



**TecnoCampus**  
Escola Superior  
Politécnica

*Centre adscrit a la*



**Universitat  
Pompeu Fabra**  
*Barcelona*

**Grau: Enginyeria Mecànica**

# **FORMES DE CORROSIÓ EN LA INDÚSTRIA. PROTECCIÓ. CAS PRÀCTIC**

## **MEMÒRIA**

**Marc Climent Ramos**

**PONENT: Carles Paul Recarens**

**CURS ACADÈMIC: 2023-2024**



**TecnoCampus**  
**Mataró-Maresme**



## **Agraïments**

Vull expressar el meu més profund agraïment a la meva família, especialment als meus pares, pel seu constant suport i amor incondicional durant tot aquest temps. Han estat el meu pilar fonamental, brindant-me sempre els recursos i l'ànim necessaris per a seguir endavant en la meva formació tant personal com professional. Sense el seu sacrifici i dedicació, la culminació d'aquest projecte no hauria estat possible.

Així mateix, desitjo agrair a tots els professors que han contribuït al meu desenvolupament acadèmic. El seu coneixement, passió per l'ensenyament i capacitat per a fomentar la curiositat i l'esperit de recerca han estat invaluables. En particular, m'agradaria agrair al meu tutor, Carles Paul, per la seva orientació i suport continu durant la realització d'aquest treball.



## **Resum**

El present Treball fi de grau se centra en l'estudi de la corrosió, les seves diferents formes de manifestació, i els mètodes de protecció i control disponibles. Seguint la classificació de la NACE (National Association of Corrosion Engineers), s'exploren mètodes de protecció com la protecció catòdica, que redueix o elimina la corrosió convertint el metall en el càtode d'una cel·la de corrosió mitjançant un corrent imprès o un ànode galvànic. Els coneixements teòrics s'apliquen en l'anàlisi i disseny d'un Sistema de Refrigeració Principal en una Central Tèrmica, avaluant i dissenyant solucions pràctiques basades en l'aprens.

## **Resumen**

El presente Trabajo fin de grado se centra en el estudio de la corrosión, sus diferentes formas de manifestación, y los métodos de protección y control disponibles.. Siguiendo la clasificación de la NACE (National Association of Corrosion Engineers), se exploran métodos de protección como la protección catódica, que reduce o elimina la corrosión convirtiendo el metal en el cátodo de una celda de corrosión mediante una corriente imprimida o un ánodo galvánico. Los conocimientos teóricos se aplican en el análisis y diseño de un Sistema de Refrigeración Principal en una Central Térmica, evaluando y diseñando soluciones prácticas basadas en el aprendizaje.

## **Abstract**

This Final Degree Project focuses on the study of corrosion, its different forms of manifestation, and the available protection and control methods.. Following the NACE National Association of Corrosion Engineers classification, protection methods such as cathode protection are explored, which reduces or eliminates corrosion by turning metal into the cathode of a corrosion cell by means of a printed current or a galvanic anode. The theoretical knowledge is applied in the analysis and design of a Main Refrigeration System in a Thermal Power Station, evaluating and designing practical solutions based on what has been learned.



# Índex

<b>1.0.</b>	<b>MEMÒRIA</b> .....	1
1.0.	Objecte i Abast .....	1
1.1.	QUE ÉS LA CORROSIÓ.....	1
1.2.	PES DE LA CORROSIÓ EN L'ACTUALITAT .....	2
1.3.	BASES D'ELECTROQUÍMICA .....	3
1.3.1.	Definicions de conceptes.....	3
1.3.2.	Reaccions d'Oxidació i Reducció .....	6
1.3.3.	Procés electrolític.....	7
1.3.4.	Termodinàmica.....	9
1.3.5.	Potencial .....	11
1.3.6.	Elèctrodes de referència usats en la protecció catòdica.....	13
1.3.7.	Series Galvàniques.....	15
1.3.8.	Equació de Nernst.....	17
1.3.9.	Sèries FEM.....	18
1.3.10.	Diagrames de Pourbaix.....	20
1.3.11.	Llei de Faraday.....	21
1.3.12.	Diagrames de Evans.....	22
1.3.13.	Afecte de l'àrea en el diagrama d'Evans.....	25
1.3.15.	Passivitat .....	29
1.4.	TIPUS D'AMBIENT .....	30
1.4.1.	Corrosió Atmosfèrica .....	30
1.4.2.	Corrosió subterrània .....	31
1.4.3.	Immersió en líquids .....	33
1.5.	MATERIALS EN ENGINYERIA.....	35
1.5.1.	Acers al carboni-manganès i acers de baix aliatge .....	35
1.5.2.	Foses.....	40
1.5.3.	Acers inoxidables .....	42
1.5.4.	Aliatges amb base de coure.....	46
1.5.5.	Aliatges d'alumini.....	48
1.5.6.	Aliatges de Magnesi .....	48
1.5.7.	Titani.....	48
1.5.8.	Aliatges amb base de Zenc.....	49
1.5.9.	Formigó Armat .....	49
1.5.10.	Polímers i plàstics .....	50

1.5.11.	Elastòmers.....	51
1.6.	<b>FORMAS DE CORROSIÓ</b> .....	52
1.6.1.	Corrosió uniforme .....	52
1.6.2.	Corrosió Localitzada .....	54
1.6.3.	Corrosió Galvànica.....	59
1.6.4.	Esquerda ment degut al medi.....	62
1.6.5.	Corrosió assistida per flux .....	69
1.6.7.	Deallowing.....	75
1.6.8.	Oxidació Química .....	77
1.6.9.	Corrosió microbiològica.....	78
1.7.	<b>PRINCIPIS GENERALS DE LA PROTECCIÓ CATÓDICA EN AIGUA DE MAR</b>	78
1.7.1.	Mètode ànodes de sacrifici .....	81
1.7.2.	Mètode de corrent imprès.....	84
1.7.3.	Elèctrodes de referència.....	88
1.7.4.	Mesurament del potencial.....	89
1.7.5.	Consideracions del disseny. ....	89
1.7.6.	Dades tècniques i funcionament .....	90
1.7.7.	Efectes dels factors mediambientals sobre la demanda de corrent.....	95
1.7.8.	Efectes secundaris de la protecció catòdica.....	99
1.7.9.	Utilització de la protecció catòdica associada als revestiments .....	99
1.8.	<b>CRITERIS PER A LA PROTECCIÓ CATÓDICA</b> .....	103
1.9.	<b>CÀLCULS A SEGUIR</b> .....	105
1.9.1.	Càlcul de la corrent necessària per a la protecció .....	106
1.9.2.	Densitat de Corrent .....	107
1.9.3.	Pes de l'Ànode.....	108
1.9.4.	Corrent de sortida .....	109
1.9.5.	Resistència dels ànodes de sacrifici .....	110
1.9.6.	Càlcul de la vida útil dels ànodes de sacrifici .....	110
2.0.	<b>CAS PRÀCTIC</b> .....	113
2.1.	<b>INTRODUCCIÓ</b> .....	113
2.2.	<b>SISTEMA DE REFRIGERACIÓ PRINCIPAL DEL GRUP 5 DE LA CTCC BESÒS</b> .....	113
2.3.	<b>CIRCULACIÓ D'AIGUA</b> .....	115
2.4.	<b>SISTEMA DE FILTRATGE I AIGUA DE CIRCULACIÓ</b> .....	119
2.4.1.	Comportes .....	119



<b>2.4.2. Bombes d'ompliment del sistema d'aigua de circulació i de refrigeració auxiliar</b>	120
<b>2.4.3. Reixes Fixes</b>	121
<b>2.4.4 Reixes mòbils</b>	122
<b>2.5. BOMBAS DE CIRCULACIÓ D'AIGUA</b>	123
<b>2.6. CANONADES ENTERRADES DEL CIRCUIT D'AIGUA DE CIRCULACIÓ</b>	125
<b>2.7. NETEJA DELS TUBS DEL CONDENSADOR</b>	126
<b>2.8. FILTRES DEBRIS</b>	129
<b>2.9. CONDENSADOR</b>	131
<b>3.0. SOLUCIÓ PROPOSADA</b>	135
<b>3.1. CÀLCULS DE PROTECCIÓ CATÒDICA</b>	135
<b>3.1.1 A.1: CÀLCUL PROTECCIÓ CATÒDICA (ÀNODES DE SACRIFICI) CANONADES DESCÀRREGA BOMBES AIGUA DE CIRCULACIÓ</b>	137
<b>3.1.2. A.2. CÀLCUL PROTECCIÓ CATÒDICA (ÀNODES DE SACRIFICI) COL·LECTOR METÀL·LIC COMÚ CANONADES BOMBES AIGUA CIRCULACIÓ</b>	138
<b>3.1.3. A.3. CÀLCUL DE PROTECCIÓ CATÒDICA (ÀNODES DE SACRIFICI) COL·LECTOR METÀL·LIC COMÚ DISTRIBUCIÓ AIGUA DE REFRIGERACIÓ A CANONADES ENTRADA CONDENSADOR (10PAB50BR003).</b>	139
<b>3.1.4. A.4. CÀLCUL PROTECCIÓ CATÒDICA (ÀNODES DE SACRIFICI) CANONADES METÀL·LIQUES AIGUA CAP A CONDENSADOR (10PAB51/52BR001)</b>	140
<b>3.1.5. A.5. CÀLCUL PROTECCIÓ CATÒDICA (ÀNODES DE SACRIFICI) CANONADES METÀL·LIQUES AIGUA SORTIDA DEL CONDENSADOR (10PAB51/52BR002)</b>	141
<b>3.1.6. A.6. CÀLCUL PROTECCIÓ CATÒDICA (ÀNODES DE SACRIFICI) COL·LECTOR METÀL·LIC COMÚ CANONADES SORTIDA AIGUA REFRIGERACIÓ CONDENSADOR CAP A POU DE RUPTURA (10PAB60BR001).</b>	142
<b>3.1.7. B. CÀLCUL PROTECCIÓ CATÒDICA PER CORRENT IMPOSAT CAIXES D'AIGUA CONDENSADOR PRINCIPAL CICLE AIGUA-VAPOR</b>	143
<b>3.2. VIABILITAT TÈCNICA</b>	146
<b>4.0. PRESSUPOST</b>	147
<b>4.1. PRESSUPOST DE LA IMPLEMENTACIÓ DEL PROJECTE</b>	147
<b>4.2. VIABILITAT ECONÒMICA</b>	150
<b>5.0. CONDICIONS NECESÀRIES</b>	153
<b>5.1. MATERIALS</b>	153
<b>5.1.1. Estació de Protecció Catòdica</b>	153
<b>5.1.2. Ànodes de Corrent Impresa</b>	155
<b>5.1.3. Elèctrodes de referència instal·lats en caixes d'aigua del condensador.</b>	156

5.1.4. Ànodes de sacrifici d'alumini protecció catòdica canonades d'acer .....	156
5.1.5. Cables .....	157
5.1.6. Armari de connexions .....	158
5.1.7. Xunts.....	158
5.1.8. Interruptors .....	158
5.1.9. Acoblaments d'acer inoxidable .....	158
<b>5.2. INSTAL·LACIÓ .....</b>	<b>159</b>
5.2.1. Ànodes .....	159
5.2.2. Elèctrodes de referència.....	159
5.2.3. Ànodes de sacrifici.....	160
5.2.4. Rectificador.....	160
5.2.5. Connexió del cable a la paret del condensador (negatiu i test). .....	160
5.2.6. Caixa de connexions d'ànodes i elèctrodes de referència.....	161
5.2.7. Activació del sistema de protecció catòdica .....	161
<b>5.3. POSADA EN MARXA.....</b>	<b>162</b>
5.3.1. Comprovacions prèvies.....	162
5.3.2. Procés de posada en marxa.....	162
<b>5.4. DOCUMENTACIÓ .....</b>	<b>163</b>
<b>5.5. REQUISITS DE QUALITAT I MEDIAMBIENTALS.....</b>	<b>164</b>
<b>5.6. CONTROL I MANTENIMENT DEL SISTEMA DE PROTECCIÓ CATÒDICA .....</b>	<b>164</b>
<b>6.0. ESTUDI MEDIAMBIENTAL .....</b>	<b>167</b>
6.1. Visió global.....	167
6.2. Conclusions .....	167
<b>7.0. PERSPECTIVA DE GÈNERE .....</b>	<b>169</b>
<b>8.0. CONCLUSIONS .....</b>	<b>171</b>
<b>9.0. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>173</b>



## Índex de Figures

Figura 1: Model atòmic de Bohr [1].....	3
Figura 2: Molècula d'aigua .....	4
Figura 3: Teoria del mar d'electrons.[3] .....	5
Figura 4: Cel.la de corrosió [4] .....	7
Figura 5: Esquema d'una cel.la de corrosió [5] .....	8
Figura 6: Pila galvànica o pila de Daniels. [8] .....	11
Figura 7: Elèctrode de referència d'hidrogen. [9].....	12
Figura 8: Parts d'un elèctrode de referència Coure-Sulfat de Coure. [9].....	13
Figura 9: Sèrie galvànica en ambient salí. [11].....	16
Figura 10: Potencials de reducció en condicions Standard [14]. .....	19
Figura 11: Diagrama de Pourbaix del Ferro [16]. .....	20
Figura 12: Diagrama d'Evans, la línia verda demostra la corba de polarització.[19].....	23
Figura 13: Diagrama d'Envans [19].....	24
Figura 14: Cel.la de polarització mixta [20]. Font: Basic Corrosion Manual, NACE Internacional,2004. [54] .....	25
Figura 15: Afecte de l'àrea: Càtode més petit. Font: Basic Corrosion Manual, NACE Internacional,2004. [54] .....	26
Figura 16: Afecte de l'àrea: Reducció de l'ànode. Font: Basic Corrosion Manual, NACE Internacional,2004. [54] .....	26
Figura 17: Canvis del Potencial degut a la temperatura. Font: Basic Corrosion Manual, NACE Internacional,2004. [54] .....	28
Figura 18: Passivitat . Font: Basic Corrosion Manual, NACE Internacional,2004. [54] .....	29
Figura 19: Diagrama ferro carboni: Separació dels acers i foses. [21] .....	41
Figura 20: Corrosió en el ferro.[23] .....	53
Figura 21: Velocitat de corrosió en funció del temps. Font: Forms of Corrosion NACE International, 1982. [54].....	53
Figura 22: Picadura en canonada metàl·lica.[24].....	55
Figura 23: Atac corrosiu per aeració diferencial. Font: : Lapuente Aragó - 2008 (Universidad de Alicante). .....	56
Figura 24: Corrosió per concentració d'ions metàl·lics. Font: (NACE, Basic Corrosion Manual, 2004) .....	57
Figura 25: Exemples de corrosió filiforme o en forma de fil. [25][26].....	58
Figura 26: Exemples de Corrosió Galvànica. [27].....	59
Figura 27: Exemple de corrosió galvànica a partir de dos materials diferents. [28] .....	60
Figura 28: Disseny per evitar corrosió galvànica. [29] .....	61
Figura 29: Sistema d'aïllament elèctric a partir de juntes aïllants. [30].....	61
Figura 30: Corrosió assistida per esforços. [31].....	63
Figura 31: Bombolla intersticial d'hidrogen. [32].....	64
Figura 32: Esquerdes per fatiga i ambient corrosiu. [33] .....	66
Figura 33: Exemples de corrosió per erosió. A) Canonada en forma de colze. B) Equip industrial. [34].....	69
Figura 34: Cavitació de la hèlix d'un vaixell. [35] .....	70
Figura 35: Corrosió d'un tub d'acer al carboni que pertany a un circuit d'una caldera de recuperació de calor. [36].....	71
Figura 36: Procés de "Cladding". [37].....	73

Figura 37: Pèrdua de les propietats de l'aliatge del llautó. [39] .....	76
Figura 38: Diagrama que mostra com la corrosió pot reduir-se mitjançant l'aplicació de protecció catòdica. FONT: UNE-EN 12473:2014.[56].....	79
Figura 39: Representació de la protecció catòdica utilitzant un ànode de sacrifici en una estructura submergida. FONT: UNE-EN 12473:2014. [56] .....	81
Figura 40: Representació d'una protecció catòdica de corrent impresa utilitzant un ànode en aigua de mar. FONT: UNE-EN 12373:2014.....	85
Figura 41: Planta del sistema de circulació d'aigua de la Central Tèrmica de Cicle combinat del Besòs. FONT PRÒPIA: Endesa Generació S.A. ....	114
Figura 42: Circulació d'aigua: Bombes. FONT: Endesa Generació S.A. ....	116
Figura 43: Canonades d'entrada i sortida d'aigua de circulació del condensador. FONT: Endesa Generació S.A. ....	117
Figura 44: Seccions i perfils de les comportes. FONT: Endesa Generació S.A.....	119
Figura 45: Bomba d'ompliment. FONT: Endesa Generació S.A.....	120
Figura 46: Secció del sistema de filtratge d'aigua. FONT: Endesa Generació S.A.....	121
Figura 47: Sistema de filtratge mòbil d'aigua de circulació. FONT: Endesa Generació S.A....	122
Figura 48: Filtres rotatius de neteja de l'aigua de circulació. FONT: Endesa Generació S.A.	123
Figura 49: Filtres rotatius de neteja de l'aigua de circulació. FONT: Endesa Generació S.A.	124
Figura 50: Esquema de la distribució de les canonades enterrades per la refrigeració del grup 5 CTCC Besòs. FONT: Endesa Generació S.A. ....	125
Figura 51: Sistema de neteja de brutícia dels tubs del condensador. FONT: Endesa Generació S.A.....	127
Figura 52: Plano del sistema de neteja de brutícia dels tubs del condensador. FONT: Endesa Generació S.A. ....	128
Figura 53: Secció interna del filtre debrís. [41].....	130
Figura 54: Vista en perspectiva del filtre debrís .[42].....	130
Figura 55: Disseny de la distribució del condensador CTCC Besòs 5. FONT: Endesa generació S.A.....	132
Figura 56: Disseny de la distribució del condensador CTCC Besòs 5. FONT: Endesa generació S.A.....	132
Figura 57: Secció interna del condensador CTCC Besòs 5. FONT: Endesa generació S.A. ..	133



## Índex de Taules

Taula 1: Característiques dels ions.....	4
Taula 2: Reaccions anòdiques i catòdiques més comunes .....	8
Taula 3: Potencials dels Electrodes de referència més utilitzats. ....	14
Taula 4: Sèrie galvànica de metalls en aigua de mar referenciats al elèctrode de referència Cu/CuSO <sub>4</sub> [11].....	16
Taula 5: Espontaneïtat de las reaccions redox en funció de la energia lliure de Gibbs ( $\Delta G^0$ )....	18
Taula 6: Propietats mecàniques d'acers amb baix contingut de carboni. ....	36
Taula 7: Criteris de potencial per a la protecció catòdica d'alguns materials en aigua de mar. FONT: Norma UNE-EN 12473:2014 .....	39
Taula 8: Aliatges d'alumini. Font: NACE, Basic Corrosion Manual, 2004. [54].....	48
Taula 9: Composició dels ànodes de Zenc en % en massa. FONT: UNE 12496:2013.....	83
Taula 10: Composició del ànode d'alumini en % en massa. FONT: UNE 12496: 2013.....	84
Taula 11: Comparació entre el mètode de ànodes de sacrifici i el mètode de la corrent impresa. FONT: Pròpia. Base: Norma UNE 12473: 2014.....	86
Taula 12: Comparativa de diferents ànodes de corrent impresa. [40].....	87
Taula 13: Potencial estructura-electròlit vs resistivitat del electròlit. FONT: Numeral 5.3.2.1 ISO 15589-1:2003 .....	104
Taula 14: Factors de desgast en recobriments anticorrosius. FONT: Norma NRF-047-PEMEX- 2014. [55].....	107
Taula 15: Requeriments de densitat de corrent per la protecció catòdica de l'acer en aigua de mar. FONT: NACE Corrosion Engineer's Reference Book. ....	107
Taula 16: Valores electroquímics de disseny per ànodes galvànics d'alumini. FONT: Norma NRF-047-PEMEX-2014. [55].....	108
Taula 17: Descripció del circuit enterrat de la refrigeració principal del grup 5 CTCC Besòs. FONT: PROPIA .....	125
Taula 18: Valors electroquímics per el càlcul de la vida útils dels ànodes de sacrifici més comuns. [43].....	137
Taula 19: Subtotal de materials de l'apartat A. FONT: Pròpia .....	147
Taula 20: Costos d'enginyeria i de ma d'obra de l'apartat A. Mostra el pressupost total de l'apartat A. FONT: Pròpia.....	148
Taula 21: Costos d'enginyeria .....	148
Taula 22: Costos de ma d'obra i instal·lació de l'apartat B. Pressupost total del apartat B. FONT: Pròpia.....	149
Taula 23: Costos de Materials del apartat B. FONT: Pròpia.....	149
Taula 24: Pressupost final d'implementació del projecte .....	150
Taula 25: Capítol II de l'elaboració del projecte: Costos materials. FONT: Pròpia. ....	150
Taula 26: Capítol I de l'elaboració del projecte: Costos d'enginyeria. FONT: Pròpia.....	150
Taula 27: Capítol III de l'elaboració del projecte: Amortitzacions. FONT: Pròpia.....	150
Taula 28: Pressupost final del Projecte .....	151





## Glossari de termes

A	Àrea total de la superfície [ $m^2$ ]
A	Àrea de l'estructura a protegir [ $m^2$ ]
A	Àrea exposada de l'ànode [ $cm^2$ ]
$D_c$	Densitat de corrent [ $mA/m^2$ ]
$\Delta f$	Increment mitjà del factor de dany del recobriment (adimensional)
E	Velocitat de consum [ $kg/A \cdot any$ ]
$E_a$	Potencial de protecció permisible pel disseny [V]
$E_c$	Potencial de protecció
$E_c - E_a$	Diferència de potencial [V]
$\varepsilon$	Capacitat electroquímica del ànode [ $A \cdot h/Kg$ ]
$f_c$	Factor de dany del recobriment (adimensional)
$f_i$	Factor de dany inicial del recobriment (adimensional)
I	Corrent de descàrrega de l'ànode [A]
$I_{cf}$	Demanda total de corrent per a protegir una secció [A]
$I_{cm}$	Demanda de corrent mitja [A]
$I_c$	Densitat de corrent per condició mitjana [ $A/m^2$ ]
$I_f$	Corrent de sortida d'un ànode requerida al final de la vida útil [A]
L	Vida útil dels ànodes en anys
M	Massa de l'ànode [Kg]
N	Número de ànodes a instal·lar
NACE	National Association of Corrosion Engineers
$\eta$	Rendiment de l'ànode
$R_a$	Resistència de l'ànode [ $\Omega$ ]
P	Resistivitat del medi [ $\Omega \cdot cm$ ]
t	Vida útil expressada en anys
u	Factor d'utilització de l'ànode
U	Factor d'utilització
$W_a$	Massa neta individual del ànode [Kg]

W            Massa neta total anòdica [Kg]

## **1.0. MEMÒRIA**

### **1.0. Objecte i Abast**

Aquest treball se centra a aplicar els principis de la corrosió i la seva protecció en sistemes de refrigeració en un entorn industrial. Tot i que s'enfocarà en sistemes exposats a atmosferes marines, específicament en un sistema de refrigeració per aigua de mar, l'estudi proporcionarà una visió general del comportament de la corrosió a diversos tipus d'escenaris.

Es realitzaran càlculs específics en el sistema d'aigua de refrigeració principal d'una central tèrmica de cycle combinat de 1250 MW alimentada per aigua de mar. Les característiques i singularitats d'aquesta central es detallaran més endavant en el projecte. L'estudi es concentrarà en tres mètodes de protecció catòdica: la protecció catòdica passiva (mitjançant ànodes de sacrifici) i la protecció catòdica activa, també coneguda com a protecció catòdica per corrent imprès. A més, s'utilitzaran recobriments específics com a mesura de protecció i control contra la corrosió, considerant-los com la primera barrera protectora.

L'abast del projecte abastarà tots els elements del sistema, amb l'objectiu de garantir que puguin assolir un cycle de vida d'aproximadament vint-i-cinc anys, una durada típica per a aquest tipus d'instal·lacions. El disseny de la protecció catòdica seguirà les especificacions i normatives europees, incloent-hi normes ISO adoptades en l'àmbit nacional (normes UNE), així com les recomanacions d'organismes internacionals com NACE (National Association of Corrosion Engineers), que facilitarà la classificació i prevenció de diverses formes de corrosió.

### **1.1. QUE ÉS LA CORROSIÓ**

Les definicions de corrosió varien, però en essència, fa referència al deteriorament dels metalls a causa de l'acció de diversos agents químics. També es pot entendre com el deteriorament continu al llarg del temps d'un material a causa de reaccions químiques o electroquímiques amb el seu entorn. En termes simples, la corrosió és el procés pel qual els materials tendeixen a revertir al seu estat natural original, accelerat per factors com

ara oxigen, aigua, productes químics, temperatura i canvis en la composició fisicoquímica del material.

D'altra banda, si ens centrem únicament en el seu sentit químic la corrosió implica el deteriorament d'un material a causa d'un atac electroquímic. En un sentit més ampli, és la tendència dels materials a cercar una forma de més estabilitat o menor energia interna. Quan la corrosió s'origina per una reacció electroquímica (oxidació), la velocitat del procés depèn de molts factors diferents com ara la temperatura, la salinitat del fluid en contacte amb el metall i les propietats específiques dels metalls involucrats.

Segons NACE (National Association of Corrosion Engineers), el terme corrosió es defineix com "el deteriorament d'una substància o la seva propietat a causa de la reacció amb el medi ambient"

## **1.2. PES DE LA CORROSIÓ EN L'ACTUALITAT**

La corrosió té un impacte significatiu tant en l'àmbit social com econòmic. Segons el Codi Tècnic de l'Edificació (CTE.), al voltant del 4% del Producte Intern Brut (PIB) d'un país industrialitzat es destina directament o indirectament a la prevenció i la correcció de problemes relacionats amb la corrosió de metalls.

Les pèrdues directes són aquelles que afecten immediatament quan passa l'atac corrosiu. Aquestes pèrdues inclouen costos de reparació, reemplaçament i substitució d'equips danyats, així com les despeses associades a mesures preventives. D'altra banda, les pèrdues indirectes engloben les conseqüències de les fallades ocasionades per la corrosió. Entre les més significatives hi ha les parades de producció derivades de fallades relacionades i les responsabilitats legals i penals a causa de possibles accidents.

En termes més simples, la corrosió no només genera costos directes immediats, com ara reparacions i reemplaçaments, sinó que també provoca pèrdues indirectes a llarg termini, com interrupcions en la producció i possibles conseqüències legals i civils a causa de falles relacionades amb la corrosió. Com és lògic, totes aquestes conseqüències de la corrosió deriven en costos els quals podrien ser deguts als següents problemes: Manteniment productiu i correctiu, pèrdua de la producció per indisponibilitat degut a falles, contaminació en la producció ( indústria alimentària o farmacèutica), pèrdua del producte, accidents mediambientals etc...

### 1.3. BASES D'ELECTROQUÍMICA

Primer de tot, es definiran fonament bàsic d'electroquímica per tal d'entendre posteriorment com funcionen i es duen a terme els diferents processos corrosius.

#### 1.3.1. Definicions de conceptes

**Matèria:** És qualsevol substància que té pes i ocupa un espai

**Element:** És una substància que no pot ser descompost per reaccions químiques. Són els blocs bàsics que constitueixen tota la matèria (exemples: Fe, O, H, C, N, etc.).

**Compost:** És una combinació de dos o més elements. És una substància pura amb composició fixa (exemples: CO<sub>2</sub>, NaCl, H<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc.).

**Barreja:** Estan formades per la combinació de més d'una substància pura. Són barreges que es produeixen en l'aire de l'atmosfera com l'aigua del mar. Encara que en una barreja homogènia s'observen les mateixes propietats a tota la seva massa, aquestes varien segons la proporció que hi hagi dels seus components.

**Àtom:** És la partícula més petita d'un element. Un àtom consisteix en un nucli central que té una càrrega positiva, envoltat d'electrons que tenen una càrrega electrònica equivalent la qual provoca una neutralitat de la partícula. [1]

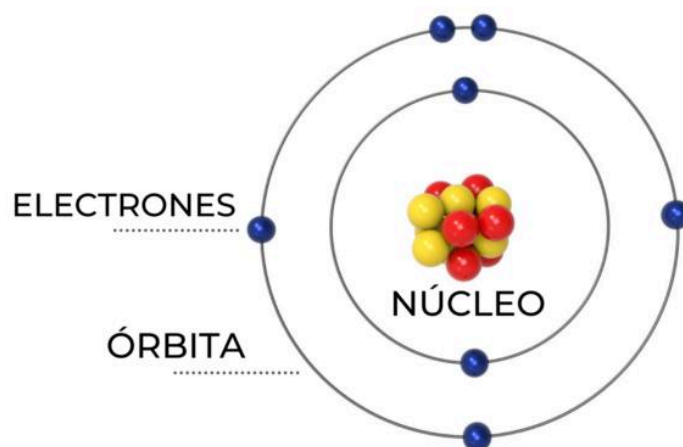


Figura 1: Model atòmic de Bohr [1]

**Molècula:** Una molècula es la partícula més petita d'un element o compost que conté totes les propietats d'aquest element o compost. Per exemple:

La partícula més petita d'un element com l'hidrogen o l'oxigen, és el H<sub>2</sub> o el O<sub>2</sub>.

La partícula més petita d'un compost com pot ser l'aigua o l'òxid de ferro(III), és el H<sub>2</sub>O [2] o el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

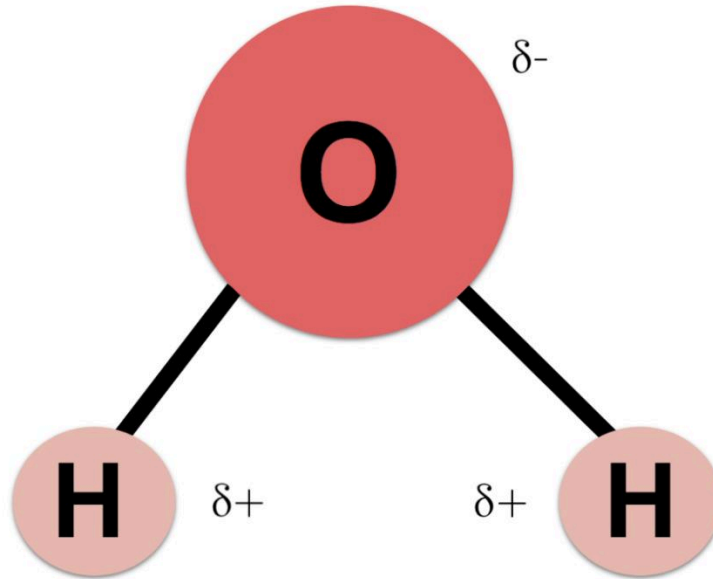


Figura 2: Molècula d'aigua

**Ió:** És un àtom carregat. En la Taula 1, s'adjunten les característiques dels anions i dels cations

Anió	Catió
Càrrega negativa.	Càrrega positiva.
Es format per l'adició d'electrons.	Es format per la pèrdua d'electrons.
Atracció cap el ànode.	Atracció cap a el càtode.

Taula 1: Característiques dels ions

- Un àtom o molècula amb càrrega negativa també es coneix com un anió.
- Un àtom o molècula amb càrrega positiva també es coneix com catió.

**Electròlit:** Un líquid que conté ions i pot conduir electricitat a través del flux d'aquests ions. Els anions es dirigeixen a l'ànode, mentre que els cations es desplacen cap al càtode. La conductivitat d'un electròlit depèn de la quantitat d'ions; pot ser altament conductiu, com l'aigua de mar, o moderadament conductiu, com l'aigua pura.

**Forces d'enllaç:** Les forces d'enllaç són les interaccions que mantenen units als àtoms en una molècula o als ions en un compost. Aquestes forces són essencials per establir les estructures químiques i determinen les propietats físiques i químiques de les substàncies. Hi ha diversos tipus de forces d'enllaç, que inclouen:

**Forces intermoleculars:** Inclouen forces de Van der Waals, Dipolo-Dipolo, ponts d'hidrogen, dipol induït, entre d'altres.

**Enllaç Iònic:** Fa referència a la unió d'ions amb càrregues oposades, com en el cas de la sal comuna (NaCl).

**Enllaç Covalent:** Implica el compartiment d'electrons de valència, com a les molècules d'O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>.

**Enllaç Metà·lic o mar d'electrons:** Es caracteritza per electrons deslocalitzats que formen un núvol electrònic lliure.

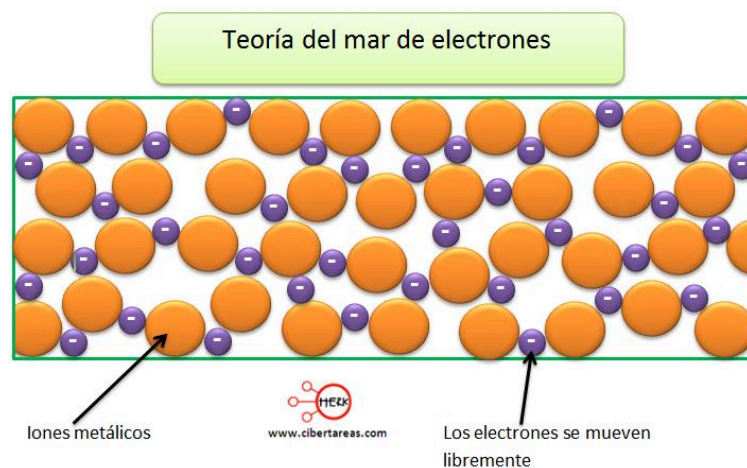


Figura 3: Teoría del mar d'electrons.[3]

### 1.3.2. Reaccions d'Oxidació i Reducció

La majoria de les reaccions de corrosió són processos electroquímics coneguts com a reaccions d'oxidació/reducció, REDOX o cel·les de corrosió (vegeu la Figura 4).

Aquestes reaccions impliquen l'intercanvi d'electrons, i en el context de la corrosió, aquest intercanvi es produeix en llocs específics. L'oxidació té lloc en regions designades com a ànodes, mentre que la reducció ocorre en àrees anomenades càtodes.

Els electrons que s'alliberen durant la semireacció d'oxidació (a l'ànode) es desplacen a través del metall cap al càtode. Al càtode, aquests electrons són consumits en la reacció de reducció. Aquestes reaccions de corrosió es desenvolupen en presència d'electròlits que subministren els reactants necessaris per a aquests processos.

Reaccions d'Oxidació:

- Aquesta reacció es dona a terme quan hi ha una pèrdua d'electrons d'un àtom compost o ió.
- Apareix un increment de la càrrega positiva de l'àtom, compost o ió.
- Dintre de la reacció electroquímica, l'oxidació apareix en l'ànode.
- Els electrons estan lliures i poden moure's lliurement dintre del metall.
- Son de la forma  $M^0 \rightarrow M^{n+} + ne^-$ .
- Exemples:  $Fe^0 \rightarrow Fe^{3+} + 3e^-$ ;  $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^-$

Reaccions de reducció:

- La reacció apareix quan s'afegeixen electrons dins d'un àtom, compost o ió.
- Apareix un increment de la càrrega negativa de l'àtom, compost o ió.
- Dintre de la reacció electroquímica, l'oxidació apareix en càtode.
- Els electrons són subministrats a partir del metall i es mouen al càtode des de zones anòdiques.
- Son de la forma  $M^{n+} + ne^- \rightarrow M^0$
- Exemples:  $Fe^{3+} + 1e^- \rightarrow Fe^{2+}$ ;  $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ ;  $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$



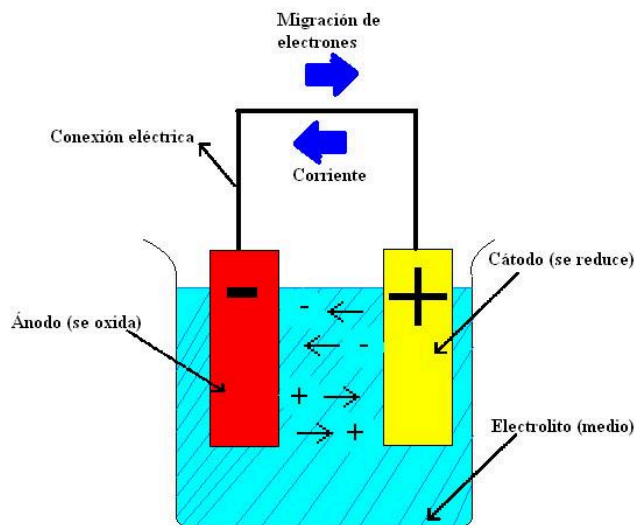


Figura 4: Cel·la de corrosió [4]

### 1.3.3. Procés electrolític

Excepte en certes reaccions de corrosió a alta temperatura, la gran majoria són processos electroquímics que tenen lloc dins d'un electrolít.

A l'ànode, es produeix l'oxidació, on els àtoms del metall es dissolen a l'electrolít i es converteixen en ions positius. Contrari a la creença comuna, la presència d'oxigen no sempre és necessària perquè passi la corrosió. En termes de corrosió, l'oxidació és simplement generar ions positius mitjançant la pèrdua d'electrons. Al càtode, les reaccions poden involucrar diversos compostos, sent les reduccions de l'hidrogen i de l'aigua força comuns. La corrosió requereix un circuit elèctric complet. Quan es duu a terme una reacció anòdica, els electrons queden al metall i, llevat que siguin utilitzats en reaccions al càtode, podrien aturar el procés de corrosió.

L'acumulació d'ions metàl·lics i electrons al metall pot alentir la velocitat de la reacció. En moltes reaccions de corrosió, els ions metàl·lics reaccionen amb altres substàncies a l'electrolít, reduint la quantitat d'ions metàl·lics dissolts i permetent que l'oxidació avanci més ràpidament. Els ions metàl·lics generats a l'ànode es combinen amb altres substàncies a l'electrolít per formar productes de corrosió. Les reaccions catòdiques consumeixen electrons i hi ha diverses reaccions comunes depenent de la composició química de

l'electròlit i altres condicions. En la taula que s'adjunta a continuació, es mostren les reaccions catòdiques més comunes:

Reacciones anódicas	Reacciones catódicas
$\text{Fe}^0 \rightarrow \text{Fe}^{3+}$	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$
$\text{Fe}^0 \rightarrow \text{Fe}^{2+}$	$2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4(\text{OH}^-)$
$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Taula 2: Reaccions anòdiques i catòdiques més comunes

A diferència dels electròlits, que condueixen electricitat mitjançant el flux d'ions, els metalls són conductors d'electricitat excel·lent gràcies al moviment d'electrons. Aquests electrons es desplacen al metall des d'àrees amb excés de càrrega negativa (més electrons) cap a àrees amb escassetat de càrrega negativa (pocs electrons). En una cel·la de corrosió, els electrons flueixen a través del metall des de les zones on ocorren les reaccions anòdiques cap a les zones on ocorren les reaccions catòdiques. El corrent elèctric també viatja a través de l'electròlit per equilibrar el flux d'electrons al metall. En aquest cas, els ions a l'electròlit actuen com a conductors del corrent elèctric.

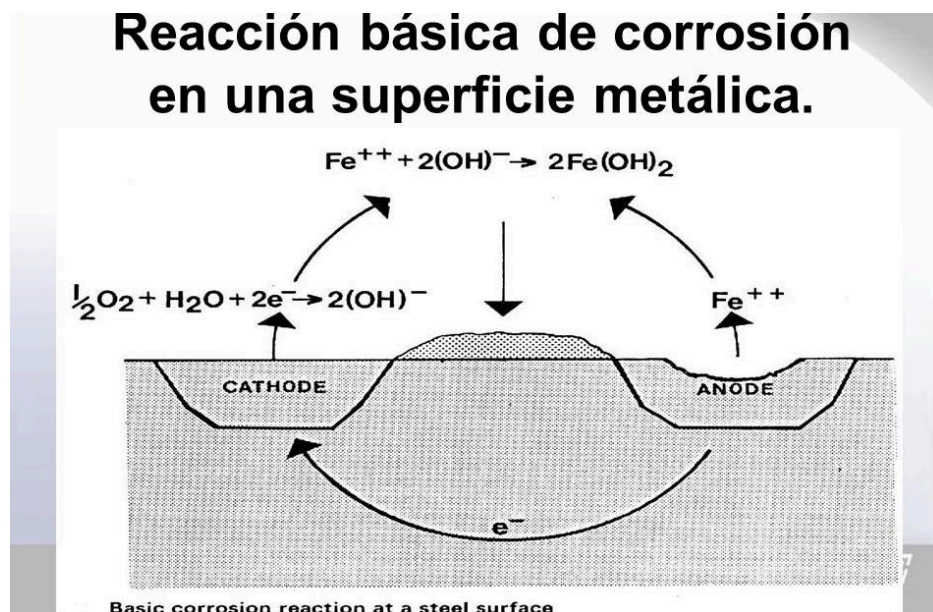


Figura 5: Esquema d'una cel·la de corrosió [5]

Els anions (ions amb càrrega negativa) es dirigeixen cap a l'ànode, mentre que els cations (ions amb càrrega positiva) es mouen cap al càtode. Perquè la corrosió passi, és essencial la presència i l'activació de tots aquests components. Els elements i les característiques necessaris en una cel·la electroquímica són:

**Ànode:** La regió on es produeix la pèrdua de metall i la generació d'electrons.

**Càtode:** La regió on els electrons produïts a l'ànode són consumits.

**Ruta metàl·lica:** El camí que permet als electrons moure's de les zones anòdiques a les zones catòdiques.

**Electròlit:** Subministra els reactius per a la reacció catòdica i facilita el flux d'ions. És crucial destacar que si algun d'aquests processos es redueix o s'atura, la reacció de corrosió disminueix o s'atura completament.

#### 1.3.4. Termodinàmica

El flux d'energia exerceix un paper fonamental en tots els processos químics, incloent-hi la corrosió. En aquest context, és essencial comprendre la dinàmica energètica entre els metalls i els productes de corrosió. Els metalls, en estat pur o en aliatges, tenen un contingut d'energia superior al dels compostos resultants dels processos corrosius. Els fenòmens naturals tendeixen a afavorir la reducció del contingut total d'energia en un sistema. En el cas dels metalls i el seu entorn, els elements metàl·lics solen trobar-se en forma de compostos químics anomenats minerals a la natura. L'extracció i la purificació de metalls purs a partir d'aquests minerals demanen energia, sigui en forma de calor o electricitat. Com més reactiu sigui el metall, més energia es requereix per obtenir-lo en forma pura des dels seus minerals.

Des d'una perspectiva energètica, la corrosió es pot entendre com el procés natural en què els metalls, amb la seva alta energia intrínseca, transiten cap a estats de menor energia en combinar-se amb altres elements per formar compostos químics. És important notar que, sovint, els productes de corrosió són idèntics als minerals originals. Per exemple, el ferro, en forma mineral, és primitivament un òxid de ferro (III), que és la coneguda, rovell, resultat de la corrosió del ferro i de l'acer.

La diferència d'energia alliberada durant aquests processos es manifesta en forma de calor (encara que de vegades és difícil de mesurar) i corrent elèctric (més fàcilment mesurable en la majoria dels casos). L'energia en un sistema es pot quantificar mitjançant l'energia lliure de Gibbs ( $\Delta G$ ), que es pot presentar en tres casos:

**$\Delta G$  Positiva:** En aquest cas, el metall és actiu i està propens a la corrosió. Aquest escenari és molt comú entre els metalls d'ús quotidià.

**Passivació:** Encara que  $\Delta G$  és més gran que zero (+), alguns metalls poden semblar resistir la corrosió i es diu que s'han "passivat". En aquest estat, el metall aparentment no experimenta corrosió.

**$\Delta G$  Zero o Negativa:** Quan  $\Delta G$  és zero o negatiu (-), el metall mostra resistència als agents corrosius. Aquest és el cas dels metalls nobles que no reaccionen significativament davant d'agents corrosius en condicions habituals.[6]

D'altra banda, també es pot saber l'espontaneïtat d'una reacció coneixent els canvis energètics associats amb la reacció, és a dir, l'energia que té el metall abans i després de corroir-se. Per a calcular aquest canvi, s'utilitza l'equació següent:

$$\Delta G = \sum n_f \mu_f (\text{estat final}) - \sum n_0 \mu_0 (\text{estat inicial}).$$

$\sum n_i \mu_i$  és el sumatori dels potencials químics de i-ènim compost als seus estats finals i inicials. Com més gran sigui el canvi d'energia, hi haurà una possibilitat o tendència major a que a dugui a terme el procés. Si el signe del balanç és negatiu implica que està passant d'un estat de més energia a un altre de menor. Aquest tipus de procés se'n diu espontani, i passa a la natura per si sol, alliberant energia.[7]

Si el canvi d'energia lliure en una reacció és igual al treball reversible total que es pot realitzar, es dedueix que:  $-\Delta G = \Delta W$  on  $\Delta W$  és qualsevol classe de treball (elèctric, mecànic, etc.). La diferència de potencial creada entre els elèctrodes provoca una migració d'electrons des de l'ànode al càtode al llarg del conductor metàl·lic extern, i constitueix el que es coneix com a pila galvànica o pila Daniels .

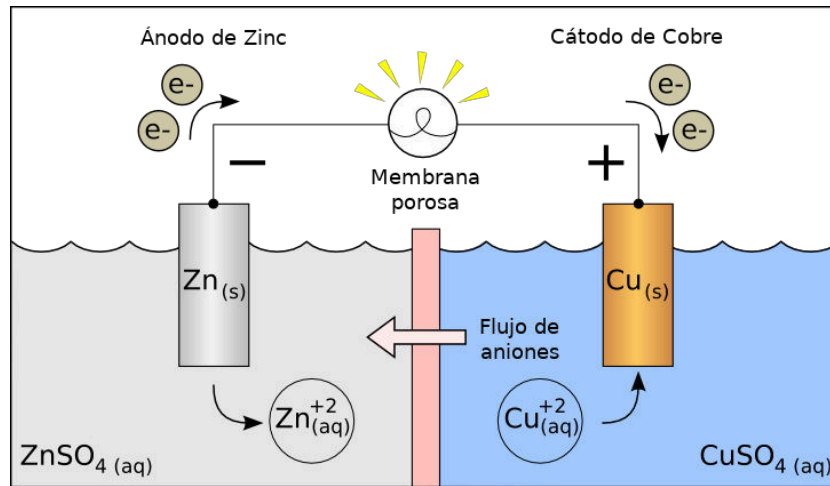


Figura 6: Pila galvànica o pila de Daniels. [8]

La diferència de potencial rep el nom de potencial de cel·la ( $E^0$ ). En haver-hi transport de càrregues, hi ha un treball per transportar-les, rebent el nom de treball elèctric ( $W_e$ ), que es defineix com la càrrega total transportada multiplicada per la diferència de potencial existent entre els elèctrodes:

$$-\Delta G = \Delta W_e = n \times F \times E^0$$

$n$ , és el nombre d'electrons que han passat per la cel·la.

$F$ , és la constant de Faraday (96500 C)

$E^0$  és el potencial estàndard que té en el procés considerant concentracions iòniques 1M.

### 1.3.5. Potencial

El mesurament del potencial elèctric és una manera d'avaluar les diferències d'energia, especialment en el context de la corrosió. En el procés de corrosió, l'ànode (elèctrode negatiu) es troba en un estat energètic més elevat en comparació del càtode (elèctrode positiu). La direcció del flux d'electrons és d'àrees de més energia (ànode) cap a àrees de menor energia (càtode). La magnitud del flux d'electrons depèn de la diferència d'energia entre l'ànode i el càtode. Aquesta diferència d'energia, o potencial, es pot mesurar mitjançant un voltímetre connectat entre l'ànode i el càtode al circuit elèctric format. En general, aquesta diferència de potencial és de l'ordre d'uns pocs volts o fins i tot menor.

Un exemple pràctic de mesurament de diferència de potencial és submergir acer galvanitzat i coure en aigua. En aquest cas, el potencial de l'acer galvanitzat és més negatiu que el del coure en 0.851 V. El mesurament no es fa individualment per a cada element, sinó que es mesura la diferència de potencial entre ells.

És similar a mesurar altures en diversos punts de la Terra; s'estableix una referència, igual que el nivell del mar és l'alçada de referència en mesurar alçades sobre la superfície terrestre. En el mesurament de potencials, s'empra comunament un elèctrode de referència. Aquest elèctrode es construeix de manera que el seu potencial sigui reproducible. Tot i que al laboratori s'assigna un potencial de zero a l'elèctrode de referència de l'hidrogen, a la pràctica industrial s'utilitzen diferents tipus d'elèctrodes de referència, relacionats amb l'elèctrode d'hidrogen però amb valors de potencial diferents de zero. És crucial indicar quin elèctrode de referència s'està usant quan es mesuren potencials respecte a elèctrodes amb valors diferents de zero.

En resum, el mesurament de potencials en corrosió es basa a entendre les diferències d'energia entre ànodes i càtodes. S'usa un elèctrode de referència per establir un punt de referència, i el mesurament es fa mesurant la diferència de potencial entre l'elèctrode de referència i el sistema en qüestió. Aquest enfocament facilita la comprensió i el control dels processos corrosius en diverses aplicacions industrials.

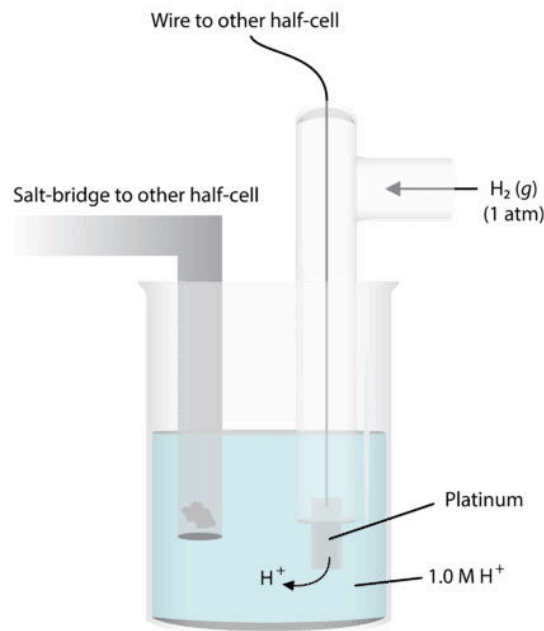
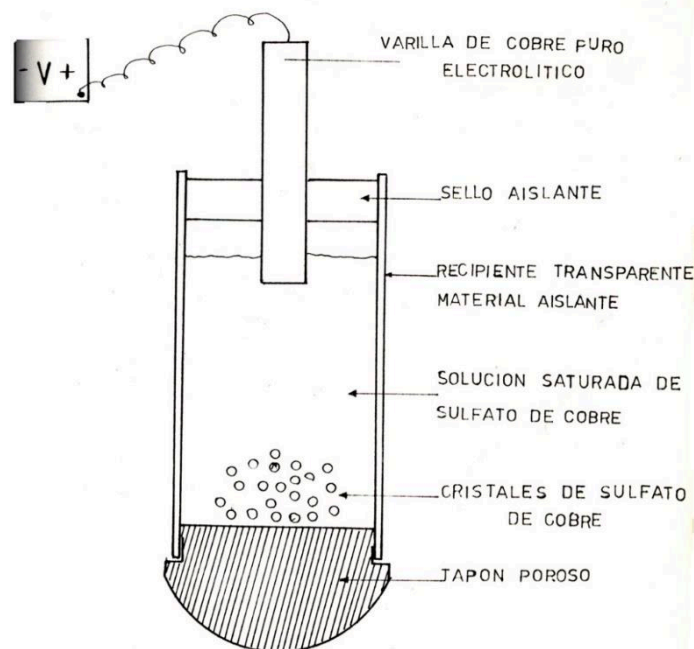


Figura 7: Elèctrode de referència d'hidrogen. [9]

### 1.3.6. Elèctrodes de referència usats en la protecció catòdica.

#### 1.3.6.1. Elèctrode de Referència Coure-Sulfat de Coure

L'elèctrode de referència de coure-sulfat de coure s'utilitza extensament per mesurar potencials en sòls i aigua dolça. Aquest elèctrode està compost per una vareta o filferro de coure submergit en una solució sobresaturada de sulfat de coure. La connexió entre l'electròlit de sulfat de coure i l'electròlit extern s'estableix mitjançant un tap porós, elaborat comunament amb materials ceràmics o fusta. La característica destacada d'aquest elèctrode de coure-sulfat de coure rau en la resistència i l'assequibilitat [10].



MEDIA CELDA DE REFERENCIA

Figura 8: Parts d'un elèctrode de referència Coure-Sulfat de Coure. [9]

Els potencials dels elèctrodes de referència més utilitzats són mesurats respecte l'elèctrode de referència de l'hidrogen. A continuació s'adjunten els potencials obtinguts:

Elèctrode de referència	Potencial (Volts)
Hidrogen	0.000
Calomelà (saturat)	+ 0,2415
Calomelà (1 N)	+ 0,2800
Calomelà (0,1 N)	+ 0,3333
Plata-Clorur de Plata (saturat)	+ 0,2250
Plata-Clorur de Plata (1 N)	+ 0,2222
Plata-Clorur de Plata ( Tipus sec en aigua de mar)	+ 0,2500
Coure-Sulfat de Coure	+ 0,3160

Taula 3: Potencials dels Electrodes de referència més utilitzats.

Per comparar diferents elèctrodes de referència, simplement es resta el potencial d'un elèctrode al de l'altre per obtenir la diferència entre aquests. Per exemple, en comparar un elèctrode de referència de Plata-Clorur de Plata de tipus sec en aigua de mar amb un elèctrode de referència de Coure-Sulfat de Coure, la diferència de potencial seria:

$$0,3160\text{V} - 0,2500\text{V} = +0,0660\text{V}$$

Això indica que l'elèctrode de Coure-Sulfat de Coure és més positiu que l'elèctrode de Plata-clorur de plata de tipus sec en aigua de mar per 0.066 V.

Per exemple, en mesurar el potencial d'un elèctrode (com un tub d'acer) submergit en un electròlit (terra humida) utilitzant un elèctrode de referència, aquest valor es pot comparar amb el potencial mesurat usant qualsevol altre elèctrode de referència.

Si mesurem el potencial del metall com a -0.850 V fent servir un elèctrode de referència de coure-sulfat de coure, i tota la resta roman constant, el potencial serà de -0.775 V si es mesura fent servir un elèctrode de referència de calomelans saturat (encara que aquest últim està en desús). El potencial del metall sempre s'informarà pel que fa a l'elèctrode de referència utilitzat en el mesurament

### 1.3.6.2. Elèctrode de referència Plata-Clorur de Plata

Aquest elèctrode utilitza la Plata com a metall de referència i aquesta està recoberta amb Clorur de Plata. En el cas del "tipus humit" d'aquest elèctrode, es fa servir una solució de clorur de potassi com a electròlit, i el potencial de l'elèctrode de referència està influenciat per la concentració de clorur de plata. Les concentracions més comunes són 1 N (normal)



o saturada. Per establir contacte entre l'electròlit de l'elèctrode de referència i l'electròlit de l'elèctrode que es mesurarà, es fa servir un disc de vidre porós o un tub capil·lar.

A l'elèctrode de plata-clorur de plata de "tipus sec", la plata recoberta amb clorur de plata es troba directament submergida a l'electròlit que envolta l'elèctrode a mesurar. Aquest tipus d'elèctrode de referència és sovint usat en aigua de mar, on la concentració de clorur (un ió crucial per al potencial d'aquest elèctrode de referència) és relativament constant. L'elèctrode de clorur de plata de tipus sec és conegut per la seva resistència i és àmpliament emprat per mesurar potencials de metalls en ambients marins.

### 1.3.7. Series Galvàniques

La sèrie galvànica és una forma d'avaluar la resistència química dels metalls i semimetall, així com la seva propensió a la corrosió. Quan dos metalls estan submergits en un líquid conductor (electròlit) i estan connectats elèctricament, el metall menys resistent experimentarà corrosió galvànica. La velocitat d'aquest procés depèn de l'electròlit i de la diferència en la resistència química dels metalls, la qual es reflecteix a la taula 4. Aquesta diferència es pot mesurar mitjançant la variació dels potencials de corrosió. La reacció galvànica entre dos metalls és fonamental en el funcionament de les piles. Aquestes taules són llistes de metalls organitzats segons les seves propietats en un entorn específic, per la qual cosa poden variar segons les condicions del medi. La sèrie galvànica més comuna i rellevant per al nostre estudi s'aplica a metalls i semimetalls amb aigua de mar.

Potenciales de electrodo de los metales en agua de mar ( V )	
Magnesio	1,55
Zinc	1,10
Aluminio	0,86
Cadmio	0,77
Hierro fundido	0,68
Acero al carbono	0,68
Acero inoxidable 18-8 (activo)	0,61
Plomo	0,57
Soldadura 50/50	0,52
Estaño	0,49

Cobre	0,43
Metal Muntz (variedad de latón)	0,43
Bronce alumino	0,51

Taula 4: Sèrie galvànica de metalls en aigua de mar referenciats al elèctrode de referència Cu/CuSO<sub>4</sub> [11]



Figura 9: Sèrie galvànica en ambient salí. [11]

Quan avaluem els potencials dels metalls en diferents entorns i els ordenem en llistes segons els seus potencials, estem creant sèries galvàniques específiques per a aquests medis particulars. És important assenyalar que en canviar l'entorn, és probable que els metalls ocupin diferents posicions en aquestes llistes. Aquestes sèries galvàniques són eines valuoses per entendre com interactuen els metalls quan es combinen. En general, observem que els metalls més actius (menys nobles) tendeixen a corroir-se més ràpidament que els metalls menys actius (més nobles), però hi ha excepcions a aquesta tendència. És crucial tenir en compte que aquestes sèries galvàniques només consideren el potencial de corrosió dels metalls

### 1.3.8. Equació de Nernst

L'equació de Nernst és una eina a l'electroquímica que ens ajuda a entendre com canvien els potencials dels metalls purs quan estan immersos en solucions amb concentracions d'ions que poden variar. Aquesta equació ens proporciona una manera de calcular el potencial elèctric en funció de les concentracions dels ions presents a la solució. En termes més simples, ens permet preveure com la composició química d'una solució afectarà la capacitat d'un metall per generar corrent elèctric. Per exemple, si tenim un elèctrode metàl·lic submergit en una solució amb diferents concentracions d'ions, l'equació de Nernst ens donarà informació sobre com influiran aquestes variacions en el potencial elèctric de l'elèctrode. Això és crucial en el disseny i comprensió de sistemes electroquímics, com ara cel·les i bateries. A continuació s'esmentarà i s'explicarà l'equació de Nernst [13]:

$$\Delta G = E_{cel.la}^0 = E^0 - \frac{R \cdot T}{n \cdot F \cdot \ln Keq} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F \cdot \ln \left( \frac{Cp}{Cr} \right)}$$

$E_{cel.la}^0$ : Potencial de la reacció

$E^0$ : Potencial en condicions standard

$R$ : Constant de gasos ideals, 8,214 J/K · mol

$T$ : temperatuta (K)

$n$ : Número de mols que han sigut transferits durant la reacció

$F$ : Constant de Faraday ~ 66.500 C

$Keq$ : Constant d'equilibride la reacció

$\left( \frac{Cp}{Cr} \right)$ : Concentracions de  $\frac{\text{Productes}}{\text{Reactius}}$

Concentracions:

- 1 para metalls en estat metàl·lic
- 1 par gasos
- 1 para ions en concentració 1M (1 mol /L) en condiciones Standard de pressió i temperatura

Si les concentracions d'ions en una solució no són d'1 M, la pressió d'una substància gasosa no és d'1 atmosfera o la temperatura no és de 25 °C, aleshores cal calcular el potencial electroquímic per a aquestes condicions específiques, com es mostra a la Taula 5. Això ens permet determinar si la reacció és espontània o no en aquestes circumstàncies particulars.

És important destacar que en canviar aquestes condicions, és possible induir que una reacció que no seria espontània en condicions estàndard es dugui a terme en altres circumstàncies. Aquest concepte és crucial en l'estudi de la corrosió, ja que moltes formes de corrosió, com la corrosió per esquerdes o l'aireig diferencial, es fonamenten en aquest principi. En resum, la capacitat de manipular les condicions pot tenir un impacte significatiu en l'ocurrència de reaccions electroquímiques, especialment en el context de la corrosió.

$\Delta G^0$	$K_{eq}$	$E^0$ cel.la	Reacció
-	Major de 1	+	Espontània
0	= 1	0	Hí ha equilibri
+	Menor de 1	-	No espontània

Taula 5: Espontaneïtat de las reaccions redox en funció de la energia lliure de Gibbs ( $\Delta G^0$ )

### 1.3.9. Sèries FEM

La sèrie de força electromotriu (FEM) és semblant a les sèries galvàniques, ja que totes dues proporcionen una llista de potencials d'oxidació organitzats en ordre dels seus valors. Tot i això, hi ha una diferència clau: mentre que les sèries galvàniques classifiquen els metalls segons els seus potencials en un únic ambient, la sèrie FEM presenta la llista de metalls en funció dels seus potencials en solucions amb concentracions estàndard d'ions, específicament a 1 M ( molar). La sèrie FEM també es coneix com la sèrie estàndard d'oxidació/reducció (rèdox), i els potencials  $E^0$  indiquen els potencials per a metalls purs en solucions dels seus ions a una activitat de 1M. Aquesta sèrie FEM és valuosa per

determinar la tendència d'un metall a corroir-se en un entorn donat. Un metall amb un potencial de FEM més negatiu tendeix a rovellar-se, mentre que un metall amb un potencial de FEM més positiu tendeix a reduir-se. Per exemple, considerem el cas del zinc en aigua on el zinc té un potencial més negatiu que l'hidrogen; per tant, tendeix a corroir-se. En canvi, coure en aigua té un potencial de FEM més positiu que l'hidrogen i tendeix a mantenir estable

És crucial destacar que la sèrie FEM fa referència a metalls purs en solucions amb activitat estàndard, segons es mostra a la Taula 5. Les reaccions poden variar per a materials d'enginyeria impurs en altres tipus de solucions.

SEMIRREACCIÓN	$E^{\circ}(V)$
$\text{Li}^+(ac) + e^- \rightarrow \text{Li}(s)$	-3.05
$\text{K}^+(ac) + e^- \rightarrow \text{K}(s)$	-2.93
$\text{Ba}^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Ba}(s)$	-2.90
$\text{Sr}^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Sr}(s)$	-2.89
$\text{Ca}^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Ca}(s)$	-2.87
$\text{Na}^+(ac) + e^- \rightarrow \text{Na}(s)$	-2.71
$\text{Mg}^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Mg}(s)$	-2.37
$\text{Be}^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Be}(s)$	-1.85
$\text{Al}^{3+}(ac) + 3e^- \rightarrow \text{Al}(s)$	-1.66
$\text{Mn}^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Mn}(s)$	-1.18
$2\text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightarrow \text{H}_2(g) + 2\text{OH}^-(ac)$	-0.83
$\text{Zn}^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Zn}(s)$	-0.76
$\text{Cr}^{3+}(ac) + 3e^- \rightarrow \text{Cr}(s)$	-0.74
$\text{Fe}^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Fe}(s)$	-0.44
$\text{Cd}^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Cd}(s)$	-0.40
$\text{PbSO}_4(s) + 2e^- \rightarrow \text{Pb}(s) + \text{SO}_4^{2-}(ac)$	-0.31
$\text{Co}^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Co}(s)$	-0.28
$\text{Ni}^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Ni}(s)$	-0.25
$\text{Sn}^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Sn}(s)$	-0.14
$\text{Pb}^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Pb}(s)$	-0.13
$2\text{H}^+(ac) + 2e^- \rightarrow \text{H}_2(g)$	0.00
$\text{Sn}^{4+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Sn}^{2+}(ac)$	+0.13
$\text{Cu}^{2+}(ac) + e^- \rightarrow \text{Cu}^+(ac)$	+0.15
$\text{SO}_4^{2-}(ac) + 4\text{H}^+(ac) + 2e^- \rightarrow \text{SO}_2(g) + 2\text{H}_2\text{O}$	+0.20
$\text{AgCl}(s) + e^- \rightarrow \text{Ag}(s) + \text{Cl}^-(ac)$	+0.22
$\text{Cu}^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Cu}(s)$	+0.34
$\text{O}_2(g) + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- \rightarrow 4\text{OH}^-(ac)$	+0.40
$\text{I}_2(s) + 2e^- \rightarrow 2\text{I}^-(ac)$	+0.53
$\text{MnO}_4^-(ac) + 2\text{H}_2\text{O} + 3e^- \rightarrow \text{MnO}_2(s) + 4\text{OH}^-(ac)$	+0.59
$\text{O}_2(g) + 2\text{H}^+(ac) + 2e^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2(ac)$	+0.68
$\text{Fe}^{3+}(ac) + e^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}(ac)$	+0.77
$\text{Ag}^+(ac) + e^- \rightarrow \text{Ag}(s)$	+0.80
$\text{Hg}_2^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow 2\text{Hg}(l)$	+0.85
$2\text{Hg}^{2+}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Hg}_2^{2+}(ac)$	+0.92
$\text{NO}_3^-(ac) + 4\text{H}^+(ac) + 3e^- \rightarrow \text{NO}(g) + 2\text{H}_2\text{O}$	+0.96
$\text{Br}_2(l) + 2e^- \rightarrow 2\text{Br}^-(ac)$	+1.07
$\text{O}_2(g) + 4\text{H}^+(ac) + 4e^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1.23
$\text{MnO}_2(s) + 4\text{H}^+(ac) + 2e^- \rightarrow \text{Mn}^{2+}(ac) + 2\text{H}_2\text{O}$	+1.23
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(ac) + 14\text{H}^+(ac) + 6e^- \rightarrow 2\text{Cr}^{3+}(ac) + 7\text{H}_2\text{O}$	+1.33
$\text{Cl}_2(g) + 2e^- \rightarrow 2\text{Cl}^-(ac)$	+1.36
$\text{Au}^{3+}(ac) + 3e^- \rightarrow \text{Au}(s)$	+1.50
$\text{MnO}_2(ac) + 8\text{H}^+(ac) + 5e^- \rightarrow \text{Mn}^{2+}(ac) + 4\text{H}_2\text{O}$	+1.51
$\text{Ce}^{4+}(ac) + e^- \rightarrow \text{Ce}^{3+}(ac)$	+1.61
$\text{PbO}_2(s) + 4\text{H}^+(ac) + \text{SO}_4^{2-}(ac) + 2e^- \rightarrow \text{PbSO}_4(s) + 2\text{H}_2\text{O}$	+1.70
$\text{H}_2\text{O}_2(ac) + 2\text{H}^+(ac) + 2e^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+1.77
$\text{Co}^{3+}(ac) + e^- \rightarrow \text{Co}^{2+}(ac)$	+1.82
$\text{O}_2(g) + 2\text{H}^+(ac) + 2e^- \rightarrow \text{O}_2(g) + \text{H}_2\text{O}(l)$	+2.07
$\text{F}_2(g) + 2e^- \rightarrow 2\text{F}^-(ac)$	+2.87

Figura 10: Potencials de reducció en condicions Standard [14].

### 1.3.10. Diagrames de Pourbaix

Els diagrames de Pourbaix són eines essencials per anticipar l'estabilitat de metalls i els productes de corrosió en entorns amb variacions de pH. El pH indica l'acidesa o l'alcalinitat d'una solució, on 7 és neutral, menys de 7 és àcid i més de 7 és alcalí. Aquests diagrames són particularment útils perquè:

- Prediuen l'Estabilitat de Substàncies: Permeten anticipar com canvia l'estabilitat de diferents substàncies en funció del pH i del potencial elèctric en un medi determinat.
- Consideren Potencial i pH: Tenen en compte tant el potencial electroquímic com el pH, dos factors crítics a les reaccions de corrosió i estabilitat dels metalls.
- Prediuen la Possibilitat de Corrosió: Faciliten la predicció de si un metall experimentarà corrosió en funció de les condicions específiques de pH i potencial.
- Prediuen la Composició de Productes de Corrosió: Ajuden a identificar els possibles productes de corrosió que es formaran en funció de les condicions de l'entorn, cosa que és essencial per comprendre i prevenir la corrosió.
- Avaluen l'efecte de canvis en pH o potencial: Permeten avaluar com canvis en el pH o el potencial poden influir en l'estabilitat dels metalls i els productes de corrosió. [15]

A continuació s'adjunta el diagrama de Pourbaix del ferro, que es un dels més utilitzats:

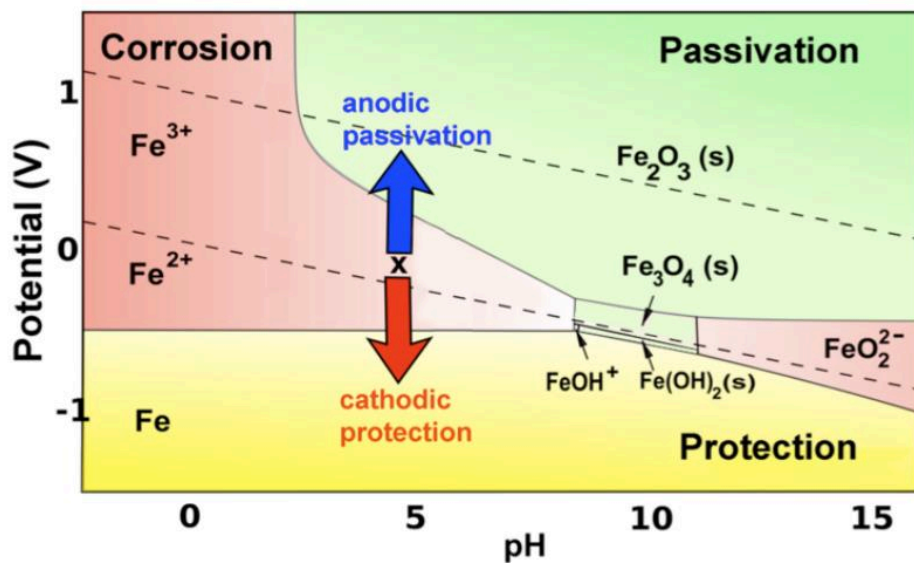


Figura 11: Diagrama de Pourbaix del Ferro [16].

Abans que s'assoleixi l'equilibri termodinàmic entre el metall i la solució, la concentració de metall dissolt és baixa, de l'ordre de  $10^{-6}$  àtoms-gram/litre, cosa que equival a aproximadament:

0.06 mg/L per a Fe, Cu, Zn,

0.03 mg/L per a Al,

0.02 mg/L per a Pb.

Aquestes línies d'indissolubilitat es visualitzen en els diagrames de pH-potencial i assenyalen les condicions en què la corrosió pot ocórrer. Al domini on la corrosió no és probable, es distingeixen dues regions:

- Immunitat: En aquesta regió, la forma sòlida estable és el propi metall, el que es coneix com a immunitat o protecció catòdica. El metall roman sense corroir-se, servint com una protecció efectiva.
- Passivació: En aquesta regió, la forma sòlida estable no és el metall, sinó un compost com un òxid, un hidròxid, un hidrur o una sal (procés de passivació). El metall tendeix a recobrir-se amb aquest compost, que pot formar una pel·lícula no porosa que evita el contacte directe del metall amb la solució (protecció perfecta) o pot crear un dipòsit porós que protegeix parcialment el metall en contacte amb la solució (protecció imperfecta). És important destacar que la capa de passivació es pot tornar inestable a causa de la fragilització per hidrogen. L'hidrogen atòmic, en ser extremadament petit, pot difondre's fàcilment en el material i dipositar-se a l'estructura reticular del metall, formant hidrogen molecular ( $H_2$ ). Aquest augment de volum associat genera una alta pressió interna, afectant l'estabilitat i la integritat de la capa de passivació.

Per tant, la passivació no garanteix l'absència total de corrosió; tot depèn de l'estabilitat i la resistència de la capa protectora formada.

### 1.3.11. Llei de Faraday

La cinètica, en el context de la corrosió, es centra en l'estudi de la velocitat dels processos químics responsables de la deterioració dels materials. En la pràctica, mesurar el flux de corrent (compost d'electrons) és una manera convenient d'avaluar les velocitats d'aquestes

reaccions electroquímiques corrosives. La densitat de corrent, que es mesura fàcilment, s'utilitza per calcular la pèrdua de material a causa de la corrosió. La Llei de Faraday estableix una relació quantitativa entre el flux de corrent i la quantitat de material corrosiu, expressada per la fórmula [17]:

$$W = \frac{M \cdot t \cdot I}{n \cdot F}$$

On:

W representa la quantitat de material que reacciona (g).

M és el pes atòmic del material que reacciona (g).

t és el temps d'exposició a la corrosió (s).

I és el flux de corrent (A).

n és el nombre d'electrons transferits, equivalent al nombre de moles transferits en la reacció.

F és la constant de Faraday, amb un valor d'aproximadament 96,500 Coulombs.

Aquesta equació permet calcular de manera precisa la pèrdua de material a causa de la corrosió en funció de la corrent elèctric aplicada i el temps d'exposició. És una eina fonamental en la comprensió i quantificació dels processos corrosius, proporcionant informació valuosa sobre la velocitat i extensió de la degradació del material.

### **1.3.12. Diagrames de Evans**

Els diagrames d'Evans són eines útils per comprendre el funcionament de les cel·les electroquímiques. En aquests diagrames, l'eix vertical representa el valor del potencial (E), mentre que l'eix horitzontal mostra el logaritme decimal de la intensitat de corrent (log I). Aquests diagrames ofereixen informació sobre com la polarització afecta el comportament de corrosió.[18]



La polarització, segons NACE International (2004), es refereix al canvi en el potencial a la superfície d'un metall a causa del flux de corrent. En una cel·la de corrosió, tant l'ànode com el càtode experimenten polarització en diversos graus. Aquest fenomen té un impacte significatiu en el flux de corrent a la cel·la i afecta de manera important la velocitat de corrosió de l'ànode. [54]

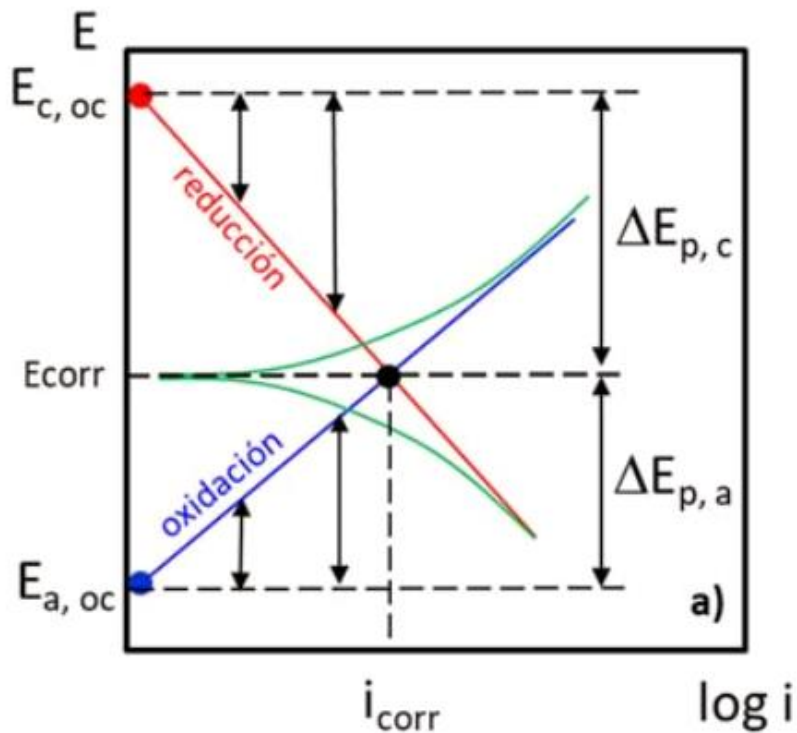


Figura 12: Diagrama d'Evans, la línia verda demostra la corba de polarització.[19]

Com la corrent flueix des de l'ànode, el potencial en aquest punt s'incrementa al incrementar-se el flux de corrent. El potencial del ànode es fa cada cop menys negatiu amb el flux. D'altra banda, la corrent també flueix per el càtode i també es polaritza al incrementar el flux de la corrent. El càtode es fa menys positiu. Aquest procés es pot veure en la figura 13.

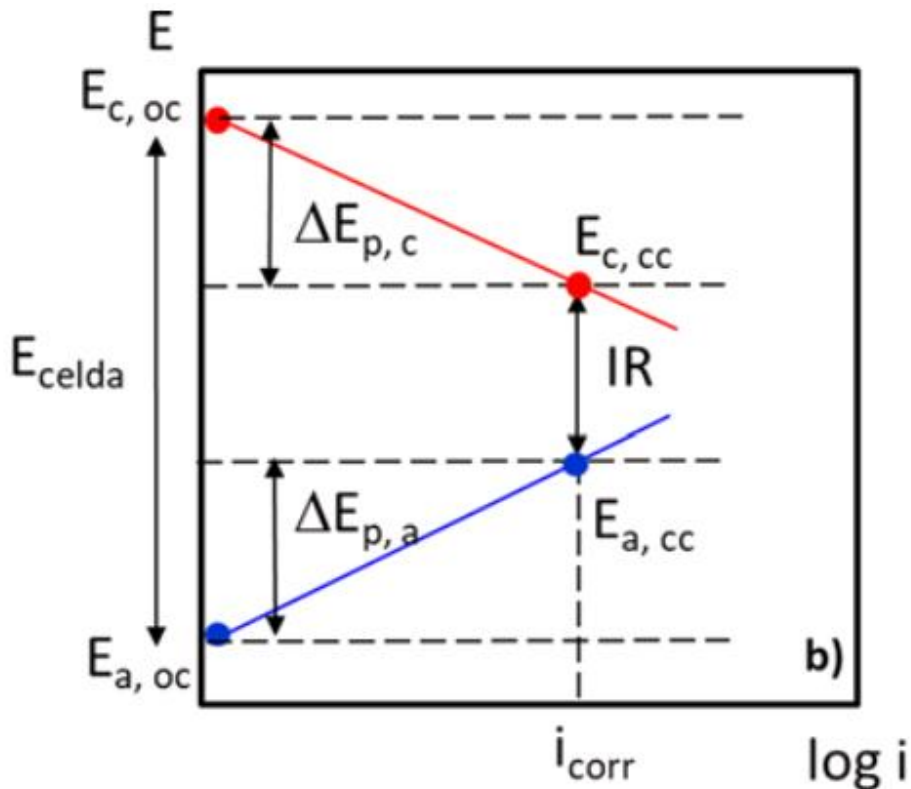


Figura 13: Diagrama d'Envans [19]

La polarització sempre passa en sentit contrari al flux de corrent que la genera. Quan connectem l'ànode i el càtode d'una cel·la de corrosió, s'hi estableix un flux de corrent entre ells. Aquest corrent provoca que el potencial de l'ànode s'acosti al del càtode, i alhora el potencial del càtode s'aproximi al de l'ànode. Al diagrama de polarització representat a la Figura 14, a mesura que la resistència en el camí electrònic i electrofílic tendeix a zero, la diferència de potencial entre els elèctrodes polaritzats també tendeix a zero, i tots dos elèctrodes assoleixen un potencial mixt estable. No obstant això, en la realitat, sempre hi haurà resistència als camins per on circula el corrent, per la qual cosa el potencial mixt estarà en algun punt entre els potencials polaritzats dels dos elèctrodes.

La diferència entre els polaritzats potencials de l'ànode i el càtode constitueix la força impulsora de la cel·la de corrosió. En aquesta condició d'estat estacionari, el corrent es defineix com el corrent de corrosió del sistema. [20]

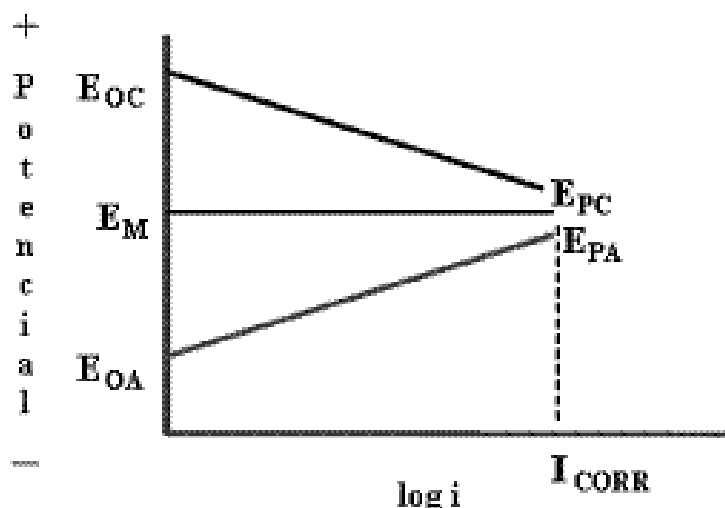


Figura 14: Cel·la de polarització mixta [20]. Font: Basic Corrosion Manual, NACE Internacional, 2004. [54]

### 1.3.13. Afecte de l'àrea en el diagrama d'Evans

En processos de corrosió, la força de la reacció està vinculada a la densitat de corrent, que es defineix com a corrent elèctric per unitat d'àrea ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ). En l'àmbit de la corrosió, aquesta mesura es fa servir per avaluar la intensitat d'una reacció electroquímica a una superfície específica. Quan es manté constant la intensitat de corrent en miliampers (mA), la reacció electroquímica resultant tindrà un impacte menys pronunciat en un elèctrode de grans dimensions en comparació amb un de més petit. Encara que la reacció total sigui la mateixa en ambdós casos, a l'elèctrode més petit, els efectes es concentren en una superfície menor (NACE International, 2004). [54]

En resum, la densitat de corrent no només reflecteix la quantitat total de corrent involucrat en una reacció de corrosió, sinó que també indica com aquest corrent es distribueix a la superfície de l'elèctrode. Aquesta comprensió és essencial per avaluar la magnitud i la localització dels efectes corrosius en diferents tipus de materials.

En el cas de la figura 15 l'increment en la polarització del càtode té un impacte substancial en la disminució del corrent de corrosió. Atès que l'àrea de l'ànode es manté constant, el corrent de corrosió es distribueix sobre la mateixa superfície de l'ànode. Com a resultat,

tant la quantitat total de material que reacciona com la corrosió en qualsevol punt específic disminueixen significativament.

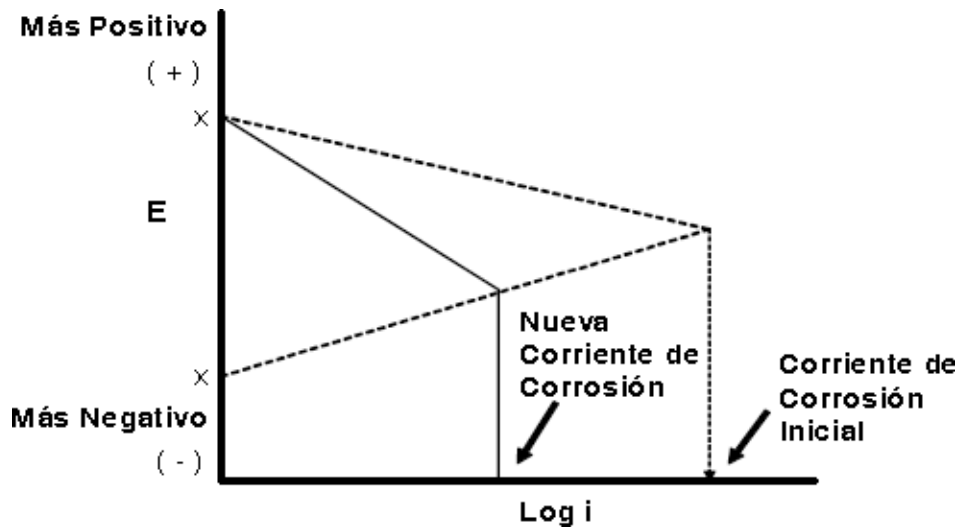


Figura 15: Afecte de l'àrea: Càtode més petit. Font: Basic Corrosion Manual, NACE Internacional, 2004. [54]

Per lo contrari, si disminuïm l'àrea de l'ànode mentre mantenim l'àrea del càtode constant, les implicacions són molt diferents. Com s'il·lustra a la figura 16, el corrent total també experimenta una reducció, però ara es concentra en un ànode més petit. Encara que la pèrdua total de material pot ser menor, aquesta disminució es focalitza en un ànode més petit, i les conseqüències per a la regió anòdica poden ser considerables.

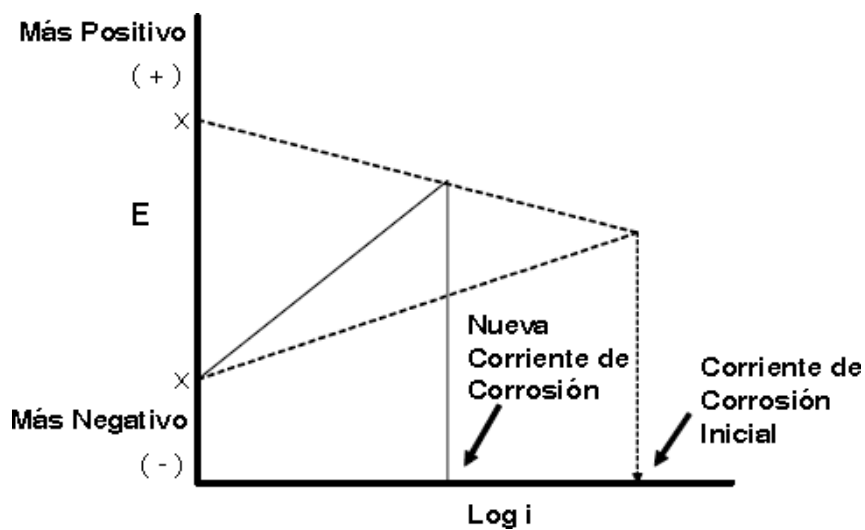


Figura 16: Afecte de l'àrea: Reducció de l'ànode. Font: Basic Corrosion Manual, NACE Internacional, 2004. [54]

### **1.3.14. Tipus de cel·les Electroquímiques**

En una cel·la electroquímica on hi hagi una diferència de potencial entre els dos elèctrodes i aquest estiguin connectats elèctricament, pot aparèixer algun tipus de de corrosió. En els apartats següents s'explicarà cada tipus.

#### **1.3.14.1. Corrosió Galvànica**

Succeeix quan hi ha una disparitat en la composició química entre dos metalls, i tots dos estan submergits en un líquid conductor o un ambient humit. Aquesta diferència de composició crea una disparitat de potencial elèctric que pot provocar corrosió.

#### **1.3.14.2. Corrosió per cel·les de concentració**

Es produeix quan diferents parts d'una superfície metàl·lica (o no metàl·lica) estan exposades a dissolucions amb concentracions diferents. Això pot resultar en el que es coneix com a corrosió per esquerdes, on àrees amb més concentració d'un agent corrosiu poden provocar una corrosió localitzada.

#### **1.3.14.3. Cel·la Activa/Passiva**

Es produeix quan una porció d'un metall està coberta per una pel·lícula de productes de corrosió que inhibeixen el procés corrosiu. La diferència de potencial entre la part del metall coberta i la descoberta pot donar lloc a una cel·la de corrosió. En la majoria dels casos, la part coberta actua com a càtode i la part descoberta com a ànode, cosa que pot generar una corrosió activa o passiva, depenent de les condicions.

Aquests fenòmens poden accelerar la corrosió localitzada, especialment quan la relació entre l'àrea de l'ànode i del càtode és petita, cosa que pot resultar en corrosió per picades o pitting.

#### 1.3.14.4. Corrosió Termo galvànica

La temperatura pot influir en els potencials de corrosió dels metalls. En general, un metall exposat a temperatures més altes tendeix a tenir un potencial més actiu, cosa que significa que es torna més propens a la corrosió. Aquest fenomen es coneix com a corrosió termogalvànica. Un exemple comú passa a les instal·lacions domèstiques de coure, on les canonades calenta i freda estan enterrades en concret. La canonada calenta, en estar a una temperatura més alta, es pot corroir més fàcilment a causa de la diferència de potencial amb la canonada freda.

Segons NACE Internacional (2004), diferents metalls mostren diferents canvis en el potencial pel que fa a la temperatura. En algunes situacions, com en aigües potables, el potencial del ferro es pot tornar més negatiu que el del zinc a mesura que la temperatura augmenta.

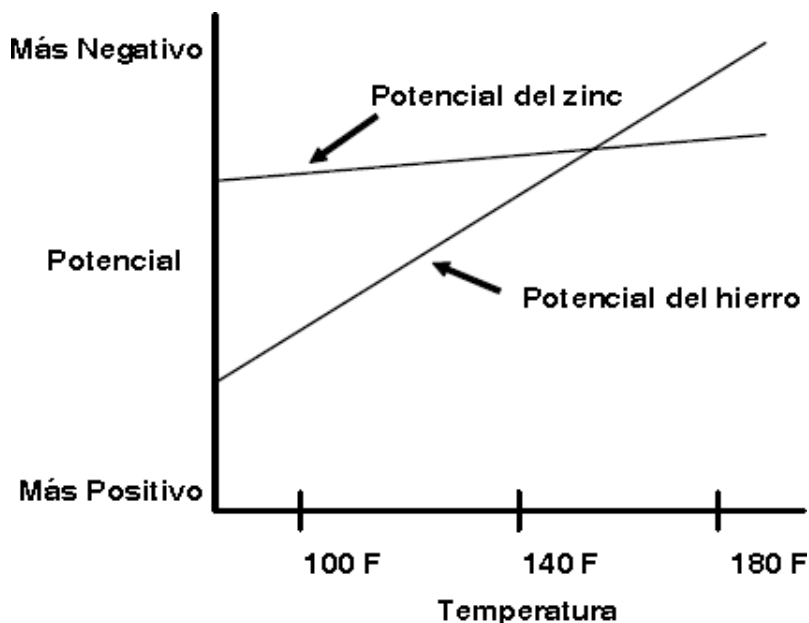


Figura 17: Canvis del Potencial degut a la temperatura. Font: Basic Corrosion Manual, NACE Internacional, 2004. [54]

Per exemple, a temperatures més baixes, el ferro actua com el càtode i corroirà el zinc, que actua com a ànode. No obstant això, al voltant dels 70°C, la situació s'inverteix i el

ferro es corroià preferentment, cosa que pot causar l'aparició d'aigua "vermella" a causa de la presència d'òxid de ferro a la corrosió dels tancs d'aigua, per exemple.

### 1.3.15. Passivitat

La passivitat és quan un metall desenvolupa una capa d'òxid que el protegeix de la corrosió. Per exemple, l'alumini, tot i ser molt propens a la corrosió, forma una capa prima d'òxid d'alumini que el protegeix a l'aire. Els acers inoxidable, que contenen crom, també desenvolupen una capa d'òxid que els protegeix.

El poder oxidant de l'entorn pot influir en la estabilitat d'aquesta capa protectora. Per exemple, en presència de certs químics oxidants, com ara l'àcid nítric, la capa protectora es torna més estable i la velocitat de corrosió disminueix. No obstant això, si el poder oxidant és massa fort, la capa protectora pot perdre la seva estabilitat, cosa que porta a un augment en la velocitat de corrosió, un fenomen conegut com a transpassivitat. En la figura que s'adjunta a continuació expressa el comportament d'un metall passiu respecte l'increment del poder oxidant d'un electròlit.

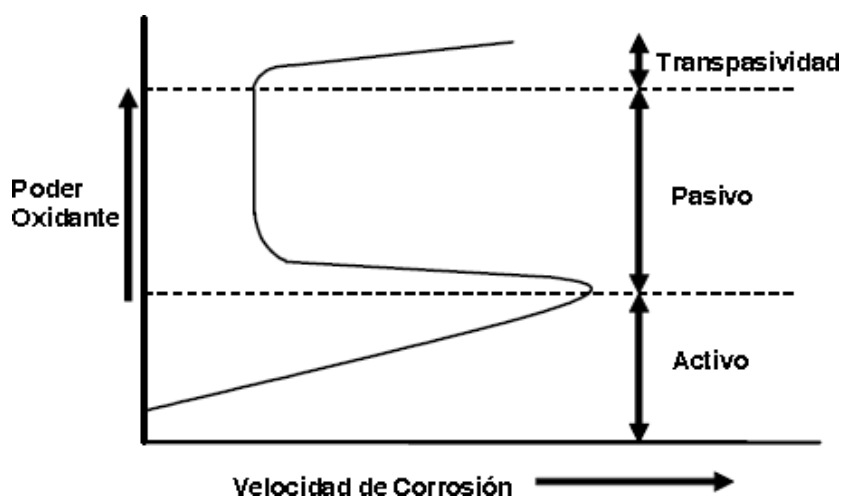


Figura 18: Passivitat . Font: Basic Corrosion Manual, NACE Internacional,2004. [54]

Es pot assolir una protecció similar aplicant un corrent elèctric per mantenir el metall en un estat passiu. Aquest és el principi darrere de la protecció anòdica, on el metall es fa més negatiu per prevenir la corrosió.

## **1.4. TIPUS D'AMBIENT**

En aquest apartat s'exploren els diferents tipus d'entorns que cal considerar en dissenyar mesures de protecció contra la corrosió. Comprendre l'entorn on es troba una estructura ens permet identificar els factors que contribueixen a la corrosió i determinar les millors estratègies per prevenir-la.

Els ambients corrosius es poden classificar típicament en quatre categories principals: atmosfèric, subterrani, líquid i alta temperatura. Cadascun d'aquests entorns presenta característiques úniques que poden variar amb el temps i que tenen un impacte significatiu en la corrosió dels materials.

És important tenir en compte que, en molts casos, els materials poden estar exposats a més d'un tipus d'ambient corrosiu alhora. Per exemple, un vaixell ha de resistir tant la corrosió de l'aigua marina com la corrosió atmosfèrica degut a la seva exposició constant al medi ambient marí i a l'aire circumdant.

### **1.4.1. Corrosió Atmosfèrica**

En aquest apartat s'exploren els diferents tipus d'entorns que cal considerar en dissenyar mesures de protecció contra la corrosió. Comprendre l'entorn on es troba una estructura ens permet identificar els factors que contribueixen a la corrosió i determinar les millors estratègies per prevenir-la.

Els ambients corrosius es poden classificar típicament en quatre categories principals: atmosfèric, subterrani, líquid i alta temperatura. Cadascun d'aquests entorns presenta característiques úniques que poden variar amb el temps i que tenen un impacte significatiu en la corrosió dels materials.

La corrosió atmosfèrica es produeix en entorns on l'aire conté substàncies diferents, a més de nitrogen i oxigen. Aquestes substàncies poden ser sòlides, líquides o gasoses, i contribueixen a la corrosió dels materials exposats.

Sòlids: La presència de sòlids com ara la sal en ambients marins pot accelerar la corrosió dels materials.



Líquids: L'aigua és el líquid més rellevant a la corrosió atmosfèrica. La humitat i la pluja poden augmentar la velocitat de corrosió en mantenir les superfícies humides durant períodes perllongats.

Gasos: Gasos com els òxids de sofre presents a la pluja àcida poden augmentar l'agressivitat corrosiva de l'ambient.

Tot i que la temperatura pot afavorir la corrosió, les altes temperatures poden assecar les superfícies, reduint així el temps d'exposició a l'aigua i disminuint la corrosió en alguns casos.

#### ***1.4.1.1. Atmosferes Industrials***

Els entorns industrials solen contenir alts nivells de gasos corrosius com a diòxid de sofre i òxids de nitrogen, cosa que crea un ambient corrosiu sever.

#### ***1.4.1.2. Atmosferes Marines***

Les atmosferes marines contenen alts nivells de clorurs i altres sals del mar, que es poden transportar cap a l'interior a través de l'esprai de l'aigua. Aquestes sals, especialment el clorur de sodi, són altament corrosives i poden generar productes de corrosió que no protegeixen adequadament les superfícies.

### **1.4.2. Corrosió subterrània**

La corrosió subterrània ocorre quan les estructures estan enterrades a terra, que pot variar considerablement en composició i característiques físiques al llarg de grans distàncies i estacions de l'any.

#### ***1.4.2.1. Característiques físiques del terra***

Les propietats físiques del sòl, com la mida de gra i la distribució de la humitat i l'aireig, n'afecten la cursivitat. Sòls amb una distribució heterogènia de mida de gra poden crear cel·les de corrosió i tornar-se corrosius, especialment si no estan ben controlats o emplenats adequadament.

#### **1.4.2.2. Característiques químiques del terra**

Els sòls tenen una àmplia gamma de propietats químiques importants, com ara el pH i la presència de sals solubles en aigua. El pH del sòl pot influir en la corrosió de diferents materials, i és una alcalinitat moderada més agressiva per a l'alumini que per a l'acer o el formigó.

Les sals presents a terra, especialment en presència d'humitat, tenen dos efectes importants. Primer, poden proporcionar ions corrosius que participen en reaccions de corrosió o afecten la formació de capes protectores a les superfícies soterrades. Segon, augmenten la conductivitat elèctrica del sòl, cosa que pot augmentar la seva cursivitat. Els clorurs i sulfats són particularment nocius a causa de les seves interaccions químiques directes.

#### **1.4.2.3. Concentració de la humitat**

La quantitat d'humitat present a terra afecta la mobilitat dels ions i, per tant, està estretament relacionada amb la conductivitat elèctrica. La humitat pot variar des de condicions àrides amb baix contingut d'humitat fins a saturació en àrees aquàtiques. La humitat és crucial per a la corrosió, ja que proporciona l'electròlit necessari i afecta la conductivitat del terra. Fins i tot en ambients àrids, sol haver-hi suficient humitat a la superfície del sòl per influir en la corrosió.

#### **1.4.2.4. Resistivitat elèctrica del medi**

La resistivitat elèctrica del terra és una mesura important de la seva corrosivitat, ja que indica la resistència que ofereix al flux de corrent. Un terra amb alta resistivitat s'oposa més al flux de corrent i, per tant, pot ser menys corrosiu. Aquesta resistivitat es mesura en ohms per metre ( $\Omega \times m$ ) i és una propietat del material del terra. La majoria dels enginyers en corrosió utilitzen la resistivitat per descriure les propietats elèctriques del medi ambient corrosiu.

#### **1.4.2.5. Concentració d'oxigen**

La quantitat d'oxigen present a terra influeix en la velocitat de corrosió de diversos materials. Una quantitat més gran d'oxigen, o una millor ventilació, tendeix a augmentar la corrosió en acers. Tot i això, una baixa ventilació pot provocar corrosió accelerada en

alguns materials, com els acers inoxidable. En condicions anaeròbiques (sense oxigen), el sòl es pot tornar més agressiu a causa de l'activitat de bacteris anaeròbics.

#### **1.4.2.6. Bactèries**

Els bacteris són comuns a la majoria dels sòls i el seu impacte en la corrosió pot ser significatiu. Mentre que la majoria dels bacteris en condicions aeròbiques no són perjudicials, els bacteris anaeròbics poden produir subproductes químics que afavoreixen la corrosió. Alguns bacteris fins i tot poden participar directament en el procés de corrosió. Per exemple, els bacteris sulfato reductors poden generar sulfurs que corroeixen ràpidament l'acer.

#### **1.4.3. Immersió en líquids**

La immersió en líquids presenta una àmplia gamma d'ambients corrosius, des d'aigua natural i tractada fins a aigua de mar i fluids químicament agressius. L'aigua de mar, amb el contingut de sals i la baixa resistivitat, és especialment corrosiva. A més, l'activitat biològica a l'aigua, incloent organismes grans i microscòpics, pot accelerar la corrosió en formar dipòsits a les superfícies submergides.

##### **1.4.3.1. pH**

El pH del líquid és un factor crucial en la capacitat corrosiva. Conèixer el pH del medi en què es troba una estructura és important, ja que pot determinar el grau d'exposició a la corrosió. Un pH més baix (àcid) tendeix a ser més corrosiu, mentre que un pH més alt (alcalí) pot ser menys corrosiu per a certs materials.

##### **1.4.3.2. Configuració física del sistema**

La manera com està estructurat físicament un sistema pot influir en diversos aspectes relacionats amb la corrosió:

- Flux del sistema: El flux pot ser laminar (ordenat) o turbulent (caòtic). La turbulència del flux tendeix a afavorir la corrosió.
- Exposició de superfícies: Les superfícies poden estar exposades tant a líquids com a vapors.

- Drenatge de tancs i recipients: Alguns recipients es poden dissenyar per drenar completament, mentre que altres no.

#### **1.4.3.3. Velocitat de flux**

La velocitat del flux pot afectar la corrosió de dues maneres:

- Un augment en la velocitat del flux pot incrementar la disponibilitat de substàncies que participen a la corrosió, com l'oxigen.
- Altes velocitats de flux poden remoure capes protectores de productes de corrosió, exposant el metall a la corrosió.

#### **1.4.3.4. Temperatura**

L'efecte de la temperatura a la corrosió de líquids és complex:

- Increments de temperatura solen augmentar les velocitats de corrosió a causa d'una velocitat de difusió d'ions més gran.
- La temperatura també pot afectar la solubilitat de compostos al líquid.

#### **1.4.3.5. Pressió**

La pressió en si té poc efecte directe a la corrosió, però pot influir en la solubilitat de gasos en els líquids.

#### **1.4.3.6. Organismes biològics**

Els microorganismes poden influir en la corrosió de dues maneres principals. Primer, poden produir compostos que corroeixen o consumir substàncies que protegeixen contra la corrosió. Segon, poden formar una capa prima però resistent a les superfícies metàl·liques submergides, alterant el transport de materials i augmentant la velocitat de corrosió. Aquesta forma de corrosió, coneguda com a corrosió influenciada microbiològicament (MIC), ocorre on hi ha condicions adequades per al creixement de microorganismes, especialment en àrees amb flux lent o estàtic. Això pot causar una corrosió molt més ràpida del que s'esperava sota condicions normals d'operació.

## 1.5. MATERIALS EN ENGINYERIA

A continuació, es descriuran els materials més comunament emprats en enginyeria en termes de la seva capacitat per a la protecció catòdica. S'analitzaran detalladament aquells materials que formen part del sistema sota consideració:

- Acers al carboni-manganès i acers de baix aliatge
- Foses
- Acers inoxidable i les seves variants.
- Aliatges que contenen cobri
- Aliatges que contenen níquel
- Aliatges d'alumini
- Titani
- Aliatges de zinc
- Formigó
- Plàstics
- Elastòmers

No s'estudiarà específicament la resistència a la corrosió dels materials polimèrics i els compostos. No obstant això, s'esmentaran els recobriments més utilitzats en la protecció catòdica en l'última part de l'apartat, a causa de la seva rellevància en aquest context.

### 1.5.1. Acers al carboni-manganès i acers de baix aliatge

Els acers amb baix contingut de carboni, generalment amb menys del 0.25% de carboni, són comunament utilitzats en diverses aplicacions a causa de les seves característiques particulars. A causa del seu baix contingut de carboni, aquests acers tenen una trempabilitat limitada, cosa que significa que no s'endureixen fàcilment amb tractaments tèrmics, per la qual cosa sovint s'utilitzen processos de conformació mecànica en fred per a augmentar la seva duresa. La microestructura d'aquests acers sol estar composta principalment per ferrita, la qual cosa els fa coneguts com a acers fèrrics. Aquesta composició els atorga una bona ductilitat i tenacitat, encara que la seva resistència mecànica pot ser menor en comparació amb altres tipus d'acers. A més, són fàcils de mecanitzar i soldar, i el seu cost és relativament baix. Aquests acers són àmpliament

utilitzats en la indústria automotriu per a la fabricació de components de carrosseries i en la construcció per a elements estructurals i armadures de formigó. Per aquesta raó, també se'ls coneix com a acers de construcció, acers suaus o acers dolços. A continuació s'adjunta una taula on es pot observar les propietats d'aquest tipus d'acers:

Acer	Resistència a la tracció(MPa)	Límit elàstic(MPa)	Ductilitat (%)
1010	325	180	28
ASTM A106 Gr B	415	240	16,5
A516Grado 70	485	260	21

Taula 6: Propietats mecàniques d'acers amb baix contingut de carboni.

### 1.5.1.1. Naturalesa de la corrosió metàl·lica

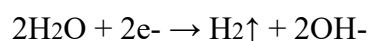
Quan un metall es corroeix en contacte amb un electròlit, els cations apareixen en l'aigua i la corresponent càrrega es forma en el metall:



Així, el corrent correspon a un flux de corrent elèctric des del metall cap a l'electròlit a causa del moviment dels cations en l'electròlit i dels electrons en el metall. Tota superfície cap a la qual circuli el corrent des del metall fins a l'aigua es denomina superfície anòdica i la reacció com a reacció anòdica. Els ions metàl·lics poden reaccionar amb ions negatius en l'electròlit per a donar productes de corrosió insolubles (per exemple, rovell en el cas de l'acer). Aquestes reaccions no afecten materialment el procés de corrosió excepte que els productes de corrosió insolubles impedeixen altres atacs de corrosió.

Perquè es produeixi la reacció de corrosió s'han de mantenir la neutralitat elèctrica total. En conseqüència, el moviment d'electrons en el metall i d'ions positius en l'electròlit sobre les zones anòdiques s'ha d'equilibrar mitjançant el consum d'electrons en altres zones, denominades zones catòdiques.

En les zones catòdiques es poden produir diverses reaccions, conegudes com a reaccions catòdiques. Les reaccions més comunes que es produeixen en els càtodes són:



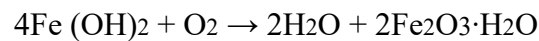
La primera d'aquestes reaccions es produeix en presència d'oxigen dissolt i en condicions de gairebé neutralitat. La segona reacció és afavorida per l'acidesa (excés d'ions hidronis) mentre que la tercera és dominant per a valors de pH superiors al valor neutre (alcalins).

En condicions airejades de gairebé neutralitat, els cations  $\text{Fe}^{2+}$  que es produeixen en l'ànode reaccionen amb els ions hidroxils que es formen en el càtode i produeixen hidròxid de ferro (II):

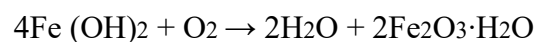
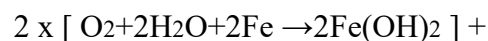
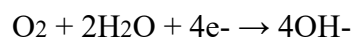


L'hidròxid de ferro (II) és oxidat fàcilment per l'oxigen dissolt per a formar òxid de ferro

(III) hidratat  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ :

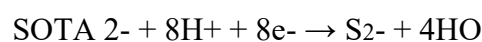


Per això, la reacció global que es desenvolupa en diverses etapes intermèdies es pot expressar mitjançant la reacció següent:

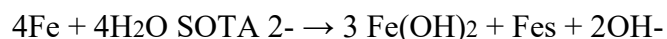


En la pràctica, la velocitat de corrosió es determina normalment per la velocitat a la qual es pot assegurar la reacció catòdica

En un mitjà anaeròbic saturat d'aigua i gairebé neutre (Norma UNE-EN-12473, 2014), els bacteris sulfat reductores poden donar lloc a una altra mena de reacció catòdica en la corrosió del ferro i de l'acer. Aquests bacteris redueixen els sulfats dissolts a sulfurs mitjançant la següent reacció:



i la reacció es caracteritza pel fet que es produeix en absència d'aire i quan hi ha sulfurs presents en els productes de corrosió. A partir de la descomposició dels productes realment formats, és probable que el mecanisme de corrosió impliqui una despolarització catòdica, que es pot representar per la reacció simplificada:



La reacció catòdica depèn del fet que els bacteris posseeixin un enzim (hidrogenasa) que permet oxidar l'hidrogen que es troben en les zones catòdiques. Els ions de sulfur produïts per la reducció de sulfats, a vegades poden estimular el procés anòdic de dissolució de ferro.

Segons la norma UNE-EN 12473 (2014), per a l'acer en aigua de mar, el procés anòdic es produeix més fàcilment que la reacció catòdica, però està limitat per la velocitat de la reacció catòdica. Això depèn essencialment de la velocitat d'arribada de l'oxigen a la superfície del metall, que al seu torn depèn de la seva concentració dissolt en l'aigua de mar i de la velocitat de circulació de l'aigua

#### ***1.5.1.2. Criteris del potencial per a la protecció catòdica***

Quan l'acer al carboni està exposat a l'aigua de mar, polaritzar-lo a un potencial de -0.8 V o més negatiu respecte a un elèctrode de referència redueix la velocitat de corrosió a un nivell acceptable. No obstant això, si l'acer està en contacte amb aigua o llocs que contenen bacteris sulfat reductores, el potencial necessari per a evitar la corrosió microbiana ha de ser de -0.90 V. En condicions d'alta temperatura en la superfície de l'acer i de l'electròlit pròxim, es recomana un potencial de protecció de -0.90 V. Entre 40 i 60 °C, aquest potencial ha d'estar entre -0.80 V i -0.90 V.

És important mantenir el potencial dins d'uns certs límits per a evitar efectes adversos, com la formació de butllofes o el despreniment catòdic dels revestiments, que poden afeblir l'estructura de l'acer. Per a acers amb un límit d'elasticitat baix de fins a 550 N/mm<sup>2</sup>, es recomana un potencial de protecció de -1.10 V, aconseguit mitjançant ànodes de sacrifici de zinc o alumini. Per a acers amb un límit d'elasticitat més alt, el rang de potencial recomanat és de -0.83 V a -0.95 V. A continuació a la Taula 7 es mostren els criteris de potencial per alguns materials:



Material	Potencial negatiu mínim (V)	Potencial negatiu màxim (V)
Acers al carboni-manganès i acers de baix aliatge amb SMYS igual o inferior a 550 N/mm <sup>2</sup>	-0,8	-1,10
Temperatura del acer > 60°C	-0,9	-1,10
Acers d'alta resistència SMYS igual o inferior a 550 N/mm <sup>2</sup>	-0,8	-0,83 a -0,95 (anar a la nota de peu <sup>a</sup> )
Aliatges de Alumini	-0,8	-1,10
Acers austenítics o aliatges a base de níquel que continguin crom i/o molibdè	-0,30	Cap límit si es completament austenític (anar a la nota de peu <sup>c</sup> )
- PREN ≥ 40	-0,5 (anar a la nota de peu <sup>b</sup> )	Cap límit si es completament austenític(anar a la nota de peu <sup>c</sup> )
- PREN < 40		
Acers inoxidable martensítics	-0,5 (anar a la nota de peu <sup>b</sup> )	-0,5 (anar a la nota de peu <sup>c</sup> )
Aliatges de coure amb alumini	-0,45 a -0,60	Sense límit
Aliatges de coure sense alumini	-0,45 a -0,60	-1,10
Aliatges de níquel-coure	-0,50	Anar a la nota al peu <sup>d</sup>

a El límit del potencial negatiu s'hauria de determinar mitjançant assajos sobre acer d'alta resistència per a condicions metal·lúrgiques i mecàniques específiques.

b Per a la majoria d'aplicacions aquests potencials són adequats per a assegurar la protecció contra la corrosió en esquerdes, encara que es poden considerar potencials més positius si s'aporta la documentació necessària.

c Depenent de l'estructura metal·lúrgica aquests aliatges poden ser susceptibles de fissuració sota esforç en presència d'hidrogen (HSC), i per això s'haurien d'evitar potencials que són molt negatius.

d Els aliatges de níquel-coure d'alta resistència poden ser sensibles a la HSC, i per tant s'haurien d'evitar els potencials amb els quals es produeix un despreniment important d'hidrogen.

Taula 7: Criteris de potencial per a la protecció catòdica d'alguns materials en aigua de mar. FONT: Norma UNE-EN 12473:2014

Els acers al carboni tenen diversos avantatges importants. En primer lloc, són econòmics i es troben fàcilment en diferents formes i grandàries, la qual cosa els fa molt accessibles per a una àmplia gamma d'aplicacions. A més, poden sotmetre's a tractaments tèrmics per a ajustar les seves propietats mecàniques segons les necessitats específiques de cada aplicació, aconseguint així una combinació òptima de resistència i ductilitat.

Una dels grans avantatges dels acers al carboni és la seva soldabilitat, tant en entorns de taller com en camp, la qual cosa facilita el seu ús en diversos projectes de construcció i fabricació. En termes de resistència a la corrosió, els acers al carboni solen comportar-se de manera similar en la majoria dels entorns, encara que la resistència pot variar lleugerament depenent del contingut de carboni i el mitjà químic específic. Per exemple, tenen una excel·lent resistència a la corrosió en àcid sulfúric concentrat.

Quant a les seves propietats mecàniques, la resistència a la tensió dels acers al carboni generalment varia entre 275 i 1,400 MPa. No obstant això, és important tenir en compte que són susceptibles a diversos tipus de corrosió sota tensió, com la corrosió per esforç causada per càustics, amoníac, nitrats, cianurs, bicarbonats i altres substàncies corrosives. També poden experimentar esquerdament induït per hidrogen (HIC) i esquerdament en metall líquid (LME) en uns certs entorns.

A més, els acers al carboni no són molt resistents a l'erosió-corrosió en ambients on estan exposats a processos de corrosió, com en aigua potable i aigua de mar. Per tant, és important considerar aquests factors en seleccionar el tipus d'acer per a una aplicació específica.

### **1.5.2. Foses**

Les foses són aliatges de ferro amb un contingut de carboni que oscil·la entre el 2.11% i el 6.67%. A causa d'aquesta alta concentració de carboni, les foses tenen una proporció significativa de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Durant el procés de refredament, la cementita es descompon en ferrita ( $\alpha$ ) i grafit (100% de carboni). La formació de grafit depèn de la composició de la fosa i de la rapidesa amb la qual es refreda. La presència de silici en la composició i un refredament lent afavoreixen la formació de grafit. La microestructura d'una fosa està determinada per la seva composició química i qualsevol tractament tèrmic aplicat. Hi ha quatre tipus principals de foses: gris, dúctil, blanca i mal·leable.

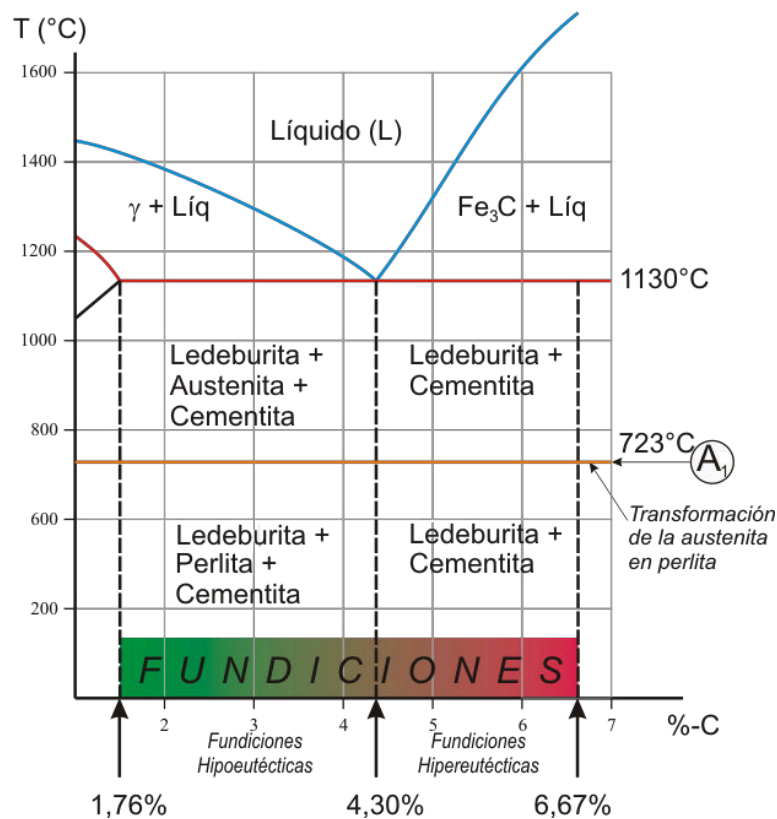


Figura 19: Diagrama ferro carboni: Separació dels acers i foses. [21]

### 1.5.2.1. Tipus de foses

**Fosa grisa:** En aquesta mena de fosa, el grafit es presenta en forma d'escates o làmines disperses en una matriu de ferrita o perlita. Són relativament fràgils i tenen una resistència a la tracció limitada. No obstant això, són soldables.

**Fosa mal·leable:** Aquestes foses contenen grafit en forma de rosetes o grups, la qual cosa les fa considerablement més resistents i dúctils en comparació amb la fosa grisa.

**Fosa blanca:** Quan la fosa es refreda ràpidament, el carboni es converteix en cementita en lloc de grafit, la qual cosa dona lloc a la formació de fosa blanca. Aquest tipus de fosa és més dura però també més fràgil, evidenciada per les seves fractures de color blanc.

**Fosa dúctil:** En aquesta mena de fosa, el grafit es presenta en forma de nòduls o esferoides, la qual cosa li confereix una alta ductilitat. Són àmpliament utilitzades en la

fabricació de canonades per a sistemes de proveïment d'aigua a causa de la seva capacitat per a resistir deformacions sense fracturar-se.

**Fosa d'alt contingut de silici:** Aquestes foses, amb un contingut de silici superior al 14%, són fràgils però altament resistents a la corrosió en una varietat d'entorns. Algunes d'aquestes foses també poden contenir crom, la qual cosa augmenta encara més la seva resistència a la corrosió. Són comunament utilitzades en sistemes de protecció catòdica, com a ànodes de sacrifici, a causa de la seva resistència a la corrosió.

**Fosa aliada:** Aquestes foses han estat desenvolupades per a brindar una major protecció contra la corrosió i per a funcionar en condicions d'alta temperatura. L'addició de coure millora la seva resistència a l'àcid sulfúric i a la corrosió atmosfèrica. Les foses aliades amb níquel i crom són especialment resistents a la corrosió en una varietat d'entorns. A més, són altament dúctils i resistents a l'erosió, la qual cosa les fa ideals per a aplicacions com a cossos de bombes i turbines.

### **1.5.3. Acers inoxidable**

Els acers inoxidable són una categoria d'acers aliats dissenyats específicament per a resistir la corrosió en una varietat d'entorns. La seva resistència a la corrosió s'aconsegueix principalment mitjançant la formació d'una capa d'òxid de crom en la seva superfície, que actua com una barrera protectora en molts mitjans corrosius.

Aquests acers es classifiquen segons la seva microestructura en austenítics, fèrrics, martensítics i dúplexs. En general, contenen un alt contingut de crom, generalment almenys del 12%, la qual cosa els permet formar aquesta capa protectora. Els austenítics, dúplexs i martensítics són els més comuns en aplicacions marines i submarines.

La resistència a la corrosió dels acers inoxidable en aigua de mar pot veure's afectada per factors com el pH, la temperatura i el contingut d'oxigen. Per a determinar la resistència a la corrosió per picades i en esquerdes, s'utilitza el concepte d'equivalent de resistència a la corrosió per picades (PREN), on valors superiors a 40 indiquen una bona resistència a aquests tipus de corrosió en aigua de mar a temperatura ambient.

Els acers inoxidable dúplexs, que contenen una mescla de ferrita i austenita en la seva microestructura, són particularment adequats per a aplicacions marines a causa de la seva combinació de resistència a la corrosió i propietats mecàniques superiors. En general, tenen un contingut de crom del 22% i un contingut de níquel del 5%. No obstant això,

poden ser susceptibles a la corrosió en esquerdes a temperatures elevades, per la qual cosa sovint se'ls aplica protecció catòdica.

És important assegurar que els acers inoxidables dúplexs estiguin polaritzats elèctricament juntament amb altres materials en contacte, com l'acer al carboni, per a evitar la formació de parells galvànics que podrien provocar corrosió. A més, la microestructura dels acers inoxidables dúplexs pot influir en la seva resposta a la protecció catòdica, ja que les fases fèrrica i martensítica poden tornar-se fràgils en condicions d'alta polarització.

#### **1.5.3.1. Acers inoxidables austenítics**

Els acers inoxidables són coneguts per la seva excel·lent resistència a la corrosió en una varietat d'ambients, inclosos els neutres, líquids oxidants i atmosfèrics. Aquesta resistència es veu millorada per la presència de molibdè, que ajuda especialment en entorns amb clorurs. Aquests acers poden endurir-se mitjançant treball en fred i no requereixen tractament tèrmic addicional.

La soldabilitat dels acers inoxidables és destacable, encara que el procés de soldadura pot influir en la seva resistència a la corrosió, ja que una soldadura inadequada pot portar a la desaleació. A més, són fàcils de formar i transformar, la qual cosa els fa versàtils en aplicacions de fabricació.

Un altre avantatge és la seva capacitat per a funcionar en temperatures extremes i resistir l'oxidació química. Són capaços de suportar altes temperatures i, sovint, són utilitzats en aplicacions que requereixen resistència tèrmica. A més, són no magnètics, la qual cosa pot ser beneficiós en unes certes aplicacions.

Malgrat els seus nombrosos avantatges, els acers inoxidables són susceptibles a la corrosió intergranular, cosa que significa que poden experimentar corrosió al llarg dels límits de gra del material. No obstant això, en general, mostren una bona resistència a l'erosió-corrosió, la qual cosa els fa adequats per a una àmplia gamma d'aplicacions industrials i comercials.

Hi ha dos tipus:

- SÈRIE 300 AISI.- Aliatges cromo-níquel (17-25% Cr i 9-10% Ni). L'addició de molibdè millora la resistència a corrosió en ambients que contenen clorurs, tal com l'aigua de mar.
- SÈRIE 200 AISI.- Aliatges cromo-manganès-nitrogen. El manganès és substituït en part per Níquel degut a la seva influència estabilitzadora en la capa passiva.

### *1.5.3.2. Acers inoxidable dúplex*

Els acers inoxidable dúplex són aliatges que tenen una estructura metal·lúrgica composta per una mescla de ferrita i austenita. Aquests aliatges, que contenen crom, níquel i molibdè, presenten una sèrie de característiques importants, segons NACE International: [54]

- Tenen una resistència a la corrosió igual o lleugerament superior a la dels acers austenítics en molts entorns.
- Són magnètics.
- Posseeixen el doble de resistència mecànica que els acers austenítics i mantenen una bona ductilitat.
- No poden ser endurits mitjançant tractaments tèrmics.
- Presenten una bona soldabilitat.
- L'estructura dúplex millora la resistència a la corrosió sota tensió en ambients amb clorurs.
- S'utilitzen comunament en tancs, recipients i canonades, especialment en la producció de petroli i gas, així com en la indústria química per a bescanviadors de calor i canonades de procés.
- Generalment, mostren una bona resistència a l'erosió-corrosió.

Aquests acers dúplex tenen un contingut de crom d'entre 18% i 26% i de níquel de 4.5% a 6.5%. L'addició d'elements com el nitrogen, molibdè, coure, silici i tungstè els confereix unes certes característiques de resistència a la corrosió.

Per a garantir la seva resistència, és important que aquests acers tinguin una microestructura adequada, amb un equilibri adequat de fases, especialment un mínim del 40% d'austenita. Les soldadures i les zones afectades tèrmicament són àrees d'atenció particular, ja que poden presentar desfavorables microestructures.

Quant a la protecció catòdica, s'estableix que el potencial de disseny ha de ser no més negatiu de -0,80 V (mesurat respecte a l'elèctrode de referència Ag/AgCl/aigua de mar), encara que en uns certs casos es pot requerir un límit de potencial menys negatiu per a minimitzar el risc de fragilització per hidrogen.

#### **1.5.3.3. Acers inoxidable martensítics**

Els acers martensítics són una subdivisió dels acers inoxidable que contenen principalment crom i carboni. Aquests acers són part de la sèrie AISI 400 (American Iron & Steel Institute) i tenen unes certes característiques distintives:

- Tenen una resistència moderada a la corrosió.
- Poden ser endurits mitjançant tractament tèrmic, la qual cosa els permet aconseguir alts nivells de resistència mecànica i duresa.
- Són magnètics a causa de la seva composició.
- A causa del seu alt contingut de carboni i la seva duresa inherent, tenen una soldabilitat limitada.
- Són susceptibles a la corrosió sota tensió en solucions càustiques.
- S'utilitzen en diverses aplicacions, com a parts de vàlvules i coixinets, instruments quirúrgics i ganiveteria.
- En general, mostren una bona resistència a l'erosió-corrosió.
- Aquests acers contenen entre un 10.5% i un 18% de crom, i un alt contingut de carboni que pot arribar fins a un 1.2%.

Quant a la seva protecció contra la corrosió, s'ha de tenir en compte que si el potencial de disseny de l'estructura és més negatiu de -0.80 V (mesurat respecte a l'elèctrode de referència Ag/AgCl/aigua de mar), existeix un risc significatiu de corrosió sota tensió. Per tant, es requereix una avaluació especial que consideri els esforços i les deformacions per a minimitzar aquest risc, segons el que s'estableix per la Norma ISO 15589-2, 2014.

#### **1.5.3.4. Acers inoxidable Fèrrics**

Els acers inoxidable fèrrics, part de la sèrie AISI 400, tenen les següents característiques:

- Tenen una resistència a la corrosió que varia de moderada a bona, i aquesta augmenta amb un major contingut de crom i alguns aliatges de molibdè.

- S'endureixen moderadament mitjançant treball en fred i no poden ser endurits per tractament tèrmic.
- Són magnètics i la seva soldabilitat és limitada.
- En general, se sotmeten a un tractament de recuita per a millorar la seva ductilitat i resistència a la corrosió.
- A causa de la seva baixa duresa, s'utilitzen principalment en processos de format en fred.
- Són susceptibles a la corrosió sota tensió en solucions càustiques.
- En general, mostren una bona resistència a l'erosió-corrosió.

#### **1.5.3.5. Acers inoxidable endurits per precipitació**

Els acers inoxidable endurits per precipitació, pertanyents a la sèrie AISI 600, són aliatges de ferro, crom i níquel que es caracteritzen per la seva resistència mecànica obtinguda a través de l'enduriment per tractament tèrmic d'envelliment. Les seves característiques són:

- Poden ser tractats tèrmicament per a augmentar la seva resistència mecànica o per processos d'envelliment sense necessitat de refredament des d'alta temperatura.
- Tenen una resistència a la tensió de fins a 1350 MPa i són magnètics.
- La seva resistència a la corrosió és generalment inferior als graus austenítics, però superior als graus martensítics i fèrrics.
- S'utilitzen àmpliament en aplicacions que requereixen alta resistència mecànica i moderada resistència a la corrosió en ambients mitjanament agressius, com en la indústria aeroespacial.
- Són susceptibles a la corrosió sota tensió per clorurs a alts nivells d'esforç.
- En general, mostren una bona resistència a l'erosió-corrosió.

#### **1.5.4. Aliatges amb base de coure**

El coure i els seus aliatges tenen moltes aplicacions en les estructures marines, des d'accessoris fins a xapats resistents a la corrosió, així com en components hidràulics. Aquests materials són comunament utilitzats en petits components submarins i en sistemes de segellament hermètic.



Quan es trien adequadament, el coure i els seus aliatges tenen una excel·lent resistència a la corrosió. La presència de petites quantitats d'ions de coure en l'aigua de mar evita que els organismes marins s'adhereixin o creixin en les superfícies d'aquests materials.

En general, no es necessita protecció catòdica per a prevenir la corrosió en el coure o els seus aliatges. No obstant això, els components de coure que estan units a estructures d'acer protegides catòlicament rebran protecció, la qual cosa pot afectar la capacitat del coure per a repel·lir el creixement d'organismes marins. Això és important perquè l'acumulació d'aquests organismes pot augmentar considerablement el pes i reduir la resistència a l'avanç. Segons les normatives, els aliatges de coure utilitzades per a protegir estructures de coure o de ferro/aliatge poden requerir una protecció addicional, especialment quan la superfície de coure està lliure d'òxids. No obstant això, quan la velocitat de corrosió està controlada únicament per la reducció de l'oxigen dissolt, la densitat de corrent no superarà un límit necessari per a aquesta reducció.

De manera general, els aliatges de coure tenen les següents característiques:

Els aliatges de coure són resistents a la corrosió en ambients aquosos a causa de la seva posició en la sèrie de força electromotriu.

Poden corroir-se en presència d'oxidants com a àcid nítric o oxigen.

- Formen capes passives en solucions aquoses que poden reduir la corrosió, però aquestes capes poden dissoldre's en condicions d'alta velocitat de flux, fent que siguin susceptibles a l'erosió-corrosió.
- Són atacades per CO<sub>2</sub>, àcids, clorurs o sulfurs en solucions aquoses.
- En ambients atmosfèrics formen una patina protectora que redueix la velocitat de corrosió, però pot ser inhibida per compostos de sofre en atmosferes industrials o clorurs en atmosferes marines.
- No són resistents a mitjans amb amoníac i són susceptibles a la corrosió sota tensió en presència d'amoníac, diòxid de sofre i àcid nítric.
- S'utilitzen àmpliament en diverses aplicacions, com a canonades d'aigua, bombes, vàlvules, bescanviadors de calor, serralleria, filat, sostres, tancs i recipients.
- Generalment mostren bona resistència a l'erosió-corrosió, però són susceptibles a la corrosió intergranular en mitjans amb amines o amoníac.

### 1.5.5. Aliatges d'alumini

L'alumini és àmpliament utilitzat en aplicacions on el pes és crucial a causa de la seva lleugeresa. Forma una capa prima d'òxid d'alumini en ambients mitjanament corrosius, la qual cosa ho protegeix de la corrosió. Aquesta capa d'òxid és estable en ambients neutres i àcids oxidants, però inestable en àcids reductors, ambients alcalins i en presència de clorurs. Pot ser tractat químicament per a fer créixer artificialment la capa d'òxid, en un procés anomenat anoditzat. No obstant això, és susceptible a la corrosió sota tensió i a la corrosió intergranular, especialment en presència d'humitat i clorurs. L'alumini comercial està aliat amb altres elements com a coure, magnesi, manganès, silici, níquel, ferro i titani. Els aliatges d'alumini poden ser tractades tèrmicament per a endurir-les i es classifiquen en sèries segons el seu principal element aliant i la seva capacitat d'enduriment per precipitació.

Sèrie	Elements de l'aliatge	¿Es pot tractar tèrmicament?	Resistència a la corrosió
1000	Cap	No	Excel·lent
2000	Cu	Sí	Suficient
3000	Si/Mn/Cu/Mg	La majoria sí	Bona
4000	Si	No	Bona/Suficient
5000	Mg	No	Excel·lent/Bona
6000	Mg, Si	Sí	Bona
7000	Zn	Sí	Suficient

Taula 8: Aliatges d'alumini. Font: NACE, Basic Corrosion Manual, 2004. [54]

### 1.5.6. Aliatges de Magnesi

El magnesi, igual que l'alumini, té una temperatura de fusió relativament baixa (651 °C), la qual cosa pot restringir el seu ús en algunes aplicacions. Encara que el magnesi mostra resistència química en ambients inerts, tendeix a ser vulnerable a la corrosió, particularment en entorns marins. Per aquesta raó, s'utilitza comunament en la fabricació d'ànodes de sacrifici per a protegir altres metalls de la corrosió.

### 1.5.7. Titani

El titani i els seus aliatges, encara que relativament recents en la seva aplicació, estan guanyant terreny degut a les seves propietats favorables. El titani pur té una baixa densitat, alt punt de fusió i és resistent i mal·leable, la qual cosa ho fa fàcil de treballar. No obstant això, la seva reactivitat química amb altres materials a altes temperatures requereix tècniques de producció costoses. A temperatura ambient, el titani exhibeix una alta

resistència a la corrosió, sent especialment resistent en ambients marins i amb clorurs. Encara que forma una capa de passivació protectora, pot corroir-se en ambients amb àcids forts. La selecció d'aliatges de titani ha de considerar els requisits de servei i les propietats específiques de cada aliatge.

#### **1.5.8. Aliatges amb base de Zinc**

El zinc és un metall blanc-blavós molt susceptible a la corrosió per humitat. S'usa en la galvanització d'acers, en la fabricació de pintures i en la producció de llautons. En combinar-se amb coure i alumini, forma aliatges que són fàcils de modelar a causa del seu baix punt de fusió i la seva compatibilitat amb els gresols d'acer. Aquests aliatges són comuns en peces d'automòbils. El principal ús del zinc és per a recobrir l'acer mitjançant la galvanització en calenta, un procés on les peces d'acer se submergeixen en zinc líquid. A més, les pintures anticorrosives sovint contenen zinc. Encara que tenen una bona resistència a la corrosió atmosfèrica, els ànodes de sacrifici de zinc no són adequats per a temperatures superiors a 60 °C en protecció catòdica en aigua de mar.

#### **1.5.9. Formigó Armat**

El formigó és una mescla econòmica de pedra (grava) i sorra unides amb ciment i aigua. És important que la proporció de grava i sorra sigui major que la del ciment, que és més costós. Els components clau són l'aigua, el ciment Portland i els agregats. Els agregats es divideixen en fins (sorres) i gruixos (graves). La sorra s'obté de la desintegració natural de roques o triturant-les. Es classifica segons la seva grandària, amb sorra fina (0.25 mm - 1 mm), sorra mitjana (1 mm - 2.5 mm) i sorra gruixuda (2.5 mm - 4.75 mm). La grava, com a agregat gruixut, s'afegeix al formigó. La geometria de la grava afecta a la resistència: la triturada proporciona més resistència que l'arrodonida a causa de la seva major adherència. No obstant això, una angulositat excessiva pot requerir més aigua i dificultar la mescla. El ciment Portland, utilitzat per a unir els agregats, es produeix escalfant minerals naturals a alta temperatura.

Segons el Manual Bàsic de Corrosió de NACE (2004), encara que el formigó en si mateix no es corroeix, pot degradar-se a causa de diversos processos mecànics i químics. El congelament i descongelament, especialment quan s'afegeixen anticongelants, poden danyar els agregats i el ciment. L'exposició a agents químics agressius, com a sulfats i ambients àcids, també pot provocar deterioració en expandir la pasta de ciment i causar

tensions. L'abradió causada pel trànsit continu i les partícules transportades per l'aigua pot afeblir el formigó, especialment quan es combina amb l'exposició a productes químics. La corrosió de l'acer embegut en el formigó és un altre problema, ja que la corrosió de l'acer pot causar fissuració i despreniment del formigó, permetent una ràpida penetració dels corrosius en l'acer. En resum, encara que el formigó no es corroeixi directament, està subjecte a deterioració per factors com el congelament, l'exposició a productes químics agressius, l'abradió i la corrosió de l'acer embegut. [54]

### **1.5.10. Polímers i plàstics**

Els plàstics són compostos orgànics que contenen carboni, juntament amb hidrogen, oxigen i altres elements en la seva composició. Majorment, són polímers, cosa que significa que estan formats per llargues cadenes d'unitats repetides. A diferència dels metalls, l'estructura dels quals és regular i tridimensional, la disposició de les molècules en els polímers és menys regular, la qual cosa afecta les seves propietats. Els plàstics tendeixen a ser més flexibles que els metalls, però també tenen una resistència a la tensió menor.

#### **1.5.10.1. Tipus**

**Termoplàstics:** Aquests polímers no presenten enllaços transversals, per la qual cosa es deformen fàcilment en elevar la temperatura. Estan formats per macromolècules lineals de gran longitud, que poden presentar també alguna part amb ramificacions. Aquests polímers es poden fondre en aplicar-los calor i tornar a modelar tantes vegades com es desitgi (reciclables), ja que no ocorren canvis químics en deformar-los per calor. Malgrat això, se sap que a mesura que són reciclats, aquests materials van disminuint les seves propietats físiques, perdent amb això la seva utilitat. Alguns exemples són: ABS, acrílics, nilons, policarbonats, polietilè, polipropilè, poliestirè, vinils, polièster, etc.

**Termoestables:** Aquests polímers sí que presenten enllaços transversals, per la qual cosa no es deformen en aplicar-los calor, sinó que mantenen una forma permanent. Solen ser resines que durant la seva fabricació experimenten un canvi químic basat en la formació d'enllaços transversals que afavoreixen que el polímer mantingui una geometria específica. A causa d'aquests enllaços transversals, no són reciclables. Alguns exemples són: epoxis, fenòlics, polièsters, silicones, poliimides, melamines, etc.

Cada tipus de plàstic té aplicacions específiques en funció de les seves propietats físiques i químiques. Per exemple, l'ABS s'utilitza en canonades i parts automotrius a causa de la seva resistència a l'impacte, el niló s'empra en engranatges i aïllaments a causa de la seva alta resistència i baixa fricció, i el PVC s'usa en canonades d'aigua a causa de la seva resistència a àcids i àlcalis. A més, els plàstics varien en la seva resistència a la corrosió, la temperatura i els productes químics, la qual cosa els fa adequats per a diverses aplicacions industrials i domèstiques.

En termes de resistència a la corrosió, alguns plàstics com el sulfur de polifenol són altament resistents, mentre que uns altres com el PVC són susceptibles a uns certs solvents. Quant a la temperatura, els plàstics termoestables com els epòxids poden suportar altes temperatures sense perdre les seves propietats, mentre que els termoplàstics com el niló poden sofrir deformacions amb la calor. La selecció del tipus de plàstic adequat per a una aplicació particular depèn de diversos factors, inclosos els requeriments de resistència mecànica, resistència química, temperatura d'operació i durabilitat.

#### **1.5.11. Elastòmers**

Els elastòmers són polímers que es caracteritzen per la seva alta elasticitat, la qual cosa els permet deformar-se considerablement sota l'aplicació de forces i després recuperar la seva forma original quan cessa la força externa. L'hule natural i els hules sintètics són exemples comuns d'elastòmers àmpliament utilitzats en diverses aplicacions a causa de les seves propietats específiques.

L'hule natural, derivat principalment del làtex dels arbres d'hule, és bàsicament un polímer de isoprens. Mitjançant un procés anomenat vulcanització, que implica l'addició de sofre i calor, l'hule natural es torna més dur i menys fràgil, la qual cosa millora les seves propietats per a unes certes aplicacions.

D'altra banda, els hules sintètics, com el neoprè i el nitril, han estat desenvolupats amb diverses formulacions per a oferir propietats específiques, com a duresa, elongació, resistència a la tensió, elasticitat, resistència a la temperatura i resistència a ambients químics específics. Per exemple, el neoprè i el nitril són coneguts per la seva bona

resistència a olis i solvents, mentre que l'hule butílic és notablement impermeable als gasos i té una millor resistència a ambients oxidants que altres elastòmers.

En general, els elastòmers exhibeixen una bona resistència a l'erosió, amb els elastòmers més tous mostrant típicament una major resistència que els més durs. Aquestes propietats fan que els elastòmers siguin àmpliament utilitzats en una varietat d'aplicacions industrials i comercials on es requereix flexibilitat, resistència química i resistència al desgast. [22]

## **1.6. FORMAS DE CORROSIÓ**

En aquest apartat s'exploraran les diverses formes de corrosió segons la classificació de NACE, juntament amb els mecanismes específics que les causen, les velocitats de deterioració i les estratègies per a controlar-les. És crucial comprendre els mecanismes subjacents darrere de cada tipus de corrosió per a implementar mesures de control efectives. La corrosió és un fenomen complex que rares vegades es manifesta de manera única, sinó que pot presentar-se de múltiples formes simultàniament. Per tant, és fonamental abordar la corrosió de manera integral i considerar-la en totes les etapes, des del disseny inicial de les estructures o sistemes. Desafortunadament, en molts projectes industrials, les consideracions de control pressupostari sovint releguen el disseny contra la corrosió a un segon pla, la qual cosa pot resultar en la necessitat d'aplicar mesures correctives addicionals més endavant per a esmenar deficiències. [54]

### **1.6.1. Corrosió uniforme**

#### **Definició:**

La corrosió uniforme és un tipus de deterioració generalitzada que afecta de manera uniforme a tota l'àrea exposada del material, sense una corrosió localitzada notable. En materials amb forma plana, es manifesta com una pèrdua de gruix uniforme, mentre que en materials amb forma cilíndrica, la corrosió avança radialment cap a l'interior, reduint el diàmetre. Aquesta forma de corrosió sol ser el resultat de la selecció inadequada de materials en entorns corrosius, la qual cosa pot provocar una deterioració severa i uniforme del material.

#### **Reconeixement:**

Per a reconèixer la corrosió uniforme, s'observa una aspror general en la superfície del material, sovint acompanyada per la presència evident de productes de corrosió. No obstant això, en alguns casos, aquests productes poden no ser visibles a causa de la seva solubilitat o a l'acció de forces externes com el vent o la pluja.



Figura 20: Corrosió en el ferro.[23]

### Com es produeix:

El mecanisme de corrosió uniforme implica un procés electroquímic que es duu a terme en la superfície del metall. Petites diferències en la composició o orientació d'àrees microscòpiques del metall creen ànodes i càtodes, que experimenten canvis en el seu potencial elèctric respecte a l'àrea circumdant. Això condueix a la corrosió uniforme, que avança de manera més o menys uniforme al llarg de tota la superfície del material.

**Velocitat de corrosió:** La velocitat de corrosió pot dependre del material i del ambient en el que aquest estigui sotmès, per lo tant pot ser lineal, creixent o decreixent amb el temps.

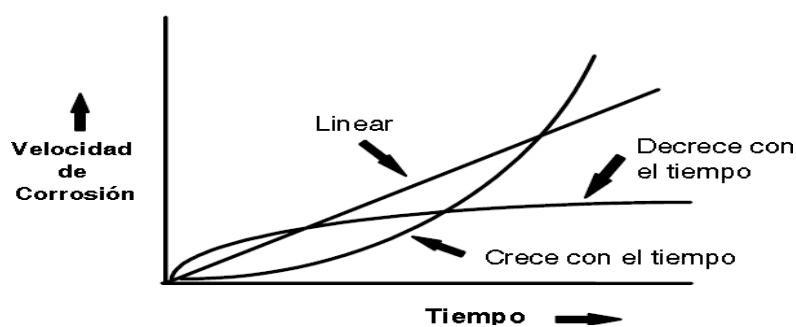


Figura 21: Velocitat de corrosió en funció del temps. Font: *Forms of Corrosion NACE International*, 1982. [54]

**Com es Mesura:**

La predicció de la corrosió és efectiva quan les velocitats de corrosió segueixen una tendència lineal o disminueixen amb el temps. Per a mesurar la corrosió, s'utilitzen diverses mètriques, com la penetració per unitat de temps, expressada comunament en mil·límetres per any. En general, es mesura mitjançant la pèrdua de pes del material, encara que també és possible realitzar mesuraments directes de la secció transversal per a avaluar el gruix del material afectat per la corrosió. Aquestes mesures proporcionen informació valuosa per a avaluar la taxa i l'impacte de la corrosió en els materials.

**Control de la corrosió uniforme:**

Quan la corrosió uniforme ocorre a velocitats baixes, sovint és tolerable i no requereix mesures de control immediates. No obstant això, és important considerar aquesta corrosió des de les primeres etapes de disseny, establint toleràncies per a la pèrdua anticipada de gruix. D'altra banda, quan la velocitat de corrosió és alta, és necessari prendre mesures correctives tant en el disseny inicial com en etapes posteriors, fins i tot durant la construcció. Aquestes mesures poden implicar canvis en la selecció de materials, ajustos en el disseny, o la implementació de mesures de protecció addicionals, com l'ús d'inhibidors químics, desgasificadors, deshumidificadors, recobriments protectors o sistemes de protecció catòdica.

**1.6.2. Corrosió Localitzada**

La corrosió localitzada, al contrari de la corrosió uniforme, representa un major risc potencial, a causa de la seva difícil detecció ja que es manifesta en zones específiques en el material, determinades tant per la naturalesa del material, la geometria d'aquest, i les condicions del mitjà al qual se sotmet (D.A. Jones, 1982). [44]

Trobem tres tipus de corrosió localitzada: la corrosió per picades ("pitting"), corrosió per esquerdes i corrosió Filiforme.



### 1.6.2.1. Corrosió per picades

#### **Definició:**

La corrosió per picades és un fenomen localitzat que es caracteritza per la formació de petites i profundes cavitats en la superfície d'un material, mentre que l'àrea circumdant roman poc o gens corroïda. Aquest tipus de corrosió sol iniciar-se en defectes o imperfeccions en la capa passiva protectora del material, com a esquerdes, esgarrapades o discontinuïtats en el recobriment.



*Figura 22: Picadura en canonada metàl·lica.[24]*

#### **Com es produeix:**

El mecanisme de la corrosió per picades implica la formació d'una cel·la electroquímica a l'interior d'aquestes imperfeccions, on s'acumulen sals corrosives. Això crea un ànode a l'interior de la picada i un càtode en les superfícies circumdants, la qual cosa condueix a una ràpida corrosió en la zona anòdica, formant les cavitats.

La importància pràctica de les picades depèn del gruix del material i de la velocitat de penetració de la corrosió. En seccions primes, les picades poden ser especialment preocupants, mentre que en seccions més gruixudes el seu impacte pot ser menor. No obstant això, la velocitat de penetració tendeix a disminuir amb el temps, especialment si hi ha múltiples picades presents.

#### **Control de la corrosió per picades:**

El control de la corrosió per picades pot implicar la selecció de materials més resistents, la modificació de l'entorn per a reduir la cursivitat, l'ús de recobriments protectors o

tècniques electroquímiques com la protecció catòdica. A més, és important mantenir les superfícies netes i lliures d'imperficcions per a prevenir la formació de picades.

### 1.6.2.2. Corrosió per esquerdes

La corrosió per esquerdes és un tipus d'atac localitzat que ocorre en àrees on l'accés al medi ambient circumdant està restringit, com en esquerdes, juntes o esquerdes. Aquest tipus de corrosió es deu a diferències en la concentració de materials dins i fora de l'esquerda, la qual cosa genera cel·les de concentració i promou la corrosió.

Les esquerdes poden formar-se en unions entre metalls, entre metall i no metall, o baix dipòsits de deixalles o productes de corrosió. La corrosió per esquerdes es manifesta principalment en l'entrada o dins de la pròpia esquerda, i sovint no és evident fins que es produeix una falla en el material.

A continuació s'explicaran els dos mecanismes bàsics que causen la corrosió per esquerdes.

#### 1.6.2.2.1. Corrosió per aeració diferencial

La corrosió per esquerdes ocorre en àrees estretes on la concentració d'oxigen és significativament menor que en la resta del sistema. Aquesta falta d'oxigen fa que aquestes àrees actuïn com a ànodes, iniciant el procés corrosiu, mentre que les zones més riques en oxigen actuen com a càtodes. L'absència d'oxigen en unes certes parts del metall

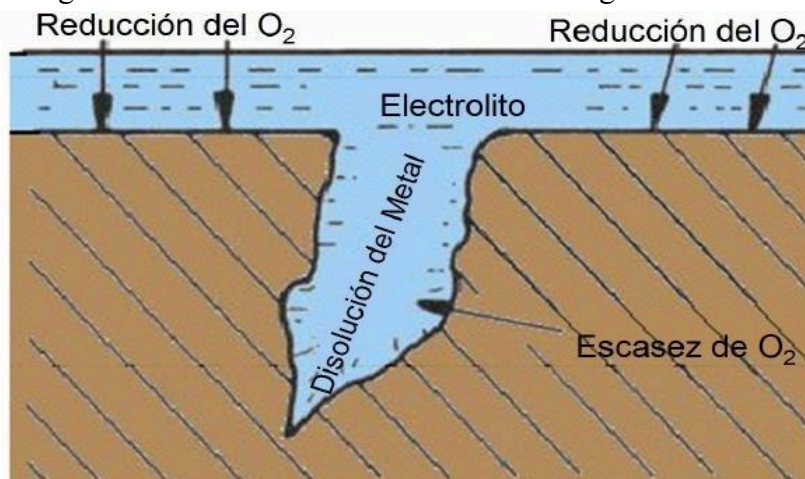


Figura 23: Atac corrosiu per aeració diferencial. Font: : Lapuente Aragón - 2008 (Universidad de Alicante).

conduïx a un atac localitzat del material, especialment en les àrees on hi ha escassetat d'oxigen.

### 1.6.2.2.2. Celles de corrosió per concentració de ions metàl·lics

En una cel·la de concentració d'ions metàl·lics, la diferència de potencial entre l'interior i l'exterior de l'esquerda es deu a una disparitat en la concentració d'aquests ions. La superfície en contacte amb una alta concentració d'ions metàl·lics té un potencial més positiu que la superfície en contacte amb una baixa concentració. En termes d'una cel·la electroquímica, la superfície amb el potencial més positiu actua com el càtode. En aquesta mena de corrosió, la zona de l'esquerda exposada a la major concentració d'ions metàl·lics actua com el càtode en comparació amb l'àrea fora de l'esquerda. En general, la corrosió es concentra en l'entrada de l'esquerda.

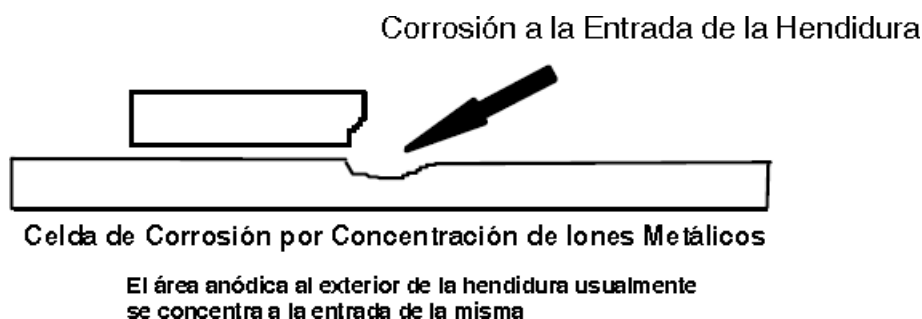


Figura 24: Corrosió per concentració d'ions metàl·lics. Font: (NACE, Basic Corrosion Manual, 2004)

Una corrosió localitzada, d'aparença similar a corrosió per esquerdes, es pot produir a causa de l'accés restringit de solucions corrosives a unes certes àrees de la superfície. Per exemple, en estructures exposades a l'atmosfera, les superfícies dins d'una esquerda poden estar subjectes a considerables períodes de mullat que altres superfícies pròximes menys exposades, les quals tendeixen a assecar-se més fàcilment. El mecanisme d'aquest atac no és per cel·les de corrosió per concentració; l'atac succeeix principalment per diferències en temps de mullat.

#### **Control de la corrosió per esquerdes:**

La selecció adequada de materials, juntament amb un disseny que minimitzi la presència d'esquerdes, són mesures fonamentals per a prevenir i reduir la corrosió sota aquesta mena de condicions. A més, la implementació de tècniques de protecció catòdica, encara que el seu mecanisme exacte no estigui completament comprès, ha demostrat ser efectiva per a controlar la corrosió per picades. En fer que el potencial extern a l'esquerda sigui més

negatiu, es redueix la diferència de potencial entre l'interior i l'exterior, i la generació d'alcalinitat en les superfícies protegides pot contrarestar l'efecte corrosiu de les sals hidrolitzades presents dins de l'esquerda.

### 1.6.2.3. Corrosió filiforme o en forma de fil

La corrosió filiforme es presenta en ambients d'alta humitat (>60%) sobre materials amb recobriments orgànics (pintures), els quals en ser ratllats, s'indueix el desenvolupament de la corrosió, que es propaga com a filaments primos (Revie i Uhlig, 2008). El mecanisme d'aquesta mena de corrosió és similar al de corrosió per esquerdes en què és impulsat per la diferència de potencial entre el front d'avanç i l'àrea darrere del front. El cap del filament d'avanç (aprox. 0,1 mm d'ample) és anòdica, amb un baix pH i falta d'oxigen, comparat amb l'àrea catòdica immediatament enrere del cap (on hi ha oxigen disponible per mitjà d'una capa o pel·lícula semipermeable).[45]

Aquest tipus de corrosió es produeix particularment en superfícies pintades; pel que pot prevenir-se mitjançant una bona neteja i preparació apropiada de la superfície metàl·lica, abans de l'aplicació del recobriment òptim en superfície ja seca (D.A. Jones, 1982).[44]



Figura 25: Exemples de corrosió filiforme o en forma de fil. [25][26].

### 1.6.3. Corrosió Galvànica

La corrosió galvànica es produeix quan diferents metalls estan en contacte elèctric i exposats a un mitjà conductor, com un líquid o una solució. En aquest procés, un dels metalls actua com a ànode i es corroià més ràpidament, mentre que l'altre metall actua com a càtode i la seva corrosió disminueix. Això es deu a les diferències en els potencials electroquímics dels metalls involucrats. La corrosió galvànica pot ocórrer no sols entre metalls diferents, sinó també entre un metall i un material no metàl·lic conductor. Es reconeix per un augment en la corrosió del metall anòdic i una disminució en la corrosió del metall catòdic.



*Figura 26: Exemples de Corrosió Galvànica. [27]*

#### **Com es produeix:**

El mecanisme de corrosió Galvànica es dut a terme a partir de quatre elements principals que es poden observar a la figura següent:



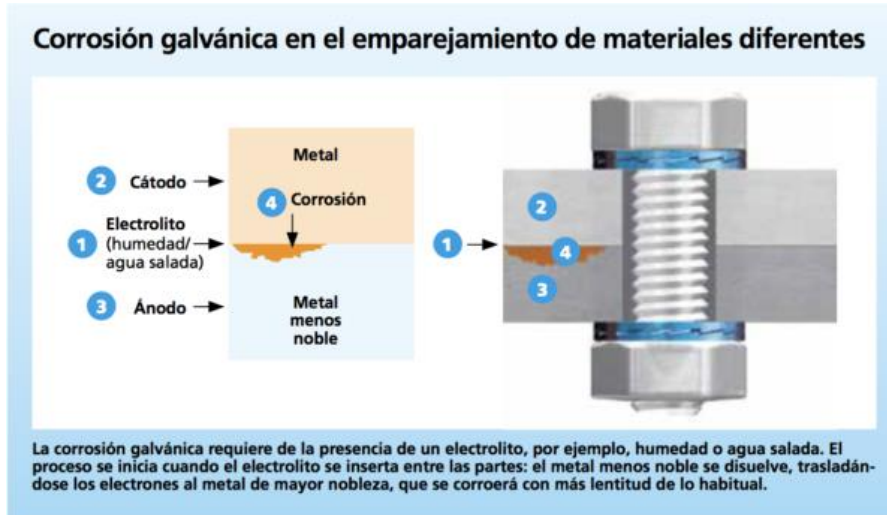


Figura 27: Exemple de corrosió galvànica a partir de dos materials diferents. [28]

### Velocitat de corrosió:

La corrosió galvànica és un tipus de corrosió accelerada que ocorre quan metalls o aliatges diferents estan en contacte elèctric i exposats a un electròlit. Això crea una cel·la electroquímica on el metall amb menor potencial electroquímic es corroeix. Diversos factors influeixen en aquest procés, incloent-hi la diferència de potencial entre els metalls, les condicions de l'entorn, el comportament de polarització dels materials, els efectes espacials i la resistivitat de l'electròlit. Aquests factors poden afectar la velocitat i la intensitat de la corrosió galvànica.

### Polarització:

Quan una reacció electroquímica s'alenteix, es diu que està polaritzada. Això pot succeir a causa de diferents factors, depenent dels metalls i electròlits involucrats. La polarització pot ser per activació o per concentració.

### Polarització per activació:

La polarització per activació es refereix als factors que alenteixen la reacció inherents a aquesta, com la velocitat a la qual els ions hidrogen es redueixen a gas hidrogen. Això depèn de la velocitat de transport de l'electró a l'ió hidrogen en la superfície metàl·lica, la concentració d'ions hidrogen i la temperatura del sistema.

### Polarització per concentració:

D'altra banda, la polarització per concentració ocorre quan hi ha canvis en la concentració en la solució prop de la superfície metàl·lica. Si la reacció ocorre molt ràpid i la concentració d'ions hidrogen en la solució és baixa, la regió prop de la superfície metàl·lica pot quedar-se sense ions hidrogen, la qual cosa alenteix la reacció.

### Control de la corrosió galvànica:

Disseny: S'ha d'evitar relacions d'àrees desfavorables. En unions reblades, caragolades o un altre tipus d'unions, utilitzar materials destinats a mantenir-se en contacte que siguin de la mateixa naturalesa o prou pròxims entre si en la sèrie galvànica.

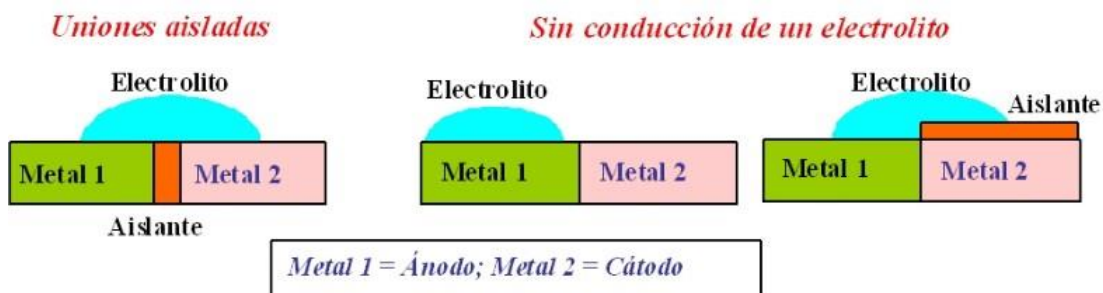


Figura 28: Disseny per evitar corrosió galvànica. [29]

Per a evitar la corrosió galvànica en connexions de metalls diferents, és important segellar les esquerdes, ja sigui soldant-les o utilitzant massilles aïllants. En unions roscades, es poden emprar juntes aïllants per a aïllar elèctricament les parts metàl·liques i les pròpies unions. A més, és crucial seleccionar materials que siguin a prop en la sèrie galvànica o utilitzar recobriments metàl·lics per a reduir la diferència galvànica.

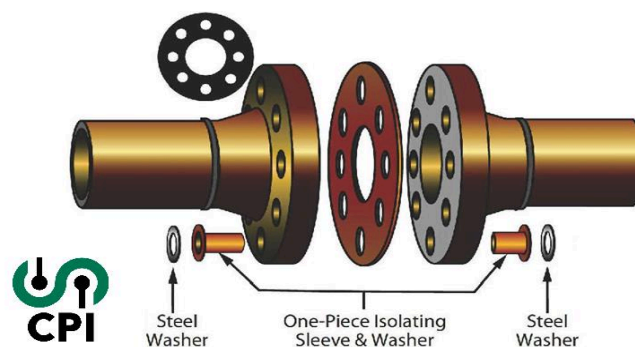


Figura 29: Sistema d'aïllament elèctric a partir de juntes aïllants. [30]

L'aïllament elèctric és una altra mesura efectiva per a prevenir la corrosió galvànica, mitjançant l'ús d'insercions no metàl·liques o recobriments que interrompin la continuïtat elèctrica. Els recobriments de barrera, tant orgànics com vitris, també són útils per a aïllar els metalls de l'entorn corrosiu. És fonamental recobrir la part anòdica de manera especial per a reduir la seva àrea i evitar disfuncions en el recobriment. La protecció catòdica és una opció, ja sigui mitjançant ànodes de sacrifici o sistemes de protecció catòdica per corrent imposat. També es pot modificar l'ambient per a reduir l'atac galvànic, utilitzant inhibidors de corrosió en medis aquosos o eliminant despolaritzadores catòdics. En resum, hi ha diverses estratègies per a prevenir la corrosió galvànica, que van des del disseny adequat fins a la selecció acurada de materials i l'ús de tècniques de protecció específiques.

#### **1.6.4. Esquerda ment degut al medi**

##### **Definició:**

L'esquerda degut al medi és una forma crítica de corrosió que pot conduir a la fractura sobtada de materials dúctils a causa de la combinació de corrosió i esforços de tensió. A diferència d'altres formes de corrosió que es desenvolupen lentament i poden detectar-se mitjançant inspecció abans que ocorri una falla, aquest tipus d'esquerda pot succeir ràpidament, resultant en una falla catastròfica abans que es pugui identificar el mal.

##### **Com es produeix:**

Aquest fenomen es caracteritza per la necessitat de la presència simultània d'esforços de tensió i corrosió perquè ocorre la fractura. Sense tots dos factors, no es produirà la fractura. Les falles que resulten d'aquesta mena de corrosió són difícils de predir i solen ser greus, especialment perquè afecten metalls seleccionats per la seva resistència general a la corrosió, com els acers inoxidable.

##### **Tipus:**

Existeixen diversos tipus d'esquerdes degudes al medi, que inclouen la corrosió assistida per esforços (SCC: Stress Corrosion Cracking), esquerda induïda per hidrogen (HIC: Hydrogen Induced Cracking), el trencament per metall líquid (LMC; Liquid Metal Cracking) i la corrosió per fatiga (CF: Corrosion Fatigue). Cadascun d'aquests tipus té característiques i mecanismes de formació específics, però tots comparteixen el risc de



provocar falles sobtades i catastròfiques en els materials. En els apartats posteriors, s'aprofundirà en cada tipus.

#### 1.6.4.1. Corrosió assistida per esforços (SCC)

##### **Definició:**

La corrosió assistida per esforços (SCC) és un tipus de fractura fràgil que ocorre en materials dúctils a causa de la combinació de tensions i un mitjà corrosiu específic. El notable de la SCC és que el mitjà corrosiu està directament relacionat amb el material en qüestió. Per exemple, un mitjà càustic pot afectar l'acer al carboni, mentre que els clorurs poden provocar SCC en l'acer inoxidable, i l'amoniac pot ser perjudicial per als aliatges de coure.

##### **Com es produeix:**

El mecanisme de la SCC implica la formació de fissures microscòpiques ramificades en la superfície del metall (veure Figura 30). La quantitat de ramificacions depèn de la concentració del mitjà corrosiu i de les tensions presents en el metall. Bàsicament, la SCC no ocorre en materials exposats a mitjans on no hi ha tensions o aquestes són mínimes. De la mateixa manera, tampoc ocorre si els materials estan exposats a un mitjà que no conté el component corrosiu específic per a aquest material.

Quan els acers tenen tensions residuals, com les generades per processos de fabricació o per esforços externs com la tracció o la soldadura, i estan exposats a un ambient corrosiu adequat, com a entorns amb presència de clorurs per als acers inoxidables, poden formar-se petites esquerdes que donen lloc a la SCC. Aquestes esquerdes solen ser transgranulars o intergranulars, cosa que significa que travessen o es desenvolupen al llarg dels límits entre grans del material.

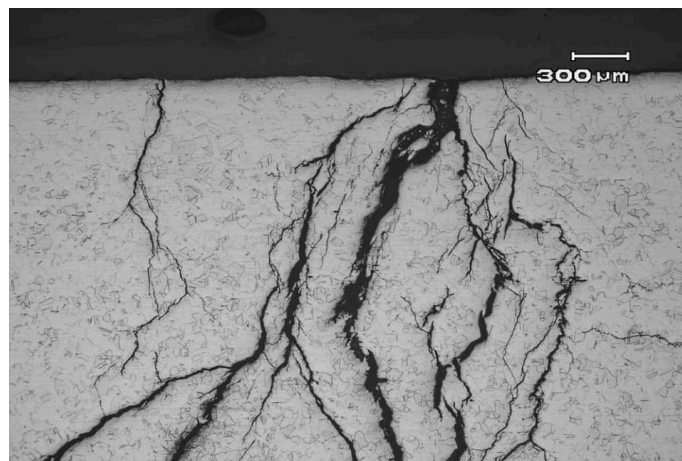


Figura 30: Corrosió assistida per esforços. [31]

#### 1.6.4.2. Esquerda induïda per Hidrogen (HIC)

##### Definició:

Una esquerda induïda per hidrogen (HIC) és el resultat de la combinació de tensions i la presència d'hidrogen en el metall. Quan l'hidrogen atòmic es produeix en la superfície del metall, pot ser absorbit pel metall i provocar esquerdes.

##### Com es produeix:

El mecanisme d'aquesta mena d'esquerda implica que l'hidrogen atòmic entra en el metall en lloc d'evolucionar com un gas en la reacció normal de reducció de l'hidrogen. Això ocorre en àrees on l'evolució normal de l'hidrogen està inhibida, i l'hidrogen es difon a l'interior del metall. La protecció anòdica pot reduir l'esquerda per hidrogen, mentre que la protecció catòdica pot empitjorar-ho. L'aplicació de protecció catòdica en el camp ha estat responsable de fallades per esquerda per hidrogen en hèlixs de vaixells.

A nivell atòmic, l'hidrogen s'acumula en les imperfeccions de l'estructura cristal·lina del metall, formant hidrogen molecular. Aquesta acumulació pot causar una deformació del metall més enllà del seu límit elàstic, la qual cosa condueix a la formació d'esquerdes. El procés d'esquerdament pot ocórrer ràpidament, amb la formació de bombolles d'hidrogen prop de la superfície del metall. Si aquestes bombolles es trenquen, poden iniciar esquerdes en la superfície metàl·lica. La presència de tensions addicionals pot augmentar la velocitat de corrosió en aquestes àrees, la qual cosa resulta en una major probabilitat de formació d'esquerdes.

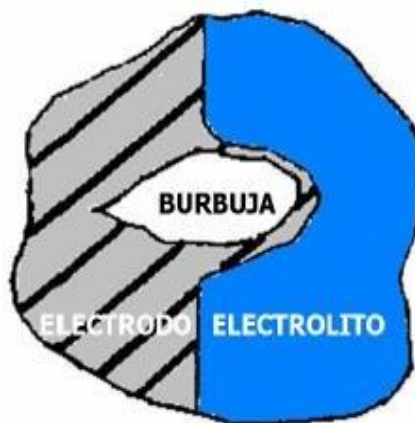


Figura 31: Bombolla intersticial d'hidrogen. [32]

**Factors que poden afectar al HIC:**

- Temperatura: La major susceptibilitat al HIC ocorre a temperatura ambient, però augmentar la temperatura pot reduir aquesta susceptibilitat.
- Concentració d'hidrogen en el mitjà.
- Nivell de tensió aplicat al metall: A major tensió a tracció, major susceptibilitat al HIC.
- Sobreprotecció catòdica: Quan s'aplica una protecció catòdica excessiva, pot produir-se un fenomen conegut com "blistering", que és la formació de butllofes en els revestiments anticorrosius. Això pot portar a una fallada en el sistema de protecció catòdica.

**1.6.4.3. Trencament per metall líquid (LMC)****Definició:**

El trencament per metall líquid (LMC) es refereix a la reducció de la resistència o ductilitat d'un metall o aliatge a causa del contacte amb un metall en estat líquid.

**Com es produeix:**

El procés de LMC difereix d'altres tipus de corrosió, com la corrosió assistida per esforç (SCC), ja que la falla comença immediatament després de la combinació del metall sòlid (sotmès a tensions) i el contacte amb el metall líquid. Aquest tipus de mal ocorre quan dues condicions es compleixen simultàniament: la presència de metall líquid en contacte amb una estructura metàl·lica sòlida i l'aplicació de tensió a aquesta estructura. Quan aquestes condicions es compleixen, el metall líquid és absorbit pels límits de gra del metall sòlid, creant esquerdes plenes de metall líquid en aquests límits i trencant la connexió entre els grans adjacents. Una vegada que el metall líquid es refreda i solidifica, deixa esquerdes en l'estructura metàl·lica. L'absorció del metall líquid ocorre a una velocitat extremadament ràpida.

**Comportament dels materials al voltant d'aquest fenomen:**

Aquest fenomen afecta a diferents metalls i aliatges de manera variable. A més, com a agent causant de fragilitat, es troben materials molt concrets. Per exemple, el gal·li (galió), pot causar un efecte de fragilitat sever en alumini i els seus aliatges, però no té un efecte significatiu en materials com a acers inoxidable o aliatges de coure. En general,

els acers inoxidable són resistent al LMC, mentre que els acers al carboni, els aliatges de coure i alumini són més susceptibles a aquesta mena de mal.

#### 1.6.4.4. Corrosió per Fatiga (CF)

##### Definició:

La corrosió per fatiga és el resultat de la combinació d'esforços cíclics i un entorn corrosiu, però no està limitada a ambients corrosius específics. En aquest tipus de corrosió, s'observa una falla prematura d'una part del material exposat a càrregues cícliques. Aquesta falla pot ocórrer fins i tot a nivells baixos d'esforç o després d'un menor nombre de cicles en comparació amb el que duraria en un entorn no corrosiu.

##### Com es produeix:

El mecanisme de la corrosió per fatiga implica la formació de picades i petites esquerdes en la superfície del metall degut a la combinació de corrosió i esforços cíclics. Aquestes picades continuen aprofundint-se fins que la peça està tan afeblida que finalment es produeix el seu trencament. Aquest procés de propagació de l'esquerda està controlat per concentracions d'esforços i propietats físiques del metall. Els esforços que generen la fatiga es concentren en els defectes existents en les peces, com entalles o esgarrapades, creant zones amb alt contingut d'energia que actuen com a ànodes, mentre que les vores dels defectes actuen com a càtodes. Això genera una pila galvànica que accelera el procés de corrosió.



Figura 32: Esquerdes per fatiga i ambient corrosiu. [33]

#### 1.6.4.5. *Control de les esquerdes produïdes per el medi*

El mecanisme de falla per la formació d'esquerdes degut al medi pot ser controlat de moltes formes:

**Disseny:** El disseny pot ser modificat per a disminuir els esforços de tensió per sota el llindar del nivell que controla SCC. Ha de considerar-se ho esforço resultant total degut a esforços residuals, esforços tèrmics i esforços de càrregues per operació i pressió. Una segona consideració en el disseny per a controlar el SCC passa per evitar geometries on la solució electrolítica es pugui concentrar, o on solucions crítiques puguin acumular-se en esquerdes un altres geometries estretes. Una tercera consideració la hi compatibilitat de materials en el sistema. Cal evitar en la mesura que sigui possible ho contacto entre materials dissimilissis. L'amoníac introduït per a controlar els nivells de pH i minimitzar la corrosió de l'acer pot causar SCC en aliatges de cobrament d'equips adjacents (Payer, 1982).

**Modificació degut al medi ambient:** A vegades pot ser controlat eliminant les espècies crítiques del mitjà, baixant el seu nivell de concentració per sota el llindar del SCC. Desafortunadament, la concentració que provoca SCC depèn de l'aliatge i de la temperatura, per el que es necessari con freqüència dades experimentals per a identificar els límits de concentració segurs.

Segons Payer (1982), en algunes combinacions medi ambiente-aliatge, es possible reduir les esquerdes induïdes per el medi mitjançant eliminació de l'oxigen dissolt o agents oxidants. L'eliminació d'oxigen es pot llevar a cap mitjançant agents segrestadors com la hidrazina ( $N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + H_2O$ ) o ho sulfít de sodi. [46]

**Tècniques electroquímiques:** La protecció catòdica pot ser utilitzada per a controlar algunes formes de SCC; no obstant això pot contribuir a la HIC, per el que ha de ser usada amb precaució. Totes dues tècniques, la protecció catòdica i la protecció anòdica la seva utilitzades per a polaritzar un aliatge a un potencial fora del llindar d'acció de la SCC. En protecció anòdica, l'aliatge es polaritza cap a un potencial més oxidant que el del rang de la SCC. En protecció catòdica el metall es polaritzat cap a un potencial més baix que el del rang de potencial d'esquerdes. La polarització pot ser controlada per l'acció galvànica de metalls dissimilissis (ànodes de sacrifici) o per corrent impuesta. de totes formes,

canvis en el potencial poden causar HIC. Un exemple molt comú d'això es la protecció catòdica d'acers d'alta resistència. Pel fet que l'hidrogen atòmic es produeix en la superfície del metall ( $H^+ + 1e^- \rightarrow H_0$ ), la protecció catòdica pot induir HIC. Una polarització a metalls més baixos deguda a protecció catòdica resulta en majors concentracions d'hidrogen en l'acer i una major susceptibilitat a la formació d'esquerdes (Payer, 1982).

**Recobriments Protectors:** Los recobriments el seu molt habitualment utilitzats per a controlar les esquerdes del medi. De totes maneres, la protecció es tan bona com la integritat del recobriments. El recobriments ha de ser l'adequat per al mig existent. Així mateix, i igualment important, se seguir exigentment ho mètode d'emprimació d'aquest, des de la preparació de la superfície, la correcta aplicació i ho compliment dels temps d'assecat.

**Reducció d'esforços residuals:** Se ha d'evitar que durant els processos de fabricació i construcció romanguin esforços residuals indesitjats que afavoreixin el SCC quan els components estén en servei. Segons Payer (1982) existeixen dos mètodes per a evitar-los [46]:

- Eliminació de tensions residuals por tractament tèrmic: L'element o equip fabricat s'escalfa a una temperatura prou alta per a relaxar els esforços residuals indesitjats.
- Mitjançant Shot peening: Procés concebut específicament per a millorar la resistència a fatiga de components subjectes a elevades tensions alternes. Els tractaments superficials com l'esmerilat, fresat, doblegat provoquen tensions residuals de tracció. Aquestes tensions residuals de tracció redueixen el cicle de vida de les peces. El shoot peening converteix les tensions residuals de tracció en tensions de compressió, millorant així ho cicle de vida de la peça. Consisteix a projectar granalla (partícules esfèriques metàl·liques, de vidre o ceràmiques) contra una superfície con la força suficient per a generar la deformació plàstica d'aquesta. Aquest tractament estén plàsticament la superfície, provocant canvis en les seves propietats mecàniques.

### 1.6.5. Corrosió assistida per flux

Aquest tipus de corrosió es donada a partir d'un flux de una substància sobre una superfície, la qual pot estar en repòs o en moviment. Aquesta acció, és la combinació de la corrosió i el flux d'un fluid. Hi ha diversos tipus de corrosió per flux: Corrosió per erosió, Fretting, cavitació o FAC( Flow Accelerated Corrosión).

#### 1.6.5.1. Corrosió erosió

**Descripció:** Aquest tipus de corrosió s'observa en sistemes de transports de fluids fets amb materials passivats , on existeixen partícules de major duresa que la capa de passivació. Aquestes partícules en estar en moviment, erosionen la capa passivada, permetent que el procés de corrosió es desenvolupi (Javaherdashti, 2008).(Internet). [47]

**Reconeixement:** L'erosió-corrosió sovint causa atac localitzat on existeixen discontinuïtats en la superfície les quals produeixen alteracions del flux i turbulència. Aquest fenomen ocorre amb freqüència en cordons de soldadura.

#### Com es produeix:

L'erosió corrosió pot ocórrer en líquids o gasos fluïnt amb o sense la presència de partícules abrasives. En aquesta forma d'atac, la velocitat de flux és suficient per a remoure productes de corrosió feblement adherits de la superfície, reduint d'aquesta manera el seu efecte protector, i inclusivament pot arribar també a remoure substrat. Això resulta en una acceleració del procés de corrosió. La turbulència de flux és també important (Figura 33), la velocitat per si sola pot explicar un sobtat increment en el mal superficial (Glaeser, 1982). [48]

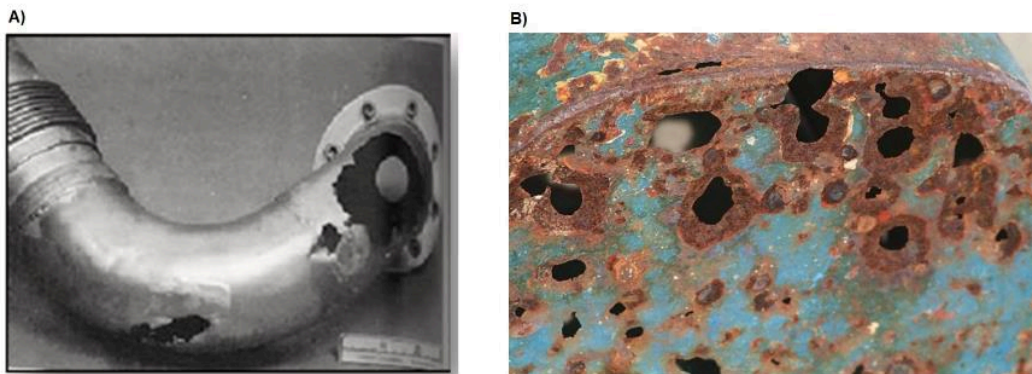


Figura 33: Exemples de corrosió per erosió. A) Canonada en forma de colze. B) Equip industrial. [34]

### 1.6.5.2. Corrosió per fricció (Fretting)

**Descripció:** La corrosió per fricció es refereix al mal per corrosió en les asprrs de les superfícies de contacte. Aquest mal s'indueix sota càrrega i en presència de moviments de superfície relatius repetits entre metalls.

El mal pot ocórrer en la interfície de dues superfícies altament carregades que no estan dissenyades per a moure's una contra l'altra. El tipus més comú de mal és causat per la vibració. Les pel·lícules passivades sobre les superfícies metàl·liques s'eliminen per l'acció del frec i exposen els metalls basi i actius a l'activitat corrosiva.

**Reconeixement:**

Els clots o solcs i les restes d'òxid caracteritzen aquest mal, que generalment es troba en maquinària, conjunts caragolats i rodaments de boles o corrons

**Mecanisme:**

Similar al de l'erosió-corrosió

### 1.6.5.3. Corrosió per cavitació

**Descripció:**

La corrosió per cavitació ocorre en sistemes de transport de líquids, fets de materials passivats, on per canvis sobtats de pressió en el sistema, es produeixen fluxos turbulents que formen bombolles d'aire, les quals actuen contra el material del sistema, deteriorant la capa de passivació i facilitant el desenvolupament del procés de corrosió, de manera



Figura 34: Cavitació de la hèlix d'un vaixell. [35]



similar a la corrosió per picades, la diferència de les quals s'observa, en què l'efecte de la cavitació és de major grandària (Revie, 2011).[45]

#### 1.6.5.4. *FAC (Flow accelerated corrosion)*

La informació obtinguda d'aquest subapartat ha estat obtinguda íntegrament del manual "Fallades en Centrals de combustibles fòssils convencionals i de cicle combinat. [49]

**Com es produeix:** La corrosió accelerada per flux (FAC), també coneguda com a corrosió assistida per flux, és un mecanisme de corrosió en el qual una capa d'òxid normalment protectora sobre una superfície metàl·lica es dissol en una aigua que flueix ràpidament. El metall subjacent es corroeix per a recrear l'òxid i, per tant, la pèrdua de metall continua.

Per definició, la taxa de FAC depèn de la velocitat del flux. El FAC sovint afecta a les canonades d'acer al carboni que transporten aigua desoxigenada ultra pura o vapor humit. L'acer inoxidable no sofreix de FAC. El FAC de l'acer al carboni es deté en presència d'una petita quantitat d'oxigen dissolt en l'aigua.

Les taxes de FAC disminueixen ràpidament en augmentar el pH de l'aigua. FAC ha de distingir-se de la corrosió per erosió perquè els mecanismes fonamentals per als dos modes de corrosió són diferents. El FAC no implica l'impacte de partícules, bombolles o cavitació que causen el desgast mecànic (sovint similar a un cràter) en la superfície. A diferència de l'erosió mecànica, la FAC implica la dissolució d'un òxid normalment poc soluble mitjançant la combinació dels fenòmens electroquímics, de la química de l'aigua i de transferència de massa. No obstant això, els termes FAC i erosió a vegades s'usen indistintament perquè el mecanisme real pot, en alguns casos, ser poc clar (Figura 35).



Figura 35: Corrosió d'un tub d'acer al carboni que pertany a un circuit d'una caldera de recuperació de calor. [36]

Avui dia els trencaments deguts a FAC són la segona causa d'indisponibilitat en calderes de recuperació de calor després dels trencaments per fatiga en els entroncaments dels col·lectors. Els trencaments es localitzen fonamentalment en els circuits de vaporització de baixa pressió encara que també s'han donat trencaments en tubs de l'economitzador de baixa pressió i alta pressió i en els circuits dels feeders i risers. El FAC en els circuits d'evaporació ocorre sota les dues formes una sola fase i dues fases.

El fenomen FAC és un procés de dissolució de la capa protectora de passivació en els acers al carboni constituents de les calderes de les centrals tèrmiques. Aquesta capa de passivació es denomina magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) en un corrent d'aigua (una sola fase) o de vapor humit (dues fases). Aquest procés redueix o elimina la capa d'òxid protectora i porti a una ràpida eliminació del material base fins que en el pitjor dels casos la canonada rebenta.

#### **1.6.5.5. Control de la corrosió assistida per flux**

La corrosió assistida per flux pot ser controlada de moltes maneres. Ja sigui a partir del seu disseny, modificant el medi, utilitzant recobriments protectors o mitjançant la protecció catòdica. En aquest apartat s'abordarà cada un d'aquests temes.

**Disseny:** En el disseny, és essencial controlar la velocitat del flux per a garantir que no superi uns certs límits específics per a cada material. És preferible tenir un flux laminar, que és suau i ordenat, en lloc d'un turbulent, que és caòtic i pot causar danys. És important evitar esquerdes en el disseny, ja que poden atrapar sòlids i gasos no desitjats.

**Modificació del medi:** En alguns casos, els inhibidors de corrosió poden controlar eficaçment l'efecte de la velocitat en la corrosió. Alguns inhibidors poden reduir la velocitat en àrees on algunes capes passivades s'han dissolt, incrementant la resistència d'aquesta. (Glessner, 1982). [48]

**Recobriments protectors:** Es poden utilitzar recobriments protectors per a controlar els efectes de la velocitat de flux. Quan hi ha o pot haver-hi presents materials sòlids dins del corrent de flux els revestiments d'hule són particularment efectius a reduir els efectes d'erosió-corrosió. Per descomptat, la unió (adhesió) del recobriments protector amb el material és un factor important en el seu ús per a controlar els efectes de velocitat. Els recobriments metàl·lics aplicats per revestiment (cladding) o soldadures sobreposades són àmpliament usats per a controlar els efectes de la velocitat en la corrosió (Glaesser, 1982). [48]

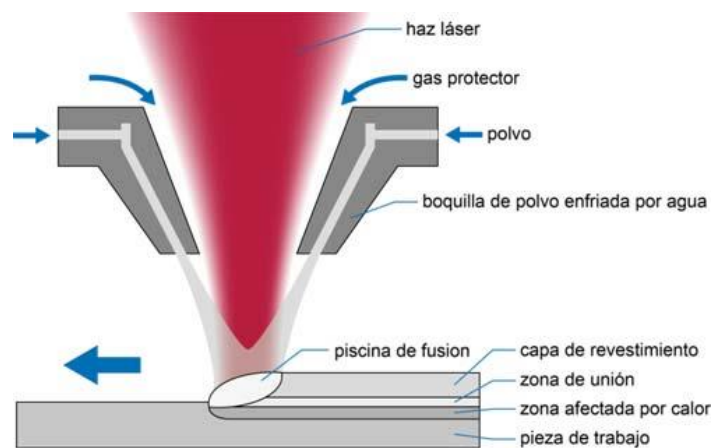


Figura 36: Procés de "Cladding". [37]

**Protecció catòdica:** Pot controlar amb eficàcia la corrosió dels metalls, encara que els metalls no estiguin coberts per capes protectores. Cal tenir en compte, però, que les necessitats de corrent per a la protecció catòdica en fluxos d'alta velocitat són normalment molt majors que condicions de baixa velocitat (NACE corrosion engineer's reference book, third edition, 2002).

#### 1.6.6. Corrosió intergranular

**Definició:** La corrosió intergranular és l'atac preferencial en, o adjacent a, les fronteres de gra d'un metall (Streicher, 1982). [50]

**Descripció:** La corrosió intergranular és una deterioració per corrosió localitzada i/o adjacent als límits de gra d'un aliatge. Sota condicions ordinàries, si un metall es corroeix uniformement, els límits de gra seran només lleugerament més reactius que la matriu. No obstant això, sota altres condicions, les regions de límit de gra poden ser molt reactives,

resultant una corrosió intergranular que origina pèrdua de la resistència de l'aliatge i fins i tot la desintegració en les vores de gra.

**Com es dur a terme:** La corrosió intergranular ocorre quan els límits de gra, o les àrees directament adjacents a les fronteres de gra, són anòdiques respecte als grans circumdants. Les fronteres de gra poden ser anòdiques cap al material circumdant per mitjà de molts mecanismes. Poden ser anòdiques a causa de diferències en els nivells d'impureses entre els grans i els límits de gra. Poden ser anòdiques a causa de l'efectiva energia de deformació dels d'àtoms a les fronteres de gra. Les fronteres de gra, o àrees adjacents, poden ser anòdiques a causa de la formació de precipitats producte d'un tractament tèrmic inadequat.

**Comportament de Materials:** Segons Streicher (1982), existeixen molts metalls i aliatges que estan subjectes a corrosió intergranular, però el més conegut és el dels acers inoxidable 18-8. [50]

Nombroses falles d'acers inoxidable 18-8 han ocorregut a causa de la corrosió intergranular. Això passa en ambients on els aliatges han de presentar excel·lent resistència a la corrosió. Quan aquests acers s'escalfen a temperatures aproximades als 500 – 800 °C, són sensibilitzats o es tornen susceptibles a la corrosió intergranular. Per exemple, un procediment per a sensibilitzar intencionalment és escalfar a 650 °C per una hora.

La teoria més acceptada universalment per a corrosió intergranular, està basada en l'empobriment o esgotament de crom en les àrees dels límits de gra. L'addició de crom a l'acer ordinari proveeix resistència a la corrosió de l'acer en molts ambients. Generalment es requereix més del 10% de crom per a un acer inoxidable en cas contrari el material comptés amb una resistència a la corrosió baixa. En el rang de temperatura indicat el Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (i el carboni) és virtualment insoluble i precipita si el contingut de carboni és pròxim a 0.02% o més. El crom és així remogut de la solució sòlida i el resultat és un metall amb menor contingut de crom en l'àrea adjacent als límits de gra. El carbucrom no és atacat en el límit del gra. L'acer empobrit en la zona pròxima als límits de gra és corroït pel fet que no conté suficient resistència a la corrosió per resistir l'atac en la major part d'ambients corrosius. L'acer inoxidable comú 18-8, tipus 304, conté normalment de 0.06 a 0.08% de carboni, i l'excés de carboni està disponible per a combinar-se amb el crom i precipitar el carbur.

### 1.6.6.1. *Com controlar la corrosió intergranular*

**Selecció de Materials:** Els materials poden ser seleccionats específicament per la seva resistència a la corrosió en un entorn de servei particular. Per exemple, per a acers inoxidable, es poden triar aliatges amb baix contingut de carboni) o graus que continguin elements estabilitzadors com a titani o niobi.

**Disseny i fabricació:** En el disseny i la fabricació, si un material és susceptible a la corrosió intergranular durant la soldadura, es poden evitar les soldadures utilitzant altres tècniques d'unió. En alguns casos, les juntes poden ser eliminades des del disseny inicial. A més, és crucial controlar adequadament l'escalfament del metall durant els processos de fabricació.

**Modificació del medi:** Modificar l'entorn també pot ser una estratègia. A vegades, ajustar el medi ambient perquè els límits de gra no siguin anòdics en comparació amb el material adjacent pot ajudar. Això es pot aconseguir mitjançant l'addició d'inhibidors químics o l'eliminació d'ions agressius, com els clorurs.

**Tractaments de soldadura:** L'ús de procediments de soldadura adequats és fonamental. Aquests procediments poden minimitzar o eliminar els efectes que provoquen la corrosió intergranular en els límits de gra. Una vegada que aquests procediments són desenvolupats i provats, han de ser aplicats acuradament per a assegurar els efectes desitjats en els materials utilitzats.

**Tractaments tèrmics:** Un tractament tèrmic adequat pot eliminar la corrosió intergranular prevenint efectes en límits de gra en primer lloc, o eliminant efectes adversos d'un tractament tèrmic inadequat o soldadura. Això comunament consisteix en un tractament tèrmic anomenat "tractament de solució", el qual dissol els constituents indesitjables en els límits de gra. Aquest tractament és consecutivament seguit d'un refredament ràpid per a prevenir la reformació de precipitats indesitjables en els límits de gra (Streicher, 1982). [50]

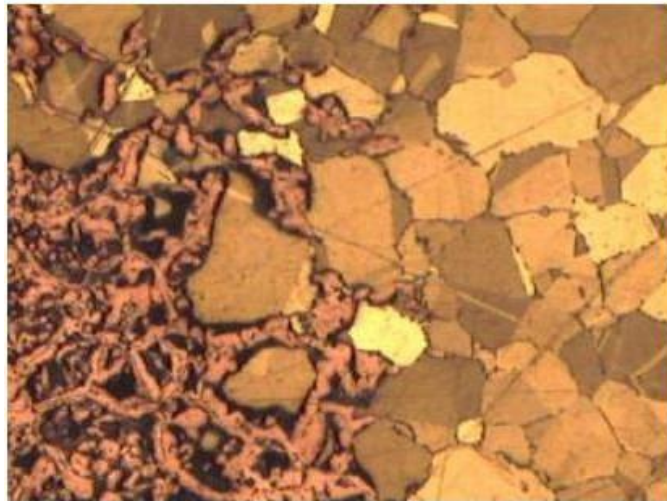
### 1.6.7. Deallowing

**Definició:** La des aliatge és un procés de corrosió que actua sobre aliatges metàl·lics, on un dels elements, de major afinitat amb l'oxigen, se separa de l'aliatge i deixen una estructura porosa de pobres propietats conformada per la resta de constituents. El procés

es nomena alternativament respecte a l'element que se separa de l'aliatge com, per exemple, el des aliatge per al llautó, aliatge que sofreix comunament d'aquesta mena de corrosió, en la qual se separa el zinc de la matriu cobri (Revie, 2011).[45]

**Descripció:** La majoria dels materials d'enginyeria són aliatges que consisteixen de mescles d'elements. En alguns casos, tal com en el cas de l'aliatge entre el zinc i el coure per a produir un llautó, un element és anòdic respecte als altres elements de l'aliatge i pot ser corroït selectivament per acció galvànica.

**Reconeixement:** Habitualment la pèrdua de les propietats d'un aliatge es detecta com un canvi de color, o un canvi dràstic en la resistència mecànica. Els llautons canviaran de color groc a vermell (figura 37), i els acers d'un color gris plata a grisa fosc.



*Figura 37: Pèrdua de les propietats de l'aliatge del llautó. [39]*

**Com es dur a terme:** Segons Heidersbach (1982), el mecanisme del Deallowing pot ser l'eliminació selectiva d'un o més constituents d'un aliatge deixant un substrat residual, o bé la dissolució de l'aliatge sencer, amb un o més constituents re dipositats. Recerques de laboratori han mostrat que tots dos processos poden ocórrer simultàniament sota unes certes condicions. En qualsevol cas, la corrosió resulta en un metall residual amb essencialment el mateix perfil superficial i volum del metall basi.[51]

#### **1.6.7.1. Control del Deallowing**

Aquest tipus de corrosió pot ser controlada de diverses maneres:

- Selecció de materials: Es pot optar per utilitzar aliatges que siguin més resistents a aquesta mena de corrosió, com els llautons inhibits en lloc dels llautons ordinaris, o foses mal·leables en lloc de foses grises.
- Control del medi ambient: A vegades, és possible influir en la corrosió intergranular mitjançant canvis en l'entorn, com ajustar els nivells d'acidesa o alcalinitat. Per exemple, el tractament adequat d'aigües residuals àcides pot prevenir la grafitització en el ferro colat.
- Ús de recobriments protectors: Aplicar recobriments protectors pot ser útil en uns certs casos per a protegir contra la corrosió intergranular.
- Tècniques electroquímiques: La protecció catòdica ha demostrat ser efectiva per a controlar aquest fenomen disminuint la corrosió a les regions intergranulars.

### 1.6.8. Oxidació Química

Fins ara hem estat parlant d'oxidació de metalls al mig aquós, no obstant això, aquests materials també reaccionen amb l'aire per a formar òxids externs. L'alta temperatura d'oxidació dels metalls és particularment important en el disseny d'alguns components com a turbines de gas, motors i equipament de petroquímiques.

El grau en què un òxid protegeix un metall i per tant no es corroeix depèn de diversos factors, els més importants són:

- El percentatge en volum de l'òxid respecte al metall després de l'oxidació ha de ser pròxim a la unitat.
- La pel·lícula formada ha de tenir bona adherència.
- El punt de fusió de l'òxid ha de ser alt.
- La pel·lícula d'òxid ha de tenir baixa pressió de vapor.
- La pel·lícula formada ha de tenir un coeficient d'expansió gairebé igual al del metall.
- La pel·lícula formada ha de tenir plasticitat a alta temperatura per a evitar que es trenqui o quarteri.

- La pel·lícula formada haurà de tenir baixa conductivitat i baixos coeficients de difusió per a ions metàl·lics i oxigen.

El primer pas és doncs determinar el percentatge en volum d'òxid respecte al metall després de l'oxidació per a avaluar si l'òxid format és protector o no. El càlcul d'aquest percentatge és el que es coneix com a relació de Pilling- Bedworth.

Quan el metall té una relació P-B < 1, l'òxid format és porós i poc protector, no protegeix, com és el cas de metalls alcalins. Si la relació és major de 1, hi haurà un esforç compressiu i l'òxid format tendirà a trencar-se, com és el cas de l'òxid de Fe III ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que val 2,15. Si la relació P-B és pròxima a la unitat, l'òxid pot ser protector però haurà de complir amb alguns altres dels factors abans assenyalats. Relació P-B= Volum de l'òxid produït/ Volum del metall que s'ha consumit.

### **1.6.9. Corrosió microbiològica**

La corrosió microbiològica, en realitat no és un tipus de corrosió en si, sinó que més aviat és un fenomen que facilita el desenvolupament d'altres processos de corrosió. Els bacteris són els microorganismes més influents en aquest cas, per la qual cosa també és coneguda com a corrosió bacteriana i es produeix en sistemes de transport de líquid, facilitant la corrosió per picades.

La naturalesa del líquid que es transporta en aquests sistemes, propícia l'acumulació i reproducció de bacteris, les quals s'aglomeren, i propicien les condicions, com a variació en la concentració de sals i oxigen, perquè es desenvolupin altres processos de corrosió com el pitting.

## **1.7. PRINCIPIS GENERALS DE LA PROTECCIÓ CATÒDICA EN AIGUA DE MAR**

Part de la informació aquí continguda s'ha recollit de la norma UNE-EN 12473:2014: Principis Generals de la protecció catòdica en aigua de mar.

La protecció catòdica és un sistema de prevenció de la corrosió electroquímica basat en la disminució del potencial de corrosió fins a un nivell en el qual la velocitat de corrosió es redueix de manera significativa, Per a estructures industrials, normalment s'obtenen



velocitats de corrosió residual inferiors a  $10\mu\text{m}/\text{any}$  per mitjà d'un sistema de protecció catòdica que sigui totalment eficaç.

La protecció catòdica s'obté mitjançant l'aplicació d'una tensió que pugui subministrar suficient corrent a la superfície metàl·lica per a disminuir el potencial. La protecció catòdica s'utilitza per a reduir la corrosió d'una gamma de metalls i aliatges per a estructures utilitzades en medis aquosos, inclosa l'aigua de mar, fins a un nivell acceptable per a les seves aplicacions previstes.

La figura 38 mostra un diagrama esquemàtic de la corba de polarització de l'acer la corrosió del qual és induïda per la reducció de l'oxigen deguda a un procés catòdic. El potencial de corrosió lliure ve donat per  $E_{\text{corr}}$ , i la velocitat de la corrosió per,  $i_{\text{corr}}$ , és igual en magnitud a la corrent límit  $i_L$  de la reducció de l'oxigen.

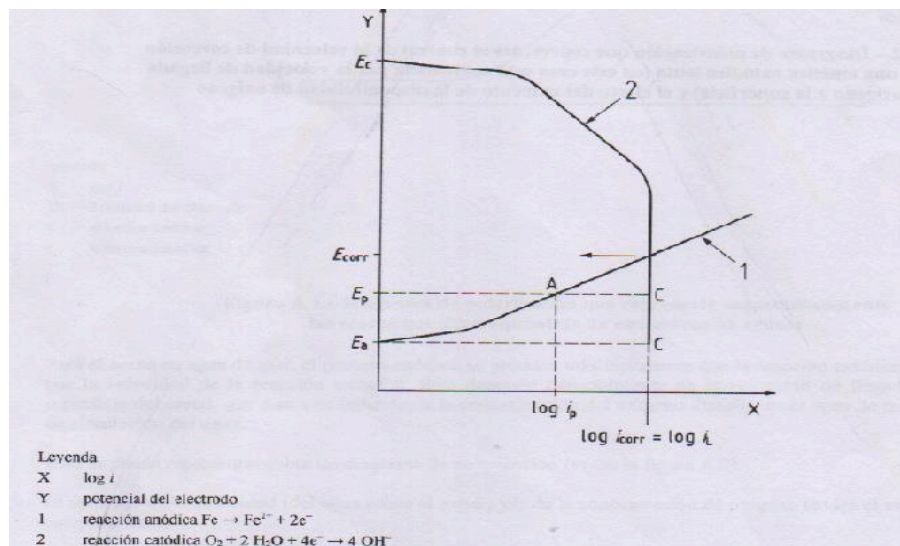


Figura 38: Diagrama que mostra com la corrosió pot reduir-se mitjançant l'aplicació de protecció catòdica.  
FONT: UNE-EN 12473:2014.[56]

Quan el potencial es redueix des de  $E_{\text{corr}}$  a  $E_p$ , la velocitat de la reacció anòdica arriba a ser inferior  $i_p$ , i la velocitat global de la reacció catòdica roman igual a  $i_L$ . La reacció catòdica rep llavors els seus electrons de dues fonts (del procés anòdic i d'una font de corrent extern de corrent). La reacció anòdica proporciona electrons equivalents a  $i_p$ , i el corrent addicional requerit ( $C$  menys  $A$ ) la proporciona una alimentació externa.

Si el potencial baixa fins a  $E_a$ , la velocitat de dissolució disminueix fins a un valor insignificant i la velocitat de la reacció catòdica roman igual a  $i_L$ . Com per a aquest potencial no existeix reacció anòdica, la reacció catòdica ha de ser mantinguda únicament per la font externa d'electrons, per la qual cosa aquesta ha de subministrar més corrent (igual a  $i_L - 0$ ) per a  $E_a$  i  $E_p$ ).

Si el potencial descendeix per sota de  $E_a$ , només són energèticament possibles els processos catòdics secundaris que no afectin la reacció de corrosió lliure.

El corrent que es requereix per a reduir la velocitat de corrosió a zero serà  $i(E_{\text{corr}}) - i(E_a)$ , i si la corrosió es deu únicament a la reducció de l'oxigen dissolt, aquest corrent serà igual a  $i_L$ , és a dir la corrent límit de reducció de l'oxigen.

La base de la protecció catòdica és la disminució del potencial de corrosió mitjançant l'aplicació d'un corrent.

En principi, la protecció catòdica es pot utilitzar per a una varietat d'aplicacions en les quals el metall se submergeix en una solució aquosa d'un electròlit que pot ser des d'aigua relativament pura, aigua salobre i aigua de mar, fins a terrenys i solucions àcides.

S'hauria de ressaltar que el mètode és electroquímic i que tant l'estructura a protegir com l'ànode utilitzat per a la protecció han d'estar en contacte metàl·lic i electrolític. Per tant, la protecció catòdica no es pot utilitzar per a controlar la corrosió atmosfèrica i formes de corrosió similars.

Les formes de corrosió que es poden controlar mitjançant protecció catòdica inclouen totes les formes de corrosió general, corrosió per picades, corrosió selectiva, corrosió en esquerdes, fissuració afavorida pel medi ambient, corrosió per cavitació i corrosió bacteriana.

Resumint:

- Sense protecció catòdica l'acer es corroeix a una velocitat donada per  $i_{\text{corr}}$  i  $i_L$ , quan la reducció de l'oxigen és la reacció catòdica.
- Reduint el potencial fins a  $E_a$ , és possible detenir completament la corrosió, però això requereix l'aplicació d'un corrent extern igual a  $i_L$ ,
- Pel fet que la polarització anòdica, que és la relació entre el potencial  $E$  i la corrent  $i$ , és aproximadament logarítmica, un petit canvi negatiu inicial del potencial (o de la polarització) pot proporcionar un gran benefici en termes de protecció.
- En disminuir el potencial per sota de  $E_a$ , part del corrent s'utilitza per a reduir electroquímicament l'aigua en ions hidroxils.

Existeixen dos mètodes per a subministrar el corrent de protecció a fi de polaritzar la superfície:

- a) Sistemes d'ànodes de sacrifici en els quals el corrent per a la protecció la subministra un metall el potencial de corrosió del qual és més negatiu que la de l'element a protegir, és a dir, els aliatges d'alumini, de zinc i de magnesi per a l'acer i el ferro per al coure i els aliatges de coure.
- b) Sistemes de corrent imprès en els quals s'utilitza corrent continu (generalment produïda a partir de corrent altern mitjançant un transformador rectificador) en conjunció amb ànodes relativament inerts com ara grafit, revestiments fins de platí, o òxids metàl·lics barrejats i activats sobre metalls com ara titani o niobi, aliatges de plom, ferro-silici, etc.; en alguns casos s'utilitza un ànode consumible constituït de ferralla de ferro o acer.

### 1.7.1. Mètode ànodes de sacrifici

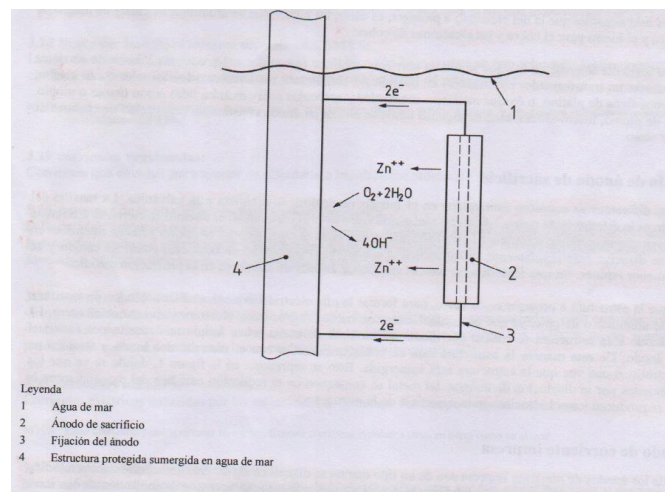


Figura 39: Representació de la protecció catòdica utilitzant un ànode de sacrifici en una estructura submergida. FONT: UNE UNE-EN 12473:2014.

[56]

Si dos metalls diferents es connecten submergits en el mateix electròlit, es crea una pila galvànica. La tensió del cicle obert és la diferència de potencial natural que existeix entre els dos metalls. Si el circuit es tanca, la diferència de potencial genera un corrent elèctric. La protecció per ànodes de sacrifici consisteix a crear una altra pila electroquímica en la qual el metall a protegir actua com a càtode (l'acer en cas d'estructures submergides), per a això s'ha de connectar elèctricament aquest metall amb un menys noble (més actiu), que es corroeix: és l'ànode de sacrifici (Figura 39).

Els materials que s'utilitzen com a ànodes de sacrifici han de ser, més actius electroquímicament que els components de l'estructura metàl·lica a protegir (el casc del vaixell) i, perquè sigui més rendible la protecció, han de ser també més barats. Generalment per a la protecció d'acers s'utilitzen ànodes de magnesi, zinc i alumini o aliatges d'aquests metalls entre ells o amb calci.

El potencial i corrent de protecció poden obtenir-se de la unió amb metalls molt més actius que el que es pretén protegir. En aquestes piles galvàniques formades, els metalls més actius actuen d'ànode, "sacrificant-se" en benefici del metall que es desitja protegir i que actua de càtode.

Des del punt de vista tècnic i econòmic, un ànode ha de reunir una sèrie de propietats essencials perquè siguin útils:

- Tenir un potencial de dissolució prou negatiu per a polaritzar l'estructura (en el cas de l'acer a  $-0,8$  V respecte a l'elèctrode de referència Ag/AgCl i  $-0,85$  V en el cas de l'elèctrode de referència Cu/CuSO<sub>4</sub>).
- Ha de presentar una tendència petita a la polarització, és a dir, no ha de desenvolupar pel·lícules que intervinguin amb els productes de corrosió.
- No formació de gas hidrogen
- El material ha de tenir un elevat rendiment elèctric en A/h kg.
- L'ànode haurà de corroir-se uniformement.
- El metall serà de fàcil adquisició i haurà de poder fondre's en diferents formes i grandàries.
- El metall haurà de tenir un cost raonable, de manera que unit amb altres característiques electroquímiques es pugui aconseguir la protecció a un cost raonable per ampere/any.
- No formació de gas oxigen
- No addició a la substància electroquímica de components deguts a l'oxidació de l'ànode.

Segons la Norma UNE 12496 (2013), els ànodes de sacrifici més comuns són:

### **Ànode de Zinc:**

El zinc ha estat sens dubte, fins a l'actualitat, el material anòdic de major utilització en la pràctica, en particular en aigua de mar. Per tant cal destacar que és el majorment utilitzat

en el casc dels vaixells. El zinc ha de ser d'elevada puresa per a evitar la polarització anòdica ocasionada per l'acumulació de pel·lícules denses i adherents, que disminueixen gradualment l'eficàcia de l'ànode, que acaba sent totalment inactiu. El zinc pur només pot utilitzar-se si el contingut d'impureses de ferro està per sota del 0,0014%; no obstant això amb l'addició d'alumini aquest nivell d'acceptació d'impureses de ferro pot incrementar-se lleugerament, i posteriors addicions de cadmi promouen la formació d'un producte de corrosió tou, no adherent sobre l'ànode. Algunes composicions d'aliatge estan patentades per un fabricant específic.

Elementos	Aleación Z 1	Aleación Z 2	Aleación Z 3	Aleación Z 4
Al	0,1-0,5	0,005 máx.	0,10 – 0,20	0,10 – 0,25
Cd	0,025 – 0,07	0,003 máx.	0,04 – 0,06	0,001 máx.
Fe	0,005 máx.	0,0014 máx.	0,001 4 máx.	0,002 máx.
Cu	0,005 máx.	0,002 máx.	0,005 máx.	0,001 máx.
Pb	0,006 máx.	0,003 máx.	0,006 máx.	0,006 máx.
Sn	–	–	0,01 máx.	–
Mg	–	–	0,5 máx.	0,05 – 0,15
Otros	0,10 máx.	0,005 máx.	0,1 máx.	0,1 máx.
Zn	99,314 min.	99,99 min.	resto	resto

NOTA 1 La aleación Z 1 normalmente se suministra de acuerdo con la Especificación Militar de Estados Unidos MIL-A-18001-K (1993) o la Norma ASTM B418, tipo I.

NOTA 2 La aleación Z 2 se denomina como "zinc de alta pureza" y normalmente se suministra de acuerdo con la ASTM B418, tipo II.

NOTA 3 La aleación Z 4 es una aleación patentada que ha sido desarrollada para su uso a temperaturas elevadas.

Taula 9: Composició dels ànodes de Zinc en % en massa. FONT: UNE 12496:2013

## Ànode d'Alumini:

Juntament amb el zinc se'l denomina a l'alumini ànode de baix potencial, per a diferenciar-los del magnesi que amb -1,5 a -1,7 volts presenta un alt potencial. Malgrat les seves atractives característiques electroquímiques, l'alumini i els seus aliatges tendeixen a passivar-se en variats electrolits, a causa de la formació de capes compactes d'òxids sobre la seva superfície, per la qual cosa la seva aplicació en la protecció catòdica ha estat més limitada que el zinc i el magnesi. Nombroses recerques realitzades encaminades a la cerca de nous aliatges que no presentessin tal inconvenient, han donat com a resultat que avui dia es disposi de diversos aliatges útils per a protecció catòdica en variades condicions de servei, sent els principals elements que formen aliatge el Zn, Hg, Sn, In i Mg.

## Ànode de Magnesi:

Aquest material anòdic presenta dos inconvenients principals:

- Alt potencial de treball, la qual cosa limita el seu ús en mitjans molt conductors i on es requereix que el potencial de protecció no adquireixi valors molt negatius. Per a complir amb tal requisit, s'hauria de recórrer al control del potencial a partir trams resistius el que complica extraordinàriament el disseny de protecció.
- Gran tendència a l'acte corrosió, per formació de micropiles locals, i baix rendiment de corrent, aproximadament el 50%.

Elementos	Aleación A 1	Aleación A 2	Aleación A 3	Aleación A 4
Zn	2,0 – 6,0	3,0 – 5,5	4,75 – 5,75	0,15 máx.
In	0,010 – 0,030	0,016 – 0,040	0,016 – 0,020	0,005 máx.
Ga	–	–	–	0,092 – 0,110
Fe	0,12 máx.	0,09 máx.	0,06 máx.	0,08 máx.
Si	0,12 máx.	0,10 máx.	0,08 – 0,12	0,10 máx.
Cu	0,006 máx.	0,005 máx.	0,003 máx.	0,005 máx.
Cd	0,002 máx.	0,002 máx.	0,002 máx.	–
Otras impurezas (cada uno)	0,02 máx.	0,02 máx.	0,02 máx.	0,02 máx.
Otras impurezas (total)	0,1 máx.	0,1 máx.	0,05 máx.	0,05 máx.
Al	resto	resto	resto	resto

NOTA 1 La aleación A 1 se utiliza generalmente para aplicaciones marinas.

La aleación A 2 normalmente se usa para aplicaciones en alta mar.

La aleación A 3 normalmente se usa para agua profunda y aplicaciones de agua fría.

La aleación A 4 normalmente se usa para aplicaciones de baja tensión de transmisión.

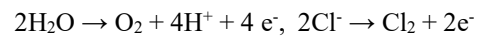
Taula 10: Composició del ànode d'alumini en % en massa. FONT: UNE 12496: 2013

A causa del primer d'aquests inconvenients, ha disminuït la seva utilització per a la protecció de molts equips marins; l'alta alcalinització de l'entorn de l'ànode i despreniment de gas hidrogen exigeix un reforçament del sistema de pintura en aquestes zones. El perill d'explosió ha fet igualment declinar el seu ús en la protecció interior de tancs de combustible.

### 1.7.2. Mètode de corrent imprès

S'utilitza un corrent continu (generalment produïda a partir de corrent altern mitjançant un transformador rectificador) en conjunció amb ànodes relativament inerts com ara el grafit, revestiments fins de platí, o òxids metàl·lics barrejats i activats sobre metalls com ara titani o niobi, aliatges de plom, ferro-sílíce, etc.; en alguns casos s'utilitza un ànode consumible constituït de ferralla de ferro o acer.

La majoria dels ànodes de corrent imprès són d'un tipus que no es dissolen fàcilment en la polarització anòdica, però mantenen reaccions alternatives que impliquen la descomposició del medi aquós o l'oxidació dels ions clorur dissolts en aquest mitjà, és a dir:



La figura 40 representa un sistema de protecció catòdica de corrent imprès en el qual s'utilitza un ànode inert en aigua de mar on es desenvolupen les reaccions secundàries que generen l'hidrogen i el clor.

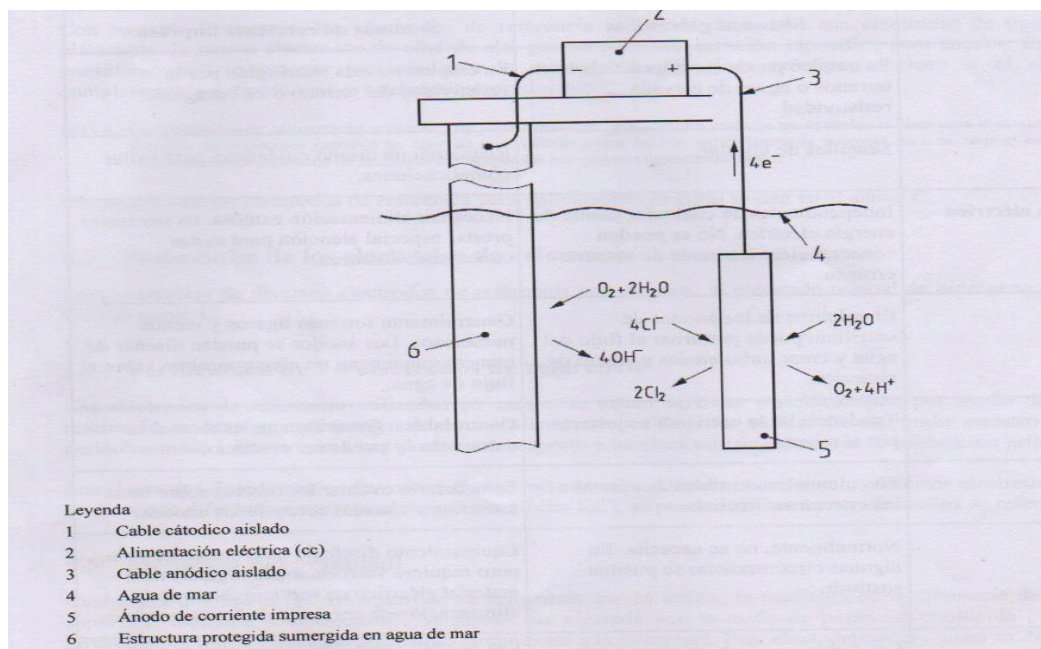


Figura 40: Representació d'una protecció catòdica de corrent impresa utilitzant un ànode en aigua de mar. FONT: UNE UNE-EN 12373:2014.

Els avantatges del sistema de corrent imprès són que és possible tenir una important tensió variable disponible, per la qual cosa es necessita instal·lar relativament pocs ànodes, fins i tot per a protegir grans estructures mancades de revestiment en mitjans que tinguin una resistivitat relativament elevada. La taula 11 proporciona una comparació de sistemes d'ànodes de sacrifici i de sistemes de corrent imprès.

	ÀNODES DE SACRIFICI	CORRIENT IMPRESA
<b>Característiques</b>	Metall protegit pel consum d'un metall més electronegatiu.	Corrents impresos usant transformador rectificador o una altra.
<b>Medi</b>	El seu ús pot ser impracticable en terrenys o aigües d'elevada resistivitat.	El seu ús no està restringit per la resistivitat del terreny o de les aigües.
<b>Font de Corrent</b>	Equivalència faradaica del metall de sacrifici.	Font de corrent continu de baix voltatge.
<b>Instal·lació</b>	Extremadament simple.	Més complexa.
<b>Ànodes</b>	El volum dels ànodes de sacrifici pot perturbar el flux de l'aigua i crear turbulències i efecte d'atracció.	Generalment són més lleugers i menys nombrosos. Els ànodes es poden dissenyar de manera que tinguin un efecte mínim sobre el flux d'aigua.
<b>Possibilitat d'interaccions secundàries</b>	Molt improbables si els ànodes estan ben distribuïts.	Grans estructures.
<b>Aplicacions viables</b>	Petites superfícies amb perills d'interacció.	Grans estructures.
<b>Control</b>	Tendència del corrent a ajustar-se per si mateixa.	Controlables. Generalment el control és automàtic i pot ser.
<b>Principals limitacions</b>	No viable en grans estructures (massa ànodes) o en sòls d'alta resistivitat. Es requereix reemplaçament.	No viable per a petites estructures pels alts costos d'instal·lació.
<b>Distribució de potencial</b>	Raonablement uniforme.	Varia. Màxima en el punt de drenatge i mínima en els punts més allunyats.
<b>Interacció</b>	Són menys susceptibles d'afectar les estructures veïnes.	És necessari avaluar els efectes sobre altres estructures situades a prop.
<b>Limitacions de corrent</b>	No pot aplicar-se en mitjans d'alta resistivitat.	Pot usar-se en medis d'alt nivell de resistivitat.
<b>Manteniment</b>	Normalment no es necessita. En algunes circumstàncies es poden substituir.	Equipament dissenyat per a un llarga vida, però requereix verificacions regulars del material elèctric en servei. Necessiten alimentació de corrent de forma contínua.
<b>Avaries</b>	Els ànodes són molt robustos i no gaire susceptibles de sofrir avaries mecàniques. Quan un sistema està compost per un gran nombre d'ànodes, la pèrdua d'alguns ànodes té escassa influència en el sistema. Les connexions han de resistir totes les forces aplicades a l'estructura. No és necessari l'aïllament elèctric dels cables.	Els ànodes són de construcció més lleugera i per això menys resistents a les avaries mecàniques. La pèrdua d'ànodes pot ser més crítica per a l'efectivitat del sistema. És obligatori l'aïllament elèctric total dels cables positius exposats a l'electròlit.

Taula 11: Comparació entre el mètode de ànodes de sacrifici i el mètode de la corrent impresa. FONT: Pròpia. Base: Norma UNE 12473: 2014.



Segons la Norma UNE 12499 (2003), els materials que poden emetre un alt corrent a una tensió baixa s'utilitzen com a ànodes de corrent imprès. El comportament de l'ànode en diferents solucions electrolítiques serà diferent i si és necessari, haurien d'obtenir-se detalls del comportament de l'ànode del seu fabricant. [57]

Els ànodes solubles s'utilitzen si els productes de reacció assumeixen funcions addicionals o si es necessita evitar la formació anòdica d'oxigen. Els ànodes solubles es consumeixen per acte corrosió i pel subministrament de corrent. Ha d'incloure's un factor d'utilització en la capacitat de corrent i en els càlculs de disseny de la vida útil de l'ànode.

Segons la norma UNE 12499 (2003), els materials que poden emetre un alt corrent a una tensió baixa s'utilitzen com a ànodes de corrent imprès. El comportament del mateix ànode en diferents solucions electrolítiques serà diferent i si és necessari, haurien d'obtenir-se detalls del comportament de l'ànode del seu fabricant. [57]

Els ànodes de corrent imprès comuns són (veure també taula 12):

- Ferrosilici (SiFe)
- Grafit
- Metalls preciosos com el platí (Pt)
- Recobriments de metalls preciosos sobre metall basi (per exemple, Pt, Anar, Pd en Tu, Nb, Ta).
- Recobriment d'òxid no metàl·lic sobre el metall basi.
- Recobriment de mescla d'òxids metàl·lics sobre un substrat metàl·lic
- Ànodes polimèrics

CARACTERÍSTICAS	TIPOS DE ÀNODOS					
Densidad gr/cm <sup>3</sup>	Ti Metal Mixed	Pt/Ti	Grafito	Pb/Ag	Fe/Si	Magnetita
	Oxides <sup>(*1)</sup>					
	04-jun	04-jun	01-mar	12	8	03-may
Densidad de corriente Normal mA/cm <sup>2</sup>	80-100	30-80	0,1-0,4	jun-18	01-feb	08-oct
Mg/A·año	04-may	6	250,1	68·10 <sup>3</sup>	250·10 <sup>3</sup>	1,5·10 <sup>3</sup>

Taula 12: Comparativa de diferents ànodes de corrent impresa. [40]

### **1.7.3. Elèctrodes de referència**

Segons la norma UNE 12473, (2014), per a determinar si una estructura està protegida adequadament és necessari mesurar el potencial material metàl·lic/aigua de mar. Per a això, s'han de realitzar connexions tant a l'estructura com a l'electròlit. La connexió a l'estructura és un simple contacte metàl·lic, però per a la connexió a l'electròlit és necessari introduir un conductor metàl·lic en aquest. Aquest conductor introdueix el seu propi potencial d'elèctrode, el qual s'inclou inevitablement en el valor mesurat. Aquesta situació es pot resoldre utilitzant un conductor el potencial d'elèctrode del qual sigui reproduïble i estigui definit; aquest dispositiu es denomina elèctrode de referència.

Els elèctrodes de referència utilitzats en camp (definit en el punt 4.6) són els elèctrodes de tipus plata/clorur de plata/aigua de mar o cobri/sulfat de coure. Aquests elèctrodes es consideren prou precisos per a la majoria dels fins pràctics. S'utilitzen per a mesurar els potencials estructura/electròlit o com a elèctrodes de consigna per a sistemes de control.

Quan l'elèctrode té les característiques que s'indiquen a continuació, es poden obtenir mesuraments prou precisos:

- Que permeti obtenir un corrent suficient perquè funcioni un mil·livoltímetre sense que variï significativament el seu potencial
- Que no degradi o contaminei el medi ambient.

Els elèctrodes de referència precisos utilitzen un electròlit reproduïble i ben definit, generalment diferent de l'electròlit en el qual es realitzen els mesuraments de potencial. Un elèctrode de referència de coure/sulfat de coure és el més precís i més adequat per a per a establir contacte amb el terreny i amb aigua dolça, però no es recomana per a ser utilitzat en aigua de mar o en altres electròlits que continguin clorurs, a causa de la seva alta contaminació amb els ions de clorurs.

Els elèctrodes de referència precisos per a monitorar i controlar sistemes de protecció catòdica marins i submarins són normalment elèctrodes de plata/clorur de plata/aigua de mar. El potencial d'aquests depèn del contingut de clorur de l'aigua on se submergeixen.

#### 1.7.4. Mesurament del potencial

Qualsevol que sigui el tipus d'elèctrode de referència que s'utilitzi, el mesurament de la diferència de potencial entre la superfície metàl·lica i l'elèctrode es pot veure afectada per la caiguda de potencial produïda pel corrent de protecció en fluir través de l'electròlit circumdant a l'estructura. Aquest efecte, conegut com a caiguda òhmica, fa que el potencial mesurat sigui més negatiu que el potencial real en la interfície metall/electròlit. La caiguda òhmica depèn de la resistivitat de l'electròlit, i és particularment important en estructures enterrades.

Normalment, els errors deguts a la caiguda òhmica es consideren insignificants en aplicacions marines, especialment quan s'utilitzen ànodes de sacrifici. No obstant això, pot ser necessari realitzar mesuraments de potencial utilitzant tècniques "OFF instantani" o tècniques de "OFF instantani en proveta", o després de la interrupció dels sistemes de corrent imprès, a fi de demostrar adequadament que s'han aconseguit els criteris de protecció, especialment en aigües salobres i en la proximitat d'ànodes de corrent imprès (Norma UNE 12473, 2014).

#### 1.7.5. Consideracions del disseny.

En dissenyar un sistema de protecció catòdica és important garantir que la totalitat de l'estructura està protegida adequadament, i que no queden zones sotmeses a una sobre polarització important, a fi d'evitar els següents efectes adversos més comuns:

- Fissuració afavorida pel medi ambient (veure 1.7.4.).
  - Fragilització per hidrogen (veure 1.7.4.2.).
  - Corrosió fatiga (veure 1.7.4.4.).
- Corrosió localitzada
  - Corrosió per esquerdes (veure 1.7.2.2.).
- Corrosió galvànica (veure 1.7.4).

Quan s'utilitzen ànodes de sacrifici, que són fonts de corrent de baixa tensió, no és massa difícil aconseguir una distribució raonablement uniforme del corrent del corrent, sempre que sigui possible distribuir els ànodes de manera proporcional a l'àrea de superfície exposada.

No obstant això, poden aparèixer dificultats si la superfície d'acer a protegir és important i existeixen restriccions quant a la ubicació dels ànodes (per exemple, en la proximitat de nusos, etc.); en aquestes circumstàncies podria ser més avantatjós l'ús de revestiments.

Segons la Norma UNE 12473 (2014), els ànodes de corrent imprès es poden considerar com una font puntual d'alta intensitat. En el disseny és necessari tenir en compte això a fi d'aconseguir l'adequada protecció remota dels ànodes, sense una sobre polarització local important d'aquests. A fi d'aconseguir l'adequada distribució del corrent de protecció, podria ser avantatjós considerar l'ús de pantalles dielèctriques prop dels ànodes o instal·lar els ànodes a una certa distància de l'estructura.

La informació que es requereix per a dissenyar un sistema de protecció catòdica complet depèn en gran manera del tipus d'estructura, de la seva complexitat i de les seves condicions de funcionament. En general, la informació que es requereix inclou les dades tècniques i de funcionament de l'estructura i la necessitat de corrent de la protecció.

### **1.7.6. Dades tècniques i funcionament**

#### **1.7.6.1. *Vida prevista***

La Norma UNE 12473 (2014), indica que en moltes estructures, com ara estructures marítimes fixes i canalitzacions, el sistema hauria de poder protegir l'estructura durant tota la seva vida de disseny prevista, però per a vaixells i altres estructures flotants que es poden posar en dic sec i que estan protegides amb ànodes de sacrifici, la vida de disseny del sistema hauria de coincidir amb un interval apropiat d'estada en dic sec.

La vida de disseny del sistema de protecció catòdica també hauria d'incloure els períodes en què l'estructura o el casc no està en funcionament, però sí que està exposada a l'aigua de mar, com ara el temps de construcció, d'assajos, de magatzematge, de transport, d'instal·lació, etc.

#### **1.7.6.2. *Materials de construcció***

El tipus de material a protegir s'ha de tenir en consideració, atès que els acers d'alta resistència, els acers inoxidable dúplex i determinats aliatges no ferroses són susceptibles de sofrir una disminució de les seves característiques mecàniques quan se sotmeten a potencials negatius excessius (sobre polarització), i s'haurien de respectar les

recomanacions que més endavant es parlarà . Això pot influir en la selecció del sistema, en l'emplaçament dels ànodes i en el possible ús de revestiments o pantalles dielèctriques.

#### **1.7.6.3. Superfícies a protegir**

La Norma UNE 12473 (2014), indica que totes les superfícies exteriors submergides (incloses les situades per sota del nivell mitjà de l'aigua de les estructures marines fixes) s'haurien de protegir catòdicament. Això inclou l'estructura principal i totes les seves parts annexes.

És normal fer referència a la superfície total submergida per a considerar la superfície del càtode, i aquesta es pot calcular a partir de plans de fabricació totalment delimitats i detallats. No obstant això, una superfície alterada per la corrosió o per la intempèrie estarà rugosa i la superfície real pot ser significativament major. S'hauria d'afegir un suplement de superfície per a tenir en compte els elements de l'estructura que estan enterrats i en continuïtat elèctrica amb l'estructura.

#### **1.7.6.4. Revestiments protectors**

Encara que els revestiments orgànics no són del tot impermeables a l'oxigen i l'aigua, sí que restringeixen la corrosió quan s'apliquen a la superfície d'un metall. La corrosió sobre una superfície pintada no es forma sota el revestiment intacte sinó en la base dels defectes i en petits orificis. Si la protecció catòdica s'aplica a una superfície pintada, el revestiment actua com una barrera resistent al pas del corrent i aquesta es dirigeix cap als defectes i els petits orificis on es produeixin picades. En termes de protecció catòdica, l'efecte dels revestiments consisteix a reduir l'àrea superficial d'estructura exposada i en conseqüència, reduir el corrent global requerit, reduir el corrent global requerit per a la protecció i millorar la distribució d'aquest corrent (Norma UNE 12473, 2014).

#### **1.7.6.5. Disponibilitat d'energia elèctrica**

L'ús d'un sistema de protecció catòdica de corrent imprès depèn de la disponibilitat d'una alimentació permanent d'energia elèctrica.

#### **1.7.6.6. Limitacions de pes**

En el cas d'estructures marines fixes, la flotabilitat pot ser un factor important que pot influir en el tipus de sistema catòdica a utilitzar. En aquest cas, cal tenir en compte que

els sistemes de protecció catòdica no són excloents, per la qual cosa pot combinar-se protecció galvànica per ànodes de sacrifici i protecció catòdica impresa, tenint present el revestiment com a pantalla dielèctrica. A aquests sistemes complexos se'ls denomina sistemes híbrids, i poden ajudar significativament a la reducció del pes estructural.

#### **1.7.6.7. Estructures adjacents**

La presència d'altres estructures en les proximitats pot donar lloc a corrosió induïda per corrents vagabunds o una fugida de corrent en l'estructura a protegir. Les estructures adjacents haurien d'estar aïllades de l'estructura principal, o, connectades a aquesta, amb la condició que es tingui en compte la superfície que aquestes estructures representen en la superfície total a protegir (Norma UNE 12473, 2014). [57]

En aquest punt és important destacar la definició de càtode estrany. Segons la norma UNE 12499 (2003), s'entén per càtode estrany la part metàl·lica unida a l'estructura protegida que presenta un potencial de corrosió lliure més positiu que l'estructura protegida i que requereix d'una densitat de corrent major que l'estructura protegida per a aconseguir la polarització catòdica.

Si la protecció catòdica de l'estructura es veu afectada negativament per aquests càtodes, llavors s'ha d'ajustar el número i posició dels ànodes de protecció catòdica i s'ha de dur a terme un aïllament elèctric de parts de l'estructura.

#### **1.7.6.8. Factors que afecten al disseny de la instal·lació**

### **Disseny**

Per a realitzar el disseny ha de disposar-se de la següent informació (Norma UNE 12499, 2003): [57]

- Plans de construcció de l'estructura a protegir amb detalls dels materials utilitzats.
- Composició química del mitjà amb detalls de les seves possibles fluctuacions
- Detalls de les condicions de servei amb detalls de les seves fluctuacions: altura del mitjà, temperatura, velocitat, pressió
- La selecció del recobriments hauria de tenir en compte la compatibilitat amb el sistema de protecció catòdica proposat.

Ha de tenir-se en compte les següents condicions en el disseny de l'estructura a protegir:

- L'enllaç equipotencial dels components per mitjà de connexions elèctriques metàl·liques
- La utilització de brides aïllants i maniguets per a cables en ànodes, elèctrodes corrent impresa i de referència.
- La provisió de punts de connexió per a ànodes i, si és necessari, càtodes.
- On existeixi qualsevol risc d'acumulació de gas, la instal·lació de sistemes de ventilació controlada.

### **Metalls diferents**

Si es protegeixen diferents metalls mitjançant protecció catòdica, el metall menys noble ha d'aconseguir el seu potencial de protecció. És molt important que els potencials de protecció dels diferents metalls no siguin incompatibles, (Norma UNE 12499, 2003). [57]

### **Conductivitat de la solució electrolítica**

És necessari que existeixi un contacte electrolític constant entre les superfícies de l'estructura protegida i els ànodes de protecció per a assegurar una distribució de corrent suficient. No és possible la protecció catòdica interna quan el líquid no és conductiu íntegrament.

### **Continuïtat elèctrica**

L'estructura a protegir ha de ser elèctricament contínua. Els components individuals de l'estructura han d'estar connectats amb unions, ponts metàl·lics de baixa resistència.

### **Distribució de corrent**

La distribució de corrent ha de ser capaç d'aconseguir l'interval de potencial de protecció en cada punt de tota l'estructura. Els factors que milloren la distribució de corrent són:

- L'alta conductivitat de la dissolució electrolítica.
- L'alta resistència de polarització (la resistència de la polarització pot millorar-se mitjançant un recobriments).
- Superfície i posició dels ànodes
- Disseny de l'estructura a protegir

## **Propietats del recobriments**

Quan s'aplica un recobriments, és necessari examinar si el recobriments presenta les propietats requerides durant un temps prou llarg sota les condicions de servei. Els possibles danys del recobriments són els següents (Norma UNE 12499, 2003). [57]

- Enlairaments.
- Enlairaments catòdics en els defectes del recobriments
- Recolzament en el recobriments

Quan la protecció catòdica s'aplica amb un recobriments existent, el disseny ha de realitzar-se considerant la futura deterioració del recobriments.

La resistència a la deterioració depèn del tipus de recobriments i del tipus de preparació de la superfície. L'experiència obtinguda a partir de la protecció catòdica externa d'estructures, no pot ser aplicada a la protecció catòdica interna d'estructures pintades o recobertes.

## **Densitat de corrent**

Segons la Norma UNE 12499 (2003), la densitat de corrent necessari per a la protecció de superfícies metàl·liques depèn dels següents paràmetres: [57]

- Composició de la solució electrolítica
- Condicions de servei (per exemple, cabal, temperatura).
- Propietats del recobriments incloent la permeabilitat del recobriments a l'aigua, ions i oxigen i la seva conductivitat elèctrica.
- Característiques de l'estructura

## **Efectes laterals**

Segons la Norma UNE 12499 (2003), les reaccions electroquímiques poden produir les següents condicions: [57]

- Evolució de gasos
- Productes de corrosió dels ànodes
- Desoxigenació
- Productes catòdics en l'estructura protegida



És necessari examinar que reaccions electroquímiques ocorren en l'estructura protegida i en els ànodes i en quina mesura aquestes reaccions interfereixen amb la funció de l'objecte protegit, per exemple respecte al següent:

- Una contaminació del mitjà mitjançant productes de reacció del material dels elèctrodes.
- Una reacció electroquímica dels constituents del mitjà.
- Una acumulació de gasos que interfereixen, en particular l'hidrogen.

Els canvis en la solució electrolítica causats per les reaccions electroquímiques no han d'alterar unes certes propietats de la solució electrolítica (per exemple, potabilitat, concentració iònica del metall).

Per exemple, el consum d'oxigen del càtode pot causar condicions anaeròbiques en aigua potable, les quals, en combinació amb bacteris reductors de sulfats, donen lloc a mala olor deguda al sulfur d'hidrogen. Depenent de l'extensió d'aquests possibles danys, en el disseny ha de tenir-se en consideració el següent:

- Tipus i superfície dels ànodes.
- Reducció dels requisits de densitat del corrent per l'ús d'un recobriments.
- Sortida de gasos
- Densitat de corrent anòdic

### **1.7.7. Efectes dels factors mediambientals sobre la demanda de corrent**

Segons la norma UNE 12473 (2014), per a avaluar les densitats de corrent necessàries, és necessari tenir en compte les característiques físiques i químiques del medi ambient i la velocitat amb què tals característiques varien diària o estacionalment. Els factors principals que afecten els requisits de la densitat de corrent en aigua de mar són la velocitat del moviment de l'aigua, la salinitat, el pH, la temperatura i la profunditat de l'aigua, així com els seus efectes sobre el contingut d'oxigen dissolt, els dipòsits calcaris i les incrustacions marines.

#### **1.7.7.1. Oxigen dissolt**

Un dels factors més importants a tenir en compte en el disseny de protecció catòdica és l'oxigen dissolt en aigua de mar. Es considera que existeix una correlació directa entre el

contingut d'oxigen dissolt i la velocitat de corrosió en aigua de mar, i que la densitat de corrent catòdic que es requereix per a proporcionar protecció contra la corrosió és proporcional a la velocitat amb què l'oxigen es difon en la superfície de l'acer.

El contingut d'oxigen dissolt en aigua de mar varia considerablement amb la profunditat de l'aigua i la localització geogràfica, i atès que la solubilitat és una funció de la temperatura i de la salinitat, també pot variar amb l'estació climatològica.

#### **1.7.7.2. Velocitat**

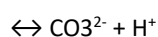
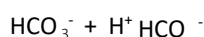
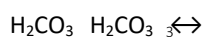
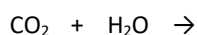
Atès que la velocitat amb què l'oxigen dissolt arriba a la superfície de l'acer es controla per difusió, tot augment de velocitat suposarà un augment de les necessitats de densitat de corrent de protecció catòdica de l'acer, en particular durant la fase inicial de polarització, abans que els dipòsits calcaris o de brutícia tinguin temps de formar-se.

#### **1.7.7.3. Dipòsits calcaris**

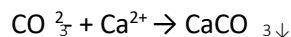
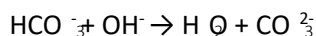
Segons la Norma UNE 12473 (2014), els dipòsits calcaris ben formats redueixen la velocitat de difusió de l'oxigen dissolt en l'aigua de mar cap a les superfícies d'acer, i redueixen per tant la densitat de corrent necessari per a mantenir la polarització catòdica.

Els principals components dels dipòsits calcaris són polimorfs del  $\text{CaCO}_3$  i calcita, així com el compost de magnesi  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (brucita), però la composició real depèn de factors com ara el pH, la temperatura, la densitat de corrent, la velocitat de l'aigua i la profunditat de la mar en aquest punt. L'aigua de mar pren  $\text{CO}_2$  de l'atmosfera i també d'organismes marins pròxims a la superfície de la mar, la qual cosa provoca una sobresaturació de  $\text{CaCO}_3$ .

Les reaccions d'equilibri entre el diòxid de carboni, el carbonat i l'aigua de mar es poden expressar segons les següents reaccions químiques:



Amb l'adició d'ions OH<sup>-</sup> al sistema, a través dels processos catòdics, es poden produir les següents reaccions:



Aquesta reacció dona la formació de precipitats sobre les superfícies catòdiques.

En la gamma de densitat de corrent on es formen els dipòsits, aquests són predominants de carbonat càlcic. En augmentar la densitat de corrent, els dipòsits comencen a ser més fins i més compactes i, per tant, millora la protecció. S'accepta generalment que s'hauria d'aplicar una densitat de corrent inicial elevat sobre l'acer no polaritzat immediatament després de la seva immersió, a fi d'afavorir una polarització catòdica ràpida i la formació d'un dipòsit calcari altament protector. No obstant això, per a una densitat de corrent molt elevat, el dipòsit podria tenir un elevat contingut de magnesi. Aquest es presenta principalment en forma de MgCO<sub>3</sub>. El Mg(OH)<sub>2</sub> és inestable en aigua de mar i no precipita per a valors de pH inferiors a 9,7. En general, els dipòsits rics en carbonat càlcic són més protectors que els rics en magnesi (Norma UNE 12473, 2014).

#### 1.7.7.4. *Temperatura*

La temperatura té una influència significativa en la resistivitat de l'aigua de mar, en el contingut d'oxigen dissolt i en la formació de dipòsits calcaris. Unida a la salinitat de l'aigua de mar, té un efecte important sobre la resistivitat de l'aigua de mar, i això està directament relacionat amb la resistència efectiva dels ànodes dels ànodes de sacrifici, en el disseny dels sistemes de protecció catòdica s'hauria de tenir en compte la temperatura.

L'efecte de la temperatura sobre la densitat de corrent límit és complex, ja que la solubilitat de l'oxigen varia en sentit invers a la temperatura, mentre que el coeficient de difusió de l'oxigen varia en el mateix sentit. L'efecte global podria ser que, en augmentar la temperatura, augmenti lleugerament la necessitat de densitat de corrent. La situació es complica a més per l'augment de solubilitat del CaCO<sub>3</sub>, en disminuir la temperatura. Això reduirà la naturalesa protectora dels dipòsits i augmentarà potencialment la densitat de corrent necessari per a la protecció (Norma UNE 12473, 2014).

#### **1.7.7.5. Salinitat**

L'efecte principal de la salinitat en la protecció catòdica és la seva influència sobre la resistivitat de l'aigua de mar i en general, per a una temperatura donada, com més elevada sigui la salinitat, més baixa serà la resistivitat i el contingut d'oxigen dissolt. Per tant, l'augment de salinitat és beneficiós ja que redueix el nivell d'oxigen dissolt i la resistència de l'ànode.

#### **1.7.7.6. pH**

En alta mar, el pH de l'aigua varia aproximadament de 7,4 a 8,4. El coneixement del valor del pH del medi on es troba l'estructura a protegir contra la corrosió, és molt important, ja que depenent d'ell, l'estructura estarà més o menys exposada al fenomen corrosiu.

#### **1.7.7.7. Incrustacions marines**

La incrustació afegeix pes a l'estructura i poden degradar el revestiment. La incrustació marina redueix la superfície de l'acer efectiva exposada a l'aigua de mar, impeding la difusió de l'oxigen per la superfície i reduint, per tant, la densitat de corrent requerit per a la protecció. No obstant això, d'altra banda, els organismes que originen aquesta incrustació poden quedar atrapats en els dipòsits calcaris, provocant buits en el dipòsit quan aquests moren. El micro ambient creat per la mort dels microorganismes pot provocar condicions que afavoreixen una corrosió més ràpida.

#### **1.7.7.8. Profunditat**

La profunditat s'associa normalment amb variacions de la temperatura, de la solubilitat de l'oxigen i de la velocitat de difusió del diòxid de carboni, i d'altres paràmetres mediambientals. Aquestes variacions haurien de tenir-se en compte en el disseny, si és el cas.

#### **1.7.7.9. Variacions estacionals i tempestes**

Les variacions de temperatura de l'aigua prop de la superfície i les tempestes, que amb freqüència estan associades als canvis climàtics estacionals, poden provocar

pertorbacions en els dipòsits calcaris, la qual cosa pot conduir a un augment de la densitat de corrent necessari en estructures situades prop de la superfície.

### **1.7.8. Efectes secundaris de la protecció catòdica**

L'aplicació catòdica pot donar lloc a efectes secundaris com ara:

- **Alcalinitat:** Segons la Norma UNE 12473 (2014), l'alcalinitat pot deteriorar per saponificació els revestiments alquídics amb base oliosa i els revestiments oli-resinosos.
- **Fragilització per hidrogen:** Està generalment admès que l'aplicació de protecció catòdica a potencials més negatius genera hidrogen atòmic que, com ja s'ha comentat, a causa de la seva petita grandària es pot difondre a través de la matriu metàl·lica allí on l'hidrogen molecular, molt més gran, no pot fer-lo. Aquest fenomen danya molt seriosament a qualsevol tipus de revestiment.
- **Clor:** Per a una instal·lació de protecció catòdica per corrent imprès en un medi marí, les reaccions de l'ànode donen com a resultat la formació electroquímica de clor. En general, l'aigua de mar és lleugerament alcalina i el clor contribuirà a la formació d'hipoclorit sòdic i àcid hipoclorós. Sota condicions d'estancament, el clor es podria transformar en gas i representar un perill per al personal d'inspecció i manteniment (Norma UNE 12473, 2014).

### **1.7.9. Utilització de la protecció catòdica associada als revestiments**

L'aplicació de recobriments com a mesura de protecció contra la corrosió és el mètode més usat, ja que, a més de protegir, també pot crear propietats addicionals en la superfície del material.

Abans d'aplicar qualsevol recobriments, s'ha de preparar la superfície metàl·lica per a eliminar possibles òxids i productes de corrosió, greixos i altres contaminants, així com possibles defectes superficials.

### **1.7.9.1. Recobriments metàl·lics**

Aquests protegeixen el metall basi, i a més proporcionen propietats mecànica addicionals, com a duresa, conductivitat, resistència a la fricció, etc. Es poden dividir en recobriments catòdics, que són més nobles que el metall basi, i en recobriments anòdics, que són menys nobles que el substrat.

Els recobriments catòdics funcionen com una barrera física que separa al metall basi del mitjà agressiu. La principal característica que han de complir aquests recobriments és que no sigui porós. Una alta porositat fa que es generin zones catòdiques en el substrat, i pot ocórrer un atac ràpid. En el cas dels recobriments anòdics, si arriba a existir una falla o la presència de porus en aquest, la zona exposada del substrat metàl·lic serà protegida catòlicament pel recobriment anòdic.

Els recobriments metàl·lics poden obtenir-se per diferents mètodes. Entre els principals es troben: immersió en metall fos, metal·lització, electrodeposició, deposició química, i dispersió (Bardal, 2004.). [52]

Els seus camps d'aplicació són:

- Protecció contra la corrosió atmosfèrica,
- Indústria alimentària
- Xarxes de distribució d'aigua,
- Indústria elèctrica,
- Embellidors, decoració d'interiors,
- Recobriments refractaris i resistents a l'abració...

### **1.7.9.2. Recobriments inorgànics**

Posseeixen una alta resistència química, i molt bones propietats fisicoquímiques, encara que solen tenir una baixa adherència amb el substrat.

Segons Bardal (2004), els recobriments d'esmalts s'utilitzen per a protecció d'acer, acer gris, coure, i altres metalls. L'esmalt vidriat és suau, químicament resistent a mitjans agressiu, bona resistència mecànica, resistent a la fricció i no és combustible. Són fràgils i tenen molt poca tolerància a la deformació. [52]

Alguns són susceptibles davant els xocs tèrmics. La seva capacitat de protecció radica principalment en el seu efecte de barrera entre el substrat i el mitjà.

Els recobriments de conversió són compostos químics de metalls que es generen en la superfície del substrat, a causa de l'acció d'agents químics o al pas d'un corrent elèctric. Aquests comprenen els tractaments per fosfats, cromats i òxids. La fosfatació de l'acer es realitza exposant la superfície de l'acer a una solució d'àcid fosfòric amb fosfats de Zn i Mn (Bardal, 2004). [52]

El cromatat s'usa àmpliament per a recobrir metalls no ferrosos, particularment Al i Zn. L'oxidació de l'alumini es coneix com anoditzat, i s'aconsegueix gràcies a la polarització anòdica.

Els recobriments ceràmics es poden aplicar amb les tècniques de polvorització, ja sigui amb el mètode de la flama o amb plasma, depenent del punt de fusió del material ceràmic de recobriments. S'empra primordialment per a prevenir la corrosió i el desgast en alta temperatura, i per a aïllar tèrmicament (Bardal, 2004). [52]

Els recobriments de morter, ciment i concret posseeixen un coeficient d'expansió tèrmica molt similar a la de l'acer, i es poden reparar fàcilment i a un baix cost. Es poden aplicar en canonades, tancs i contenidors metàl·lics, i en construccions exposades a condicions atmosfèriques o subterrànies.

Els seus camps d'aplicació són:

- Aplicacions decoratives.
- Senyals de trànsit.
- Panells d'arquitectura.
- Recobriments de tancs.
- Baños i equips domèstics.
- Dipòsits i conduccions d'aigua.
- Les capes de conversió, excepte l'anoditzat dels aliatges d'alumini, se solen emprar només com a protecció temporal o base de pintures.

### **1.7.9.3. Recobriments de pintures orgàniques**

Segons Bardal (2004), l'ús de les pintures com a recobrint és el mètode més comú de prevenció de la corrosió. Una pintura anticorrosiva està composta d'un aglutinant, pigments, un solvent/diluent, dispersors i un nombre variable d'additius addicionals, com ara antioxidants i assecants, entre altres. [52]

En general les pintures tenen un baix cost, són de fàcil aplicació, i com a mètode de protecció es pot combinar amb qualsevol dels vists anteriorment, a més de que són fàcils de restaurar. Els principals desavantatges de les pintures són la seva baixa resistència tèrmica, la seva tendència a degradar-se amb el temps, i en general una baixa resistència química en solucions agressives.

En els sistemes de recobriments de pintura es poden reconèixer tres seccions o capes: base primària o “primer”, capa intermèdia, i capa superior o acabat. Els “primers” contenen pigments que brinden cert grau d'inhibició o de protecció catòdica al substrat. Les pintures contenen pigments de colors i dispersors que poden ajudar a millorar l'efecte de barrera del sistema de recobriments.

El “primer” és el més important recobrint en els sistemes de pintures, perquè està en contacte directe amb l'estructura metàl·lica i ha de formar la barrera física entre aquesta i l'ambient. Ha de tenir com a característiques principals una alta adhesió, cohesió, força d'enllaç, distinció o flexibilitat, dens, llis i amb porus molt petits.

Un pigment molt emprat en els “primers” és el fosfat de zinc. El zinc en pols brinda protecció catòdica al substrat metàl·lic quan la seva concentració és prou alta. D'altra banda, els pigments en l'acabat donen color i protegeixen l'aglutinant del mal per llum ultraviolada (Bardal, 2004). [52]

Els seus camps d'aplicació són:

- Encara que l'aplicació més estesa és contra la corrosió atmosfèrica, el nombre de sistemes i qualitats és tan enorme, que existeixen solucions adequades per a protegir metalls submergits en molts medis naturals i industrials
- Poden protegir per simple exclusió del mitjà o combinar aquesta acció amb altres mecanismes, com la inhibició o la protecció catòdica.



#### **1.7.9.4. Recobriments de goma, cautxús, polímers i grasses olis anticorrosius**

Segons Raichev, Veleva i Valdez (2009), els recobriments de goma són substàncies a base de resines sintètiques (polièster, poliuretà, resina d'epòxid, acrílic), sòlides i amb alt pes molecular. Tenen una bona adherència, són resistents a l'abradió, poc permeables, s'expandeixen i contreuen amb les variacions tèrmiques, són resistents a la majoria de les substàncies químiques inorgàniques i àcids orgànics. El seu desavantatge principal és la seva baixa resistència tèrmica (93 °C) i la seva tendència a l'envelliment. [53]

El cautxú emprat com a recobrint pot ser d'origen natural o sintètic. El cautxú natural s'obté a partir del làtex, no obstant això, la seva producció natural no cobreix totes les necessitats de la indústria, per la qual cosa més de la meitat del cautxú que s'empra actualment és d'origen sintètic.

Els recobriments de polímers tenen una alta resistència química a l'aigua, condicions atmosfèriques i a químics agressius; s'empren en aïllaments tèrmics i elèctrics, i brinden una bona aparença. Els seus desavantatges principals són la seva baixa resistència tèrmica i envelliment ràpid. Com a recobriments anticorrosius s'usen polímers termoplàstics, en forma de plaques, pólvores, pastes, làmines, solucions i suspensions. També s'empren resines termoreactives en forma líquida, que s'apliquen amb polvorització o per mitjans electroestàtics.

Els olis i greixos anticorrosius són un mitjà temporal de protecció, i s'usen durant l'emmagatzematge i transport de metalls, maquinària, peces i equips.

Tenen un baix cost, menor que les pintures, la preparació de la superfície abans de la seva aplicació no ha de ser tan acurada, es remouen fàcilment després d'un temps d'ús, i se'ls poden addicionar inhibidors (Raichev, Veleva i Valdez, 2009). [53]

### **1.8. CRITERIS PER A LA PROTECCIÓ CATÓDICA**

Se segueix la metodologia en la Norma de Referència de Petrolis Mexicans, PEMEX, NRF-047- PEMEX-2014. [55]

Per a protegir catòdicament conductes i o estructures d'acer al carboni enterrades o submergides, s'ha de complir com a mínim amb un dels següents criteris:

a) Canonades o estructures en general enterrades. Un potencial estructura-electròlit o mitjà corrosiu mesurat en la superfície d'un terrenys, el valor dels quals ha de ser igual o més negatiu que

-0,850 V i no més negatiu que -1,200 V per a evitar danys al recobriment. Aquest potencial s'ha de mesurar respecte a l'elèctrode de referència de Cu/CuSO<sub>4</sub>, amb el sistema de protecció catòdica encès i el corrent elèctric circulant en el circuit, per a minimitzar la caiguda ANAR a l'elèctrode de referència s'ha de col·locar el més a prop possible de la canonada.

Tal interpretació vàlida solo s'ha d'aplicar a sistemes de protecció catòdica a base de corrent imprès i no s'ha d'utilitzar en sistemes de protecció catòdica amb ànodes de galvànics o sistemes combinats de corrent imprès i ànodes galvànics, a causa de la impossibilitat d'interrompre simultàniament totes les fonts externes de corrent de protecció de corrent de protecció catòdica provinent dels ànodes.

b) Canonades o estructures amb ànodes galvànics d'alumini. Un potencial estructura-electròlit o mitjà corrosiu el valor del qual ha de ser igual o més negatiu que -0,800 V quan estan immerses en aigua de mar o un valor igual o més negatiu que -0,900 V quan estan enterrades en el llit marí amb activitat de bacteris sulfat reductores (BSR) i/o temperatures majors de 60 °C i en tots dos casos, no més negatiu que -1,100V per a evitar danys al recobriment. Aquest potencial s'ha de mesurar respecte a un elèctrode de referència Ag/AgCl en aigua de mar, els valors que s'estableixen es van determinar en aigua de mar amb una resistivitat de 30 Ω·cm.

c) Conductes o estructures en sòls d'alta resistivitat. Un potencial estructura-electròlit o mitjà corrosiu, determinat en funció de la resistivitat de l'electròlit on se situen, conforme amb els valors de la taula següent:

Potencial (V) vs electrodo Cu/CuSO <sub>4</sub>	Resistividad del suelo (ρ) en Ω·m (Ω·cm)
Igual o más negativo que -0,750	1.00 (10.000) < ρ < 1.000 (100.000)
Igual o más negativo que -0,650	ρ ≥ 1.000 (100.000)

Taula 13: Potencial estructura-electròlit vs resistivitat del electròlit. FONT: Numeral 5.3.2.1 ISO 15589-1:2003

- d) Canvi mínim de 0,100 V en el potencial de canonades de conductes o estructures, més negatiu que el valor de potencial estructura-electròlit mesurat sense protecció catòdica (OFF). Aquest canvi de potencial s'ha de mesurar entre de manera immediata en apagar el sistema de protecció catòdica ja que correspon a la diferència de potencial entre el valor de potencial que es mesura amb el sistema de protecció catòdica apagat instantàniament o "instant OFF" i el valor de potencial natural que es mesura mantenint el sistema de protecció catòdica apagat (OFF), tots dos amb un elèctrode de referència de Cu/CuSO<sub>4</sub>.

## 1.9. CÀLCULS A SEGUIR

En aquest apartat s'explicaran tots els càlculs que es duran a terme per tal d'obtenir una solució vàlida del problema inicial. Es seguirà la metodologia en la Norma de Referència de Petrolis Mexicans, PEMEX, NRF-047- PEMEX-2014. En el procediment de càlcul de la protecció catòdica s'utilitzarà el mètode de protecció galvànica o per ànodes de sacrifici i el de corrent imprès o imposat. L'objectiu de tots dos és el mateix, determinar el tipus i nombre d'ànodes més adequat per a la protecció. [55]

En el mètode de corrent imprès, se seleccionen a més els components de la instal·lació del circuit complet, com ara els elèctrodes de referència o les provetes.

Els càlculs del tipus i número d'ànode es poden realitzar per dos procediments, el d'intensitat i el de massa. En el procediment d'intensitat per a determinar el nombre d'ànodes és necessari obtenir la demanda de corrent total del sistema, i relacionar-la amb la capacitat de corrent de l'ànode. En canvi en el segon mètode, el de la massa, per al càlcul del nombre d'ànodes és necessari obtenir la massa total per a protegir el sistema, i relacionar-lo amb la massa total per a protegir el sistema, i relacionar-lo amb la massa neta de l'ànode.

Dels dos procediments es prenen els valors més desfavorables, que generalment són els obtinguts pel procediment de la massa. En el desenvolupament de l'estudi, els càlculs d'ànodes de sacrifici es realitzaran pel mètode de massa. En els càlculs de protecció mitjançant corrent imprès el nombre d'ànodes es calcularà pel mètode àmpliament més emprat, el mètode d'intensitat.

### 1.9.1. Càlcul de la corrent necessària per a la protecció

La demanda de corrent total s'ha de determinar en funció de tres valors de densitat de corrent que es demanda a una condició inicial, mitjana i final, els quals corresponen respectivament a la densitat de corrent requerit per a poder polaritzar una canonada en un període d'1 a 2 mesos com a condició inicial, a la densitat de corrent necessari per a mantenir la polarització de la canonada o estructura com a condició mitjana i al corrent necessari per a una eventual repolarització que pugui ser necessària prop del final de la vida útil de la canonada o estructura com a condició final.

A efectes pràctics per al càlcul de la demanda de corrent, s'utilitza la condició mitjana que és la requerida per a mantenir la polarització.

Aquesta es calcula mitjançant l'expressió (1):  $I_{cm} = A \cdot f_c \cdot i_c$  On:

$I_{cm}$  = Demanda de corrent mitjà (A)

A = Àrea total de la superfície expressada en d'una secció expressada en m<sup>2</sup>.

$i_c$  = densitat de corrent per a condició mitjana, expressada en A/m<sup>2</sup>

$f_c$  = factor de mal del recobriment per a condicions mitjana o final (adimensional)

La demanda de corrent d'una canonada s'incrementa a mesura que el recobriment es deteriora, degrada o desprèn, per la qual cosa el sistema de protecció catòdica ha de subministrar el corrent necessari per a complir algun dels requeriments anteriorment comentats, a mesura que el recobriment es deteriora.

Per a preveure l'anterior, s'estableix el concepte de factor de mal del recobriment ( $f_c$ ), que es defineix com el quocient que resulta de dividir la relació de densitat de corrent requerit per a polaritzar una superfície metàl·lica d'acer recoberta, entre la densitat de corrent de la superfície metàl·lica de l'acer nu. Aquest factor inclou la variació respecte al temps que presenta la densitat de corrent de protecció, a causa de la deterioració del recobriment.

El factor de mal a condició mitjana es calcula mitjançant l'expressió (2):

$$f_c = f_i + (0,5 \cdot \Delta f \cdot t)$$

On:

$f_c$  = Factor de desgast del recobriment, calculat a condició mitjana, adimensional.

$f_i$  = Factor de desgast inicial del recobriment, calculat inicial, adimensional.

$\Delta f$  = Increment mitjà anual del factor de mal en el recobriment, adimensional.

$t$  = vida útil expressada en anys

Tipo de recubrimiento	Factor $f_i$	$\Delta f$
Epoxídico adherido por fusión "Fusión-Bonded Epoxy FBE" o epóxico líquido	0,020	0,001
· Polietileno extruido tricapa, incluye primario FBE, polietileno y polipropileno PP · Cintas o mangas termo contráctiles	0,005	0,0002
Asfalto, esmalte de alquitrán o cinta aplicada en frío, entre otros tipos de recubrimientos	0,002	0,0001

Taula 14: Factors de desgast en recobriments anticorrosius. FONT: Norma NRF-047-PEMEX-2014. [55]

## 1.9.2. Densitat de Corrent

Requerimiento de densidad de corriente para protección catódica del acero en agua de mar	
Condiciones ambientales	$D_c$ : Densidad de corriente (mA/m <sup>2</sup> )
<i>Sumergido en a agua de mar</i> <sup>(a)</sup>	
Flujo estacionario	
Bien recubierto	1 a 2
Recubrimiento pobre o viejo	2 a 20
Desnudo	20 a 30
Velocidad baja <sup>(b)</sup>	
Bien recubierto	2 a 5
Recubrimiento pobre o viejo	5 a 20
Desnudo	50 a 150
Velocidad media <sup>(c)</sup>	
Bien recubierto	5 a 7
Recubrimiento pobre o viejo	10 a 30
Desnudo	150 a 300
Velocidad alta <sup>(d)</sup>	
Recubrimiento pobre, viejo, desnudo	250 a 1000
<u>Enterrado</u>	
Resistividad del suelo <sup>(e)</sup>	
0,5 a 5 $\Omega$ -m	1 a 2
5 a 15 $\Omega$ -m	0,5 a 1
15 a 40 $\Omega$ -m	0,1 a 0,5
<sup>(a)</sup> Estructuras o buques	
<sup>(b)</sup> 0,3 a 1 m/s	
<sup>(c)</sup> 1 a 2 m/s	
<sup>(d)</sup> Flujo turbulento	
<sup>(e)</sup> Tuberías o estructuras, protegidas o envueltas	

Taula 15: Requeriments de densitat de corrent per la protecció catòdica de l'acer en aigua de mar. FONT: NACE Corrosion Engineer's Reference Book.

La taula 15 mostra, segons NACE Corrosion Engineer's Reference Book, la densitat de corrent aproximadament requerit per a la protecció catòdica de l'acer en aigua de mar, en funció del recobriment i la velocitat de l'electròlit, tant per a acer submergit com enterrat:

### 1.9.3. Pes de l'Ànode

El pes total teòric de material anòdic per a protegir l'estructura es calcula mitjançant l'expressió (3) de la norma de referència següent:

$$W = \frac{I_c \cdot t \cdot 8760}{u \cdot \varepsilon}$$

On:

W = Massa neta total anòdica (kg).

I<sub>cm</sub> = Demanda de corrent mitja expressada en Ampers (A).

A = Àrea de l'estructura a protegir (m<sup>2</sup>).

T = Vida teòrica de disseny de la instal·lació expressada en anys.

u = Factor d'utilització del ànode.

ε = Capacitat electroquímica del ànode en A·h/Kg. Per temes de disseny els valors electroquímics d'aquest paràmetre es mostren a la taula 16.

Tipo de ánodo	Temperatura Superficial del ánodo <sup>a</sup> (°C)	Inmerso en agua de mar	
		Potencial del ánodo E <sub>a</sub> vs Ag/AgCl en agua de mar (mV)	Capacidad electroquímica ε A·h/Kg
Aluminio	≤ 30	-1050	2.700
	30-60	-1050	2.000
	>60-80	-1000	900

Notas: <sup>a</sup>. Para temperaturas entre los límites establecidos, la capacidad de corriente se debe interpolar

Taula 16: Valores electroquímics de disseny per ànodes galvànics d'alumini. FONT: Norma NRF-047-PEMEX-2014. [55]

El nombre d'ànodes necessaris s'obté del quocient entre la massa neta total anòdica necessària i la massa neta individual de l'ànode, l'expressió del qual (4) segons la norma de referència és:

$$n = \frac{W}{w_a}$$

On:

n = nombre d'ànodes a ser instal·lat, és adimensional.

W = Massa neta total anòdica necessària, expressada en quilograms (Kg).

W<sub>a</sub> = Massa neta individual de l'ànode, expressada en quilograms (Kg).

La quantitat calculada d'ànodes de sacrifici requerits per a protegir una canonada conforme aquesta norma, s'ha de distribuir uniformement en la seva longitud total sense excedir en cap cas, una separació màxima entre ànodes de 200 metres.

#### 1.9.4. Corrent de sortida

El corrent de sortida requerida d'un ànode al final de la vida de disseny I<sub>f</sub>, s'ha de calcular mitjançant l'expressió (5). S'ha de preveure la disminució del gruix de l'ànode per a la condició final.

$$I_f = \frac{I_{cf}}{n}$$

On:

I<sub>f</sub> = Corrent de sortida d'un ànode requerida al final de la vida de disseny, expressada en A.

I<sub>cf</sub> = Demanda total de corrent per a protegir una secció específica del conductes al final de la seva vida de disseny, expressada en A.

n = Nombre d'ànodes que s'han d'instal·lar en una secció específica del conducte.

Per a un ànode amb grandària i massa proposats, el corrent de sortida real d'un ànode al final de la vida de disseny I<sub>af</sub>, s'ha de calcular amb l'expressió (6):

$$I_{af} = \frac{(E_c - E_a)}{R_a}$$

On:

I<sub>af</sub> = Corrent de sortida d'un ànode al final de la vida de disseny, expressada en A.

E<sub>c</sub>-E<sub>a</sub> = diferència de potencial, expressada en V.

E<sub>c</sub> = Potencial de protecció permisible per disseny, expressada en V.

E<sub>a</sub> = Potencial de l'ànode a circuit obert, expressat en V.

$R_a$  = Resistència de l'ànode expressada en  $\Omega$ .

Per a proporcionar la demanda de corrent, el corrent de sortida real de l'ànode ha de ser major o igual al corrent de sortida conforme amb l'expressió (7):

$$I_{af} \geq I_f$$

### 1.9.5. Resistència dels ànodes de sacrifici

Existeixen múltiples equacions per a determinar la resistència d'ànodes de sacrifici amb una geometria específica. L'expressió (8) emprada en aquest cas és per a ànodes amb geometria no especificada.

$$R_a = \frac{0,315 \cdot \rho}{\sqrt{A}}$$

On:

$R_a$  = Resistència de l'ànode ( $\Omega$ ).

$\rho$  = Resistivitat del mitjà ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ).

$A$  = Àrea exposada de l'ànode ( $\text{cm}^2$ ).

En el disseny s'ha d'utilitzar el valor de resistivitat de l'aigua de mar de 17  $\Omega \cdot \text{cm}$ .

### 1.9.6. Càlcul de la vida útil dels ànodes de sacrifici

S'ha de calcular utilitzant l'expressió (9) i verificar tal vida útil sigui igual o major a la vida de disseny del conducte o estructura.

$$L = \frac{M \cdot U}{I \cdot E}$$

On:

$L$  = Vida efectiva o útil dels ànodes (anys)  $M$  = Massa de l'ànode (Kg)

$O$  = Factor d'utilització

$I$  = Corrent de descàrrega de l'ànode (A)



E = Velocitat de consum (Kg/A·any),

Unint l'expressió (3) amb l'expressió (9) s'obté la següent expressió equivalent (10):

$$W = \frac{(t \cdot A \cdot D_c \cdot 8760)}{(\varepsilon \cdot 1000 \cdot \eta \cdot u)}$$

On:

W = Massa neta total anòdica (kg)

t = vida de disseny de la instal·lació, expressada en anys

A = Àrea de l'estructura a protegir (m<sup>2</sup>)

D<sub>c</sub> = Densitat de corrent electròlit, expressat en dt./m<sup>2</sup>. Per a propòsits de disseny, els valors d'aquest paràmetre electroquímic s'estableixen en la taula 15 de la present memòria.

ε = Capacitat electroquímica de l'ànode, expressada en A·h/Kg. Per a propòsits de disseny, els valors d'aquest paràmetre electroquímic s'estableixen en la taula 16 d'aquesta norma de referència.

η = Rendiment de l'ànode (adimensional: taula 16)

u = factor d'utilització de l'ànode (adimensional: taula 16)



## 2.0. CAS PRÀCTIC

Per a seguir la descripció del document s'han de tenir presents els P & ID en els annexos de l'annex 2.

### 2.1. INTRODUCCIÓ

La C.T.C. C. Del Besos està composta per tres grups, amb una potència instal·lada de 1620 MW. Els grups 3 i 4, de 400 MW cadascun, són grups de cicle combinat bufó eix, mentre que el grup 5 és un cicle combinat 2x1 de 820 MW. Així mateix, es disposa d'una sèrie de sistemes comuns per al correcte funcionament de la central.

Els grups 3 i 5 són propietat d'Endesa Generació S. A., així com els sistemes comuns de la central. La central està emplaçada en el terme municipal de Sant Adrián de Petons, Barcelona, en l'avinguda Eduard Maristany núm. 46-48, entre Teresa i el riu Besòs.

D'ara endavant ens referirem sempre com a base de l'estudi al sistema d'aigua de circulació o refrigeració principal del grup 5 de la CTCC Besòs.

### 2.2. SISTEMA DE REFRIGERACIÓ PRINCIPAL DEL GRUP 5 DE LA CTCC BESÒS.

El sistema d'aigua de circulació consisteix en un circuit obert en el qual les bombes aspiren l'aigua de mar des de la casa de bombes, canalitzant-la a través dels tubs del condensador i retornant-la a la mar mitjançant l'estructura de descàrrega.

Les bombes d'aigua de circulació aspiren aigua de mar de l'estructura de la casa de bombes. Les quatre (4) bombes d'aigua de circulació són del 25% de capacitat. L'aigua bombada al condensador entra als tubs del condensador a través de les caixes d'aigua d'entrada del condensador, refrigera el condensador, surt calent a través de les caixes d'aigua de sortida del condensador i descàrrega a un pou de ruptura a través del col·lector de descàrrega.

La instal·lació de reixes fixes i reixetes mòbils, amb el sistema de neteja, permeten que l'aigua de mar sigui filtrada i protegeixen el sistema d'aigua de circulació de residus en l'aigua. El sistema de neteja de tubs del condensador en el circuit d'aigua de circulació permet resoldre els problemes derivats de la brutícia i formació d'incrustacions en els tubs. En les canonades d'entrada al condensador estan localitzats els injectors d'esferes

del sistema de neteja de tubs. Les esferes són forçades per l'aigua de circulació a passar a través dels tubs del condensador, netejant-los per fregament. En la canonada de sortida del condensador es disposa dels captadors que recullen les esferes per a tornar a enviar-les al punt d'injecció mitjançant les bombes de recirculació de boles.

Els filtres debris protegeixen el condensador dels possibles residus que pugui haver-hi a l'entrada d'aquest. El sistema d'encebament de les caixes d'aigua del condensador mantenen tots els tubs del condensador inundats per a evitar una reducció en l'àrea d'intercanvi que causaria un empitjorament en la transferència de calor. Les bombes en operació recullen els gasos no- condensables del tanc de buit i els condueixen cap als separadors per a la seva descàrrega a l'atmosfera.

Les funcions per a les quals ha estat dissenyat el Sistema d'Aigua de Circulació són les que a continuació s'indiquen:

- Eliminar la calor alliberada per la condensació procedent del cicle.
- Netejar els tubs del condensador mitjançant un sistema d'esferes circulants amb la finalitat d'assegurar una bona transferència de calor.
- Mantindre els tubs del condensador completament inundats per a la correcta operació del condensador.
- Subministrar aigua de refrigeració als bescanviadors de calor de les bombes de buit del condensador, de les bombes d'encebament de les caixes d'aigua i als bescanviadors del circuit tancat de refrigeració.
- Subministrament aigua a la Planta Dessaladora.



Figura 41: Planta del sistema de circulació d'aigua de la Central Tèrmica de Cicle combinat del Besòs. FONT PRÒPIA: Endesa Generació S.A.

## 2.3. CIRCULACIÓ D'AIGUA

Després de passar a través de l'estructura de reixes fixes (10PAC10/20/30/40-AT001) i reixetes mòbils (10PAC10/20/30/40-AZ001), les quals permeten retenir els possibles elements estranys que poguessin ser perjudicials per a la bomba, l'aigua de mar aconsegueix la casa de bombes d'on aspiren les bombes d'aigua de circulació. En cada bassa de la casa de bombes hi ha dues (2) transmissors de nivell 10PAC10/20/30/40-CL001-B01 i 10PAC10/20/30/40-CL001-B02, que permeten conèixer en tot moment el nivell de l'aigua en la bassa i protegir les bombes. També hi ha disponible una comporta en cada bassa de la casa de bombes 10PAC10/20/30/40-BZ001 per a aïllar qualsevol dels canals d'aspiració de les bombes en cas que fos necessari.

Les bombes d'aigua de circulació 10PAC10/20/30/40AP001 són del 25% de capacitat. A la sortida de cada bomba hi ha una canonada metàl·lica de 48" 10PAB10/20/30/40BR001 amb juntes d'expansió 10PAB10/20/30/40BR801. A continuació s'amplia amb canonada de 60". En aquesta mateixa canonada també es localitza una vàlvula de papallona bridada 10PAB10/20/30/40-AA301 d'actuador motoritzat que serveix d'aïllament.

Són quatre (4) bombes de tipus vertical en pou inundat, del 25% de capacitat cadascuna, no pull-out, amb descàrrega per sobre de la placa basi, fabricades per Flowserve.

Té impulsor de flux mixt, de simple aspiració, coixinets radials lubricats per la pròpia aigua, proveïts de camises, coixinet d'embranchada de corrons en bomba, lubricat amb bany d'oli i refrigerat per aigua, acoblament flexible espaiador entre bomba i motor, i segell mecànic refrigerat. Tots aquests materials interns i la carcassa de la bomba són d'acer inoxidable 316Ti i d'acer inoxidable 316, respectivament.

Les condicions de disseny de cada bomba són, 16350 m<sup>3</sup>/h de cabal, 16 m.c.a. de TDH i 495 rpm. El sistema de bombament no disposa de cap mena de protecció catòdica perquè no és necessari ja que els materials constituents no el requereixen. Les quatre canonades de descàrrega de les bombes connecten amb un conducte (col·lector) comú de canonada metàl·lica de 3200 mm de diàmetre (10PAB50BR001), el qual canvia el seu material a formigó i mantenint el seu diàmetre a 3200 mm passa a dir-se (10PAB50BR002). En el conducte comú de canonada metàl·lica (10PAB50BR001) es troba una connexió 10PAB50-BR003 de 10" per a buidatge i ompliment i d'una boca d'home

10PAB50BR100 de 800 mm amb un bombeig automàtic de 3" (10PAB50AA801) a l'inici del col·lector per a eliminar l'aire que arrossegui l'aigua de circulació.



Figura 42: Circulació d'aigua: Bombes. FONT: Endesa Generació S.A.

A més al final d'aquest col·lector es disposa d'una connexió per a subministrament d'aigua de mar a la planta dessaladora de 8", que subministra aigua de mar a aquesta planta a través de la línia 10PAB50BR005 de 6". En el col·lector comú de formigó (10PAB50BR002) es troben: la connexió de subministrament d'aigua al sistema de refrigeració auxiliar de 26" i una boca d'home al final del tram 10PAB50BR101 de 800 mm amb un bombeig automàtic de 3" (10PAB50AA802) amb vàlvula d'aïllament (10PAB50AA502) per a eliminar l'aire que arrossegui l'aigua de circulació.

Tota la canonada metàl·lica de 60" a la intempèrie com la canonada metàl·lica embeguda en formigó de  $\phi 3200\text{mm}$  (col·lector comú) són d'acer al carboni SA-106 Gr.B. No disposen de protecció catòdica però sí d'un revestiment a base d'engomat de neoprè que teòricament els protegeix del contacte directe amb l'electròlit. Les canonades metàl·liques a la intempèrie estan protegides mitjançant emprímació i pintures que els protegeixen de l'ambient en què es troben.

La canonada de formigó que circula parcialment el recorregut enterrat es tracta de canonada "bona" o canonada de formigó armat, la qual no està protegida catòlicament ni externa ni internament ja que degut a les seves propietats no es necessari.



Figura 43: Canonades d'entrada i sortida d'aigua de circulació del condensador. FONT: Endesa Generació S.A.

Aquest conducte comú (10PAB50BR002) es transforma en un col·lector comú de canonada metàl·lica embeguda en formigó de  $\phi 3200\text{mm}$  (10PAB50BR003) que al seu torn es divideix en dues canonades d'entrada al condensador 10PAB51/52-BR001 metàl·liques de 84". En aquestes canonades es localitzen vàlvules d'aïllament motoritzades 10PAB51/52-AA301, uns filtres debrís (10PAB51/52-AT001). També es localitzen en aquestes canonades els injectors d'esferes del sistema de neteja de tubs i unes juntes d'expansió abans dels filtres debrís (10PAB51/52-BR801) i altres a l'entrada del condensador principal (10PAB51/52-BR802).

El condensador principal 10MAG01-AC001 és de tipus vertical d'un pas per carcassa i dos passos pels tubs. Els tubs i les plaques tubulars són de titani, els primers de  $\phi 1 \frac{1}{4}$ " SB338-Gr2 i els segons de SB265-Gr1. Les caixes d'aigua són de xapa d'acer al carboni SA516-70 protegides interiorment per un revestiment a base d'engomat de neoprè de 6,35 mm de gruix que els protegeix del contacte directe amb l'electròlit. A més hi ha instal·lats ànodes de sacrifici basi ferro al 99% de puresa interior. La superfície externa està protegida per capes d'emprimació de interzinc 22 i acabat de pintura industrial.

En les caixes d'entrada del condensador es troben per cada caixa, un punt de prova de pressió, un manòmetre, un drenatge, un venteig manual proveït de vàlvula, i una connexió

al tanc de buit, del sistema d'encebament de les caixes d'aigua del condensador, a través de la línia 10PAB01-BR008 de 4" amb una ventosa 10PAB01-AA801, la qual permet el pas d'aire però no d'aigua.

En les caixes de retorn del condensador es troben per cada caixa, un drenatge i un venteig manual proveïts de vàlvules, una connexió al tanc de buit del sistema d'encebament de les caixes d'aigua del condensador a través de la línia 10PAB01-BR012 de 4" amb una ventosa 10PAB01-AA803, la qual permet el pas d'aire però no d'aigua. Els drenatges de les caixes d'aigua de retorn del condensador descarreguen en un col·lector comú. Per cada caixa es troben un punt de prova de pressió, i un manòmetre.

En cadascuna de les caixes de sortida del condensador es troben un punt de prova de pressió, un manòmetre, un drenatge, un venteig manual i una connexió al tanc de buit, del sistema d'encebament de les caixes d'aigua del condensador amb una ventosa 10PAB01-AA802, la qual permet el pas d'aire però no d'aigua. En cada caixa d'aigua de sortida hi ha una vàlvula trencadora de buit 10MAG01AA010/011 de 3" que protegeixen el sistema davant pressions negatives que poguessin produir-se en cas de tret de les bombes d'aigua de circulació. També s'inclou per cada caixa de sortida un transmissor de nivell 10MAG01-CL003/004-B01.

La sortida de l'aigua calenta del condensador es realitza mitjançant dues línies 10PAB51/52-BR002 de 84", en les quals es disposen els captadors de boles del sistema de neteja de tubs (10PAH10/20-AT001), dues juntes d'expansió per cada línia 10PAB51/52-BR803/804, i les vàlvules de papallona motoritzades 10PAB51/52-AA302 d'aïllament a la sortida del condensador.

Aquestes línies de descàrrega del condensador conflueixen en un conducte comú 10PAB60-BR001 de canonada metàl·lica embeguda en formigó de 3200 mm de diàmetre i 16 mm de gruix d'acer al carboni SA106-Gr.B. Aquesta canonada està proveïda d'una boca d'home 10PAB60-BR100 de 800 mm en la tapa del qual hi ha un venteig automàtic 10PAB60-AA801 de 3" amb vàlvula d'aïllament. A través d'aquesta boca d'home es realitza també la descàrrega de l'aigua procedent del drenatge dels filtres debrs (10PAB51/52-AT001). Aquest col·lector comú es converteix en una canonada de recorregut enterrat que novament es tracta de canonada bona o canonada de formigó armat (10PAB60BR002). A aquest conducte comú també li arriba la descàrrega del circuit obert de refrigeració auxiliar a través d'una connexió de 28". Al final d'aquest col·lector es troba



una boca d'home 10PAB60BR101 de 800 mm amb un venteig automàtic amb vàlvula d'aïllament. Aquest col·lector acaba en una cambra de descàrrega on hi ha un desbordi amb l'elevació suficient perquè la canonada de descàrrega funcioni en règim de canonada plena.

## 2.4. SISTEMA DE FILTRATGE I AIGUA DE CIRCULACIÓ

A fi de mantenir en bon funcionament el sistema de circulació existeix un sistema de filtrat de l'aigua de mar, compost per reixes fixes i reixetes mòbils, que protegeixen aquest sistema de circulació de residus en l'aigua.

### 2.4.1. Comportes

Encara que existeixen 4 comportes, existeixen dues entrades d'aigua de mar des de la bassa d'aportació cap a l'entrada al col·lector comú d'aspiració de l'aigua de circulació. Dos d'elles estan de reserva en el cas que alguna de les d'ús habitual no fos estanca o tingués algun problema d'estanquitat. Estan construïdes a mesura; són d'acer i estan protegides en tota la seva superfície per pintura d'emprimació anticorrosiva, acabat en pintura negra i estan protegides catòlicament per ànodes de sacrifici de zinc. S'ha de tenir en compte que el cicle de vida de les comportes ocorre estant la canonada no submergida, pel pràcticament podríem considerar que treballen subjectes sota atmosfera corrosiva.

Des d'aquest punt de vista, és tan important el control dels ànodes de sacrifici com el propi de la pintura de protecció anticorrosiva o fins i tot el manteniment de les juntes d'estanquitat.

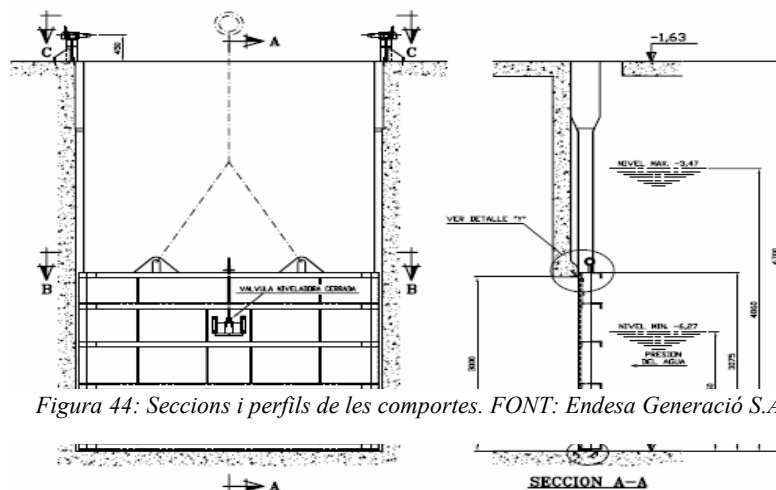


Figura 44: Seccions i perfils de les comportes. FONT: Endesa Generació S.A.

### 2.4.2. Bombes d'ompliment del sistema d'aigua de circulació i de refrigeració auxiliar

Per a omplir el sistema després d'una parada i en arrencades s'ha instal·lat una bomba d'ompliment (10PAC70-AP001), del 100% de capacitat i aspira aigua de la bassa. S'ha dimensionat per a l'ompliment del sistema d'aigua de circulació i el circuit obert de refrigeració auxiliar.

La seva línia de descàrrega està proveïda de (figura 45): un manòmetre, un ampliador, una junta d'expansió, una vàlvula antiretorn, un drenatge de 1" amb vàlvula d'aïllament, un venteig automàtic, i una vàlvula motoritzada d'aïllament. Aquesta línia de descàrrega finalitza en el col·lector 10PAB50BR001 a través de la línia 10PAB50BR003 per a l'ompliment del sistema.

D'aquesta línia 10PAB50BR003 de 10" se subministra aigua al sistema de neteja de reixetes mòbils a través de la línia 10PAB50BR004 de 6". A més aquesta línia (10PAB50BR003) està proveïda d'una vàlvula d'aïllament 10PAB50AA001, que es troba tancada en operació normal i s'obre de manera manual per a permetre el buidatge del sistema de totes les canonades fins al condensador.



Figura 45: Bomba d'ompliment. FONT: Endesa Generació S.A.

Els materials constituents del sistema són de polièster reforçat de Fibra de Vidre, que tenen un comportament ideal enfront de l'aigua de mar. De fet, gran part de les petites i mitjanes embarcacions estan construïdes amb aquest material. Per aquesta raó el sistema està protegit davant la corrosió, per la qual cosa no requereixen protecció catòdica.

El seu pot apreciar que existeixen complements polimèrics, en aquest cas de PP (Polipropilè) i juntes de compensació de neoprè. Totes les connexions metàl·liques són d'acer inoxidable 316.

Tots els materials del sistema, per tant, tenen un excel·lent comportament davant la corrosió

### 2.4.3.Reixes Fixes

Existeix una reixa fixa (figura 46) per cada línia de filtració, quatre (4) en total (10PAC10/20/30/40- AT001). Cada bloc de dos (2) reixes fixes està equipat amb un (1) neta reixes que arrossega els possibles materials sòlids que hagin pogut quedar enganxats procedents de la cantés d'aportació. Per tant es disposa de dues neta reixes (10PAC10/20-AT002) per a la neteja de les quatre (4) reixes fixes. Aquest rasclat actua per la cara frontal de la reixa i de baix a dalt, produint la neteja de la mateixa en el moviment ascendent. El funcionament és totalment automàtic.

El material de les reixes és titani, el comportament en aigua del qual de mar des del punt de vista corrosiu és excel·lent, per la qual cosa les reixetes no es troben protegides catòlicament.

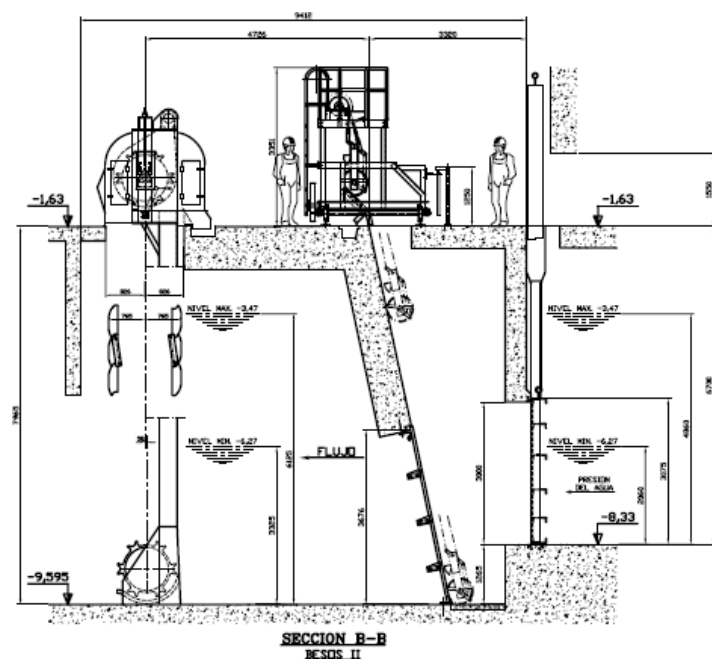


Figura 46: Secció del sistema de filtratge d'aigua. FONT: Endesa Generación S.A.

#### 2.4.4 Reixes mòbils

En la bassa d'aigua de bombeig hi ha un conjunt de quatre reixetes mòbils (10PAC10/20/30/40-AZ001) que filtren l'aigua que aspiren les bombes d'aigua de circulació, retenint aquells sòlids que hagin pogut arribar (figura 47).

La neteja de les 4 reixetes mòbils es realitza amb aigua a pressió aportada per dos grups de moto- bombes del 100% del cabal total. Qualsevol d'aquestes dues (2) bombes té capacitat per a netejar les quatre (4) reixetes mòbils.

A banda i banda de cada reixa mòbil existeixen uns transmissors de nivell, que detecten la diferència de nivell que es produeix aigües amunt i a baix de la reixeta en funció del grau d'enbrutament. Quan la pèrdua de càrrega (diferència de nivell) aconseguixi els punts de consigna establerts, el sistema de neteja de reixetes donarà les ordres necessàries perquè els equips es posin en funcionament. De manera que, l'operació d'aquest sistema és automàtica en funció d'aquests valors de consigna fixats. La velocitat de les reixetes augmentarà si es produeix un augment de la pèrdua de càrrega.



*Figura 47: Sistema de filtratge mòbil d'aigua de circulació. FONT: Endesa Generació S.A.*

Les reixetes mòbils estan constituïdes per (figura 47):

- Una estructura principal d'acer inoxidable AISI 304. (Pes total: 1595 Kg).
- Safates de filtrat d'acer inoxidable acer inoxidable AISI 304 (Pes total: 4050 Kg)
- Cadenes d'acer inoxidable AISI 304. (Pes total: 746 Kg).

- Una protecció de PRFV completa (externa: en blau a la foto) per a cadascuna de les reixetes.

Cada reixeta mòbil està protegida catòlicament per ànodes de sacrifici d'aliatge d'alumini de diverses mesures el pes total de les quals és de 93,9 Kg/reixeta per a un període de 10 anys de vida.

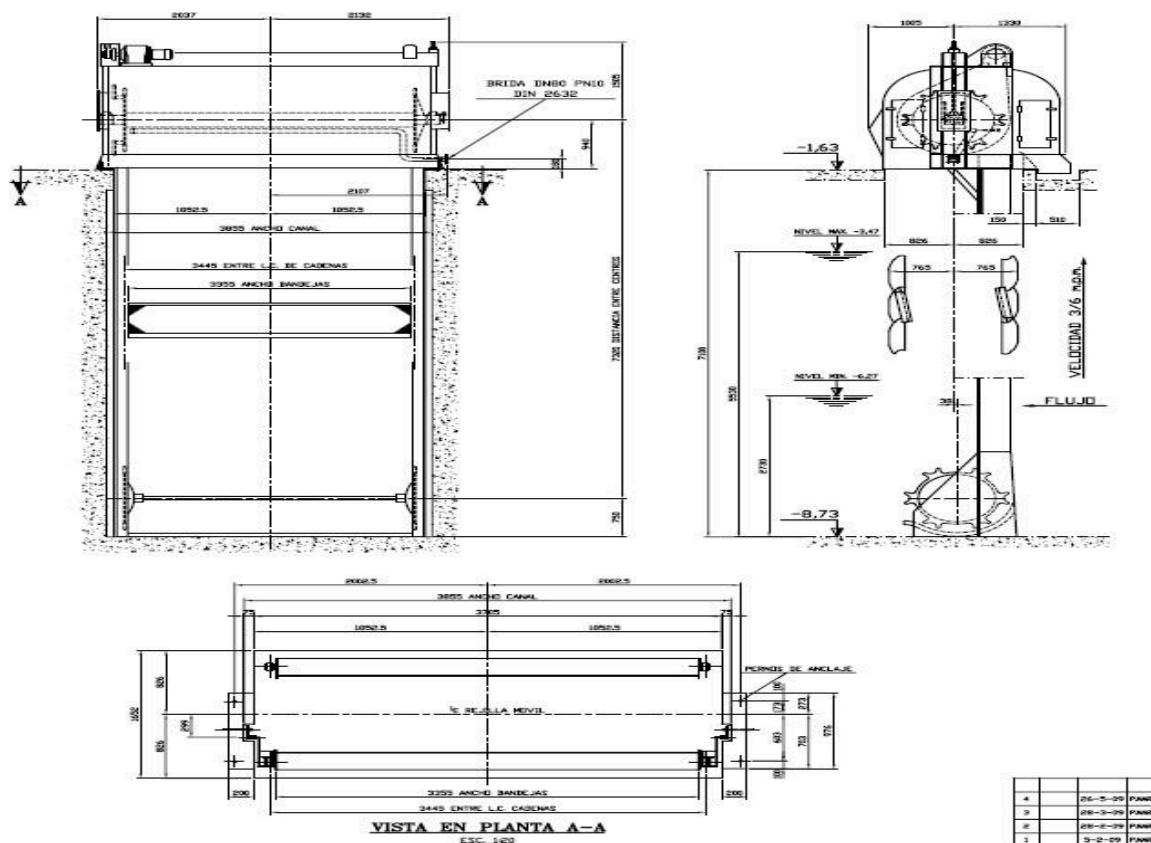


Figura 48: Filtres rotatius de neteja de l'aigua de circulació. FONT: Endesa Generación S.A.

## 2.5. BOMBAS DE CIRCULACIÓ D'AIGUA

El circuit enterrat del subministrament d'aigua de circulació està compost per (taula 17 i figura 49):

Les bombes d'aigua de circulació 10PAC10/20/30/40AP001 són del 25% de capacitat. A la sortida de cada bomba hi ha una canonada metàl·lica de 48" 10PAB10/20/30/40BR001 amb juntes d'expansió 10PAB10/20/30/40BR801. A continuació hi ha un ampliador que connecta amb canonada de 60". En aquesta mateixa canonada també es localitza una

vàlvula de papallona bridada 10PAB10/20/30/40-AA301 d'actuador motoritzat que serveix d'aïllament (figura 49).

Són quatre (4) bombes de tipus vertical en pou inundat, del 25% de capacitat cadascuna, senar pull- out, amb descàrrega per sobre de la placa basi, fabricades per Flowserve.

Té impulsor de flux mixt, de simple aspiració, coixinets radials lubricats per la pròpia aigua, proveïts de camises, coixinet d'embranchada de corrons en bomba, lubricat amb bany d'oli i refrigerat per aigua, acoblament flexible espaiador entre bomba i motor, i segell mecànic refrigerat. Tots aquests materials interns i la carcassa de la bomba són d'acer inoxidable 316Ti i d'acer inoxidable 316, respectivament.

Les condicions de disseny de cada bomba són, 16350 m<sup>3</sup>/h de cabal, 16 m.c.a. de TDH i 495 rpm. El sistema de bombament no disposa de cap mena de protecció catòdica perquè no és necessari ja que els materials constituents no el requereixen.

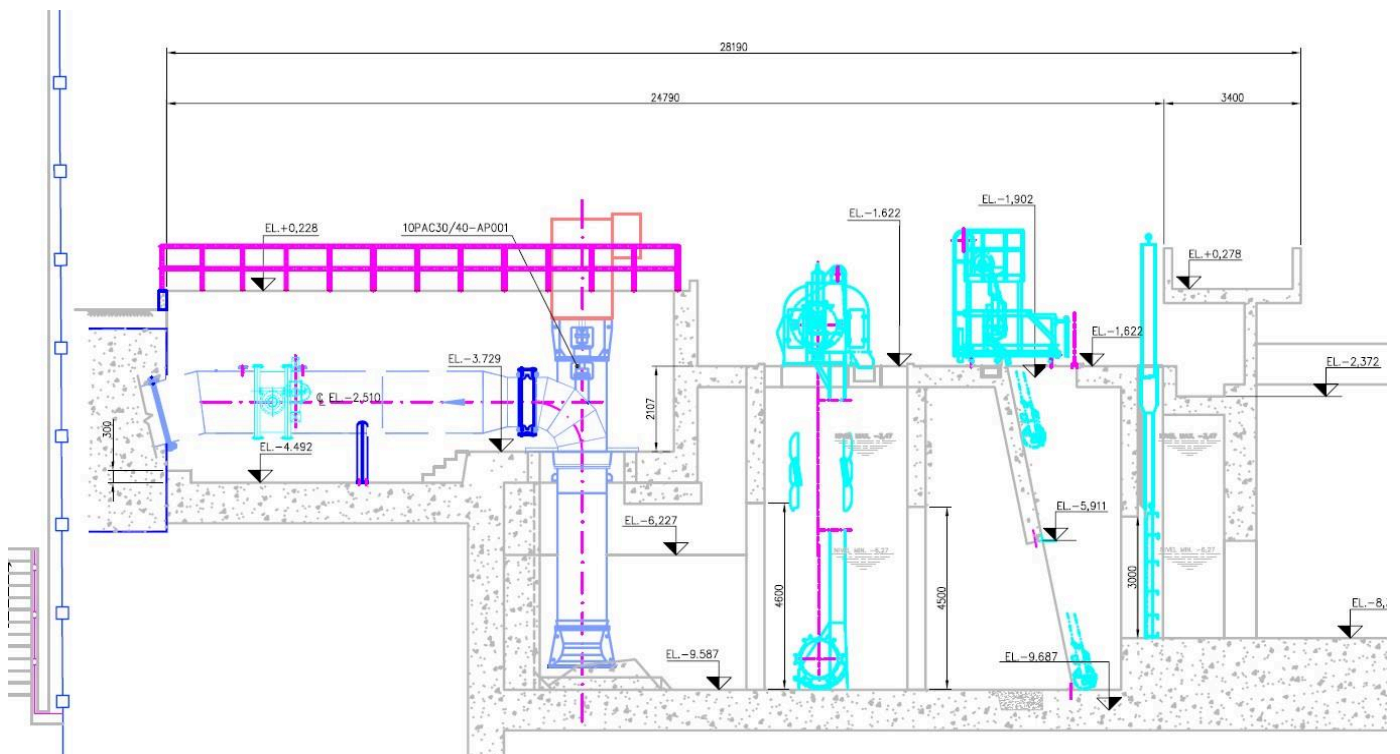


Figura 49: Filtres rotatius de neteja de l'aigua de circulació. FONT: Endesa Generación S.A.



## 2.6. CANONADES ENTERRADES DEL CIRCUIT D'AIGUA DE CIRCULACIÓ

Identificació del tram de la canonada	Característiques	Funció	Observacions
10PAB50BR001	Canonada enterrada constituïda per virolas d'acer al carboni SA-106 Gr.B, Ø3242 mm i gruix 16 mm	Col·lector comú que recull l'aigua procedent de les 4 bombes d'aspiració.	Embeduda en formigó. Té una protecció interna d'engomat de neoprè de 6 mm. No disposen de protecció catòdica.
10PAB50BR002	Tram de canonada bona (canonada de formigó reforçada amb planxa d'acer), Ø3242 mm.	Canonada que connecta amb el tram col·lector comú de distribució d'aigua de refrigeració cap al condensador. Realitza altres funcions entre les quals destaca l'alimentació de la refrigeració secundària, l'alimentació d'aigua de procés a la unitat dessaladora i la presa d'aigua per al sistema d'ompliment.	L'acer de reforç constituent de la canonada *bona està protegit interiorment i exteriorment per formigó. Interiorment amb un recobriment epoxiàtic amb bona resistència a l'aigua de mar i ho aïlla d'ell.
10PAB50BR003	Canonada enterrada constituïda per *virolas d'acer al carboni SA-106 Gr.B, Ø3242 mm i gruix 16 mm que distribueix l'aigua cap a les caixes d'aigua inferiors del condensador a través de les canonades exteriors 10PAB51BR001 i 10PAB52BR001.	Col·lector comú que distribueix l'aigua procedent de l'aspiració de les bombes i les distribueix al condensador.	Embeduda en formigó. Té una protecció interna d'engomat de neoprè de 6 mm. No disposen de protecció catòdica.
10PAB60BR001	Canonada enterrada constituïda per virolas d'acer al carboni SA-106 Gr.B, Ø3242 mm i gruix 16 mm que rep l'aigua procedent de les caixes d'aigua inferiors superiors del condensador a través de les canonades exteriors *10PAB51BR002 i 10PAB52BR002.	Col·lector comú que recull l'aigua procedent del condensador (1 calent) i la connecta amb la canonada bona 10PAB60BR002.	Embeduda en formigó. Té una protecció interna d'engomat de neoprè de 6 mm. No disposen de protecció catòdica.
10PAB60BR002	Tram de canonada bona o canonada de formigó reforçada amb planxa d'acer, Ø3242 mm.	Canonada que connecta amb el tram col·lector comú 10PAB60BR001 i condueix tot el retorn de distribució d'aigua de refrigeració cap al pou de ruptura. Realitza altres funcions entre les quals destaca recollir l'aigua procedent de la sortida de l'aigua de refrigeració secundària i l'aigua de sortida dels filtres autonetejadors DEBRIS.	L'acer de reforç constituent de la canonada bona està protegit interiorment i exteriorment per formigó. Interiorment amb un recobriment epoxiàtic amb bona resistència a l'aigua de mar i ho aïlla d'ell.

Taula 17: Descripció del circuit enterrat de la refrigeració principal del grup 5 CTCC Besòs. FONT: PROPIA

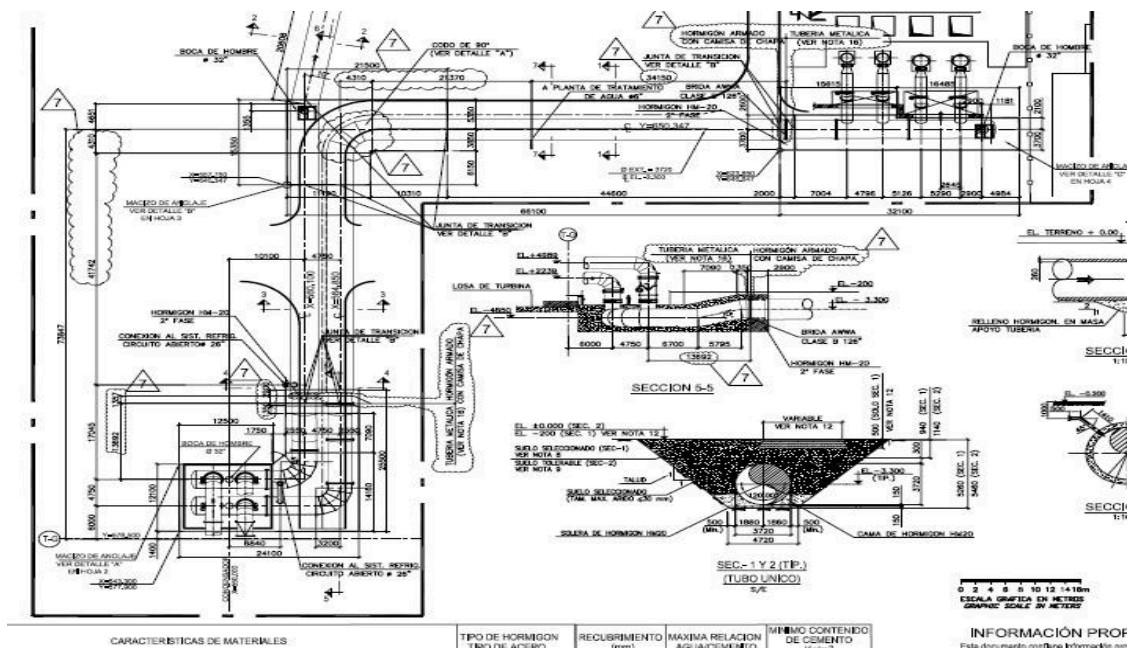


Figura 50: Esquema de la distribució de les canonades enterrades per la refrigeració del grup 5 CTCC Besòs. FONT: Endesa Generació S.A.

La canonada bona està protegida interiorment per un revestiment epòxid bicomponent. El formigó queda protegit a l'atac químic de l'aigua de mar en la seva capa interior que és per on circula la refrigeració. És un preparat específic per a protegir formigó en immersió compost per:

Preparació de superfície neta amb aigua a pressió mínim WJ-2 Segons Norma SSPC 12/NEIX 5.

Pintat (veure annex 2, Fixa Sigmacover 211 i 420):

- 1r Capa Sigmacover 211 de 40 micres.
- 2a Capa Sigmashield 420 de 150 micres.
- 3a Capa Sigmashield 420 150 micres.

Es tracta d'una imprimació de dos components epòxid curat amb poliamida. La primera capa és la que s'adhereix al formigó, té bona resistència a l'aigua i és resistent a l'impacte i a l'abració. La segona capa és un recobriment característic en tancs de càrrega i vaixells, excel·lent resistència a l'aigua de mar i a l'abració i a l'impacte. La mescla és senzilla de netejar.

Exteriorment la canonada no porta cap sistema de protecció. S'entén que en estar l'acer que constitueix la canonada embegut el formigó i aquesta enterrada sota un terreny suposadament amb alta resistivitat (no s'han obtingut dades de valors de resistivitat), la canonada manca externament de qualsevol tipus de revestiment o protecció catòdica.

## **2.7. NETEJA DELS TUBS DEL CONDENSADOR**

El sistema de neteja de tubs del condensador en el circuit d'aigua de circulació permet resoldre els problemes derivats de la brutícia i la formació d'incrustacions en els tubs, conseqüències de les impureses contingudes en l'aigua, que són:

- Disminució de la transferència de calor.
- Augment de pressió del condensador i consegüent pèrdua de rendiment de la turbina.
- Corrosió del material de tubs.
- Augment de la pèrdua de càrrega a través dels tubs i consegüent disminució del cabal d'aigua de circulació.





Figura 51: Sistema de neteja de brutícia dels tubs del condensador. FONT: Endesa Generación S.A.

En el corrent d'aigua d'entrada existeixen 2 injectors en cadascuna de les dues canonades d'entrada al condensador 10PAB51/52BN001/002. Aquestes boles són forçades per l'aigua de circulació a passar a través dels tubs del condensador netejant-los per fregament. Les boles netejadores s'extreuen del corrent d'aigua a la sortida del condensador gràcies a un filtre captador. Es disposa de 2 filtres 10PAH10/20-AT001, un en cada canonada de sortida del condensador. Els filtres captadors de boles disposen d'un transmissor de pressió diferencial 10PAH10/20-CP001-B01.

Les boles són recollides per quatre línies, dues línies per cada filtre captador 10PAH10-BR001/002 i 10PAH20-BR001/002 de 3". Aigües avall del filtre captador i en aquestes línies es troben les vàlvules 10PAH10-AA001/002 i 10PAH20-AA001/002. Aquestes dues línies s'ajunten en una línia 10PAH10-BR003 i 10PAH20-BR003 de 3".

A continuació es troben les bombes de recirculació de boles 10PAH10-AP001 i 10PAH20-AP001 amb vàlvules d'aïllament 10PAH10-AA003 i 10PAH20-AA003 de 3" en l'aspiració de les bombes juntament amb uns espiells de 4". En la descàrrega de les bombes hi ha vàlvules d'aïllament 10PAH10/20-AA004. Aquestes dues línies s'uneixen i aigües avall es troba un col·lector de boles 10PAH30-AT001, una vàlvula d'aïllament 10PAH30-AA001, i un distribuïdor de boles 10PAH30-BR901. El col·lector de boles disposa d'un bombeig 10PAH30AA502 i d'un drenatge 10PAH30AA501.

A continuació es condueixen les boles als punts d'injecció, a través de les línies de 10PAH31-BR002/003 i 10PAH32-BR002/003 de 2 1/2". En aquestes línies es troben les vàlvules 10PAH31-AA001/002 i 10PAH32-AA001/002.

L'efecte de neteja de les boles es deu al fet que tenen un diàmetre lleugerament superior al diàmetre interior dels tubs del condensador i al recobriment que revesteix les mateixes.

El sistema està format bàsicament pels següents materials que li confereixen protecció anticorrosiva (Figura 52):

- Captador i distribuïdor d'esferes: Cilindre estanc amb espèll de vidre constituït per acer al carboni SA-105 i recobert de polímer termoplàstic. CPVC (policlorur de vinil clorat).
- Vàlvules de distribució: Vàlvules de membrana, cos d'acer al carboni SA-105, interiorment encamisades per CPVC. Membrana de gruix 5 mm de PTFE (politetrafluoroetilè), resistent a la corrosió per aigua de mar, també denominat comercialment com a tefló.
- Canonada de distribució: Canonades d'entre 2" i 2 1/2" d'acer al carboni SA 106 GrB amb encamisada interior de CPVC.
- Canonades de conducció: Canonades de Polipropilè (PP) de 3" de diàmetre.
- Rescloses o filtres captadors: Interiorment i en contacte amb l'aigua de mar les rescloses estan constituïdes per acer inoxidable 316 modificat amb Titani (316Ti). Els seus elements de transmissió estan constituïdes del mateix material.
- Les esferes de neteja són d'escuma biodegradable.

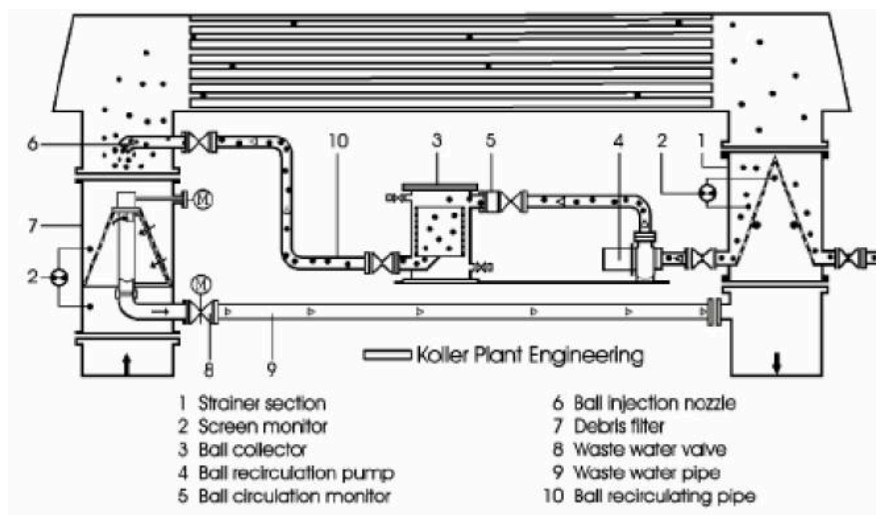


Figura 52: Plano del sistema de neteja de brutícia dels tubs del condensador. FONT: Endesa Generación S.A.

## 2.8. FILTRES DEBRIS

Es tracta de dos filtres situats just abans de l'entrada d'aigua de refrigeració del condensador en cadascuna de les canonades d'entrada d'aigua. La finalitat d'aquests filtres és evitar que la brutícia transportada pel cabal d'aigua de refrigeració obstrueixi les plaques dels tubs del condensador, i per tant, causin freqüents parades o reduccions d'eficiència de la planta.

Cada filtre té una vàlvula motoritzada, que està en la canonada de desguàs. Aquests filtres quan estan massa bruts, obren la seva vàlvula motoritzada i es posen a funcionar fent un cicle de rentada. L'aigua juntament amb la brutícia es descarrega a través de les línies de desguàs, una per cada filtre que s'uneixen en la línia de desguàs que descarregarà al col·lector de descàrrega a la cambra de descàrrega del condensador.

Cada filtre debrís està compost per elements filtrants individuals (reixetes) que poden intercanviar-se fàcilment sense llevar la carcassa del filtre en cas que les condicions de brutícia canviïn durant la vida útil de la planta. Els elements filtrants són del tipus grans plaques perforades, amb cambres filtrants de perfil profund. Quan els elements filtrants estiguin fixats deuen cobrir tota la secció transversal de la carcassa del filtre, evitant que la brutícia passi (figura 53 i 54).

Els materials que constitueixen el filtre són:

- La carcassa és d'acer al carboni S235JR02 amb engomat intern de neoprè d'aproximadament 5-6mm.
- Totes les parts internes del filtre en contacte amb aigua de mar són de material Dúplex "Standard" 1.4462. Els materials de tots els elements de transmissió són també del mateix material.
- Els materials de les vàlvules de totes les funcionalitats del sistema de filtratge (acte rentat, drenatge, etc...) són tant el seu cos com els seus interns d'acer inoxidable 1.4408.

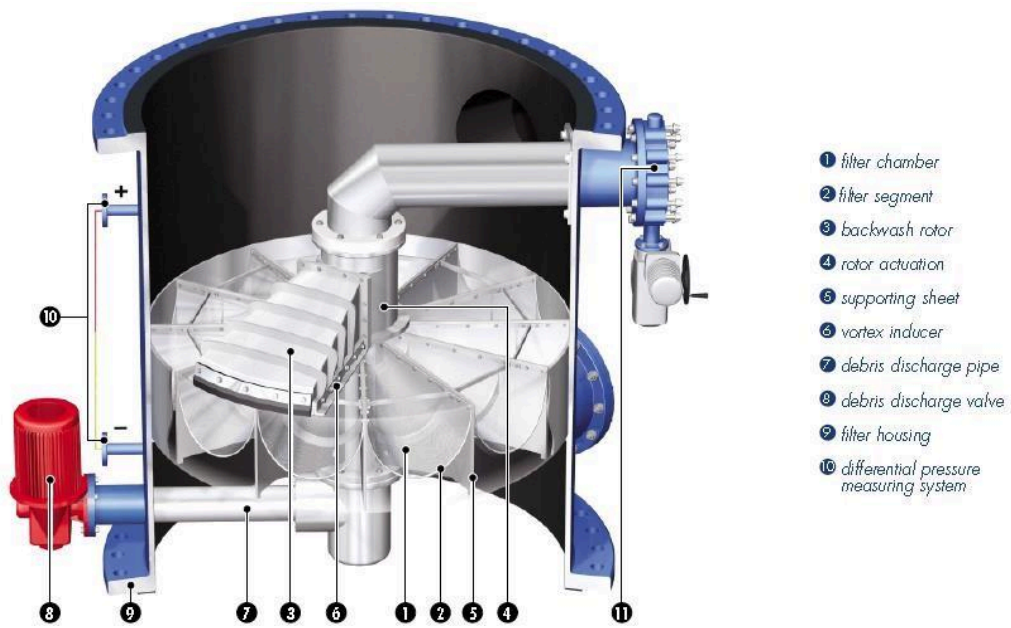


Figura 53: Secció interna del filtre debris. [41]



Figura 54: Vista en perspectiva del filtre debris. [42]

## 2.9. CONDENSADOR

Un condensador és un bescanviador tèrmic, en qual es pretén que el fluid que el recorre canviï a fase líquida des de la seva fase gasosa mitjançant l'intercanvi de calor amb un altre mitjà. La condensació es produeix amb aigua en circuit obert provinent de la mar. Les característiques principals d'aquest condensador són:

- Descàrrega vertical del vapor procedent de la turbina de baixa pressió.
- Existència d'un pou calent per al condensat.
- Caixes d'aigua dividides i dues fas tubulars (figura 55 i 56) Materials:
  - 16881 tubs d'1 ¼” de titani ASTM SB338-GR2 de 0.599 mm de gruix (Figura 55: passo aigua).
  - 930 tubs d'1 ¼” de titani ASTM SB338-GR2 de 0.599 mm de gruix (Figura 55: pas aïri refrigeració).
  - 890 tubs d'1 ¼” de titani ASTM SB338-GR2 de 0.599 mm de gruix (Figura 55: protecció impacte).
  - Carcassa: Acer al carboni ASTM SA516-70
  - Caixes d'aigua: Acer al carboni ASTM SA516-70 amb engomat de neoprè de 6.35 mm.
  - Cobertes de les caixes d'aigua: Acer al carboni ASTM SA516-70 amb engomat de neoprè de 6.35mm.
  - 15 plaques tubulars: Blindatge de titani sota base d'acer al carboni ASTM SA516-70.
  - Pou condensat: Acer al carboni ASTM SA516-70
  - Collet: Acer al carboni ASTM SA516-70



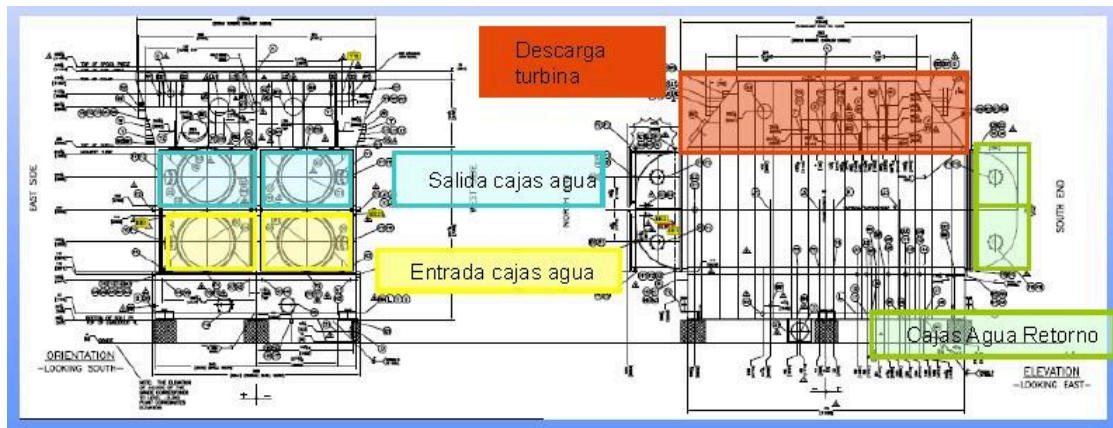


Figura 55: Disseny de la distribució del condensador CTCC Besòs 5. FONT: Endesa generació S.A.

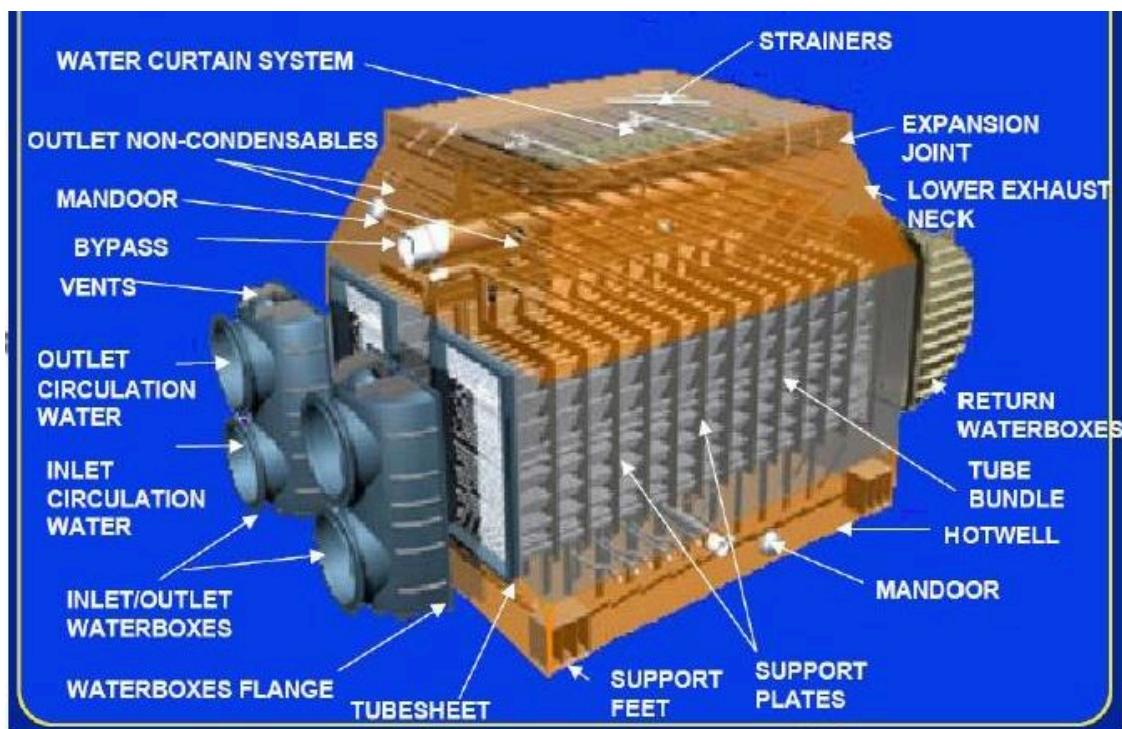


Figura 56: Disseny de la distribució del condensador CTCC Besòs 5. FONT: Endesa generació S.A.

Actualment les caixes d'aigua del condensador estan protegides per protecció catòdica mitjançant ànodes de sacrifici. Són xapes de ferro pur (99%) de 128 x 120 x 30 cm distribuïdes al llarg de tota la superfície. La seva eficiència és molt baixa, a més de consumir-se un curt període de temps. La seva substitució és complexa pel fet que algunes ubicacions d'aquests són complexes quant a accés.

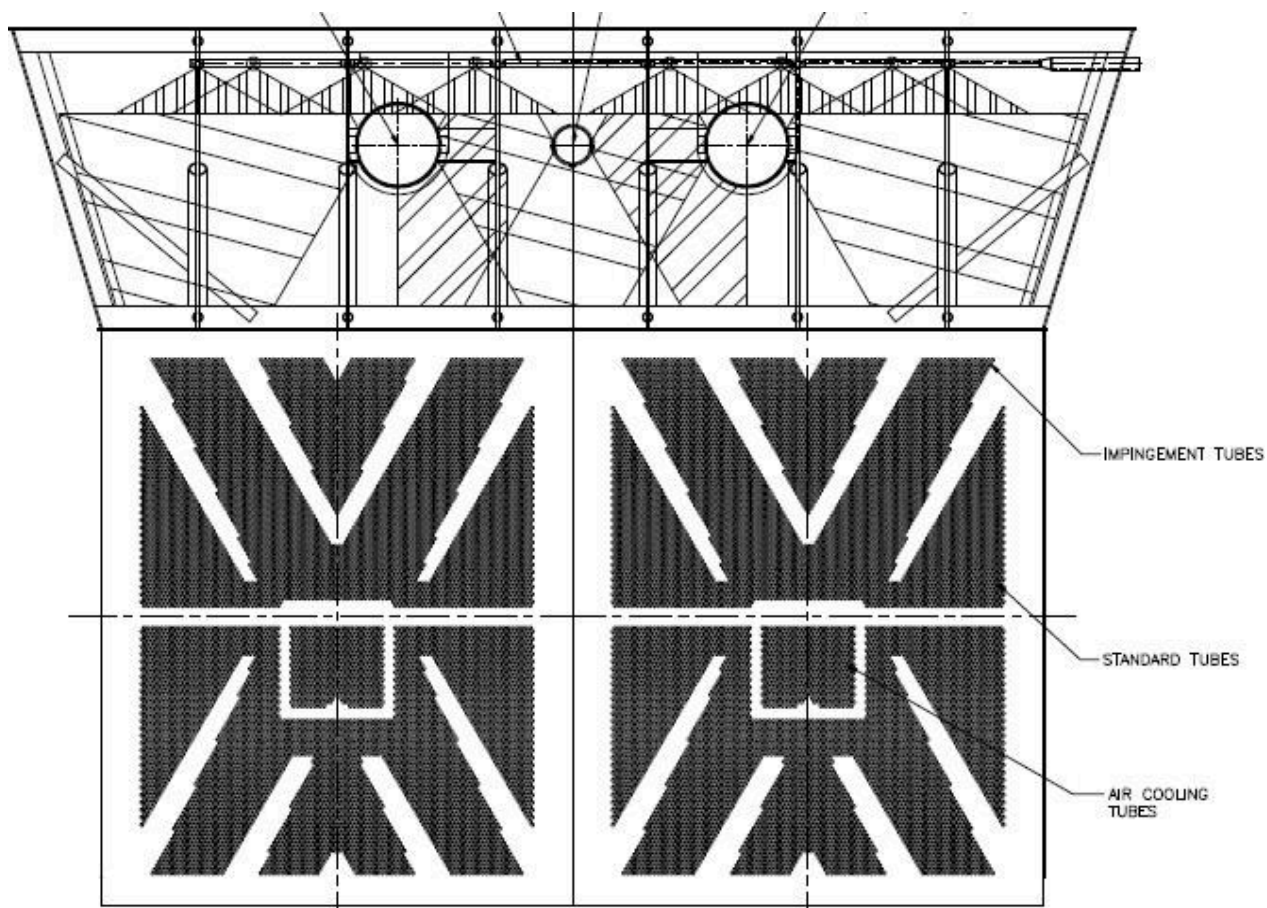


Figura 57: Secció interna del condensador CTCC Besòs 5. FONT: Endesa generació S.A.





### 3.0. SOLUCIÓ PROPOSADA

En aquest apartat es demostrarà si es pot millorar la vida útil del sistema de refrigeració evitant corrosió mitjançant la utilització de càlculs extrets de la teoria plantejada.

#### 3.1. CÀLCULS DE PROTECCIÓ CATÒDICA

En aquest subapartat, es duran a terme els càlculs necessaris per proposar una solució en dos seccions diferenciades per la lletra A i B:

- A. Càlcul i disseny de tots els trams de canonada metàl·lica enterrada embegudes en formigó i a la intempèrie de tot el sistema d'aigua de refrigeració (circulació principal) mitjançant un sistema de protecció catòdica per ànodes de sacrifici. Dins de les dues possibilitats de càlcul s'emprarà la més restrictiva, que és el mètode de la massa.
- B. Càlcul i disseny d'un sistema de protecció catòdica per corrent imprès de les caixes d'aigua del condensador del circuit. En aquesta ocasió s'utilitzarà l'únic mètode de càlcul possible, el de la intensitat:

D'altre banda, per a la realització dels càlculs, s'utilitzarà la teoria plantejada en la part teòrica del projecte i es seguiran els següents criteris que regeixen totes les normes en protecció catòdica, siguin UNE, NACE o PEMEX: [54], [55]

- I. **Canonades o estructures en general enterrades.** Un potencial estructura-electròlit o mitjà corrosiu mesurat en la superfície d'un terreny, el valor del qual ha de ser igual o més negatiu que  $-0,850$  V i no més negatiu que  $-1,200$  V per a evitar danys al recobriment. Aquest potencial s'ha de mesurar respecte a l'elèctrode de referència de Cu/CuSO<sub>4</sub>, amb el sistema de protecció catòdica encès i el corrent elèctric circulant en el circuit, per a minimitzar la caiguda ANAR a l'elèctrode de referència s'ha de col·locar el més a prop possible de la canonada.
- II. **Canonades o estructures amb ànodes galvànics d'alumini.** Un potencial estructura-electròlit o mitjà corrosiu el valor del qual ha de ser igual o més negatiu que  $-0,800$  V quan estan immerses en aigua de mar i no més negatiu que  $-1,100$  V

per a evitar danys al recobriment. Aquest potencial s'ha de mesurar respecte a un elèctrode de referència Ag/AgCl en aigua de mar.

- III. **Canvi mínim de 0,100 V en el potencial de canonades de o estructures, més negatiu que el valor de potencial estructura-electròlit mesurat sense protecció catòdica** . Aquest canvi de potencial s'ha de mesurar entre de manera immediata en apagar el sistema de protecció catòdica ja que correspon a la diferència de potencial entre el valor de potencial que es mesura amb el sistema de protecció catòdica apagat instantàniament o "instant OFF" i el valor de potencial natural que es mesura mantenint el sistema de protecció catòdica apagat (OFF), tots dos amb un elèctrode de referència de Cu/CuSO<sub>4</sub>.

Per últim, per a la realització dels càlculs es partirà de les següents variables:

- a) Densitat de corrent de protecció màxima 20 dt./m<sup>2</sup>. Es pren aquest valor considerant la taula 15 de la memòria. S'ha considerat una velocitat de circulació de l'aigua de vapor mitjà (entre 1-2 m/s) i un recobriment pobre o vell. Això ens suposa una finestra de densitat de corrent de protecció entre els 10-30 dt./m<sup>2</sup>. Suposem que en portar la planta 9 anys funcionant des que es va realitzar la seva posada en marxa l'any 2011, ens trobaríem més prop del 10 que del 30. Per aquesta raó, seleccionem un valor de 15 dt./m<sup>2</sup>.
- b) Per normativa els ànodes seleccionats per a aquesta aplicació són ànodes d'alumini. D'acord amb la taula 18 són:
  - $\xi$  = Capacitat electroquímica de l'ànode, expressada en A·h/Kg. Per a propòsits de disseny, els valors d'aquest paràmetre electroquímico s'estableixen 2500 A·h/Kg.
  - $\eta$  = Rendiment de l'ànode = 0,9
  - u = factor d'utilització de l'ànode = 0,85
  - $E_{\text{treball}}/V_{\text{Ag/AgCl}} = -0,8/-1,10$  V
- c) t = considerarem un temps de vida de disseny de la instal·lació de 10 anys.
- d) Per al cas d'ànodes d'injecció per corrent imposat s'utilitzaran aquells de major rendiment i prestacions ofereixen. Aquests són els "Titanium Metall Mixed

Oxidis'', també coneguts com TMMO que ofereixen densitats de corrent de fins a 100 dt/cm<sup>2</sup> (Taula 12).

- e) Per a les caixes del condensador, degut a aquest efecte àrea i al comportament més aviat noble del titani s'ha considerat una densitat de corrent sensiblement més baixa, encara que dins del rang de revestiment vell i velocitats mitjanes, de 10 dt/m<sup>2</sup>.
- f) S'utilitzaran les fórmules de càlcul de l'apartat 1.10 de la memòria.
- g) Totes les canonades d'acer a la intempèrie o enterrades disposen d'un recobriment a base d'engomat de neoprè de 6,35 mm. Les caixes d'aigua del condensador també disposen d'aquests mateixos recobriments.

	Al	Zn	Mg
A·h/kg teòrics	2976	820	2198
A·año/kg teòrics	0,34	0,094	0,251
A·h/kg reals	2400/2800	780	1050/1250
A·año/kg reals	0,274/0,32	0,089	0,12/0,143
Rendimiento	80/95	95	47/57
Factor utilización	85	85	85
Consumo Kg/A·año	2,94	10,64	3,98
$E_{\text{corr}}/V_{\text{Ag/AgCl}}$	-1,05/-1,15	-1,05	-1,5/-1,7
$E_{\text{trabajo}}/V_{\text{Ag/AgCl}}$	-0,8/-1,10	-0,96	-1,35/-1,50
Coste (relativo al Al)	1	2,3	3,4

Taula 18: Valors electroquímics per el càlcul de la vida útils dels ànodes de sacrifici més comuns. [43]

### 3.1.1 A.1: CÀLCUL PROTECCIÓ CATÒDICA (ÀNODES DE SACRIFICI) CANONADES DESCÀRREGA BOMBES AIGUA DE CIRCULACIÓ

Dona lloc al pla nº1: PLA INSTAL·LACIÓ P.C. CANONADES DE DESCÀRREGA BOMBES AIGUA CIRCULACIÓ. Es troba a l'annex 3.

Es requereix protecció catòdica per a 4 canonades (Ø60'' Acer al carboni SA 106 GrB) de descàrrega de les bombes d'aigua de circulació. Com pràcticament totes tenen la mateixa longitud, procedirem al càlcul d'una els resultats de la qual es consideraran per igual en la resta de canonades:

Càlcul de la superfície (A) a protegir (veure plano 1):

$$\text{Longitud tub} = 8,726 \text{ m} + 1,25 \text{ m (reducció + avanci vàlvula)} = 9,976 \text{ m} = 10 \text{ m} ; S1 = 2\pi RL = 2\pi \cdot 0,762 \cdot 10 = 47,88 \text{ m}^2$$

La línia conté dues vàlvules (de papallona) de 60" i una altra de 48". Per a simplificar càlculs, considerarem com si ambdues anessin de 60".

$$S_2 = 2\pi R^2 = 2\pi \cdot 0.762^2 = 3,6483 \text{ m}^2$$

$$ST = S_1 + S_2 = 47,88 \text{ m}^2 + 3,6483 \text{ m}^2 = 51,52 \text{ m}^2$$

Per a calcular el pes dels ànodes necessaris per a la protecció utilitzem la següent expressió:

$$W = \frac{(t \cdot A \cdot D_c \cdot 8760)}{(\varepsilon \cdot 1000 \cdot \eta \cdot u)} = \frac{(10 \cdot 51,52 \cdot 15 \cdot 8760)}{(2500 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 0,86)} = 35,40 \text{ Kg}$$

De l'annex nº2 (Ànodes de sacrifici de Alumini) seleccionem un ànode d'alumini de 8 Kg i de codi W14.

$n \text{ ànodes} = W/W_{\text{ànode}} = 35,40/8 = 4,42 \sim 5$  ànodes model W14. Al ser imparell, i observant el disseny de la canonada, l'ideal seria instal·lar **6 ànodes**.

Distribució òptima:  $s = L/n = 9,976 \text{ m}/3 \text{ ànodes} = 3,32 \sim 3 \text{ m}$  de separació sempre que sigui possible. A ser 4 el nom total de canonades  $4 \cdot 6 = 24$  ànodes W14 (8 kg pes net).

### 3.1.2. A.2.CÀLCUL PROTECCIÓ CATÒDICA (ÀNODES DE SACRIFICI) COL·LECTOR METÀL·LIC COMÚ CANONADES BOMBES AIGUA CIRCULACIÓ

Dona lloc al pla nº2: PLA INSTAL·LACIÓ P.C. COL·LECTOR CANONADES BOMBES AIGUA REFRIGERACIÓ. Es troba a l'annex 3.

Es requereix protecció catòdica per a 1 col·lector comú enterrat ( $\varnothing 3242\text{mm}$ : Acer al carboni SA 106 GrB) embegut en formigó on descarreguen les 4 canonades de descàrrega de les bombes d'aigua de circulació. Així:

Càlcul de la superfície (A) a protegir (veure plano 2):

$$\text{Longitud tub} = 28,127 \text{ m ;}$$

$$\text{Fons} = \pi R^2 = \pi \cdot 1,621^2 = 8,25 \text{ m}^2 \text{ Llavors:}$$

$$ST = 2\pi RL + \pi R^2 = 2\pi \cdot 1,621 \cdot 28,127 + 8,25 = 294,73 \text{ m}^2$$

Per a calcular el pes dels ànodes necessaris per a la protecció utilitzem la següent expressió:

$$W = \frac{(t \cdot A \cdot D_c \cdot 8760)}{(\varepsilon \cdot 1000 \cdot \eta \cdot u)} = \frac{(10 \cdot 294,73 \cdot 15 \cdot 8760)}{(2500 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 0,86)} = 202,49 \text{Kg}$$

De l'annex nº2 (Ànodes de sacrifici de Alumini) seleccionem un ànode d'alumini de 14,1 Kg i de codi W24.

$n \text{ ànodes} = W/W_{\text{ànode}} = 202,49/14,1 = 14,36 \sim 15$  ànodes model W24. En ser imparell, i observant el disseny de la canonada, l'ideal seria instal·lar **16 ànodes**.

Distribució òptima:  $s = L/n = 28,127 \text{ m}/8 \text{ ànodes} = 3,516 \sim 3,5 \text{ m}$  de separació sempre que sigui possible. 16 ànodes W24 (14,1 kg pes net).

### **3.1.3. A.3. Càlcul de protecció catòdica (Ànodes de sacrifici) col·lector metàl·lic comú distribució aigua de refrigeració a canonades entrada condensador (10PAB50BR003).**

Dona lloc al pla nº3: PLA INSTAL·LACIÓ P.C. COL·LECTOR CANONADES ENTRADA/SORTIDA AIGUA REFRIGERACIÓ CONDENSADOR (INTEMPÈRIE & ENTERRADES). Es troba a l'annex 3.

Es requereix protecció catòdica per a 1 col·lector comú enterrat ( $\varnothing 3242\text{mm}$ : Acer al carboni SA 106 GrB) embegut en formigó el qual recull l'aigua procedent de l'aspiració de les bombes a través de la canonada bona 10PAB50BR003 i les distribueix cap al condensador a través de les canonades 10PAB51/52BR001 que es troben en la intempèrie.

Càlcul de la superfície (A) a protegir (veure plano 3):

Longitud tub aproximadament = 15,17 m;

$$ST = 2\pi RL = 2\pi \cdot 1,6212 \cdot 15,17 = 154,75 \text{ m}^2;$$

Llavors, com hem fet anteriorment utilitzem l'expressió següent per a calcular el pes dels ànodes necessaris de protecció:

$$W = \frac{(t \cdot A \cdot D_c \cdot 8760)}{(\varepsilon \cdot 1000 \cdot \eta \cdot u)} = \frac{(10 \cdot 154,75 \cdot 15 \cdot 8760)}{(2500 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 0,86)} = 106,32Kg$$

De l'annex nº2 (Ànodes de sacrifici de Alumini) seleccionem un ànode d'alumini de 10,1 Kg i de codi W17.

$n \text{ ànodes} = W/W_{\text{ànode}} = 106,32/10,1 = 10,53 \sim 11$  ànodes model W17. En ser imparell, i observant el disseny de la canonada, l'ideal seria instal·lar **12 ànodes**.

Distribució òptima:  $s = L/n = 15,17 \text{ m}/6 \text{ ànodes} = 2,53 \sim 3 \text{ m}$  de separació sempre que sigui possible. 12 ànodes W17 (10,1 kg pes net).

### 3.1.4. A.4.CÀLCUL PROTECCIÓ CATÒDICA (ÀNODES DE SACRIFICI) CANONADES METÀL·LIQUES AIGUA CAP ACONDENSADOR (10PAB51/52BR001)

Dona lloc al pla nº3: PLA INSTAL·LACIÓ P.C. COL·LECTOR CANONADES ENTRADA/SORTIDA AIGUA REFRIGERACIÓ CONDENSADOR (INTEMPÈRIE & ENTERRADES). Es troba a l'annex 3.

Es requereix protecció catòdica per a 2 canonades metàl·liques (Ø84" Acer al carboni SA 106 GrB) situades a la intempèrie les quals proporcionen aigua de refrigeració al condensador. Com ambdues són idèntiques, procedirem al càlcul d'una els resultats de la qual es consideraran per igual a l'altra canonada:

Càlcul de la superfície (A) a protegir (veure plano 3):

Longitud tub aproximadament = 10,139 m + 1,067 m + 1,067m + 2,134 m + 1,131 m = 15,538 m;

$$S1 = 2\pi RL = 2\pi \cdot 1,067 \cdot 15,538 = 104,17 \text{ m}^2$$

La línia conté una vàlvula de 84" i un filtre DEBRIS DN2100. Vàlvula de papallona:

$$S2 = \pi R^2 = (1,067 \pi)^2 = 3,576 \text{ m}^2$$

Filtre DEBRIS: L'àrea d'intercanvi és cònica (acer dúplex estàndard), de base 2100 mm i altra 500 mm.

Calculem la generatriu del con:  $g = \sqrt{(r^2 + h^2)} = \sqrt{((1,050)^2 + (0,5)^2)} = 1,163 \text{ m}$   
 $S_3 = \pi g R = 1,163\pi \cdot 1,050 = 3,834 \text{ m}^2$

$ST = S_1 + S_2 + S_3 = 104,17 \text{ m}^2 + 3,576 \text{ m}^2 + 3,834 \text{ m}^2 = 111,57 \text{ m}^2$

Seguidament:

$$W = \frac{(t \cdot A \cdot D_c \cdot 8760)}{(\varepsilon \cdot 1000 \cdot \eta \cdot u)} = \frac{(10 \cdot 111,57 \cdot 15 \cdot 8760)}{(2500 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 0,86)} = 76,66 \text{ Kg}$$

De l'annex nº2 (Ànodes de sacrifici de Alumini) seleccionem un ànode d'alumini de 10,1 Kg i de codi W17.

$n \text{ ànodes} = W/W_{\text{ànode}} = 76,66/10,1 = 7,59 \sim \mathbf{8 \text{ ànodes model W17}}$ .

Distribució òptima:  $s = L/n = 15,538 \text{ m}/4 \text{ ànodes} = 3,8845 \sim 3 \text{ m}$  (la geometria de la canonada no permet separar els ànodes més de 3m).

En ser 2 el nombre total de canonades  $2 \cdot 8 = 16$  ànodes W17 (10,1 kg pes net).

**Nota:** Per a adaptar-se al disseny de la canonada, tal vegada el vuitè ànode no podria instal·lar-se en tenir aquesta una geometria complexa. En aquest cas, hauríem d'instal·lar 7 ànodes W19, de 12,1 Kg de pes net. Llavors disposaríem d'una protecció de 84,7 Kg, que també seria vàlida, però una mica més costosa econòmicament.

Si volguéssim reduir la massa de l'ànode i acostar-nos als 76,66 Kg hauríem de demanar fabricar un ànode fora de catàleg, la qual cosa implicaria un sobre cost innecessari.

### 3.1.5. A.5.CÀLCUL PROTECCIÓ CATÒDICA (ÀNODES DE SACRIFICI) CANONADES METÀL·LIQUES AIGUA SORTIDA DEL CONDENSADOR (10PAB51/52BR002)

Dona lloc al pla nº3: PLA INSTAL·LACIÓ P.C. COL·LECTOR CANONADES ENTRADA/SORTIDA AIGUA REFRIGERACIÓ CONDENSADOR (INTEMPÈRIE & ENTERRADES).

Es requereix protecció catòdica per a 2 canonades metàl·liques (Ø84" Acer al carboni SA 106 GrB) situades a la intempèrie les quals reben el retorn d'aigua de refrigeració al

condensador i la condueixen al col·lector de sortida cap al pou de ruptura. Com ambdues són idèntiques, procedirem al càlcul d'una dels resultats de la qual es consideraran per igual l'altra canonada:

Càlcul de la superfície (A) a protegir (veure plano 3):

Longitud tub aproximadament = 7,142 m + 5,523 m + 3,201 m + 3,451 m + 2,521 m + 1,649 = 23,49 m;

$$S1 = 2\pi R \cdot L = 2\pi \cdot 1,067 \cdot 23,49 = 157,46 \text{ m}^2$$

La línia conté una vàlvula de 84": Vàlvula de papallona:

$$S2 = \pi R^2 = (1,067 \pi)^2 = 3,576 \text{ m}^2$$

$$ST = S1 + S2 = 157,46 \text{ m}^2 + 3,576 \text{ m}^2 = 161,04 \text{ m}^2$$

Seguidament:

$$W = \frac{(t \cdot A \cdot D_c \cdot 8760)}{(\varepsilon \cdot 1000 \cdot \eta \cdot u)} = \frac{(10 \cdot 161,04 \cdot 15 \cdot 8760)}{(2500 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 0,86)} = 76,66 \text{ Kg}$$

De l'annex nº2 (Ànodes de sacrifici de Alumini) seleccionem un ànode d'alumini de 8 Kg i de codi W14.

$$n \text{ ànodes} = W/W \text{ ànode} = 110,64/8 = 13,83 \sim \mathbf{14 \text{ ànodes model W14.}}$$

Distribució òptima:  $s = L/n = 23,49 \text{ m}/7 \text{ ànodes} = 3,35 \sim 3 \text{ m}$  de separació sempre que sigui possible. En ser 2 el nombre total de canonades  $214 = 2 \cdot 8 \text{ ànodes W14}$  (8 kg pes net).

### **3.1.6. A.6.CÀLCUL PROTECCIÓ CATÒDICA (ÀNODES DE SACRIFICI) COL·LECTOR METÀL·LIC COMÚ CANONADES SORTIDA AIGUA REFRIGERACIÓ CONDENSADOR CAP A POU DE RUPTURA (10PAB60BR001).**

Dona lloc al pla nº3: PLA INSTAL·LACIÓ P.C. COL·LECTOR CANONADES ENTRADA/SORTIDA AIGUA REFRIGERACIÓ CONDENSADOR (INTEMPÈRIE & ENTERRADES). Es troba a l'annex 3.

Es requereix protecció catòdica per a 1 col·lector enterrat (Ø3242mm: Acer al carboni SA 106 GrB) embegut en formigó el qual recull l'aigua procedent de les canonades de



sortida d'aigua del condensador 10PAB51/52BR002 i la trasllada cap al pou de ruptura a través de la seva connexió enterrada amb la canonada bona Ø3242mm 10PAB60BR002.

Càlcul de la superfície (A) a protegir (veure pla 3):

Longitud tub aproximadament = 11,780 m

$$ST = 2\pi R \cdot L = 2\pi \cdot 1,6212 \cdot 11,780 = 120 \text{ m}^2;$$

Llavors:

$$W = \frac{(t \cdot A \cdot D_c \cdot 8760)}{(\varepsilon \cdot 1000 \cdot \eta \cdot u)} = \frac{(10 \cdot 120 \cdot 15 \cdot 8760)}{(2500 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 0,86)} = 82,5 \text{ Kg}$$

De l'annex nº2 (Ànodes de sacrifici de Alumini) seleccionem un ànode d'alumini de 10,1 Kg i de codi W17.

$n \text{ ànodes} = W/W_{\text{ànode}} = 82,45/10,1 = 8,163 \sim 9$  ànodes model W17. En ser imparell, i observant el disseny de la canonada, l'ideal seria instal·lar **10 ànodes**.

Distribució òptima:  $s = L/n = 11,78 \text{ m} / 5 \text{ ànodes} = 2,4 \sim 3 \text{ m}$  de separació sempre que sigui possible. 10 ànodes W17 (10,1 kg peso net).

### 3.1.7. B. CÀLCUL PROTECCIÓ CATÒDICA PER CORRENT IMPOSAT CAIXES D'AIGUA CONDENSADOR PRINCIPAL CICLE AIGUA-VAPOR.

Si bé es definiran les superfícies de les Caixes d'aigua i de les plaques tubulars, i es coneixen les dimensions dels petits trams de canonada a protegir internament, no ha d'oblidar-se que aquestes estructures estan en continuïtat estructural, i per tant elèctrica, amb els tubs del condensador així com amb la resta de canonades d'entrada i sortida, des de les bombes d'impulsió fins al desguàs en la mar. A més, haurà de tenir-se en compte també la superfície del propi condensador, en contacte amb l'electròlit.

Realitzar estimacions de superfícies totals a protegir és molt complicat donada la configuració del condensador. No obstant això, pot establir-se una previsió mínima d'acord amb els quals pot inferir-se dels plànols. Al nostre entendre ha de considerar-se, almenys el següent:

Les superfícies a considerar són aproximadament:

16881 tubs Ø 1 ¼" (31,75 mm).

$$S_1 = n_{\text{tubs}} \cdot 2\pi rL = 16881 \cdot 2\pi \cdot 0,015875 \cdot 12,446 = 20956,64 \text{ m}^2 \text{ de titani}$$

Placa tubular: 4 plaques. Superfície plaques (sense forats);  $S_s = 3,962\text{m} \times 5,131 \text{ m} = 20,33 \text{ m}^2$ .

Superfície plaques (amb forats):

$$S_c = s_s - \sum \emptyset \text{ tubs} = S_s - \sum (\pi \cdot r^2 \cdot n_{\text{tubs}}) = 20,33\text{m}^2 - 13,365 \text{ m}^2 = 6,96\text{m}^2;$$

$$S_2 = 4 \cdot S_c = 4 \cdot 6,96 = 27,86 \text{ m}^2 \text{ d'acer al carboni recoberta de titani.}$$

Caixes d'aigua: 4 caixes:

$$S_{\text{lateral}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot R_c^2}{2} = 2\pi \cdot 1,9812 = 24,66 \text{ m}^2;$$

$$S_3 = 4 \cdot S_{\text{lateral}} = 98,63 \text{ m}^2 \text{ d'acer al carboni.}$$

Canonades entronqui: 4 canonades.  $S_t = 2\pi R_t L = 2\pi \cdot 1,067 \cdot 2,280 = 15,29 \text{ m}^2$ ;

$$S_4 = 4 \cdot S_t = 4 \cdot 15,29 = 61,16 \text{ m}^2 \text{ d'acer al carboni.}$$

$$S_T = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = 20956,64 \text{ m}^2 + 27,86 \text{ m}^2 + 98,63 \text{ m}^2 + 61,16 \text{ m}^2 = 21144,29 \text{ m}^2$$

El total mínim a considerar de superfícies en contacte amb l'electròlit serà d'aproximadament **21144,29 m<sup>2</sup>**.

La intensitat de corrent requerit vindrà definida per l'expressió:

$$D_c \cdot S_T = \frac{15 \frac{\text{mA}}{\text{m}^2}}{1000 \cdot 21144,29 \text{ m}^2} = 317,16 \text{ A}$$

**En ser 4 caixes d'aigua, la intensitat per caixa serà de 79,29 A.**

Però, tenint en compte que pràcticament polaritzem el titani enfront de les caixes d'aigua d'acer al carboni, i a l'ésser el titani un metall bastant noble, s'antulla a pensar que la densitat de corrent utilitzat és massa permissiva, valdria la pena restringir el valor de la densitat de corrent considerat, prenent un valor de 10 dt./m<sup>2</sup>, en el qual continuariem trobant-nos en el mateix escenari de la taula 15 de la memòria considerat en el disseny d'acord amb el manual NACE Corrosion Engineer's Reference Book.

Així, utilitzant una  $D_c$  de 10 dt./m<sup>2</sup>, ens trobaríem en el següent escenari:

$$D_c \cdot ST = \frac{10 \frac{mA}{m^2}}{1000 \cdot 21144,29 m^2} = 317,16 A$$

En conseqüència, donat el tipus d'electròlit, de molt baixa resistivitat, els equips transformadors hauran de dimensionar-se en sortides previstes màximes de 12/24 V i 75 A, alimentats a 230 V 50 Hz, monofàsics.

S'empraran 14 ànodes d'injecció de corrent per corrent imprès TMMO de la marca Corrpro MMO Probe Ànode que ofereix 540 A/m<sup>2</sup> (veure annex 2, Ànode de corrent impresa Corrpro).

Cada ànode pot proporcionar una intensitat:

$I_{\text{ànode}} = 75 A/14 = 5,357 A$ . Per a això, serà necessari considerar magneto tèrmics de 6 A o 10 A. Els primers s'antullen justos, per la qual cosa seleccionarem els de protecció 10 A.

Sobre la base dels 10 A, seleccionarem un ànode d'injecció de corrent de 9" de longitud i ½" de diàmetre, d'acord amb:

En base de l'annex 2( Densitats de corrent) , els ànodes Corrpro MMO proporcionen 50 A/ft<sup>2</sup> = 540 A/m<sup>2</sup>. Llavors:  $S_{\text{lateral ànode}} = 2\pi rL = 2\pi \cdot 0,0127 \cdot 0,2286 = 0,0182415 m^2$

$S_{\text{tapa ànode}} = \pi r^2 = \pi(0,0127)^2 = 5,067e-04 m^2$

$S_{\text{ànode}} = 0,0182415 m^2 + 5,067e-04 m^2 = 0,018748 m^2$

$I_{\text{ànode}} = D_c \cdot S_{\text{ànode}} = 540 A/m^2 \cdot 0,018748 m^2 = 10,12 A \sim 10 A$

D'acord amb normativa, se seleccionaran elèctrodes de referència de Ag/AgCl per a aigua de mar, garantits pel fabricant per a 25 anys de vida ininterrompuda, especials per a aquesta mena d'aplicacions.

### Resumint:

El sistema de Protecció Catòdica a instal·lar serà per corrent imposat. Estarà constituït per quatre (4) equips independents, un per Caixa. Cada equip estarà format per un transformador, un conjunt d'ànodes de titani activat, i elèctrodes de referència. Associat a cada armari s'instal·larà una caixa de connexió dels cables anòdics

corresponents. Per a l'escomesa als transforma rectificadors s'instal·larà un armari de proteccions. En cada Caixa d'Aigua s'instal·laran 14 ànodes d'injecció de corrent imprès i 2 elèctrodes de referència, així com les connexions que permetin una adequada protecció de tota la seva superfície.

Les connexions dels cables de massa a l'estructura es realitzaran mitjançant caragol, rosca i volanderes a platines d'acer soldades a l'estructura. Les connexions de cable de potència i referència seran independents.

### **3.2. VIABILITAT TÈCNICA**

Després de realitzar una sèrie de càlculs detallats, s'ha demostrat que els components de les seccions estudiades no sofriran corrosió significativa sota les condicions operatives previstes. Aquests càlculs consideren els factors crítics que poden influir en la corrosió, com ara l'elecció de materials, la quantitat d'ànodes de sacrifici utilitzats, i les condicions ambientals.

A més, es compta amb la tecnologia adequada i disponible actualment per a implementar les solucions plantejades, la qual cosa assegura que les mesures de protecció contra la corrosió siguin efectives. Els mètodes de control i prevenció proposats, com ara l'ús de recobriments protectors i tècniques electroquímiques, són tècnicament viables i es basen en pràctiques industrials comprovades.

En resum, la solució plantejada és viable tècnicament, garantint la durabilitat i fiabilitat dels components gràcies als càlculs realitzats i a la disponibilitat de la tecnologia necessària per a dur a terme les mesures preventives i correctives identificades.

## 4.0. PRESSUPOST

En aquest apartat del treball s'explicarà i s'adjuntarà el pressupost del projecte juntament amb la viabilitat econòmica. Cal recalcar que el pressupost del següent apartat correspon al pressupost de la implementació del projecte i que la viabilitat econòmica correspon a l'elaboració del projecte no a la seva implementació.

### 4.1. PRESSUPOST DE LA IMPLEMENTACIÓ DEL PROJECTE

En aquest subapartat es detallaran els costos de la implementació del projecte el qual com a la part pràctica contarà de dos apartats, l'apartat A i B.

IT	Ud	DESCRIPCIÓ	Qt	€/Ud	€/Tot
1	Ud	Ànode de sacrifici d'alumini WWI PROCAT per a aigua de mar per a condensadors de refrigeració amb aigua de mar en Centrals Elèctriques i interior de canonades de gran diàmetre, d'aliatge que denominada ALOLINE® (BA-778) obtinguda a partir d'alumini d'alta puresa (99,99%) aliat amb indi, potencial respecte a l'acer protegit de -320 mV, rendiment 92%, capacitat de corrent teòric de 2.880 A x h/Kg, tipus W14 de 8 KG massa neta.	52	96,43	5.014,46
2	Ud	Ànode de sacrifici d'alumini WWI PROCAT per a aigua de mar per a condensadors de refrigeració amb aigua de mar en Centrals Elèctriques i interior de canonades de gran diàmetre, d'aliatge que denominada ALOLINE® (BA-778) obtinguda a partir d'alumini d'alta puresa (99,99%) aliat amb indi, potencial respecte a l'acer protegit de -320 mV, rendiment 92%, capacitat de corrent teòric de 2.880 A x h/Kg, tipus W17 de 10,1 Kg massa neta.	38	121,74	4.626,12
3	Ud	Ànode de sacrifici d'alumini WWI PROCAT per a aigua de mar per a condensadors de refrigeració amb aigua de mar en Centrals Elèctriques i interior de canonades de gran diàmetre, d'aliatge que denominada ALOLINE® (BA-778) obtinguda a partir d'alumini d'alta puresa (99,99%) aliat amb indi, potencial respecte a l'acer protegit de -320 mV, rendiment 92%, capacitat de corrent teòric de 2.880 A x h/Kg, tipus W24 de 14,1 Kg massa neta.	16	169,956	2.719,30
4	Ud	Xapes d'acer al carboni SA-105 de 5x40x10 mm	212	4,056	859,872
5	SUBTOTAL MATERIALS .....				13.219,75

Taula 19: Subtotal de materials de l'apartat A. FONT: Pròpia

IT	Ud	DESCRIPCIÓ	Qt	€uros/Ud	€uros/Tot
6	Ud	Neteja profunda amb aigua a pressió per a neteja adequada conjunt de canonades a instal·lar ànodes. 3 dies hàbils.	1	3.600,00	3.600,00
7	Ud	Preparació (cort) recobriment de revestiment de neoprè de 0,25" de les canonades previ a les soldadures de les xapes de suport dels ànodes. Personal especialitzat. 7 dies hàbils.	1	16.920,00	16.920,00
8	Ud	Muntatge mecànic 2 equips Oficial 1r primera muntador + Oficial primera mecànic 7 dies de treball hàbils.	1	9.408,00	9.408,00
9	Ud	Contractació tècnica mà d'obra reposició pintura, segellament estanc i capa de neoprè de 0,25". Equip de treball 4 tècnics i 2 ajudants. Previsió per a durada màxima de treballs per 7 dies hàbils.	1	20.160,00	20.160,00
10	Ud	Muntatge de totes les bastides necessàries per a escometre els treballs.	1	28.800,00	28.800,00
11	Ud	Hores d'enginyeria expert en instal·lacions de protecció catòdica per a definir projecte.	<b>Nota: Veure Taula de costos d'enginyeria</b>		25896
12	SUBTOTAL Enginyeria, Mà d'Obra d'Instal·lació i Posada en marxa .....				104.784,00
13	<b>TOTAL PRESSUPOST TREBALLS PROJECTE A, SEGONS SUMA DE SUBTOTALS.....</b>				118.003,75

Taula 20: Costos d'enginyeria i de mà d'obra de l'apartat A. Mostra el pressupost total de l'apartat A. FONT: Pròpia.

La taula que s'adjunta a continuació són els costos d'enginyeria del capítol 1 de la viabilitat econòmica. Aquest és el única capítol que esta inclòs dins del pressupost del projecte. Per a calcular aquest capítol s'han tingut en compte uns costos indirectes del 20% i un marge del 30%.

CAPÍTOL I: ELABORACIÓ DEL PROJECTE			
COSTOS DIRECTES			
Codi	Unitats	Preu unitari (€/unitat)	Cost (€)
1	4	50,00 €	200,00 €
2	3	50,00 €	150,00 €
3	130	50,00 €	6.500,00 €
4	110	50,00 €	5.500,00 €
5	20	50,00 €	1.000,00 €
6	8	50,00 €	400,00 €
7	6	50,00 €	300,00 €
8	15	50,00 €	750,00 €
9	36	50,00 €	1.800,00 €
<b>Total costos directes</b>			<b>€ 16.600,00</b>
<b>COSTOS INDIRECTES</b>			
			€ 3.320,00
<b>Total costos indirectes</b>			<b>€ 3.320,00</b>
<b>COSTOS TOTALS</b>			
<b>Costos totals</b>			<b>€ 19.920,00</b>
<b>MARGE</b>			
			€ 5.976,00
<b>TOTAL CAPÍTOL I</b>			<b>€ 25.896,00</b>

Taula 21: Costos d'enginyeria

IT	Ud	DESCRIPCIÓ	Qt	€/Ud	€/Tot
1	Ud	Sub-Quadre de Distribució per a la totalitat dels circuits, preparat per a escomesa en tensió alterna monofàsica 230 V-50 Hz, en armari metàl·lic IP 55. L'armari serà per a interior, de polièster reforçat amb fibra de vidre. Disposarà de porta amb pany i anirà preparat per al seu muntatge sobre basament. Estarà dotat de ventilació per a la seva refrigeració i d'interruptor magnetotèrmic adequat a la potència dels equips, i amb protecció de sobretensions en l'entrada del mateix (tipus "çDenhventil o similar).	1	1.872	1.872
2	Ud	Armari amb transformarectificador independents de control manual/automàtic, en armari metàl·lic IP 55. L'armari serà per a interior, de polièster reforçat amb fibra de vidre, amb indicadors analògics de voltatge, intensitat i potencial de referència, alimentat 230 V/50 Hz, sortides màximes previstes en cada transformarectificador de 12- 24V / 75 A. Amb alarmes de sobreprotecció, selecció d'equip que vol visualitzar-se i potenciòmetre de regulació per a control manual.	4	8.580,00	34.320,00
3	Ud	Ànodo de Tu sonda tipus Corpro MMO (baioneta), per a 10 A de sortida a una densitat de corrent màxim de 550 A /m², en aigua de mar. Cap de connexió en acer inoxidable 316 l x 3", de rosca 1" NPT de Ø ½" i longitud activa 9", protegit amb tub de fibra de vidre i connexió *condulet de 1" NPT	56	1008	56.448,00
4	Ud	Elèctrode permanent de Ag/AgCl de 1", tipus Corpro Permacell o similar, per a control en automàtic del transformarectificador, ja previst amb de connexió en acer inoxidable 316 l x 3"	6	1.695,00	10.170,00
5	Ud	Caixa per a interconnexió ànodes, ha de ser de fibra de vidre modelada., amb xunts 10 A/50 MV i magnetotèrmics de 10 A per a 14 ànodes, i sortida a rectificador.	4	2.400,00	9.600,00
6	ml	Cable 1x25mm2 coure trenat tipus RZ-1 K 0,6/1kV amb aïllament THW (Thermoplastic High Heat and Moisture Water Resistant) amb aïllament termoplàstic de PVC, 600 V, 75 °C, en sec i humit, per a connexions de potència (positiu i negatiu)	700	7	4.914
7	ml	Cable 1x4 mm2 coure trenat tipus RZ-1 K 0,6/*1kV amb aïllament THW (Thermoplastic High Heat and Moisture Water Resistant) amb aïllament termoplàstic de PVC, 600 V, 75 °C, en sec i humit, per a connexions de negatiu de referència i provetes metàl·lics.	1.100	2	1.921,92
8	Ud	Caixa de presa de potencial, en acer pintat, amb borns, per a cables d'elèctrode de referència permanent i negatiu de referència, amb derivació mitjançant hembra per a connexió d'equips de registre de potencials. A instal·lar en llocs accessibles en el recorregut dels cables als transformarectificadors.	6	280,80	1.684,80
9		SUBTOTAL Materials .....			120.930,72

Taula 23: Costos de Materials del apartat B. FONT: Pròpia.

IT	Ud	DESCRIPCIÓ	Qt	€/Ud	€/Tot
10	Ud	Contractació obra electromecànica industrial, que comprèn perforació de 62 trepants i soldadura de 62 maniguets 1x3" a estructures, reposició de pintura interior afectada, connexió i estesa de cables i de safata portables tipus "*regiban", així com subministrament d'aquesta. Equip de treball format per 4 oficials de la mecànica + 2 oficials de primera elèctric, 2 oficials soldador i 4 ajudants. Previsió per a durada màxima de treballs per 21 dies hàbils	1	75.600,00	75.600,00
11	Ud	Contractació tècnica mà d'obra reposició pintura, segellament estanc i capa de neoprè de 0,25". Equip de treball 2 tècnics i 2 ajudants. Previsió per a durada màxima de treballs per 21 dies hàbils	1	35.280,00	35.280,00
12	Ud	Supervisió de muntatge mecànic amb presència permanent de supervisor d'expert en sistema de protecció catòdica per corrent imprès obra durant tots els dies de la instal·lació. Previst per a un màxim de 21 dies hàbils	1	12.600,00	12.600,00
13	Ud	Muntatge dels elements propis de protecció catòdica, cablejat d'elements, i proves prèvies de posada en servei. Mínim 10 dies hàbils. Equip de dos operaris qualificats. Inclou desplaçaments.	1	10.800,00	10.800,00
14	Ud	Muntatge de totes les bastides necessàries per a escometre els treballs	1	30.000,00	30.000,00
15	Ud	Registres de potencials de 24 h en, dues setmanes després de la posada en marxa. Redacció d'informe final i lliurament de tota la documentació de l'obra (manuals, registres, etc).	8	888	7.104,00
16		SUBTOTAL Enginyeria, Mà d'Obra d'Instal·lació i Posada en marxa .....			171.384,00
17		<b>TOTAL PRESSUPOST TREBALLS PROJECTE B, SEGONS SUMA DESUBTOTALS .....</b>			292.314,72

Taula 22: Costos de ma d'obra i instal·lació de l'apartat B. Pressupost total del apartat B. FONT: Pròpia.

A continuació s'adjunta la taula final on es mostra el pressupost final de la implementació del projecte

TOTAL PRESSUPOST TREBALLS DE PROJECTE A	118.003,75 €
TOTAL PRESSUPOST TREBALLS DE PROJECTE B	292.314,72
<b>TOTAL PRESSUPOST</b>	<b>410.318,47 €</b>

Taula 24: Pressupost final d'implementació del projecte

## 4.2. VIABILITAT ECONÒMICA

En aquest subapartat s'adjuntaran tots els capítols del pla econòmic del projecte. Recalcar que aquest capítols corresponen únicament a l'elaboració del projecte. Seguidament es justificarà si aquest projecte és viable econòmicament.

CAPÍTOL I: ELABORACIÓ DEL PROJECTE					
COSTOS DIRECTES					Cost (€)
Codi	CAPÍTOL III: AMORTITZACIONS				200,00 €
1	AMORTITZACIONS				150,00 €
2	Codi	Descripció	Cost d'inversió	Anys	Cost amortitzat (€)
3					6.500,00 €
4	Plantejament i realització de la solució més adequada	HP Vectus 16-E0095NS	825,90 €	3 110	46,66 €
5	Viabilitats	ASUS ROG G513RC-HN088W	974,38 €	3 20	55,69 €
6	Pressupost	Calculadora CASIO 2	20 €	10 8	0,34 €
7	<b>TOTAL CAPÍTOL III</b>				<b>102,69 €</b>
8	Imprevistos (10% costos directes)				10,27 €
9	Imprevistos (20% costos indirectes)				6,60 €
Total costos directes					€ 16.600,00
COSTOS INDIRECTES					
COSTOS INDIRECTES (20% costos directes)					€ 3.320,00
Total costos indirectes					€ 3.320,00
COSTOS TOTAIS					
Costos totals					€ 19.920,00
MARGE					
Marge (30% costos totals)					€ 5.976,00
TOTAL CAPÍTOL I					€ 25.896,00

Taula 27: Capítol III de l'elaboració del projecte: Amortitzacions. FONT: Pròpia.

Taula 26: Capítol I de l'elaboració del projecte: Costos d'enginyeria. FONT: Pròpia

CAPÍTOL II: MATERIAL				
COSTOS DIRECTES				
Codi	Descripció	Unitats	Preu unitari (€/unitat)	Cost (€)
1	Boligraf	4	1,50 €	6,00 €
2	Llibreta	2	4,00 €	8,00 €
3	Corrector Tipp-Ex	2	2,50 €	5,00 €
<b>Total costos directes</b>				<b>19,00 €</b>
COSTOS INDIRECTES				
Costos indirectes de material (20% costos directes de material)				
<b>Total costos indirectes</b>				<b>3,80 €</b>
COSTOS TOTAIS DE MATERIAL				
<b>Costos totals de material</b>				<b>22,80 €</b>
IMPREVISTOS MATERIAIS				
Imprevistos materials (10% costos totals de material)				
<b>Total imprevistos</b>				<b>2,28 €</b>
<b>TOTAL CAPÍTOL II</b>				<b>116,16 €</b>

Taula 25: Capítol II de l'elaboració del projecte: Costos materials. FONT: Pròpia.



<b>PRESSUPOST FINAL</b>	
TOTAL CAPÍTOL I: ELABORACIÓ DEL PROJECTE	25.896,00 €
TOTAL CAPÍTOL II: MATERIAL	116,16 €
TOTAL CAPÍTOL III: AMORTITZACIONS	102,02 €
<b>TOTAL</b>	<b>26.114,18 €</b>
IVA 21%	5.483,98 €
<b>TOTAL PRESSUPOST</b>	<b>31.598,16 €</b>

*Taula 28: Pressupost final del Projecte*

Com es pot veure al pressupost, el projecte té un cost final de 31-598,16 €. La major part d'aquest cost ve donat pels costos d'enginyeria, sent una conseqüència lògica degut a que aquest correspon únicament al cost de l'elaboració del projecte.

El projecte en qüestió ha estat analitzat en termes de viabilitat econòmica, encara que no s'ha inclòs un apartat específic de rendibilitat en el pressupost. La raó d'això és que el benefici econòmic es deriva directament de la implementació de les solucions proposades, més que d'una anàlisi de rendibilitat tradicional. Es a dir, no pot calcular-se una rendibilitat en si, sinó que la justificació de la implementació del projecte ve donada per augmentar la vida útil dels components que componen el sistema de refrigeració. A continuació s'explicaran dues raons principals per la implementació d'aquest projecte que demostren que aquest es viable econòmicament:

- Si es deixessin els components del condensador i el sistema de filtrat d'aigua tal com estan, fabricats amb els materials actuals, això provocaria nombrosos problemes en els components a causa de la corrosió. Aquests problemes no sols afectarien l'operativitat del sistema, sinó que també implicarien costos significatius en reparacions i manteniment. D'altre banda, aquesta problemàtica de corrosió principalment derivaria en problemes en els conductes i el condensador, el qual per si sol ja suposa una inversió aproximada de 10 milions d'euros. Per lo tant la simple aplicació del projecte ajudaria a minimitzar la necessitat de reemplaçar i reparar components del sistema, eliminant per tant, costos addicionals a l'empresa .
- Implementar el projecte amb les solucions proposades és més rendible a llarg termini que utilitzar components fabricats enterament amb materials anticorrosius. Aquests materials, encara que són altament resistents a la corrosió,

són molt costosos i requereix una inversió inicial important. Si es focalitza l'ús de materials anticorrosius únicament en parts crítiques del sistema i s'apliquen tractaments anticorrosius en els demes components, s'aconsegueix una protecció adequada contra la corrosió sense incórrer en els elevats costos de materials especialitzats. D'aquesta manera el projecte també significaria un estalvi de cara al manteniment òptim dels components del sistema.

En resum, el projecte és econòmicament viable perquè les solucions plantejades permeten prevenir danys costosos, protegir inversions significatives i optimitzar l'ús de materials costosos. Aquesta estratègia assegura la protecció adequada contra la corrosió de manera més rendible que l'ús extensiu de materials anticorrosius, garantint així la viabilitat i sostenibilitat econòmica del projecte.

## 5.0. CONDICIONS NECESARIES

En aquest apartat es donaran les especificacions que contenen els materials necessaris i les instruccions per a la instal·lació d'un sistema de protecció catòdica de corrent imprès. Totes aquestes dades han sigut proporcionades per Endesa Generación S.A.

### 5.1. MATERIALS

#### 5.1.1. Estació de Protecció Catòdica

La unitat de potència de protecció catòdica de corrent imprès ha de ser manual & automàtica controlada mitjançant rectificador, entrada 120/230 alterna monofàsica, 50 Hertz, 12 volts, sortida de CC de 75 amperes, amb caixa refrigerada per aire i de rectificadors universals.

Constarà dels següents components:

- a) Transformador per a adaptar la tensió de la xarxa a tensions d'utilització i establir una separació galvànica. Els seus debanaments seran totalment independents, amb un aïllament d'almenys 3 kV. El voltatge de sortida del bobinatge secundari no ha de ser major de 12 V.
- b) Circuit rectificador d'ona completa mitjançant tiristors, amb proteccions RC, per a alimentar en corrent continu tant al circuit exterior de protecció com al de control de la pròpia Estació de Protecció Catòdica. La sortida estarà protegida mitjançant fusible, limitació de corrent i descarregadors de sobretensions. El factor d'arissat serà com a màxim d'un 4,5% eficaç.
- c) Filtres antiparasitaris.
- d) Bloc de regulació i control de la tensió i intensitat d'injecció.
- e) Elements de protecció, tant de l'equip com de les persones.
- f) Bloc de senyalització, indicadors i alarmes.
- g) Dispositius de telecontrol i telecomandament.
- h) Serà alimentat amb una tensió de 120/230 Vca – 50 Hz. Estarà protegit a l'entrada d'aquesta alimentació elèctrica mitjançant descarregadors de sobretensions.

## **Mode de funcionament**

Tindrà la possibilitat de funcionar en mode manual o automàtic.

### **Funcionament en mode MANUAL:**

En aquest mode es podrà donar una tensió de sortida fixa, de 0 Vcc a la màxima tensió. Aquesta tensió de sortida s'establirà mitjançant un potenciòmetre.

### **Funcionament en mode AUTOMÀTIC:**

Incorporarà tres llaços de control: regulació de tensió, d'intensitat i d'intensitat mínima.

#### **a) Regulació de tensió**

Mitjançant un potenciòmetre s'establirà el potencial que es desitja mantenir en el punt d'injecció, independentment de les variacions de la tensió d'entrada o de la càrrega en la sortida.

L'equip incorporarà un llaç de control que compararà el potencial de la canonada respecte a l'elèctrode de referència de plata/sulfat de plata i un potencial de protecció de consigna establert prèviament. La diferència de potencial resultant s'utilitza per a regular la sortida de corrent del transformarectificador variant l'angle de conducció dels tiristors del pont rectificador. El llaç de mesura ha de tenir una impedància d'entrada elevada, d'almenys 1 M $\Omega$ .

El funcionament automàtic es fa molt més adequat quan les condicions del circuit exterior siguin molt variables.

#### **b) Llaç de limitació d'intensitat**

Igual que per al potencial de sortida, es fixarà un valor de consigna per a la intensitat de sortida, es mesurarà el valor del corrent injectat mitjançant un xunt i es corregirà la diferència amb la finalitat de no superar el valor màxim de corrent de sortida.

#### **c) Llaç de regulació d'intensitat mínima**

Es tindrà la possibilitat d'establir com a consigna un determinat valor d'intensitat mínima a injectar, a fi de que la canonada no quedi desprotegida en cap moment, ni en els punts més allunyats del lloc d'injecció de corrent.

Per a poder passar d'un mode de funcionament a l'altre (manual/automàtic) s'instal·larà un commutador.

L'equip incorporarà un temporitzador on/off amb temps regulable de desconexió de la EPC. Això permet mesurar els potencials de les caixes d'aigua amb i sense injecció de corrent i permet comprovar el potencial de protecció catòdica de polarització. El temporitzador serà apropiat per a realitzar interrupcions d'entre 1 i 3 segons, i temps de connexió d'entre 60 i 120 segons.

En previsió que el sistema pugui arribar a funcionar rebent la consigna des d'un lloc remot, es tindrà l'opció de treballar en mode "LOCAL" o en mode "REMOT". En el mode "LOCAL" el potencial de consigna s'estableix mitjançant un selector o un potenciòmetre des del propi armari. En el mode "REMOT" la consigna de potencial es rep des d'un Centre de Telecontrol exterior. El Terminal Remot convertirà aquesta consigna en un senyal analògic de 4 - 20 dt. o digital que serà la que s'envii al rectificador.

### **Proves i assajos previs**

Els transformarectificadors han de ser sotmesos a una sèrie de proves i assajos en fàbrica abans de la seva instal·lació i posada en servei, com ara:

- a) Proves de funcionament en buit i càrrega. Es comprovarà el correcte funcionament de la regulació, ajust de límits, selecció de funcionament, arrissat, etc.
- b) Proves de sobrecàrrega, i curtcircuit en rectificadors automàtics, amb comprovació de la limitació de corrent de sortida.
- c) Proves d'escalfament a plena càrrega, verificant l'ascens de temperatura fins a l'equilibri.
- d) Assaig d'aïllament elèctric, abans i després de l'assaig de rigidesa
- e) Prova de rigidesa.

### **5.1.2. Ànodes de Corrent Impresa**

Els ànodes seran tipus baioneta i estaran composts d'un substrat de titani sòlid amb un revestiment de capa exterior d'òxid metàl·lic mixt. Porció activa de 9 polzades de llarg per 1/2 polzada diàmetre. Longitud inactiva de 6 polzades, protegida amb fibra de vidre G-10 de 1-1 / 8 polzades. L'ànode ha d'incloure un filtre d'acer inoxidable NPT d'1 polzada i una caixa de connexió per a cable terminació. Ànode de sonda tipus Corrpro MMO (baioneta).

Proporcionaran un corrent màxim de sortida de 10 A i es dissenyaran de manera que la vida útil sigui de 20 anys.

### **Proves i assajos**

Abans d'instal·lar els ànodes realitzar les següents comprovacions:

- a) Comprovar que la superfície està exempta d'escòries o restes de materials estranys.
- b) La morfologia no ha d'haver estat alterada
- c) No deuen presentar cap esquerda
- d) La seva resistència elèctrica mesura entre l'ànode i l'extrem lliure del cable amb què se subministra el mateix no excedirà de 0,01 ohm. Això es determinarà fent circular un corrent de 10 A.
- e) De cada bugada es prendran dues mostres per a anàlisi química, al principi i final de la bugada solidificada. Sobre les mostres es realitzarà una anàlisi espectrogràfica havent d'estar els resultats dins dels límits especificats pel fabricant o subministrador.
- f) No hi ha pantalles aïllants entre l'ànode i l'estructura a protegir
- g) El circuit elèctric entre l'ànode i l'estructura ha d'estar obert fins a la posada en servei.

#### **5.1.3. Elèctrodes de referència instal·lats en caixes d'aigua del condensador.**

Les sondes d'elèctrode de referència han de ser de tipus submergible per a muntatge en paret de plata.

L'element de l'elèctrode ha de protegir-se amb un tub de fibra de vidre G-10 d'1 polzada de diàmetre. Els elèctrodes han d'incloure maquinari de muntatge que inclou blindatge de fibra de vidre, filtre d'acer inoxidable NPT 316 d'1 polzada i caixa de conductes perquè la terminació del cable es munti fos de la caixa d'aigua. Elèctrode de referència tipus Corpro Permacell o similar de Ag/AgCl.

#### **5.1.4. Ànodes de sacrifici d'alumini protecció catòdica canonades d'acer**

Ànodes de sacrifici d'aliatge d'alumini, ALOLINE-778. Aquests ànodes són apropiats per a la seva utilització com a ànodes de sacrifici en aigües salobres i en aigua de mar. Pilotis

de ducs d'alba, pilotis d'embarcadors, condensadors de refrigeració amb aigua de mar en Centrals Elèctriques, interior de canonades de gran diàmetre amb aigua de mar, fons de tancs de cru amb aigua de mar, etc. L'aliatge BA-778 és vàlida per a ser utilitzada a temperatures altes.

L'aliatge que es fabrica i comercialitza és denominada ALOLINE® (BA-778) obtingudes a partir d'alumini d'alta puresa (99,99%) aliat amb indi. Les característiques d'aquest aliatge són les següents:

- Potencial en circuit obert respecte a un elèctrode de coure-sulfat de coure: -1.170 mV./Cu/CuSO<sub>4</sub>.
- Potencial respecte a l'acer protegit: -320 mV.
- Rendiment: 92%
- Capacitat de corrent teòric: 2.880 A x h/Kg.

#### 5.1.5. Cables

El cable d'estructura del circuit de sortida negativa del rectificador a la paret del condensador ha de ser 25 mm de diàmetre, de coure trenat, amb aïllament THW (Thermoplastic High Heat and Moisture Water Resistant) amb aïllament termoplàstic de PVC, 600 V, 75 °C, en sec i humit

El cable de l'ànode del circuit de sortida positiu del rectificador a la caixa de connexions de l'ànode / elèctrode de referència ha de ser de diàmetre 25 mm, coure trenat, amb aïllament THW.

Els cables de l'ànode des de la caixa de connexions de l'ànode / elèctrode de referència als ànodes individuals han de ser de 4 mm de diàmetre, coure trenat, amb aïllament THW.

El cable de prova (Test) de la caixa de connexions de l'ànode / elèctrode de referència a la paret del condensador ha de ser 4 mm de diàmetre, coure trenat, amb aïllament THW.

Els cables dels elèctrodes des de la caixa de connexions de l'ànode / elèctrode de referència als elèctrodes individuals han de ser 4 mm de diàmetre, coure trenat, amb aïllament THW.

El cable d'estructura (prova) de la caixa de connexions de l'ànode / elèctrode de referència al controlador del rectificador ha de ser 4 mm de diàmetre, coure trenat, amb aïllament THW.

El cable de l'elèctrode de referència des de la caixa de connexions de l'ànode / elèctrode de referència al controlador del rectificador ha de ser 4 mm de diàmetre, coure trenat, amb aïllament THW.

#### **5.1.6. Armari de connexions**

La caixa (4) de connexions dels ànode / referencia ha de ser de fibra de vidre modelada. Les dimensions han de ser de 460x400x200 mm. La caixa de connexions estarà proveïda i completament acoblada amb catorze (14) interruptors de 10A i derivacions individuals, muntats en un panell fenòlic aïllat. La caixa de connexions ha d'incloure una barra de bus comú per als cables de l'ànode.. A més, per als elèctrodes de referència, un cable 4 mm de diàmetre de la paret de la unitat del condensador, un cable 4 mm del rectificador.

L'armari serà per a interior, de polièster reforçat amb fibra de vidre. Disposarà de porta amb pany i anirà preparat per al seu muntatge sobre basament. Estarà dotat de ventilació per a la seva refrigeració i per a evitar condensacions. Hi haurà suficient espai lliure en el seu interior per a allotjar diversos equips registradors. En la documentació de l'equip ha d'indicar-se el material de fabricació i el grau de protecció.

#### **5.1.7. Xunts**

Les derivacions de mesurament de corrent per a les caixes d'unió d'ànode / elèctrode de referència han de tenir una classificació de 10 amperes / 50 mini volts tipus Holloway o similar.

#### **5.1.8. Interruptors**

14 interruptors bipolars de protecció per armari de 10 amperes cadascun, tipus GUERIN o similar.

#### **5.1.9. Acoblaments d'acer inoxidable**

L'acoblament de muntatge de l'ànode i l'elèctrode de referència ha de ser d'acer inoxidable 316, 3000 psi, rosca 1 polzada NPT. Les dimensions externes de l'acoblament seran



d'1.75" de diàmetre exterior i 1.18 "de llarg. Parcialment roscat a 0.68" de longitud des d'un extrem. L'extrem no roscat de l'acoblament ha de tenir 0.5" de llarg.

## **5.2. INSTAL·LACIÓ**

### **5.2.1. Ànodes**

- i. S'instal·laran un total de cinquanta-sis (56) ànodes. S'instal·laran catorze (14) ànodes en cada de les quatre (4) caixes d'aigua. Els plans mostren les ubicacions típiques dels ànodes per a caixes d'aigua.
- ii. En cada ubicació de l'ànode, s'ha de trepar un forat a través de la paret de la caixa d'aigua, dimensionat per a acomodar el diàmetre exterior de l'acoblament d'acer inoxidable d'1 polzada, 3000 psi. S'ha de soldar el mig acoblament a la paret de la caixa d'aigua com es mostra en el pla de detall (pla 9). L'instal·lador dels ànodes en les caixes d'aigua ha de fer això sempre abans de l'aplicació del revestiment interior.
- iii. Usant compost antiadherent o cinta de tefló, acoblar l'ànode a través de l'acoblament. L'espai anul·lar entre l'ànode i l'interior de la penetració ha d'estar ple amb segellador de silicona. La petita caixa de connexions ha de muntar-se en la paret exterior de la caixa d'aigua. Connectar el cable de 4 mm de diàmetre i passar el cable a través del conduit cap a la caixa de connexions.

### **5.2.2. Elèctrodes de referència**

- i. Els elèctrodes de referència muntats en la paret han d'emmagatzemar-se en un lloc on no estiguin subjectes a temperatures baixes (<0 °C).
- ii. S'instal·laran un total de dotze (12) elèctrodes de referència. 4 en les caixes d'aigua 1&4 i 2 en la caixes d'aigua 2&3. Els plans mostren les ubicacions típiques d'elèctrodes per a caixes d'aigua.
- iii. En cada ubicació d'elèctrode, trepar un forat a través de la paret de la caixa d'aigua, dimensionat per a acomodar el diàmetre exterior de l'acoblament d'acer inoxidable d'1 polzada, 3000 psi. Soldar l'acoblament a la paret de la caixa d'aigua com es mostra en el pla (pla 9).
- iv. Usant compost antiadherent o cinta de tefló, acoblar l'ànode a través de l'acoblament. L'espai anul·lar entre l'ànode i l'interior de la penetració ha d'estar ple amb segellador de silicona. La petita caixa de connexions ha de muntar-se en

la paret exterior de la caixa d'aigua. Connectar el cable de 4 mm de diàmetre i passar el cable a través del conduit cap a la caixa de connexions.

- v. La tapa de plàstic en l'extrem de la sonda de l'elèctrode ha de deixar-se en el seu lloc just abans de posar en servei el condensador. Deixar la tapa oberta durant un temps prolongat pot provocar que s'assequi l'endoll de l'elèctrode, i provocar un possible mal permanent a l'elèctrode.

### **5.2.3. Ànodes de sacrifici.**

Els ànodes es solden a les estructures a protegir, entre les seves ànimes d'acer (platines d'acer que els suporten) i la superfície a protegir.

En els les canonades solen instal·lar soldant els extrems de l'ànima (normalment sobresurten per tots dos extrems dels ànodes) a platines d'acer soldades al fons i en la part superior de la canonada, amb aproximadament 5-10 cm d'altura.

### **5.2.4. Rectificador**

- i. Es proporcionaran quatre (4) unitats rectificadores. Es requereix un rectificador controlat de potencial automàtic utilitzat per a energitzar catorze (14) ànodes d'injecció de corrent imprès instal·lats en les corresponents caixes d'aigua.
- ii. El rectificador ha d'instal·lar-se en un lloc accessible i convenient el més a prop possible del condensador.
- iii. Connectar el rectificador a una font d'alimentació monofàsica de 120/230 V CA (50 Hertz). La demanda de corrent altern màxim per al rectificador és inferior a 10 amperes. Per tant, el subministrament de CA ha d'estar connectat a través d'un interruptor de 10 amperes (mínim).

### **5.2.5. Connexió del cable a la paret del condensador (negatiu i test).**

Soldar un cupó d'acer a la paret del condensador en un lloc accessible i convenient.

Connectar un

(1) cable de diàmetre 25 mm (negatiu) i un (1) cable de 4 mm (test) al cupó amb terminals de coure (veure detall pla 9).

Estendre un conduit d'1 polzada de diàmetre per al cable d'estructura 25 mm (negatiu) des del veïnatge del cupó d'acer en la caixa d'aigua del condensador al rectificador de protecció catòdica (veure detall pla 9).

Estendre un conduit de ¾" polzada de diàmetre per al cable d'estructura 4mm (negatiu Test) des del veïnatge del cupó d'acer en la caixa d'aigua del condensador a la caixa de connexions (veure detall pla 9).

#### **5.2.6. Caixa de connexions d'ànodes i elèctrodes de referència**

- Es proporcionen quatre (4) caixes de connexions d'ànode d'injecció/elèctrode de referència, completament acoblades cadascuna amb catorze (14) interruptors i derivacions individuals, terminals per a acabar fins a vint-i-un (21) cables de 4 mm i una terminal en la barra de bus per a acabar un (1) cable 25 mm de diàmetre.
- Muntar les caixes de connexions de connexions el més a prop possible del condensador i al costat dels rectificadors de protecció catòdica.
- Instal·lar conduits que s'estenguin entre les seves respectives caixes d'aigua, rectificadors i caixes de connexions d'acord amb al RBT (Reglament Baixa Tensió). Els cables es poden agrupar en conduits comuns
- Instal·lar tots els ànodes, elèctrode de referència, estructura (prova), cables de control i cables de sortida del positiu (+) del rectificador a través dels seus conduits designats i acabar-los en la caixa de connexions en les seves terminals apropiats, com es mostra en els plans.
- Tots els cables han d'identificar-se amb identificació no metàl·lica; etiquetes com s'indica en els plans.

#### **5.2.7. Activació del sistema de protecció catòdica**

- No activar els rectificadors. L'activació dels rectificadors ha de realitzar-se per tècnics qualificats en instal·lacions de protecció catòdica per ànodes d'injecció de corrent imprès i sota la supervisió d'un enginyer expert en corrosió
- Operar el sistema de protecció catòdica sense establir adequadament el criteri d'operació pot provocar danys en el revestiment de la caixa d'aigua i possibles danys per corrosió en les zones danyades.

### **5.3. POSADA EN MARXA**

La posada en marxa del sistema es realitzarà una vegada que estigui completament acabat el muntatge complet. Se seguiran els passos següents:

#### **5.3.1. Comprovacions prèvies.**

##### **Caixes d'aigua**

Inspecció de possibles falles de revestiment en el conjunt de les 4 caixes d'aigua del condensador i canonades de connexió, prestant especial atenció a les juntes i acabats en les unions de les caixes d'aigua amb el cos del condensador i a cadascun dels acabats (68) del revestiment en la instal·lació dels ànodes d'injecció i dels elèctrodes de referència en les caixes d'aigua del condensador.

##### **Connexions elèctriques**

- El cable positiu de sortida del rectificador està connectat als ànodes d'injecció de corrent i als elèctrodes de referència.
- El cable negatiu de sortida del rectificador està connectat a les caixes d'aigua.
- Els cables estan clarament identificats mitjançant etiquetes.
- No hi ha entroncaments en l'estesa de cables fora de caixes específiques.
- Comprovació de l'estrenyi de les connexions.

##### **Estacions de Protecció Catòdica**

- Les característiques elèctriques compleixen amb el requerit en el Projecte.
- Protecció contra contactes elèctrics directes.
- Descarregadors de sobretensió d'alimentació i sortida de c. c.

##### **Juntes aïllants**

- Mesurament de la resistència elèctrica entre els extrems de cada junta aïllant per a comprovar que no estan comunicades.

#### **5.3.2. Procés de posada en marxa**

1. Es donarà alimentació elèctrica a les EPC's i es realitzarà l'ajust inicial del potencial i el corrent de sortida amb els valors calculats en el Projecte.

2. Mesurament de tots els potencials dels ànodes d'injecció. Es reajustarà la injecció de corrent de la EPC fins a obtenir els valors de potencial desitjats. La regulació ha de realitzar-se portant el potencial a més negatiu i no a l'inrevés, ja que això últim pot produir una polarització de l'estructura que emmascari la regulació dels rectificadors.
3. Es realitzaran els següents mesuraments:
  - Preses de potencial. Mesurament de  $E_{on}$  i  $E_{off}$
  - Registres de  $E_{on}$  i  $E_{off}$  durant 24 hores amb interval de mesures d'1 minut.
  - Mesurament del corrent de circulació per les caixes d'aigua
  - Es realitzaran i documentaran registres continus en les EPCs i preses de potencial dotada amb proveta. En aquests registres es realitzarà mesurament ON/OFF almenys cada minut.
4. Mesura dels potencials en totes les preses de potencial i transcriure les dades a gràfiques. Comprovar que en totes les preses de potencial amb proveta el potencial real  $E_{IRfree}$  està entre  $-0,80$  i  $-1,1$  V respecte a l'elèctrode de Ag/AgCl, tal com indica la Norma EN 12473.
5. Registres de potencial durant 24 hores en aquells punts on es prevegi l'aparició de corrents vagabunds. Anàlisi dels registres. Si es troben zones amb variacions del potencial, veure la possibilitat d'instal·lar drenatges unidireccionals, augmentar núm. d'Estacions de Protecció Catòdica o instal·lar ànodes de sacrifici en punts intermedis com a suport a la protecció.
6. Una vegada ajustat el sistema realitzar informe amb totes les mesures, registres i indicació de l'estat final de les juntes aïllants: obertes, puntejades o amb regulació de corrent.

#### **5.4. DOCUMENTACIÓ**

Finalitzada la verificació de l'efectivitat de la protecció catòdica es lliurarà a la propietat la documentació final, que inclourà:

- Descripció de les instal·lacions amb característiques dels equips.
- Modificacions efectuades respecte al projecte original, en cas d'existir.
- Esquema lineal d'implantació, en el qual es reflectirà la ubicació de les caixes d'aigua del condensador i tots els elements relacionats amb la protecció catòdica:

preses de potencial, juntes aïllants amb el seu estat final, ànodes d'injecció de corrent, recorreguts de cables, EPCs, , elèctrodes de referència permanents, xarxes de connexió a terra, etc, així com les estructures pròximes que puguin influir en la protecció catòdica: encreuament de ferrocarril i línies elèctriques, incloent-hi els valors mesurats de resistivitat del terreny.

- Registres de mesuraments dels potencials.
- Gràfic del valor del potencial, tant natural  $E_{on}$  com  $EIR_{free}$  en totes les caixes d'aigua.
- Documentació i recomanacions per a l'operació i manteniment del sistema de protecció catòdica. S'inclouran catàlegs dels equips.

## 5.5. REQUISITS DE QUALITAT I MEDIAMBIENTALS

El contractista haurà de disposar d'un Sistema de Gestió de Seguretat, de Gestió Ambiental i de Gestió de Qualitat.

Així mateix haurà de disposar dels equips de mesura adequats, que com a mínim seran:

- Polímetres i registradors amb possibilitat de mesurar simultàniament el potencial ON, OFF.
- Tel·luròmetres per al mesurament de la resistència del terreny
- Pines amperimètriques de corrent continu i altern.

El contractista que executi els treballs en camp haurà d'elaborar un Pla de Gestió Ambiental per al desenvolupament de la seva activitat, en el qual es tindrà en compte:

- Gestió de residus: restes d'envasos i embalatges, pintures, olis, etc.
- Elaboració dels Programes de Punts d'Inspecció per a controlar i documentar el compliment del Pla.
- A igualtat de prestacions s'empraran els productes més innocus per a les persones i el medi ambient. On sigui possible s'utilitzaran productes biodegradables.

## 5.6. CONTROL I MANTENIMENT DEL SISTEMA DE PROTECCIÓ CATÒDICA

Ha de parar-se esment a les modificacions que poden produir-se en instal·lacions de l'entorn o l'envelliment del revestiment de les caixes d'aigua i canonades d'interconnexió.

Una vegada que les caixes d'aigua estiguin polaritzades no s'esperen grans variacions del potencial i basten les mesures del potencial instantani. Si es produeixen forts i ràpides variacions s'ha de pensar que són produïdes per corrents paràsits. Quan se sospiti de la seva existència s'han de realitzar registres del potencial d'una durada mínima de 24 hores en aquells llocs en principi més susceptibles de veure's afectats per aquesta mena de corrents, com són els creus i aproximacions a vies de ferrocarril electrificat, línies elèctriques,...

L'objectiu és mantenir tots els punts de l'estructura al llarg del temps amb un potencial suficient per a inhibir la corrosió. És necessari realitzar unes comprovacions periòdiques i uns registres que certifiquin que la canonada està sent ben mantinguda. Aquest exercici de control del correcte funcionament de les EPC's, i dels potencials en les caixes d'aigua del condensador han de realitzar-se de manera preventiva en un període no major a l'any.

En principi, si l'Estació de Protecció Catòdica funciona bé és d'esperar que l'estructura es trobi protegida en tot el seu recorregut. Es considera que el potencial no sofreix grans variacions.

S'avalua l'efectivitat del sistema comparant els valors mesurats amb els de referència, presos en el moment de la posada en servei i anys següents o amb els criteris de protecció.

És important el control de l'estat del revestiment aïllant, donada la influència que té sobre el potencial de l'estructura.





## **6.0. ESTUDI MEDIAMBIENTAL**

En aquest apartat es dura a terme un anàlisi mediambiental del projecte. Aquest anàlisi esta enfocat únicament al desenvolupament del projecte (teòric), no a la seva implementació.

### **6.1. Visió global**

En avaluar la viabilitat mediambiental del projecte, s'han identificat dues formes principals d'enfocar l'impacte ambiental. Primerament, hi ha l'impacte directe associat amb la fase teòrica del projecte, com la generació de residus (bolígrafs, paper, quaderns) i les emissions de gasos (produïdes per l'energia que alimenta els ordinadors utilitzats). En segon lloc, s'ha considerat l'impacte indirecte que es produirà una vegada implementat el projecte, amb emissions de gasos i generació de residus en una escala més gran. Aquests impactes poden incloure, per exemple, les emissions durant la fabricació dels components, el funcionament continu del sistema i el manteniment necessari.

Les llistes de control, la matriu de Leopold i el diagrama de xarxes, els quals es troben a l'Annex, han ajudat a obtenir una visió global de l'influència del projecte en el medi ambient.

### **6.2. Conclusions**

En conclusió, el projecte té un impacte ambiental relatiu, ja que depèn íntegrament de la seva implementació, el qual no està sota el control d'aquest projecte sinó de l'empresa que el dugui a terme. Per lo tant, s'ha intentat obtenir un impacte sobre el medi ambient lo més pròxim a la realitat utilitzant aspectes especulatius.



## **7.0. PERSPECTIVA DE GÈNERE**

Aquest projecte, centrat en un treball teòric amb la seva implementació en un sistema de refrigeració, presenta una perspectiva totalment neutra pel que fa al gènere. Les activitats realitzades i les decisions preses al llarg del desenvolupament del projecte no es decanten per cap gènere específic. El focus ha estat en l'eficiència tècnica del sistema de refrigeració, assegurant que les consideracions de gènere no influeixen en cap aspecte del treball. Així, es manté un enfocament equitatiu i inclusiu, garantint que el projecte sigui accessible i aplicable per a qualsevol persona, independentment del seu gènere.



## 8.0. CONCLUSIONS

El present Treball fi de grau s'ha centrat en l'estudi detallat de la corrosió, les seves diverses manifestacions i els mètodes disponibles per a la seva protecció i control. La corrosió es defineix com una reacció química o electroquímica entre un metall o aliatge i el seu entorn, la qual cosa resulta en la deterioració de les seves propietats. Aquest treball ha seguit la classificació de formes de corrosió establerta per la National Association of Corrosion Engineers (NACE), àmpliament reconeguda en el camp de l'enginyeria de la corrosió. Entre els mètodes de protecció, s'ha prestat especial atenció a la protecció catòdica, que implica fer que el metall a protegir funcioni com un càtode mitjançant l'aplicació d'un corrent imprès o la fixació d'un ànode galvànic. A través de càlculs precisos de protecció catòdica, s'ha aconseguit allargar la vida útil d'un sistema de aigua de refrigeració principal d'una central tèrmica de cicle combinat.

Des d'una perspectiva personal, la realització d'aquest projecte ha estat una experiència extremadament enriquidora i gratificant. L'oportunitat d'aprofundir en un tema tan crític com la corrosió m'ha permès apreciar la complexitat i la importància de la protecció de materials en diverses indústries. A través d'aquest treball, no sols he adquirit coneixements tècnics valuosos, sinó que també he desenvolupat una major consciència sobre els desafiaments i solucions pràctiques en el camp de l'enginyeria de materials.

Com a estudiant i enginyer, la realització d'aquest projecte ha representat un desafiament tècnic i acadèmic considerable, però també ha estat una oportunitat per a aplicar coneixements teòrics en un context pràctic. Al llarg del desenvolupament del projecte, he après a identificar les diferents formes de corrosió i a avaluar els mètodes de protecció més adequats per a cada cas. La recerca sobre la protecció catòdica i la seva implementació en un sistema de refrigeració principal d'una central tèrmica ha estat particularment instructiva. Aquest procés m'ha permès adquirir habilitats en el disseny i avaluació de sistemes de protecció contra la corrosió, així com en la interpretació de normatives i estàndards tècnics.

En conclusió, el projecte no sols ha complert amb els seus objectius inicials d'estudiar la corrosió en l'indústria i d'allargar la vida útil del sistema de refrigeració, sinó que també ha proporcionat una base sòlida de coneixements i habilitats que seran fonamentals en la meva futura carrera professional. La combinació de teoria i pràctica en l'estudi de la

corrosió i el seu control ha estat una experiència educativa integral, i estic segur que les competències adquirides em permetran abordar futurs desafiaments en el camp de l'enginyeria amb confiança i eficàcia. La capacitat d'estendre la vida útil del sistema de refrigeració mitjançant càlculs de protecció catòdica reforça la rellevància i l'impacte positiu d'aquest treball.

## 9.0. BIBLIOGRAFIA

[1] Foto model atòmic de Bohr. Recuperat de:

[https://www.google.es/search?sca\\_esv=595140811&sxsrf=AM9HkKmOeVjO2ju2Lx38miZpCOXhdi2kwA:1704220695492&q=modelo+atomico+de+bohr&tbm=isch&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwiKt7HprL-DAXwVqQEHzYXCSwQ0pQJegQIDhAB&biw=1280&bih=665&dpr=1.5#imgrc=MZ49JcTPF6\\_e2M](https://www.google.es/search?sca_esv=595140811&sxsrf=AM9HkKmOeVjO2ju2Lx38miZpCOXhdi2kwA:1704220695492&q=modelo+atomico+de+bohr&tbm=isch&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwiKt7HprL-DAXwVqQEHzYXCSwQ0pQJegQIDhAB&biw=1280&bih=665&dpr=1.5#imgrc=MZ49JcTPF6_e2M)

[2] Foto Molècula d'aigua. Recuperat de:

[https://www.google.es/search?sca\\_esv=595140811&sxsrf=AM9HkKnVNzim\\_CEAfwbxqTgBo-FG3TFuUg:1704221461318&q=Mol%C3%A8cula+de+agua&tbm=isch&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwiZ5MfWr7-DAXWITaQEhbFHALQ00pQJegQICxAB&biw=1280&bih=665&dpr=1.5#imgrc=HVtMbR0d8gG\\_KM](https://www.google.es/search?sca_esv=595140811&sxsrf=AM9HkKnVNzim_CEAfwbxqTgBo-FG3TFuUg:1704221461318&q=Mol%C3%A8cula+de+agua&tbm=isch&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwiZ5MfWr7-DAXWITaQEhbFHALQ00pQJegQICxAB&biw=1280&bih=665&dpr=1.5#imgrc=HVtMbR0d8gG_KM)

[3] Teoria mar d'electrons. (2012). Recuperat de:

<https://clasesdequimica.blogspot.com/2012/04/modelo-de-mar-de-electrones.html>

[4] Cel.la de corrosió. (2011). Recuperat de:

<https://maintenancela.blogspot.com/2011/09/corrosion-y-su-control-parte-i.html>

[5] Esquema d'una cèl.la de corrosió. Recuperat de: <https://slideplayer.es/slide/144750/>

[6] Tipus d'energia de Gips segons el seu valor. Recuperat de:

<https://www.studysmarter.es/resumenes/quimica/termodinamica/espontaneidad/>

[7] Potencials químics. Recuperat de: [https://oa.upm.es/38735/1/amd-apuntes-termodinamica-v3\\_0.pdf](https://oa.upm.es/38735/1/amd-apuntes-termodinamica-v3_0.pdf)

[8] Pila galvànica. Recuperat de: [https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:%C3%A1nica_sin_flujo_cati%C3%B3nico.png)

[%C3%A1nica sin flujo cati%C3%B3nico.png](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:%C3%A1nica_sin_flujo_cati%C3%B3nico.png)

[9] Electrode de referència d'hidrogen. Recuperat de:

[https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica\\_Introductoria%2C\\_Conceptual\\_y\\_GOB/Qu%C3%ADmica\\_Introductoria\\_%28CK-12%29/23%3A\\_Electroqu%C3%ADmica/23.05%3A\\_Electrodo\\_de\\_Hidr%C3%B3geno\\_Est%C3%A1ndar](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Introductoria%2C_Conceptual_y_GOB/Qu%C3%ADmica_Introductoria_%28CK-12%29/23%3A_Electroqu%C3%ADmica/23.05%3A_Electrodo_de_Hidr%C3%B3geno_Est%C3%A1ndar)

[10] Ànodes Galvànics Recuperat de: <https://proteccioncatodica.wordpress.com/media-celda-de-referencia/>

[11] Series Galvàniques Recuperat de:

[https://es.slideshare.net/JosDavidGranados/potenciales-y-series-galvanicas?from\\_search=0](https://es.slideshare.net/JosDavidGranados/potenciales-y-series-galvanicas?from_search=0)

- [12] Series Galvàniques (2011). Recuperat de: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Serie-galvanica-para-algunos-metales-y-aleacion-comunes-ECCA-2011\\_fig1\\_283699824](https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Serie-galvanica-para-algunos-metales-y-aleacion-comunes-ECCA-2011_fig1_283699824)
- [13] Equació de Nernst. (n.d.). Recuperat de: <https://maciassensors.com/es/the-nernst-equation-a-key-concept/>
- [14] Potencials estàndard. Recuperat de: <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/421-potenciales-estandar-de-reduccion.html>
- [15] Diagrames de Pourbaix. Recuperat de: [https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica\\_Inorg%C3%A1nica/Libro%3A\\_Introducci%C3%B3n\\_a\\_la\\_Qu%C3%ADmica\\_Inorg%C3%A1nica\\_\(Wikibook\)/04%3A\\_Estabilidad\\_Redox\\_y\\_Reacciones\\_Redox/4.06%3A\\_Diagramas\\_de\\_Pourbaix](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Inorg%C3%A1nica/Libro%3A_Introducci%C3%B3n_a_la_Qu%C3%ADmica_Inorg%C3%A1nica_(Wikibook)/04%3A_Estabilidad_Redox_y_Reacciones_Redox/4.06%3A_Diagramas_de_Pourbaix)
- [16] Diagrama de Pourbaix del Ferro. Recuperat de: [https://www.google.es/search?q=Diagrama+de+Pourbaix+del+metal+hierro+&tbm=isch&ved=2ahUKEwjxm6vBqM6DAxXXmicCHWm6Br0Q2-cCegQIABAA&oq=Diagrama+de+Pourbaix+del+metal+hierro+&gs\\_lcp=CgNpbWcQA1CbBVibBWDBC2gAcAB4AIABZIGBwwGSAQMxLjGYAQCgAQGqAQtd3Mtd2I6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=1TCcZbHdMte1nsEP6fSa6As&bih=945&biw=1920#imgsrc=CGroBqpx0qMVM](https://www.google.es/search?q=Diagrama+de+Pourbaix+del+metal+hierro+&tbm=isch&ved=2ahUKEwjxm6vBqM6DAxXXmicCHWm6Br0Q2-cCegQIABAA&oq=Diagrama+de+Pourbaix+del+metal+hierro+&gs_lcp=CgNpbWcQA1CbBVibBWDBC2gAcAB4AIABZIGBwwGSAQMxLjGYAQCgAQGqAQtd3Mtd2I6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=1TCcZbHdMte1nsEP6fSa6As&bih=945&biw=1920#imgsrc=CGroBqpx0qMVM)
- [17] Diagrama d'Evans. Recuperat de: <https://www.studysmarter.es/resumenes/quimica/redox/leyes-de-faraday/>
- [18] Llei de Faraday. Recuperat de: <https://es.scribd.com/document/409070967/Diagrama-de-Evans>
- [19] Diagrama d'Envans. Recuperat de: <https://core.ac.uk/reader/60425220>
- [20] Diagrama de Polarització Recuperat de: <http://www.apie.com.ar/Boletines/boletin-08/art-polarizacion.html>
- [21] Foses. Recuperat de: <https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700290/helvia/aula/archivos/repositorio/0/42/html/fundicion.html>
- [22] Elastòmers. Recuperat de: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/elastomeros-que-son-tipos-y-aplicaciones/>
- [23] Tipus de Corrosió. Recuperat de: <https://www.hidraflex.com/es/content/91-una-guia-completa-para-la-proteccion-contr-la-corrosion-y-control-de>
- [24] Picadures. Recuperat de: <https://www.merus.es/formacion-de-picaduras-corrosion/>
- [25] (n.d.). Recuperat de <https://www.proquimia.com/wp-content/uploads/2016/01/Corrosion-filiforme-parte-I.pdf>



- [26] Corrosió Filiforme. Recuperat de: <https://www.micronicsinc.com/es/filtration-news/corrosion-prevention-filter-press-operation/>
- [27] Corrosió Filiforme. Recuperat de: <https://www.micronicsinc.com/es/filtration-news/corrosion-prevention-filter-press-operation/>
- [28] Corrosió Galvànica en emparellament de Materials Diferents. Recuperat de: <https://www.nord-lock.com/es-es/panorama/consejos-de-atornillado/2017/the-experts-matching-washers-and-bolts-of-different-materials/>
- [29] Corrosió Galvànica Recuperat de: <https://www.far.bo.it/es/corrosi%C3%B3n-galv%C3%A1nica.html>
- [30] Junta d'aïllament. Recuperat de: <https://www.episefa.com/kits-dielectricos/>
- [31] Esquerdament per Corrosió. Recuperat de: <https://www.linkedin.com/pulse/agrietamiento-por-corrosi%C3%B3n-bajo-tensi%C3%B3n-mecanismo-control-sprne/>
- [32] Tema 11-Fonaments de corrosió 2007-2008. Recuperat de <https://rua.ua.es>
- [33] (2016). Corrosió por fatiga. Recuperat de: <https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2016/07/corrosion-por-fatiga.html>
- [34] Anàlisi de corrosió y erosió en equips utilitzant CFD. Recuperat de: <https://www.esss.com/es/blog/analisis-de-corrosion-y-erosion-en-equipos-utilizando-cfd/>
- [35] Corrosió por cavitació en turbines. Recuperat de: <https://www.google.com/search?q=corrosi%C3%B3n+por+cavitacion+en+turbinas&rlz>
- [36] Flow-Accelerated Corrosion. Recuperat de: [https://www.corrosionclinic.com/types\\_of\\_corrosion/Flow-Accelerated-Corrosion\\_FAC-htm](https://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/Flow-Accelerated-Corrosion_FAC-htm)
- [37] Cladding amb làser. Recuperat de: <https://www.laserline.com/es-int/cladding-con-laser/>
- [38] Corrosió: Estudi de protecció catòdica en un vaixell. Recuperat de: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/20418/Corrosion%20Estudio%20de%20proteccion%20catodica%20en%20un%20buque.%20pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [39] Tipus de corrosió. Recuperat de: <https://pdfcoffee.com/tipos-de-corrosion-13-pdf-free.html>
- [40] Ànodes de corrent impresa. Recuperat de: <https://www.guldager.es/wp-content/uploads/2017/06/Tf-2.pdf>

- [41] Filtre Dervis. Recuperat de <https://www.taprogge.es/anwendungsfelder-produkte/efficiency-in-energy-and-water-kraftwerke-und-industrie/filtration/filter-typ-pr-bw-800/>
- [42] Filtre Dervis. Recuperat de <https://www.beaudrey.com/debris-filters>
- [43] Valors per el càlcul de la vida útil dels Ànodes. Recuperat de: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8236/1/CorrTema10.pdf>
- [44] D.A. Jones (2008). Forms of Corrosion Recognition and prevention. Chapter 2.
- [45] Revie, R.W. and Uhlig, H.H. (2008) Corrosion and Corrosion Control.
- [46] ] J.H.Payer (1982). Forms of Corrosion Recognition and prevention. Chapter 4.
- [47] Javaherdashti, R. (2008) Microbiologically influenced corrosion “An engineering insight”. Springer, 1-35.
- [48] W.Gleaser (1982). Forms of Corrosion Recognition and prevention. Chapter 5.
- [49] ARGOS (Enginyeria i Tecnologia de Materials, 2005).
- [50] M.A.Streicher (1982). Forms of Corrosion Recognition and prevention. Chapter 6.
- [51] R.H.Heidersbach (1982).Forms of Corrosion Recognition and prevention.Chapter 7.
- [52] Bardal, E. (2004). Corrosion and Protection. Editorial Springer-Verlag.
- [53] Raichev, Raicho, Velva, Lucien & Valdex, Benjamín. Corrosión de metales y degradación de materiales.
- [54] NACE Internacional: 2004 (Basic Corrosion Manual),
- [55] NRF-047-PEMEX: 2014. Disseny, instal·lació i manteniment dels sistemes de protecció catòdica.
- [56] UNE-EN 12473:2014. Principis generals de la protecció catòdica en aigua de mar.
- [57] UNE-EN 12499:2003. Octubre 2006/AC. Protecció Catòdica interna en estructures metàl·liques.
- [58] UNE-EN 12696: 2004. Protecció catòdica per a l'acer en formigó.
- [59] UNE-EN 14505: 2006. Protecció catòdica d'estructures complexes.
- [60] UNE-EN 50162: 2005. Protecció contra la corrosió deguda a corrents vagabunds provinents de sistemes de corrent continu.
- [61] UNE-EN 13509: 2003. Tècniques de mesura en protecció catòdica.

