons resultats obtinguts a la planta pilot l'any 2001, es va iniciar el procés de construcció i posada en funcionament de la planta de Ferrara.

Finalment, al primer trimestre del 2002, amb una inversió final de 10,6 milions d'euros, es va posar en funcionament la planta de Vinyloop Ferrara SpA, dissenyada principalment pel tractament de residus de cables, amb una capacitat de processament de 10000 tones de residus l'any, de les quals es creu que es reutilitzaran en forma de PVC unes 8500 tones.

### 5.2. Descripció del procés

El procés Vinyloop, representat a la Figura 5.1, és un procés de reciclatge de PVC d'última generació ja que permet aïllar i reutilitzar el PVC contingut en materials com les fibres de polièster, els metalls o els teixits naturals, tots ells materials amb estructures compostes i que



mitjançant mètodes tradicionals és molt difícil, i no rentable econòmicament, la seva separació i posterior reciclatge.

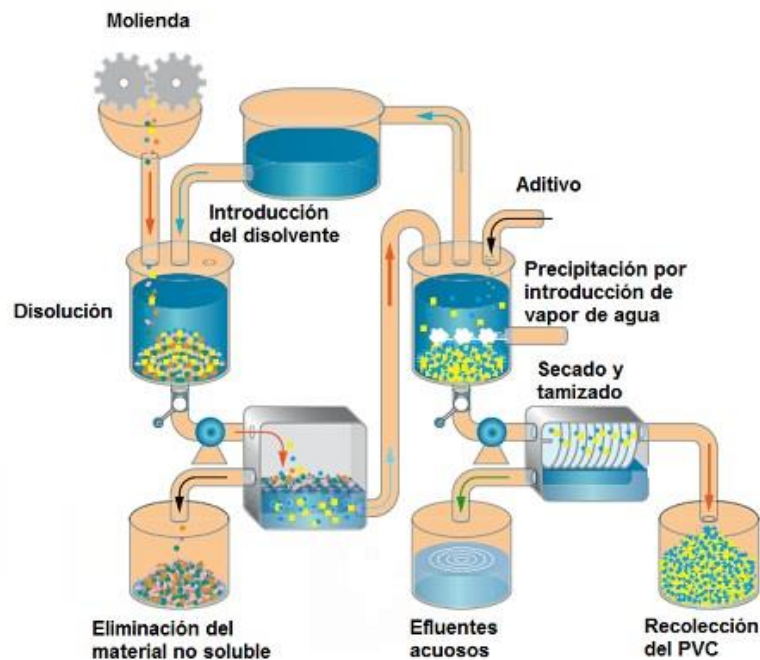


Figura 5.1. Esquema del procés Vinyloop [29]

Aquest procés parteix d'una tecnologia de reciclatge mecànic amb un circuit tancat on s'utilitza dissolvents orgànics per separar i reciclar el PVC, que pràcticament en la seva totalitat es reutilitzarà i s'aconseguirà minimitzar la contaminació al medi ambient. A més a més, un altre característica molt important d'aquest procés rau en que el PVC reciclat té una qualitat molt semblant a la del PVC original.

Vinyloop es caracteritza per les seves etapes principals:

- La dissolució selectiva del PVC a partir de tota la matèria mesclada a reciclar.
- L'eliminació per filtració de totes les impureses no solubles en la suspensió anterior.
- La recuperació per precipitació del PVC, mitjançant la injecció de vapor d'aigua.
- La recirculació i recuperació del dissolvent després de la precipitació del PVC.
- La centrifugació i assecat del PVC reciclat.

A la Figura 5.2 està representat el diagrama de flux del procés Vinyloop on s'observen totes les etapes, descrites específicament a continuació, així com les respectives substàncies que hi intervenen. [30]



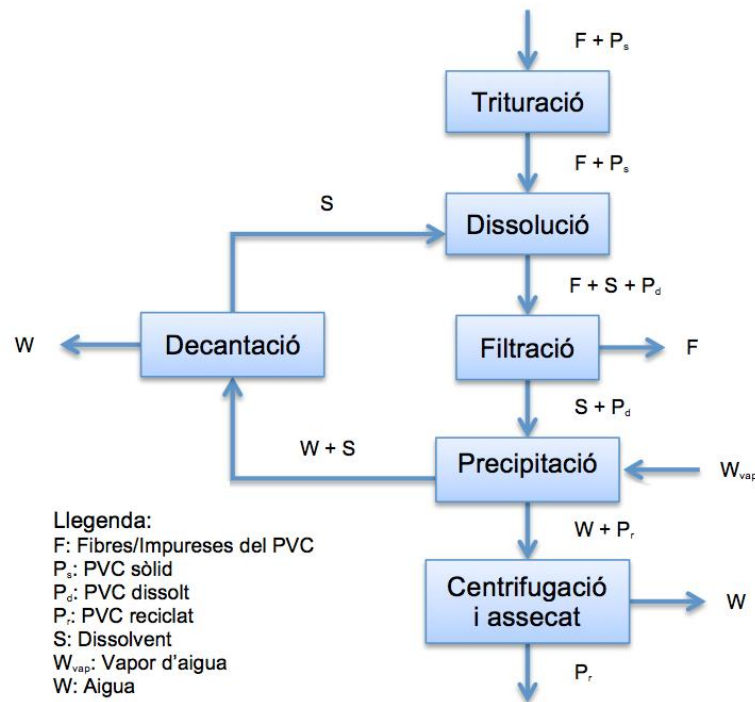


Figura 5.2. Diagrama de flux del procés Vinyloop

Generalment com a etapa prèvia al procés serà necessari un tractament de la matèria a reciclar, aquesta etapa consisteix en una trituració del material per tal de disminuir la mida i facilitar la manipulació a les següents etapes. Mitjançant la trituradora s'aconseguirà obtenir fragments d'entre 2 i 3 cm. Una característica molt important que han de complir les trituradores és que el número de revolucions per minut del rotor no superi les 150 rev/min, sent ideals unes 100 rev/min. Aquesta restricció bé condicionada ja que velocitats de rotació superiors podrien escalfar massa el material i crear una massa pastosa, enlloc de triturar-lo, i dificultar o impossibilitar el procés de reciclatge així com el funcionament de la trituradora.

Un cop obtinguts els fragments s'introdueixen juntament amb el dissolvent a l'interior d'un reactor. El dissolvent utilitzat serà una barreja entre tres substàncies, la metil-etil-cetona (MEK), l'hexà i l'aigua, amb unes proporcions amb pes de 83%, 12% i 5% respectivament. L'utilització d'aquest dissolvent permetrà obtenir una perfecte selectivitat dels materials a dissoldre, ja que el PVC es dissoldrà completament a diferència de les impureses contingudes que quedaran en suspensió per poder-se separar a l'etapa de filtració.

A més del dissolvent a aquesta etapa també s'introdueixen els additius que permetran donar unes propietats específiques al PVC reciclat que s'obindrà finalment, com per exemple els colorants o els plastificants. S'haurà de tenir en compte que els additius introduïts a aquesta etapa hauran de ser solubles en el dissolvent ja que els additius insolubles podrien ser separats del PVC dissolt juntament amb la matèria en suspensió durant la filtració.





El reactor utilitzat per dur a terme l'operació de dissolució, serà un reactor Batch ja que la dissolució del PVC no es pot realitzar mitjançant un procés continu sinó que ha de realitzar-se per etapes, és a dir, fins que no s'han dissolt totes les fibres aquestes no es podran filtrar. Les condicions d'operació del reactor seran d'aproximadament; una pressió de treball d'uns 3,5 bars i una temperatura d'uns 110°C. L'utilització d'una pressió de treball tan elevada permet treballar a una temperatura molt elevada sense que els dissolvents entrin en ebullició, d'aquesta manera es pot accelerar considerablement el procés de dissolució. A més a més, aquests reactors també hauran de tenir un agitador horitzontal per mantenir en constant moviment la dissolució i permetre la millor interacció entre els additius i el PVC dissolt.

Després de la dissolució de tots els fragments de PVC es realitza una filtració amb el principal objectiu de poder acabar de separar les impureses que contenia el PVC inicialment com poden ser petits trossos de metalls, etiquetes o partícules insolubles amb el dissolvent. Aquesta filtració es realitza mitjançant un teixit o pantalla amb uns porus d'entre 0,1 i 10 mil·límetres.

Amb el polímer filtrat i lliure d'impureses es passa a l'etapa de precipitació, on s'injectarà una gran quantitat de vapor d'aigua per precipitar el polímer dissolt en forma de PVC sòlid. La injecció de vapor d'aigua a més de precipitar el polímer també provoca l'evaporació del dissolvent creant un azeòtrop i mantenint una temperatura a l'interior del reactor d'aproximadament uns 74°C amb la pressió atmosfèrica com a pressió de treball. Un cop s'ha evaporat tot el dissolvent la temperatura del reactor augmenta fins aproximadament 100°C, ja que no llavors no hi ha presència de l'azeòtrop a l'interior del reactor, on es mantindrà entre 10 i 30 minuts per tal de permetre la precipitació de les últimes partícules de PVC reciclat.

A més de la injecció de vapor d'aigua al llarg d'aquesta etapa s'introduiran els últims additius que permetran acabar de donar totes les propietats i característiques finals del PVC. Com que el dissolvent s'evaporarà es podran separar d'ell tots els additius que son solubles en el dissolvent i millorar d'una forma molt important les propietats finals del PVC.

Utilitzar vapor injectat al procés de precipitació a més a més dels avantatges citats anteriorment també comporta un avantatge molt important, ja que si l'escalfament del tanc es realitzés com el reactor de dissolució, amb mantes calefactores, és a dir, a través de les parets del reactor, el polímer solidificaria a les parets augmentant considerablement la neteja a l'interior del reactor. Al realitzar l'escalfament per injecció de vapor la temperatura de les parts del reactor és molt més baixa i es disminueix el risc de solidificació a les parets del reactor.

Com a etapa final del procés Vinyloop, tot el polímer precipitat abans de poder ser reutilitzat s'introdueix a l'interior d'una centrifugadora o assecadora per deshumidificar les partícules de PVC reciclat.



Paral·lelament al procés principal de reciclatge descrit anteriorment, es produeix un procés de recuperació i recirculació del dissolvent utilitzat al llarg del procés. Aquest procés consisteix en primer lloc en una condensació del dissolvent, ja que quan es separa durant el procés de precipitació per ser reutilitzat es troba en estat vapor i la separació d'un azeòtrop s'ha de fer en estat líquid. Finalment a l'interior d'un reactor o decantador, seguit d'un assecament per dissolvents orgànics, es separarà pràcticament tota l'aigua del dissolvent, d'aquesta manera es podrà tornar a reutilitzar aquest dissolvent.



## 6. DIMENSIONAT I SELECCIÓ DELS EQUIPS DEL PROCÉS

En el següent apartat es realitzarà el disseny o la selecció dels equips que intervenen al llarg del procés, com són els reactors, la trituradora, la centrifugadora i el decantador. Cadascun dels reactors es dissenyarà a partir de la solució que haurà de contenir, les condicions d'operació i la capacitat que ha de poder processar a cada operació. D'altra banda, la trituradora i la centrifugadora s'han seleccionat a partir d'una comparació entre diferents models seleccionats rigorosament a partir de les condicions d'operació que han de dur a terme durant el procés.

### 6.1. Trituradora

Els plàstics són uns materials molts versàtils i amb estructures polimèriques molt diverses, és per això que s'ha de seleccionar una màquina eficient de reducció del volum de plàstic per a un previ procés al reciclatge, la trituració mecànica.

El terme trituració fa referència a la reducció de trossos grans a una mida més reduïda i convenient per a una reducció secundària amb dissolvents. Avui en dia al mercat hi ha centenars d'equips especialitzats per aquesta funció oferint diferent tipus de rotors, diferents capacitats de trituració, fulles de tall o tecnologies de tall.

Per tal de seleccionar l'equip de trituració més adient s'ha de tenir en compte certs paràmetres o aspectes com són la duresa de la matèria prima, la mida dels trossos que rep la maquinària així com la mida del producte final que es desitja, la quantitat de producte que es vol triturar, és a dir la capacitat de la màquina per hora, i si les impureses poden existir per tal que aquestes es rebutgin o es triturin.

#### 6.1.1. Trituradora de mandíbula

La trituradora de mandíbula és un equip molt utilitzat avui dia en les indústries, s'utilitza per a la trituració de diferents materials però és més eficient per a aquells materials que presenten una resistència de compressió menor de 300-320 MPa.

La trituració que efectua aquest equip s'anomena trituració de primer nivell i es tracta d'una trituració gruixuda i mitja, és a dir les fraccions que s'obtenen no són tant fines com les que es podrien obtenir en altres processos. S'anomenen trituradores de mandíbula degut a la similitud que presenta el moviment de la placa de trituració o mandíbula mòbil amb la mandíbula al mastegar.

El funcionament està basat en un sistema de politges que roten gràcies a un motor elèctric, així es mou contínuament una de les dues mandíbules (mandíbula mòbil) cap a l'altra mandíbula (mandíbula fixa), aquestes es poden veure a la Figura 6.1. Apropant-se i allunyant-



se periòdicament fan que el material que entra per la tolva caigui entre aquestes mandíbules i gràcies al seu moviment es trenqui en fraccions més reduïdes del material i posteriorment caigui cap a la sortida o bé en un recipient col·lector que es pot col·locar a la part inferior i extreure o bé en una cinta transportadora. [31]

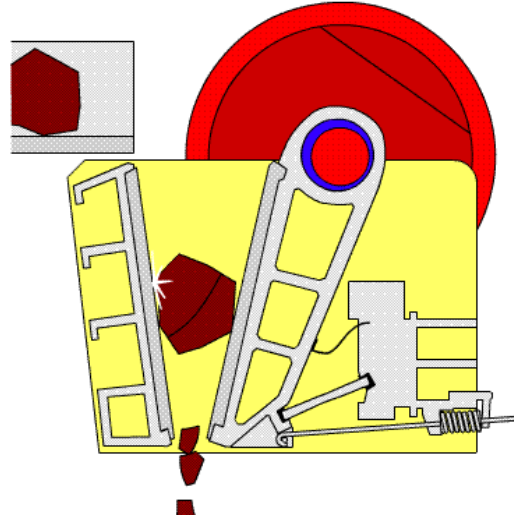


Figura 6.1. Esquema d'una trituradora de mandíbula

#### 6.1.1.1. Característiques de la trituradora de mandíbula

Les característiques més importants de la trituradora de mandíbula són les següents: [31]

- Alt rendiment per triturar
- Uniformitat en la granulometria
- Estructura senzilla
- Fàcil de reparar i operar
- Costos de operació baixos
- Ports d'alimentació i descarrega ajustables
- Aplicacions en diversos medis com mineria, construcció.

#### 6.1.1.2. Model

Per a la trituradora de mandíbula s'ha seleccionat el model PC400x300 de la companyia Henan Hongji Mine Machinery Co., Ltd.

Aquest model s'empra per un gran ventall de materials diferents des de materials de la construcció fins a processament de minerals per la qual cosa és apta i útil per a una trituració inicial del PVC. [32]



Taula 6.1. Propietats tècniques de la trituradora de mandíbula

Dades tècniques	Valor	Unitat
Potència del motor	11	kW
Capacitat	5 – 10	t/h
Mida material entrada	≤100	mm
Mida material sortida	≤10	mm
Mida de la màquina	400x300	mm
Pes de la màquina	800	Kg
Preu	5000 – 6000	€

### 6.1.2. Trituradora d'un eix

La trituradora d'un eix és un equip molt utilitzat actualment, ja que es pot utilitzar amb una gran varietat de materials. Es caracteritzen per un funcionament senzill, tal i com s'observa a la Figura 6.2, consisteix en una alimentació per gravetat i un sistema impulsor que permet dirigir tot el material a triturar cap a un rotor amb fulles de tall on es trenca el material en petites seccions. [33]

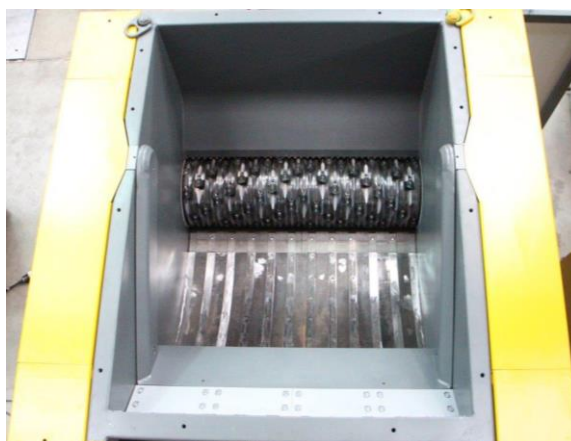


Figura 6.2. trituradora d'un eix

#### 6.1.2.1. Característiques de la trituradora d'un eix

Les característiques més importants de la trituradora d'un eix són les següents: [33]

- Alt rendiment per triturar.
- Gran versatilitat.
- Fàcil manteniment.
- Granulat d'alta qualitat.



### 6.1.2.2. Model

El model seleccionat de trituradora d'un eix és la trituradora QR800 de la companyia UNTHA Ibérica S.A., representada a la Figura 6.3, que és una trituradora per a processar materials com el PVC i té les següents característiques: [33]

Taula 6.2. Propietats tècniques de la trituradora d'un eix

Dades tècniques	Valor	Unitat
Potència	22 – 30	kW
Potència hidràulica	1,1	kW
Amplada de la càmera de tall	800	mm
Diàmetre de la tolva	800 x 1300	mm
Velocitat de rotació del rotor	97	rpm
Mida de les fulles	34	mm
Pes	3,8	t
L x B x H	1580 x 1745 x 1680	mm
Mida dels materials finals	30	mm
Capacitat	800	Kg/h
Preu	5000 – 7000	€



Figura 6.3. Imatge de la trituradora d'un eix

### 6.1.3. Comparativa i selecció de la trituradora

Per tal de seleccionar un dels dos tipus de trituradores la de mandíbula o la de un eix mencionades anteriorment s'ha fet un anàlisi comparatiu de les dues alternatives confeccionant una matriu de filtratge amb la finalitat de poder-les comparar de manera més eficient.

En la matriu de filtratge de la Taula 6.3 s'han escollit diversos paràmetres, referents tant a característiques externes com internes dels equips, que son valorats per a cada alternativa



amb una puntuació entre el 1 i el 10, sent la puntuació més baixa la més negativa i la més alta la més positiva o adequada per a la planta, per tal de que sigui una comparació equitativa s'ha donat a cadascun dels paràmetres un pes segons la importància que denoten aquets en l'objectiu final.

Els criteris utilitzats per a seleccionar la millor alternativa son:

- **Robustesa de la màquina:** S'ha puntuat amb la xifra més baixa aquella opció en que la màquina és més gran i per tant menys còmoda ja que ocuparà més lloc a la planta.
- **Potència necessària:** Es puntua amb un valor inferior aquella alternativa que consumeix més potència ja que això repercutirà directament al cost elèctric necessari per al funcionament.
- **Eficiència de trituració:** S'ha puntuat més alt aquella opció que es considera que millor tritura el PVC en qualsevol de les formes en les que es pugui trobar.
- **Estètica:** Com més agradable sigui l'aspecte que presenta més alta serà la puntuació, tot i que per a aquest projecte no es un paràmetre molt rellevant s'ha considerant però amb un pes molt baix respecte els altres.
- **Cost de la màquina:** Com més econòmic es l'equip millor s'ha valorat l'alternativa.
- **Temps de preparació:** L'opció que menys temps requereixi de preparació serà millor amb la qual cosa es puntua de manera més alta.
- **Mida del material final:** Com més petit sigui el material triturat que s'obté d'aquella alternativa més alt s'ha puntuat aquella opció ja que millor serà per posteriorment dissoldre-ho amb dissolvent.

Taula 6.3. Matriu de filtratge

Criteris	Pes (%)	Trituradora de mandíbula	Trituradora d'un eix
<b>Robustesa de la màquina</b>	10	8	4
<b>Potència necessària</b>	20	9	5
<b>Eficiència en la trituració</b>	20	4	9
<b>Estètica</b>	5	5	8
<b>Cost de la màquina</b>	15	5	5
<b>Temps de preparació</b>	15	5	7
<b>Mida del material final</b>	15	9	8
<b>Puntuació total</b>	<b>100</b>	<b>6,5</b>	<b>6,6</b>

Finalment, tenint en compte la matriu de filtratge, s'ha considerat que la millor alternativa per a la planta de reciclatge de PVC es la trituradora d'un eix, s'ha seleccionat la opció que ha



obtingut una puntuació més alta tenint el compte els pesos de cada paràmetre. A més a més com que la puntuació final de cada model a la matriu de filtratge ha estat molt semblant, el fet que la trituradora de mandíbula tingui una capacitat molt superior a la necessària a la planta de reciclatge també ha fet decidir que la millor opció és la trituradora d'un eix.

## 6.2. Reactor de dissolució

A continuació es dimensiona el primer reactor del procés, el reactor de dissolució.

### 6.2.1. Selecció del material

En primer lloc s'ha dut a terme la selecció del material del reactor a partir de les seves condicions d'operació.

Tenint en compte que el reactor treballa a elevades temperatures i pressions, la millor família de materials per dur a terme el disseny són els acers inoxidable, ja que tenen una excel·lent soldabilitat, molt bona resistència a la corrosió, s'endureixen mitjançant tractament tèrmic, són fàcils de transportar i a més a més poden suportar temperatures i pressions elevades el seu interior. [34]

A partir de les anteriors propietats i les mostrades a la Taula 6.4 s'ha decidit utilitzar un acer inoxidable austenític o també anomenat de la sèrie 300 AISI, caracteritzats per contenir níquel amb el que s'aconsegueix transformar l'estructura cristal·lina a austenita.

Taula 6.4. Propietats generals dels acers inoxidable [34]

Tipus	Resistència a la corrosió	Duresa	Magnètics	Enduribles per tractament tèrmic	Soldabilitat
<b>Martensítics</b>	Baixa	Alta	Si	Si	Poca
<b>Fèrrics</b>	Bona	Mitja-Baixa	Si	No	Limitada
<b>Austenítics</b>	Excel·lent	Alta*	No**	No	Excel·lent

\* Tenen major duresa si són treballats en fred  
 \*\* Tenen una mica de magnetisme si són treballats en fred

A partir de les seves principals aplicacions els acers AISI 304 i 316 són els únics que s'utilitzen per equips de l'indústria química, sent les seves composicions químiques les que es mostren a la Taula 6.5:

Taula 6.5. Composició química dels acers inoxidable AISI 304 i 316 [34]

Tipus	%màx. C	%màx. Mn	%màx. Si	% Cr	% Ni	% Mo
<b>AISI 304</b>	0,08	2	1	18 - 20	8 - 10,5	---
<b>AISI 316</b>	0,08	2	1	16 - 18	10 - 14	2 - 2,5





A partir de l'adició de molibdè a l'acer AISI 316 es millora la resistència a la corrosió per picadures, generada per halògens com el fluor, el color, el brom o el iode. Per tant, com que el PVC conté clor és molt important utilitzar un acer amb resistència a la corrosió.[34]

A la següent taula, Taula 6.6, es mostren algunes de les propietats més importants de l'acer inoxidable austenític AISI 316:

Taula 6.6. Característiques tècniques de l'acer inoxidable austenític AISI 316 [35]

Propietats	Característica	AISI 316	Unitats
<b>Físiques</b>	Pes específic	7,95	g/cm <sup>3</sup>
	Mòdul d'elasticitat	193000	N/mm <sup>2</sup>
	Estructura	Austenítica	
	Calor específic	500 (20 °C)	J/Kg·K
	Conductivitat tèrmica	16 (100 °C)	W/m·K
		21 (150 °C)	
	Coeficient de dilatació tèrmic mitjà	16,02 (100 °C) 16,20 (300 °C)	10 <sup>6</sup> ·°C <sup>-1</sup>
Temperatura de fusió	1371 - 1398	°C	
<b>Elèctriques</b>	Resistència elèctrica	0,74 (20 °C)	μΩm
<b>Mecàniques en calent</b>	Elasticitat	Rp (0,2)	140 (300 °C)
		Rp (1)	166 (300 °C)

Finalment, a la Taula 6.7 i a la Taula 6.8, es mostren algunes recomanacions a tenir en compte a l'hora de mecanitzar l'acer AISI 316, en les operacions de tornejat i fresat.

Taula 6.7. Mecanitzat per tornejat [36]

Paràmetres	Tornejat amb metall dur		Tornejat amb acer ràpid
	De desbast	D'acabat	Tornejat d'acabat
<b>Velocitat de tall (m/min)</b>	170 - 145	160 - 210	25 - 45
<b>Avanç (mm/r)</b>	0,2 - 0,4	0,1 - 0,2	0,1 - 0,5
<b>Profunditat de tall (mm)</b>	1 - 4	0,5 - 1	0,5 - 3
<b>Mecanitzat grup ISO</b>	M20 - M30	M10	

Taula 6.8. Mecanitzat per fresat [36]

Paràmetres	Fresat amb metall dur	
	Fresat de desbast	Fresat d'acabat
<b>Velocitat de tall (m/min)</b>	60 - 120	100 - 155
<b>Avanç (mm/r)</b>	0,2 - 0,3	0,2
<b>Profunditat de tall (mm)</b>	≤ 4	≤ 0,6
<b>Mecanitzat grup ISO</b>	M20 - M30	M10



### 6.2.2. Dimensionat

Per tal de realitzar el dimensionat del reactor de dissolució, s'ha decidit considerar com a dada primordial per als càlculs de la planta de reciclatge que el volum a tractar sigui de 1500 kg de barreja de polímer. Com que no es parteix d'un material pur s'ha fixat que aquest volum presenti un 8% de contaminant, dada basada en la normativa amb número de document, WO2001023463A1, que afirma que els polímers poden contenir aquesta quantitat d'impureses. Per tant dels 1500 kg de barreja només 1380 kg correspondran a PVC, corresponents a un volum de 985,71 L.

$$1380 \text{ kg}_{\text{PVC}} \cdot \frac{1 \text{ L}_{\text{PVC}}}{1,4 \text{ kg}_{\text{PVC}}} = 985,71 \text{ L}$$

Tenint en compte el que s'ha mencionat anteriorment, el 8% de contaminant respecte el total de volum a reciclar correspon a una massa de 120 kg, que amb la densitat del contaminant, dada extreta de la normativa WO2001023463A1, s'obté un volum de contaminant de 104,34 L.

$$120 \text{ kg}_{\text{contaminant}} \cdot \frac{1 \text{ L}_{\text{contaminant}}}{1,15 \text{ kg}_{\text{contaminant}}} = 104,34 \text{ L}$$

Per tant el volum a tractar pel reactor de dissolució és de:

$$V_B = 985,71 + 104,34 = 1090,05 \text{ L} \approx 1,1 \text{ m}^3$$

Segons la normativa, US008338563B2, per cada quilogram de barreja a tractar són necessaris 5 kg de solvent, per tant, en el present projecte s'ha establert la mateixa proporció, així doncs, si es tracten 1500 kg es necessitaran un total de 7500 kg de solvent.

Com a dissolvent per a diluir el PVC s'ha decidit utilitzar una barreja d'aigua, metil-etil-cetona i hexà en les proporcions que estableix la patent amb numero de document, US 008338563B2, a partir de les proporcions s'ha calculat el volum necessari de cada compost. Els resultats dels càlculs queden reflectits en la Taula 6.9.

Taula 6.9. Composició del solvent

Composició	Quantitat de producte	Volum del producte
83% MEK	6225 kg	7,73 m <sup>3</sup>
5% H <sub>2</sub> O	375 kg	0,375 m <sup>3</sup>
12% C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	900 kg	1,374 m <sup>3</sup>

$$V_S = 7,73 + 0,375 + 1,374 = 9,5 \text{ m}^3$$

Un cop calculat els volums necessaris de cadascun dels dissolvents s'obté un volum total de 9,5 m<sup>3</sup> que sumant-li el volum que ocupa la barreja de polímer s'obté un volum de 10,6 m<sup>3</sup>.



$$V_{BS} = 9,5 + 1,1 = 10,6 \text{ m}^3$$

Però com que els volums dels líquids no són additius i hi poden haver contraccions del volum, es suposa que el volum total de barreja de polímer i solvent és de  $10 \text{ m}^3$ .

Tenint en compte que el reactor mai estarà ple al 100%, generalment està compres entre el 70% i el 80% del volum total que ocupa el reactor, ja que s'ha de deixar un espai de seguretat per possibles gasos que es puguin despendre o canvis amb el volum de la dissolució. Per tant s'ha decidit que el reactor tingui un 25% del volum total buit, obtenint un volum final del reactor de  $13,5 \text{ m}^3$ :

$$V_{TR} = \frac{V_{BS}}{0,75} = \frac{10}{0,75} = 13,33 \text{ m}^3 \approx 13,5 \text{ m}^3$$

Per a la caracterització del reactor de dissolució, un reactor Batch, s'ha establert que sigui un dipòsit cilíndric, vertical, amb les dues tapes en forma de semi-casquets esfèrics, el diàmetre del qual és dues terceres parts de l'alçada del dipòsit, requisit que es compleix sempre en aquests tipus de dipòsit.

$$D = \frac{2}{3} \cdot h \quad \text{Eq 6-1}$$

A més a més també s'han de complir les següent relacions que estableixen les normes de dimensionament de dipòsits.

$$V_{\text{cilindre}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h \quad \text{Eq 6-2}$$

$$V_{\text{casquets}} = \frac{\pi}{3} \cdot a^2 \cdot (3 \cdot r - a) \quad \text{Eq 6-3}$$

$$a = 0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot h \quad \text{Eq 6-4}$$

Sabent que la geometria del reactor és cilíndrica amb els casquets semi-esfèrics, es determina l'equació del volum total del reactor a partir de les equació Eq 6-1, Eq 6-2 i Eq 6-3.

$$V_{TR} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h + 2 \cdot \left( \frac{\pi}{3} \cdot a^2 \cdot (3 \cdot r - a) \right) \quad \text{Eq 6-5}$$

L'equació del volum total del reactor, Eq 6-5, es troba en funció de l'alçada total del reactor, per tant a partir d'aquesta equació es pot dimensionar tot el reactor.

$$13,5 = \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot h \right)^2 \cdot h + \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left( 0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot h \right)^2 \cdot \left( 3 \cdot \frac{\frac{2}{3} \cdot h}{2} - 0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot h \right)$$

$$h = 3,25 \text{ m}$$

$$D = \frac{2}{3} \cdot h = 2,16 \text{ m} \approx 2,2 \text{ m}$$



Com que s'ha realitzat aquesta aproximació del diàmetre, el volum del reactor es veurà lleugerament modificat obtenint un valor definitiu de 14 m<sup>3</sup>.

$$V_{TR1} = \frac{\pi}{4} \cdot 2,2^2 \cdot 3,25 + \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3,25\right)^2 \cdot \left(3 \cdot \frac{\frac{2}{3} \cdot 3,25}{2} - 0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3,25\right) = 14 \text{ m}^3$$

### 6.2.2.1. Disseny del reactor tenint en compte la pressió interna:

Com que el disseny del tanc es fa a partir del codi ASME secció VIII, divisió 1, s'han de tenir en compte les condicions internes d'operació. La pressió interna del reactor s'ha considerat de 3,5 bar (0,35 MPa) i la temperatura de treball d'uns 110°C. Un cop definides les condicions internes d'operació s'ha definit la pressió i temperatura de disseny, per determinar aquests valors s'han incrementat les condicions d'operació en un 10% aproximadament, per tant la pressió i temperatura de disseny són 0,385 MPa i 120°C respectivament.

Per dur a terme el disseny a partir de la pressió interna s'ha de tenir en compte el coeficient de seguretat, Eq 6-6, i l'eficiència de les soldadures "E" que es fixa un valor de 1,5 i 0,85 respectivament.

$$\gamma_s = \frac{\sigma_e}{\sigma_{eq}} = 1,5 \div 3 \quad \text{Eq 6-6}$$

$$\sigma_{eq} \leq \frac{\sigma_e}{\gamma_s} = \sigma_{admissible} \quad \text{Eq 6-7}$$

Tot seguit tenint en compte les condicions d'operació, el coeficient de seguretat i l'eficiència de les soldadures a partir de l'equació, Eq 6-8, es calcula el gruix que presenta l'envolvent cilíndrica del dipòsit:

$$t_{cilindre} = \frac{P \cdot R_i}{S \cdot E - 0,6 \cdot P} \quad \text{Eq 6-8}$$

El gruix de l'envolvent cilíndrica del dipòsit calculat a continuació és de 4,3 mm.

$$t_{cilindre} = \frac{0,385 \cdot \frac{2,2}{2}}{\frac{174}{1,5} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 0,385} = 4,31 \text{ mm}$$

Generalment durant la vida útil del reactor el gruix de les parets disminueix com a conseqüència de la corrosió, com que a l'interior del reactor hi haurà clor provinent del PVC, i és un component molt abrasiu, és molt important dimensionar el reactor amb un sobre gruix. Fent una cerca bibliogràfica s'ha trobat que generalment les parets dels reactor es dimensionen amb un sobre gruix extra de 3 mm per evitar el problema de la corrosió. Així doncs s'obté un gruix de l'envolvent de 7,31 mm.

$$t_{Tcilindre} = 4,31 + 3 = 7,31 \text{ mm}$$



Un cop determinat el gruix de l'envolvent s'ha de determinar el gruix dels dos casquets a partir de l'equació, Eq 6-9.

$$t_{\text{casquet}} = \frac{P \cdot R_i}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P} \quad \text{Eq 6-9}$$

A partir de l'equació, Eq 6-9, tal i com es mostra a continuació s'obté un gruix dels casquets de 2,15 mm.

$$t_{\text{casquet}} = \frac{0,385 \cdot \frac{2,2}{2}}{2 \cdot \frac{174}{1,5} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 0,385} = 2,15 \text{ mm}$$

Seguint el mateix procediment que per l'envolvent, el gruix total dels casquets tenint en compte el sobre gruix per la corrosió és de 5,15 mm.

$$t_{T_{\text{casquet}}} = 2,15 + 3 = 5,15 \text{ mm}$$

Tots els càlculs realitzats s'han realitzat considerant que el reactor es troba sense líquid en el seu interior, però s'ha de tenir en compte que generalment el reactor també haurà de suportar la pressió realitzada per la columna de líquid, barreja de polímers i solvent, que es troben el seu interior. Per tant és necessària comprovar si els gruixos determinats anteriorment són els adients amb el reactor ple de líquid.

En primer lloc es calcula el nivell del líquid un cop el reactor està amb la màxima capacitat de líquid el seu interior. Per a realitzar aquest càlcul s'han de calcular els volums de les cúpules i del cilindre mitjançant les equacions Eq 6-2 i Eq 6-3, sent aquests valors de 0,83 m<sup>3</sup> i 12,35 m<sup>3</sup> respectivament. A continuació es mostren els càlculs realitzats:

$$\begin{aligned} V_{\text{cúpula}} &= \frac{\pi}{3} \cdot a^2 \cdot (3 \cdot r - a) = \frac{\pi}{3} \cdot \left(0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot h\right)^2 \cdot \left(3 \cdot \frac{2}{3} \cdot h - 0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot h\right) \\ &= \frac{\pi}{3} \cdot \left(0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3,25\right)^2 \cdot \left(3 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3,25 - 0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3,25\right) = 0,8321 \text{ m}^3 \\ V_{\text{cilindre}} &= \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h = \frac{\pi}{4} \cdot 2,2^2 \cdot 3,25 = 12,35 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Com que el volum total del líquid és de 10 m<sup>3</sup>, la cúpula inferior estarà completament coberta de líquid.

$$V_{\text{restant de líquid}} = 10 - 0,8321 = 9,1679 \text{ m}^3$$

Amb la cúpula inferior completament plena resten aproximadament 9,17 m<sup>3</sup> de líquid, com que el volum del cilindre calculat anteriorment és superior el volum restant de líquid, tota la resta de líquid estarà contingut a l'interior del cilindre. Tot seguit es mostren els càlculs per a determinar l'alçada del líquid a la part cilíndrica del reactor.



$$9,1679 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h \rightarrow 9,1679 = \frac{\pi}{4} \cdot 2,2^2 \cdot h$$

$$h = 2,41 \text{ m}$$

Per tant l'alçada del líquid a l'interior de la part cilíndrica del reactor és de 2,41 m. Per determinar l'alçada total del líquid, s'ha de tenir en compte l'alçada de la cúpula inferior, ja que aquesta està completament plena, i la part que conté líquid del cilindre del reactor, ja que aquesta part no està completament plena.

$$h_{\text{TOTAL}} = 2,41 + 0,25 \cdot 2,2 = 2,96 \text{ m}$$

Tenint en compte que l'alçada total del líquid a l'interior del reactor és de 2,96 m es pot calcular quina és la pressió màxima exercida per la columna de líquid.

$$P_{\text{imax}} = 0,385 + 10^3 \cdot 9,81 \cdot 2,96 \cdot 10^{-6} = 0,414 \text{ MPa}$$

A partir d'aquest valor es calcula el nou gruix necessari, però a diferència dels càlculs anteriors per determinar el gruix, no s'ha de tenir en compte el sobre gruix per corrosió, ja que aquesta prova es realitza amb aigua (s'utilitza aigua enlloc del líquid que contindrà el reactor per tal d'evitar importants contratemps en cas de fuga o fallida de l'equip) quan l'equip és nou i encara no hi ha hagut el desgast provocat per la corrosió.

Així doncs el gruix de l'envolvent, calculat a partir de l'equació Eq 6-8 ha de ser:

$$t_{\text{cilindre}} = \frac{0,414 \cdot \frac{2,2}{2}}{\frac{174}{1,5} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 0,414} = 4,63 \text{ mm}$$

I el gruix dels casquets calculat a partir de l'equació Eq 6-9 ha de ser:

$$t_{\text{casquet}} = \frac{0,414 \cdot \frac{2,2}{2}}{2 \cdot \frac{174}{1,5} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 0,414} = 2,31 \text{ mm}$$

Per tant a partir de la prova hidràulica els gruixos de l'envolvent i dels casquets han de ser 4,63 mm i 2,31 mm respectivament.

### 6.2.2.2. Disseny per pressió externa

Segons el codi ASME secció VIII, divisió 1, a més de tenir en compte les condicions internes d'operació també s'ha de tenir en compte la pressió externa pel disseny del reactor, que en aquest cas és de 0,101 MPa.

A partir dels resultats obtinguts a la prova de disseny per pressió interna, se suposa un gruix total de la paret de la part cilíndrica del reactor de 8 mm, que restant-li els 3 mm de corrosió s'obté un gruix de 5 mm.



Pel disseny per pressió externa també s'han de tenir en compte el nombre total d'anells rigiditzadors que té el reactor, per aquest reactor s'ha considerat que el reactor presenta un anell rigiditzador per fortificar-lo. Per tal de calcular la distància entre dos anells rigiditzador s'ha d'utilitzar la següent equació:

$$L = \frac{h_{\text{TOTAL}}}{n^{\circ}_{\text{anells}} + 1} \quad \text{Eq 6-10}$$

Però com que el reactor només té un anell rigiditzador, la distància L que es calcularà per aquest cas és la distància des de l'extrem del reactor fins a l'anell rigiditzador, és a dir, serà el centre del reactor.

$$L = \frac{3,25 + 2 \cdot 0,25 \cdot 2,2 \cdot \frac{1}{3}}{1 + 1} = 1,81 \text{ m}$$

Un cop calculada la distància L entre anells rigiditzador, que per aquest cas és el centre del reactor, s'han de calcular els quocients adimensionals corresponents a les equacions Eq 6-11 i Eq 6-12. Mitjançant aquests quocients és podran calcular els factors A i B que es determinaran gràficament a partir dels gràfics de la Secció VIII, Divisió 1 del codi ASME.

$$\frac{L}{\text{OD}} \quad \text{Eq 6-11}$$

$$\frac{\text{OD}}{t} \quad \text{Eq 6-12}$$

Els quocients adimensionals que permeten calcular els factors A i B s'han calculat a continuació donant uns valors de 0,819 i 442 respectivament.

$$\frac{L}{\text{OD}} = \frac{1,81}{2,2 + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 0,819$$

$$\frac{\text{OD}}{t} = \frac{2,2 + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = 442$$

Tot seguit amb els valors dels quocients adimensionals i la Figura 6.4 es determinarà gràficament el valor del factor A. Un cop determinat el factor A mitjançant la Figura 6.5 i la Figura 6.6 es determinarà el factor B que permetrà determinar la màxima pressió admissible pel reactor segons l'equació Eq 6-13.

$$P_a = \frac{4 \cdot B}{3 \cdot \left(\frac{\text{OD}}{t}\right)} \quad \text{Eq 6-13}$$



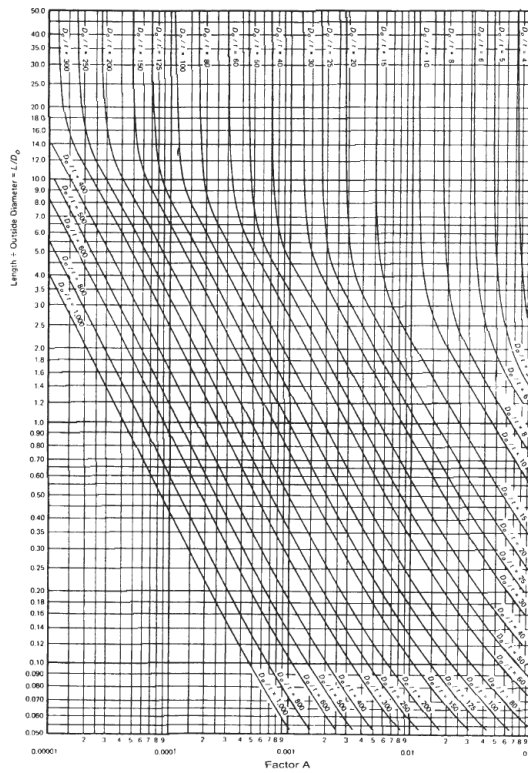


Figura 6.4. Determinació del factor A

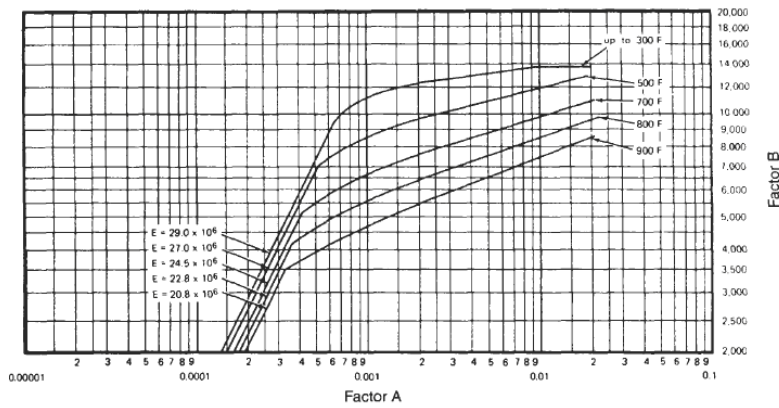


Figura 6.5. Determinació el factor B per a tensions de límit elàstic entre 24 i 30 kpsi

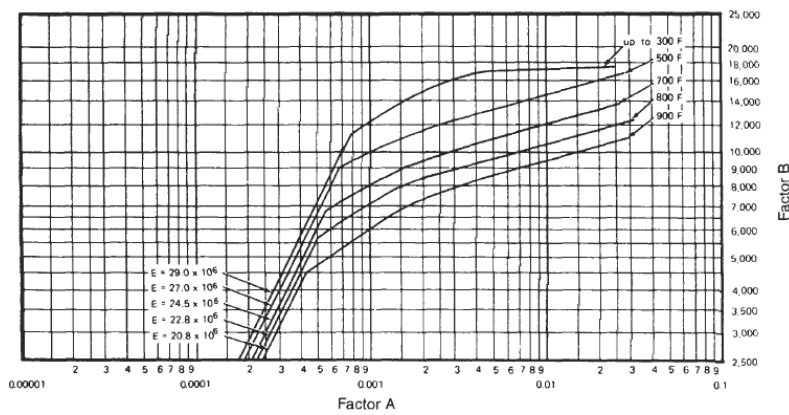


Figura 6.6. Determinació del factor B per a tensions de límit elàstic superiors a 30 kpsi





A partir de les figures anteriors s'ha obtingut un factor A de 0,00018 i com per correspondència un factor B de 2,75 kpsi, és a dir, 18,96 MPa. Per tant a continuació a partir de l'equació Eq 6-13 i els factors A i B es calcula la màxima pressió admissible amb un gruix total de 8 mm.

$$P_a = \frac{4 \cdot 18,96}{3 \cdot 442} = 0,06 \text{ MPa} < 0,101 \text{ MPa}$$

Per tant amb aquest gruix de la paret de l'envolvent es suporta com a màxim una pressió inferior a l'atmosfèrica, per tant, com a conseqüència s'haurà d'augmentar el gruix d'aquesta part del reactor.

A continuació es suposa un gruix de la paret de 10 mm, que restant-li els 3 mm de corrosió s'obté un gruix de 7 mm.

Seguint el mateix procediment que pel cas de 8 mm de gruix s'obtenen els següents quocients adimensionals.

$$\frac{L}{OD} = \frac{1,81}{2,2 + 2 \cdot 7 \cdot 10^{-3}} = 0,82$$

$$\frac{OD}{t} = \frac{2,2 + 2 \cdot 7 \cdot 10^{-3}}{7 \cdot 10^{-3}} = 316,29$$

Un cop s'han calculat els quocients adimensionals a partir de la Figura 6.4, la Figura 6.5 i la Figura 6.6 s'han calculat els nous factors A i B obtenint uns valors de 0,0003 i 4,5 kpsi (31,03 MPa) respectivament.

Finalment s'ha calculat la màxima pressió admissible per aquest nou gruix de la part de l'envolvent del reactor obtenint la següent pressió:

$$P_a = \frac{4 \cdot 31,03}{3 \cdot 316,29} = 0,131 \text{ MPa} > 0,101 \text{ MPa}$$

Per tant, amb un gruix de la paret de 10 mm el reactor podrà suportar la pressió externa, és a dir, l'envolvent del reactor té un gruix final de 10 mm.

Un cop realitzat el dimensionament de l'envolvent del reactor s'han de dimensionar els dos casquets. Segons els resultats obtinguts a la prova de disseny per pressió interna dels casquets, es comprova si un gruix de 7 mm (4 mm si no es té en compte el sobre gruix per corrosió) es suficient per suportar la pressió externa.

Pel cas dels casquets només s'haurà de calcular el quocient corresponent a l'equació Eq 6-12 i el factor A es calcularà mitjançant l'equació Eq 6-14.



$$\text{Factor A} = \frac{0,125}{\frac{\text{OD}}{t}} \quad \text{Eq 6-14}$$

Tot seguit es mostra el càlcul del quocient adimensional donant un valor de 552.

$$\frac{\text{OD}}{t} = \frac{2,2 + 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} = 552$$

A partir del valor del quocient adimensional es calcula el factor A mitjançant l'equació Eq 6-14:

$$\text{Factor A} = \frac{0,125}{552} = 0,00023$$

Seguint el mateix procediment descrit que pel cas de l'envolvent el factor B es determina gràficament a partir de la Figura 6.5 i Figura 6.6, donant un valor pel factor B de 4 kpsi (27,59 MPa), que permetrà calcular mitjançant l'equació Eq 6-15 el valor de la màxima pressió admissible.

$$P_a = \frac{B}{\frac{\text{OD}}{t}} \quad \text{Eq 6-15}$$

Per tant s'ha obtingut com a màxima pressió admissible:

$$P_a = \frac{27,59}{552} = 0,05 \text{ MPa} < 0,101 \text{ MPa}$$

Per tant la màxima pressió admissible és inferior a la pressió externa i com a conseqüència s'haurà d'augmentar el gruix de la paret dels casquets.

Augmentant el gruix de la paret dels casquets fins a 10 mm, s'obté un gruix de 7 mm sense tenir en compte els 3 mm de sobre gruix per corrosió.

Seguint el mateix procediment que pel cas anterior, en primer lloc es calcularà el quocient adimensional i el factor A mitjançant les equacions Eq 6-12 i Eq 6-14.

$$\frac{\text{OD}}{t} = \frac{2,2 + 2 \cdot 7 \cdot 10^{-3}}{7 \cdot 10^{-3}} = 316,29$$

$$\text{Factor A} = \frac{0,125}{\frac{\text{OD}}{t}} = \frac{0,125}{316,29} = 0,0004$$

A partir del factor A i la Figura 6.5 i la Figura 6.6 s'obté un valor de 6 kpsi (41,37 MPa) pel factor B.

Finalment es calcula a partir de l'equació Eq 6-15 el nou valor de la màxima pressió admissible.



$$P_a = \frac{41,37}{316,29} = 0,131 \text{ MPa} < 0,101 \text{ MPa}$$

Per tant amb el gruix de la paret de 10 mm el reactor podrà suportar perfectament la pressió externa, per tant el gruix final dels casquets és de 10 mm.

En resum es presenta la Taula 6.10 on s'inclouen les característiques més importants pel dimensionament del reactor de dissolució.

Taula 6.10. Característiques del reactor de dissolució

Paràmetre	Valor
Diàmetre interior	2,2 m
Alçada del cilindre	3,25 m
Alçada dels casquets	0,55 m
Volum del reactor	14 m <sup>3</sup>
Material	AISI 316
Gruix de la paret de la part cilíndrica	10 mm
Gruix de la paret dels casquets	10 mm
Numero d'anelles de reforç	1 anell

### 6.2.3. Parts del reactor de dissolució

Tot seguit es descriuen les principals entrades i sortides que té el reactor així com la forma final que aquest ha adquirit.

#### 6.2.3.1. Recipient cilíndric i cúpules

El recipient cilíndric s'ha realitzar segons les indicacions de la Taula 6.10, mentre que les cúpules que s'havien considerat semiesfèriques per a la realització dels càlculs, s'han dissenyat amb forma tori-esfèrica per tal de que les entrades i sortides quedin més estables. Per a dimensionar el casquets, tal i com es mostra a la Figura 6.7 s'ha partit de l'alçada del casquet calculada amb anterioritat però a més s'ha afegit la premissa de que la part més vertical del casquet mesuri  $h/3$  sent  $h$  l'alçada de la cúpula

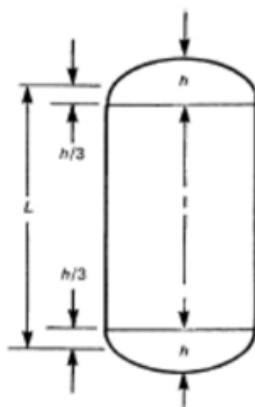


Figura 6.7. Diagrama de disseny del reactor



### 6.2.3.2. Obertures

- **Entrades:** el reactor de dissolució són necessàries dues entrades una per a la entrada dels dissolvents i una altra per a que entri el PVC triturat. Les obertures es troben situades a la part superior del reactor i s'ha decidit que aquestes presentin les mateixes dimensions.

Adicionalment, s'ha afegit una obertura cap a la part cèntrica i superior del reactor per tal de poder introduir l'agitador que ajudarà a homogeneïtzar la dissolució, aquesta entrada però és més estreta ja que s'haurà d'ajustar a la barra de l'agitador.

A més de les entrades dels fluids i del forat central, s'ha considerat necessària la realització d'una boca d'home per tal de que qualsevol operari pugui accedir a l'interior del reactor en cas de necessitat.

- **Sortides:** a la part inferior del reactor hi ha dues sortides, una que és per extreure el fluid interior del reactor amb la mateixa mida que les entrades del plàstic i dels dissolvents i una altra per tal de poder buidar el dipòsit en un moment puntual.

Lateralment hi ha una altra sortida en el sistema d'escalfament per tal de que surtin els condensats que s'han creat al introduir vapor per tal d'escalfar el reactor.

### 6.2.3.3. Agitador

Per tal d'homogeneïtzar la dissolució a l'interior del reactor i que la temperatura sigui més uniforme, s'ha introduït un agitador amb tres nivells de pales d'acer inoxidable, segons el determinat a l'annex B.

L'agitador es col·loca al centre del dipòsit per a tenir major eficiència, aquest es cargolat a l'entrada central per tal que quedi fixe, deixant les pales a l'interior del reactor i el motor a la part de fora.

### 6.2.3.4. Sistema d'escalfament

Com a sistema d'escalfament, per conducció, del reactor s'ha decidit emprar un sistema de circulació de vapor mitjançant un hèlix de tubs semicirculars.

### 6.2.3.5. Sistema de subjecció

S'han incorporat 4 subjeccions per tal de poder mantenir el reactor elevat. Els suports estan formats per un sistema de dos triangles perpendiculars a la superfície del reactor. La representació de la funció dels suports es pot veure a la Figura 6.8.





Figura 6.8. Reactor amb 4 sistemes de subjecció

#### 6.2.3.6. *Altres*

El reactor porta incorporats uns sensors de temperatura i de pressió per tal de poder assegurar que es treballa en les condicions de treball òptimes. A més a més també hi ha sensors que mesuren el nivell de la dissolució mitjançant un sensor radar sense necessitat de contacte per tal d'assegurar que la quantitat que hi ha a l'interior del reactor és l'adequada. A més a més amb aquests sensors es podrà controlar la velocitat d'entrada i sortida del reactor. [37]

### 6.3. Filtre

Tot i existir diferents tècniques de filtració, només es considerarà la necessària per al procés Vinyloop la filtració sòlid-líquid que consta d'una operació en la que el component sòlid que es troba en una dissolució líquida es separa del component líquid fent passar la dissolució per una membrana porosa o un medi filtrant que reté els sòlids. Existeixen diversos tipus de membrana segons l'àmbit en que es doni l'operació per tan cal seleccionar la més adient en cada situació.

Els filtres són fonamentals per tal de garantir la puresa dels fluids i en aquest cas, especialment per eliminar les partícules que no s'han dissolt. La temperatura és una limitació molt important alhora de seleccionar el millor filtre ja que en el present treball es treballa amb temperatures molt elevades, entre 100°C i 120°C, es per això que el material del filtre ha de suportar aquest rang de temperatures, a més també s'ha de tenir en compte la corrosió que suposa el clor en la dissolució a filtrar i que aquesta conté diferents dissolvents que la malla haurà de resistir.

Entre la sortida del reactor de dissolució i l'entrada del reactor de precipitació es col·loca un filtre, com el de la Figura 6.9.

Com que la solució conté substàncies corrosives, el material dels filtres s'ha decidit que sigui d'acer inoxidable 316 que a més a més permetrà suporta altes temperatures, de fins a 260°C, que serà ideal per a poder-lo emprar just a la sortida del reactor.



El filtre escollit s'anomena separador sòlid-líquid i consta d'un tub per on entra la solució a filtrar i on posteriorment separa la part sòlida de la solució, desviant aquesta del trajecte, de la part líquida que continua el cicle cap al següent equip. S'ha escollit aquest equip ja que presenta molta capacitat de filtratge a més de no retenir la part sòlida en l'interior com altres mètodes que necessitarien doncs un temps de neteja de filtre entre cicles de treball el que ocasionaria més temps de procés.



Figura 6.9. Filtres metàl·lics d'acer inoxidable 316

## 6.4. Reactor de precipitació

Tot seguit es dimensiona el segon reactor del procés de reciclatge de PVC, el reactor de precipitació.

### 6.4.1. Selecció del material

Seguint el procediment del reactor de dissolució, inicialment s'ha seleccionat a partir de les condicions d'operació el material del reactor.

Considerant que les condicions d'operació son molt semblants que les del reactor de dissolució, en aquest cas també s'ha decidit utilitzar l'acer AISI 316 com el material per a la construcció d'aquest segon reactor.

### 6.4.2. Dimensionat

Per aquest reactor la dada més important que s'ha de tenir en compte és la quantitat d'aigua que s'ha d'afegir per a dur a terme una bona precipitació del PVC, aquest valor ha estat buscar bibliogràficament i a la patent EP0945481B1 cita que una adequada proporció per a dur a terme la precipitació del PVC és un quilogram d'aigua per cada quilogram de metil-etil-cetona que contingui el solvent. Per tant per aquest procés el tenir 6225 kg de metil-etil-cetona es necessiten 6225 kg d'aigua o que és el mateix que  $6,225 \text{ m}^3$  d'aigua.

D'altre banda com que entre el reactor de dissolució i el de precipitació hi ha un filtre per extreure tota la matèria contaminant, a aquest reactor ja no hi ha els 120 kg de contaminant.



Tenint en compte totes les matèries provinents de l'etapa anterior que estan presents a la Taula 3.2 i el volum de l'aigua que s'ha d'afegir, s'obté un volum total del reactor de 16,75 m<sup>3</sup>.

Taula 6.11. Dades pels productes provinents del procés de filtratge

Producte	Quantitat del producte	Volum del producte
PVC	1380 kg	0,985 m <sup>3</sup>
MEK	6225 kg	7,73 m <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> O	375 kg	0,375 m <sup>3</sup>
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	900 kg	1,374 m <sup>3</sup>

Però com que els volums dels líquids no són additius i generalment hi ha contraccions del volum, es suposa que el volum total és de 16,25 m<sup>3</sup>.

Igual que el reactor de dissolució, s'ha decidit que el reactor tingui un 25% del volum total buit.

$$V_{TR} = \frac{V_{BS}}{0,75} = \frac{16,25}{0,75} = 21,66 \text{ m}^3 \approx 21,75 \text{ m}^3$$

A partir de la geometria cilíndrica del reactor amb els casquets semi-esfèrics, s'obté l'equació del volum total del reactor Eq 6-5, que substituint el volum total del reactor pels 21,75 m<sup>3</sup> queda:

$$21,75 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot h\right)^2 \cdot h + \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot h\right)^2 \cdot \left(3 \cdot \frac{\frac{2}{3} \cdot h}{2} - 0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot h\right)$$

Equació a partir de la qual s'ha pogut calcular l'alçada de la part cilíndrica del reactor, obtenint una alçada de 3,8 m, per tant el diàmetre calculat a partir de l'equació Eq 6-1 és d'aproximadament 2,6 m. Com que el diàmetre del reactor s'ha aproximat el volum d'aquest es veurà lleugerament modificat, obtenint un volum definitiu de 22,85 m<sup>3</sup>.

#### 6.4.2.1. Disseny del reactor tenint en compte la pressió interna

Segons el codi ASME secció VIII, divisió 1, s'han de tenir en compte les condicions internes d'operació, és a dir, la pressió i temperatura. Per aquest reactor la pressió i temperatura interna d'operació seran de 0,101 MPa i uns 100°C. A partir d'aquestes condicions internes d'operació s'ha definit la pressió i temperatura de disseny, incrementant les condicions d'operació en un 10% aproximadament, obtenint una pressió i temperatura de disseny de 0,111 MPa i 110°C respectivament.

Per aquest reactor, igual que l'anterior, el coeficient de seguretat i l'eficiència de les soldadures continuaran sent de 1,5 i 0,85 respectivament.

El càlcul del gruix de l'envolvent es realitza a partir de l'equació Eq 6-8, obtenint un gruix de 1,46 mm.



$$t_{\text{cilindre}} = \frac{0,111 \cdot \frac{2,6}{2}}{\frac{174}{1,5} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 0,111} = 1,46 \text{ mm}$$

Però tenint en compte el sobre gruix de 3 mm per corrosió, s'obté un gruix final de 4,46 mm.

Amb el gruix de l'envolvent calculat, s'ha de definir el gruix dels dos casquets a partir de l'equació Eq 6-9.

$$t_{\text{casquet}} = \frac{0,111 \cdot \frac{2,6}{2}}{2 \cdot \frac{174}{1,5} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 0,111} = 0,73 \text{ mm}$$

Per tant el gruix dels casquets és de 0,73 mm que tenint en compte el sobre gruix pels efectes de la corrosió, es té un gruix final de 3,73 mm.

Un cop definit el gruix de totes les parets del reactor, s'ha de realitzar la prova hidràulica per comprovar si tots els gruixos són els adients o bé s'han de reforçar i augmentar-se.

Per tal de determinar l'alçada de la columna d'aigua de l'interior del reactor, en primer lloc, a partir de les equacions Eq 6-2 i Eq 6-3 s'han de determinar els volums de les cúpules i de l'envolvent del reactor.

$$\begin{aligned} V_{\text{cúpula}} &= \frac{\pi}{3} \cdot a^2 \cdot (3 \cdot r - a) = \frac{\pi}{3} \cdot \left(0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot h\right)^2 \cdot \left(3 \cdot \frac{2}{3} \cdot h - 0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot h\right) \\ &= \frac{\pi}{3} \cdot \left(0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3,8\right)^2 \cdot \left(3 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3,8 - 0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3,8\right) = 1,33 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$V_{\text{cilindre}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h = \frac{\pi}{4} \cdot 2,6^2 \cdot 3,8 = 20,18 \text{ m}^3$$

Com que el volum total del líquid és de 16,25 m<sup>3</sup>, la cúpula inferior s'omplirà completament i com que el volum restant de líquid és inferior el volum de l'envolvent, tot aquest estarà contingut a l'interior de l'envolvent.

$$V_{\text{restant de líquid}} = 16,25 - 1,33 = 14,92 \text{ m}^3$$

Partint de l'equació Eq 6-2 es calcula l'alçada de la columna de líquid de l'interior de l'envolvent.

$$14,92 = \frac{\pi}{4} \cdot 2,6^2 \cdot h \rightarrow h = 2,81 \text{ m}$$

Per tant l'alçada del líquid a l'interior de la part cilíndrica és de 2,81 m, és a dir, l'alçada total del líquid a l'interior del reactor és de:

$$h_{\text{TOTAL}} = 2,81 + 0,25 \cdot 2,6 = 3,46 \text{ m}$$





Amb l'alçada total es pot calcular la pressió interna màxima, obtenint el següent valor:

$$P_{i_{\max}} = 0,111 + 10^3 \cdot 9,81 \cdot 3,46 \cdot 10^{-6} = 0,145 \text{ MPa}$$

A partir d'aquesta nova pressió es determinen els nous gruixos de les parets per tal de comprovar si els calculats anteriorment poden suportar aquesta pressió.

Així doncs a partir de les equacions Eq 6-8 i Eq 6-9 es calcula el nou gruix de l'envolvent i dels casquets.

$$t_{\text{cilindre}} = \frac{0,145 \cdot \frac{2,6}{2}}{\frac{174}{1,5} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 0,145} = 1,91 \text{ mm}$$

$$t_{\text{casquet}} = \frac{0,145 \cdot \frac{2,6}{2}}{2 \cdot \frac{174}{1,5} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 0,145} = 0,96 \text{ mm}$$

Per tant a partir de la prova hidràulica els gruixos de l'envolvent i dels casquets han de ser 1,91 mm i 0,96 mm respectivament. Com el reactor de dissolució, no s'ha de tenir en compte el sobre gruix ja que aquesta prova es duu a terme quan l'equip és nou i encara no hi ha hagut cap tipus de desgast provocat per la corrosió.

#### **6.4.2.2. Disseny per pressió externa**

Un cop dimensionat el reactor segons la pressió interna, la secció VIII, divisió 1, de codi ASME diu que també s'ha de tenir en compte la pressió externa pel disseny del reactor, que en aquest cas és de 0,101 MPa.

A partir dels resultats obtinguts a la prova de disseny per pressió interna, se suposa un gruix total de la paret de l'envolvent del reactor de 7 mm, que restant-li els 3 mm de corrosió s'obté un gruix de 4 mm.

Com que aquest reactor té unes dimensions més grans que el reactor de dissolució s'ha decidit que tingui dos anells rigiditzadors, per tant la distància entre anells rigiditzadors es calcularà segons l'equació Eq 6-10.

$$L = \frac{3,8 + 2 \cdot 0,25 \cdot 2,6 \cdot \frac{1}{3}}{2 + 1} = 1,41 \text{ m}$$

Per tant amb la distància entre anells rigiditzadors es poden calcular els dos quocients adimensionals, a partir de les equacions Eq 6-11 i Eq 6-12.

$$\frac{L}{OD} = \frac{1,41}{2,6 + 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 0,541$$



$$\frac{OD}{t} = \frac{2,6 + 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} = 652$$

Per tant a partir dels dos quocients adimensionals i la Figura 6.4 es pot determinar gràficament el factor A, donant un valor de 0,00012. Tot seguit amb el factor A i la Figura 6.5 i la Figura 6.6 es determina gràficament el factor B amb un valor de 2,25 kpsi (15,51 MPa).

Finalment a partir de l'equació Eq 6-13 s'ha calculat la màxima pressió admissible per de la part de l'envolvent del reactor.

$$P_a = \frac{4 \cdot 15,51}{3 \cdot 652} = 0,032 \text{ MPa} < 0,101 \text{ MPa}$$

Per tant aquest gruix de l'envolvent no és suficient per suportar la pressió externa de 0,101 MPa, com a conseqüència, s'ha augmentat el gruix de l'envolvent fins a 10 mm ja que la màxima pressió admissible encara està molt allunyada de la pressió externa.

Seguint el mateix procediment que pel cas de 7 mm de gruix primer es calculen els dos quocients adimensionals.

$$\frac{L}{OD} = \frac{1,41}{2,6 + 2 \cdot 7 \cdot 10^{-3}} = 0,539$$

$$\frac{OD}{t} = \frac{2,6 + 2 \cdot 7 \cdot 10^{-3}}{7 \cdot 10^{-3}} = 373,43$$

A partir dels quocients adimensionals i la Figura 6.4, la Figura 6.5 i la Figura 6.6 s'han calculat els nous factors A i B obtenint uns valors de 0,00031 i 5 kpsi (34,47 MPa) respectivament.

Finalment s'ha calculat la màxima pressió admissible per aquest nou gruix.

$$P_a = \frac{4 \cdot 34,47}{3 \cdot 373,43} = 0,123 \text{ MPa} > 0,101 \text{ MPa}$$

Per tant, amb un gruix de la paret de 10 mm el reactor podrà suportar la pressió externa, és a dir, l'envolvent del reactor té un gruix final de 10 mm.

Un cop realitzat el dimensionament de l'envolvent s'han de dimensionar els dos casquets. Com que tots els dimensionaments realitzats anteriorment el gruix de les parets ha estat de 10 mm, per aquest cas també es partirà inicialment d'aquest gruix.

Pel cas dels casquets, el procediment a seguir per calcular el factor A és diferent ja que es calcula mitjançant l'equació Eq 6-14.

$$\text{Factor A} = \frac{0,125}{373,43} = 0,00033$$



Seguint el mateix procediment descrit que pel cas de l'envolvent el factor B es determina gràficament a partir de la Figura 6.5 i Figura 6.6, donant un valor pel factor B de 5,5 kpsi (37,92 MPa), que permetrà calcular mitjançant l'equació Eq 6-15 el valor de la màxima pressió admissible.

$$P_a = \frac{37,92}{373,43} = 0,102 \text{ MPa} > 0,101 \text{ MPa}$$

Per tant amb el gruix de la paret de 10 mm es podrà suportar la pressió externa.

En resum es presenta la Taula 6.12 on s'inclouen les característiques més importants pel dimensionament del reactor de precipitació.

Taula 6.12. Característiques del reactor de precipitació

Paràmetre	Valor
Diàmetre interior	2,6 m
Alçada del cilindre	3,8 m
Alçada dels casquets	0,65 m
Volum del reactor	22,85 m <sup>3</sup>
Material	AISI 316
Gruix de la paret de la part cilíndrica	10 mm
Gruix de la paret dels casquets	10 mm
Numero d'anelles de reforç	2 anells

### 6.4.3. Parts del reactor de precipitació

Tot seguit es dimensiona el segon reactor del procés de reciclatge de PVC, el reactor de precipitació

#### 6.4.3.1. Recipient cilíndric i cúpules

El recipient cilíndric i les cúpules del reactor de precipitació s'han efectuat de la mateixa forma que pel reactor de dissolució, seguint les mesures corresponents a aquest reactor especificades a la Taula 6.12.

#### 6.4.3.2. Obertures

- **Entrades:** existeixen dues entrades en la part superior del reactor corresponents a la entrada de la dissolució provinent del depòsit anterior i una altra per a poder introduir els additius necessaris en aquesta etapa, també hi ha una entrada en la part lateral del reactor d'una mida inferior per l'entrada del vapor d'aigua.
- **Sortides:** el reactor presenta una sortida a la part superior per tal de poder extreure el dissolvent i una sortida en la part inferior per tal de poder retirar el precipitat.



### **6.4.3.3. Sistema de subjecció**

Per al reactor de precipitació s'ha decidit emprar el mateix mètode de subjecció que al reactor de dissolució, incorporant els 4 elements on poder recolzar el dipòsit.

### **6.4.3.4. Anells rígids**

S'han incorporat dos anell rígids per tal de donar força al dipòsit, tal i com s'ha descrit anteriorment.

## **6.5. Assecador o centrifugadora**

Una centrifugadora és una màquina que serveix per assecar substàncies o per separar els components d'una massa o mescla en funció de la seva densitat fent ús de la força centrífuga, que és aquella basada en un eix de referència amb l'eix giratori respecte del qual la substància gira al seu voltant i crea una força no visible cap a fora.

Actualment la centrifugació és un mètode mecànic utilitzat en un ampli ventall d'indústries, sent algunes de les més importants l'indústria química petroquímica, la refinaria o l'alimentària. En el cas de l'indústria química un dels usos més comuns és la deshumidificació de substàncies. Pel que fa al procés de reciclatge del PVC, s'introdueix el polímer precipitat a l'interior de la centrifugadora on es deshumidificaran totes les partícules de PVC reciclat obtenint el producte final del procés, el PVC sec i reciclat, i d'altra banda un flux d'aigua que es pot reutilitzar al reactor de precipitació en forma de vapor d'aigua.

Per seleccionar l'equip de centrifugació més adient s'han tingut en compte diferents paràmetres alguns dels més importants són el producte final que s'obté i la quantitat de producte que es vol tractar per hora.

S'han seleccionat dos models diferents de centrifugadores verticals, ideals per separar sòlids de líquids, que es descriuen a continuació.

### **6.5.1. Model 1: AC1500**

La AC1500, Figura 6.10, és una centrifugadora de l'empresa Flottweg Separation Technology que funciona a una velocitat de rotació molt més elevada que la majoria de centrifugadores i com a conseqüència permet separar qualsevol tipus de partícula sòlida d'un líquid a més a més de poder separar el mateix instant líquids de diferents densitats. [39]



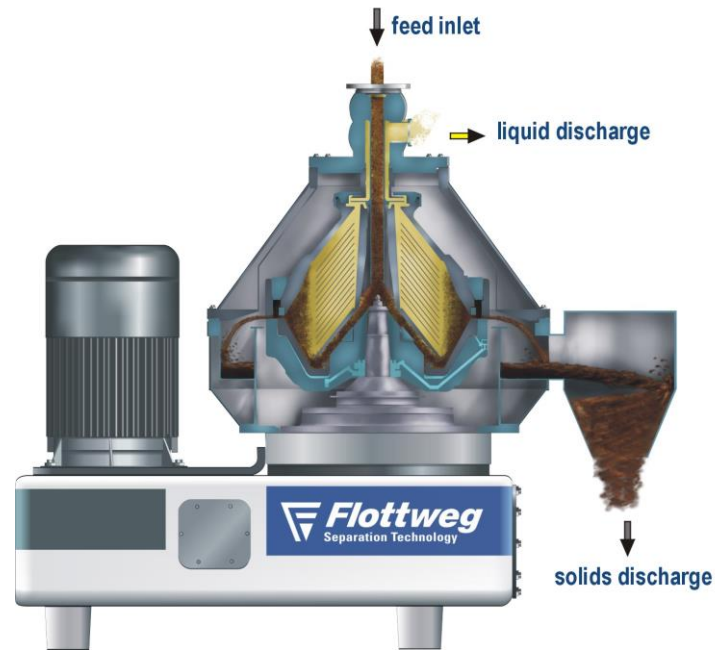


Figura 6.10. Centrífuga AC1500

Les seves característiques principals són les de la Taula 6.13:

Taula 6.13. Característiques de la centrífuga AC1500

Dades tècniques	Valor	Unitat
Motor	18,5	kW
Capacitat hidràulica	20000	l/h
Dimensions	1500x1000x1700x2400	mm
Pes	1550	kg

### 6.5.2. Model 2: SC o RC120VxDEC

La SC o RC120VxDEC, Figura 6.11, és una centrífuga de l'empresa Rousselet Robatel i és ideal per a l'indústria química. Es tracta d'una centrífuga amb descarrega pel fons i amb un sistema de neteja incorporat. [40]





Figura 6.11. Centrifugadora SC o RC120VxDEC

Les seves característiques principals són les de la Taula 6.14:

Taula 6.14. Característiques de la centrifugadora SC o RC120VxDEC

Dades tècniques	Valor	Unitat
<b>Motor</b>	15	kW
<b>Volum</b>	310	l
<b>Càrrega màxima</b>	390	kg
<b>Dimensions</b>	600 (Altura) 1200 (diàmetre)	mm
<b>Pes</b>	3200	kg

### 6.5.3. Comparativa i selecció de la centrifugadora

Per tal de seleccionar un dels dos tipus de centrifugadora s'ha fet un anàlisi comparatiu de les dos alternatives confeccionant una matriu de filtratge, Taula 6.15, amb la finalitat de poder-les comparar de manera més eficient.

Els criteris utilitzats per a seleccionar la millor alternativa son:

- **Potència necessària:** Es puntua amb un valor inferior aquella alternativa que consumeix més potència ja que això repercutirà directament al cost elèctric necessari per al funcionament.
- **Capacitat:** Contra més capacitat de processament major puntuació ha estat assignada.
- **Dimensions:** S'ha puntuat amb la xifra més baixa aquella opció en que la màquina és més gran i per tant menys còmoda ja que ocuparà més lloc a la planta.
- **Pes:** Com el dimensionament, un major pes provocarà que el moviment de la màquina sigui més complex i per tant es puntua amb una menor puntuació.



- **Cost de la màquina:** Com més econòmic es l'equip millor s'ha valorat l'alternativa.
- **Estètica:** Com més agradable sigui l'aspecte que presenta més alta serà la puntuació, tot i que per a aquest projecte no es un paràmetre molt rellevant s'ha considerant però amb un pes molt baix respecte els altres.

Taula 6.15. Matriu de filtratge

Criteri	Pes (%)	AC1500	SC o RC120VxDEC
Potència necessària	25	5	8
Capacitat	25	5	8
Dimensions	15	5	7
Pes	10	7	4
Cost	20	5	6
Estètica	5	10	8
<b>Puntuació total</b>	100	5,45	7,05

Finalment, tenint en compte la matriu de filtratge, s'ha considerat que la millor alternativa per a la planta de reciclatge de PVC és la centrifugadora SC o RC120VxDEC. La opció seleccionada ha estat la que ha obtingut una puntuació més alta tenint el compte els pesos de cada paràmetre.

## 6.6. Decantador

La decantació del dissolvent es realitza en dues etapes, la primera a l'interior de l'equip decantador, dimensionat a continuació, i la segona on s'acabarà de separar les dues fases a partir d'un mètode d'assecamment per dissolvents orgànics com pot ser un tamís molecular, que retindrà la major part de l'aigua continguda en el MEK.

El dimensionat del decantador, utilitzat per a separar l'aigua del dissolvent es realitza a continuació.

### 6.6.1. Selecció del material

Com a material per a dissenyar el decantador també s'ha seleccionat l'acer inoxidable AISI 316, ja que com els reactors aquest també tindrà al seu interior petites quantitats de cor provinents del dissolvent.

### 6.6.2. Dimensionat

El decantació continuarà els productes mostrats a la Taula 6.16, provinents del reactor de precipitació.



Taula 6.16. Dades dels productes provinents del procés de precipitació

Producte	Quantitat del producte	Volum del producte
MEK	6225 kg	7,73 m <sup>3</sup>
H2O	5975 kg*	5,975 m <sup>3</sup>
C6H14	900 kg	1,374 m <sup>3</sup>

\*375 kg del dissolvent i 5290 kg afegits a l'etapa de precipitació, s'ha de tenir en compte que a l'etapa de precipitació s'han afegit 6225 kg d'aigua i d'aquests un 10% està amb el PVC i serà extreta el procés de centrifugació o assecat.

Per tant es té un volum de 15,1 m<sup>3</sup>, però com que els volums dels líquids no són additius i generalment hi ha contraccions del volum, es suposa que el volum total és de 15 m<sup>3</sup>.

Com en el cas del reactor de dissolució i precipitació, s'ha decidit que el decantador tingui un 25% del volum total buit.

$$V_{TD} = \frac{V_D}{0,75} = \frac{15}{0,75} = 20 \text{ m}^3$$

A partir de la geometria cilíndrica del decantador amb els casquets semi-esfèrics, s'obté l'equació del volum total del decantador Eq 6-5, que substituint el volum total del decantador pels 20 m<sup>3</sup> s'obté:

$$20 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot h\right)^2 \cdot h + \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \left(0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot h\right)^2 \cdot \left(3 \cdot \frac{\frac{2}{3} \cdot h}{2} - 0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot h\right)$$

A partir d'aquesta equació s'ha pogut calcular l'alçada de la part cilíndrica del decantador, obtenint un valor de 3,7 m i com a conseqüència s'ha obtingut un diàmetre de 2,4. Com que s'ha aproximat el diàmetre del decantador a un més estàndard, el volum d'aquest es veurà modificat, obtenint un volum amb un valor final de 20,61 m<sup>3</sup>.

### 6.6.2.1. Disseny del decantador tenint en compte la pressió interna

Segons el codi ASME secció VIII, divisió 1, s'ha de tenir en compte la pressió i la temperatura interna d'operació, que són de 0,101 MPa i 35°C, respectivament. A partir d'aquestes condicions d'operació es determinen les condicions de disseny, un 10% superiors a les condicions d'operació, és a dir, la pressió i la temperatura de disseny seran de 0,111 MPa i 38,5°C respectivament.

Pel decantador, com els dos reactors, el coeficient de seguretat i l'eficiència de les soldadures seran de 1,5 i 0,85 respectivament.

A partir de l'equació Eq 6-8, es calcula el gruix de l'envolvent, que serà de 1,35 mm.

$$t_{\text{cilindre}} = \frac{0,111 \cdot \frac{2,4}{2}}{\frac{174}{1,5} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 0,111} = 1,35 \text{ mm}$$





Però tenint en compte el sobre gruix de 3 mm per corrosió, s'obté un gruix final de 4,35 mm.

Tot seguit a partir de l'equació Eq 6-9, es calcula el gruix dels dos casquets, obtenint un gruix de 0,68 mm.

$$t_{\text{casquet}} = \frac{0,111 \cdot \frac{2,4}{2}}{2 \cdot \frac{174}{1,5} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 0,111} = 0,68 \text{ mm}$$

Però tenint en compte el sobre gruix de 3 mm per corrosió, s'obté un gruix de 3,68 mm.

Amb el gruix de tot el decantador definit, s'ha de realitzar la prova hidràulica per comprovar si aquest es adient o s'ha de reforçar una mica més.

Per tal de determinar l'alçada de la columna d'aigua de l'interior del decantador, inicialment, s'han de determinar els volums de les cúpules i de l'envolvent del decantador a partir de les equacions Eq 6-2 i Eq 6-3.

$$\begin{aligned} V_{\text{cúpula}} &= \frac{\pi}{3} \cdot a^2 \cdot (3 \cdot r - a) = \frac{\pi}{3} \cdot \left(0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot h\right)^2 \cdot \left(3 \cdot \frac{\frac{2}{3} \cdot h}{2} - 0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot h\right) \\ &= \frac{\pi}{3} \cdot \left(0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3,7\right)^2 \cdot \left(3 \cdot \frac{\frac{2}{3} \cdot 3,7}{2} - 0,25 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3,7\right) = 1,23 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$V_{\text{cilindre}} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot h = \frac{\pi}{4} \cdot 2,4^2 \cdot 3,7 = 16,74 \text{ m}^3$$

Com que el volum total del líquid és de 15 m<sup>3</sup>, la cúpula inferior s'omplirà completament i com que el volum restant de líquid és inferior el volum de l'envolvent, tot aquest estarà contingut a l'interior de l'envolvent

$$V_{\text{restant de líquid}} = 15 - 1,23 = 13,77 \text{ m}^3$$

A partir de l'equació Eq 6-2 s'obté l'alçada de la columna de líquid a l'interior de l'envolvent.

$$13,77 = \frac{\pi}{4} \cdot 2,4^2 \cdot h \rightarrow h = 3,04 \text{ m}$$

Per tant l'alçada total del líquid a l'interior del decantador és de 3,64 m.

$$h_{\text{TOTAL}} = 3,04 + 0,25 \cdot 2,4 = 3,64 \text{ m}$$

Amb l'alçada total es pot calcular la pressió interna màxima, que és de 0,147 MPa.

$$P_{\text{I}_{\text{max}}} = 0,111 + 10^3 \cdot 9,81 \cdot 3,64 \cdot 10^{-6} = 0,147 \text{ MPa}$$



Com a conseqüència s'ha de comprovar si el gruix del decantador determinar anteriorment pot suportar aquesta pressió. Per tant a partir de les equacions Eq 6-8 i Eq 6-9 es recalcula el gruix de l'envolvent i dels casquets.

$$t_{\text{cilindre}} = \frac{0,147 \cdot \frac{2,4}{2}}{\frac{174}{1,5} \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 0,147} = 1,79 \text{ mm}$$

$$t_{\text{casquet}} = \frac{0,147 \cdot \frac{2,4}{2}}{2 \cdot \frac{174}{1,5} \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 0,147} = 0,89 \text{ mm}$$

Per tant a partir de la prova hidràulica els gruixos de l'envolvent i dels casquets han de ser 1,79 mm i 0,89 mm respectivament. No s'ha de tenir en compte el sobre gruix ja que aquesta prova es duu a terme quan l'equip és nou i encara no hi ha hagut cap tipus de desgast provocat per la corrosió.

#### 6.6.2.2. Disseny per pressió externa

Seguint el procediment establert per la secció VIII, divisió 1 del codi ASME, també s'ha de tenir en compte la pressió externa pel disseny del decantador, sent aquesta de 0,101 MPa.

A partir dels resultats obtinguts a la prova de disseny per pressió interna, se suposa un gruix total de la paret de l'envolvent del decantador de 7 mm, que restant-li els 3 mm de corrosió s'obté un gruix de 4 mm.

Degut a les grans dimensions del decantador, s'ha decidit dissenyar-lo utilitzant dos anells rigiditzadors. La distància entre anells calculada a partir de l'equació Eq 6-10 és de 1,37 m.

$$L = \frac{3,7 + 2 \cdot 0,25 \cdot 2,4 \cdot \frac{1}{3}}{2 + 1} = 1,37 \text{ m}$$

Per tant amb la distància entre anells rigiditzadors es poden calcular els dos quocients adimensionals, a partir de les equacions Eq 6-11 i Eq 6-12.

$$\frac{L}{OD} = \frac{1,37}{2,4 + 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 0,569$$

$$\frac{OD}{t} = \frac{2,4 + 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} = 602$$

Per tant a partir dels dos quocients adimensionals i la Figura 6.4 es pot determinar gràficament el factor A, obtenint un valor de 0,00013. A continuació amb el factor A i la Figura 6.5 i la Figura 6.6 es determina gràficament el factor B, obtenint un valor de 2,40 kpsi (16,55 MPa).



Finalment a partir de l'equació Eq 6-13 s'ha calculat la màxima pressió admissible per l'envolvent del decantador.

$$P_a = \frac{4 \cdot 16,55}{3 \cdot 602} = 0,037 \text{ MPa} < 0,101 \text{ MPa}$$

Per tant aquest gruix de l'envolvent no és suficient per suportar la pressió externa de 0,101 MPa, com a conseqüència, s'ha augmentat el gruix de l'envolvent fins a 10 mm ja que la màxima pressió admissible encara està molt allunyada de la pressió externa.

Seguint el mateix procediment anterior es calculen de nou els dos quocients adimensionals.

$$\frac{L}{OD} = \frac{1,37}{2,4 + 2 \cdot 7 \cdot 10^{-3}} = 0,568$$

$$\frac{OD}{t} = \frac{2,4 + 2 \cdot 7 \cdot 10^{-3}}{7 \cdot 10^{-3}} = 344,86$$

A partir dels quocients adimensionals i la Figura 6.4, la Figura 6.5 i la Figura 6.6 s'han calculat els nous factors A i B obtenint uns valors de 0,00039 i 5,75 kpsi (39,46 MPa) respectivament.

Finalment s'ha calculat la màxima pressió admissible per aquest nou gruix.

$$P_a = \frac{4 \cdot 39,46}{3 \cdot 344,86} = 0,153 \text{ MPa} > 0,101 \text{ MPa}$$

Per tant, amb un gruix de 10 mm l'envolvent podrà suportar la màxima pressió externa, és a dir, l'envolvent del decantador té un gruix final de 10 mm.

Un cop realitzat el dimensionament de l'envolvent s'han de dimensionar els dos casquets. Com que tots els dimensionaments realitzats anteriorment el gruix de les parets ha estat de 10 mm, per aquest cas també es partirà inicialment d'aquest gruix.

Pel cas dels casquets, el procediment a seguir per calcular el factor A és diferent ja que es calcula mitjançant l'equació Eq 6-14.

$$\text{Factor A} = \frac{0,125}{344,86} = 0,00036$$

Seguint el mateix procediment descrit que pel cas de l'envolvent el factor B es determina gràficament a partir de la Figura 6.5 i la Figura 6.6, donant un valor pel factor B de 5,65 kpsi (38,96 MPa), que permetrà calcular mitjançant l'equació Eq 6-15 el valor de la màxima pressió admissible.



$$P_a = \frac{38,96}{344,86} = 0,113 \text{ MPa} > 0,101 \text{ MPa}$$

Per tant amb el gruix de 10 mm els casquets podran suportar la màxima pressió externa.

Finalment, com a resum es presenta la Taula 6.17 on s'inclouen les característiques més importants pel dimensionament del decantador.

Taula 6.17. Característiques del decantador

Paràmetre	Valor
Diàmetre interior	2,4 m
Alçada del cilindre	3,7 m
Alçada dels casquets	0,62 m
Volum del decantador	20 m <sup>3</sup>
Material	AISI 316
Gruix de la paret de la part cilíndrica	10 mm
Gruix de la paret dels casquets	10 mm
Numero d'anells de reforç	2 anells

### 6.6.3. Parts del decantador

Tot seguit es descriuen les principals entrades i sortides que té el decantador, així com la forma final que ha adquirit.

#### 6.6.3.1. Recipient cilíndric i cúpules

El recipient cilíndric s'ha realitzat segons les indicacions de la Taula 6.17, mentre que les cúpules que s'havien considerat semiesfèriques per a la realització dels càlculs, s'han dissenyat amb forma tori-esfèrica per tal de que les entrades i sortides quedin més estables. Per a dimensionar els casquets, tal i com es mostra a la Figura 6.7 s'ha partit de l'alçada del casquet calculant amb anterioritat però a més s'ha afegit la premissa de que la part més vertical del casquet mesuri h/3 sent h l'alçada de la cúpula.

#### 6.6.3.2. Obertures

- **Entrades:** a la part superior del decantador es troben les entrades del decantador, una d'elles corresponent a l'entrada del dissolvent a decantar i l'altre, just el centre del casquet i una mica més estreta, és per l'agitador que ajudarà a homogeneïtzar la dissolució a l'inici del procés, ja que després l'agitador s'aturarà per poder separar completament les dos fases.

D'altre banda, s'ha considerat necessària una boca d'home per tal de que qualsevol operari pugui accedir a l'interior del reactor en cas de necessitat.



- **Sortides:** a la part inferior del reactor hi ha una sortida que es per extreure el fluid, inicialment s'extraurà l'aigua i a continuació el dissolvent.

#### **6.6.3.3. Agitador**

Per tal d'homogeneïtzar la dissolució, a l'inici del procés, a l'interior del decantador s'ha introduït un agitador amb tres nivells de pales d'acer inoxidable.

#### **6.6.3.4. Sistema de refredament**

Com a sistema de refredament, per conducció, s'ha decidit emprar un sistema de circulació d'aigua mitjançant un hèlix de tubs semicirculars. Per la part superior del decantador entra l'aigua freda i per la part inferior del decantador s'extreu l'aigua a temperatura ambient.

#### **6.6.3.5. Sistema de sujecció**

El decantador té incorporades 3 potes per tal de poder mantenir-lo elevat i realitzar amb facilitat les connexions de les sortides del decantador.

#### **6.6.3.6. Altres**

El decantador porta incorporats uns sensors de temperatura i de pressió per tal de poder assegurar que es treballa en les condicions òptimes de treball. A més a més també hi ha sensors que mesuren el nivell de la dissolució mitjançant un sensor radar sense necessitat de contacte per tal d'assegurar que la quantitat que hi ha a l'interior del reactor és l'adequada. A més a més amb aquests sensors es podrà controlar la velocitat d'entrada i sortida del reactor.



## 7. DISSENY 3D I PLÀNOLS DELS EQUIPS DIMENSIONATS

Els reactors i el decantador, s'han dissenyat en un model 3D i sobre plànols 2D, per a poder-los visualitzar millor. Totes les vistes dels dissenys en 3D i els plànols acotats es mostren en detall a l'annex C. Tant la trituradora com la centrifugadora, al estar seleccionades d'un determinat proveïdor, no es realitzarà la seva representació en 3D i plànols.

### 7.1. Reactor de dissolució

A continuació es mostren les principals vistes del disseny en 3D del reactor de dissolució i els plànols amb les cotes.

#### 7.1.1. Disseny en 3D

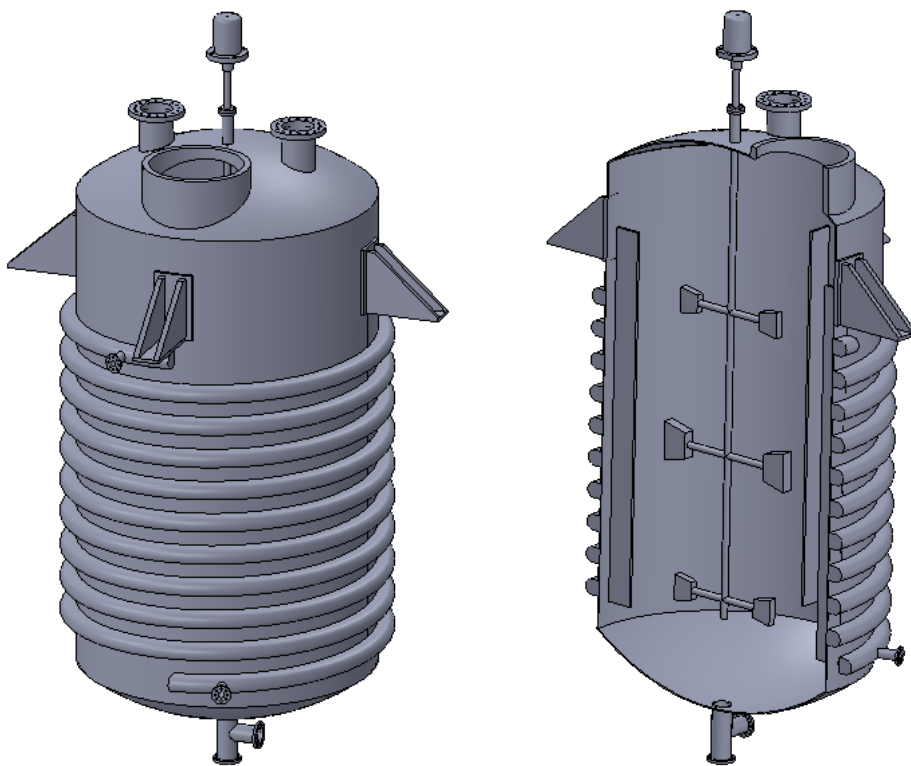


Figura 7.1. Vista dimètrica i interna del reactor de dissolució

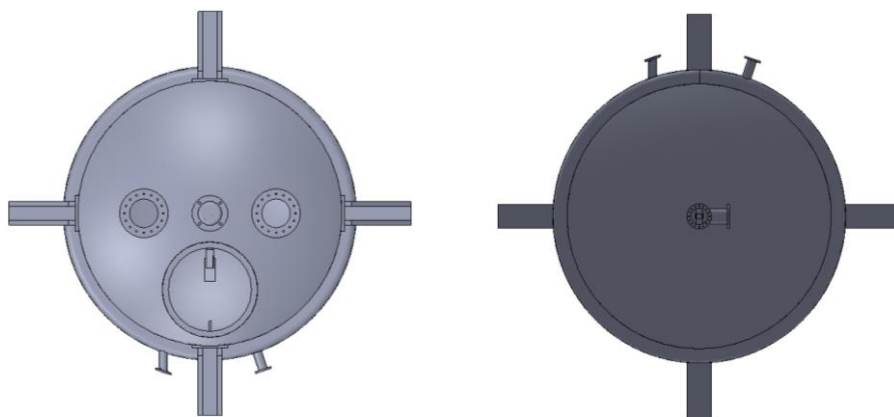


Figura 7.2. Vista de la part superior i inferior del reactor de dissolució



7.1.2. Plànols del disseny

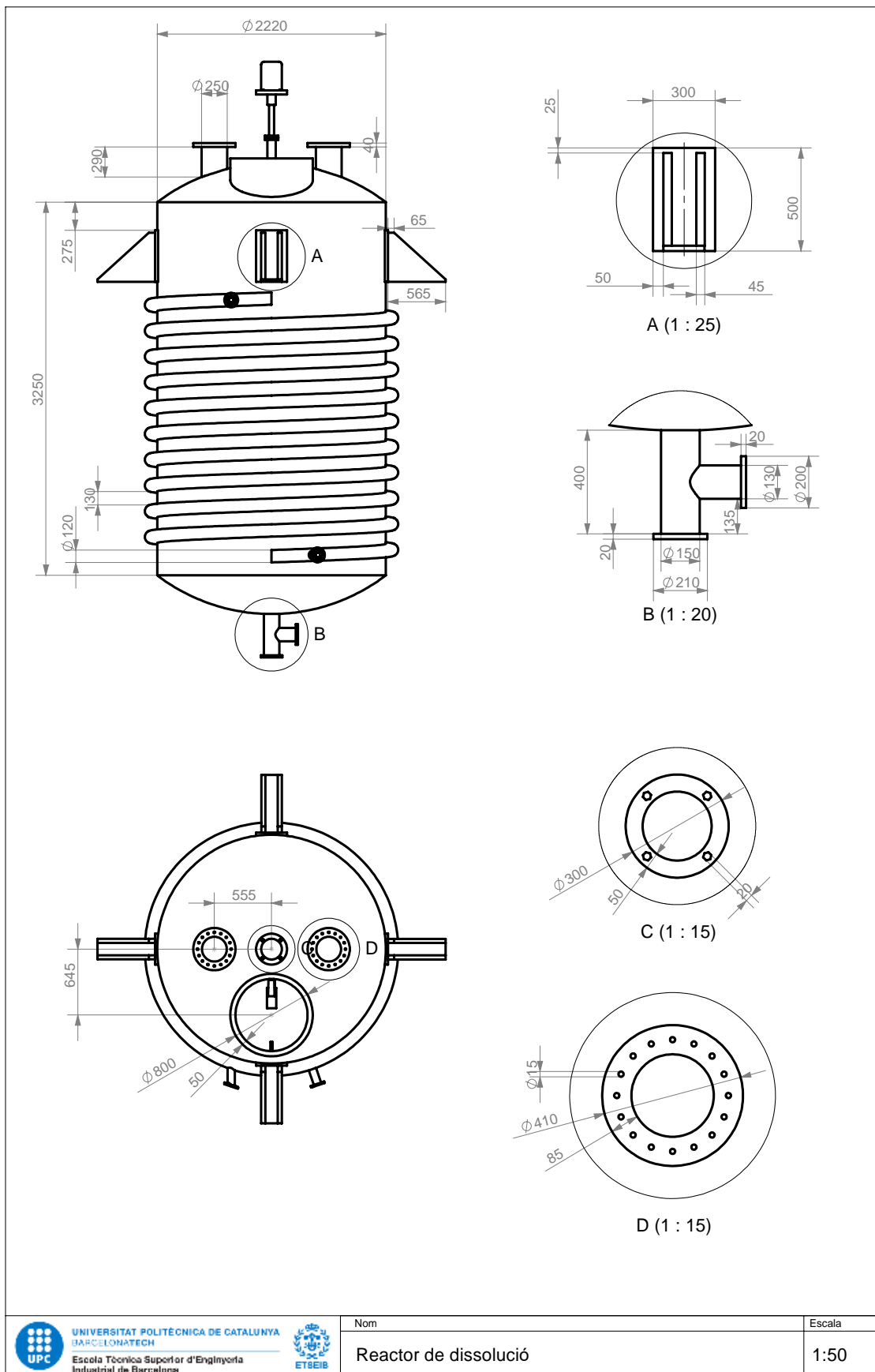


Figura 7.3. Cotes de la cara frontal i de la cara superior del reactor de dissolució



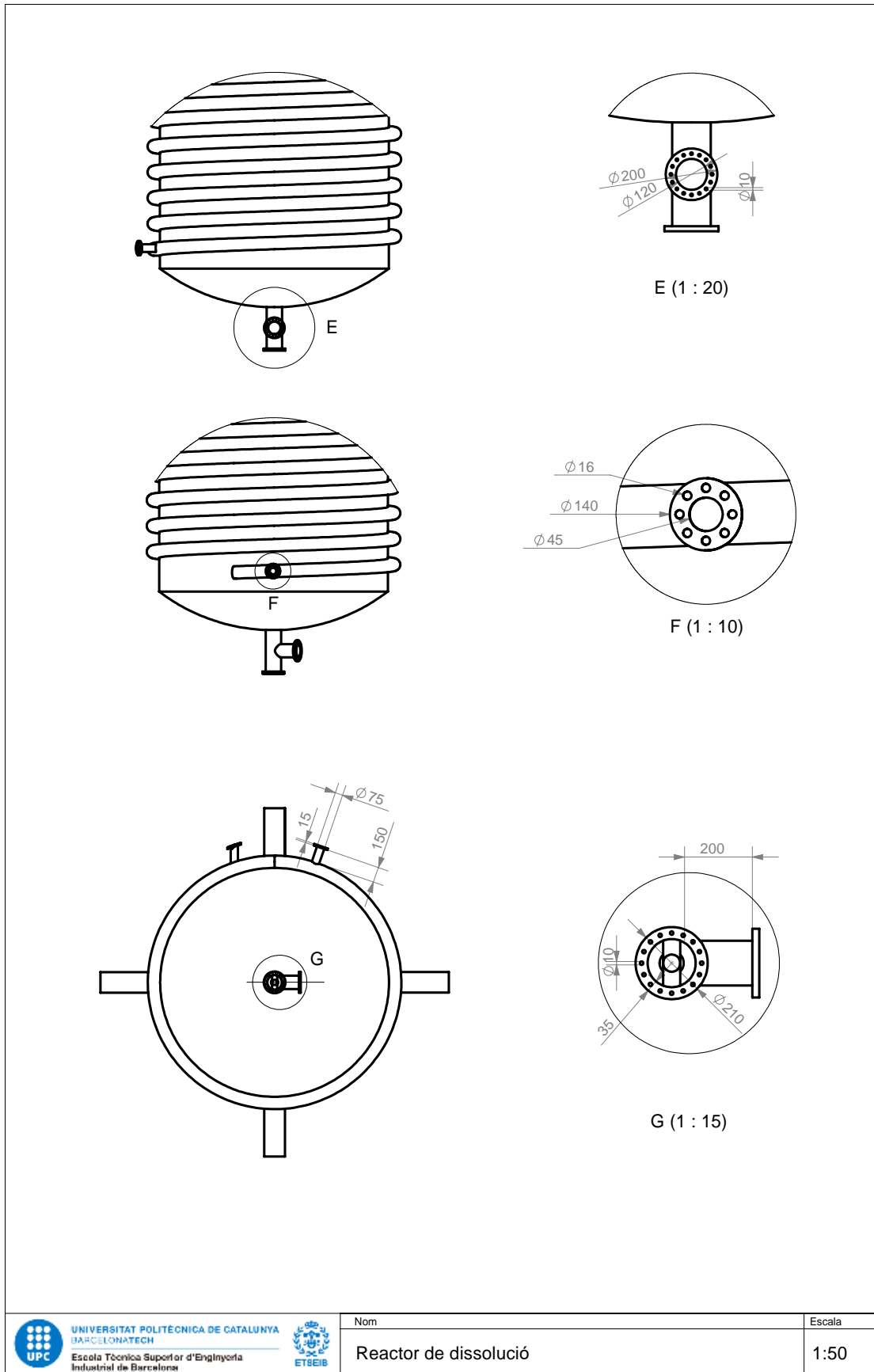


Figura 7.4. Cotes de la sortida de l'aigua de calefacció, la sortida d'emergència i de la cara inferior del reactor de dissolució





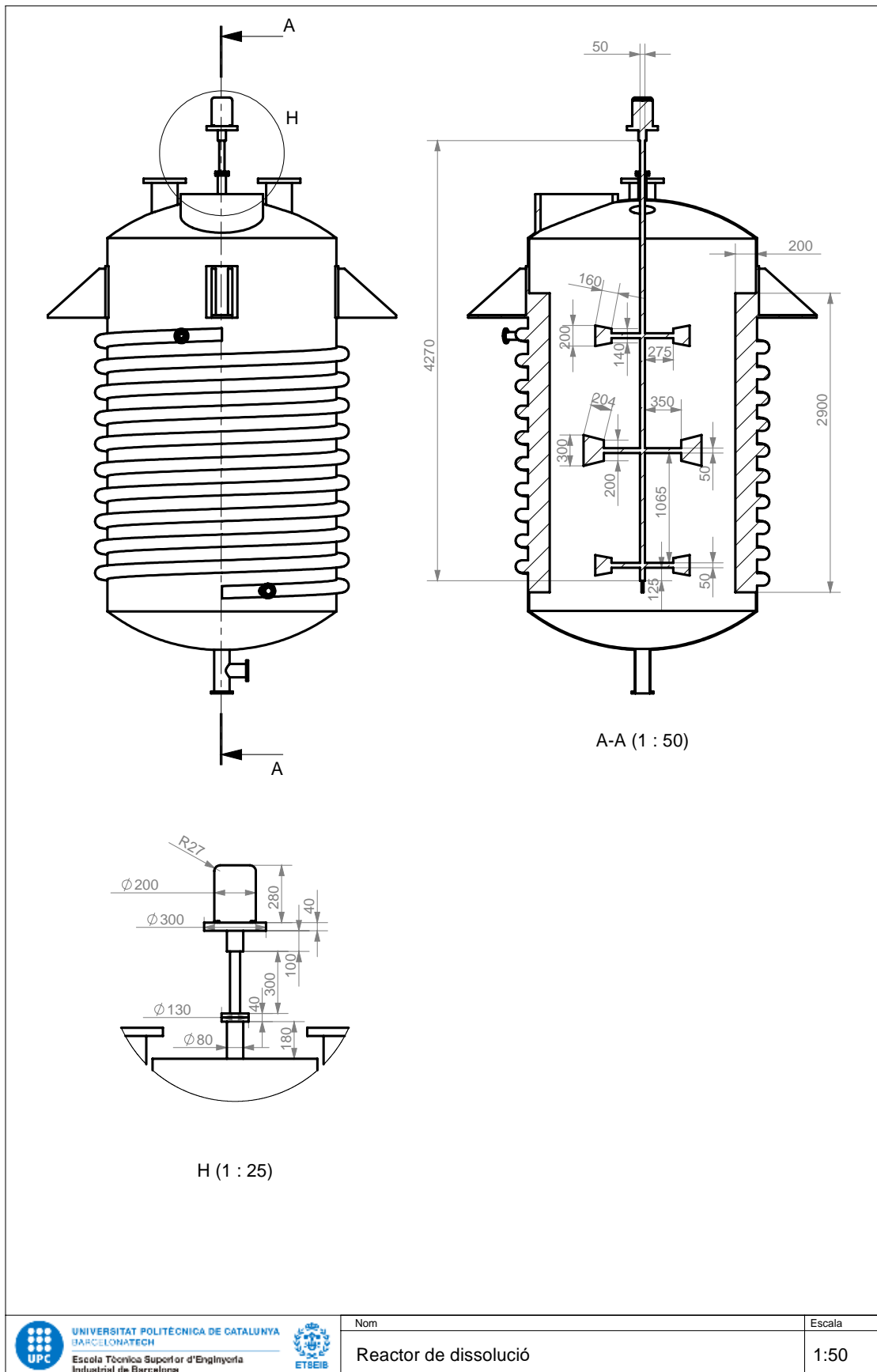


Figura 7.5. Costes de la cara interior i del agitador del reactor de dissolució



## 7.2. Reactor de precipitació

A continuació es mostren les principals vistes del disseny en 3D del reactor de precipitació i els plànols amb les cotes.

### 7.2.1. Disseny en 3D

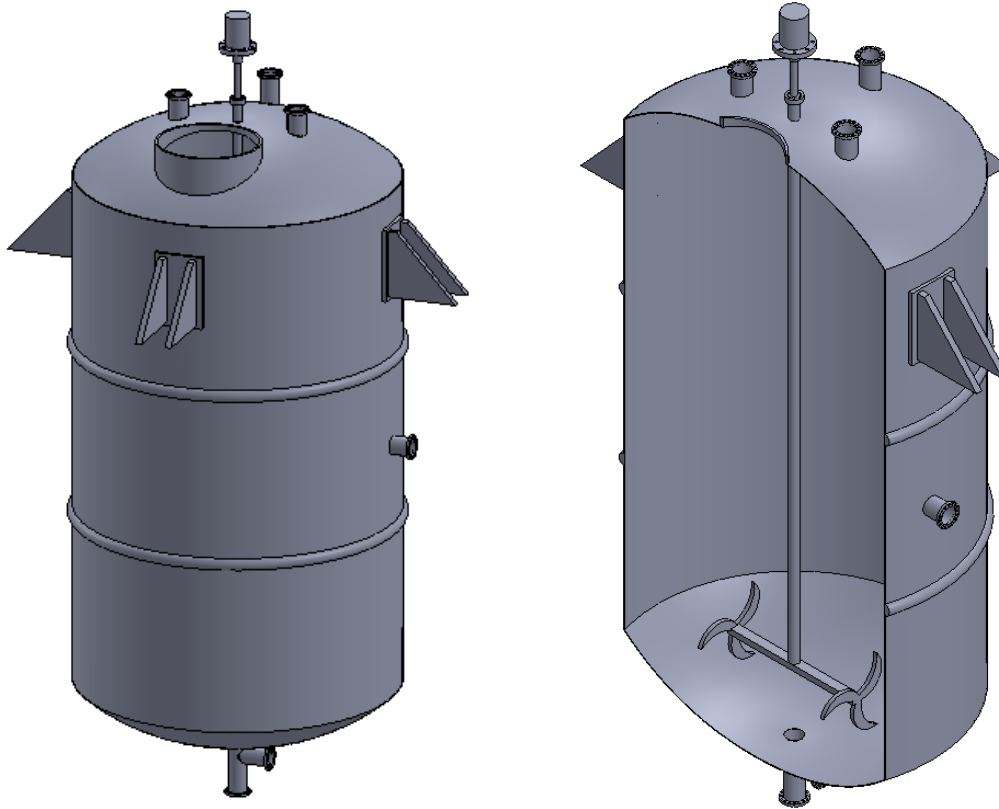


Figura 7.6. Vista dimètrica i interna del reactor de precipitació

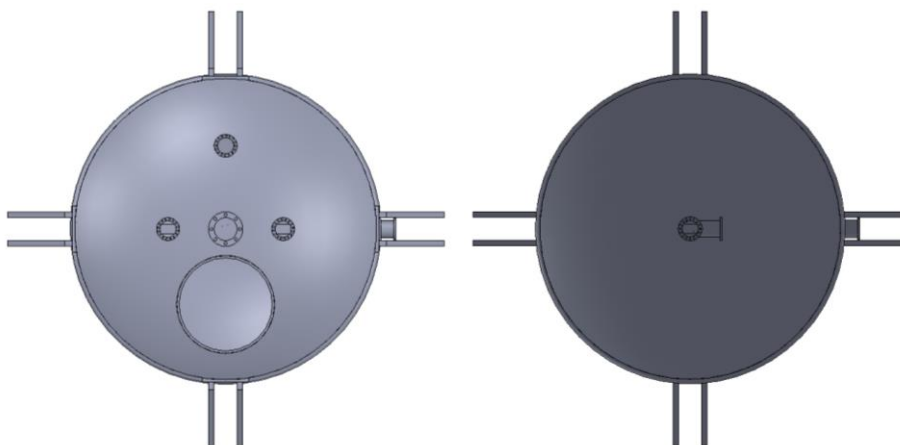


Figura 7.7. Vista de la part superior i inferior del reactor de precipitació



7.2.2. Plànols del disseny

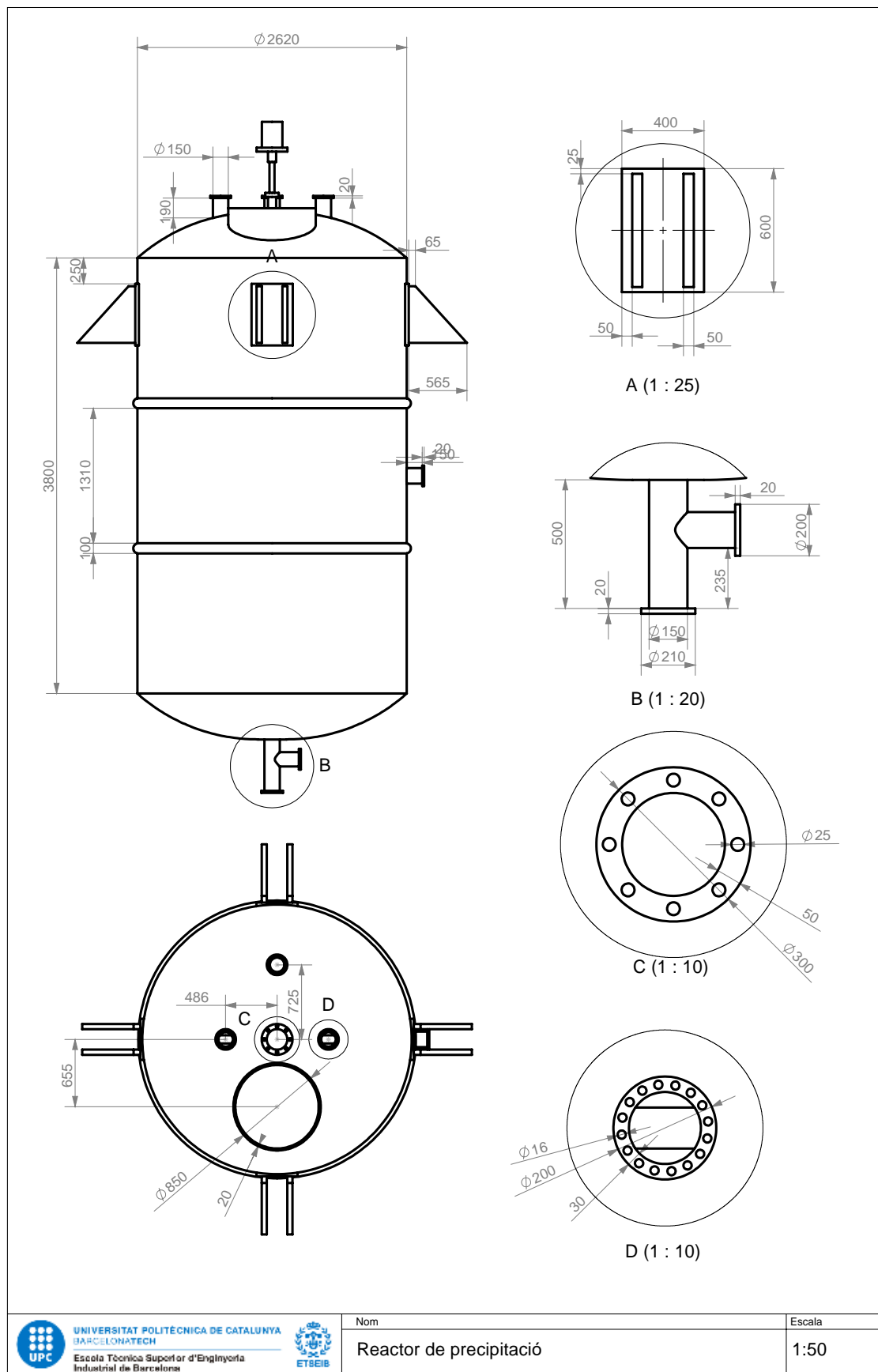


Figura 7.8. Cotes de la vista de la cara frontal i de la part superior del reactor de precipitació



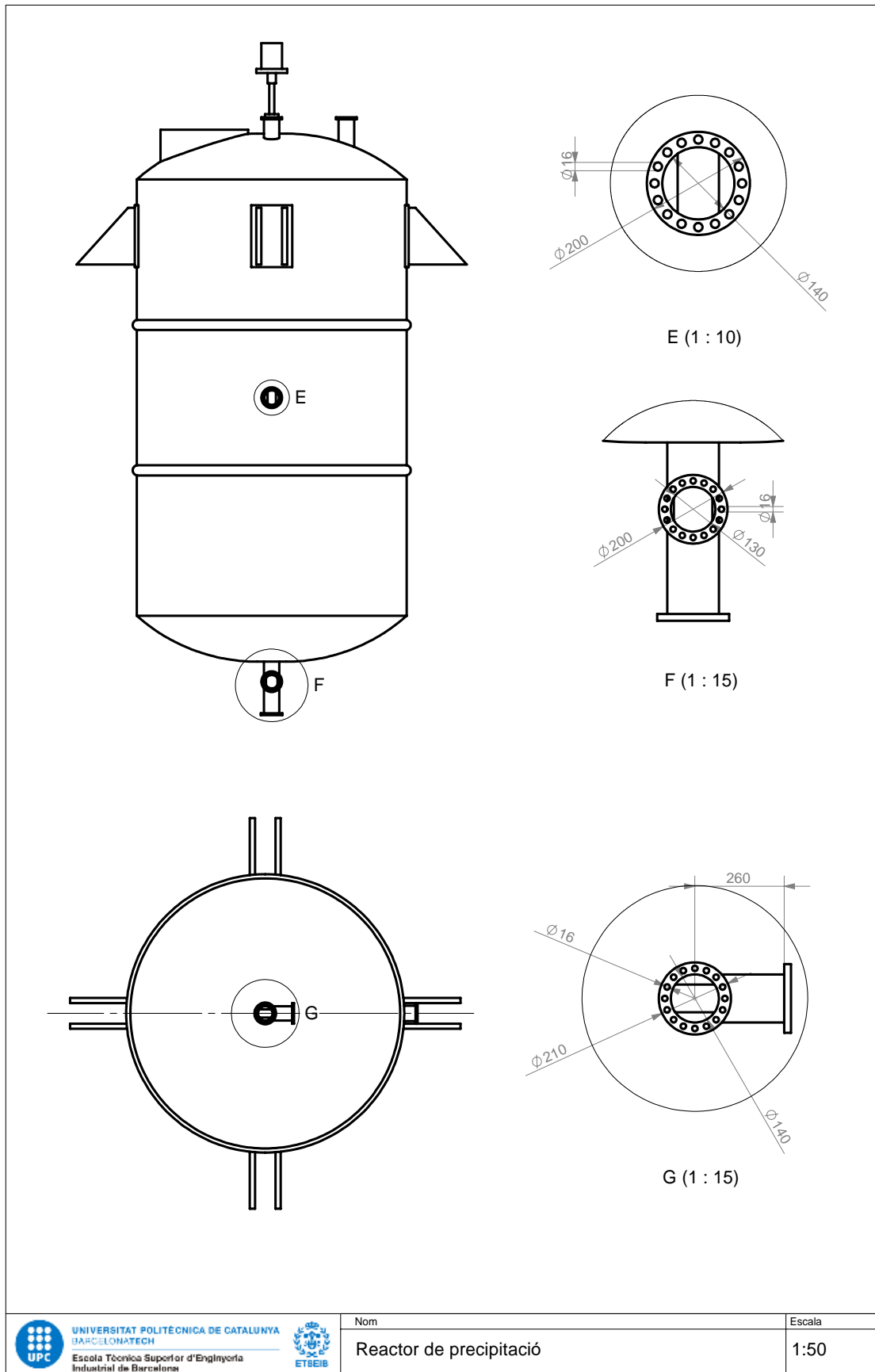


Figura 7.9. Cotes de la vista de la cara dreta i de la part inferior del reactor de precipitació



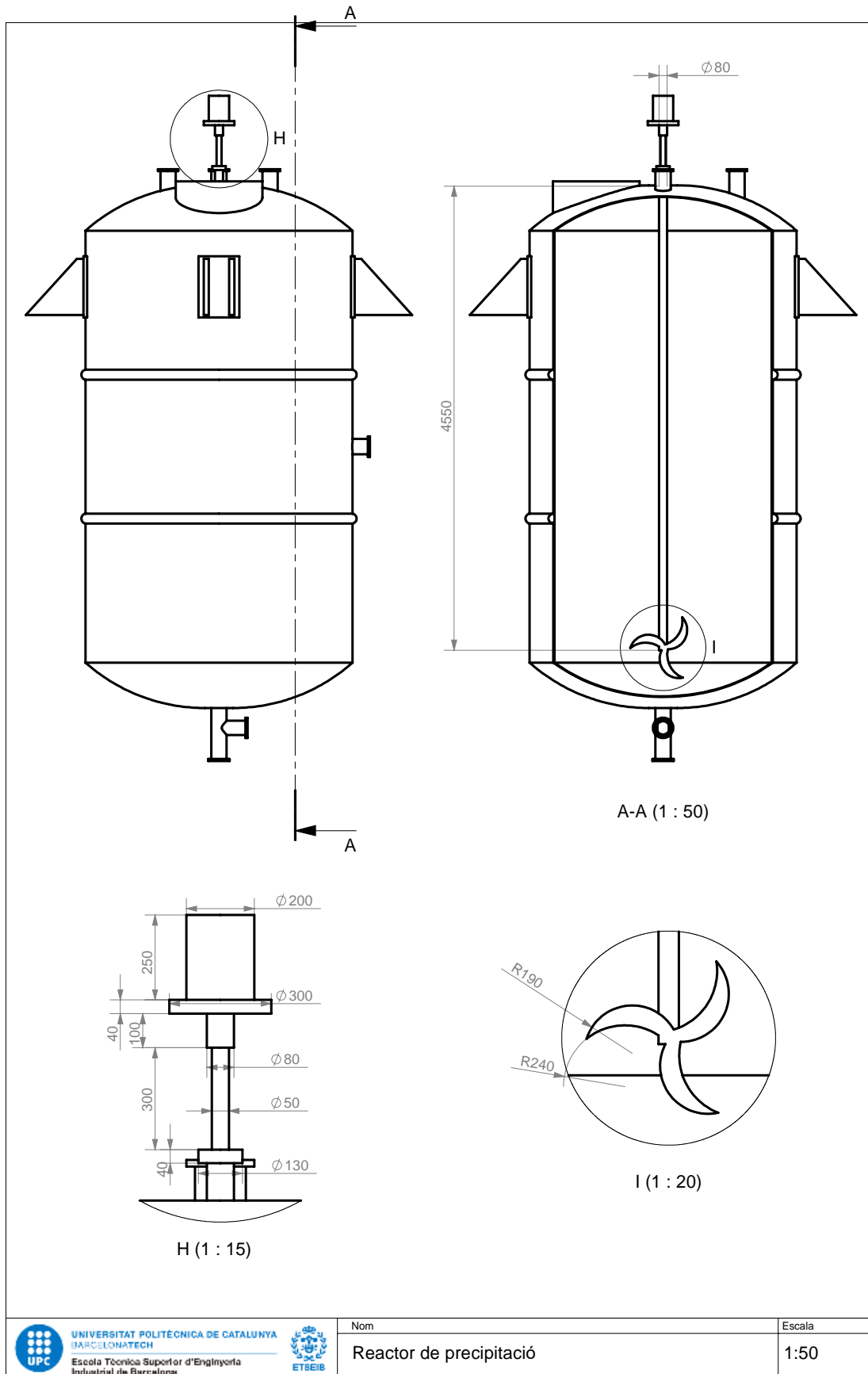


Figura 7.10. Cotes de la vista interior i de l'aspa de trituració del reactor de precipitació



### 7.3. Decantador

A continuació es mostren les principals vistes del disseny en 3D del decantador i els plànols amb les cotes.

#### 7.3.1. Disseny en 3D

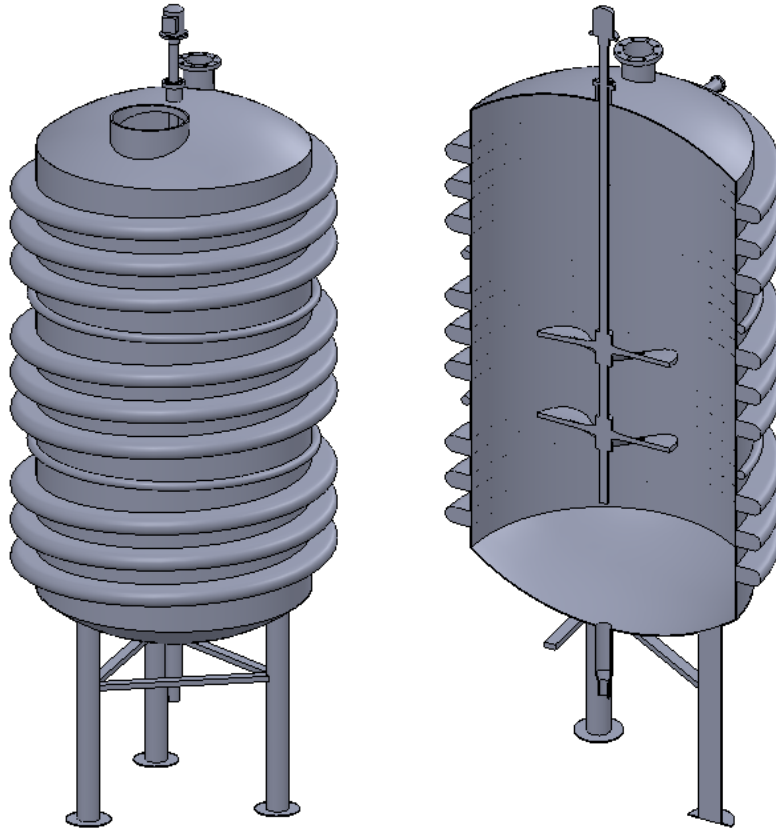


Figura 7.11. Vista dimètrica i interna del decantador

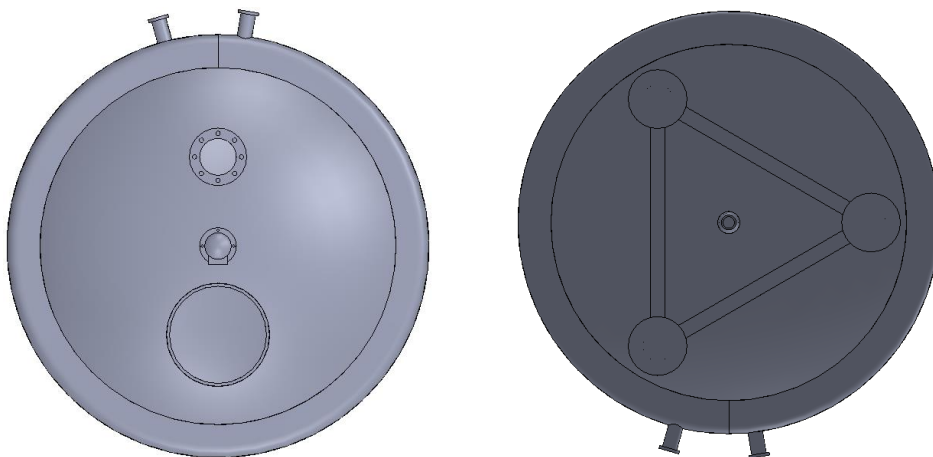


Figura 7.12. Vista de la part superior i inferior del decantador



7.3.2. Plànols del disseny

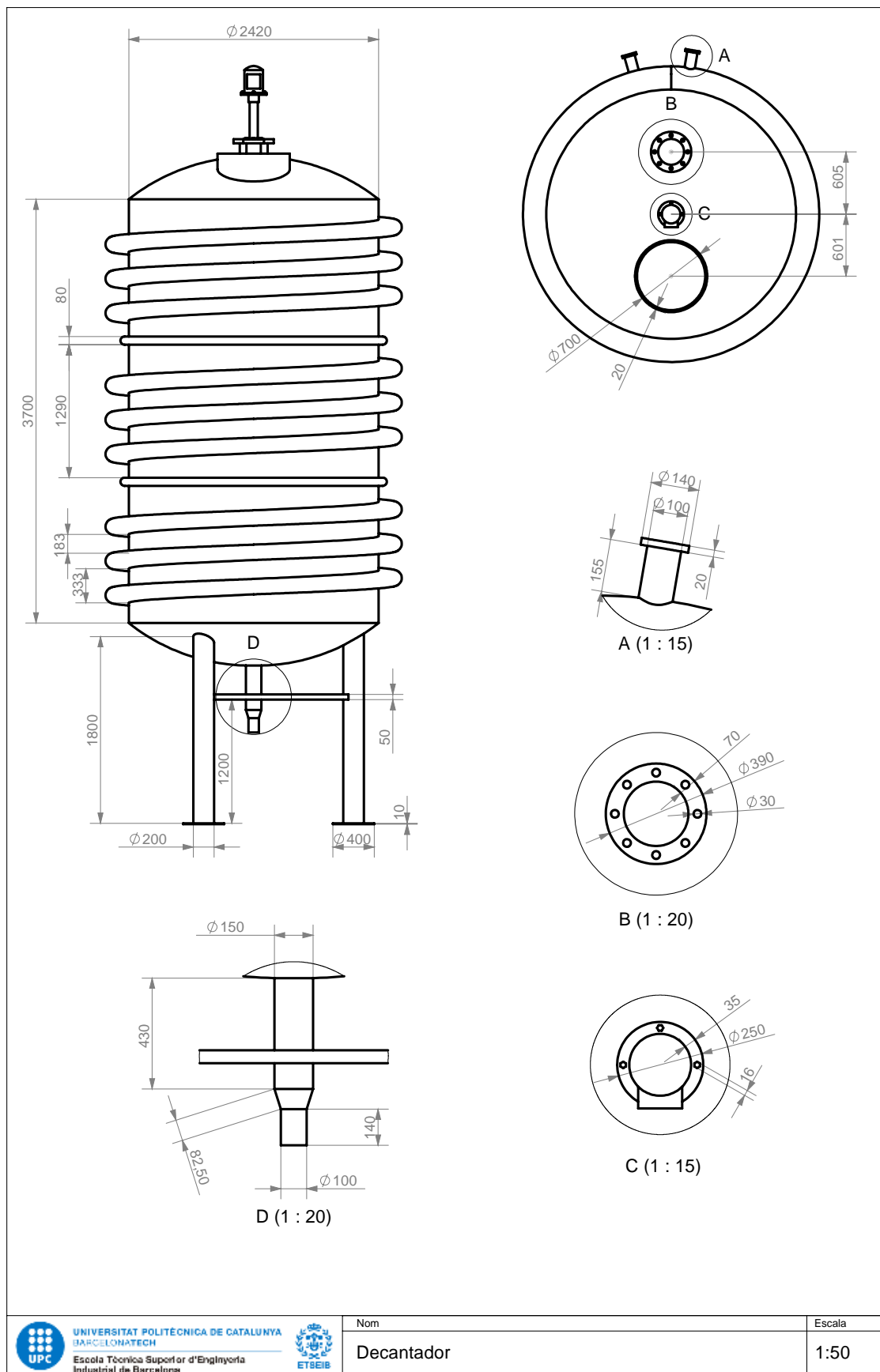


Figura 7.13. Vista de la cara frontal i de la part superior del decantador

	<p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona</p>	<p>Nom Decantador</p>	<p>Escala 1:50</p>
--	--	---------------------------	------------------------



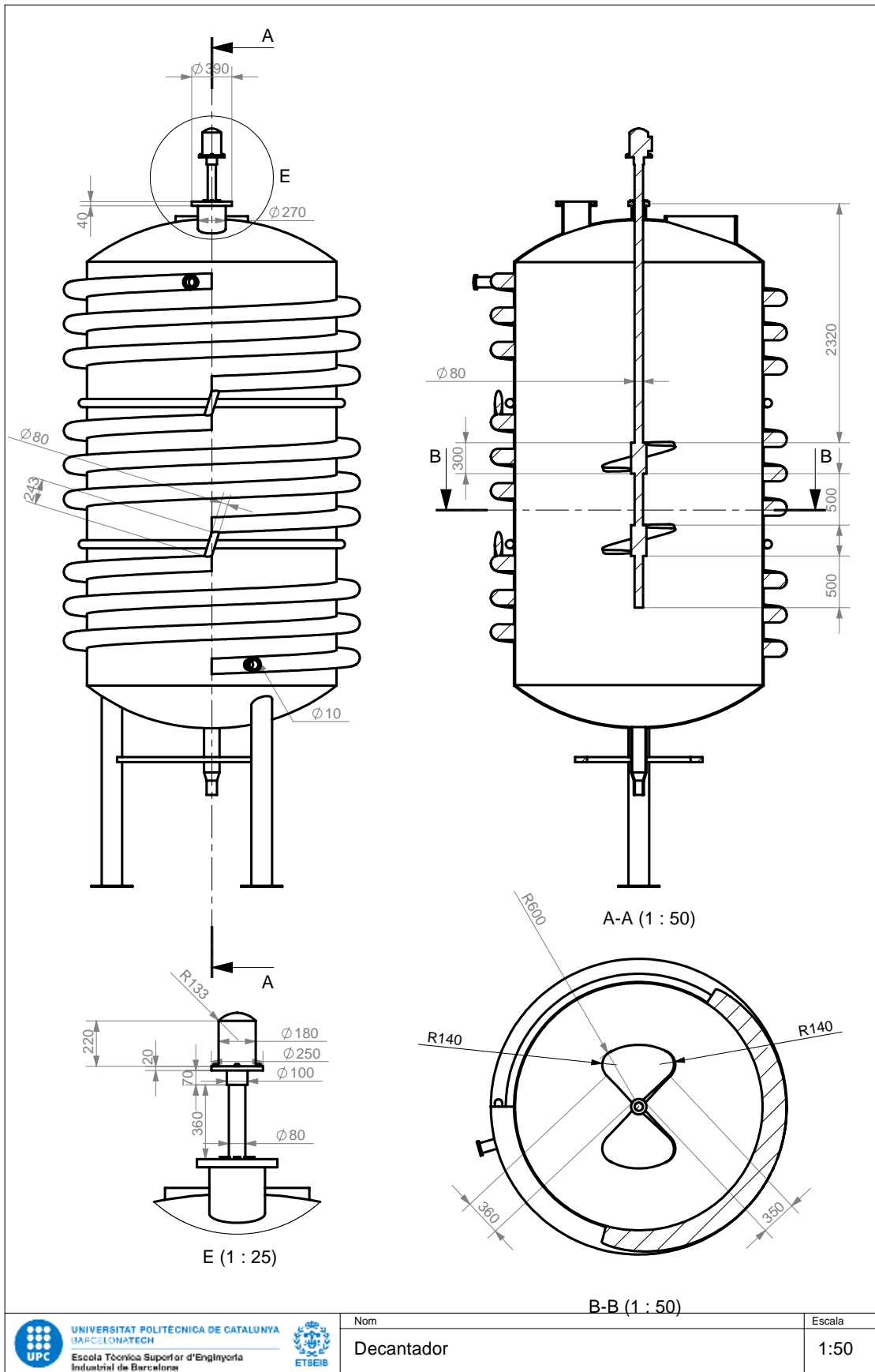


Figura 7.14. Vista del darrere i de la part interior del decantador





## 8. ESTUDI ECONÒMIC DE LA REALITZACIÓ DEL PROJECTE

Per a la realització del càlcul econòmic del projecte s'ha de tenir en compte que aquest consisteix en el disseny d'una planta de reciclatge que podria dur-se a terme però que al ser un estudi teòric amb aplicació no immediata, no es tenen en compte els costos d'equips, materials o substàncies necessàries ni de construcció i transport de la planta.

### 8.1. Costos personal

El principal cost recau en els salaris dels enginyers que han dut a terme el projecte així com el del director d'aquest, en aquest cas es tracta de dos enginyers químics ja que d'aquesta manera s'optimitza el temps ja que es treballa de forma paral·lela però pactada en el disseny de les diferents parts.

Cadascun dels enginyers té un salari de 25€ per hora treballada i es considera que cadascun ha dedicat 600 hores al projecte, mentre que el salari del director de projecte és de 35€ hora i ha treballat 60 hores, així doncs el cost dels personal necessari ha estat de 32100€, cost desglossat en la Taula 8.1.

Taula 8.1. Taula resum dels costos de personals

Treballador	Temps dedicat (h)	Cost (€/h)	Preu (€)
Enginyer químic 1	350	25	8750
Enginyer químic 2	350	25	8750
Director del projecte	60	35	2100
<b>Total costos personal</b>			<b>19600€</b>

### 8.2. Costos Software i hardware

A més dels costos de personal, també es consideren els costos de software (paquet de office i programa solidworks) i hardware (ordinador, impressora, etc) a la Taula 8.2 i la Taula 8.3.

S'ha escollit adquirir la llicència del Microsoft Office 2016 en la versió "Hogar y estudiantes" que es una versió simple del office i té un cost de 159,24€. Com que es considera que una llicència del Office pot venir una vigència de 4 anys i a més a més ha estat utilitzada durant mig any, es considerarà un cost pel projecte d'una vuitena part del valor total.

Pel que fa a la llicència del programa sòlid Works s'ha seleccionat el "Solidworks Standard" que és la versió més econòmica del programa, aquesta té un cost de 6600€ més un cost extra de subscripció de 1500€ anuals. Es considera que el programa SolidWorks es podrà utilitzar durant 4 anys i la llicència d'aquell any podrà continuar sent utilitzada la resta del any per nous projectes.



Respecte al hardware, els costos estan resumits en la Taula 8.3 però s'ha considerat un cost mitjà dels ordinadors emprats ja que tot i treballar cada enginyer amb el seu, en ocasions també s'ha fet ús d'ordinadors de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona. Per tant el cost total dels ordinadors al considerar-se que aquests tenen una vida útil de 5 anys i han estat utilitzats per a la realització del durant 6 mesos serà d'una desena part del cost total.

Taula 8.2. Taula resum dels costos de Software

Concepte	Preu adquisició [€]	Unitats	Cost [€]
Llicèn. Micros Office 2016	159,24	0,125	19,91
Llicència Solidworks	6600	0,25	1650
Cost anual	1500	0,5	750
<b>Total costos Software</b>			<b>2419,91€</b>

Taula 8.3. Taula resum dels costos de Hardware

Concepte	Preu adquisició [€]	Unitats	Cost [€]
Ordinador portàtil	550	0,2*	110
Impresora HP deskjet 3054A	79	1	79
Pendrive toshiba 16GB	6	2	12
<b>Total costos Hardware</b>			<b>201€</b>

\* es compren 2 ordinadors portàtils

### 8.3. Costos materials fungibles

En aquest apartat es consideren aquells materials que es consumeixen durant el treball, tant els materials d'oficina, com la línia d'internet i altres que es troben resumits en la Taula 8.4.

Els costos d'electricitat i internet només es tenen en compte un sol cop ja que durant la majoria de les hores s'ha treballat en un mateix lloc utilitzant la mateixa línia d'internet.

Taula 8.4. Taula resum dels costos de materials fungibles

Concepte	Cost mensual/unitari	Temps/Unitats	Cost [€]
Electricitat	40€/mes	5	200
Internet	37€/mes	5	185
Material oficina	-	-	100
Tinta impressora	24,95€/unitat	1	24,95
<b>Total cost materials fungibles</b>			<b>509,95€</b>



## 8.4. Cost Total

El cost total dels costos del projecte queda definit en la següent Taula 8.5.

*Taula 8.5. Taula resum dels costos totals del projecte*

Concepte	Cost [€]
<b>Costos personal</b>	19600
<b>Costos Software</b>	2419,91
<b>Costos hardware</b>	201
<b>Costos materials fungibles</b>	509,95
<b>Total cost projecte</b>	22730,86€



## 9. ESTUDI DE L'IMPACTE AMBIENTAL DE LA PLANTA

En el present apartat es pretén descobrir com afecta la implantació del projecte al medi ambient així com quines són aquelles parts on s'ha de tenir un control de certs paràmetres per tal de complir els límits legals de contaminació.

La primera part que s'ha de gestionar és l'aigua emprada en el rentat dels plàstics que és un procés previ al procés de trituració, al inici del procés es renten els plàstics provinents dels contenidors per tal de extreure les brutícies o contaminacions exteriors que puguin estar enganxades als plàstics, aquesta aigua al final del cicle es sol llençar al clavegueram es per això que cal que compleixi certs paràmetres de qualitat, en aquest cas els paràmetres més rellevants solen ser el pH, la demanda de oxigen (DQO), la conductivitat, les partícules en suspensió (MES) així com la quantitat de greixos i olis.

L'aigua utilitzada varia molt els seus paràmetres de contaminació segons si es tracta d'aigua que ha rentat plàstics provinents del contenidor de reciclatge de plàstics o si ha rentat els plàstic provinents del contenidor general, en aquest darrer cas òbviament els paràmetres sempre indiquen valors superiors, es per això que en ocasions cal un procés de depuració de l'aigua abans de ser abocada al mar.

A Catalunya segons l'agència catalana de l'aigua els límits d'emissió d'abocament al mar dels principals paràmetres a controlar de l'aigua són els que es recullen a la Taula 9.1.

*Taula 9.1. Límits legals d'abocaments d'aigua al mar segons l'agència catalana de l'aigua. [41]*

Paràmetre	Valor límit	Unitats
<b><math>\Delta T</math></b>	5	°C
<b>pH</b>	6-10	
<b>MES (mat. en suspensió)</b>	250	mg/l
<b>DQO</b>	700	mg O <sub>2</sub> /l
<b>DBO5</b>	300	mg O <sub>2</sub> /l
<b>Olis i greixos</b>	50	mg/l

En el cas de la planta de reciclatge de PVC també s'haurà de tenir en compte l'aigua provinent del decantador o reactor que ha estat separada del dissolvent, aquesta aigua es reutilitza en forma de vapor en el reactor de precipitació, es per això que en aquest cas no caldria treballar amb aigua completament pura i es podria controlar els paràmetres de contaminació al cap de certs cicles d'utilització, també pot contenir restes de dissolvents o del clorur de calci emprat per la separació dels dissolvents i de l'aigua però posteriorment tornarà a estar en contacte amb aquests, conseqüentment s'haurà de renovar de forma mensual, enviant l'aigua a tractar a una empresa externa per tractar-la.



Pel que fa als dissolvents utilitzats en el procés, aquets poden alliberar compostos orgànics volàtils a la atmosfera que en grans quantitats podrien provocar problemes importants com la degradació de la capa de ozó, la legislació indica els límits i considera els dissolvents orgànics o tot el que hagi estat en contacte amb ells un residu perillós per tant ha de ser gestionat. Els efectes nocius dels productes emesos a l'ambient depenen de la seva toxicitat, persistència i mobilitat, ja que tenen una vida mitja a l'ambient alta.

En el cas del MEK segons la fitxa de seguretat Química es considera de toxicitat aguda i la seva eliminació s'ha d'executar en una incineradora per a productes químics ja que és un producte inflamable com l'hexà. Totes les fitxes de seguretat del compostos utilitzats durant el procés es troben a l'annex D. En el present treball s'ha decidit que els dissolvents seran enviats a una empresa externa per tractar-los.

Un altre aspecte a tenir present és el consum d'energia elèctrica que necessita la planta per a funcionar, no es pot deixar de tenir en compte que per a la producció d'electricitat es consumeix molta quantitat d'hidrocarburs que aquests contaminen l'ambient.

Finalment, també s'ha de considerar la contaminació acústica ja que si se superen un certs límits s'ha de considerar un control o un sistema de protecció per als possibles treballadors que puguin estar dintre del recinte de la planta durant el temps de funcionament d'aquesta, la primera opció es intentar reduir o eliminar al màxim el soroll, en últim cas es farà ús d'equips de protecció individual (EPI) com taps o orelles, al utilitzar aquest tipus d'equips és necessari estar segurs que els EPI són els adequats per a tipus i duració del soroll segons el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT).

Els límits establerts per osha (Occupational Safety and Health Standards) segons les hores treballades en un dia estan recollides a la Taula 9.2, a més la exposició instantània no hauria de superar el nivell màxim de pressió per al oïdes els 140 dBA.

Taula 9.2. Límits de soroll [42]

Hores al dia	dBA (decibels mesurats en A-escala)
8	90
6	92
4	95
3	97
2	100
1,5	102
1	110
0,5	110
0,25	115



## 10. PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE

En aquest apartat es mostra planificació de com s'ha anat distribuint el temps en setmanes durant la realització del projecte així com quines tasques s'han realitzat i quant temps han suposat aquestes.

	Juliol				Agost				Setembre				Octubre				Novembre				Desembre				Gener			
Setmana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Definició d'objectius																												
Recerca bibliogràfica																												
Selecció dels punts del treball																												
Redacció de la part teòrica																												
Disseny dels equips																												
Selecció dels equips																												
Estudi impacte ambiental																												
Estudi econòmic																												
Revisió de la part teòrica del projecte																												
Disseny dels equips amb SolidWorks																												
Realització dels plànols																												
Conclusions, agraïments i resum																												
Revisió de tot el projecte																												
Presentació PowerPoint																												
Defensa oral																												



## 11. CONCLUSIONS

---

El principal objectiu del present treball consistia en el disseny i selecció de cadascun dels equips que constitueixen la planta de reciclatge que processa 1,5 tones de PVC diàries seguint el procés Vinyloop. Aquest s'ha assolit dissenyant els dos reactors i el decantador a partir del programa SolidWorks i seleccionant la trituradora i la centrifugadora dels proveïdors UNTHA Ibérica S.A. i Flottweg Separation Technology respectivament segons les nostres necessitats.

Un cop analitzat i estudiat detalladament el procés de reciclatge de PVC seguint el procés Vinyloop es van poder començar a dissenyar els equips seleccionats per a disseny, que són el reactor de dissolució, el reactor de precipitació i el decantador, i a cercar informació sobre els equips determinats per catàleg, la trituradora, la centrifugadora i un filtre.

- S'ha dissenyat un reactor de dissolució treballant de forma discontinua amb unes condicions d'operació de 0,35 MPa i 120°C i un sistema amb forma d'hèlix de tubs semicirculars el voltant del reactor per escalfar-lo i poder mantenir la temperatura.
- El reactor de precipitació, també treballa de forma discontinua, amb unes condicions d'operació de 0,101 MPa i 100°C.

El decantador dissenyat seguint un procés discontinu, a partir de les condicions d'operació de 0,101 MPa i 35°C, s'ha decidit implementar sistema de refrigeració amb forma d'hèlix de tubs semicirculars el voltant del reactor per tal de refredar més ràpidament la dissolució.

Per a la selecció de la trituradora, s'han comparat diferents models i finalment s'ha decidit que la més oportuna per a la planta sigui la QR800 de la companyia UNTHA Ibérica S.A. una trituradora d'un eix.

Mitjançant una comparació per una matriu de filtratge escollin uns paràmetres que s'han considerat rellevants s'ha decidit que la centrifugadora que millor compleix les nostres necessitats és la SC o RC120VxDEC de l'empresa Rousselet Robatel.

- El cost econòmic s'ha dut a terme tenint en compte que el present projecte és un estudi teòric del disseny d'una planta de reciclatge i per tant no s'ha tingut en compte en cap moment els costos dels materials, equips, personal i construcció de la planta, així com costos externs interrelacionats amb la planta.
- Al tractar-se d'un procés de cicle tancat, la contaminació ambiental de la planta s'ha considerat mínima ja que tant el dissolvent com l'aigua serà reutilitzada en diferents cicles de funcionament i al final de la seva vida útil es transportaran a una empresa externa per on es realitzarà un seu tractament de reciclatge.



- Al laboratori s'ha analitzat una mostra de la mescla de dissolvent i PVC per tal de determinar-ne la seva viscositat a les condicions d'operació dels equips de la planta, a més a més, també s'ha definit l'espectre IR del PVC que permetrà a l'inici del procés realitzar una preselecció del material i d'aquesta manera poder separar contaminants.

S'han aconseguit assolir la majoria dels objectius que es proposaven inicialment, després d'haver seleccionat i dissenyat les diferents subunitats de la planta, s'han obtingut uns plànols que podrien ser útils a la vida real tot i ser un projecte teòric i no haver realitzar cap comprovació en una planta pilot.

Finalment com a futurs projectes es proposa que es realitzi a nivell de laboratori i planta pilot proves experimentals per tal de validar les condicions d'operació que determinen les patents i poder extreure dades amb diferents condicions d'operació i d'aquesta manera poder realitzar un dissenyar mitjançant un simuladors, com el HYSYS, de tot el procés.





## 12. AGRAÏMENTS

---

Agraïm tot el temps dedicat durant la realització del projecte al nostre tutor Alfonso Rodríguez que en tot moment ens ha atès i guiat en els nostres dubtes i sobretot per donar-nos l'oportunitat de realitzar aquest projecte.

Volem agrair especialment a l'escola per haver-nos deixar usar l'equip infraroig per tal de complementar el nostre treball i per haver-nos donat els coneixements necessaris durant el grau per dur-lo a terme.

També donar les gràcies a tots els companys del grau d'enginyeria química que al llarg de tots aquests anys ens han permès tirar endavant i aconseguir els nostres objectius.

Agrair a les nostres famílies, especialment als pares i germans, que sempre han estat amb nosaltres donant-nos suport en els bons i els mals moments i motivar-nos sempre que ha estat necessari.

Finalment agrair al company/a de projecte, ja que sense cap dels dos aquest treball no hagués pogut ser possible.



### 13. BIBLIOGRAFIA

---

- [1] <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-07.php>; Consultada el setembre de 2017
- [2] <https://informationandtruth.wordpress.com/2016/12/01/craqueo-catalitico/>; Consultada el setembre de 2017
- [3] <http://www.ingenieriaquimica.net/articulos/315-refino-del-petroleo-v-craqueo-termico-visbreaking/>; Consultada el setembre de 2017
- [4] <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=9150>; Consultada el setembre de 2017
- [5] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/ca/Sea\\_salt-es\\_hg.svg/500px-Sea\\_salt-es\\_hg.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/ca/Sea_salt-es_hg.svg/500px-Sea_salt-es_hg.svg.png); Consultada el setembre de 2017
- [6] <http://lamarsalao.com/historia-de-una-salina/>; Consultada el setembre de 2017
- [7] Apunts de química industrial (assignatura amb codi UPC 240272) del curs 2016 – 2017
- [8] <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/policloruro-de-vinilo>; Consultada el setembre de 2017
- [9] <http://www.plasticbages.com/caracteristiquespvc.html>; Consultada l'octubre de 2017
- [10] <http://www.jq.com.ar/imagenes/productos/PVC/PVCprop/dtecnicos.htm>; Consultada l'octubre de 2017
- [11] <http://www.plasticseurope.es/Document/plastics---the-facts-2016-15787.aspx?FolID=2>; Consultada el setembre de 2017
- [12] <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/6309-PVC-El-segundo-plastico-de-mayor-consumo-en-el-mundo-con-una-cifra-anual-de-23-Mt.html>; Consultada el setembre de 2017
- [13] <https://www.opportimes.com/empresas/mexichem-es-la-4ta-productora-de-resina-de-pvc-en-el-mundo/>; Consultada el setembre de 2017
- [14] [https://www.cortizo.com/paginas/sobre\\_cortizo](https://www.cortizo.com/paginas/sobre_cortizo); Consultada el setembre de 2017
- [15] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Programa de Seguimiento de Basuras Marinas en Playas “ Informes de resultados 2015”
- [16] <http://www.temasambientales.com/2017/03/degradacion-de-distintos-materiales.html>; Consultada el novembre de 2017
- [17] [http://www.cepex.com/wp-content/uploads/dossier\\_informativo\\_pvc\\_reciclaje.pdf](http://www.cepex.com/wp-content/uploads/dossier_informativo_pvc_reciclaje.pdf); Consultada el setembre de 2017
- [18] <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/37/residuos-plasticos/gestion-del-residuo/valorizacion-material/249/reciclaje-mecanico.html>; Consultada el novembre de 2017
- [19] <https://energia12.com/2012/03/29/transformacion-por-pirolisis-obtencion-diesel-a-partir-de-residuos-plasticos-2a-parte/>; Consultada el novembre de 2017
- [20] <https://revistapetroquimica.com/reciclado-energetico-de-plasticos-co-procesamiento-en-refinerias-y-craqueo-termico/>; Consultada el novembre de 2017
- [21] [https://books.google.es/books?id=jXEFxC3GiGQC&pg=PT282&lpg=PT282&dq=separacion+de+plasticos+por+rayos+X&source=bl&ots=A0QST37\\_Jg&sig=soRt-](https://books.google.es/books?id=jXEFxC3GiGQC&pg=PT282&lpg=PT282&dq=separacion+de+plasticos+por+rayos+X&source=bl&ots=A0QST37_Jg&sig=soRt-)



- igebHL\_7Ubl94L0lr7d8U8&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjp-Mnj5MPXAhWHvRQKHw4tBmMQ6AEIZTAN#v=onepage&q=separacion%20de%20plasticos%20por%20rayos%20X&f=false; Consultada el novembre de 2017
- [22] <http://www.ecobar.info/materiales-separacion-mezcla-mecanico-quimico-valorizacion-energetica-degradacion/>; Consultada el novembre de 2017
- [23] <http://www.um.es/aulasenor/saavedrafajardo/apuntes/doc/plasticos2.pdf>; Consultada el novembre de 2017
- [24] Apunts de l'assignatura optativa ampliació en química.
- [25] <http://www.ehu.eus/imacris/PIE06/web/IR.htm>; Consultada l'octubre de 2017
- [26] Rubinson K.A., Rubinson J.F., "Análisis Instrumental", Ed. Pearson Educación, 2000
- [27] [https://www.ktr.co.jp/english/zairyou/z1\\_sose03.html](https://www.ktr.co.jp/english/zairyou/z1_sose03.html); Consultada l'octubre de 2017
- [28] <http://hjcrusher.es/3-4-hydrocyclone>; Consultada el novembre de 2017
- [29] <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2012/10/reciclado-de-pvc.html>; Consultada el setembre de 2017
- [30] <https://patents.google.com/patent/EP0945481B1/en>; Consultada el setembre de 2017
- [31] <https://www.quiminet.com/articulos/funcionamiento-y-caracteristicas-de-la-trituradora-de-mandibula-2653608.htm>; Consultada l'octubre de 2017
- [32] <http://www.sinocrusher.es/a3-hammer-crusher.html>; Consultada l'octubre de 2017
- [33] [http://www.untha.com/es/trituradores/trituradores/q800-1400\\_p987](http://www.untha.com/es/trituradores/trituradores/q800-1400_p987); Consultada l'octubre de 2017
- [34] <http://www.bonnet.es/clasificacionacerinox.pdf>; Consultada el setembre de 2017
- [35] <http://data.irestal.com/files/files/2012030204152933979.pdf>; Consultada el setembre de 2017
- [36] <https://www.empresascarbone.com/pdf/ficha-tecnica-del-acero-inoxidable.pdf>; Consultada el setembre de 2017
- [37] <https://www.industriaquimica.es/media/uploads/directorio/documentos/28286-ES-Medici%C3%83%C2%B3n-de-nivel-y-presi%C3%83%C2%B3n-para-la-industria-qu%C3%83%C2%ADmica.pdf>; Consultada el novembre de 2017
- [38] <http://www.russellfinex.com/es/equipos-de-separacion/separador-de-liquido-solido/separador-centrifugo/>; Consultada el gener de 2018
- [39] <https://www.flottweg.com/product-lines/separator/>; Consultada l'octubre de 2017
- [40] <http://www.rousselet-robotel.com/espanol/products/vert-basket-auto-discharge-centrifuges.php>; Consultada l'octubre de 2017
- [41] [http://aca-web.gencat.cat/aca/documents/ca/sollicituds/criteris\\_abocaments.pdf](http://aca-web.gencat.cat/aca/documents/ca/sollicituds/criteris_abocaments.pdf); Consultada el novembre de 2017
- [42] [https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show\\_document?p\\_table=standards&p\\_id=9735](https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=standards&p_id=9735); Consultada el novembre de 2017



## **ANNEXES**

---

### **A. ELS POLÍMERS**

- A.1. *Definició*
- A.2. *Classificació*
- A.3. *Avantatges i inconvenients*
- A.4. *Procés d'obtenció dels polímers sintètics*

### **B. DETERMINACIÓ VISCOSITAT DE LA SOLUCIÓ I SELECCIÓ DE L'AGITADOR**

- B.1. *Fonament teòric*
- B.2. *Part experimental*
- B.3. *Procediment operatiu*

### **C. DISSENY TRIDIMENSIONAL I PLÀNOLS DELS EQUIPS DISSENYATS**

- C.1. *Reactor de dissolució*
- C.2. *Reactor de precipitació*
- C.3. *decantador*

### **D. FITXES DE SEGURETAT QUÍMICA**

- D.1. *Metil etil cetona (MEK)*
- D.2. *Hexà*
- D.3. *Acetona*

### **E. Bibliografia**

- E.1. *Bibliografia web*
- E.2. *Bibliografia complementaria*

