

Resum

Al llarg de les pàgines d'aquest treball es realitza una aproximació al disseny dels equipaments típics que poden trobar-se a l'enginyeria química, com poden ser columnes de destil·lació o tancs a pressió. Es fa una aproximació a tres vessants del disseny: la selecció de materials de construcció, l'estimació de cost del sistema i els requeriments del disseny mecànic.

Amb aquest objectiu s'investiga utilitzant diferents llibres com a font bibliogràfica, tant de caràcter general com més especialitzats en una mateixa temàtica, formant així una base teòrica i establint els mètodes per dur a terme el disseny desitjat. Posteriorment, s'exemplifica aquesta teoria resumida en un procés concret, basat en un sistema ja existent. En aquest últim punt, es plasma la interrelació de les diferents fases de disseny exposades i la significació que pot tenir cadascuna d'elles.

Concretament, es dissenya un sistema per a poder reciclar, mitjançant una separació, diferents dissolvents orgànics provinents de residus industrials. D'aquesta manera, es veuen reflectides les consideracions que hom ha de fer per tal d'analitzar un sistema flexible, és a dir, de condicions variables.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	2
1. GLOSSARI	5
2. PREFACI	7
2.1. Motivació.....	7
2.2. Requeriments previs	7
3. INTRODUCCIÓ	9
3.1. Objectius del projecte	9
3.2. Abast del projecte	10
4. MATERIALS DE CONSTRUCCIÓ	12
4.1. Ferro i acer.....	12
4.2. Acer inoxidable.....	12
4.2.1. Tipus d'acers	13
4.3. Metalls i aliatges no ferrosos	15
4.4. Ceràmics	17
4.5. Orgànics.....	18
5. SELECCIÓ DE MATERIALS	21
5.1. Tipus de corrosió	21
5.1.1. Ambiental	22
5.1.2. Aigües.....	23
5.1.3. Microbiològica	23
5.1.4. Galvànica.....	23
5.1.5. Uniforme i per picadura	23
5.1.6. Intergranular	24
5.1.7. Condicions metal·lúrgiques	24
5.1.8. Fractura per hidrogen	24
5.2. Resistència a la corrosió	25
5.3. Propietats mecàniques	26
5.3.1. Temperatura	27
5.4. Contaminació.....	28
5.5. Costos	28



6.	CÀLCUL DEL COST DEL SISTEMA	30
6.1.	Estimació de la inversió i instal·lació	30
6.1.1.	Mètodes bàsics d'aproximació del cost	31
6.1.1.1.	Coeficient de gir de circulació:	31
6.1.1.2.	Mètode de Williams:	31
6.1.2.	Mètodes factorials	33
6.1.2.1.	Mètode de Lang:	33
6.1.2.2.	Mètode de Hand:	34
6.1.2.3.	Mètode de Cran:	35
6.1.2.4.	Mètode de Chilton:	36
6.1.2.5.	Mètode de Peters&Timmehaus:	38
6.2.	Càlcul detallat de l'equipament	38
6.2.1.	Columnes de destil·lació	39
6.2.2.	Bescanviadors de calor	39
6.2.3.	Canonades	39
6.2.4.	Bombes	39
6.2.5.	Equips a pressió	40
6.3.	Funcionament	48
6.4.	Avaluació econòmica del projecte: rendibilitat	49
7.	DISSENY MECÀNIC DE L'EQUIPAMENT	52
7.1.	Consideracions de disseny	53
7.2.	Pressió interna: disseny dels components principals	54
7.3.	Pressió externa: comprovacions mínimes	58
7.4.	Orificis o connexions	61
7.5.	Normativa ATEX	65
8.	APLICACIÓ A UN PROCÉS CONCRET	67
8.1.	Equipament i condicions de treball	69
8.1.1.	Aigües	70
8.2.	Proposta	71
8.2.1.	Selecció de materials	73
8.2.2.	Disseny mecànic	75
8.2.3.	Costos associats	77
8.3.	Avaluació de l'impacte ambiental	82

CONCLUSIONS	84
BIBLIOGRAFIA	86
Referències bibliogràfiques.....	86
ANNEX A EQUACIONS I TAULES COMPLEMENTÀRIES	88
• Tensió provocada pel vent.....	88
ANNEX B CÀLCULS	90
Disseny mecànic.....	90
○ Tanc i decantador:	90
○ Columna:	91
Costos	91
○ Tanc:	91
○ Columna:	92
○ Bescanviador:	92
○ Decantador:	93
○ Bomba:	93
ANNEX C CODIS I ESTÀNDARDS	94
AISI	94
ASME.....	94
UNS	94
ANNEX D INFORMACIÓ ADDICIONAL	96
Anàlisi d'aigües.....	96



1. Glossari

A_1	Àrea requerida.....	mm^2
A_2	Àrea addicional disponible a l'envoltant	mm^2
A_3	Àrea addicional disponible a la connexió.....	mm^2
A_4	Àrea del reforç dintre de la zona de reforç efectiva.....	mm^2
C	Coefficient de forma segons tipus de terminació.....	-
c	Factor de forma	-
d_1	Diàmetre de la àrea eliminada	mm
d_2	Radi de la zona de reforç efectiva.....	mm
D_e	Diàmetre exterior	mm
E	Eficiència de la soldadura	-
K	Coefficient d'esveltesa	-
K_a	Coefficient d'alçada	-
L_4	Alçada de la zona de reforç efectiva.....	mm
p	Pressió bàsica	MPa
p_0	Pressió	MPa
P_i	Pressió interna	MPa
P_d	Pressió de disseny	MPa
Q	Càrrega provocada pel vent per metre lineal	$\text{m} \cdot \text{MPa}$
r	Coefficient d'accessoris	-
S	Esforç màxim permisible	MPa

T_i	Espessor mesurat o mínim segons tolerància del element imm
t_i	Espessor mínim requerit del element imm
\bar{T}_i	Espessor nominal de l'equip.....mm
t_s	Espessor de la carcassamm
V	Velocitat del ventm/s

2. Prefaci

2.1. Motivació

La principal raó per la qual aquest projecte va ser ideat és la de millorar la capacitat d'aplicació de la teoria a casos pràctics. A més, per tal d'ampliar els coneixements apresos al llarg del grau, aquest projecte s'apropa a l'activitat que un enginyer químic pot realitzar habitualment en una planta.

L'avenç científic i tecnològic ha permès un augment de la població mundial que implica la necessitat de que la indústria evolucioni cap a un millor equilibri entre progrés i medi ambient, per tal de mantenir el benestar social. En aquest principi de sostenibilitat es basa l'empresa *Ecología Química S.A.*, la qual des de l'any 1992 es dedica a la valorització de dissolvents orgànics i tractament de residus industrials provinents de diferents indústries com poden ser la farmacèutica, la química o la de pintures. Compartint aquests objectius, en aquest treball es veurà un dels processos que es duen a terme. La millora ecològica que l'activitat d'aquesta empresa implica i la raresa del procés respecte a altres més habituals, fa d'aquest treball un intent de millora de competències de cara al futur.

2.2. Requeriments previs

Per al correcte anàlisi que es realitzarà al llarg del treball, és necessària una sèrie de dades de base per als càlculs. És a dir, conèixer les condicions de treball del procés i les dimensions aproximades de cada equip. Amb aquest objectiu, hi ha un contacte amb l'empresa abans comentada per tal de conèixer, a grans trets, un procés que s'hi realitza. Degut al secret industrial no és possible accedir amb exactitud a cada variable implicada. Tot i això, la bona disposició a col·laborar ha permès que en aquest document es realitzés una identificació de les necessitats del sistema i una aproximació, pel que fa als càlculs, a un ordre de magnitud semblant.

3. Introducció

En aquest treball s'analitza i exemplifica una de les principals funcions d'un enginyer, ser capaç d'identificar adequadament un problema per tal solucionar-lo de la millor forma possible. La finalitat és resoldre les diferents necessitats humanes que apareixen amb els anys. En l'àmbit de l'enginyeria existeix un procés constant de millora i creació de nous productes, a més del seu posterior tractament un cop ha finalitzat la seva vida útil. El treball i la investigació sobre els processos industrials fan possible aquesta millora.

El disseny d'un procés químic inclou una sèrie de requisits a complir per tal de que sigui eficient, segur, sostenible i viable. A l'enginyeria química es treballa habitualment amb productes perillosos per al personal i per al propi equipament de la planta. És a dir, el mode de tractar-los determinarà en gran mesura la seguretat del procés, i en el cas de possible corrosió, la continuïtat del mateix. Aquest fet ve determinat tant pel control del procés com per l'equip utilitzat. Per altra banda, la voluntat de tota empresa és l'obtenció de beneficis, així que el disseny vindrà delimitat per aquells criteris econòmics que l'empresari consideri adients i el capital inicial disponible per a ser invertit. L'estudi previ de la situació i les necessitats per a un procés químic a la indústria resulta ser, doncs, una tasca complexa.

El present treball concretament estudia el disseny de l'equipament amb el qual es durà a terme el procés desitjat, un cop determinades les condicions de treball del mateix. Amb aquesta finalitat, el treball es divideix en dues parts clarament diferenciades. En un primer moment, es desenvolupa una base teòrica general on es descriuen els diferents mètodes i criteris per a una correcta determinació dels equips. Aquí s'explica paral·lelament l'elecció del material segons la compatibilitat química d'aquest amb l'entorn on es trobarà i les consideracions econòmiques imposades que la poden fer variar. Seguidament aquesta primera part acaba resumint la determinació del gruix de les parets de diferents equips usualment utilitzats a la indústria química, per tal de resistir les tensions que suportin.

La segona part del treball consta d'un exemple d'aplicació concret del procediment de disseny prèviament explicat, utilitzant com a guia el primer apartat. D'aquesta manera es clarifica, especifica i corrobora amb resultats generals la informació donada.

3.1. Objectius del projecte

La finalitat principal d'aquest projecte és l'estudi de l'aplicació de diferents criteris, mètodes i procediments destinats a una correcta elecció i disseny del equipament necessari per a un

procés industrial. Totes les decisions a prendre es trobaran enfocades a l'acompliment de diferents objectius:

- Viabilitat econòmica del procés.
- Manteniment de la seguretat, tant estructural del equipament com del personal de l'empresa.
- Mínima afectació química i física dels equips degut a l'entorn on es trobin.
- Reducció de l'impacte ambiental que implicaria la realització material del procés.

Per a tal propòsit primer es definirà una base teòrica que posteriorment s'utilitzarà per analitzar el cas concret d'un procés real d'una planta química.

3.2. Abast del projecte

En aquest treball existeixen diferents limitacions que defineixen un grau màxim de detall i completesa. Es basarà en estudis i teoria ja existent a l'hora d'escollir entre les possibles opcions de disseny, sense considerar necessària la realització de noves investigacions per tal millorar l'acompliment dels objectius.

La primera part del treball, que engloba els fonaments teòrics del estudi es divideix en tres apartats. El primer, de selecció de materials, descriurà la majoria de materials de construcció d'unitats de la indústria. Aquesta descripció es centrarà en la resistència a la corrosió, temperatura de treball i capacitats mecàniques, mencionant quan es consideri necessari les demés característiques considerades en aquest projecte secundàries.

En el posterior anàlisi econòmic s'utilitzaran aproximacions factorials en un primer moment, i allà on es necessiti, correccions empíriques per component. No es considerarà per tant el cost de la retirada dels mateixos.

Pel que fa al disseny mecànic de l'equipament de la planta, es tractarà aquí el gruix de les parets necessari per a suportar una pressió interna o externa, a més del reforç de material que requeriria un orifici en el susdit equip.

Llista d'equips considerats al anàlisi:

- Tanc.
- Columna de destil·lació.
- Bescanviadors de calor.

- Canonades.
- Bombes.

L'estudi de cada component es veurà des de un punt de vista general sense arribar a la profunditat necessària que requeriria un projecte oficial.

4. Materials de construcció

El propòsit d'aquest capítol és fer una descripció suficient únicament dels materials més habitualment utilitzats en la construcció dels equips, per a poder escollir-ne posteriorment el més adequat al procés segons les propietats que ofereixin aquests.

4.1. Ferro i acer

L'acer al carboni (o acer dolç) és el material comunament utilitzat a la indústria química degut al seu baix cost, la facilitat de fabricació i l'àmplia disponibilitat de formes i mides. Tenen una alta resistència a la tracció i ductilitat. Habitualment s'utilitza per treballar amb components orgànics o solucions neutres a temperatures moderades.

Per altra banda, la resistència a la corrosió és relativament baixa. Tot i això, és útil amb dissolucions amb alta concentració d'àcid sulfúric o àlcalis càustics. Per a millorar aquest baix nivell de resistència es sol combinar amb diferents elements: amb níquel s'incrementen les propietats a baixes temperatures i la duresa, amb molibdè s'afegeix més resistència a les operacions a altes temperatures. A més, el crom i el silici milloren propietats com duresa i la resistència a la abrasió i oxidació. En el cas del silici, un alt tant per cent d'aquest (14-15%) és particularment útil envers a minerals àcids, exceptuant el fluorhídric, tot i haver augmentat així la seva fragilitat.

4.2. Acer inoxidable

L'acer inoxidable és el material més utilitzat a la indústria química com a resistent a la corrosió. En general aquest material és una aliatge de ferro amb un alt contingut de níquel o crom, a més d'altres possibles components. El crom és utilitzat per augmentar la resistència a la corrosió en ambients oxidants mentre que el níquel ho fa en ambients no oxidants.

Aquests acers poden oferir temporalment una major resistència a la corrosió si la superfície és tractada amb àcid nítric i després esbandida amb aigua, procés conegut com a passivació. La corrosió acostuma a ser més perillosa en punts on el material s'acumula, de manera que s'aconsella una mínima utilització de cantonades agudes o costures.

A més, com a conseqüència de l'alta temperatura necessària per a la soldar aquest acer, pot haver-hi precipitat de carbur de plom en el límit del gra, donant lloc a una menor resistència a la corrosió a la soldadura. Per tal d'evitar això, s'utilitzen acers amb baixa concentració de

carboni o controlant el recuit.

4.2.1. Tipus d'acers

Existeixen tres grans grups d'aliatges inoxidables, classificats en base a la composició i la microestructura¹, la qual es descriu generalitzada a continuació:

- **Martensític:** contenen aproximadament entre un 12 i un 20% de crom, un màxim de 2% de níquel i una quantitat de carboni entre el 0.2 i el 0.4%. Poden ser endurits amb tractaments tèrmics, fent així augmentar la resistència a la tracció de 550 a 1380MPa. La menor resistència a la corrosió davant el tipus austenític fa que s'utilitzin en ambients poc corrosius. Es descriuen els diferents tipus a la Taula 1.
- **Ferrític:** amb una quantitat de crom d'entre el 15 i el 30% i menys del 0.1% de carboni, sense níquel. En aquest cas la duresa pot millorar-se amb un treball en fred i no amb tractaments tèrmics. Bona resistència a la corrosió exceptuant àcids reductors com l'àcid clorhídric (HCl). Es descriuen els diferents tipus a la Taula 2.
- **Austenític:** amb un percentatge de crom entre el 16 i 26% i de níquel, entre un 6 i un 22%. Pel que fa al carboni el màxim acostuma a ser 0.08%. Aquest tipus poden ser endurits amb treball i no amb tractaments tèrmics, fent augmentar la resistència a la tracció des de 585MPa fins a 2000MPa. Aquest tipus és el més resistent a la corrosió gràcies a una estructura molecular uniforme (tipus cúbica centrada a les cares). La addició de molibdè, com en el tipus 316, millora tant la resistència a la corrosió com a les altes temperatures. Es descriuen els diferents tipus a la Taula 3.
- **Dúplex:** El nom procedeix de la mescla de estructures austenítica i ferrítica que hi contenen. El contingut en Cr és superior al 20% i presenten una millor resistència a la corrosió per tensió que els acers austenítics (veure secció 4.2.1. Condicions metal·lúrgiques). S'ha de tenir en compte a l'hora de soldar-los perquè és important mantenir l'equilibri des dos tipus d'estructures també a la zona soldada. Es descriuen els diferents tipus a la Taula 4.

Taula 1 Tipus de acers inoxidables martensítics². Font [3]

¹ Dades segons [2], pàg. 446.

² Per a més informació sobre el codi AISI i UNS, consultar Annex , C Codis i estàndards.

Codi		Composició (%)					Propietats mecàniques			
AISI	UNS	Cr	Ni	Mo	C	Altres	Límit elàstic (MPa)	Resistència a la tracció (MPa)	Elongació (%)	Duresa (HB)
403	S40300	11.5-13.0			0.15		276	517	35	155
410	S41000	11.5-13.5			0.15		241	483	30	150
414	S41400	11.5-13.5	1.25-2.5		0.15		621	793	20	235
416	S41600	12.0-14.0		0.6	0.15	0.15S mín.	276	517	30	155
416Se	S41623	12.0-14.0			0.15	0.15Se mín.	276	517	30	155
420	S42000	12.0-14.0			0.15		345	655	20	195
420F	S42020	12.0-14.0		0.6	0.15 mín	0.15S mín.	379	655	22	220
422	S42200	11.0-13.0	0.5-1.0	0.75-1.25	0.20-0.25	0.15-0.30 V, 0.75-1.25 W	862	1000	18	320
431	S43100	15.0-17.0	1.25-2.50		0.20		665	862	20	260
440A	S44002	16.0-18.0		0.75	0.60-0.75		414	724	20	210
440B	S44003	16.0-18.0		0.75	0.75-0.95		427	738	18	215
440C	S44004	16.0-18.0		0.75	0.95-1.20		448	758	14	220
501	S50100	4.0-6.0		0.40-0.65	0.10 mín.		207	483	28	160
502	S50200	4.0-6.0		0.40-0.65	0.10		172	448	30	150

Taula 2 Tipus de acers inoxidable ferrítics. Font [3]

Codi		Composició (%)							Propietats mecàniques			
AISI	UNS	Cr	C	Mn	Si	P	S	Altres	Límit elàstic (MPa)	Resistència a la tracció (MPa)	Elongació (%)	Duresa (HB)
405	S40500	11.50-14.50	0.08	1.0	1.0	0.04	0.03	0.1-0.3 Al	276	448	30	150
409	S40900	10.50-11.75	0.08	1.0	1.0	0.045	0.045	(6 × C) Ti mín.	241	448	25	137
429	S42900	14.0-16.0	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03		276	483	30	163
430	S43000	16.8-18.0	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03		276	517	30	160
430F	S43020	16.8-18.0	0.12	1.25	1.0	0.06	0.15	0.6 Mo	379	552	25	170
434	S43400	16.8-18.0	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03	0.75-1.25 Mo	365	531	23	160
436	S43600	16.8-18.0	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03	0.75-1.25 Mo (5 × C)(Cb + Ta) mín.	365	531	23	160
442	S44200	18.0-23.0	0.2	1.0	1.0	0.04	0.03		310	552	20	185
446	S44600	23.0-27.0	0.2	1.5	1.0	0.04	0.03	0.25N	379	586	25	160

Taula 3 Tipus de acers inoxidable austenítics. Font [3].

Codi		Composició (%)							Propietats mecàniques			
AISI	UNS	Cr	Ni	Mo	C	Si	Mn	Altres	Límit elàstic (MPa)	Resistència a la tracció (MPa)	Elongació (%)	Duresa (HB)
304	S30400	18.0-20.0	8.0-10.5		0.08	1.0	2.0		241	565	60	149
304L	S30403	18.0-20.0	8.0-12.0		0.03	1.0	2.0		228	545	60	143
308	S30800	19.0-21.0	10.0-12.0		0.08	1.0	2.0		207	586	55	150
309	S30900	22.0-24.0	12.0-15.0		0.20	1.0	2.0		276	655	45	170
309S	S30908	22.0-24.0	12.0-15.0		0.08	1.0	2.0		276	655	45	170
310	S31000	24.0-26.0	19.0-22.0		0.25	1.5	2.0		310	655	50	170
310S	S31008	24.0-26.0	19.0-22.0		0.08	1.5	2.0		310	655	50	170
316	S31600	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	0.08	1.0	2.0		248	565	55	149
316L	S31603	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	0.03	1.0	2.0		234	558	55	146
317	S31700	18.0-20.0	11.0-15.0	3.0-4.0	0.08	1.0	2.0		276	586	50	160
317L	S31703	18.0-20.0	11.0-15.0	3.0-4.0	0.03	1.0	2.0		241	586	55	150
321	S32100	17.0-19.0	9.0-12.0		0.08	1.0	2.0	(5 × C) Ti	207	586	55	160
347	S34700	17.0-19.0	9.0-13.0		0.08	1.0	2.0	(10 × C)(Cb + Ta) 0.20 Co	241	621	50	160

Taula 4 Tipus de acers inoxidable dúplex. Font [3].

Codi		Composició (%)							Propietats mecàniques			
AISI	UNS	Cr	Ni	Mo	C	Si	Mn	Altres	Límit elàstic (MPa)	Resistència a la tracció (MPa)	Elongació (%)	Duresa (HB)
329	S32900	25.0-30.0	3.0-6.0	1.0-2.0	0.10	1.0	2.0		552	724	25	230
3RE60	S31500	18.0-19.0	4.25-5.25	2.5-3.0	0.03	1.4-2.0	1.2-2.0	0.05-0.10 N	A789			
2205	S32205	22.0-23.0	4.5-6.5	3.0-3.5	0.03	1.0	2.0	0.05-0.20 N	450	655	25	293
2304	S32304	21.5	3.0-5.5	0.5-0.6	0.03	1.0	2.5	0.05-0.25 N 0.05-0.6 Cu	400	600	25	290
Fevralium	S32550	24.0-27.0	4.5-6.0	2.9-3.9	0.04	1.0	1.5	0.10-0.25 N 1.5-2.5 Cu	550	760	15	302
44LN	S31200	24.0-26.0	5.5-6.5	1.2-2.0	0.03	1.0	2.0	0.14-0.20 N	450	690	25	293
DP3	S31260	24.0-26.0	5.5-7.5	2.5-3.0	0.03	1.0	0.75	0.10-0.30 N 0.2-0.8 Cu	485	690	25	293
2507	S32750	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-5.0	0.03	0.8	1.2	0.24-0.32 N	550	795	15	310

En general i seguint la nomenclatura AISI, la sèrie d'acers inoxidable 300 conté una gran quantitat de níquel i crom. En el cas de la sèrie 400, aquests contenen molt de crom i poc o res de níquel. La sèrie 500 es caracteritza per portar poc crom i poc o res de níquel. A la sèrie 300, excepte el 309, el segon dígit determina si la concentració de níquel és inferior a un 10%, indicat amb un 0, o superior, indicat en aquest cas amb un 1. A la sèrie 400, un increment al nombre representat pels dos últims dígits representa un augment de concentració de crom.

4.3. Metalls i aliatges no ferrosos

- **Níquel**

Aquest material mostra una gran resistència a la majoria de compostos àlcalis, pel que és habitualment utilitzat en la producció de sosa. A més, aquesta propietat anticorrosiva és major en condicions reductores que en oxidants. No sofreix fractura de corrosió sota tensió com pot oferir l'acer inoxidable. Les bones prestacions mecàniques són semblants al acer al carboni, i és fàcilment treballat.

- **Monel**

Aliatge de níquel i un 30% de coure, habitualment utilitzat a les plantes químiques de paper. El coure millora la resistència a àcids oxidants. Manté adequadament les propietats mecàniques fins als 500°C i resisteix bé dissolucions clorades. És també adequat enfront a minerals àcids diluïts, utilitzat davant àlcalis, àcids i sals orgàniques i aigua de mar.

- **Inconel**

Base de níquel amb un 16% de crom i un 7% de ferro. Manté les seves propietats a altes temperatures i és més resistent a àcids i a gasos de forn. Habitualment utilitzat en forns.

- **Hastelloy**

El nom comercial Hastelloy fa referència a aliatges de níquel, crom, molibdè i ferro. Tot i resultar molt cars, formen un dels materials més resistents a la corrosió, particularment a àcids com el clorhídric (HCl). Existeixen dos tipus principals: Hastelloy B, amb un 65% de níquel, un 28 % de molibdè i un 6% de ferro, i el Hastelloy C, amb un 54% de níquel, un 17% de molibdè un 15% de crom i un 5% de Fe. Altres elements com tungstè, manganès, sílice, carboni, fòsfor i sofre completen els tants per cent. A més, l'addició de coure augmenta la resistència a àcids minerals.

- **Alumini**

La fina capa d'òxid (Al_2O_3) que es forma a la superfície del material li aporta una bona resistència a la corrosió, sempre i quan es trobi entre un pH de 4 i 8.5, del contrari s'oxidaria donant espècies diferents. És adequat utilitzar-lo quan s'emmagatzema amoníac, àcids orgànics, àcid nítric i aigua destil·lada, tot i que no és apte per a aigües potables o industrials. No és resistent a espècies halogenades ni entorns àlcalis.

Pel que fa als aliatges amb alumini, aquestes milloren les propietats mecàniques, però disminueixen les de resistència a la corrosió.

- **Coure**

El metall pur ha sigut habitualment utilitzat a la indústria alimentària, particularment a la producció de cervesa. Els principals aliatges on es troba són el llautó, de coure i zinc, i el bronze, de coure i un altre metall. Per norma general aquests aliatges són més resistents a la corrosió. Tot i que llautó amb molt de zinc no és adequat amb àcids o àlcalis, degut a la possibilitat de la pèrdua del zinc. S'ha de tenir en compte la possible corrosió galvànica per contacte d'aquest amb altres metalls menys nobles.

És útil davant solucions àlcalis, àcids i sals orgàniques. Per altra banda, no resisteix amoníac, sals oxidants, àcid sulfhídric (H_2S) i àcids minerals. El seu ús principal és als bescanviadors de calor i vàlvules, o aprofitant la seva alta conductivitat elèctrica, per a cables.

- **Plom**

Avui en dia ja no tant utilitzat degut al increment del seu preu, la capacitat de passivació del plom li oferiria bones propietats anticorrosives. Amb el cas de sulfats, carbonats o fosfats eleva la seva resistència, mentre que amb nitrats, acetats o clorurs la minva. És per això que el plom és eficaç davant àcid sulfúric, però dèbil davant àcid acètic o nítric.

- **Titani**

Material dúctil i fàcilment manejable, molt lleuger ($4,5\text{g/cm}^3$) i amb una elevada temperatura de fusió (1668°C). Té una elevada resistència a la corrosió gràcies a la passivació en forma d'òxid de titani (TiO_2), resultant així més adient que els inoxidable davant de l'àcid nítric. Per contra, no resisteix a l'àcid sulfúric, àlcalis o àcid clorhídric. La resistència davant aquest últim pot ser millorada amb un aliatge amb pal·ladi (0.15%). Habitualment s'empra a bescanviadors de calor, emmagatzematge de residus nuclears, com a elèctrode o difusors a la indústria del paper.

- **Tàntal**

Extremadament car amb propietats mecàniques semblants a les del acer al carboni tot i que amb una temperatura de fusió de 2996°C . Resistència a la oxidació semblant a la del vidre, la qual es veuran més endavant. Només és atacat pel àcid fluorhídric, àlcalis calents i concentrats i per materials que continguin sulfits lliures.

- **Zirconi**

Habitualment utilitzat a plantes nuclears gràcies la baixa absorció de neutrons i la resistència a l'aigua calenta a alta pressió. A la indústria química es sol utilitzar per a resistir àcids calents com podrien ser el nítric, el sulfúric o el clorhídric. Amb una resistència a la corrosió similar a la del tàntal, és més barat que aquest últim.

4.4. Ceràmics

Els materials ceràmics són utilitzats puntualment combinant les baixes propietats mecàniques que presenten amb l'alta resistència a diferents substàncies. Habitualment s'utilitzen com a folres o recobriment de metalls.

- **Vidre**

Aquest material té una excel·lent resistència excepte a l'àcid fluorhídric (HF), solucions alcalines calents i a àcid fosfòric concentrat i calent (H_3PO_4). Per altra banda, degut a l'estructura molecular és un material fràgil i amb poca resistència al xoc tèrmic. Sense aquest últim desavantatge, existeix el borosilicat, comercialment conegut amb el nom Pyrex, el qual presenta una alta resistència a salts de temperatura a més d'una millorada resistència a l'atac químic.

- **Gres i porcellana**

Resistents a la majoria de productes químics excepte àlcalis i fluorurs. Tenen una millor resistència mecànica que el vidre, però amb menys conductivitat i major sensibilitat al dany per xoc tèrmic. Amb menor resistència química, existeix esmalt vitrificat, utilitzat per a recobrir acer.

- **Maó**

Hi ha diferents tipus de maons resistents a l'atac químic, formats per carboni, esquist (fins a 350°C) o materials refractaris (fins als 870°C).

Els maons amb propietats refractàries són més útils per a operacions a altes temperatures, com en forns, reactors o calderes. Aquesta característica és donada gràcies a la mescla amb sílice (SiO_2) i alumina (Al_2O_3). Davant ambients amb perill d'atac àlcali, és millor augmentar la quantitat d'alumina, i per a una correcta expansió del recobriment amb el maó, el sílice augmenta l'expansió davant la temperatura.

4.5. Orgànics

- Polímers

Comunament coneguts com a plàstics, aquests tenen el avantatge respecte dels metalls de ser més lleugers, fàcils de fabricar i tèrmica i elèctricament més aïllants. Per altra banda, el seu ús es troba molt limitat degut a les relativament baixes temperatures a les quals poden treballar. A més, les propietats mecàniques són inferiors a les dels metalls, tal i com s'observa a la Taula 5. Aquestes últimes poden ser millorades mitjançant l'addició d'additius.

D'acord a l'estructura, es poden classificar en dos grans grups:

1. Termoplàstics: degut a la naturalesa dels enllaços entre les diferents molècules, aquests poden ser modelats més d'un cop gràcies a un augment de la temperatura. Exemples d'aquest tipus de plàstics són el clorur de polivinil (PVC) i el polietilè.
2. Termoplastables: al presentar una estructura més reticulada que els termoplàstics, aquests no poden ser modelats mitjançant un augment de temperatura perquè es cremen. Les resines de polièster i epoxi són exemples d'aquests polímers.

En general tenen una gran resistència a àcids minerals i a substàncies inorgàniques, degut a que la corrosió que hi succeeix no es deu al fenomen electroquímic que es dona en els metalls.

Tot i això, són capaços d'absorbir altres tipus de components, com podrien ser dissolvents orgànics, fent-los per tant no adequats al contacte amb altres substàncies orgàniques.

Taula 5 Propietats mecàniques d'alguns polímers. Font [1].

Polímer	Acrònim	Resistència a la tracció (MPa)	Mòdul elàstic (MPa·10 ³)	Densitat (kg/m ³)
Clorur de polivinil	PVC	55	3.5	1400
Polietilè de baixa densitat	LDPE	12	0.2	900
Polipropilè	PP	35	1.5	900
Politetrafluoroetilè	PTFE	21	1.0	2100
Polietàer reforçat amb fibra de vidre	PET GRP	100	7.0	1500

A continuació es resumeixen algunes característiques dels polímers més habitualment utilitzats en la construcció [1]:

- Clorur de polivinil

El PVC és un material termoplàstic resistent a la majoria d'àcids inorgànics, excepte el sulfúric i el nítric concentrats, i a les sals inorgàniques. No es recomana el seu ús per sobre dels 60°C ni posar en contacte amb dissolvents orgànics.

- Poliolefines

Relativament barates, resistents i flexibles, amb una resistència a l'atac químic molt similar a la del clorur de polivinil. El polietilè de baixa densitat no es recomana ser utilitzat per sobre dels 60°C, i el d'alta densitat és més rígid i permet temperatures més elevades. La poliolefina més resistent és el polipropilè, arribant a acceptar una temperatura de treball de 120°C.

- Politetrafluoroetilè

Més conegut amb el nom comercial de Teflón, es pot utilitzar fins a una temperatura de 250°C i és resistent a una gran varietat de productes exceptuant àlcals i fluor calents. És difícil de fabricar resultant així car. Habitualment s'utilitza a juntes, per a donar propietats antiadherents a superfícies o per a recobriments de recipients.

- Fluorur de polivinilidè

L'acrònim és PVDF i presenta una alta resistència química com el politetrafluoroetilè, amb una major facilitat de fabricació. Resisteix tant àcids com bases inorgàniques i dissolvents orgànics. La temperatura màxima de treball en aquest cas es considera que sigui 140°C.

- Plàstics reforçats amb fibra de vidre

Possiblement el plàstic termostable més utilitzat a la indústria química és la resina de polièster reforçada amb fibra de vidre. Aquest reforç dona al polímer una alta millora de força i resistència depenent de la forma en que s'hagi utilitzat i estructurat la fibra. Per contra, a major quantitat de reforç, menor resistència química. Tot i que aquesta disminució acostuma a ser acceptada davant la millor resistència a la tracció aconseguida.

Habitualment aquest reforç és utilitzat quan es dissenya un recipient a pressió on és necessària la millora de propietats mecàniques comentada. A més les resines de polièster són químicament resistents a àcids minerals, sals inorgàniques i a diversos dissolvents. Similarment, les resines epoxi tenen una resistència a la oxidació semblant tot i que més adequades als àlcalis.

- Cautxú

Generalment s'utilitza el cautxú natural, resistent a àcids i àlcalis, però no als dissolvents orgànics, com la majoria de polímers. Històricament s'ha utilitzat com a revestiment a tancs i canonades donant una major resistència química. Existeixen també diferents cautxús sintètics modificats per a millorar la resistència al àcid nítric o als dissolvents, punts febles del cautxú natural. Evidentment, resulten més cars d'adquirir.

- Carbó

El carbó i el grafit presenten una gran capacitat de resistència davant tot tipus de substàncies, exceptuant certes condicions oxidants molt severes. I gràcies també a l'alta conductivitat tèrmica, són molt adequats com a recobriments per a intercanviadors de calor, bombes i canonades.

Una limitació que presenten aquests dos components són les seves temperatures d'oxidació, 350°C en el cas del carboni i 400°C en el cas del grafit.

5. Selecció de materials

Els productes amb els quals treballa a l'enginyeria química són habitualment perillosos. Les condicions on es troben han de ser correctament controlades pel que fa a temperatura i pressió. La variabilitat d'aquestes, juntament amb la perillositat que poden representar, obliguen a que el material en el que els productes siguin continguts respongui amb unes determinades propietats per a un funcionament correcte del procés. S'ha de tenir també en compte no només les condicions en estat estacionari, sinó les alteracions d'aquestes diferents variables en els estats estacionaris de engegada i aturada del sistema.

En ocasions l'àmplia varietat i similitud d'aquests dificulta el procés d'elecció del més adient. Existeixen diferents factors a tenir en compte quan l'enginyer ha de decidir quin és el més adequat, els quals s'explicaran a continuació. Un possible sistema a seguir per a seleccionar el material és el següent:

1. Selecció preliminar: basada en la bibliografia sobre el tema, l'experiència i les recomanacions del fabricant.
2. Comprovació experimental: anàlisi del comportament dels possibles materials davant de les condicions específiques de treball del sistema.
3. Interpretació dels resultats del laboratori i altres característiques del mateix: extracció de conclusions sobre els resultats de les proves tenint en compte el mètode de fabricació teòric segons el fabricant.
4. Comparació econòmica: càlcul detallat de la inversió inicial i futura que implicaria la compra i funcionament del equip.

Existeixen guies de materials resistent a la corrosió que resulten útils en la fase de selecció preliminar. Tot i això, l'antiguitat de les dades i la particularització de cada sistema no permet que siguin una garantia de solució al problema. És normal la existència de contaminants o variacions de les condicions del treball que poden atacar el material que hem escollit o canviar la naturalesa de la corrosió. Tot i això, són útils davant una primera identificació d'aquells que no seran adequats al sistema d'estudi.

5.1. Tipus de corrosió

Un criteri bàsic i principal de la selecció de materials a l'enginyeria química és la determinació de la resistència que ofereixi aquest envers a la reacció produïda pel contacte amb el producte. La nova espècie apareguda com a resultat de dita reacció representa una

degradació de l'equip, comportant així un major cost del procés i augment de la perillositat del sistema. Els factors que intervenen en la resistència a aquest atac són diversos. Existeixen diferents tipus de corrosió, basats en la causa inicial que la provoca. Es llisten aquí els principals condicionants, els quals venen determinats per la naturalesa de la reacció:

- Temperatura: afecta a la velocitat de corrosió i les propietats mecàniques.
- Pressió.
- pH.
- Presència de impureses: més vulnerabilitat a corrosió per estrès.
- Contacte amb oxigen.
- Velocitat i agitació del flux: a major fregament, més erosió.
- Coeficient de transmissió de calor.

En funció d'un major o menor valor dels mateixos, tots ells acceleren la velocitat a la qual el material és atacat i per tant hauran de ser controlats o ben determinats per a un disseny correcte del sistema. A continuació es descriuen breument els diferents tipus [4].

5.1.1. Ambiental

La humitat present a l'aire és potencialment un electròlit que al entrar en contacte amb el material en qüestió, l'oxida. S'ha demostrat que existeix un valor d'humitat relativa depenent del material i la contaminació a partir del qual la oxidació provocada augmenta considerablement. Per exemple, amb el ferro, una humitat relativa major al 60% incrementa considerablement l'aparició d'òxid a la superfície.

Aquest procés és generalment funció de la capacitat de difusió d'oxigen a través de la capa aquosa. A més, la velocitat de corrosió és major si l'electròlit es troba en repòs. Pel que fa a la temperatura, un increment d'aquesta agita les molècules i per tant la difusió d'oxigen, així que es produeix una major corrosió a majors temperatures. Tot i això, a partir dels 80°C la solubilitat del oxigen a l'aigua és menor i per tant s'aconsegueix un menor atac.

La presència de contaminants, com el òxid de sofre (SO₂), també incrementa la velocitat de corrosió. És per aquesta raó que en ocasions l'aigua de rosada representa un major perill corrosiu que l'aigua de pluja, perquè aquesta última pot significar una neteja de contaminants superficials. Aquests contaminants depositats depenen habitualment del tipus d'atmosfera i ambient on es troba l'equip. Per exemple, la major presència de sals a l'aire en un ambient marí significa un major perill per al material, ja que s'hi depositaran més ions.

5.1.2. Aigües

Les impureses que es troben a l'aigua representen una major velocitat de corrosió del material perquè es tracta, en la seva majoria, de ions. La procedència de l'aigua i allà on s'hagi trobat determinarà el tipus d'espècies presents a la mateixa.

L'oxigen present a l'aigua actua com a càtode de la reacció que provoca la corrosió. Una aigua en contacte amb aire és més perillosa perquè existirà difusió d'oxigen cap a l'aigua, i per tant, a més concentració, més activitat d'aquest com a càtode. En cas de que l'aigua sigui no airejada, és el hidrogen qui actua com a càtode desprenent hidrogen gas. Tot i això, aquest segon té un menor potencial d'oxidació i per tant una menor actuació com a agent corrosiu.

5.1.3. Microbiològica

Existeixen diferents bacteries que aprofiten les reaccions d'oxidació com a font d'energia per al seu metabolisme. Hi ha principalment dos tipus:

- Ferrobacteries: són aeròbies i utilitzen l'energia produïda pel ferro al oxidar-se, fixant el hidròxid fèrric al seu cos. Un exemple és la gallionella.
- Reductores de sulfats: en aquest cas són anaeròbiques i extreuen l'energia gràcies a la reducció de sulfats a àcid sulfhídric. Poden trobar-se latents fins a que les condicions ambientals són adequades.

5.1.4. Galvànica

Si dos metalls amb potencials electroquímics suficientment diferents es troben en contacte es forma una pila: el material més noble actua com a càtode, i el que menys, com a ànode. Hi ha diferents factors que afecten a aquest procés, com la conductivitat de l'electròlit a través del qual s'intercanvien els electrons, la ventilació i la relació d'àrees. Aquesta última fa augmentar la velocitat de corrosió quan l'àrea del càtode és major a la del ànode.

5.1.5. Uniforme i per picadura

La corrosió uniforme és aquella que es defineix com la pèrdua de material com a reducció del gruix inicial degut a la transformació a una altra espècie que aquest sofreix a la seva superfície.

La picadura és un tipus de corrosió molt localitzat, el qual afecta principalment a alumini o

acers inoxidable. Habitualment és produïda per clorurs en contacte amb aquests dos materials.

5.1.6. Intergranular

Aquest és un tipus de corrosió localitzat als límits de gra de la estructura metàl·lica. Es caracteritza com a la precipitació de compostos sobre aquests límits de gra, alterant així l'estructura metàl·lica i per tant les seves propietats mecàniques. Per a evitar aquesta aparició de precipitats, és important reduir el tant per cent de carboni ja sigui amb un tractament tèrmic per a dissoldre els carburs o estabilitzant la mescla amb neodimi o titani.

Els acers austenítics i els aliatges de coure i alumini són propenses a aquest tipus de corrosió localitzada.

5.1.7. Condicions metal·lúrgiques

En ocasions, entre dos composicions iguals o semblants s'hi produeix corrosió perquè, per exemple, la temperatura pot crear diferències galvàniques: un metall fred tendeix a convertir el material cap a una zona més anòdica.

Per altra banda, tensions mecàniques poden fer més vulnerable el material davant un atac químic. Més conegut com a “Stress Corrosion Cracking” (SCC), aquesta produeix esquerdes superficials al metall que poden convertir-se en problemàtiques si, sense un control adequat, es permet que creixin fins a posar en perill la integritat del conjunt. Aquestes es propaguen a major velocitat en presència de clorurs, hidròxids i nitrats.

Les tensions que causen aquesta debilitat poden ser externes degut a un esforç puntual, o internes, degut a tensions romanents degut a la solidificació del material en el moment de la seva fabricació. Per a eliminar aquestes tensions internes és necessari realitzar una recuita, un tractament tèrmic amb un refredament lent que modifica les propietats mecàniques del metall.

5.1.8. Fractura per hidrogen

El petit volum de l'àtom d'hidrogen li permet entrar dintre de la estructura cristal·lina de els metalls. Un cop absorbit, aquest pot reaccionar amb el carboni dels acers i formar metà, o entre ells mateixos per a formar hidrogen gas. L'aparició d'aquestes molècules a l'interior de la estructura debiliten el material reduint la seva ductilitat. Els acers martensítics són més propensos que els austenítics aquest fenomen.

5.2. Resistència a la corrosió

A mesura que s'han llistat els diferents tipus de materials a la secció 4. Materials de construcció, s'ha realitzat una explicació sobre la resistència a la corrosió de cada material.

En general, acers inoxidable són més resistents a la corrosió a mesura que s'augmenta la quantitat del solut, però el cost augmenta considerablement. Per a exemplificar aquest fet es comparen a continuació alguns dels acers de la Taula 7, prenent com a referència la resistència a la corrosió del acer 304.

Taula 6 Comparació de la resistència de corrosió. Font [1].

Acer (AISI)	304	304L	316	316L	310
Resistència a la corrosió	1	1.1	1.25	1.3	1.6

En canvi, s'observa també que la disminució de la quantitat de carboni provoca l'efecte contrari, evitant així l'aparició de compostos carbonats i per tant disminuint la degradació del material.

Els acers inoxidable són habitualment adequats si l'ambient és oxidant, mentre que si es tracta d'un ambient reductor, es recomana la utilització d'aliatges especials o amb major quantitat de níquel. Els principals tipus de corrosió que poden trobar-se a aquests materials són el intergranular i el tipus amb tensió.

Taula 7 Principals metalls i aliatges utilitzats per a evitar la corrosió. Font [3].

Codi		Composició (%)							Propietats mecàniques			
AISI	UNS	Cr	Ni	Mo	C	Si	Mn	Altres	Límit elàstic (MPa)	Resistència a la tracció (MPa)	Elongació (%)	Duresa (HB)
410	J91159	11.5-14.0	1.0	0.5	0.15	1.5	1.0		1034	1379	7	390
420	J91153	11.5-14.0	1.0	0.5	0.20-0.40	1.5	1.0		1138	1517	1	470
431	J91803	18.21	2.0		0.30	1.5	1.0		414	655	15	195
446	J92615	26.0-30.0	4.0		0.50	1.5	1.0		448	669	18	210
312	J93423	26.0-30.0	8.0-11.0		0.30	2.0	1.5		434	669	18	190
17-4PH	J92180				0.07				1138		3	418
15-5PH	J92110	14.0-15.5	4.2-5.5		0.07	1.0	0.7	2.5-3.5 Cu				
304L	J92500	17.0-21.0	8.0-12.0		0.03	2.0	1.5		248	531	60	140
304	J92600	18.0-21.0	8.0-11.0		.08	2.0	1.5		255	531	55	140
316L	J92680	17.0-21.0	9.0-13.0	2.0-3.0	0.03	1.5	1.5		262	552	55	150
316	J92900	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	0.08	2.0	1.5		290	552	50	160
316H	J92901	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	0.12	1.5	1.5		290	552	50	160
317	J93001	18.0-21.0	9.0-13.0	3.0-4.0	0.08	1.5	1.5		303	572	45	170
317L	J92999	18.0-21.0	9.0-13.0	3.0-4.0	0.03	1.5	1.5		275	552	50	150
347	J92710	18.0-21.0	9.0-12.0		0.08	2.0	1.5	(8 × C) Cb, 1.0 màx.	262	531	39	149
303	J92701	18.0-21.0	9.0-12.0	1.5	0.16	2.0	1.5		276	531	52	150
309	J93402	22.0-26.0	12.0-15.0		0.20	2.0	1.5		345	607	38	190
310	J94202	23.0-27.0	19.0-22.0		0.20	2.0	1.5		262	524	37	144
Alloy20	J95150	19.0-22.0	27.5-30.5	2.0-3.0	0.07	1.4	1.5	3.0-4.0 Cu	221	476	48	130
2205	J92205	21.0-23.5	4.5-6.5	7.5-3.5	0.03	1.0	1.5	0.1-0.3 N	414	621	20	250

5.3. Propietats mecàniques

Les diferents propietats mecàniques a considerar d'un material són:

- a) **Resistència a la tracció:** coneguda també com la resistència a la tensió, és la mesura bàsica de la resistència que ofereix el material davant d'una tensió.
- b) **Límit elàstic:** aquesta es defineix com la tensió que provoca una deformació permanent del 0.2%. És la dada bàsica de caracterització de materials per al disseny industrial.
- c) **Rigidesa:** capacitat per a no ser flexionat, en funció del mòdul elàstic del material i la secció transversal de la peça.
- d) **Tenacitat:** relacionada amb la resistència a la tracció, mesura la capacitat del material a evitar la propagació d'esquerdes. Per exemple, l'estructura cristal·lina de metalls dúctils cedeix localment a la punta de la possible fissura de forma que atura la seva propagació.
- e) **Duresa:** habitualment mesurada en graus Brinell, determina la capacitat del material davant el desgast. Serà interessant per tant si es preveu que aquest es trobi en contacte amb sòlids abrasius o en suspensió ja que afectaran en menor grau a la superfície.
- f) **Fatiga:** degut a petites esquerdes que apareixen al ser sotmès a una tensió periòdica en el temps, més una possible alta temperatura que debilita l'estructura, el material acaba minvant les seves propietats mecàniques o fins i tot, trencant-se. Aquestes càrregues cícliques les podem trobar a elements rotatius com bombes o compressió.
- g) **Fluència:** representa la capacitat de deformació lenta que presenta el material degut a una tensió constant. Habitualment s'expressa com aquella tensió que provoca un trencament en 100000 hores a la temperatura d'assaig. Normalment no es considera aquesta deformació ja que la fluència de la majoria de materials és ínfima a temperatures moderades i a considerar a elevades.

A la Taula 8 veiem representades algunes propietats mecàniques de materials habitualment utilitzats en l'enginyeria.

Taula 8 Propietats mecàniques de metalls i aliatges comunament utilitzats. Font [1].

Material	Resistència a la tracció (MPa)	Mòdul elàstic (MPa·10 ³)	Duresa (HB)	Densitat específica
Acer al carboni	430	210	100-200	7.9
Ferro fos	140-170	140	150-250	7.2
Acer inoxidable (AISI 304)	>540	210	160	8
Níquel	500	210	80-150	8.9
Monel	650	170	120-250	8.8
Coure	200	110	30-100	8.9
Llautó almirallat	400-600	115	100-200	8.6
Alumini (>99%)	80-150	70	30	2.7
Plom	30	15	5	11.3
Titani	500	110	150	4.5

5.3.1. Temperatura

Un altre punt a tenir en compte a l'hora d'escollir el material més adequat, és el comportament d'aquest davant la temperatura on es trobarà. A l'enginyeria química és habitual trobar processos duts a terme a baixes o altes temperatures. Davant d'aquestes condicions tant les propietats mecàniques com de resistència química poden veure's afectades. Una baixa temperatura pot fer reduir la ductilitat i la resistència a l'impacte, en el cas dels metalls, alhora que augmentar la resistència a la tracció. Per exemple, els acers al carboni, a diferència dels acers austenítics, es tornen fràgils a aquestes temperatures. Per altra banda, la conductivitat tèrmica d'aquests acers al carboni és considerablement superior que la dels austenítics, amb uns valors habituals de 60W/m°C i 16W/m°C respectivament.

En cas d'una alta temperatura, es poden presentar problemes de ruptura i acceleració de la fatiga del material. L'acer ferrític és més dèbil en aquest sentit que un altre de tipus austenític, ambdós amb la possibilitat de millorar les dites propietats amb un afegit de molibdè.

Taula 9 Temperatures màximes d'alguns metalls. Font [2].

Metall	Temperatura màxima (°C)
Acer al carboni	480
Inconel	1100
AISI 304	900
AISI 309	1100
AISI 310	1100
AISI 410	700
AISI 430	850
AISI 446	1100
AISI 502	620

5.4. Contaminació

El flux de matèria a tractar pot contenir diferents elements perjudicials per al procés. Aquests poden afectar d'una manera més severa al material del equip que el producte per sí mateix. A més, les espècies formades en aquesta corrosió poden alterar el producte. Per exemple, la utilització de metalls com la plata o aliatges amb coure no són adequats per a trobar-se en contacte amb acetilè perquè formen acetaldehids explosius.

Quan es tracta d'un procés on s'utilitzin catalitzadors, aquests contaminants o substàncies formades podrien enverinar el catalitzador, fent que aquest quedi inutilitzable. Degut a aquestes raons, els efectes d'aquests contaminants determinen, en certs casos, el material a utilitzar.

En indústries com la dels aliments, farmacèutiques o tèxtils, la rugositat de la superfície pot determinar l'adequació del equip per al procés. En el cas de que la rugositat sigui gran, l'acumulació de substàncies adherides a la superfície representa un punt de contaminació no admissible en aquestes indústries degut a raons d'higiene. A més, una superfície més fina facilita la neteja del equip. També és important en el cas de la tèxtil perquè existeix la possibilitat de que els fils s'enganxessin a les irregularitats.

5.5. Costos

Usualment hi ha més d'un material adequat per a complir els requisits del sistema. El criteri bàsic de selecció entre materials possible és la determinació d'aquell que resulti més barat a l'empresa. Per a aquesta diferenciació és necessari conèixer la sèrie de punts següents per a cada possibilitat:

- Cost de la instal·lació.
- Vida útil.
- Costos de manteniment: tant la quantitat com la freqüència de realització.
- Cost de retirada.
- Cost del temps d'inactivitat per a reemplaçar o arreglar.
- Cost de instal·lacions de control per tal d'assegurar la seva vida útil.
- Valor temporal del diner.
- Aquells factors que influeixin sobre la fiscalitat, com la depreciació i els impostos.
- Taxa d'inflació.

És difícil preveure tant la vida útil com cost de manteniment que es requerirà, i només es pot aproximar un valor mitjançant procediments heurístics basats en l'experiència amb el material a estudi. En el següent punt es detalla l'estudi econòmic a realitzar necessari a l'hora de dissenyar un procés a una planta química. A la Taula 10 es llisten diferents preus unitaris de metalls.

Taula 10 Cost unitari de metalls habitualment utilitzats en la construcció d'equips³. Font [1].

Metall	€/t
Acer al carboni	520
AISI 304	2410
AISI 316	3280
Coure	2590
Alumini	1550
Níquel	11030
Monel	8620
Titani	34470

En ocasions, els requeriments de resistència química impliquen un material molt car. Existeix també la possibilitat de reduir el cost d'aquest mitjançant una combinació de dos components: un altre material no tant resistent a l'oxidació i més barat, amb un recobriments ceràmic o plàstic que ofereixi la capacitat de resistència requerida. Tot i això, la durabilitat d'aquest folre és qüestionable i la homogeneïtat del conjunt disminueix. És per això que, si hi ha només una petita diferència econòmica entre la opció de utilitzar només el component car i la de la combinació de materials, és recomanable decantar-se per la primera opció⁴.

³ Preus actualitzats segons l'índex CEPCI de 2013.

⁴ Suggestió trobat a [2]

6. Càlcul del cost del sistema

La raó de ser de tot procés industrial és treure'n un benefici, de manera que s'ha de realitzar un anàlisi previ complet dels costos i beneficis resultants del sistema. A més del benefici previst com a diferència entre venda i costos de producció, és important conèixer el valor de la inversió inicial i tots aquells factors que puguin influir sobre el capital.

6.1. Estimació de la inversió i instal·lació

En el moment d'instal·lació de la planta s'hi realitza la major inversió de capital perquè s'ha de comprar i preparar l'equipament. Hi ha dos tipus de costos associats a aquesta inversió:

- Directes: són els elements concrets de la instal·lació, que donen com a resultat el capital físic. En general són l'equipament, els materials i serveis, i els subcontractes necessaris per a les obres. Es llista a continuació els diferents elements d'aquest tipus:
 - Equipament i la seva instal·lació.
 - Instrumentació i controls.
 - Sistema de canonades.
 - Sistema elèctric.
 - Terreny i el seu condicionament.
 - Edificacions.
 - Instal·lacions de serveis com aigua i vapor i energia.
- Indirectes: aquells costos no particularitzats en elements tangibles. Alguns costos d'aquest tipus són els següents:
 - Costos d'enginyeria.
 - Despeses legals.
 - Despeses temporals de construcció i transport.
 - Honoraris del contractista.
 - Elements contingents.

Per a preveure el valor d'aquesta inversió existeixen diferents mètodes de càlcul. La majoria d'aquests es basen principalment en la recopilació de dades de preus al llarg de molts anys. Un càlcul teòric d'un cost a l'àmbit de la enginyeria es veu determinat principalment per la experiència.

En els diferents mètodes a continuació mostrats apareixen molts cops dades pertanyents a fonts bibliogràfiques de fa alguns anys. Aquests valors es troben, per tant, referenciats al valor

dels diners en el moment de la seva confecció. Degut a la inflació i diferents factors econòmics aquest valor ha anat variant al llarg dels anys. Per tant, per a que un càlcul de cost sigui vàlid el valor del diner ha de ser actualitzat al moment en que es realitzen les previsions.

Aquesta actualització es determina mitjançant l'índex CEPCI (acrònim de Chemical. Aquest serveix per escalar el cost d'una planta a partir d'un cost conegut d'un cert any, a l'any en el que es realitza la previsió de la inversió. Els índexs actuals es basen en un cost base d'entre el 1957 i 1959, i han sigut actualitzats mes rere mes per experts del grup de la revista *Chemical Engineering* [14].

L'escalat del cost es realitza mitjançant l'aplicació de la següent fórmula:

$$C_{actual} = C_{antic} \cdot \frac{CEPCI_{actual}}{CEPCI_{antic}} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

6.1.1. Mètodes bàsics d'aproximació del cost

6.1.1.1. Coeficient de gir de circulació:

És el quocient entre el valor de les ventes anuals entre el capital immobilitzat. Aproximadament, en el cas de plantes químiques, es troba entre 0.4 i 0.5 [3].

6.1.1.2. Mètode de Williams:

Aquest mètode relaciona dos casos diferents amb similar capacitat, ja sigui equipament o planta, mitjançant un exponent que depèn del cas concret. Aplicant la equació 6.2 és possible predir el cost d'un cas nou. Per a els exponents de Williams consultar la i la .

$$\frac{C_a}{C_b} = \left(\frac{P_a}{P_b} \right)^n \quad (\text{Eq. 6.3})$$

On:

- C_i : cost del equip o planta “i”.
- P_i : capacitats o paràmetres funcionals del equip o planta “i”.
- n : exponent de Williams.

Taula 11 Factors per al mètode de Williams (1). Font [8].

Classe d'equip (i paràmetre funcional)	n
Aspiradors de gas (cabal)	0.87
Bombes (Cabal)	0.520-0.76
Bescanviadors de calor (superfície de calefacció)	0.6
Colectors de pols (cabal)	0.84
Compressors (cabal)	0.73
Cristalitzadors (volum)	0.80-0.85
Depòsits (volum)	0.65
Desintegradors mecànics (potència i capacitat de producció)	0.60-0.72
Espesadors (sedimentadors) (superfície lliure)	0.30-0.72
Evaporadors (superfície de calefacció)	0.50-0.70
Filtres (superfície de filtració)	0.58-0.66
Hidroextractors i centrífugues (diàmetre)	1
Barrejadors (volum i potència)	0.35-0.70
Secadors: superfície de càrrega	0.9
Bufants (cabal)	0.30-0.60
Tamitzadores (superfície de tamitzats)	0.28-0.80
Torres (diàmetre)	0.72-1.20
Transportadors i elevadors (longitud o distància)	0.47-0.89

Taula 12 Factors per al mètode de Williams(2). Font [8].

Tipus de planta	n
Òxid d'etilè	0.79
Etanol	0.6
Estirè	0.68
Butadiè	0.59
Coquitxació del petroli	0.58
Formaldehid	0.58
Benzè	0.61
Àcid nítric	0.56
Oxigen	0.64
Acetilè	0.75
Metanol	0.83
Alcohol butílic	0.55
Alcohol isopropílic	0.6
Sosa	0.35
Àcid fosfòric	0.58
Nitrat amònic	0.54
Urea	0.59
Àcid sulfúric	0.62
Amoníac	0.74
Etilè	0.58

6.1.2. Mètodes factorials

Els denominats mètodes factorials resulten més precisos a l'hora de calcular un valor de cost perquè es basen en correccions matemàtiques depenent del cas concret a anàlisi.

6.1.2.1. Mètode de Lang:

El més bàsic d'aquest tipus de mètodes és el de Lang, amb el qual s'utilitza la equació 6.4 per a la estimació del cost depenent del tipus de planta amb el que es tracta.

$$C = F \cdot \sum_i E_i \quad (\text{Eq. 6.5})$$

On:

- C: el cost total.
- F: factor de Lang.
- E_i : cost de cada equip.

Taula 13 Factors per al mètode de Lang. Font [8].

Tipus de planta	Factor
De sòlids	3.1
Mixtes	3.63
De fluids	4.74

6.1.2.2. Mètode de Hand:

Semblant al anterior, en aquest cas existeix un factor diferent en funció de cada equip a sumar. En aquest cas, la equació a utilitzar és la 6.6.

$$C = \sum_i (f_i \cdot E_i) \quad (\text{Eq. 6.7})$$

On:

- f_i : el factor de cada tipus d'equip.

Taula 14 Factors per al mètode de Hand. Font [8].

Equip	Factor
Mescladors	2
Bufants i ventiladors (motor inclòs)	2.5
Centrífugues (Procés)	2
Compressors:	
Centrífugs, amb motor (motor exclòs)	2
Amb turbina de vapor (turbina inclosa)	2
Alternatius, vapor i gas	2.3
Amb motor (motor exclòs)	2.3
Ejectors (unitats de buit)	2.5
Forns (unitats paquet)	2
Canviadors de calor	4.8
Instruments	4.1
Motors, electricitat	8.5
Bombes:	
Centrífugues amb motor (motor exclòs)	7
Amb turbina de vapor (turbina inclosa)	6.5
De desplaçament positiu (motor exclòs)	5
Reactors: aprox. equivalent al d'equip	
Refrigeració (unitat paquet)	2.5
Tancs:	
Procés	4.1
Emmagatzematge	3.5
Prefabricats i muntats en camp	2
Torres (columnes)	4

6.1.2.3. Mètode de Cran:

Si es diferencia entre els possibles costos directes indirectes que pot tenir un equip, s'aplica la equació .

$$C = [\sum(E \cdot F_D) + I \cdot F_I] \cdot (1 + F_N) \quad (\text{Eq. 6.8})$$

On:

- F_D : factor del cost directe en dependència del equip i material.
- I : cost del instrument.

- F_I : factor del cost directe del instrument.
- F_N : factor del cost indirecte.

Taula 15 Factors per al mètode de Cran. Font [8].

Equip	Factor
Agitadors acer al carboni	1.3
Agitadors acer inoxidable	1.2
Mescladors	1.3
Bufadors	1.4
Calderes	1.5
Centrífugues, acer al carboni	1.3
Aerorrefrigerants, acer al carboni	2.5
Camb. de calor, carcassa i tubs SS	1.9
Camb. de calor, carcassa i tubs CS/ SS	2.1
Camb. de calor, carcassa i tubs CS/AI	2.2

6.1.2.4. Mètode de Chilton:

Amb aquest mètode, es parteix del cost del equip instal·lat per a calcular, amb els factors de la Taula 16, la resta de costos. És a dir, es sumen els costos directes i indirectes a partir d'una ponderació del cost del equip. D'aquesta manera, la equació resultant és la següent:

$$C = C_i \cdot (1 + \sum f_d) \cdot (1 + \sum f_i) \quad (\text{Eq. 6.9})$$

On:

- C: cost total.
- C_i : cost del equip a analitzar.
- f_d : factors de costos directes.
- f_i : factors de costos indirectes.

Taula 16 Factors per al mètode de Chilton. Font [8].

Costos directes	
Concepte	Factor
Instal·lació	0.4-1.2
Canonades (en funció del tipus de planta)	
Sòlids	0.07-0.10
Mixta	0.10-0.30
Fluids	0.30-0.60
Instrumentació (en funció de la automatització)	
Poca o cap	0.02-0.05
Mitja	0.05-0.10
Completa	0.10-0.15
Edificis y preparació del terreny (en funció del tipus de planta)	
Existent	0.00
Externa	0.05-0.20
Mixta	0.20-0.60
Interna	0.60-1.00
Auxiliars (en funció de la extensió)	
Cap	0.00
Ampliació petita	0.00-0.05
Ampliació gran	0.05-0.25
Nova	0.25-1
Línies exteriors (en funció de la unitat)	
Integrada	0.00-0.05
Separada	0.05-0.15
Dispersa	0.15-0.25
Costos indirectes	
Concepte	Factor
Ingenyeria i construcció (en funció de la complexitat)	
Simple	0.20-0.35
Complexa	0.35-0.50
Contingència (segons el procés)	
Complet	0.10-0.20
Subjecte a canvis	0.20-0.30
Especulatiu	0.30-0.50
Factor de tamany (segons unitat)	
Gran	0.00-0.05
Petita	0.05-0.15
Planta pilot	0.15-0.35

6.1.2.5. Mètode de Peters&Timmerhaus:

Aquest mètode més avançat, combina el mètode de Chilton i de Hand. Com en el de Chilton, es basa en el cost del equip però també classifica cada cost segons el tipus de planta com en el cas de Hand. Tal y com es mostra a la Taula 17, cada possible cost de la planta es troba referenciat com a un percentatge del cost del equipament.

Taula 17 Percentatges de costos per al mètode de Peters&Timmerhaus. Font [2].

Tipus de plana	Tant per cent del valor del equip		
	Líquids	Mixta	Sòlids
Costos directes			
Valor del equip	100	100	100
Instal·lació	45	39	47
Instrumentació (instal·lada)	9	13	18
Canonades (instal·lades)	16	31	66
Electricitat (instal·lada)	10	10	11
Edificis	25	29	18
Preparació del terreny	13	10	10
Serveis	40	55	70
Terreny	6	6	6
Total costos directes	264	293	346
Costos indirectes			
Enginyeria	33	32	33
Construcció	39	34	41
Total costos directes i indirectes	336	359	420
Contractista	17	18	21
Contingències	34	36	42
Total capital fix	387	413	483
Capital Circulant	68	74	86
Capital total	455	487	569

6.2. Càlcul detallat de l'equipament

En aquest punt es detalla l'estudi econòmic a realitzar sobre una sèrie d'equips habitualment necessaris en els processos de la indústria química: columnes de destil·lació, bescanviadors de calor, canonades, bombes i equips a pressió. Aquests càlculs són els factors a partir dels quals es comença a aplicar els mètodes abans explicats.

Tots els casos es basen en la resolució de l'equació a continuació. Aquesta consta d'un cost base que s'haurà de multiplicar per tots els factors corresponents del mètode.

$$C = C_b \cdot \prod f_i \quad (\text{Eq. 6. 10})$$

6.2.1. Columnes de destil·lació

El cost d'una columna es pot dividir en els següents punts:

1. Cost de la carcassa, capçals, etc.
2. Elements interns, com poden ser els plats, el rebliment, etc.

El primer punt s'aconseguirà obtenint els diferents factors del Gràfic 1. Després se li haurà de sumar el cost dels elements interns, que dependrà del tipus de columna utilitzat. En cas de necessitar el cost de plats, s'obtindrà del Gràfic 2. Mentre que si és una columna de rebliment, es calcula el cost utilitzant el volum que aquest ocupa i multiplicant-lo pel factor adequat de la Taula 18.

En cas de que el material utilitzat no aparegui als gràfics mencionats, es pot utilitzar la següent la Taula 10 per a escalar el cost calculat suposant que es tracta d'un altre metall.

6.2.2. Bescanviadors de calor

De forma semblant a les columnes, el cost dels bescanviadors també depenen de dos factors: els cost de la carcassa y dels tubs. Segons [1], el cost de la carcassa s'obté del Gràfic 3. Mentre que el cost dels tubs interiors s'obté aplicant els factors del Gràfic 3.

Per altra banda, existeix un altre mètode amb més factors amb els que es corregeix més el cost base. En aquest cas, el cost base s'extreu del Gràfic 5 i tots els factors de les taules Taula 19 a la Taula 22.

6.2.3. Canonades

Existeixen diferents mètodes de càlcul del cost d'una canonada. És un cost que depèn molt dels metres que es comprin i del mètode de fabricació. Pel que fa al cost de la canonada en sí, al Gràfic 6 es mostra una aproximació de la relació de cost que es pot donar entre diferents metalls i configuracions amb les que estiguin construïdes.

6.2.4. Bombes

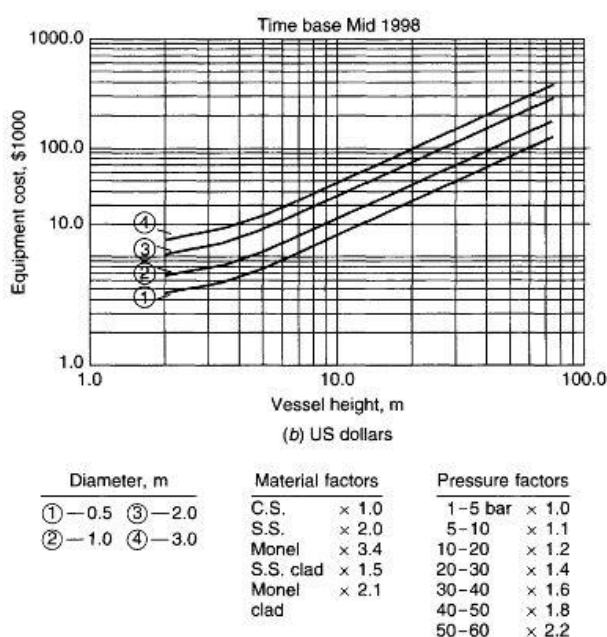
Per a calcular el cost d'una bomba, incloent el del motor que necessita, el cost base es troba amb el Gràfic 7 i els factors de la Taula 23.

6.2.5. Equips a pressió

Per al càlcul d'un equip a pressió primer s'haurà de calcular una aproximació de la massa amb la equació aproximada 6.11. En aquesta equació la variable D_e s'expressarà en metres. Aquest pes s'haurà de multiplicar pel cost unitari del material mostrat anteriorment a la Taula 10, i posteriorment per un factor de correcció que depèn del material amb el que ha sigut construït. Aquests factors es mostren a la Taula 24.

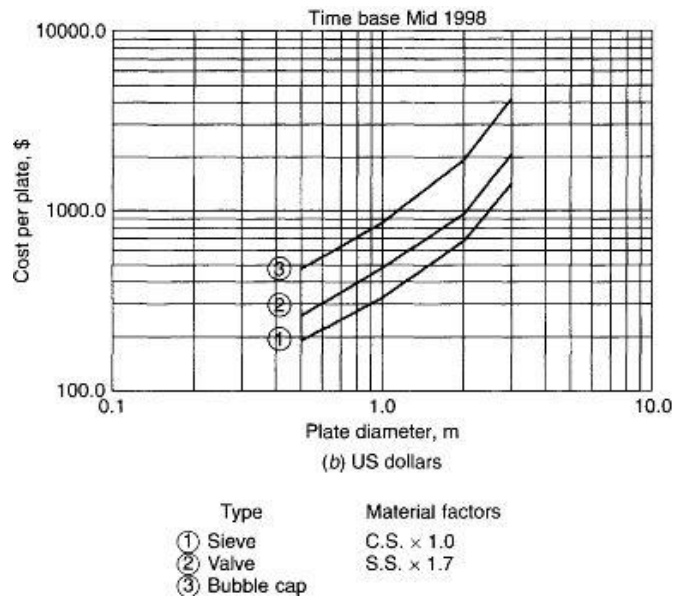
$$Massa = 7.85 \cdot D_e \cdot t \cdot \pi \cdot (h + D_e) \quad (\text{Eq. 6.12})$$

Gràfic 1 Cost d'un recipient vertical⁵. Font [1].



⁵ Vàlid per a recipients amb temperatures de disseny de fins a 300°C. En base dollars de l'any 1998.

Gràfic 2 Cost de plats de columnes⁶. Font [1]

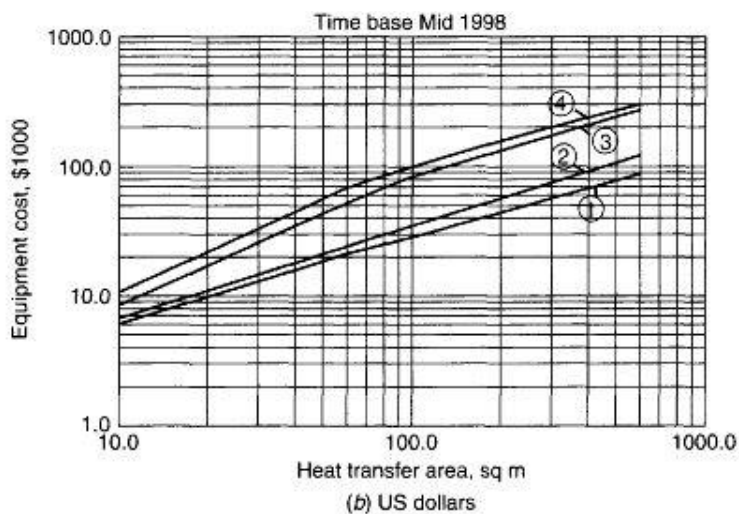


Taula 18 Cost de rebliment. Font [1].

Dimensions (mm)	Cost (€/m ³)		
	25	38	50
Tipus cadira, de gres	1512	1102	1037
Tipus anell, de polipropilè	1166	670	432
Tipus anell, d'acer inoxidable	2700	2700	1469

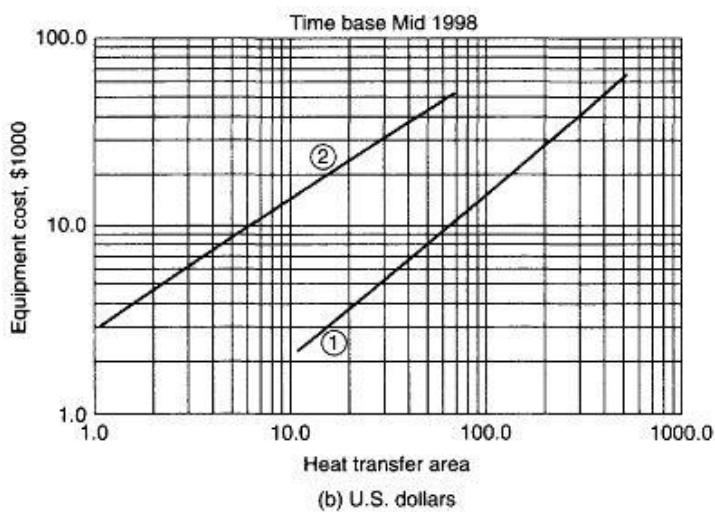
⁶ En base dollars de l'any 1998.

Gràfic 3 Cost de la carcassa d'un bescanviador⁷. Font [1].



Materials		Pressure factors	Type factors
Shell	Tubes		
① Carbon steel	Carbon steel	1-10 bar × 1.0	Floating head × 1.0
② C.S.	Brass	10-20 × 1.1	Fixed tube sheet × 0.8
③ C.S.	Stainless steel	20-30 × 1.25	U tube × 0.85
④ S.S.	S.S.	30-50 × 1.3	Kettle × 1.3
		50-70 × 1.5	

Gràfic 4 Cost dels tubs d'un bescanviador⁸. Font [1].



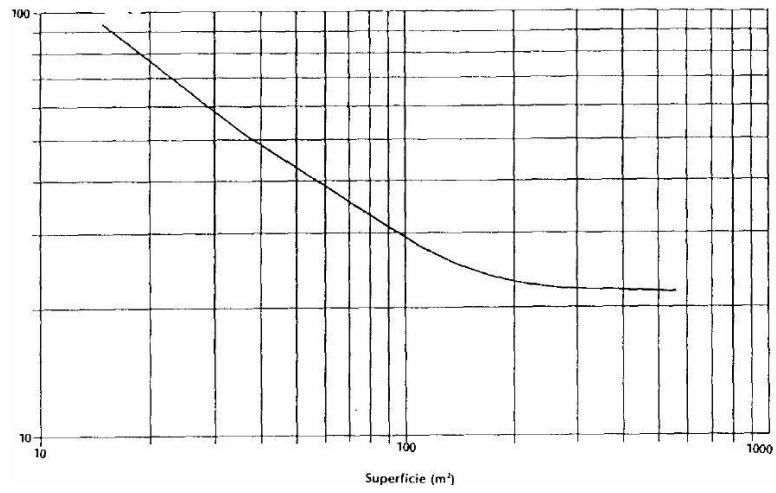
Type	Area scale	Material
(1) Gasketed plate	m ²	Carbon steel
(2) Double pipe	m ² × 100	Carbon steel

Material factors, plate only: Stainless steel 2.5, Titanium 6.0.

⁷ En base dollars de l'any 1998.

⁸ En base dollars de l'any 1998.

Gràfic 5 Cost d'un bescanviador en funció de l'àrea de transmissió de calor⁹. Font



⁹ Cost base en pessetes de 1991 i a multiplicar per 1000.

Taula 19 Factors per a bescanviadors 1. Font

Tipus	Factor
AES	1.00
AEM	0.87
AEU	0.85
AKT	1.20
BES	0.92
BEM	0.80
BEU	0.75
BKT	1.10
Thermosiphon	1.35
Número de passos	
2.00	1.00
4.00	1.02
6.00	1.04
	1.06
12.00	1.08
Longitud (m)	
2.4	1.35
3.7	1.13
4.9	1.00
6.1	0.92
7.3	0.90
Temperatura (°C)	
T<350	1.00
350<T<550	1.08

Taula 20 Factors per a bescanviadors 2. Font

Pressió (bar)	Superfície de contacte (m²)		
	50.00	100.00	500.00
<10	1.00	1.00	1.00
10-20	1.03	1.08	1.18
20-30	1.15	1.20	1.32
30-40	1.28	1.35	1.50
40-65	1.67	1.75	1.93
65-85	1.80	1.90	2.10
85-130	2.35	2.45	2.70
130-180	3.00	3.15	3.45

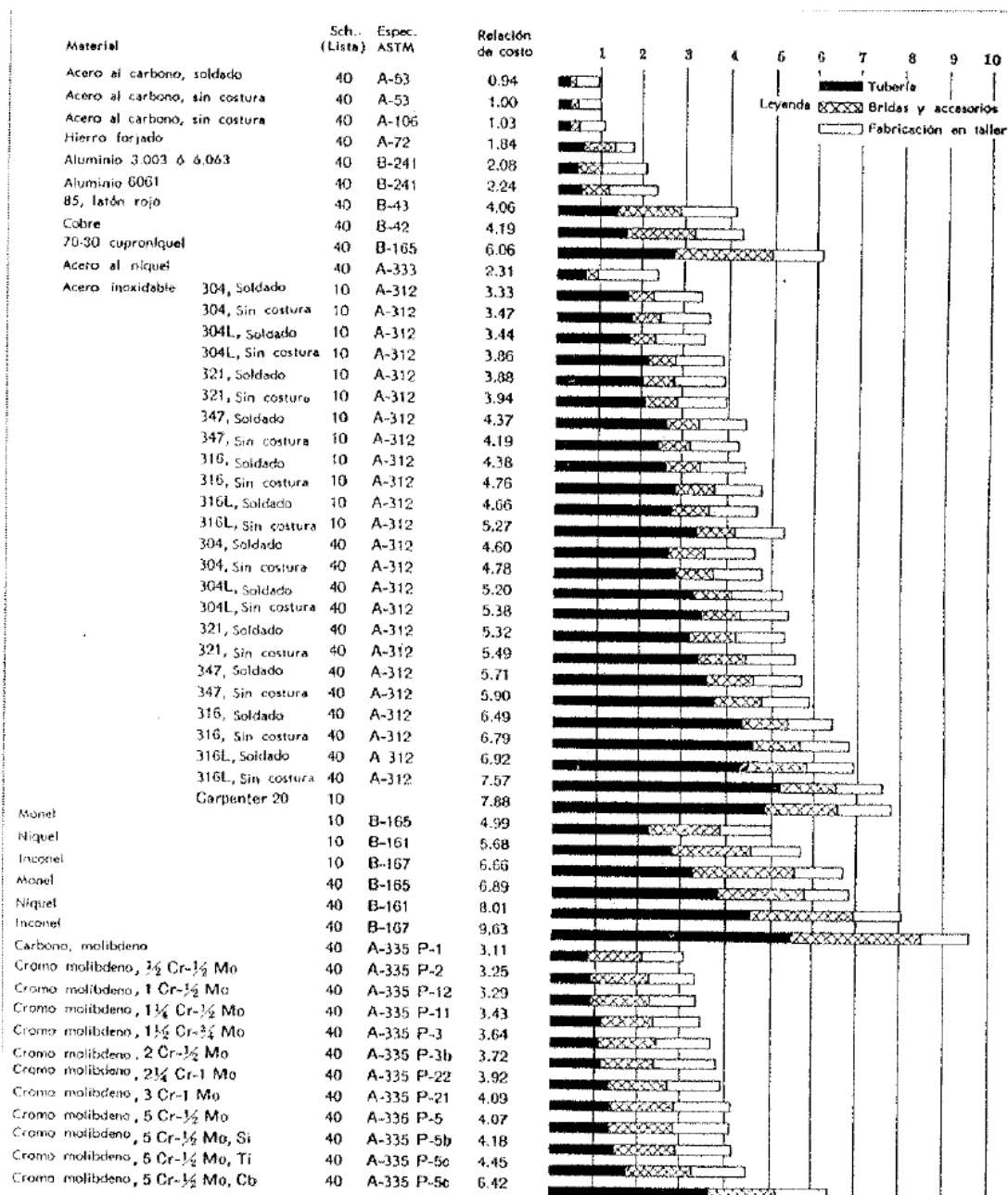
Taula 21 Factors per a bescanviadors 3. Font

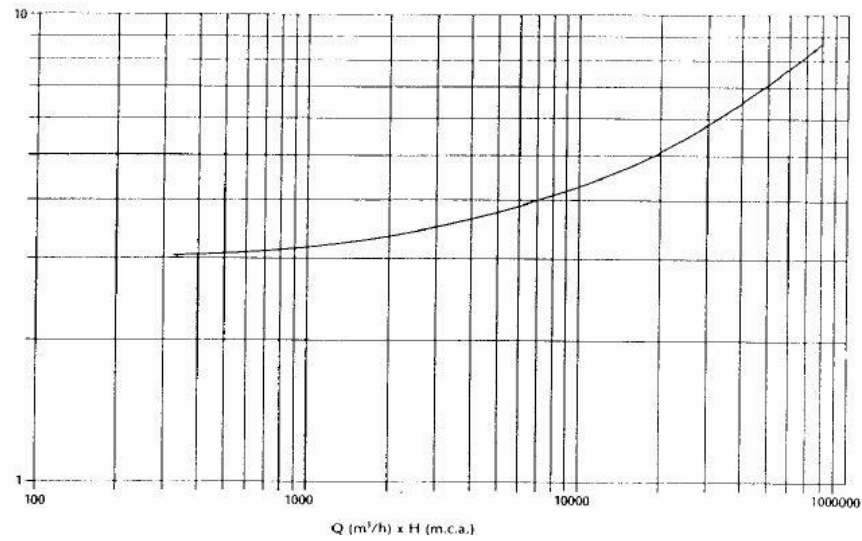
Diàmetre (mm)	Tipus de pas (in)	Factor
19.2	Cuadrat 1	1.00
19.2	Triangular 1.3	0.95
19.2	Triangular 1	0.97
25.4	Cuadrat 1.25	1.07
25.4	Triangular 1.25	0.97

Taula 22 Factors per a bescanviadors 4. Font

Superfície de contacte (m²)	Material Carcassa/Tubs									
	AC/AC	AC/Cu	AC/Mo	AC/304	304/304	AC/316	AC/Monel	Monel/Monel	AC/Ti	Ti/Ti
<10	1.00	1.05	1.40	1.55	2.30	1.95	2.80	4.50	4.70	11.00
10-50	1.00	1.10	1.55	1.75	2.55	2.15	3.05	4.80	5.80	12.20
50-100	1.00	1.15	1.75	2.15	2.90	2.55	3.55	5.30	7.30	13.90
100-500	1.00	1.30	2.05	2.60	3.40	3.00	4.35	6.10	9.40	16.30
500-1000	1.00	1.50	2.35	3.20	4.15	3.65	5.25	7.10	12.00	19.10

Gràfic 6 Relació de costos en canonades metàl·liques. Font [2].



Gràfic 7 Cost d'una bomba incloent el motor¹⁰. Font

Taula 23 Factors per al cost d'una bomba. Font

Tipus	Factor
Procés horitzontal	1.00
Procés amb doble guarnició i fluid intermig	1.50
Vertical en línia	0.50
Accionada per turbina	0.80
Química	0.50-0.70
Material	
Acer al carboni	1.00
Bronce	1.25
Acer al carboni/inoxidable 316	1.50
Acer inoxidable 316	1.80
Hastelloy	2.80
Temperatura (°C)	
<150	1.00
150-250	1.15
>250	1.30
Pressió d'aspiració (bar)	
<20	0.70
20-40	1.00
40-70	1.30

¹⁰ Valors en pessetes de 1998 i, a més, s'ha de multiplicar per 40000.

Taula 24 Correcció del cost d'un equip a pressió degut al material. Font

Material (AISI)	Factor
304	2.8
304L	3
316	2.9
316	3.3
347	2.9

6.3. Funcionament

El cost de funcionament d'una planta prové de diferents orígens. Primerament existeix el cost de producció pròpiament dit, que inclou costos de matèries primeres i energia entre d'altres. Segonament, també hi ha els costos fixos deguts a la existència mateixa de la planta, com poden ser segurs, les amortitzacions o els impostos. Per últim, diferents serveis i altres costos administratius també s'han de tenir en compte al calcular el cost de funcionament d'una planta.

En funció del cost del producte a vendre, del capital immobilitzat o del cost de manteniment, a [2] es proposa un mètode de càlcul de funcionament d'una planta un cop s'ha realitzat la previsió de inversió necessària per a la mateixa. A la Taula 25 es resumeixen diferents costos de funcionament classificats tal i com s'han introduït en aquest punt.

Taula 25 Costos de funcionament de la planta. Font [2].

Costos directes de producció	
Matèria prima	10-50% del cost total del producte
Mà d'obra	10-20% del cost total del producte
Supervisió i oficines	10-25% de la mà d'obra
Serveis	10-20% del cost total del producte
Manteniment i reparacions	2-10% del capital immobilitzat
Operacions d'abastiment	10-20% del cost de manteniment o 0.5-1% del capital immobilitzat
Laboratori	10-20% de la mà d'obra
Patents i royalties	0-6% del cost total del producte
Cargues fixes	
Amortitzacions	10% del capital immobilitzat
Impostos locals	1-4% del capital immobilitzat
Segurs	0.4-1% del capital immobilitzat
Lloguer	8-12% del valor del lloguer de la terra
Costos generals de la planta	
Salari, serveis mèdics, seguretat, etc.	50-70% del cost de la mà d'obra + cost de supervisió + cost de manteniment
Costos generals de la planta	
Administració	15% del cost de la mà d'obra + cost de supervisió + cost de manteniment
Distribució i ventes	2-20% del cost total del producte
Investigació i desenvolupament	5% del cost total del producte
Interessos de finançament	0-10% del capital total

6.4. Avaluació econòmica del projecte: rendibilitat

La rendibilitat relaciona el capital invertit amb els beneficis i costos anuals (com ho són els de producció). Aquest càlcul és en gran mesura inexacte perquè els beneficis anuals extrets i els costos que suposarà el funcionament de la planta han de ser suposats. A més, hi ha una llarga llista de punts que poden afectar aquest càlcul:

- Capital total invertit.
- Costos de fabricació.
- Període de construcció.
- Costos inicials d'engegada.
- Volum de ventes.
- Preu del producte.

- Flux de costos durant la vida del producte.
- Valor de la recuperació de les instal·lacions fixes.
- Mètode de depreciació.
- Taxa de recuperació mínima acceptable.
- Impostos.
- Inflació.
- Condicions generals del negoci.
- Etc.

En funció de les dades que es disposi es poden calcular diferents valors que poden ser utilitzats com a índexs de rendibilitat.

La quantitat de capital futur a partir d'una quantitat actual es calcula segons la equació . En cas de que el valor conegut siguin les anualitats a pagar, el capital futur serà el resultat de la equació 6.13

$$F = I \cdot (1 + i)^n \quad (\text{Eq. 6.14.})$$

$$F = I \cdot (1 + i)^n \quad (\text{Eq. 6.14})$$

Per altra banda, si es vol conèixer el preu anual que suposarà haver realitzat una inversió en funció d'un cert temps de retorn, la equació a utilitzar és la 6.15.

$$F = A \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i} \quad (\text{Eq. 6.16})$$

Com l'objectiu de tota empresa, i de la majoria de projectes, és extreure'n un benefici econòmic, és necessari estimar un període de recuperació de la inversió a partir del qual es percebi la generació de beneficis. Aquest serà el temps durant el qual el flux d'ingressos de diners servirà únicament per a pagar la inversió inicial.

Aquests ingressos es registren poc a poc al llarg del temps i el valor del diner és regressiu, així que els diferents moviments de capital han de ser actualitzats a un valor actual. D'aquesta manera es pot realitzar una correcta quantificació del valor de la inversió inicial.

Si anomenem Q al benefici net obtingut en un període n , es trasllada aquest valor al moment de la inversió (Q') amb la següent funció. On i representa la taxa d'interès per al període n .

$$Q' = \frac{Q}{(1+i)^n} \quad (\text{Eq. 6.17})$$

D'aquesta manera, si es sumen els diferents valors obtinguts en cada període (Q_n) fins arribar un cert temps de vida considerat del projecte, obtenim el valor actual net (VAN):

$$VAN = \sum_{n=0}^n \frac{Q_n}{(1+i)^n} \quad (\text{Eq. 6.18})$$

Un cop es pot determinar aquesta variable, és possible calcular el temps de recuperació d'una inversió. Aquest moment serà quan el VAN s'iguali a 0. Significarà que el valor dels diners ingressats en cada període (cadascun amb un valor diferent) ha igualat la despesa inicial per la posada en funcionament del projecte. En aquest cas, la variable desconeguda de la equació 6.19 serà n .

Des d'un altre punt de vista aquesta equació pot ser utilitzada per a calcular l'anomenada taxa interna de rendibilitat (TIR). Aquesta és la taxa màxima que es podria permetre per a que el projecte compleixi amb el moment a partir del qual es necessita una generació de beneficis. És a dir, si la dada definida és un temps desitjat de recuperació de la inversió, la variable desconeguda de la equació 6.20 serà i , coneguda com s'ha mencionat prèviament, TIR.

$$0 = \sum_{n=0}^n \frac{Q_n}{(1+i)^n} \quad (\text{Eq. 6.21})$$

Existeix també un altre índex de rendibilitat, més simple i habitualment utilitzat per a fer una ràpida comparació entre diferents alternatives senzilles: la relació de retorn (RR). Per a aquest índex és necessària la equació 6.22.

$$RR = \frac{\sum_{n=0}^n Q_n}{I \cdot n} \quad (\text{Eq. 6.23})$$

7. Disseny mecànic de l'equipament

En aquest capítol es descriu el procediment a dur a terme a l'hora de dissenyar correctament l'estructura d'un equip per tal de assegurar-ne l'adequació al procés. A l'enginyeria química, la variable de disseny més determinant acostuma a ser la diferència de pressió, ja sigui cap a l'exterior o l'interior, la qual posa en perill la integritat de la planta. Aquells equips amb una diferència de pressió considerable entre l'interior i exterior es consideraran equips a pressió (EP). No hi ha un valor determinat de pressió per a delimitar quins són els recipients a pressió i quins no, però en general es considera que si l'equip fa més de 0.15m de diàmetre i existeix una diferència de 50kPa, es recomana l'estudi de tensions com a EP.

Existeixen diferents codis per a especificar la fabricació i els detalls del disseny dels EP. En aquest treball es seguirà les especificacions definides al codi ASME secció VIII. No caldrà, per tant, una avaluació detallada de totes les tensions, però sí una determinació de les combinacions de possibles càrregues, les quals es descriuen a continuació:

- Pressió de disseny interior i exterior.
- Pes del equip i el seu possible contingut.
- Sobrepesos provinents de components penjats del equip (bombes, canonades, etc.) o accessoris interns (plats, separadors, etc.) o externs (anells rigiditzadors, potes, etc.).
- Reaccions cícliques i dinàmiques, degudes a variacions tèrmiques o de pressió, o a vibracions.
- Vent.
- Gradients de temperatura i diferents els coeficients de dilatació si s'ha utilitzat més d'un material.
- Pressions especials, com poden ser la de la prova hidràulica, causada per una deflagració o per un cop d'ariet.

Les principals tensions a les que és sotmès l'equip amb forma de revolució són la longitudinal, la circular i la radial. Tot i això, si el radi és més de deu vegades superior al espessor utilitzat, aquestes actuen com una de sola anomenada tensió de membrana, i l'estudi a realitzar es veurà lleugerament modificat.

En definitiva, l'estudi té com a objectiu definir un determinat espessor de material que garanteixi el bon funcionament del mateix, en funció de les condicions d'operació, el material utilitzat i la forma i dimensions del equip.

7.1. Consideracions de disseny

Les variables necessàries a determinar per a realitzar el disseny del equip són:

- **Pressió de disseny:** s'escull la major entre un 10% més de la pressió màxima d'operació del sistema o aquesta mateixa més 0.2MPa.
- **Temperatura de disseny:** serà la temperatura màxima d'operació més 20°K, per tal de que fluctuacions a la temperatura degut a canvis en el sistema no posin en perill la integritat del mateix.
- **Càrrega deguda al vent:** en funció de la velocitat del vent, la qual es determinarà com la màxima velocitat registrada pel mateix en els últims vint anys. L'adequada determinació de la càrrega per metre lineal es determina amb les equacions trobades al Annex A Equacions i taules complementàries
- .
- **Tipus de material utilitzat:** en funció de les propietats mecàniques i químiques de les que disposi el material de l'equip, es determinarà si aquest és adequat o no per al sistema. Existirà una pressió i temperatura màxima que resistirà, com una resistència a la corrosió depenent del producte contingut.
- **Espessor per corrosió:** per tal de garantir de que el gruix de material que es dissenya no es vegi minvat per la corrosió, es recomana afegir 2 o 4mm de gruix segons si el sistema és lleugerament o altament corrosiu, respectivament.
- **Gruix mínim pràctic de paret:** es requerirà un gruix mínim de material per a assegurar la rigidesa de l'equip davant el seu propi pes, a més del sobregruix degut a la corrosió permissible. Segons el codi ASME, un mínim de 1.5mm és adequat. A més, a [1] trobem una major especificitat a l'hora d'afegir gruix de material en funció del diàmetre del equip en qüestió, tal i com es mostra a la Taula 26.

Taula 26 Gruix mínim pràctic de paret. Font [1]

Diàmetre (m)	Gruix mínim (mm)
1.0	3
De 1.0 a 2.0	5
De 2.0 a 2.5	7
De 2.5 a 3.0	8
De 3.0 a 3.5	10

- **Tensió màxima permissible:** serà la tensió de disseny màxima que podrà suportar el

material de construcció. Per tal de assegurar que no s'arriba al límit de la resistència del material, tenint en compte que no es poden predir i calcular totes les tensions que hi suportarà, la tensió màxima de disseny serà molt menor al límit elàstic. Segons els codi ASME, aquesta serà la menor de:

- 25% de la tensió de ruptura a temperatura ambient.
- 25% de la tensió de ruptura a temperatura de disseny.
- 62.5% del límit elàstic a temperatura ambient.
- 62.5% del límit elàstic a temperatura de disseny.
- 80% de la tensió de ruptura considerant la fatiga després de 100.000 hores de treball.

Es mostren alguns valors de esforç màxim permisible a la Taula 27.

Taula 27 Tensions màximes permissibles per a alguns metalls. Font [1].

Metall	Resistència a la tracció (MPa)	Tensió màxima permisible fins a la temperatura (°C): (MPa)				
		93	149	204	260	316
Acer al carboni	360	126	115	105	93	83
304L	552	105	90	76	67	62
316L	483	108	100	83	76	70
Monel 400	483	114	107	102	101	101
Inconel 600	552	133	130	128	128	128

- **Eficiència de la soldadura:** en funció del tipus de soldadura, el càlcul del gruix necessari a la paret serà diferent, perquè anirà en funció de la eficiència de la mateixa. Aquesta variable dependrà del examen radiogràfic realitzat.

Taula 28 Eficiència màxima de la soldadura. Font [1].

Descripció del treball	Grau de l'examen radiogràfic		
	Complet	Puntual	Cap
Unió a topall doblement soldada o equivalent	1.00	0.85	0.70
Unió a topall, soldadura única amb tira de suport	0.90	0.80	0.65
Unió a topall, soldadura única sense tira de suport	-	-	0.60
Unió de superposició doblement farcida completa	-	-	0.55
Unió de superposició farcida completa amb soldadures de tap	-	-	0.50
Unió de superposició farcida completa sense soldadures de tap	-	-	0.45

7.2. Pressió interna: disseny dels components principals

A partir de l'anàlisi de les possibles tensions que es troben al material, al codi ASME [10]

s'especifica com calcular l'espessor mínim de la paret en funció de l'equip.

- **Carcasses cilíndriques**

$$t = \frac{P_d \cdot D_i}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_d} \quad (\text{Eq. 7.24})$$

- **Carcasses esfèriques**

$$t = \frac{P_d \cdot D_i}{S \cdot E - 0.2 \cdot P_d} \quad (\text{Eq. 7.25})$$

- **Terminacions planes**

$$t = D_e \cdot \sqrt{\frac{C \cdot P_d}{S \cdot E}} \quad (\text{Eq. 7.26})$$

On C depèn de la restricció de la vora. Seguidament es llisten alguns valors de C en funció del tipus de vora il·lustrat a la Il·lustració 1.

- Terminació amb brides.
- i c) Placa soldada a la carcassa amb un cordó de soldadura amb un angle de 45° i una profunditat del 70% del espessor de la carcassa: $C=0.33 \cdot t_s$, on t_s és l'espessor de la carcassa. Utilitzant D_i per a la variable D_e de la equació 7.27.
- Coberta amb pern amb una junta de cara completa: $C=0.25$ i com a D_e s'utilitza el diàmetre de la circumferència que uniria els centres dels pern.
- Coberta amb pern amb una junta de cara cargolada: $C=0.3$ i com a D_e s'utilitzarà el valor de diàmetre mig de la junta.

- **Capçals hemisfèrics**

Il·lustració a de la Il·lustració 2.

$$t = \frac{P_d \cdot D_i}{4 \cdot S \cdot E - 0.4 \cdot P_d} \quad (\text{Eq. 7.28})$$

- **Capçals el·líptics**

Il·lustració b de la Il·lustració 2.

$$t = \frac{P_d \cdot D_i}{2 \cdot S \cdot E - 0.2 \cdot P_d} \quad (\text{Eq. 7.29})$$

- **Capçals torisfèrics decimals o tipus Klopper¹¹**

Il·lustració c de la Il·lustració 2.

$$t = \frac{P_d \cdot R_c}{S \cdot E - 0.1 \cdot P_d} \quad (\text{Eq. 7.30})$$

- **Estretaments o zones còniques**

En la zona del colze del estretament s'haurà reforçar la carcassa del material amb un major gruix que el calculat a la zona cilíndrica (veure Il·lustració 3). Després, l'espessor dependrà del punt que estiguem analitzant perquè depèn del diàmetre. És per això que es recomana agafar el gruix màxim: calculat segons el diàmetre immediatament posterior a la zona reforçada. Per a aquest càlcul és necessària la equació 31.

$$t = \frac{P_d \cdot D_i}{(2 \cdot S \cdot E - P_d) \cdot \cos \alpha} \quad (\text{Eq. 7.32})$$

- **Canonades**

$$t = \frac{P_d \cdot D_i}{2 \cdot S + P_d} \quad (\text{Eq. 7.33})$$

El diàmetre intern haurà sigut calculat en funció de la velocitat lineal que es desitgi a la canonada. A la Taula 29 es mostren algunes velocitats lineals típiques segons el tipus de fluid transportat.

Taula 29 Velocitats de fluids a canonades.

	Velocitat lineal (m/s)
Líquids bombejats (no viscosos)	1.0-3.0
Gasos i vapors	15.0-30.0
Fluids a alta pressió	30.0-60.0

El gruix aquí calculat correspon només al necessari per a suportar la pressió. Tot i que si es

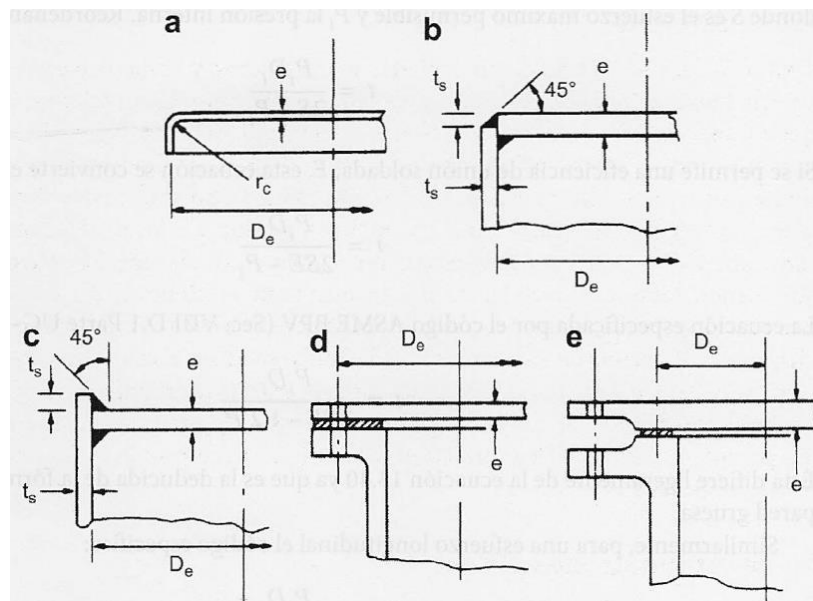
¹¹ El radi de curvatura del capçal és igual al diàmetre de la carcassa, mentre que el radi de curvatura de les vores és 10 cops inferior.

tracta d'un fluid bombejat s'haurà de tenir en compte el cost de bombeig que suposa determinar un diàmetre intern o un altre. A [1] es proposa que el diàmetre òptim intern d'una canonada serà, en funció del material, el resultat de la equació 7.34.

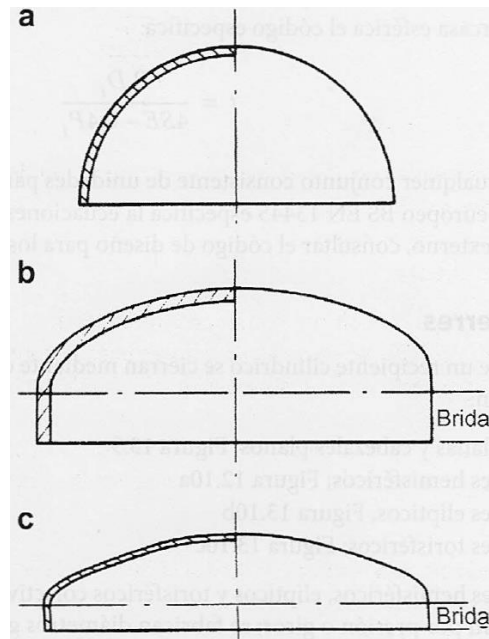
$$D_{\text{òptim}} = C \cdot G^{0.53} \cdot \rho^{-0.37} \quad (\text{Eq. 7.35})$$

On C és 293 si es tracta d'acer al carboni i 260 si es tracta d'acer inoxidable.

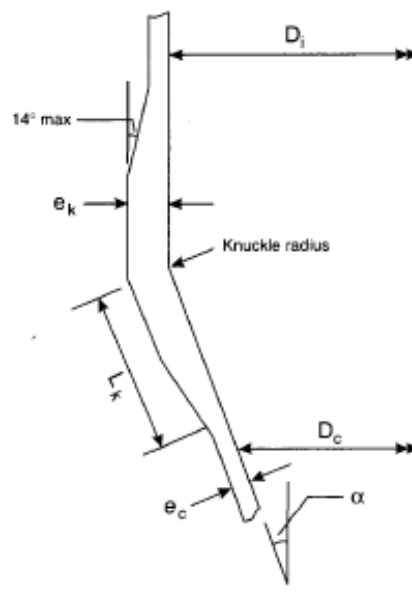
Il·lustració 1 Terminacions planes. Font [1]



Il·lustració 2 Tipus de capçals. Font [1].



Il·lustració 3 Reforç necessari en un colze. Font [1].



7.3. Pressió externa: comprovacions mínimes

Al codi ASME es proposen un seguit de passos per tal de conèixer quin gruix mínim necessita el equip per tal de resistir a una pressió externa:

1. Es proposa un espessor inicial t , calculat de manera que suporti la pressió interna.

2. Determinar la distància longitudinal del equip (L) o en el cas de que existeixin anells rigiditzadors, L serà la distància entre els mateixos.
3. Es calculen els valors de L/D_e i $D_e/(t-c)$.
4. Amb els valors anteriors, trobar el factor A a o i, utilitzant aquest, trobar el factor B a o.
5. Calcular la pressió externa permesa pel susdit gruix amb la equació 7.36. En cas de que el factor A hagi caigut a l'esquerra de les funcions que determinen el factor B, la pressió es determinarà amb la equació 7. 37. En aquest cas, la variable E representa el mòdul elàstic del material. Es mostren alguns mòduls elàstics a la

$$P_a = \frac{4 \cdot B}{3 \cdot \frac{D_e}{t-c}} \quad (\text{Eq. 7.38})$$

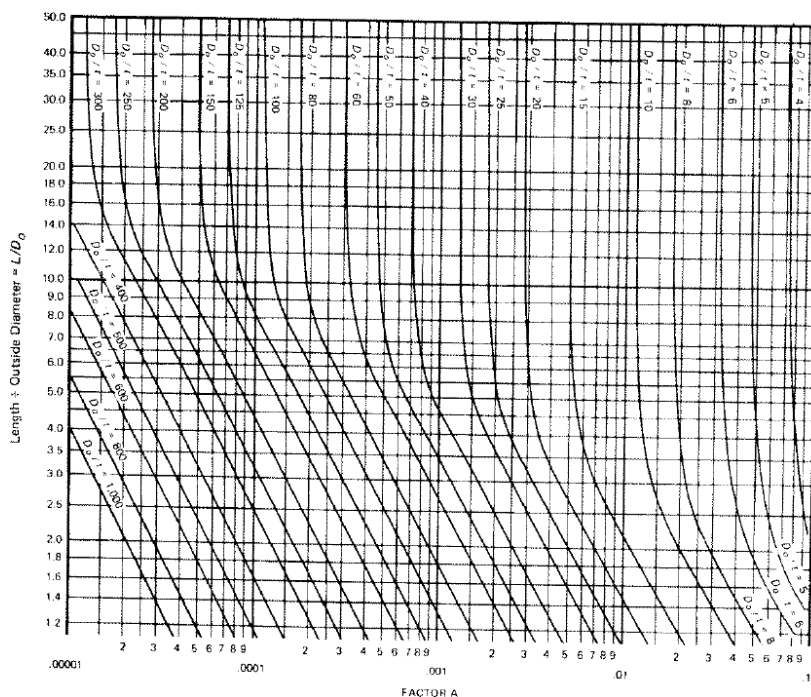
$$P_a = \frac{2 \cdot A \cdot E}{3 \cdot \frac{D_e}{t-c}} \quad (\text{Eq. 7.39})$$

Taula 30 Mòdul elàstic d'alguns metalls. Font [7].

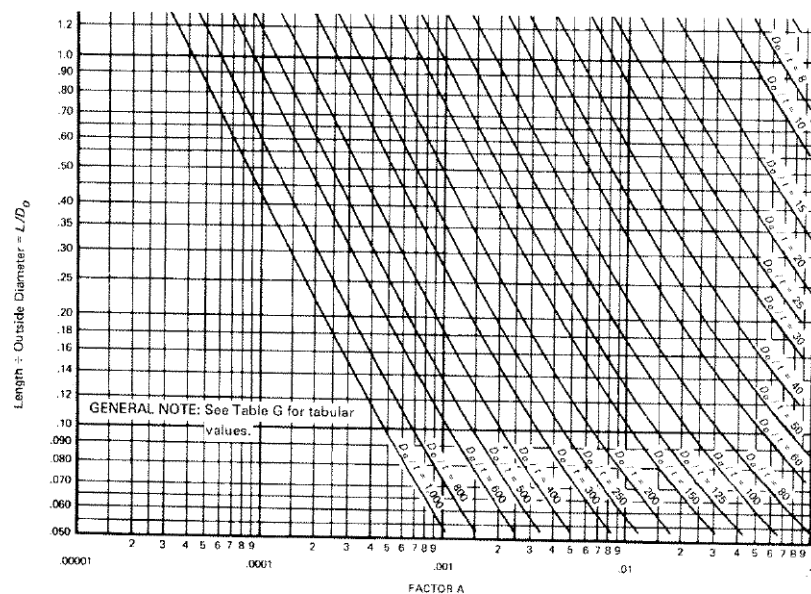
Metall (AISI)	Mòdul elàstic (psi)
304L	$28 \cdot 10^6$
316L	$28 \cdot 10^6$
Monel 400	$26 \cdot 10^6$

6. Si la pressió externa permesa és superior a la externa real, l'espessor estudiat serà suficient. En cas contrari, s'haurà d'augmentar el gruix o instal·lar un anell rigiditzador més per tal de reduir la variable L, i tornar a començar el procés. Aquest procés iteratiu finalitzarà quan es trobi un espessor que permeti suportar la pressió externa desitjada.

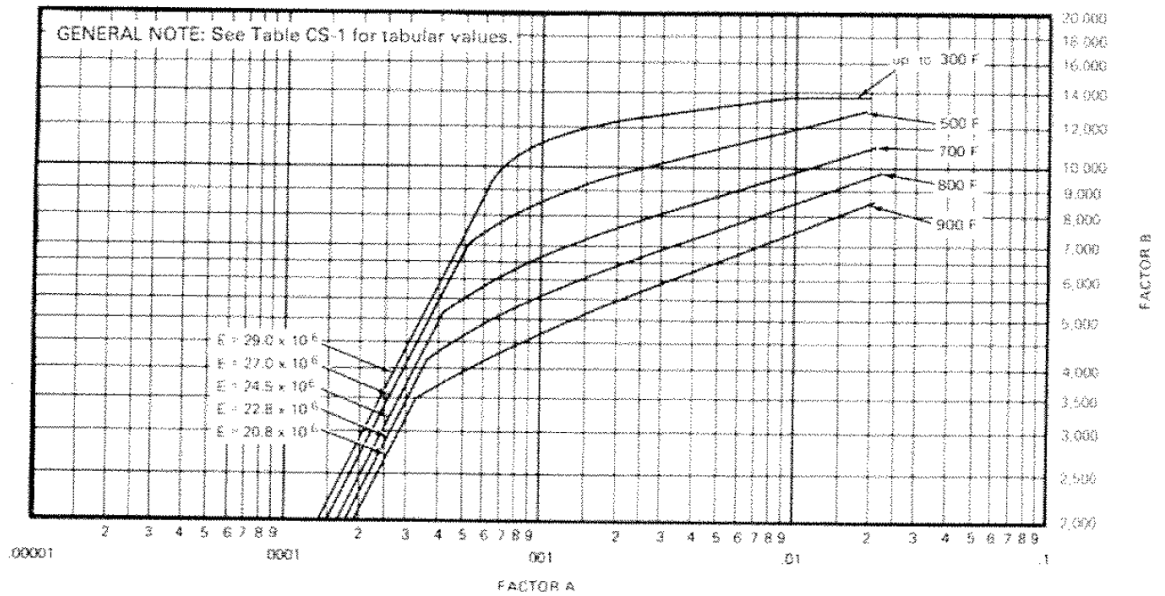
Gràfic 8 Determinació del factor A (1). Font [6].



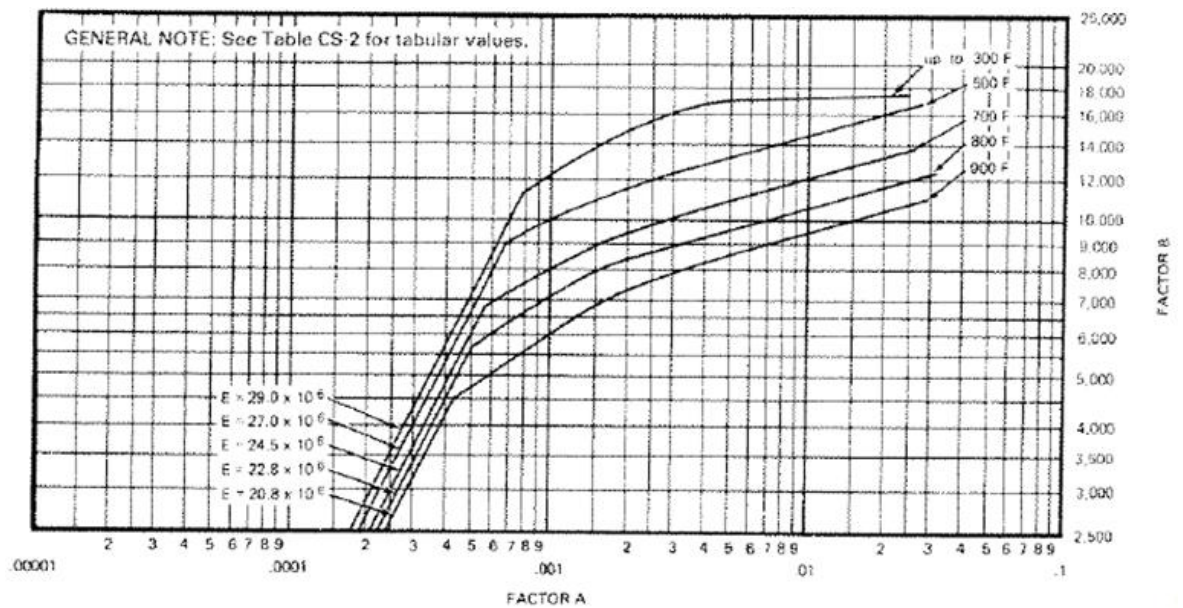
Gràfic 9 Determinació del factor A (2). Font [6].



Gràfic 10 Determinació del factor B per a acers al carboni o inoxidable amb un límit elàstic inferior a 207MPa. Font [6].



Gràfic 11 Determinació del factor B per a acers al carboni o inoxidable amb un límit elàstic superior a 207MPa. Font [6].



7.4. Orificis o connexions

En cas que es necessiti connectar l'equip a una canonada, havent de realitzar un forat en la paret del mateix, es necessita afegir material al voltant de la connexió. L'objectiu és reforçar aquesta zona on acaba el material, les propietats mecàniques de la qual poden ser inferior, a més del fet que el gruix de la paret havia sigut calculat considerant-la uniforme.

A la normativa ASME sec. VIII es determinen diferents variables a calcular a partir dels

quals, amb la metodologia seguidament exposada, es coneix el volum de material necessari per al reforç. A la Il·lustració 4 s'esquematitzen les esmentades variables. A continuació s'especifiquen les necessàries per a les fórmules.

Els subíndex h, b i r, es refereixen a l'envoltant principal, a la connexió i al reforç, respectivament. Les variables \bar{T}_i indiquen l'espessor nominal de la paret del element "i", tot i que, a ser possible, es treballarà amb les de tipus T_i , les quals representen el espessor mesurat o el mínim dintre de la tolerància. A més, les variables t_i representen el gruix de paret mínim necessari per a suportar la pressió interna del respectiu element. d_1 ,

Pel que fa a les demés variables, es calculen segons:

$$d_1 = \frac{D_b - 2 \cdot (T_b - c)}{\sin \beta} \quad (\text{Eq. 7.40})$$

$$d_2 = \max \left[d_1; (T_b - c) + (T_h - c) + \frac{d_1}{2} \right] \quad (\text{Eq. 7.41})$$

$$L_4 = \min [2.5 \cdot (T_h - c); 2.5 \cdot (T_b - c) + T_r] \quad (\text{Eq. 7.42})$$

$$A_1 = t_h \cdot d_1 \cdot (2 - \sin \beta) \quad (\text{Eq. 7.43})$$

$$A_2 = (2 \cdot d_2 - d_1) \cdot (T_h - t_h - c) \quad (\text{Eq. 7.44})$$

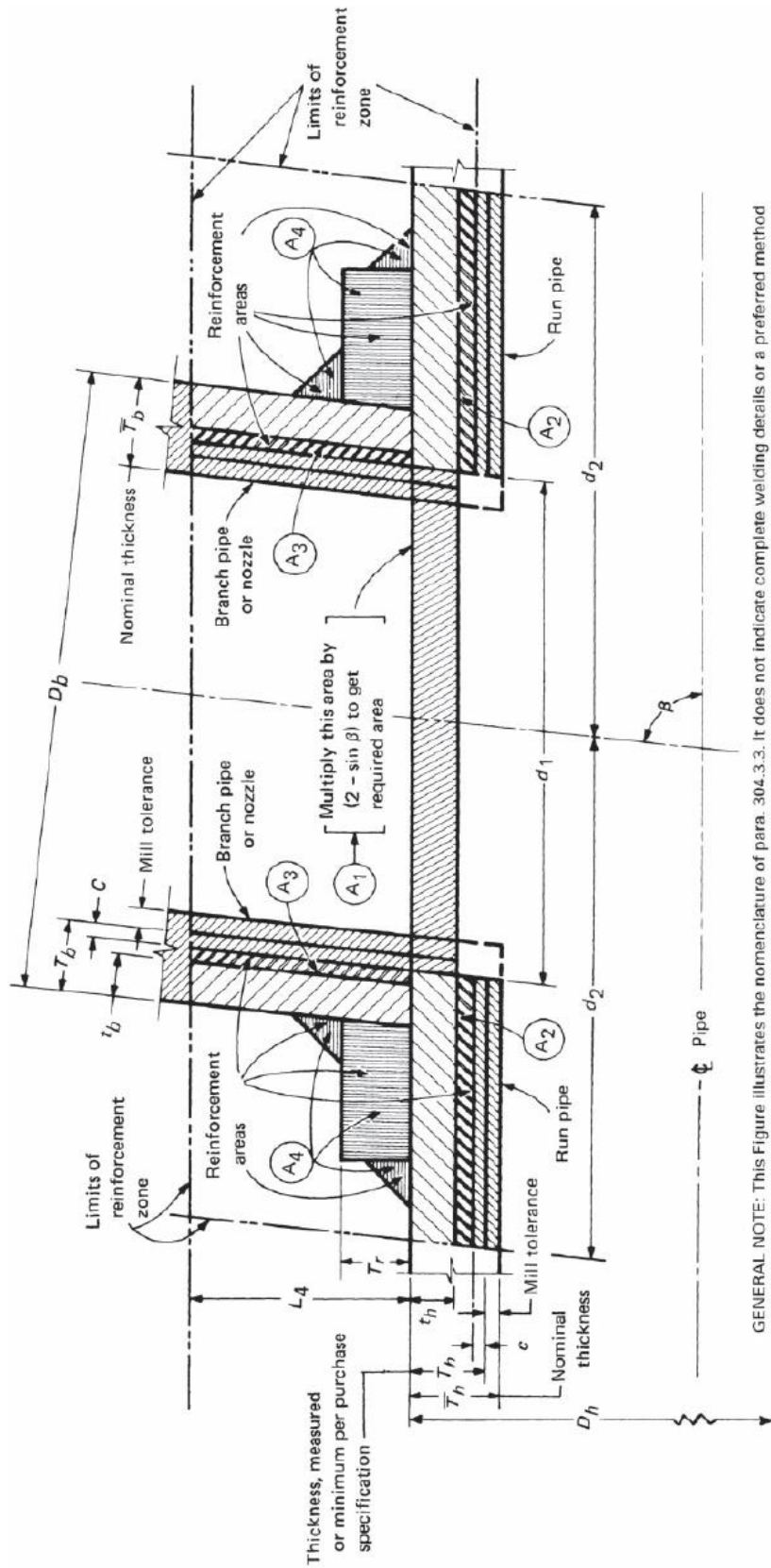
$$A_3 = \frac{2 \cdot L_4 \cdot (T_b - T_c - c)}{\sin \beta} \quad (\text{Eq. 7.45})$$

I per últim, A_4 es calcula com la suma d'àrees del reforç dins de la zona efectiva.

Procediment de càlcul:

1. Calcular els espessors mínims requerits a l'envoltant i la connexió: t_h i t_b .
2. Calcular l'àrea de material eliminada: A_1 .
3. Determinar els límits de l'àrea considerada: d_2 i L_4 .
4. Sumar les àrees considerades de reforç (A_2 , A_3 , A_4) disponibles.
5. Comparar aquesta última suma amb la requerida (A_1).
6. En cas de que sigui inferior, s'haurà de augmentar l'àrea de material de reforç (A_4) fins a que la suma del punt 5 sigui superior a l'àrea requerida.

Il·lustració 4 Reforç per a orificis. Font [10].



GENERAL NOTE: This Figure illustrates the nomenclature of para. 304.3.3. It does not indicate complete welding details or a preferred method of construction. For typical weld details, see Fig. 328.5.4D.

7.5. Normativa ATEX

Existeix una definició oficial segons la qual una ATEX s'entén per atmosfera explosiva: la mescla amb l'aire, en condicions atmosfèriques, de substàncies inflamables en forma de gasos, vapors, boires o pols, en què, després d'una ignició, la combustió es propaga a la totalitat de la barreja no cremada.

Exemples de possibles substàncies inflamables poden ser: metà en forma de gas, acetona en forma de vapor o alumini en forma de pols. Per a seguir el procediment marcat segons la normativa per a evitar aquestes condicions perilloses, primerament és absolutament necessari conèixer bé les propietats dels productes a tractar. En funció de les temperatures d'ignició o inflamabilitat, es podrà saber si ens trobem davant d'una atmosfera explosiva o no. A més, per a que es produeixi l'explosió existeix un límit inferior y superior de quantitat de producte inflamable a l'aire. Per un costat, si hi ha massa poc, la ignició no es propaga suficient, mentre que per altra banda, si hi ha massa, la manca d'oxigen impossibilita aquesta reacció.

Segonament, s'ha de classificar exhaustivament tot aquell espai on es trobi el producte en diferents zones. Aquestes tenen una classificació numèrica segons la possibilitat de formació d'una ATEX i la seva durada. A més, tindran un codi numèric dependent de si és formada degut a un gas o per partícules sòlides en suspensió. En aquest punt, és important tenir en compte qualsevol possible formació d'espurna. Aquesta pot ser generada, per exemple, en el fregament d'un agitador amb un equip, o amb una descàrrega d'un aparell electrònic. Per altra banda, també s'ha d'identificar qualsevol possible font d'escapament de gasos o partícules. Les zones s'identificaran segons la codificació de la Taula 31.

Taula 31 Relació entre la categoria de l'equip i les diferents zones de perill. Font [15].

Equipament			Zona	
Nivell de protecció	Categoria	Existència d'ATEX	Gas	Pols
Molt alt	1	Persistent	0	20
Alt	2	Ocasionalment probable	1	21
Normal	3	Improbable o de curta duració	2	22

Habitualment es comença identificant una zona on la formació de la ATEX és segura (o zona 0) i després s'estudia si les zones contigües també han de tenir aquesta classificació (no hi ha cap paret o impediment entre ambdues). A partir d'aquí, el voltant de qualsevol possible punt d'escapament d'aquesta zona, serà considerat zona 1, i així consecutivament.

El següent pas a realitzar és aprovisionar-se d'equips amb la certificació adequada segons la zona en la qual seran instal·lats. Segons la zona, el marcatge del equip haurà de ser tant o més segur que la correspondència mostrada a la Taula 31.

Després de definir els equips a utilitzar i no abans, és aconsellable plantejar diferents maneres de prevenir la formació de la ATEX. Per exemple, és possible que la reacció que ocorre dins d'un tanc formi un gas inflamable. En el moment de dissenyar el sistema, s'ha d'haver calculat de manera que la temperatura sigui inferior a la d'ignició per tal de que no exploti per sí sol. Tot i això, per precaució, és aconsellable reduir la temperatura fins que el producte es trobi per sota del punt d'inflamació i així, tot i que per accident es produís una espurna, no s'inflamaria tot el producte.

Una possible manera de protegir una zona és inertitzant-la amb la injecció de nitrogen per tal de que arrossegui el oxigen, disminuint, com s'ha comentat, la temperatura, o amb un millor segellat de la zona. Per a que es produeixi la explosió s'han de donar a la vegada 3 condicions: que hi hagi una ATEX, una font d'ignició i un mètode de propagació. Eliminant com a mínim algun d'aquests elements es mitiga la possibilitat de que el sistema exploti. Habitualment, en el mateix marcatge dels equips s'indica sobre quin o quins dels 3 punts el component ha sigut assegurat.

Posteriorment, quan es considera que s'ha reduït prou la possibilitat de formació de la atmosfera explosiva, és necessari dissenyar un mètode per mitigar les conseqüències que ocasioni la suposada explosió.

Tot i que aplicant una metodologia adequada es redueixi el risc d'aparició d'una ATEX, la zona no es reduirà mai de classificació i ha de seguir estant protegida amb l'equipament primerament designat.

Finalment, és necessari omplir una sèrie d'informes que descriuen la situació del sistema i tot el procés utilitzat per a minvar el perill. Els operaris que hi treballen han de ser adequadament formats davant la situació de perill i cada zona ha de trobar-se corresponentment etiquetada de forma visible.

8. Aplicació a un procés concret

El cas concret d'estudi és la separació de diferents components orgànics provinents de residus industrials. La majoria d'aquestes substàncies són dissolvents orgànics, tal i com es llisten a la Taula 32, però també s'hi poden trobar altres espècies provinents de: transformacions de les molècules originals degut a la temperatura o al contacte amb el solut, o altres possibles contaminants externs. A més, la majoria de productes amb els que s'ha treballat presentaven també traces d'aigua amb clor dissolt. Tant el clor com a component en els dissolvents, com el trobat a l'aigua és el causant dels majors problemes de corrosió que hi succeeixen, tal i com es detallarà més endavant.

Taula 32 Temperatures de fusió i ebullició dels components tractats a Ecologia Química S.A. en condicions normals. Font [1], [5].

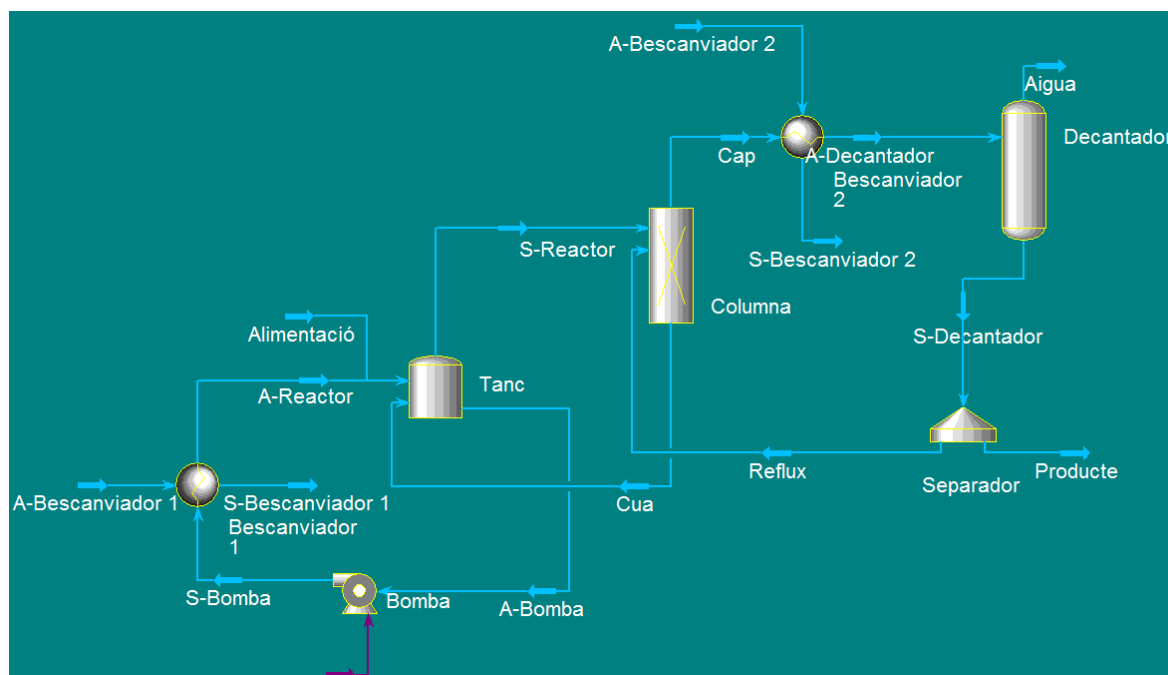
Component	T_f (°C)	T_e (°C)
Acetat de butil (NBA)	-73.5	126.00
Acetat de etil	-83.60	77.10
Acetona	-94.70	56.10
Alcohol isopropílic (IPA)	-88.00	82.20
Ciclohexà	6.70	80.70
Clorur de metilè	-94.90	39.60
Decà	-29.70	216.30
Dimetilformamida	-60.40	153.00
Etilenglicol	-13.00	197.20
Heptà	-90.60	98.40
Hexà	-95.30	68.70
Isobutilmetilcetona (MIBK)	-84.20	116.40
Isooctà	-107.40	99.20
Metanol	-97.70	64.50
Metil-etil-cetona (MEK)	-86.70	79.60
Metilciclohexà	-126.60	100.90
Metil-terbutil-eter (MTBE)	-108.60	55.20
Pentà	-129.70	36.10
Tetracloroetilè	-22.20	121.10
Tetrahidrofurà (THF)	-108.40	66.00
Toluè	-95.00	110.60
Tricloroetilè	-116.40	87.20
Trietilamina	-114.70	88.90
m-xilè	-47.90	139.10

El procediment dut a terme per a separar els diferents components és el mètode de destil·lació en discontinu. Aquest mètode de separació és recomanat quan [1]:

- La quantitat a destil·lar és petita.
- Posseeixen una ampla varietat de components a l'alimentació.
- El cabal d'alimentació és irregular.
- La composició de l'alimentació és irregular.

Les diferents espècies i alimentacions amb les que es pot arribar a treballar implicarien diverses i diferents columnes de destil·lació habitual. El cabal d'alimentació varia en funció de la calor que s'hagi de transmetre, tenint present que la capacitat d'aportació de calor és en aquesta instal·lació constant. Existeixen diferents modes d'operació possibles. A continuació es descriu breument el sistema instal·lat l'empresa d'estudi.

Figura 1 Esquema del procés estudiat.



El primer pas a realitzar és la determinació de la composició del producte a tractar. Aquest procediment es du a terme en un laboratori intern on es treballa la mostra. En funció dels resultats d'aquests assaigs s'especifiquen les condicions d'operació del sistema. Per exemple, si la mescla conté majoritàriament toluè, la temperatura de la columna haurà de ser la del seu punt d'ebullició per tal de poder ser separat.

El flux de producte a tractar és introduït a un tanc per a ser homogeneïtzat gràcies a un

agitador. El contingut d'aquest es fa circular a un primer bescanviador on s'hi aportarà la calor necessària. Posteriorment, quan s'arriba a la temperatura desitjada, és introduït a una columna de destil·lació. D'aquesta en resulten dos fluxos de matèria amb diferent composició química: el producte de cap, ric en components volàtils, i la cua, amb la resta més pesant.

La fracció rica en components volàtils és refredada mitjançant un segon bescanviador (que anomenarem condensador) i pot ser tornada a introduir a la columna com a reflux per a millorar l'equilibri dintre de la mateixa o ser simplement extreta del sistema com a producte final. La determinació d'aquesta divisió es basa en els resultats d'una cromatografia de gasos realitzada amb alíquotes extretes a la sortida del condensador.

Al llarg del procés, primerament l'anàlisi cromatogràfic mostrarà que els components que puguen són els més volàtils, i potser no interessin a l'empresa. Aquests són retirats del cicle per a ser posteriorment tractats com a residus. Més tard, quan la temperatura del tanc homogeneïtzador s'hagi apropat a la del dissolvent desitjat, haurà començat a pujar també el component a recuperar i, a partir del moment que es mostra relativament pur¹², és extret cap a un tercer i últim bescanviador de calor. Aquest procediment es du a terme fins que la quantitat de producte interessant disminueix i evidències de contingut de molècules més pesants comencen a aparèixer. En aquest moment es considera que l'espècie a reciclar ha sigut ja separada i s'atura el procés.

El producte sortint del condensador és portat a un decantador. Aquest és útil davant possibles mescles azeotròpiques formades entre diferents molècules. En aquest punt la mescla és decantada per a ser separada en dos fases i així poder retirar la no interessant. En cas de que no hi hagi una mescla azeotròpica, el producte passa pel decantador sense cap impediment. El producte d'aquí separat es portarà per últim als tancs d'emmagatzematge que seran transportats fins al client.

8.1. Equipament i condicions de treball

Dels diferents equips instal·lats a la planta real és possible conèixer la següent llista de característiques de la columna de destil·lació:

¹² El moment de començar a recuperar el dissolvent es decideix en funció de la puresa demandada pel client. D'aquesta manera, si el client no el necessita molt pur, la quantitat total serà major. Fins i tot, en ocasions es planteja començar a separar quan encara no es molt pur per a recuperar una major quantitat i posteriorment refinar-lo amb el procés escaient.

- Dimensions:
 - Diàmetre: entre 800 i 1000mm.
 - Alçada: entre 4 i 6m.
 - Volum: 10m³
- Temperatures: el cap de la columna es mantindrà a la temperatura d'ebullició del producte. Per altra banda, el calderí haurà de trobar-se entre 10 i 20 graus més que al cap.
- Pressions: si la temperatura d'ebullició del producte a destil·lar és menor a 100°C, es treballa a pressió atmosfèrica, en cas contrari, es redueix fins a uns 100mbar.
- Cabal mitjà: entre 2000 i 3000l/h.

Són considerades les dos pressions possibles degut a un estalvi energètic. Per a poder facilitar la ebullició dels components amb aquesta elevada temperatura de canvi d'estat, es redueix la pressió fins a uns 100mbar disminuint també així la calor necessària per a arribar a aquesta transformació. D'aquesta manera, la temperatura màxima amb la qual es troben calculen que és d'uns 150°C.

El material de construcció utilitzat per a tot l'equipament és l'acer inoxidable d'altres prestacions tipus AISI 316L. Amb aquest es considera que es cobreixen la majoria de possibles components amb els que es treballa. Degut a limitacions econòmiques, els tancs d'emmagatzematge del producte encara no tractat i les canonades que el porten fins al reactor són d'acer al carboni. Es considera que en aquesta zona existeix menor perill d'oxidació degut a la menor temperatura atmosfèrica a la que s'hi manté.

Per altra banda, també es disposa d'una línia de procés amb un material encara més resistent a la corrosió que l'acer inoxidable: un Hastelloy. Aquest és utilitzat en moments puntuals quan es determina que el producte a reciclar és altament corrosiu amb quantitats considerables de clor.

8.1.1. Aigües

Les aigües utilitzades per l'empresa per a refrigerar o escalfar als bescanviadors són extretes de la xarxa directament. Les espècies en dissolució que s'hi puguin trobar dissoltes podrien atacar als bescanviadors i resultar un problema. És per això que anualment es realitza un anàlisi de les mateixes. Ha sigut possible accedir als resultats d'un d'ells, els quals es mostren al Annex D Informació addicional.

En aquest document manquen tres valors importants pel que fa a la determinació de la

capacitat oxidant de l'aigua. El primer i més important, els clorurs, degut a la possibilitat d'aparició de picadures als materials. El segon, els sulfats, i per últim, la duresa total.

La conclusió a extreure dels resultats coneguts és que es tracta d'unes aigües amb un pH relativament bàsic (de valor igual a 9). Al mateix annex es detalla també un mètode com a proposta per a poder qualificar millor l'aigua en termes de corrosivitat: el mètode de Langelier.

8.2. Proposta

Donades les aproximacions del sistema original, es suposa un escenari semblant amb mesures aproximades per tal de determinar matemàticament una possible solució als diferents punts analitzats del sistema. Primerament, es determinen certs paràmetres necessaris per al estudi a realitzar. Aquests són basats en el sistema real i es pretén exemplificar una possible situació real.

Es considera que d'una empresa es reben uns certs residus industrials dels quals se sap que són una mescla de dissolvents orgànics. Degut a motius econòmics i polítiques mediambientals la empresa els vol recuperar i així no haver-ne de comprar encara més.

A aquesta empresa també se li demana tota la informació possible del contingut de la mescla i del procés del qual prové. A més, es pren una alíquota del tanc per tal d'analitzar-la al laboratori i poder llistar els diferents components.

En aquest exemple es suposa que es rep una mescla de toluè i m-xilè. Per tal de separar ambdós components es considera que la temperatura necessària per tal de que el toluè bulli sobre segur és de 111°C. La temperatura al cap serà doncs la especificada. D'aquesta manera, al reactor, al primer bescanviador, a la bomba i a la zona inferior de la columna es desitja mantenir una temperatura de 131°C. Tot i això, en aquest tipus de planta el disseny del equipament no es podrà basar en un únic escenari de procés. Com ja s'ha explicat anteriorment, hi ha productes que la empresa accepta per a tractar que arriben a necessitar una temperatura de 150°C per a ser portats a ebullició. Per a realitzar el disseny mecànic s'ha de prendre una temperatura 20°C superior a la màxima del sistema en condicions normals. És per això que en el disseny mecànic la temperatura de disseny serà 170°C.

Pel que fa a la pressió, es considerarà que sigui de 100mbar degut a la elevada temperatura a la qual s'ha d'arribar. El cabal que hi circularà com sortida del procés és de 3000l/h, semblant així als paràmetres de la empresa. Tot i això, el cabal de circulació entre el reactor i el

bescanviador per a escalfar el producte es portarà a 1m/s de velocitat lineal (recomanat per a fluids bombejats). Amb aquesta velocitat i amb unes canonades de 5cm de diàmetre nominal es té uns $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

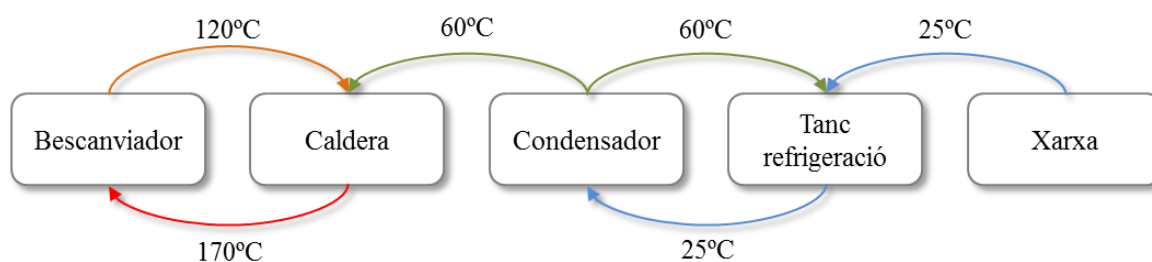
L'energia consumida per a aquest procés es calcula a partir del cabal de condensats que surten del bescanviador: 3000l/h. El consum energètic del sistema, per tant, és l'aportada per l'aigua quan és refredada des de uns 160°C (en el cas més extrem) fins a ser condensada a 100°C a través del bescanviador esmentat.. Per a aconseguir aquest flux màssic de vapor a 160°C es determina un sistema de forma que es necessiti el mínim consum d'energia possible. Aquesta reducció de consum energètic és possible gràcies al disseny d'un sistema tancat de recirculació de l'aigua.

Els condensats que surten del bescanviador a 100°C a punt de bombolla es porten a una caldera a la qual arriben a 90°C (les canonades no son adiabàtiques). En aquesta caldera es porta el flux màssic fins a la temperatura desitjada i es retornen al bescanviador.

No es considera viable que el flux sortint del bescanviador es porti al condensador del cap de la columna perquè en moltes ocasions aquest no es trobarà per sobre dels 100°C. Tot i això, degut a diferents raons (pèrdues per condensació, etc.), sempre és necessària una mínima alimentació d'aigua de reposició. Aquesta serà aportada pel flux d'aigua de sortida del condensador de la columna perquè ja s'haurà escalfat en el procés de refredament del producte tractat sortint del cap de la columna.

Amb aquestes consideracions són necessaris, per tant, dos sistemes tancats de recirculació d'aigua. Es descriuen a la figura següent:

Figura 2 Reaprofitament de l'energia.



El calor que ha d'aportar la caldera variarà en funció de la caiguda tèrmica que existeixi al bescanviador, perquè la diferencia de temperatures anirà reduint-se fins a que el producte es trobi a 150°C. Es considerarà, tot i això, que el treball de la caldera es equivalent a escalfar vapor des de els 120°C fins als 170°C continuadament. S'utilitzen 120°C com a temperatura

sortida tot i que la real siguin uns 140°C, per a tenir en compte l'aportació d'energia inicial per haver escalfat l'aigua fins a la temperatura de 170°C. Amb aquestes consideracions, el calcula:

$$Q = \dot{m} \cdot (h_{170^{\circ}\text{C}} - h_{120^{\circ}\text{C}}) = 0.83 \cdot (2716 - 2816) \cong 83\text{kW}$$

Calculats segons les taules trobades a [9].

On:

- \dot{m} : flux màssic ([kg/s]).
- h_i : entalpia per quilogram de l'aigua a pressió 1atm a la temperatura i ([kJ/kg]).

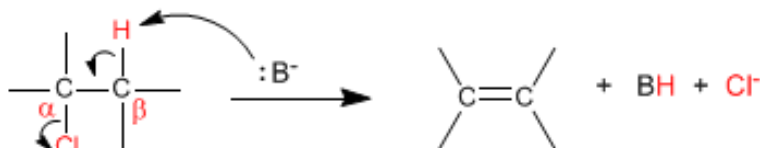
En total, l'empresa necessita aproximadament 83kW per a escalfar el producte. Si a aquest valor li sumem els 5kW consumits per la bomba i uns 20kW gastats per la electricitat i diferents serveis que s'utilitzen, l'empresa consumeix uns 108kW quan es troba en funcionament.

8.2.1. Selecció de materials

El producte d'alimentació de la planta és la mescla de diferents dissolvents orgànics que es pretenen valoritzar mitjançant la separació dels seus components. Tot i això, un estudi adequat del producte a tractar determinarà realment la presa de decisió del material adequat amb el qual treballar. La majoria de vegades a l'anàlisi es troben traces d'aigua i de components clorats. Aquest fet limitarà i dificultarà una adequada i concreta selecció del material de construcció dels equips.

Les espècies iòniques dissoltes a l'aigua, especialment el clor, impliquen una elevada perillositat envers a la oxidació de materials metàl·lics. A més, els halogenurs poden ser susceptibles de degradar-se mitjançant una reacció de deshidrohalogenació resultant en un doble enllaç a la molècula original amb despreniment d'àcid del halogen respectiu. Aquesta reacció es catalitza amb calor i en presència de bases fortes com hidròxid de sodi (NaOH) o de potassi (KOH). La raó d'aquesta catalització radica en que aquestes bases formen forts nucleòfils que ataquen a un hidrogen (electròfil) que fàcilment s'elimina de la molècula original. L'electró lliure que deixa el hidrogen és atrapat per un halogen veí i, amb aquest electró, és eliminat també de la molècula original. D'aquesta forma es generen anions de clor perillosos per al material de construcció del equip. A la Il·lustració 5 es mostra el mecanisme de eliminació descrit, on el nucleòfil és identificat amb el símbol "B".

Il·lustració 5 Mecanisme de deshidrohalogenació. Font [17].



En general, com es veu a la Taula 33, els metalls són passius davant la presència de molècules orgàniques, degut a la naturalesa iònica dels seus enllaços. D'aquesta manera, un acer convencional sense propietats especials anticorrosives com l'acer al carboni hauria de ser suficient. Tot i això, com a conseqüència de l'aparició de les altres espècies comentades, apareixen problemes importants de corrosió sobre els materials no inoxidable.

Taula 33 Adequació entre substància i material de construcció. Font [1], [2].

On:

- A: Material adequat per aquest compost
- P: Perill. Adequació segons condicions de treball.
- X: No adequat.
- : Sense dades.

Substància	Metalls							No metalls				
	Acer al carboni	Acer inoxidable		Níquel	Monel	Llautó	Alumini	Vidre	Carbó	Resines		Clorur de vinilidè
Ferro i acer	Amb Cr i Ni	Amb Cr, Ni i Mo	Fenòliques							Acríliques		
Acetona	A	A	A	A	A	A	A	A	A	P	X	P
Ciclohexà	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	-	-
Etilenglicol	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	P
Heptà	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	P
Metanol	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	-	A
Tricloroetilè	P	P	A	A	A	P	P	A	A	A	-	P

El procés de selecció de materials no només es basa en un anàlisi teòric de les propietats mecàniques i químiques del mateix. És necessari i important tenir en compte que la heurística pot ser decisiva en aquest punt. Donada l'experiència de l'empresa on hi ha hagut diferents problemes de corrosió, es plantejarà la comparació entre tres metalls diferents, tots ells amb capacitats anticorrosives: acer AISI 304L, AISI 316L i Monel 400.

La quantitat i facilitat de trobar proveïdors d'aquests metalls és major que en altres, així que els costos també poden ser encara menors que els costos teòrics calculats degut a la competició de preus i un menor temps de transport. A més, al tractar-se de metalls habitualment utilitzats, és també més senzill trobar complements, recanvis, etc.

El llibre [7] conté un anàlisi considerablement ampli de molts metalls utilitzats per a la construcció de equips per a processos químics en relació a les seves propietats mecàniques i anticorrosives. En aquesta font es donen diferents taules per mostrar la compatibilitat dels metalls estudiats davant una llista de components iònics que podrien resultar un problema.

S'estudia la resistència d'aquests 3 metalls davant la presència de diferents àcids i les conclusions extretes s'expliquen a continuació. El metall AISI 304L és un acer inoxidable d'altres prestacions mecàniques, però amb una baixa capacitat de resistència a la corrosió, especialment a elevades temperatures. Pel que fa al 316L, la major quantitat de níquel que hi conté li dona unes prestacions anticorrosives més bones. Aquest sí que es capaç de resistir certa quantitat de clor mentre es mantingui sec i preferiblement en estat gasós. Per últim, el Monel resisteix millor encara aquest component i proporcionaria unes capacitats mecàniques encara més òptimes.

En un primer moment es podria considerar que el metall 304L ja es descarta completament. Tot i això, la decisió es prendrà en funció del càlcul econòmic i la inversió necessària a realitzar i s'explicarà més endavant.

8.2.2. Disseny mecànic

Per a poder prosseguir amb el corresponent disseny mecànic de cada component, es llisten les dades necessàries per a aquests càlculs:

- Es considera que tots els equips tenen una soldadura doble i s'ha realitzat un examen radiogràfic puntual. De manera que el factor E es igual a 0.85.
- Temperatura de disseny: 170°C
- Pressió de disseny 0.2MPa
- Espessor per corrosió: 2mm
- Espessor mínim pràctic (segons Taula 26):
- Espessor de reforç al decantador: 9mm
- Diàmetre de la zona de càlcul de la zona cònica del decantador: 0.7m

Amb aquestes consideracions de disseny i tenint en compte les tensions de disseny de la Taula 34, es dimensionen els diferents equips de la planta. En referència a la bomba necessària per a fer circular el producte a tractar entre el tanc i el bescanviador on es dona calor al sistema, s'utilitzarà la mateixa potència que la actual a l'empresa: 5kW. Pel que fa al cabal, se sap que la les canonades en aquesta zona tenen un diàmetre nominal intern de 50mm. Amb aquesta dada i tenint en compte que es vol una velocitat lineal d'aproximadament 1m/s, s'obté un

cabal de $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

A les següents taules es descriuen les característiques dels diferents equips a considerar. Els resultat dels càlculs dels gruixos es mostren i s'expliquen al Annex B Càlculs, Utilitzant les equacions donades a l'apartat 7.2, es poden calcular els següents espessors necessaris per a suportar la pressió interna:

Taula 50.

Taula 34 Tensions de disseny dels materials proposats. Font [1] i [7].

	AISI 304L	AISI 316L	Monel 400
Tensió de disseny a 170°C (MPa)	85	93	105

Taula 35 Dimensionament del tanc amb capçals torisfèrics.

Concepte	Dimensió	Unitats
Diàmetre interior (D_i)	2	m
Gruix carcassa	10	mm
Gruix capçals	10	mm
Alçada	3	m
Volum intern	9	m^3

Taula 36 Dimensionament de la columna amb rebliment d'acer inoxidable.

Concepte	Dimensió	Unitats
Diàmetre interior (D_i)	0.8	m
Gruix carcassa	8	mm
Gruix capçals	8	mm
Alçada	5	m
Alçada del rebliment	3	m
Tamany del rebliment	38	mm

Taula 37 Dimensionament del bescanviador.

Concepte	Dimensió	Unitats
Diàmetre interior (D_i)	1	m
Gruix carcassa	3	mm
Gruix capçals	3	mm
Longitud	2	m

Taula 38 Característiques del bescanviador.

Configuració	AES
Número de tubs	200
Número de passos	2
Cabal de condensats	3000l/h
Diàmetre interior tubs	17.40mm
Gruix tubs	1.65mm
Material de la carcassa	Acer al carboni

Taula 39 Dimensionament del decantador.

Concepte	Dimensió	Unitats
Diàmetre interior (D_i)	1	m
Alçada	1.5	m
Gruix carcassa	6	mm
Gruix zona cònica	6	mm
Gruix zona reforçada	8	mm
Angle d'estretament	30	°

8.2.3. Costos associats

Primerament es realitza un càlcul del cost de cada equip per separat. Per a aquests diferents càlculs es necessita en diverses equacions adaptar el valor del diner mostrat a les taules de les fonts bibliogràfiques al valor actual. És per això que, segons escaigui, es realitza una actualització de preus a l'any 2013 segons el procediment indicat a l'apartat 6.1 Estimació de la inversió i instal·lació. Els resultats obtinguts es mostren a la següent taula:

Taula 40 Costos dels diferents equips.

Equip	Cost de l'equip (€)		
	AISI 304L	AISI 316L	Monel 400
Tanc	18100	27000	71100
Columna	29100	29100	46600
Bescanviador	37800	46500	65900
Decantador	2900	4300	11400
Bomba	3000	4000	5000

Respecte al cost de les canonades, es considerarà que es volen sense costura per a una millor qualitat estructural del material. Segons el Gràfic 6, es pot dir que en el cas de ser construïdes amb Monel 400 el preu seria només lleugerament superior a que si fossin construïdes amb 316L. Per altra banda, el material 316L es considera que seria 1.2 cops més car que el 304L.

Seguint un procés de comparació similar al utilitzat a [2], es preveu una vida útil per a cada un dels materials. Segons la mateixa font bibliogràfica, l'acer acostuma a tenir una vida útil major (18 anys) perquè és un metall ferrós, comparat amb els no ferrosos (16 anys). Tot i això, a la pràctica, els equips construïts amb acer inoxidable de baix aliatge duren uns 8 anys mentre que materials més resistents arriben a uns 15 o 17 anys.

A continuació per a construir la Taula 41 Comparació costos de materials., la qual es proposa com a mètode de comparació a [2], és necessari prendre una sèrie d'aproximacions.

Taula 41 Comparació costos de materials.

Concepte	Cost (€)		
	AISI 304L	AISI 316L	Monel 400
Compra de l'equip	18100	27000	71100
Instal·lació	9050	13500	35550
Cost de l'equip instal·lat	27150	40500	106650
Sobrecost respecte AISI 304L		13350	79500
Temps de vida estimat (anys)	8	14	18
Cost de reposició anual	3394	2893	5925
Manteniment anual	5430	2700	7110
Cost anual total	8824	5593	13035
Estalvi anual respecte AISI 304L		3231	-
Taxes degut als estalvis (40%)		1292	
Estalvi net		1939	
Retorn de la inversió respecte AISI 304L		15%	

Els diferents percentatges utilitzats per a calcular aquests valors es basen tant en l'experiència de l'empresa com en diferents punts de les fonts bibliogràfiques. Tal i com s'observa, el cost d'instal·lació s'aproxima al 50% del cost de compra de l'equip. El manteniment necessari depèn del material utilitzat, degut a les seves propietats mecàniques i químiques. És per això que es considera un 30% en el cas del AIS304L, per al 316L i per al Monel 400, al ser més resistents a la corrosió, només un 10%.

Es conclou que el metall per a construir els diferents equipaments és el AISI216L. Tot i així, degut a les possibles limitacions econòmiques a l'hora de realitzar una inversió, no es descarta que es puguin realitzar combinacions dels mateixos. És a dir, segons el punt del sistema on ens trobem pot interessar més col·locar-hi un metall o un altre. A la Taula 41 Comparació costos de materials. es comparen els diferents metalls per a una mateix equip i condicions de treball. Per altra banda, si es classifica el sistema en diferents zones segons les condicions del sistema, l'estudi podria portar a altres resultats.

Per exemple, als tancs d'emmagatzematge on es guarda el producte rebut fins a ser tractat i a les canonades que el porten fins al tanc agitat on s'escalfa la mescla, la temperatura és sempre l'ambient. En aquests punts és possible que el perill de corrosivitat sigui molt menor que a parts posteriors del sistema. Això és degut a que, primerament, a menor temperatura hi ha menys energia per a que succeeixin les reaccions d'oxidació i, a més, és possible que els dissolvents encara no hagin sigut deshidrohalogenats. Aquests arguments podrien portar a pensar que utilitzar l'acer 304L pot ser una opció a considerar viable.

Donada aquesta alternativa, l'estalvi que suposaria podria significar la reconsideració del metall Monel 400 com a material per a construir els components on es sap que hi haurà una major temperatura i un conseqüent major perill de corrosió: el tanc agitat, el bescanviador on s'aporta la calor i la columna.

Posteriorment, per a determinar la viabilitat de la inversió en la construcció de la planta es continua amb el procediment anteriorment descrit. Amb el mètode Peters&Timmerhaus es determina una suposada suma de capital necessària per a la posada en marxa de la planta. Es parteix de la suma de costos dels diferents equips construïts amb AISI 316L com a inversió inicial.

Taula 42 Estimació de la inversió necessària per a la planta.

Tipus de plana	Cost (€)
	Líquids
Costos directes	
Valor del equip	110900
Instal·lació	49905
Instrumentació (instal·lada)	9981
Canonades (instal·lades)	17744
Electricitat (instal·lada)	11090
Edificis	27725
Preparació del terreny	14417
Serveis	44360
Terreny	6654
Total costos directes	292776
Costos indirectes	
Enginyeria	36597
Construcció	43251
Total costos directes i indirectes	372624
Contractista	18853
Contingències	37706
Total capital fix	429183
Capital Circulant	75412
Capital total	504595

Amb aquestes dades, es pot prosseguir al estudi del benefici anual necessari per a que el negoci resulti beneficiós per a l'empresari. Per a tal objectiu s'utilitzarà l'equació 6.21. Es considera que a partir dels 5 anys com a màxim l'empresa ha de començar a generar beneficis, i que l'interès romandrà constant al 10% anual. D'aquesta manera, la variable n serà igual 5 i, per altra banda, i serà 0.1.

Considerant un flux anual de capital constant dedicat a la recuperació de la inversió (Q_n), aquest haurà de ser el resultat de la suma d'ingressos de l'any (B) menys els costos de producció (P). Aquest segon cost es calcula a partir de la Taula 25 i els resultats es veuen reflectits en la taula següent.

Taula 43 Costos de funcionament de la planta.

	Cost (€)
Costos directes de producció	
Matèria prima	-
Mà d'obra	75000
Supervisió i oficines	15000
Serveis	44000
Manteniment i reparacions	21459
Operacions d'abastiment	3219
Laboratori	11250
Patents i royalties	-
Cargues fixes	
Amortitzacions	42918
Impostos locals	8584
Segurs	754
Lloguer	1200
Costos generals de la planta	
Salaris, serveis mèdics, seguretat, etc.	66875
Costos generals de la planta	
Administració	16719
Distribució i ventes	-
Investigació i desenvolupament	-
Interessos de finançament	-
Total	306978

Per al càlcul de la mà d'obra s'ha considerat 3 treballadors (la resta de personal s'inclou en altres punts del càlcul) cobrant una mitja de 25000€ a l'any. Pel que fa als serveis, s'utilitza el valor donat a la taula d'estimació de la inversió.

Amb aquests valors, es realitza el següent càlcul:

$$0 = \sum_{n=0}^n \frac{Q_n}{(1+i)^n} = \frac{Q_0}{(1+i)^0} + \sum_{n=1}^n \frac{Q_n}{(1+i)^n} = \frac{-I}{(1+i)^0} + Q_n \cdot \sum_{n=1}^n \frac{1}{(1+i)^n}$$

$$Q_n = \frac{I}{\sum_{n=1}^n \frac{1}{(1+i)^n}} = 133100\text{€}$$

$$B = Q_n + P \cong 440000\text{€}$$

Per tant, l'empresa haurà d'ingressar un mínim de 440000€ anuals per a fer front a la despesa anual que suposa la planta i poder retornar el cost de la inversió inicial de manera que a partir dels 5 anys es puguin registrar beneficis.

8.3. Avaluació de l'impacte ambiental

L'impacte ambiental és la diferència del estat del medi ambient en cas de que es dugués a terme l'activitat de la proposta de projecte explicada, comparat amb el que hi hauria si no s'hagués realitzat. L'avaluació del mateix és el procés amb el qual s'identifiquen, s'interpreten i es preveuen diferents conseqüències que la realització del projecte pot causar sobre el medi ambient.

Per un costat existeixen diferents activitats amb efectes negatius per al medi ambient resultants de la implementació del sistema, llistades a continuació:

- Construcció del equipament: extracció de les matèries primeres del medi.
- Muntatge de la estructura: destrucció d'una zona de terreny per a construir-la.
- Generació de residus i emissions contaminants: consumint energia per al procés i amb el transport de persones i productes.

Per a aproximar l'impacte que suposa la despesa energètica de la planta, la organització WWF España, que publica al seu butlletí *Observatorio de la Electricidad* [16] proposa una sèrie de quantitats de contaminants, calculades de forma teòrica, que es suposa que s'emeten al ambient per cada kWh consumit:

Taula 44 Contaminants produïts al consumir 1kWh. Font [16].

Gas	Quantitat
Diòxid de carboni	0.179kg
Diòxid de sofre	0.417g
Òxids de nitrogen	0.283g
Residu radiactiu	
Baixa i mitja activitat	0.00234cm ³
Alta actividad	0.286mg

Degut a la gran varietat de molècules orgàniques que componen els dissolvents orgànics, no es pot donar un valor quantitatiu de la energia que necessiten per a ser fabricats.

Com s'ha explicat anteriorment al punt 8.2 Proposta, el consum d'energia necessària per al

funcionament del sistema és aproximadament de 108kW. D'aquesta manera, els contaminants produïts degut a aquest consum són els següents:

Taula 45 Generació de contaminants per hora.

Gas	Generació
Diòxid de carboni	19.3kg/h
Diòxid de sofre	45.0g/h
Òxids de nitrogen	30.6g/h
Residu radiactiu	
Baixa i mitja activitat	0.3cm ³ /h
Alta actividad	30.1mg/h

La metodologia de disseny d'aquest projecte té en consideració la capacitat anticorrosiva dels materials a utilitzar amb l'objectiu d'una major vida útil dels equips. A més d'un estalvi econòmic, la menor freqüència de reposició i reparació dels equips implica, primerament, una menor necessitat d'extracció de matèria primera (diferents metalls) i, segonament, l'estalvi energètic que implicaria tot el procés de construcció dels equips. Per altra banda, una menor corrosió dels metalls significa una menor pèrdua de material cap al fluid i, conseqüentment, una menor toxicitat del producte resultant.

A més, tots els gasos no condensables generats i el residu no recuperat es porten a una planta de tractament de residus segons normativa per a ser emmagatzemats o tractats adequadament.

Per altra banda, la posada en funcionament de la planta implicaria també un elevat nombre de efectes potencialment positius:

- La no existència de tancs d'emmagatzematge de residus perillosos.
- Menor producció de dissolvents orgànics. Tant per la energia necessària per a la seva formació com, per exemple, per una possible necessitat de perforació del terreny per a l'extracció de cru.
- Mentalització social cap a una societat més sostenible.

Hi ha certs aspectes que es podrien incloure per a un disseny més sostenible. Per exemple, amb l'objectiu d'un menor impacte negatiu sobre l'entorn, es recomanaria situar el muntatge de l'equipament en una zona allunyada de punts amb ecosistemes sensibles, com podria ser el cas d'una zona amb camps de cultiu o un riu. Així, possibles accidents o fuites no es trobarien a prop d'aquests ecosistemes.

Conclusions

Utilitzant la teoria recopilada, s'han pogut assolir els diferents objectius amb els quals aquest treball havia sigut plantejat. Gràcies a un millor coneixement dels diferents possibles costos del sistema ha sigut possible calcular la rendibilitat d'una planta química i ser conscient de les eines i limitacions de les que es pot disposar. En aquest sentit, ha sigut determinant l'estudi de les capacitats de cada material per a saber aprofitar les diferents propietats que ofereixen i, més important encara, ser possible comparar-los.

Les conclusions més significatives obtingudes d'aquest treball són:

- La principal complexitat radica en la multidisciplinarietat de les decisions a prendre i la forta relació i dependència entre elles: la mínima decisió en un àmbit afecta a les altres àrees. És a dir, el balanç econòmic d'una empresa ha de ser positiu, i la decisió d'escollir un material o un altre influeix directament en el disseny mecànic necessari i sobre el cost a assumir. Això significa que, en definitiva, l'adequació del disseny del sistema serà definida per un anàlisi de costos finals.
- És important saber on buscar la informació i contrastar-la. Es necessita del saber col·lectiu i dels estudis que s'han fet per poder dissenyar, així el temps d'investigació es redueix al màxim i es pot fer amb major efectivitat. És vital una àmplia recerca bibliogràfica a llibres especialitzats en la matèria o en l'aspecte que s'està analitzant. A banda de comptar amb les eines teòriques adients, és necessari disposar de prou temps per a realitzar una empresa d'aquesta envergadura.

Per altra banda, els diferents punts dels objectius a aconseguir s'han assolit amb els següents resultats:

- La capacitat d'un material de no degradar-se vindrà determinada en gran mesura pels productes amb els que es trobi en contacte. S'ha de tenir present, doncs, les possibles espècies a les que haurà de fer front. Segons la naturalesa d'aquestes, en principi s'escollirà un material d'una altra tipologia d'enllaços. Per exemple, els components orgànics no ataquen als metalls i viceversa. Tot i això, la possible aparició d'altres substàncies (com en el cas estudiat on apareixia àcid clorhídric), fa necessari un estudi més profund de les compatibilitats dels productes i materials.
- En aquest treball, en primer lloc, s'ha tingut en compte la flexibilitat necessària del sistema, que implica també una major dificultat a l'hora de fixar diferents variables de disseny. És important definir les diverses possibilitats que es desitgen del conjunt per

tal que sigui sempre adequat a les condicions a les que es veurà sotmès. Seran determinants, per exemple, les temperatures i pressions mínimes i màximes en les que es pugui trobar en cert moment.

- Un disseny mecànic adient no es limita a assegurar la vida útil de l'equip, sinó que també englobarà tots aquells aspectes obligatoris de cara a la seguretat del personal que treballa amb ells. Respecte a aquest punt, ha sigut molt útil la recerca bibliogràfica sobre normatives de seguretat. Avui en dia s'ha avançat molt en la conscienciació de la prevenció i seguretat industrial. Tot i això, només la pràctica pot facilitar l'aplicació d'unes lleis i normes que han sigut plasmades amb un llenguatge cuidat, on s'especifica fins a l'últim detall.
- La utilització de mesures, materials i normatives més estàndards impliquen un menor cost i complexitat. En el món industrial, hi ha certs materials i mesures que són més utilitzats que d'altres. L'elevada rotació d'aquest tipus de components comporta un abaratiment del producte degut a la major oferta que es crea. S'ha de ser conscient, per tant, que la precisió d'un càlcul ha de ser limitada segons la possibilitat d'adaptació a un estàndard de la indústria. Per exemple, si es coneix que es vol un acer austenític, de dins de l'àmplia gama que s'ofereix només s'acostumen a utilitzar uns 3 models. En lloc d'analitzar un per un, es farà una recerca de quin és el més utilitzat en el cas concret.
- Al llarg dels anys, la indústria de les energies renovables i de reciclatge haurà de créixer considerablement. Amb el procés estudiat, s'exemplifica un cas on el funcionament del sistema en sí compensa en gran mesura la contaminació que produeix. Un plantejament adequat del sistema d'una planta haurà de tenir present diferents normatives mediambientals que s'hauran de complir. A més, qualsevol petit esforç o alternativa que porti a un disseny més ecològic serà beneficiosa, tot i que habitualment aquestes millores no són aplicades degut al major cost que suposa.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] Sinnott, R.K. *Coulson & Richardson's chemical engineering. Volume 6, Chemical engineering design*. Oxford [etc.] : Elsevier Butterworth-Heinemann. 2005.
- [2] Max S. Peters, Klaus D. Timmerhaus. *Plant design and economics for chemical engineers*. New York [etc.] : McGraw-Hill International Book. 2003.
- [3] Robert H. Perry, Don W. Green,. *Perry's chemical engineers' handbook*. New York [etc.] : McGraw-Hill, cop. 2008.
- [4] Bilurbina Alter, Luis, Liesa Mestres, Francisco, Iribarren Laco, José Ignacio,. *Corrosión y protección*, Barcelona : Edicions UPC, 2003
- [5] Reichardt, Christian. *Solvents and solvent effects in organic chemistry*. Weinheim [etc.] : VCH, 1988.
- [6] Moss, Dennis. *Pressure vessel design manual : illustrated procedures for solving major pressure vessel design problem*. Burlington [etc.] : Gulf Professional, cop. 2004.
- [7] Philip A. Schweitzer, P. E. *METALLIC MATERIALS Physical, Mechanical, and Corrosion Properties*. New York : Marcel Dekker, Inc. 2003.
- [8] Departamento de Ingeniería Química y Textil, Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Salamanca. *Diseño de equipos e instalaciones*.
- [9] Departament de Màquines i Motors Tèrmics. ETSEIB, UPC. *Taules i gràfiques de propietats termodinàmiques*. Barcelona : Serveis Gràfics Copisteria Imatge, SL, 2012.
- [10] Codi ASME Sec. VIII.
- [11] Institut americà del ferro i el acer (AISI). [<http://www.steel.org>, 28 de febrer de 2014]
- [12] MatWeb. [<http://www.matweb.com/search/SearchUNS.aspx>, 28 de febrer de 2014]
- [13] ASME. [<http://www.asme.org>, 2 de març de 2014]
- [14] Vatavuk, William M. *Updating the CE Plant Cost Index*. Chemical Engineering, febrer



de 2002.

- [15] Institut Nacional de Seguretat i Higiene en el treball. *Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de atmosferas explosivas en el lugar de trabajo*. ISBN 978-84-7425-764-9. 2008.
- [16] García Monzón, Raquel. *Observatorio de la Electricidad Mayo 2014*. [http://www.wwf.es/que_hacemos/cambio_climatico/nuestras_soluciones/energias_renovables/observatorio_de_la_electricidad/, 29 de setembre de 2014]
- [17] Academia Minas. [<http://www.quimicaorganica.org/>, 1 de setembre de 2014]
- [18] BOE Reial Decret 140/2003
- [19] W.F. LANGELIER. *Analytical control of anticorrosion water treatment*. Ediciones Omega. 1990.

Annex A Equacions i taules complementàries

• Tensió provocada pel vent

Les equacions necessàries per a calcular una aproximació de la resistència que haurà d'oposar un equip enfront a la força del vent es determina amb el seguit d'equacions següents:

$$p_0 = \frac{V}{725.04} \quad (\text{Eq. Annex A.46})$$

$$p = p_0 \cdot K_s \quad (\text{Eq. Annex A.47})$$

$$P_1 = p \cdot c \cdot K \cdot r \quad (\text{Eq. Annex A.48})$$

$$Q = D_e \cdot P_1 \quad (\text{Eq. Annex A.49})$$

On:

- c: factor de forma.
- D_e : diàmetre exterior.
- K: coeficient d'esveltesa.
- K_a : coeficient d'alçada.
- p: pressió bàsica.
- p_0 : pressió en MPa.
- Q: càrrega provocada pel vent, per metre lineal.
- r: coeficient d'accessoris.
- V: velocitat del vent.

Els valors per a aquests coeficients els podem trobar a la sèrie de taules següents:

Taula 46 Coeficient d'alçada

Alçada (m)	K_a
0 - 15	1,00
15 - 25	1,15
25 - 40	1,30
>40	1,50

Taula 47 Factor de forma



Tipus d'àrea exposada	c
Cilíndrica (llisa)	0,60
Cilíndrica (rugosa)	0,80
Esfèrica	0,45

Taula 48 Coeficient d'esveltesa

Esveltesa (alçada/D_e)	K
1 - 5	1,00
10	1,25
30	1,35
>70	1,50

Taula 49 Coeficient d'accessoris

D_e (mm)	r
<399	1,40
400 - 599	1,30
600 - 999	1,20
>1000	1,15

Annex B Càlculs

Disseny mecànic

Utilitzant les equacions donades a l'apartat 7.2, es poden calcular els següents espessors necessaris per a suportar la pressió interna:

Taula 50 Càlcul de disseny mecànic segons pressió interna

Equip	AISI 304L		AISI 316L		Monel 400	
	Carcassa	Capçals	Carcassa	Capçals	Carcassa	Capçals
Tanc	5.5	5.5	5.1	5.0	4.5	4.5
Columna	2.2	2.2	2.0	2.0	1.8	1.8
Bescanviador	2.8	2.7	2.6	2.6	2.4	2.3
Decantador	2.8	2.7	2.6	2.6	2.4	2.3
Zona cònica decantador	2.2	-	2.0	-	1.8	-

Seguidament es detalla el càlcul del gruix de material necessari per a suportar la pressió externa. Per a aquest càlcul es coneix que si en determinats moments el sistema funciona a 100mbar, es trobarà suportant una pressió externa igual a uns 90kPa. Amb aquesta pressió mínima a suportar com a objectiu, es realitzen els següents càlculs en funció del equip estudiat.

○ Tanc i decantador:

Considerant un gruix per al tanc de 10mm i 6mm per al tanc i al bescanviador respectivament, els factors L/D_e i $D_e/(t-c)$ són pràcticament iguals. El primer dels factors dóna aproximadament 1.5, i el segon prop de 250.

Conseqüentment, el factor A trobat al Gràfic 8 és el mateix, 0.00023, i també el factor B del Gràfic 10, igual a 3250psi. Com s'ha pogut determinar el factor B, la equació a utilitzar per determinar la pressió que suporta aquest gruix és la $7.32P_a = \frac{4 \cdot B}{3 \cdot \frac{D_e}{t-c}}$ (Eq. 7.38).

La pressió externa que suportaran amb aquests gruixos serà, per tant 119kPa. Com aquest valor és superior al desitjat, l'espessor suposat necessari es considera viable.

○ Columna:

Primerament es suposa un valor de gruix inicial: 8mm. En aquest cas, els factors L/D_e i $D_e/(t-$



c) donen 6.2 i 134.6 respectivament. Amb aquests valors el factor A trobat al Gràfic 8 és 0.00015. Amb aquest resultat no és possible entrar als gràfics corresponents per a trobar el factor B, de manera que la pressió suportada es calcula amb la equació 7.33. Per a aquesta equació són necessaris els mòduls elàstics mostrats a la Taula 30.

D'aquesta manera, es troba que els acers 304L i 316L suportarien 143kPa mentre que el Monel 400 en suportaria 133kPa. Espessors menors donen resultats insuficients i és per això que es considera que el gruix esmentat és el necessari.

Tal i com s'observa a la Taula 51, el gruix calculat segons una certa pressió externa no depèn tan del material com en el cas del disseny segons pressió interna. En aquest cas, el factor forma d'equip pren un paper molt més important. L'esveltesa d'un dipòsit pot resultar decisiva a l'hora de determinar la quantitat de material a utilitzar.

Taula 51 Gruix necessari per a suportar funcionament en condicions de buit.

Equip	Gruix de material (mm)		
	AISI 304L	AISI 316L	Monel 400
Tanc	10.0	10.0	10.0
Columna	8.0	8.0	8.0
Decantador	6.0	6.0	6.0

Costos

En aquest apartat es dona una breu explicació dels costos que apareixen a la .

o Tanc:

Per al càlcul del cost del tanc on es durà a terme la ebullició del producte, primerament es calcula la quantitat de material de l'equip utilitzant la equació 6.11:

$$Massa = 7.85 \cdot D_e \cdot t \cdot \pi \cdot (h + D_e) = 7.85 \cdot 2.01 \cdot 10 \cdot \pi \cdot (3 + 2.01)$$

$$Massa \cong 2500kg$$

Aquest pes és multiplicat pel cost unitari i el factor material de cada un dels metalls a considerar. Com no es disposa del factor material del Monel 400, es suposa semblant al del acer 316L: 3.3.

o Columna:

Primerament es calcula el cost base de la carcassa vertical. El cost base trobat és de 10000\$ de

l'any 1998. Sabent que l'índex CEPCI de l'any 1998 és de 390 i el de 2013 de 615, aquest cost és equivalent a uns 12500€ de l'any 2013.

Es multiplica aquest cost base pel factor material corresponent i el factor pressió, el qual, en aquest cas, és 1. Els resultats es mostren a la següent taula:

Taula 52 Cost de la carcassa de la columna.

	AISI 304L	AISI 316L	Monel 400
Cost carcassa (€)	25000	25000	42500

A aquests valors se'ls hi haurà de sumar el cost del reblliment. Aquest no depèn del material exterior sinó del qual estiguin construïts. Es considera que s'utilitzen anells d'acer inoxidable de 38mm. Coneixent l'alçada a on arriba el reblliment es calcula el volum que ocupa i es multiplica pel corresponent cost de la Taula 18. Aproximadament dona 4100€.

○ **Bescanviador:**

Amb el número i dimensions del tubs del bescanviador es calcula una àrea de transmissió de calor d'uns 24m². Amb aquest valor, del Gràfic 5 s'extreu un cost base de 65000pts/m² de l'any 1991. Traduït a euros de l'any 2013 i multiplicat per l'àrea de transmissió de calor, són aproximadament 16000€.

Aquest valor es multiplica pels següents factors:

Taula 53 Factors utilitzats per al càlcul del cost del bescanviador.

Concepte	Factor
Tipus	1.00
Passos	1.00
Longitud	1.35
Temperatura	1.00
Superfície	1.00
Tipus de pas	1.00
Material dels tubs	
304L	1.75
316L	2.15
Monel 400	3.05

○ **Decantador:**

Per a aquest càlcul s'utilitzarà la fórmula adaptada per a recipients a pressió. No s'utilitza la



taula per a recipients verticals per a evitar extrapolacions.

En aquest cas:

$$\text{Massa} = 7.85 \cdot D_e \cdot t \cdot \pi \cdot (h + D_e) = 7.85 \cdot 1.06 \cdot 6 \cdot \pi \cdot (1.5 + 1.06)$$

$$\text{Massa} \cong 400\text{kg}$$

Aquest resultat es multiplica pel factors adients de forma similar al càlcul del tanc.

○ **Bomba:**

Com el sistema necessita poca aportació d'energia, la bomba necessària no entra dintre del rang donat pel gràfic corresponent per a calcular el seu cost. És per això que es considera un cost simbòlic de 3000€ per al acer 304L, 4000€ en el cas de 316L i 5000€ per al Monel.

Annex C Codis i estàndards

AISI

Acrònim de “American Iron and Steel Institute” (Institut Americà del Ferro i el Acer), és una associació d’empreses de Nord Amèrica originada al 1912 amb els objectius següents:

- Advocar per polítiques públiques que donin suport a un entorn competitiu per a la fabricació nacional.
- Proporcionar productes d’alt valor afegit per a una àmplia gamma de clients.
- Ser líder en el camp de la innovació i la tecnologia de la producció d’acer.
- Producció d’acer de forma segura i respectuosa amb el medi ambient.
- Ampliar el mercat de l’acer a Amèrica del Nord en aplicacions tradicionals i innovadores .

Constituïda per 21 empreses productores d’acer i uns 125 socis productors o clients, els quals representen tres quartes parts de la capacitat productiva de Nord Amèrica. És per tant, el tipus de codi més utilitzat a Estats units. Es classifiquen els acers segons quatre dígit: el primer especifica el tipus d’aliatge, el segon indica aproximadament la quantitat de element principal i els dos últims per a el tant per cent de carboni present.

ASME

Acrònim de “American Society of Mechanical Engineers” (Societat Americana d’Enginyers Mecànics). ASME desenvolupa codis i normes utilitzades a més de 100 països, relacionats amb l’art, la ciència i la enginyeria mecànica, tot i que internacionalment coneguts pels codis de disseny, comprovacions i inspeccions d’equips.

L’objectiu és millorar la seguretat pública i la qualitat de vida, facilitant el comerç, la innovació i la competitivitat.

UNS

Acrònim de “Unified Numbering System” (Sistema de Numeració Unificat), és un mode de designar un aliatge. És administrat conjuntament per ASME i AISI. Aquest codi no especifica completament el material, perquè no estableix requisits per a les propietats del material, com el tractament tèrmic, la forma o la qualitat.



Es compon per una lletra que indica el tipus de material principal, seguidament hi ha tres dígits que indiquen una designació antiga del mateix, i s'afegeixen dos més per a variacions més modernes.

Annex D Informació addicional

Anàlisi d'aigües

Fragment del informe del laboratori encarregat del anàlisi de les aigües utilitzades per *Ecología Química S.A.*:

Taula 54 Resultats de l'anàlisi d'aigües.

Determinaciones solicitadas	Resultados	Unidades
Aerobios Totales a 36 °C	<1000	ufc/ml
Hierro (Fe)	<0,10	mg/l
Fosfato total (P2O5)	3,1	mg/l
Fosfatos (P2O5)	--	mg/l
Fosfonatos (P2O5)	--	mg/l
Turbidez	9,5	UNF
Cloro residual in situ (Cl2)	0,40	mg/l
Temperatura "in situ"	19	°C
Densidad a 20 °C	0,14	°Be
Residual Biocida B-15	0,90	mg/l
pH "in situ"	9,0	u.PH
Conductividad a 25 °C "in situ"	1980	µS/cm

Un mètode útil per haver qualificat adequadament l'agua hauria estat el mètode de Langelier. Es tracta d'un dels mètodes més comuns utilitzats per a qualificar una aigua segons els ions que contingui. Aquest és oficialment reconegut perquè apareix com a possible mètode d'anàlisi al Reial Decret 140/2003.

En general, si l'índex es trona entre 0.5 i -0.5, l'agua es troba en equilibri i és potable segons [18]. Si es tractés d'un valor superior, es consideraria una aigua incrustant, i si fos inferior, una aigua agressiva. Aquesta caracterització determina que per a un correcte funcionament del sistema (sense sedimentació ni degradació del material) es desitja aproximar l'índex de Langelier a 0.

Per a calcular aquest índex (I_{SL}) és necessari aplicar la equació següent:

$$I_{SL} = pH_A - \log \frac{1}{[Ca^{+2}]} - \log \frac{1}{[Alc]} - C \quad (\text{Eq. Annex . 50})$$

On es requereixen les variables:



- pH inicial de l'aigua (pH_A).
- Concentració de ions calci ($[\text{Ca}^{+2}]$)
- Alcalinitat, expressada com a ppm de CaCO_3 ([Alc]).
- Constant dependent de la temperatura i la salinitat (C) segons Gràfic 12 Gràfic de Hoover.

Gràfic 12 Gràfic de Hoover. Font [19].

