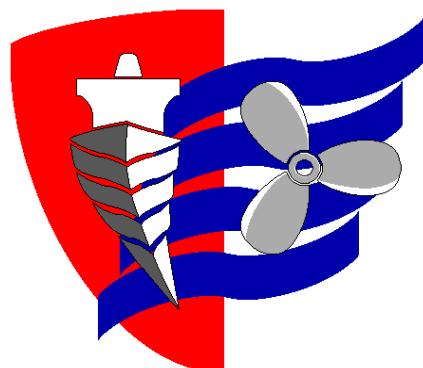


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Máster*

**ESTUDIO DE LA PROTECCIÓN  
CATÓDICA DEL BUQUE HOSPITAL  
“ESPERANZA DEL MAR”**

---

**STUDY OF THE CATHODIC PROTECTION OF  
THE HOSPITAL SHIP “ESPERANZA DEL MAR”**

Para acceder al Título de Máster Universitario en  
**INGENIERÍA MARINA**

Autor: Pablo González Pinín

Directora: Dra. María Victoria Biezma Moraleda

JUNIO - 2025



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

*Trabajo Fin de Máster*

**ESTUDIO DE LA PROTECCIÓN  
CATÓDICA DEL BUQUE HOSPITAL  
“ESPERANZA DEL MAR”**

---

**STUDY OF THE CATHODIC PROTECTION OF THE  
HOSPITAL SHIP “ESPERANZA DEL MAR”**

Para acceder al Título de Máster Universitario en  
**INGENIERÍA MARINA**

**Junio - 2025**



## ÍNDICE

Índice .....	1
Resumen.....	1
Abstract.....	3
Agradecimientos .....	5
1    Introducción .....	6
1.1    Justificación .....	6
1.1    Motivación .....	6
1.2    Objetivos.....	7
2    Estado del arte.....	8
2.1    El fenómeno de corrosión.....	8
2.2    Tipos de corrosión .....	11
2.2.1    Galvánica.....	11
2.2.2    Uniforme .....	13
2.2.3    Localizada .....	14
2.2.4    Intergranular .....	16
2.2.5    Selectiva.....	18
2.2.6    Corrosión Bajo tensión .....	18
2.2.7    Corrosión fatiga .....	20
2.2.8    Por erosión .....	22
2.2.9    Por cavitación.....	24
2.2.10    Por fricción.....	25

2.3 Factores que condicionan la susceptibilidad de los materiales metálicos .....	27
2.3.1 Factores metalúrgicos .....	28
2.3.2 Factores ambientales .....	28
2.3.3 Condiciones de servicio.....	29
2.3.4 Influencia del diseño y ensamblaje.....	30
2.3.5 Tiempo de exposición y mantenimiento .....	30
2.4 Normativa .....	31
2.5 Análisis problemas de corrosión .....	32
3 Corrosión en el sector naval .....	36
3.1 Corrosión en contacto con agua de mar.....	37
3.2 Impacto medio ambiente .....	39
4 Control de la corrosión y protección de los materiales.....	41
4.1 Protección Catódica.....	42
4.1.1 Protección catódica mediante ánodos de sacrificio .....	45
4.1.2 Protección catódica mediante Corriente impresa .....	47
4.2 Recubrimientos protectores .....	52
4.3 Inhibidores de corrosión .....	55
5 Metodología .....	57
5.1 Objeto y alcance del proyecto .....	57
5.2 Buque utilizado en el estudio.....	58
5.3 Ánodos de sacrificio.....	60
5.3.1 Consideraciones básicas para el diseño de sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio .....	60
5.3.2 Cálculo de los ánodos necesarios para la protección catódica del casco	61

5.3.3	Distribución de los ánodos.....	67
5.3.4	Selección de los ánodos.....	70
5.3.5	Consideraciones adicionales .....	70
5.3.6	Costes de la utilización de ánodos de sacrificio .....	71
5.4	Corrientes Impresas .....	72
5.4.1	Cálculo de la corriente necesaria para la protección del casco del buque.....	73
5.4.2	Selección unidad de control.....	74
5.4.3	Estimación de costos para una unidad de 35 A.....	75
6	Comparación de técnicas de protección catódica.....	79
6.1	Ventajas y limitaciones .....	79
6.2	Comparativa Operacional .....	80
6.2.1	Principio de Funcionamiento .....	81
6.2.2	Eficiencia de Protección .....	81
6.2.3	Mantenimiento y Operación.....	82
6.2.4	Costos Operacionales .....	82
6.2.5	Adaptabilidad y Control .....	83
6.2.6	Consideraciones Ambientales .....	83
7	Conclusiones .....	85
8	Líneas Futuras de Investigación .....	88
9	Referencias bibliográficas .....	91
	Anexos .....	101
	ANEXO 1. Plano de varada buque hospital “Esperanza del Mar” .....	101
	ANEXO 2. Ánodos de zinc ( <i>Bera</i> ) .....	102
	ANEXO 3. Corrientes impresas ( <i>Llalco</i> ) .....	103

## Índice de Figuras

Figura 1. Representación de una celda electroquímica. ....	9
Figura 2. Serie galvánica para algunos metales y aleación comunes.....	10
Figura 3. Celda de corrosión galvánica.....	12
Figura 4. Análisis de la corriente de corrosión galvánica entre una aleación de aluminio y acero inoxidable expuesta a un electrolito de gota equilibrado...	13
Figura 5. Ejemplo de corrosión uniforme. ....	14
Figura 6. Ejemplo de corrosión por picaduras. ( <i>Pitting Corrosion</i> ).....	15
Figura 7. Ejemplo de corrosión por resquicios ( <i>Crevice corrosion</i> ).....	16
Figura 8. Acero inoxidable tipo 304.....	17
Figura 9. Ejemplo de la deszincificación del latón.....	18
Figura 10. El puente Silver se derrumba sobre el río Ohio, 17 de diciembre de 1967.....	20
Figura 11. Teoría de daño acumulativo de Palmgren-Miner. ....	22
Figura 12. Tubería con ondulaciones y huecos causados por corrosión-erosión.....	22
Figura 13. Álabes de una bomba con corrosión-erosión debido al movimiento de un fluido. ....	23
Figura 14. Cavitación. ....	24
Figura 15. Efectos de la corrosión por cavitación. ....	25
Figura 16. Diagrama simplificado del dispositivo de prueba de corrosión por fricción.....	26
Figura 17. International Organization for Standardization. (ISO) .....	31
Figura 18. Corrosión de la pala del timón de un buque. ....	34
Figura 19. Buque mercante en dique seco. ....	36

Figura 20. Biofouling en el casco de un buque. ....	38
Figura 21. Pintura antifouling aplicada en la obra viva del buque. ....	38
Figura 22. Acidificación de los océanos. ....	40
Figura 23. Diagrama de Pourbaix, potencial – pH para el Fe a 25ºC.....	44
Figura 24. Ánodos de sacrificio.....	46
Figura 25. Sistema de protección catódica por ánodo de sacrificio. ....	47
Figura 26. Sistema de protección catódica por corriente impresa. ....	48
Figura 27. Unidad de control.....	49
Figura 28. Ánodos.....	50
Figura 29. Electrodo de referencia.....	51
Figura 30. Belzona 5811 ( <i>Immersion Grade</i> ).....	53
Figura 31. Aplicación Belzona 5811 en un intercambiador de calor. ....	53
Figura 32. Buque Hospital Esperanza del Mar.....	58
Figura 33. Palas del timón. ....	68
Figura 34. Aletas estabilizadoras.....	68
Figura 35. Tomas de mar.....	69
Figura 36. Cuerpo hélice de proa.....	69
Figura 37. LLALCO Fluid technology.....	75

## Índice de Tablas

Tabla 1. Características generales "Esperanza del Mar" .....	59
Tabla 2. Coeficiente de bloque dependiendo del tipo de buque .....	63
Tabla 3. Costes de la utilización de ánodos de sacrificio.....	72
Tabla 4. Costes de la utilización de corriente impresa. ....	77
Tabla 5. Ventajas y limitaciones ánodos de sacrificio. ....	79
Tabla 6. Ventajas y limitaciones corrientes impresas. ....	80

## RESUMEN

El siguiente trabajo se presentará en la Escuela Técnica Superior de Náutica como Trabajo Fin de Máster, al objeto de obtener el título de Máster en Ingeniería Marina. Trata sobre la corrosión y la protección catódica en buques, centrándose en el estudio comparativo de los costos y la eficiencia de los métodos de protección disponibles.

Este estudio analiza los efectos de la corrosión en estructuras navales, abordando su definición, causas y clasificación según su naturaleza electroquímica y física. Se detallan los distintos tipos de corrosión que pueden afectar a un buque, tales como la corrosión galvánica, por aireación diferencial, por picadura, intergranular y microbiológica, entre otras.

Puesto que uno de los métodos anticorrosivos empleados en el sector naval es la protección basada en técnicas electroquímicas, en particular, la **protección catódica**, que se basa en controlar el potencial del metal a proteger, llevándolo a zona de inmunidad electroquímica con ayuda de una fuente que suministre electrones. Existen dos técnicas para ello:

1. **Protección mediante ánodos de sacrificio**, se utilizan metales más reactivos (como zinc, aluminio o magnesio) que se corroen en lugar de la estructura principal.
2. **Protección mediante corriente impresa**, que aplica una corriente eléctrica externa para minimizar la corrosión.

Para ilustrar la aplicación práctica de estos métodos, se realiza un estudio detallado de costos en el buque hospital "**Esperanza del Mar**". Se analiza la eficiencia y viabilidad económica de ambos sistemas de protección catódica, teniendo en cuenta la disposición de los ánodos, su vida útil estimada y los costes asociados al mantenimiento. Se realiza una comparativa integral entre la inversión inicial y los beneficios operativos a largo plazo, considerando la

prolongación de la vida útil del casco y la reducción del mantenimiento, con el objetivo de aportar un análisis técnico-económico que respalde la toma de decisiones en el ámbito de la protección contra la corrosión en buques, favoreciendo su seguridad y eficiencia operativa.

### **Palabras clave**

Corrosión, potencial electroquímico, protección catódica, ánodos de sacrificio, corrientes impresas

## ABSTRACT

The following work will be presented at the Escuela Técnica Superior de Náutica as a Master's Final Project in order to obtain the master's degree in marine engineering. It focuses on corrosion and cathodic protection in ships, with an emphasis on a comparative study of the costs and efficiency of the available protection methods.

This study analyzes the effects of corrosion on naval structures, addressing its definition, causes, and classification according to its electrochemical and physical nature. It details the different types of corrosion that can affect a ship, such as galvanic corrosion, differential aeration corrosion, pitting, intergranular, and microbiological corrosion, among others.

Since one of the anticorrosive methods used in the naval sector is protection based on electrochemical techniques, particularly cathodic protection—which is based on controlling the potential of the metal to be protected by bringing it into the zone of electrochemical immunity with the help of a source that supplies electrons—two techniques exist for this purpose:

1. **Protection using sacrificial anodes**, where more reactive metals (such as zinc, aluminum, or magnesium) corrode instead of the main structure.
2. **Protection using impressed current**, which applies an external electric current to minimize corrosion.

To illustrate the practical application of these methods, a detailed cost study is carried out on the hospital ship "**Esperanza del Mar**". The efficiency and economic viability of both cathodic protection systems are analyzed, considering the arrangement of the anodes, their estimated service life, and the associated maintenance costs. An integral comparison is made between the initial investment and the long-term operational benefits, considering the extension of the hull's service life and the reduction in maintenance, with the

aim of providing a technical-economic analysis that supports decision-making in the field of corrosion protection in ships, thus enhancing their safety and operational efficiency.

### **Keywords**

Corrosion, electrochemical potential, cathodic protection, sacrificial anodes, impressed current systems

## AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que me han brindado su apoyo a lo largo de este proceso. A mi familia, por su apoyo, comprensión y paciencia; y a mis amigos, por estar ahí cuando más lo he necesitado. Su compañía y ánimo han sido clave para sacar adelante este trabajo.

Quiero hacer una mención especial a la Dra. María V. Biezma Moraleda. Agradecer su disposición y aceptación de dirigir mi trabajo, incluso con las dificultades que supuso mi situación laboral y el escaso tiempo disponible. Su compromiso, experiencia y dedicación han sido fundamentales para llevar a cabo la elaboración de este proyecto. Ha sido un privilegio contar con su acompañamiento académico en este importante desafío.

Gracias a todos por estar a mi lado y por hacer de este camino una experiencia más enriquecedora.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 JUSTIFICACIÓN

### *¿Por qué este trabajo importa?*

La corrosión no es solo un problema técnico: es un enemigo silencioso de la eficiencia operativa y de la seguridad en la navegación. En un mundo cada vez más enfocado en la sostenibilidad, la optimización de recursos y la prolongación de la vida útil de los componentes y equipos, poder comprender y aplicar adecuadamente los sistemas de protección catódica en buques resulta más relevante que nunca.

Este trabajo no pretende limitarse a describir cómo se protegen los cascos de barco, de acero, sino ofrecer una visión práctica y económica que permita decidir, con criterios técnicos sólidos, cuál es el sistema más adecuado para cada situación.

## 1.1 MOTIVACIÓN

**La visión detrás del casco:** Cada metro cuadrado del casco de un buque representa decisiones de ingeniería que impactan directamente en múltiples aspectos operativos y económicos, tales como:

- Reducción del mantenimiento y de las paradas técnicas no programadas.
- Mejora en la eficiencia energética, al disminuir la fricción con el agua.
- Aumento de la maniobrabilidad y de la seguridad estructural.
- Conservación de una apariencia estética profesional y cuidada.
- Optimización de los costes a largo plazo mediante sistemas eficientes.

Este trabajo surge como una oportunidad para conectar el conocimiento adquirido en el Máster con la realidad del entorno marino, desarrollando un proyecto con impacto tangible en la industria. Analizar y diseñar soluciones

reales para combatir la corrosión, es una forma directa de contribuir a la mejora técnica y económica de la navegación.

## 1.2 OBJETIVOS

**Propósito de este trabajo:** Realizar un análisis técnico y económico de los métodos de protección catódica aplicados a cascos de buques de acero, con especial énfasis en el diseño y la implementación de estos sistemas en una embarcación real.

### **Objetivos específicos:**

- ✚ Analizar en profundidad los distintos tipos de corrosión que afectan a la obra viva del casco, basándome en la experiencia adquirida, y estudiar sus causas desde un enfoque fisicoquímico para comprender mejor su origen y evolución.
- ✚ Describir y comparar los sistemas de protección catódica disponibles: ánodos de sacrificio y sistemas de corriente impresa (*Impressed Current Cathodic Protection*, ICCP), identificando sus ventajas, limitaciones y aplicaciones específicas.
- ✚ Diseñar e implementar un sistema de protección catódica para una embarcación de salvamento, incluyendo cálculos técnicos, distribución de ánodos y selección de materiales.
- ✚ Evaluar la eficiencia y la vida útil de los ánodos de sacrificio, así como los costes asociados a la instalación, el mantenimiento y la sustitución del sistema.
- ✚ Establecer pautas de inspección y mantenimiento, determinando los parámetros clave para garantizar una protección continua y efectiva del casco.
- ✚ Formular recomendaciones técnicas y económicas que sirvan de base para la toma de decisiones en futuros proyectos de protección catódica en buques similares.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 EL FENÓMENO DE CORROSIÓN

La **corrosión** es un fenómeno que provoca el deterioro de materiales metálicos mediante reacciones químicas y electroquímicas. Este proceso se produce cuando los materiales buscan alcanzar un estado de menor potencial energético. Debido a sus consecuencias económicas, de seguridad y de conservación de materiales, es fundamental estudiar y reducir la corrosión. [1][2]

La Normativa, **ISO 8044**, describe la corrosión como una “Interacción fisicoquímica del metal con su ambiente, que provoca cambios en las propiedades del metal, y que puede causar una significativa merma de las funciones del material, del ambiente, o del sistema en donde el material forme parte”; en general, esta interacción es de tipo electroquímico. [3]

Los materiales metálicos se obtienen procesando minerales y menas que se encuentran en su estado natural y se induce un estado de mayor energía. La corrosión se produce cuando, con el tiempo, estos materiales intentan alcanzar su estado natural de menor potencial energético, lo que permite estabilizarse termodinámicamente.

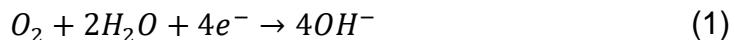
En la mayoría de los procesos de corrosión, se producen reacciones de reducción-oxidación, que son reacciones electroquímicas. Para que estos procesos se desarrollen, es necesario que haya tres componentes:

1. Partes del material con mayor o nula actividad, denominada a veces electrodos, en donde se darán las reacciones anódicas y catódicas, respectivamente.
2. Electrolito como medio conductor, que suele ser una solución acuosa, en la mayoría de los casos.
3. Una conexión eléctrica entre los ánodo y cátodo.

En los procesos electroquímicos relacionados con la corrosión y la protección catódica, se producen reacciones diferenciadas en el ánodo y el cátodo. [4]

En el cátodo, donde ocurre la reducción del oxígeno, se puede observar la siguiente reacción en medio neutro o básico, referida como la Ecuación 1:

- En medio básico (*Ecuación 1*):



En medio ácido, esta misma reducción ocurre conforme a la Ecuación 2:

- En medio ácido (*Ecuación 2*):



En el ánodo, tiene lugar la oxidación del metal, dando inicio al proceso de corrosión. Una reacción típica es (*Ecuación 3*):



Esta oxidación representa la pérdida de metal, y al combinarse con las reacciones catódicas, se forma una **celda electroquímica** activa si no se implementan sistemas de protección como la protección catódica. La Figura 1, muestra una celda electroquímica. [5]

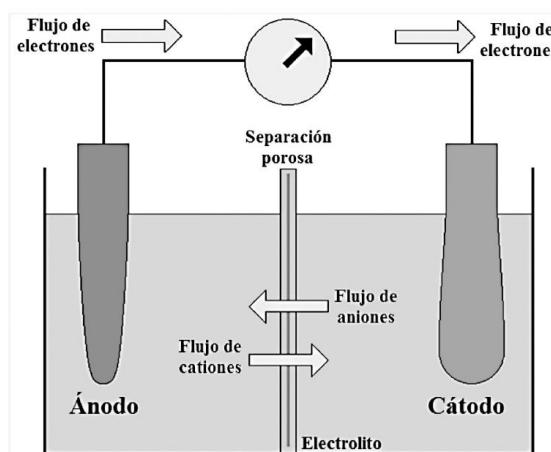


Figura 1. Representación de una celda electroquímica. Fuente: [6]

Las dos reacciones ocurren simultáneamente. Tal y como se observa en las ecuaciones, el ánodo cede electrones al sistema durante la reacción, lo que hace que pase de su estado metálico básico a cationes que se disuelven en el electrolito. Esto provoca que el material sufra corrosión. Por otro lado, en el cátodo, los iones absorben electrones haciendo que vuelvan a su estado básico. [5]. En el caso de un par galvánico, un metal cede electrones, activo, y el otro, en forma de catión metálico, más noble, los capta.

El grado de susceptibilidad o resistencia de un material metálico a la corrosión viene definido por su potencial electroquímico, cuyo valor depende de la composición del electrolito. Un valor de potencial positivo indica que el material es más noble, es decir, más resistente a la corrosión, mientras que un valor negativo indica que el material es más reactivo a la corrosión.

La **serie galvánica** es una tabla que clasifica diferentes tipos de materiales según su potencial electroquímico cuando están sumergidos en un determinado electrolito. La Figura 2, representa una tabla de serie galvánica que incluye algunos metales y aleaciones comunes.

Metal	
Material Reactivo (anódico)	Platino
Menor potencial electroquímico	Oro
	Plata
	Acero Inoxidable (pasivado)
	Aleaciones de Níquel-Cobre
	Cobre
	Bronces
	Níquel
	Estaño
	Acero
	Cadmio
	Aluminio
	Magnesio
	Zinc

Figura 2. Serie galvánica para algunos metales y aleación comunes. Fuente:  
[6]

Los productos generados durante el proceso de corrosión en la superficie de los materiales pueden influir de forma positiva o negativa en sus propiedades, dependiendo de su composición y del ambiente circundante, entre otros factores. En el caso del hierro, el producto de corrosión, conocido como

herrumbre, altamente higroscópica, es menos denso que el metal base, lo que ocasiona que se desprenda de la superficie y acelere el proceso de corrosión. En cambio, para sistemas metálicos y metales puros, como el aluminio, níquel o acero inoxidable, los productos de corrosión forman una capa sólida y estable que protege el material contra la corrosión. Este fenómeno es conocido como pasivación, el cual, brinda la capacidad de ser inoxidable a los materiales.

La corrosión puede presentarse de diferentes formas, dependiendo de diversos factores. Por ello, es importante conocer los distintos tipos de corrosión, ya que su clasificación ayuda a entender mejor el fenómeno y a aplicar soluciones más adecuadas en cada situación.

## 2.2 TIPOS DE CORROSIÓN

Los tipos más comunes de corrosión se describen brevemente a continuación:

### 2.2.1 GALVÁNICA

La corrosión galvánica es un proceso electroquímico que se produce cuando dos metales con distintos potenciales eléctricos se encuentran conectados eléctricamente en un medio conductor, como el agua salada. Creando una **celda de corrosión** o **celda galvánica** (*Figura 3*) en la que el metal menos noble actúa como ánodo y se deteriora más rápidamente, mientras que el más noble hace de cátodo y permanece protegido. Este tipo de corrosión es especialmente crítico en ambientes marinos, ya que la interacción entre materiales metálicos distintos puede acelerar de forma considerable el desgaste estructural.

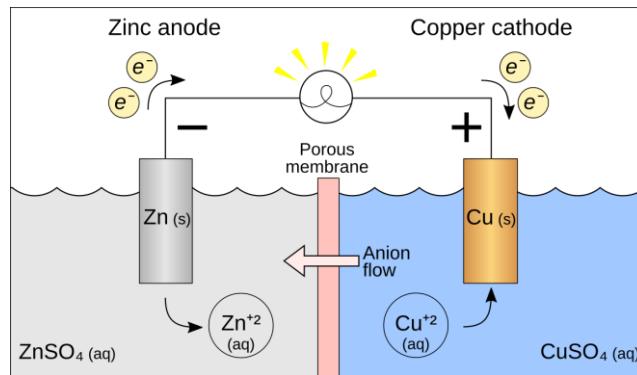
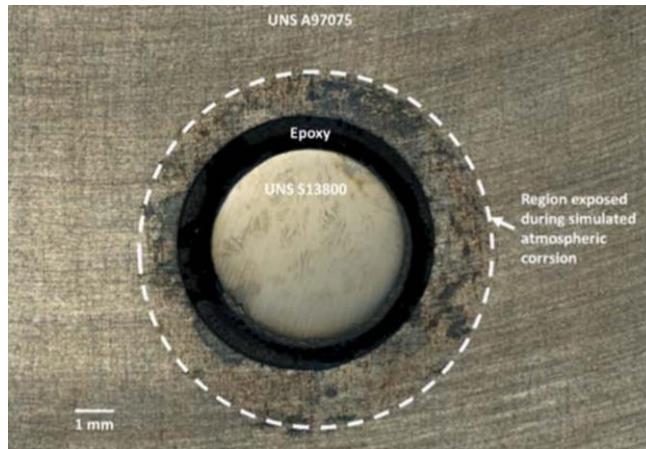


Figura 3. Celda de corrosión galvánica. Fuente: [7]

Para mitigar sus efectos, existen diversas soluciones, como seleccionar metales con potenciales similares, aplicar recubrimientos aislantes entre ellos o instalar sistemas de protección catódica. Estas tecnologías, que incluyen tanto ánodos de sacrificio como sistemas de corriente impresa (ICCP), permiten controlar el potencial electroquímico de los elementos metálicos expuestos, minimizando el deterioro. La decisión sobre qué método emplear debe considerar aspectos como las condiciones del entorno, los materiales utilizados y el coste de implementación y mantenimiento. [8]

Un ejemplo representativo de corrosión galvánica se encuentra en el artículo de *Liu et al* [9], donde se analizó la corriente de corrosión entre una aleación de aluminio y acero inoxidable expuestas a un electrolito en forma de gota equilibrada. Los resultados mostraron que la aleación de aluminio actuó como ánodo y se corroyó más rápidamente en presencia del acero inoxidable, que funcionó como cátodo (Figura 4). Este estudio subraya la importancia de considerar la compatibilidad de materiales en diseños estructurales para prevenir la corrosión galvánica.[10]



*Figura 4. Corrosión galvánica entre una aleación de aluminio y acero inoxidable expuesta a un electrolito de gota equilibrado. Fuente: [10]*

## 2.2.2 UNIFORME

Cuando la corrosión se distribuye de manera uniforme sobre la superficie del metal, se produce lo que se conoce como **corrosión uniforme** (*Figura 5*). Se considera que es el tipo de corrosión más frecuente y responsable de la mayoría de las pérdidas de material. En este proceso, no hay sitios preferenciales de corrosión, lo que significa que, tanto el ánodo como el cátodo no tienen una ubicación fija, lo que produce una corrosión homogénea en todo el substrato metálico.

La velocidad de la corrosión uniforme puede expresarse de dos formas principales:

- **mdd** (miligramos por decímetro cuadrado por día) indica la pérdida de masa del metal por unidad de superficie y tiempo, representando la cinética de disolución del material.
- **mpy** (milésimas de pulgada por año o su equivalente en mm/año) expresa la disminución del espesor del metal con el tiempo, reflejando la profundidad del ataque corrosivo.

Ambas unidades permiten cuantificar la cinética de la corrosión, ya sea en términos de masa o de pérdida de espesor. Como la corrosión se produce de manera uniforme en toda la superficie del metal, se puede controlar prácticamente bien mediante la protección catódica, o utilizando revestimientos superficiales (por ejemplo, pinturas). A menudo, el ampollamiento y/o desprendimiento de los sistemas de recubrimiento protector en las estructuras conduce a este tipo de corrosión. A pesar de ello, no se considera un tipo peligroso de corrosión, ya que se puede predecir la cinética de corrosión mediante técnicas de corrosión electroquímica o gravimétricas (variación de peso).



*Figura 5. Ejemplo de corrosión uniforme. Fuente: [11]*

En la práctica, es poco probable que se presente una corrosión uniforme completamente homogénea, siempre habrá áreas donde la corrosión será más rápida que en otras, dando como resultado una superficie rugosa con una cubierta irregular de productos de corrosión, especialmente en partes metálicas complejas.

#### 2.2.3 LOCALIZADA

La **corrosión localizada** es un tipo de corrosión que afecta a zonas específicas del material, y representa un mayor riesgo que la corrosión uniforme. Es difícil de detectar y se manifiesta en áreas determinadas por la

naturaleza del material, capacidad de mantener íntegra su capa protectora, su geometría y por las condiciones ambientales a las que está expuesta.

Existen dos formas principales de corrosión localizada que afectan a estructuras metálicas, especialmente en ambientes marinos: la corrosión por picaduras y la corrosión por resquicios.

**La corrosión por picaduras** (*Pitting Corrosion*) (*Figura 6*) es un tipo de ataque altamente localizado que se manifiesta como pequeños orificios o cavidades en la superficie del metal. Este fenómeno ocurre cuando la capa pasiva protectora del metal, como la del acero inoxidable, se rompe en puntos específicos, permitiendo que el metal subyacente se oxide rápidamente. Las picaduras pueden ser profundas y difíciles de detectar, lo que las hace especialmente peligrosas, ya que pueden perforar completamente una pared metálica sin una pérdida significativa de material en el resto de la estructura.

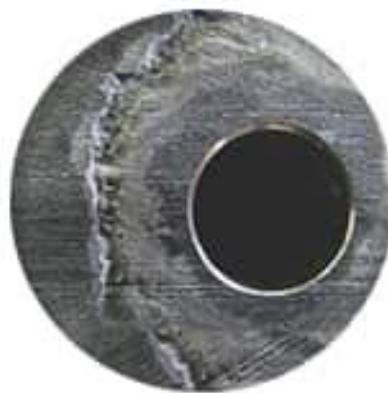
[12] [13]



*Figura 6. Ejemplo de corrosión por picaduras. (Pitting Corrosion).* Fuente: [13]

**La corrosión por resquicios** (*Crevice corrosion*) (*Figura 7*) es un tipo de corrosión localizada que ocurre en espacios estrechos donde el acceso al oxígeno es limitado, como entre tuberías y abrazaderas, juntas o debajo de depósitos. En estas áreas, el agua salada puede infiltrarse, creando un ambiente químicamente agresivo debido a la acumulación de iones corrosivos como los cloruros. Esto conduce a la descomposición de la capa pasiva

protectora del acero inoxidable, iniciando la corrosión. A diferencia de la corrosión por picaduras, que ocurre en superficies abiertas, la corrosión por resquicios se desarrolla en áreas confinadas y puede ser más difícil de detectar, ya que a menudo requiere la remoción de componentes como abrazaderas para su inspección. Además, puede ocurrir a temperaturas más bajas que la corrosión por picaduras. [13]



*Figura 7. Ejemplo de corrosión por resquicios (Crevice corrosion).* Fuente: [13]

Ambos tipos de corrosión pueden comprometer la integridad estructural de componentes metálicos y requieren estrategias de prevención específicas, como el diseño adecuado, el uso de materiales resistentes a la corrosión y la aplicación de recubrimientos protectores.

#### 2.2.4 INTERGRANULAR

La estructura interna de metales y aleaciones está formada por granos separados por límites de grano. La **corrosión intergranular** sucede a lo largo de estos límites o en áreas adyacentes a ellos, que son propensos a la precipitación y segregación de compuestos en las aleaciones, así como a su mayor inestabilidad termodinámica. Cuando se produce este tipo de corrosión, las propiedades mecánicas de la estructura se ven afectadas negativamente.

En aceros inoxidables austeníticos y aleaciones de níquel, la sensibilización, que es como se conoce este fenómeno en estos sistemas, puede llevar a cabo la formación de zonas empobrecidas en cromo en los límites de grano debido a la precipitación del carburo de cromo en estas áreas. Por otro lado, en aleaciones no ferreas, como el latón y las aleaciones de aluminio, la segregación de ciertos elementos como el zinc (Zn) y el silicio (Si) también puede conducir a la corrosión intergranular. [14] [15]

Sin embargo, medir el grado de corrosión intergranular puede resultar complicado, ya que la pérdida de peso y la dimensión de las áreas afectadas suelen ser muy pequeñas.

La Figura 8 presenta la microestructura del acero inoxidable tipo 304 en dos estados: [14]

- Izquierda: microestructura en estado normalizado.
- Derecha: microestructura "sensibilizada", que muestra susceptibilidad a la corrosión intergranular y al agrietamiento por corrosión bajo tensión.

La sensibilización ocurre cuando el acero inoxidable austenítico se expone a temperaturas entre 550 y 850 °C, lo que provoca la precipitación de carburos de cromo en los límites de grano. Este fenómeno reduce la resistencia a la corrosión en esas áreas, haciéndolas más vulnerables a ataques corrosivos.

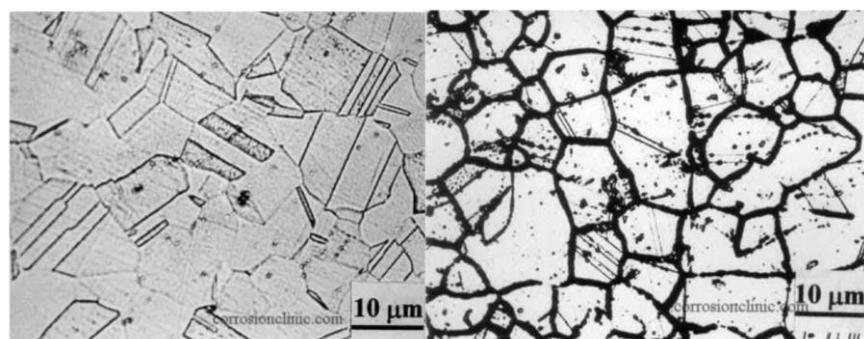
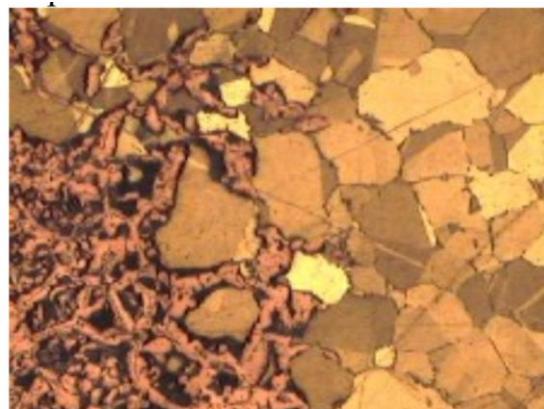


Figura 8. Acero inoxidable tipo 304. Fuente: [14]

## 2.2.5 SELECTIVA

La **corrosión selectiva** es un proceso en el cual uno de los componentes de una aleación metálica se disuelve preferentemente, dejando una matriz debilitada compuesta por los elementos restantes. Un caso particular de este fenómeno es la **deszincificación** (*Figura 9*), la cual afecta a las aleaciones de latón (cobre y zinc). En este proceso, el zinc se disuelve selectivamente cuando el latón está expuesto a ambientes húmedos o acuosos, especialmente en presencia de cloruros, dejando una estructura porosa rica en cobre que compromete la integridad mecánica del material. [16]



*Figura 9. Ejemplo de la deszincificación del latón.* Fuente: [16]

Para prevenir la deszincificación, se recomienda el uso de latones resistentes a este fenómeno, conocidos como **Dezincification Resistant Brass** (DZR). Estos latones están diseñados para inhibir la deszincificación mediante la adición de elementos aleantes como arsénico, antimonio o fósforo, y mediante tratamientos térmicos que favorecen la formación de una microestructura más homogénea y resistente a la corrosión.

## 2.2.6 CORROSIÓN BAJO TENSIÓN

La **corrosión bajo tensión** (*Stress Corrosion Cracking, SCC*) es un fenómeno que combina la acción de un entorno corrosivo con tensiones mecánicas, ya sean aplicadas externamente o residuales, provocando la formación y

propagación de grietas en materiales metálicos que, en condiciones normales, serían dúctiles y resistentes. Este tipo de corrosión es especialmente insidioso, ya que puede desarrollarse sin una pérdida significativa de material, llevando a fallos estructurales repentinos y catastróficos. [17]

Un ejemplo representativo de este fenómeno se encuentra en los aceros inoxidables austeníticos utilizados en la industria del petróleo y gas. Los aceros inoxidables pueden ser susceptibles a la SCC en ambientes que contienen cloruros, especialmente a temperaturas elevadas. El mecanismo de SCC en estos materiales implica la formación de grietas intergranulares debido a la sensibilización por precipitación de carburos en los límites de grano, lo que reduce la resistencia a la corrosión en esas zonas. [17]

Los factores que influyen en la SCC incluyen la composición química del material, la microestructura, la presencia de tensiones residuales y las condiciones ambientales, como la concentración de iones agresivos y la temperatura. Para mitigar este tipo de corrosión, se recomienda el uso de materiales resistentes a la SCC, el control de las tensiones residuales mediante tratamientos térmicos adecuados y la protección contra ambientes corrosivos mediante recubrimientos o inhibidores de corrosión.

Un ejemplo clásico es el colapso del puente Silver en 1967 [18], donde una pequeña grieta por SCC en una barra de suspensión provocó el colapso total de la estructura, causando la muerte de 46 personas.

En la Figura 10 se observa una tubería de acero inoxidable con grietas ramificadas características de la SCC, detectadas mediante inspección con partículas magnéticas.



*Figura 10. El puente Silver se derrumba sobre el río Ohio, 17 de diciembre de 1967. Fuente: [18]*

En resumen, la comprensión y prevención de la corrosión bajo tensión son esenciales para garantizar la integridad y seguridad de las estructuras metálicas en entornos agresivos, especialmente en sectores críticos como el energético y el petroquímico.

Recientemente se ha evaluado la susceptibilidad a la SCC del acero inoxidable lean dúplex 2001 cuando se expone a soluciones simuladas de poro de hormigón contaminadas con cloruros, simulando condiciones marinas y bajo diferentes condiciones tensionales, para estudiar su comportamiento en SCC. [19]. Este estudio resalta la importancia de considerar tanto las condiciones ambientales como las tensiones mecánicas al seleccionar materiales para estructuras expuestas a ambientes corrosivos, como las infraestructuras marinas y las construcciones en zonas costeras.

#### 2.2.7 CORROSIÓN FATIGA

Cuando un metal sufre muchas tensiones o deformaciones, sus propiedades mecánicas se debilitan poco a poco, lo que puede causar fisuras y romperlo, incluso si las tensiones son menores que las que normalmente causarían daño en una sola carga constante. Este fenómeno se conoce como **fatiga** y

es responsable de la mayoría de las roturas en componentes estructurales y maquinaria. [20]

Cuando se somete el material a cargas oscilantes en presencia de un ambiente agresivo, se produce la corrosión por fatiga, lo que es más perjudicial que la fatiga mecánica o la corrosión química por separado. La interacción de múltiples variables químicas, mecánicas y microestructurales hace que el análisis de este proceso sea complejo.

**La corrosión por fatiga** es un fenómeno que combina la acción de cargas cíclicas y ambientes corrosivos, acelerando la formación y propagación de grietas en materiales metálicos. Este proceso es especialmente crítico en estructuras expuestas a condiciones marinas, donde la presencia de cloruros y la humedad constante intensifican la degradación del material.

Un ejemplo representativo de este fenómeno se observa en las armaduras de acero inoxidable utilizadas en estructuras de hormigón armado en ambientes marinos. En la Tesis Doctoral de Iñigo Calderón Urízar-Aldaca, titulada "***Fatiga de elementos estructurales por acciones dinámicas aleatorias en medio ambiente agresivo***" [21] se desarrolló un modelo numérico para predecir la vida útil de estas armaduras bajo condiciones de carga cíclica y exposición a ambientes salinos. El modelo incorpora un "factor de empuje de corrosión" que ajusta la regla de daño lineal de Palmgren-Miner (*Figura 11*), considerando la influencia sinérgica de la corrosión y la fatiga. Los resultados mostraron que las armaduras de acero inoxidable dúplex lean 2001 presentaron un rendimiento 1.5 veces superior al del acero al carbono, ofreciendo una mejor relación costo-beneficio en aplicaciones marinas.

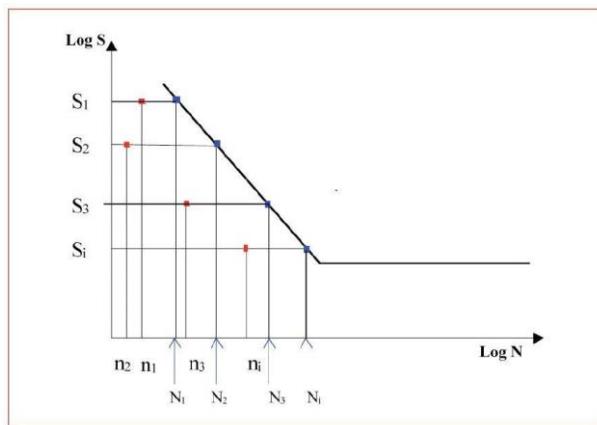


Figura 11. Teoría de daño acumulativo de Palmgren-Miner. Fuente: [22]

Este enfoque destaca la importancia de considerar simultáneamente los efectos de la corrosión y la fatiga en el diseño y mantenimiento de estructuras expuestas a ambientes agresivos, proporcionando herramientas más precisas para predecir su durabilidad y prevenir fallos prematuros.

#### 2.2.8 POR EROSIÓN

Se conoce como **corrosión por erosión** al fenómeno de aceleración en la velocidad de corrosión de un metal, el cual, es causado por el movimiento relativo de un fluido corrosivo y la superficie de un metal (Figura 12). La presencia de partículas sólidas en suspensión en el fluido puede aumentar el efecto erosivo que provoca el deterioro del metal. Diferentes estudios han demostrado que la interacción entre estos dos procesos, corrosión y erosión se conoce como un efecto sinérgico.



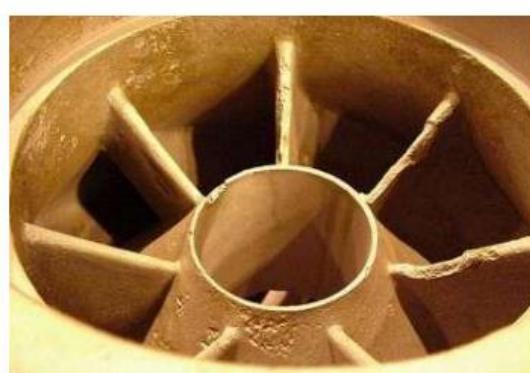
Figura 12. Tubería con ondulaciones y huecos causados por corrosión-erosión. Fuente: [23]

En general, la **sinergia** se define como la diferencia entre el daño causado por la acción combinada de la corrosión por erosión y la suma del daño vinculado solo a las contribuciones relacionadas con la erosión y la corrosión pura. Este fenómeno sinérgico suele ocurrir en codos de tubería, constricciones del tubo y otras estructuras que alteran la dirección o la velocidad del flujo del fluido.

Además, la corrosión por erosión puede provocar la formación de surcos profundos y alargados en la superficie del metal, lo que aumenta la rugosidad y afecta a la estructura del componente. Por lo tanto, es importante tener en cuenta este proceso en la evaluación de la integridad de los equipos y estructuras expuestos a fluidos corrosivos en movimiento.

En los últimos años ha habido un importante avance en el estudio de los fenómenos de erosión causados por partículas en ambientes acuosos. [24]

La complejidad del proceso de corrosión por erosión radica en las múltiples causas que pueden promoverla. Durante la corrosión por erosión, los productos de corrosión se depositan inicialmente en la superficie interna de la tubería en forma de incrustaciones. Varias investigaciones han estudiado los fenómenos de erosión-corrosión (*Figura 13*) involucrados y se ha descubierto que la erosión afecta la corrosión mediante la eliminación de depósitos superficiales, el aumento de la turbulencia local y la rugosidad de la superficie.

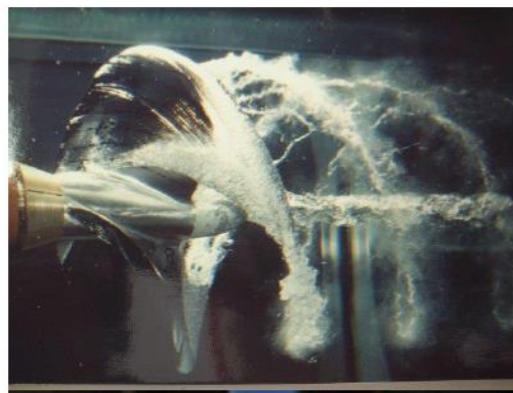


*Figura 13. Álabes de una bomba con corrosión-erosión debido al movimiento de un fluido.* Fuente: [12]

El desgaste mecánico resulta en el daño de la capa protectora pasiva, lo que expone superficies frescas y desnudas al medio corrosivo. Esto acelera el proceso de corrosión y conduce al desarrollo de una nueva capa protectora que eventualmente se dañará por la acción mecánica adicional. Además, las partículas abrasivas de alta velocidad deforman significativamente el metal y forman una capa resistente por el trabajo.

#### 2.2.9 POR CAVITACIÓN

La **corrosión por cavitación** es uno de los tipos de corrosión más comunes en sistemas de transporte de líquidos, como tuberías, válvulas y bombas. Este fenómeno se produce debido a los cambios de presión en el sistema que dan lugar a flujos turbulentos que forman burbujas de aire en el líquido (*Figura 14*). Estas burbujas implosionan contra el material del sistema, produciendo pequeñas cavidades que dañan la capa de pasivación y exponiendo el metal a la corrosión (*Figura 15*). La corrosión por cavitación puede afectar tanto a materiales ferrosos como no ferrosos y puede causar una pérdida de espesor significativa en poco tiempo. [25]



*Figura 14. Cavitación. Fuente: [26]*

La cavitación puede ser causada por varios factores, como el diseño del sistema, la velocidad del líquido y la presión. La cavitación también puede ser un problema en la industria marítima, especialmente en las hélices de los

barcos. Si no se controla, la corrosión por cavitación puede causar fallas catastróficas en los sistemas de transporte de líquidos.

Investigaciones recientes han analizado el comportamiento de uniones soldadas de bronces de elevada aleación frente a la cavitación en agua de mar. Estos estudios destacan la importancia de la microestructura y las características de la soldadura en la resistencia a la cavitación, proporcionando información valiosa para mejorar la durabilidad de componentes en entornos marinos. [27]



*Figura 15. Efectos de la corrosión por cavitación. Fuente: [28]*

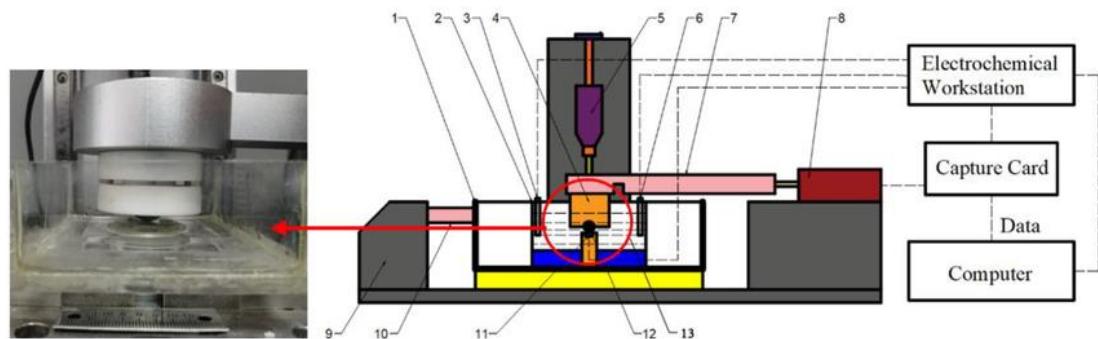
Para evitar la corrosión por cavitación, es importante usar materiales resistentes a este daño, como aceros inoxidables dúplex o aleaciones de níquel. También hay que controlar bien la presión y la velocidad del líquido en el sistema. Además, hacer inspecciones regulares y detectar la corrosión por cavitación a tiempo puede ayudar a evitar problemas mayores.

#### 2.2.10 POR FRICCIÓN

La **corrosión por fricción** (*fretting corrosion*) (*Figura 16*). es un fenómeno que ocurre cuando dos superficies metálicas en contacto experimentan micromovimientos repetitivos bajo carga, lo que provoca desgaste y oxidación en las zonas afectadas. Este tipo de corrosión es especialmente problemático

en aplicaciones de alta carga y velocidad, como en componentes mecánicos en movimiento, ejes, engranajes y cojinetes.

En la Figura 16 es un diagrama esquemático que muestra la interacción entre dos superficies metálicas sometidas a micro movimientos repetitivos bajo carga. Este tipo de representación ayuda a visualizar cómo se produce el desgaste y la oxidación en las zonas de contacto, características de este fenómeno.



*Figura 16. Diagrama simplificado del dispositivo de prueba de corrosión por fricción. Fuente: [29]*

El mecanismo de la corrosión por fricción implica inicialmente la adhesión de las asperidades de las superficies en contacto. Los micromovimientos rompen estas uniones, generando residuos de desgaste que, al oxidarse, aceleran el proceso corrosivo. Este ciclo continuo de adhesión, ruptura y oxidación conduce a un deterioro progresivo de las superficies, disminuyendo su resistencia a la fatiga y reduciendo la vida útil de los componentes.

Para mitigar los efectos de la corrosión por fricción, se han desarrollado diversas estrategias. Por ejemplo, el uso de recubrimientos duros como TiSiN y ZrN aplicados mediante técnicas como la evaporación por arco catódico ha demostrado mejorar significativamente la resistencia a la corrosión por fricción en aleaciones como CoCrMo, reduciendo la pérdida de volumen y la liberación de iones metálicos. En un estudio, se observó que estos recubrimientos disminuyeron la pérdida de volumen por “fretting” en más de 10 y 1000 veces, respectivamente, y redujeron la liberación de iones de cobalto en un 90%. [30]

Otra estrategia efectiva es el uso de lubricantes sólidos como el disulfuro de molibdeno ( $\text{MoS}_2$ ). Estos lubricantes forman una película protectora que minimiza el contacto directo entre las superficies metálicas, disminuyendo así la fricción y la corrosión asociada. Estudios han demostrado que los recubrimientos de  $\text{MoS}_2$  pueden reducir significativamente el desgaste por fretting y el coeficiente de fricción en condiciones de carga cíclica. [31]

En resumen, la corrosión por fricción representa un desafío significativo en aplicaciones mecánicas de alta carga y velocidad. La implementación de recubrimientos protectores y la selección cuidadosa de materiales son estrategias clave para mitigar sus efectos y prolongar la vida útil de los componentes.

### 2.3 FACTORES QUE CONDICIONAN LA SUSCEPTIBILIDAD DE LOS MATERIALES METÁLICOS

El objetivo principal de este apartado es identificar y analizar los distintos factores que influyen en los procesos de corrosión de materiales metálicos, con el fin de comprender cómo afectan al comportamiento y durabilidad de las estructuras expuestas a ambientes agresivos. A través de esta revisión se pretende establecer una base técnica que permita evaluar de forma crítica las condiciones que favorecen o aceleran los mecanismos corrosivos, proporcionando así criterios para la selección adecuada de materiales, el diseño preventivo y la aplicación de medidas de protección eficaces.

Este análisis resulta especialmente relevante en sectores donde la corrosión compromete la seguridad operativa, como la industria naval, petroquímica o energética.

### 2.3.1 FACTORES METALÚRGICOS

Las propiedades intrínsecas del material metálico determinan en gran medida su susceptibilidad a la corrosión. La composición química, la microestructura y las propiedades físicas y mecánicas son aspectos clave.

**Composición química:** La presencia de ciertos elementos de aleación puede mejorar o empeorar la resistencia a la corrosión. Por ejemplo, el cromo en aceros inoxidables forma una capa pasiva de óxido que protege contra la corrosión. Sin embargo, impurezas como el azufre pueden promover la formación de inclusiones que actúan como sitios de iniciación de la corrosión. [6]

**Microestructura y fases:** La distribución de fases y la presencia de precipitados pueden crear celdas galvánicas internas, acelerando la corrosión localizada. Por ejemplo, en aleaciones de aluminio, la precipitación de fases ricas en cobre puede aumentar la susceptibilidad a la corrosión intergranular. [32]

**Propiedades físicas y mecánicas:** La rugosidad superficial influye en la formación de capas pasivas y en la acumulación de contaminantes. Superficies más rugosas pueden retener más humedad y partículas corrosivas, aumentando la tasa de corrosión. [33]

### 2.3.2 FACTORES AMBIENTALES

El entorno en el que se encuentra el material metálico es crucial para el desarrollo de procesos corrosivos. Los principales factores ambientales incluyen:

**Tipo de electrolito:** La presencia de soluciones acuosas con iones disueltos, como cloruros o sulfatos, puede acelerar la corrosión. Los cloruros, en particular, son conocidos por su capacidad para penetrar y destruir capas pasivas en metales como el acero inoxidable. [34]

**pH, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto:** Un pH bajo (medio ácido) generalmente aumenta la tasa de corrosión. Temperaturas elevadas aceleran las reacciones electroquímicas, intensificando los procesos corrosivos. La salinidad y el oxígeno disuelto también juegan roles importantes; altas concentraciones de oxígeno pueden aumentar la corrosión en metales ferrosos. [35]

**Contaminantes industriales:** La presencia de gases como el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera puede formar ácidos al disolverse en agua, aumentando la acidez del medio y, por ende, la corrosión. [36]

### 2.3.3 CONDICIONES DE SERVICIO

Las condiciones operativas a las que se somete un material influyen significativamente en su comportamiento frente a la corrosión.

**Cargas mecánicas (fatiga, impacto, presión):** Las tensiones cíclicas pueden provocar la formación de grietas que actúan como sitios de iniciación para la corrosión. La fatiga-corrosión es un fenómeno donde la acción combinada de cargas cíclicas y un ambiente corrosivo reduce la vida útil del material. [6]

**Movimiento relativo (erosión, cavitación):** El flujo de fluidos a alta velocidad puede causar erosión, eliminando capas protectoras y exponiendo el metal base a la corrosión. La cavitación, causada por la formación y colapso de burbujas en un líquido, puede generar daños localizados en superficies metálicas. [34]

**Ciclos térmicos:** Las variaciones de temperatura pueden inducir tensiones térmicas que, combinadas con ambientes corrosivos, aceleran la degradación del material. La fatiga térmica es especialmente relevante en componentes sometidos a calentamientos y enfriamientos repetidos.

#### 2.3.4 INFLUENCIA DEL DISEÑO Y ENSAMBLAJE

El diseño y la forma en que se ensamblan los componentes metálicos pueden crear condiciones propicias para la corrosión.

**Geometría, uniones, heterogeneidad de materiales:** Diseños que incluyen zonas de difícil acceso o que permiten la acumulación de humedad y contaminantes pueden favorecer la corrosión localizada. La unión de metales diferentes puede crear celdas galvánicas, donde el metal menos noble se corroa preferentemente. [6]

**Problemas de accesibilidad para protección/mantenimiento:** Áreas de difícil acceso pueden no recibir adecuadamente tratamientos protectores o mantenimiento regular, aumentando la susceptibilidad a la corrosión. Además, las rendijas o espacios estrechos pueden retener soluciones corrosivas, promoviendo la corrosión por rendija.

#### 2.3.5 TIEMPO DE EXPOSICIÓN Y MANTENIMIENTO

La duración de la exposición a ambientes corrosivos y las prácticas de mantenimiento son factores determinantes en la vida útil de los materiales metálicos.

**Efecto acumulativo del tiempo:** La corrosión es un proceso progresivo; cuanto mayor sea el tiempo de exposición sin protección adecuada, mayor será el daño acumulado.

**Mecanismos de progresión de daño:** La corrosión puede comenzar como un proceso superficial y avanzar hacia el interior del material, comprometiendo su integridad estructural. [6]

## 2.4 NORMATIVA

La **Organización Internacional de Normalización (ISO)** (*Figura 17*) cuenta con una serie de normas relacionadas con la corrosión que establecen estándares y guías para la prevención, evaluación y control de la corrosión en diversos entornos. Ayudan a las empresas a seleccionar los materiales adecuados y aplicar las mejores prácticas para prevenir la corrosión y proteger sus activos. [37]



*Figura 17. International Organization for Standardization (ISO).* Fuente: [37]

Algunas de las normas ISO más relevantes en el ámbito de la corrosión son las siguientes:

- **ISO 8501:** Establece los métodos para la preparación de superficies antes de la aplicación de recubrimientos protectores en estructuras metálicas. Incluye requisitos para la eliminación de óxido, pintura vieja y otras impurezas que pueden afectar la adherencia y la durabilidad del recubrimiento. [38]
- **ISO 9223:** Clasifica los ambientes corrosivos en función de su corrosividad, determinando criterios para determinar la corrosión en diferentes materiales. Define seis categorías de ambientes corrosivos, desde muy baja hasta muy alta corrosividad, y proporciona información para seleccionar los materiales adecuados en función del ambiente en el que se encuentran. International Organization for Standardization. (2017). [39]
- **ISO 11844-1:** Establece los requisitos para la protección contra la corrosión de las estructuras de acero en la construcción de puentes.

Incluye información sobre la selección de materiales, la preparación de la superficie y la aplicación de recubrimientos protectores para prevenir la corrosión. [40]

- **Norma ISO 15741:** Establece los requisitos para la prevención de la corrosión en los sistemas de tuberías de acero utilizados en la industria petrolera. Incluye información sobre la selección de materiales, la protección catódica y la prevención de la corrosión bajo aislamiento. [41]

Además, existen otras normativas ISO relacionadas con la corrosión en diferentes contornos, como la ISO 8502 para la evaluación de la limpieza de superficies antes de la aplicación de recubrimientos, la ISO 8503 para la evaluación de la preparación de superficies mediante la medición del perfil de rugosidad, y la ISO 11127 para los abrasivos utilizados en los procesos de preparación de superficies.

## 2.5 ANÁLISIS PROBLEMAS DE CORROSIÓN

La corrosión es un fenómeno complejo de naturaleza fisicoquímica que afecta a materiales metálicos expuestos a entornos agresivos, generando importantes consecuencias técnicas, económicas y de seguridad. Su estudio requiere un enfoque multidisciplinar y una cooperación activa entre profesionales, empresas e instituciones.

En respuesta a esta necesidad, existen numerosas organizaciones científicas a nivel mundial que promueven la investigación, la formación y la estandarización en materia de corrosión.

- En España, la **Sociedad Científica Española de Materiales (SOCIEMAT)** agrupa a expertos en materiales y corrosión, promoviendo el intercambio científico. [42]

- En Francia, **CEFRACOR (Comité Français de l'Association Internationale de la Corrosion)** es una entidad clave que impulsa la investigación y normativa sobre corrosión. [43]
- En Estados Unidos, la antigua NACE **International (National Association of Corrosion Engineers)**, ahora parte de AMPP, es una de las principales instituciones dedicadas al control y estudio de la corrosión a nivel global. [44]
- En Alemania, la principal organización dedicada al estudio y control de la corrosión es la **Deutsche Gesellschaft für Korrosionsschutz** (DGK). Esta sociedad reúne a profesionales y expertos en el campo de la corrosión, promoviendo la investigación, desarrollo tecnológico y normativas para la prevención y control de la corrosión en diversos sectores industriales. [45]

Todas ellas con un papel clave en la generación y difusión del conocimiento técnico.

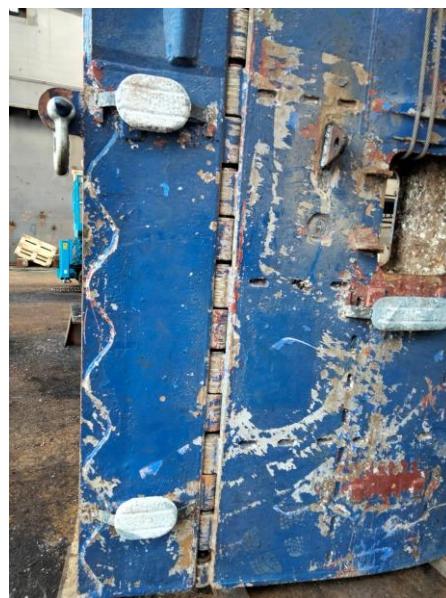
Desde el punto de vista industrial, la corrosión representa una amenaza constante, con elevados costes asociados tanto directos (como reparación, mantenimiento o sustitución de equipos) como indirectos, como la pérdida de productividad o la reducción de la vida útil de los activos. Sectores como el marítimo, el químico o el aeroespacial son especialmente vulnerables, ya que operan en condiciones que favorecen la corrosión. Además, este deterioro puede afectar la calidad y seguridad de los productos, así como la imagen y competitividad de las empresas.

Por tanto, comprender los factores que influyen en la corrosión y aplicar estrategias de prevención eficaces es esencial para garantizar la sostenibilidad y fiabilidad de las infraestructuras y procesos industriales.

Las empresas enfrentan costos importantes relacionados con la corrosión, incluidos los costos de los materiales, los costos de las reparaciones y el costo de los reemplazos. Estos costes pueden representar entre el 3% y el 5% del

PIB en países industrializados. Identificar y cuantificar estos costes es esencial para justificar inversiones en prevención y control de la corrosión. [46]

En particular, las empresas que operan en ambientes corrosivos, como las industrias marinas y químicas, y las empresas que dependen de estructuras y maquinarias de alta tecnología y alto valor, como aviones, barcos y turbinas de gas, se pueden enfrentar a costos significativamente más altos, debido a la corrosión (*Figura 18*).



*Figura 18. Corrosión de la pala del timón de un buque.* Fuente: Elaboración propia.

Las empresas pueden adoptar diversas estrategias para reducir dichos costos:

- Selección de materiales resistentes a la corrosión y aplicación de recubrimientos protectores que reducen los costos de mantenimiento y reparación.
- Monitorización regular del estado de las estructuras y el mantenimiento preventivo, esenciales para detectar y prevenir la corrosión antes de que cause daños significativos.

- Inversión en investigación para el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías resistentes a la corrosión, beneficioso para las empresas a largo plazo.

En resumen, la corrosión representa un problema significativo y costoso para las empresas. La prevención de la corrosión es fundamental, no solo para reducir los costos económicos asociados a reparaciones, mantenimiento y reemplazo de materiales dañados, sino también para evitar paradas no planificadas y prolongar la vida útil de las instalaciones y equipos. Controlar la corrosión contribuye a garantizar la seguridad de las operaciones, protegiendo tanto a las personas como al medio ambiente, y asegura que los productos y servicios ofrecidos mantengan un alto nivel de calidad y fiabilidad. Por lo tanto, la gestión eficaz de la corrosión es una inversión clave para la sostenibilidad y competitividad de las empresas en distintos sectores industriales.

### 3 CORROSIÓN EN EL SECTOR NAVAL

El entorno marino constituye uno de los principales retos para la integridad de los materiales metálicos debido a la agresividad del agua de mar, que provoca daños severos en gran variedad de componentes. [47]

Aunque ciertas aleaciones presentan una buena resistencia a la corrosión en ambientes atmosféricos, su comportamiento puede deteriorarse notablemente cuando se exponen al ambiente marino, como ocurre comúnmente en la construcción naval. [48]

La susceptibilidad de los metales a regresar a su estado natural hace que la mayoría de los materiales empleados en estructuras navales sean vulnerables a la corrosión, un fenómeno tan extendido que muchas veces se asume como inevitable. [49]

Sin embargo, la solución a este problema no requiere fórmulas complejas, sino un enfoque práctico basado en el conocimiento del comportamiento de los materiales frente a agentes agresivos como el agua salada. [50]

En la siguiente Figura (*Figura 19*) se observa un buque en astillero, preparado para realizar labores de mantenimiento en el casco, lo cual es fundamental para prevenir la corrosión y asegurar la integridad estructural de la embarcación.



*Figura 19. Buque mercante en dique seco. Fuente: [51]*

Por ello, la prevención y el mantenimiento juegan un papel fundamental en la protección de las embarcaciones. La falta de conocimiento sobre las herramientas y métodos disponibles puede conducir a una aceptación injustificada de la corrosión, incrementando riesgos y costos. [47]

Implementar medidas básicas de mantenimiento permite prevenir gran parte de los daños inducidos, reduciendo considerablemente tanto los gastos de reparación como la posibilidad de fallos graves durante la operación. [48]

Es imprescindible comprender que la corrosión no es un proceso ineludible; con sentido común y estrategias adecuadas, es posible minimizar sus efectos adversos, garantizando la durabilidad y seguridad en la construcción naval. [50]

### 3.1 CORROSIÓN EN CONTACTO CON AGUA DE MAR

La **corrosión marina** es un proceso de degradación de materiales metálicos que ocurre cuando estos están en contacto directo con el agua de mar. Este medio es altamente conductor y contiene una elevada concentración de iones cloruro, los cuales pueden penetrar y desestabilizar las películas pasivas protectoras en la superficie de los metales, facilitando la aparición de corrosión localizada, como picaduras y grietas. Además, la alta solubilidad de oxígeno en el agua salada intensifica las reacciones electroquímicas, acelerando el deterioro de las estructuras metálicas.

Otro factor agravante es el ***biofouling*** (Figura 20), que implica la acumulación de microorganismos, plantas, algas y animales en las superficies sumergidas, creando microambientes que favorecen la corrosión microbiológica. Para mitigar estos efectos, se emplean pinturas ***antifouling***, también conocidas como pinturas antiincrustantes o patentes. Estas pinturas se aplican en la parte sumergida del casco de las embarcaciones y están formuladas con biocidas que se liberan gradualmente al entrar en contacto con el agua, creando una superficie hostil para los organismos marinos. Esto no solo

previene la adhesión de organismos que contribuyen al *biofouling*, sino que también actúa como una barrera protectora contra la corrosión, prolongando la vida útil de la embarcación y mejorando su eficiencia operativa.



*Figura 20. Biofouling en el casco de un buque. Fuente: [52]*

Existen diferentes tipos de pinturas *antifouling* (Figura 21), como las autopulimentables, que se desgastan de manera controlada liberando biocidas, y las de matriz dura, que son más resistentes y adecuadas para embarcaciones de alta velocidad. [53]



*Figura 21. Pintura antifouling aplicada en la obra viva del buque. Fuente:  
Elaboración propia*

La elección del tipo de pintura depende de factores como el tipo de embarcación, las condiciones de navegación y las regulaciones ambientales vigentes.

### 3.2 IMPACTO MEDIO AMBIENTE

La corrosión marina no solo afecta la integridad de las estructuras navales, sino que también tiene repercusiones significativas en el medio ambiente. Los sistemas de protección contra la corrosión, como los ánodos galvánicos y los recubrimientos orgánicos, pueden liberar metales pesados y compuestos orgánicos al entorno marino. Estos contaminantes pueden acumularse en los sedimentos y afectar la vida marina, alterando los ecosistemas locales.

Además, la degradación de materiales debido a la corrosión puede generar residuos que, al desprenderse, se dispersan en el océano, contribuyendo a la contaminación marina. La necesidad de reemplazar o reparar estructuras corroídas también implica un consumo adicional de recursos y energía, aumentando la huella ambiental de las actividades navales. [46]

La corrosión marina también puede contribuir al proceso de **acidificación** del océano. Este fenómeno se origina cuando el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico es absorbido por el agua de mar, formando ácido carbónico y disminuyendo el pH del océano, lo que lo hace más ácido. [54] [55]

Esta disminución del pH tiene efectos corrosivos directos sobre las estructuras marinas, tanto naturales como artificiales. Por ejemplo, el agua de mar más ácida puede disolver las conchas y esqueletos de organismos marinos que contienen carbonato de calcio, como corales, moluscos y ciertos tipos de plancton.

En la Figura 22 representa el proceso de acidificación de los océanos, causado por el aumento de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) disuelto en el agua marina.

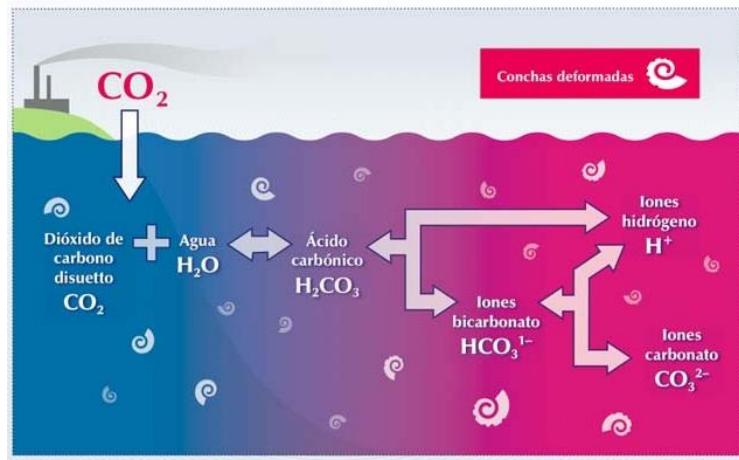


Figura 22. Acidificación de los océanos. Fuente: [56]

Además, la acidificación puede acelerar la corrosión de infraestructuras metálicas en ambientes marinos, como plataformas petrolíferas, barcos y puentes costeros debilitando las estructuras y reduciendo su vida útil. La acidificación representa un desafío significativo para la preservación de ecosistemas y la durabilidad de infraestructuras costeras.

Otro impacto de la corrosión marina en el medio ambiente es el aumento de la concentración de nutrientes en el agua. La corrosión de metales puede liberar nutrientes como el hierro, que pueden fomentar el crecimiento de microorganismos como las algas. Si este crecimiento es excesivo, puede dar lugar a floraciones de algas tóxicas que afectan negativamente a la calidad del agua y a la fauna que vive en ella. Además, las algas pueden consumir oxígeno del agua y provocar zonas muertas donde los organismos marinos no pueden sobrevivir. [57]

Por lo tanto, es esencial considerar el impacto ambiental de la corrosión marina al diseñar estrategias de prevención y mantenimiento, buscando soluciones que minimicen tanto el deterioro de las estructuras como la contaminación del entorno marino.

## 4 CONTROL DE LA CORROSIÓN Y PROTECCIÓN DE LOS MATERIALES

Si bien la selección de un material resistente a la corrosión es la medida de control más efectiva, esta opción no siempre es viable debido a varias limitaciones. Éstas incluyen las condiciones del entorno, las restricciones dimensionales y geométricas necesarias en el material para su aplicación y los costos asociados. Como resultado, se requiere explorar otros métodos para proteger los materiales de la corrosión.

Una de las estrategias más utilizadas es la **protección catódica**, la cual consiste en inducir a un metal a comportarse como cátodo dentro de una celda de corrosión. Esto se logra mediante, por ejemplo, con la unión física a un metal más reactivo, que se corroa en su lugar, ofreciendo así una defensa efectiva contra diferentes tipos de corrosión, como la intergranular, por picaduras y el agrietamiento bajo tensión. Para que este método sea eficaz, ambos metales deben estar en contacto eléctrico o sumergidos en un electrolito.

Otra estrategia fundamental son los **recubrimientos protectores**, como los epoxídicos, poliuretanos o recubrimientos avanzados con nanopartículas, que actúan como barreras físicas entre el metal y el medio agresivo. En el caso de los buques, estos recubrimientos son esenciales en zonas como el casco o los tanques de lastre, donde la exposición al agua salada es constante.

Finalmente, el uso de **inhibidores de corrosión** también resulta muy efectivo. Estas sustancias químicas se añaden al medio para reducir las reacciones electroquímicas que provocan la corrosión. Pueden ser de tipo anódico, catódico o mixto, y son especialmente útiles en sistemas cerrados como circuitos de refrigeración o en el mantenimiento de estructuras metálicas en ambientes controlados.

Estas tres estrategias (protección catódica, recubrimientos e inhibidores de corrosión) son frecuentemente combinadas para optimizar la protección y prolongar la vida útil de las estructuras metálicas expuestas a condiciones agresivas. Su implementación resulta esencial en diversas industrias donde la integridad estructural de los metales es crucial, ya que permiten minimizar los daños, reducir los costos asociados a reparaciones o reemplazos, y garantizar un funcionamiento más seguro y eficiente de los sistemas expuestos a entornos corrosivos. [58]

A continuación, se abordará la protección catódica como una de las estrategias más eficaces para prevenir la corrosión de estructuras metálicas, especialmente en entornos marinos o industriales agresivos. Este método consiste en modificar el potencial electroquímico del metal a proteger, forzándolo a comportarse como un cátodo en una celda de corrosión. Ya sea mediante el uso de ánodos de sacrificio o mediante corriente impresa, la protección catódica ha demostrado ser una solución efectiva y duradera en aplicaciones como tuberías, cascos de buques, plataformas offshore y tanques de almacenamiento.

#### 4.1 PROTECCIÓN CATÓDICA

La **protección catódica**, (PC) es un método activo de control de la corrosión que se aplica directamente sobre la estructura metálica a proteger, convirtiéndola en el cátodo de una celda electroquímica. A diferencia de métodos pasivos como la selección de materiales resistentes o el uso de inhibidores para modificar el medio, la PC actúa sobre el potencial electroquímico del metal, previniendo así su oxidación. [59]

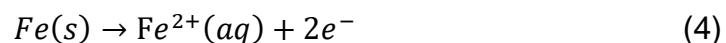
La efectividad de la protección catódica puede comprenderse visualmente mediante **el diagrama de Pourbaix** (*Figura 23*) para el sistema Fe-H<sub>2</sub>O. Es una herramienta fundamental en la electroquímica para comprender la estabilidad de las diferentes especies del hierro en función del pH y el potencial electroquímico (E). Este diagrama permite identificar las condiciones

bajo las cuales el hierro se encuentra en estado metálico, forma óxidos o hidróxidos pasivos, o se disuelve como iones ferrosos ( $Fe^{2+}$ ) o férricos ( $Fe^{3+}$ ).

Zonas principales del diagrama Fe-H<sub>2</sub>O:

1. **Zona de corrosión activa:** En condiciones de pH bajo (ácido) y potenciales positivos, el hierro tiende a oxidarse, formando iones  $Fe^{2+}$  o  $Fe^{3+}$ , lo que indica una alta susceptibilidad a la corrosión.
2. **Zona de pasivación:** En un rango de pH moderado a alcalino (aproximadamente entre 8 y 13) y potenciales intermedios, se forman capas pasivas como  $Fe(OH)_3$  o  $Fe_2O_3$  que protegen al metal subyacente de una mayor oxidación.
3. **Zona de inmunidad:** A potenciales negativos y en un amplio rango de pH, el hierro permanece en su estado metálico, siendo termodinámicamente estable y no propenso a la corrosión.

Estas zonas se determinan mediante las ecuaciones de Nernst para las reacciones redox del hierro en presencia de agua. Por ejemplo, la reacción de oxidación del hierro metálico a ion ferroso en medio ácido se representa en la Ecuación 4 como:



La línea correspondiente en el diagrama indica el equilibrio entre el hierro metálico y el ion ferroso, y su posición depende del pH y del potencial del sistema. [60]

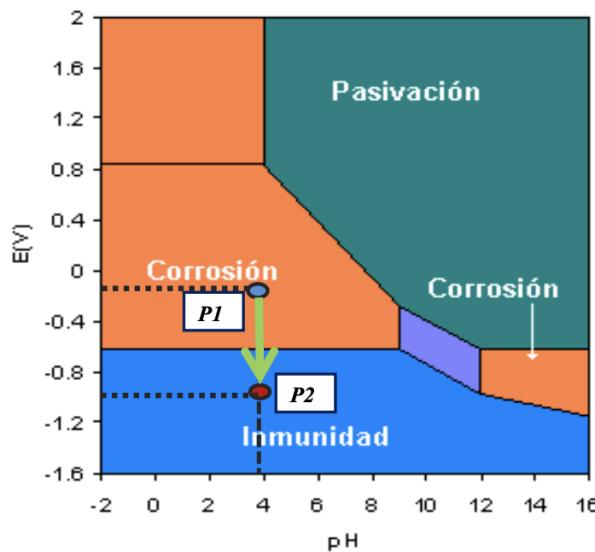


Figura 23. Diagrama de Pourbaix, potencial – pH para el Fe a 25°C. Fuente: [61]

El diagrama de Pourbaix es esencial para diseñar estrategias de protección contra la corrosión, como la selección de recubrimientos adecuados o la implementación de sistemas de protección catódica, especialmente en estructuras expuestas a ambientes marinos como los cascos de los buques. Este diagrama permite identificar las condiciones de pH y potencial eléctrico en las que un metal como el hierro se mantiene estable y no se oxida. En este contexto, la protección catódica se basa precisamente en mantener al hierro dentro de esa zona “segura” del diagrama, evitando así su disolución y prolongando la vida útil de la estructura metálica. [60]

Existen dos formas principales de aplicar este método:

- ✚ Ánodos de sacrificio: se conectan metales más electropositivos (como zinc, magnesio o aluminio) a la estructura a proteger. Estos se oxidan en lugar del metal principal, funcionando como protectores consumibles.
- ✚ Corrientes impresas: se aplica una corriente externa desde una fuente de alimentación a través de ánodos inertes. Esta técnica permite un mayor control del potencial de protección, especialmente útil en

estructuras grandes o de geometría compleja, como cascos de buques o tanques.

Ambos métodos son ampliamente utilizados en ambientes marinos y subterráneos debido a su eficacia comprobada para evitar la corrosión en infraestructuras críticas.

#### 4.1.1 PROTECCIÓN CATÓDICA MEDIANTE ÁNODOS DE SACRIFICIO

Los ánodos utilizados en la protección catódica están fabricados con aleaciones metálicas que tienen un potencial electroquímico más negativo que el metal a proteger, lo que facilita su oxidación preferencial y protege la estructura principal. [50]

Existen varios tipos de ánodos de sacrificio, siendo los más comunes los de zinc, aluminio y magnesio, cada uno adecuado para diferentes ambientes y estructuras. [62]

- Ánodos de zinc: se emplean típicamente en agua de mar debido a su buena compatibilidad y eficacia en ambientes marinos, protegiendo estructuras como cascos de buques y plataformas offshore. [59]
- Ánodos de aluminio: utilizados en aguas marinas y salobres, ofrecen un mayor rendimiento y duración que los de zinc, siendo adecuados para estructuras submarinas extensas, como tuberías y tanques. [49]
- Ánodos de magnesio: tienen un potencial más negativo y se usan principalmente en ambientes de agua dulce o suelos altamente resistentes, protegiendo estructuras enterradas o sumergidas. [50]

Estos ánodos se aplican en diversas estructuras metálicas, desde cascos de barcos, puentes, tanques, hasta instalaciones subterráneas e industriales, donde la protección catódica ayuda a prevenir la corrosión y prolongar la vida útil. [59][62]

En la Figura 24 se observa la hélice de un buque junto a varios ánodos de sacrificio instalados en la parte inferior del casco.

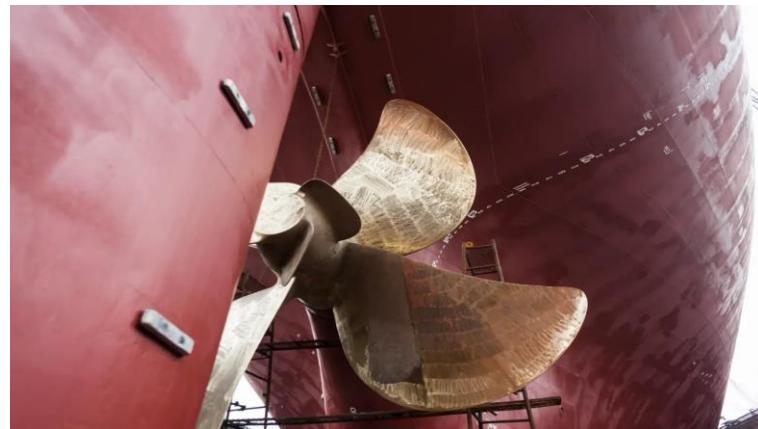


Figura 24. Ánodos de sacrificio. Fuente: [63]

El funcionamiento de un **ánodo de sacrificio** es similar al de una celda electroquímica. El metal protegido actúa como cátodo (carga negativa) y el ánodo, hecho de un material más reactivo, funciona como el polo positivo. Debido a la diferencia de potencial entre ambos, se genera una corriente eléctrica, que hace que el ánodo se oxide en lugar del metal protegido. A medida que el ánodo se desgasta, la estructura principal se mantiene intacta, prolongando su vida útil.

Un ejemplo común de este tipo de protección lo constituyen los **ánodos de zinc**. A medida que el zinc se corroe, libera electrones, permitiendo que el metal principal se mantenga como cátodo y evitando su deterioro debido a la corrosión. Este proceso electroquímico es clave para la protección eficaz de estructuras expuestas a ambientes corrosivos.

En la Figura 25 se ilustra el funcionamiento del sistema de protección catódica mediante ánodos de sacrificio.

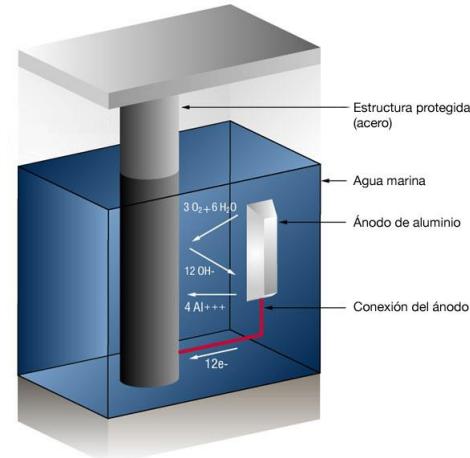


Figura 25. Sistema de protección catódica por ánodo de sacrificio. Fuente: [64]

La elección del material adecuado depende de factores como la composición del agua, temperatura, resistividad y tipo de estructura a proteger, asegurando una protección óptima y económica. [65]

#### 4.1.2 PROTECCIÓN CATÓDICA MEDIANTE CORRIENTE IMPRESA

Un sistema de protección catódica por **corrientes impresas** (*Impressed current cathodic protection - ICCP*) (Figura 26) en un buque es una tecnología diseñada para prevenir la corrosión del casco cuando está en contacto con el agua de mar. Su funcionamiento se basa en la aplicación de una corriente eléctrica controlada, con el fin de mantener el potencial del metal en un nivel adecuado para evitar su oxidación (inmunidad electroquímica). [66]

Este sistema consta de ánodos auxiliares o de referencia, instalados estratégicamente en el casco, los cuales están conectados a una fuente de alimentación externa. Un controlador monitorea constantemente el potencial eléctrico de la estructura y ajusta la corriente suministrada según sea necesario, garantizando una protección óptima.

A diferencia de los ánodos de sacrificio, que se consumen con el tiempo, los ánodos de este sistema no sufren un desgaste significativo, lo que lo convierte en una solución más eficiente y de mayor durabilidad para la protección de embarcaciones expuestas a ambientes marinos agresivos.

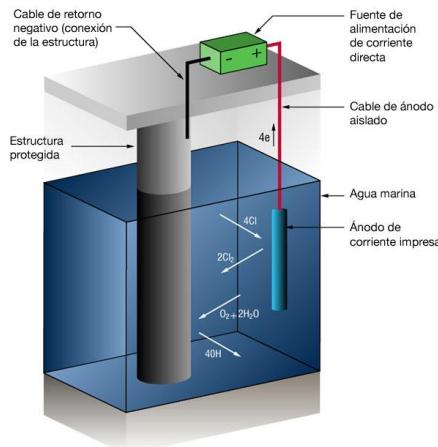


Figura 26. Sistema de protección catódica por corriente impresa. Fuente:

[64]

Los sistemas de protección catódica por corriente impresa (ICCP) están compuestos por varios elementos clave que trabajan conjuntamente para asegurar una protección eficiente y controlada frente a la corrosión en estructuras metálicas expuestas a medios agresivos. A continuación, se describen sus principales componentes.

El corazón del sistema es la **unidad de control y potencia** (Figura 27), instalada habitualmente en la sala de máquinas en un armario estanco. Esta unidad se encarga de transformar la corriente alterna, de la red eléctrica del buque, en corriente continua mediante rectificadores; regulando su salida en función de las condiciones de protección requeridas.



Figura 27. Unidad de control. Fuente: [67]

Estas unidades están disponibles en diferentes capacidades, que pueden oscilar entre los 20 y los 900 amperios, en función del fabricante y las necesidades específicas del buque.

La corriente continua generada es enviada a través de los **ánodos de corriente impresa** (Figura 28), los cuales están fabricados con materiales altamente duraderos que no se consumen durante el proceso de protección catódica. Entre los más comunes se encuentran:

- **Titanio recubierto con óxidos metálicos mixtos (MMO)**: Estos ánodos, generalmente con recubrimientos de óxidos de metales como rutenio e iridio, ofrecen una larga vida útil y estabilidad en ambientes marinos agresivos. Son ampliamente utilizados en estructuras sumergidas como cascos de barcos y plataformas offshore. [65]
- **Titanio platinado**: Consiste en una delgada capa de platino sobre un sustrato de titanio. Este tipo de ánodo es insoluble y proporciona una protección eficaz en aplicaciones marinas, incluyendo la protección de cascos de buques. [68]
- **Hierro-silicio**: Utilizado en ambientes con alta resistividad, como suelos o estructuras enterradas, debido a su buena conductividad y resistencia a la corrosión. [65]

Estos materiales se seleccionan según las condiciones específicas del entorno y la estructura a proteger, garantizando una distribución uniforme de la corriente protectora y una protección eficaz contra la corrosión.

Según el diseño del fabricante, pueden presentarse en diferentes formas, adaptadas a las necesidades estructurales del buque y a la distribución de corriente deseada, como se puede ver en la Figura 28. Los principales tipos son:

- **Ánodos lineales:** empleados en zonas amplias del casco, permiten una distribución uniforme de la corriente a lo largo de una superficie extensa.
- **Ánodos elípticos:** utilizados en áreas con geometrías complejas o con espacio reducido, ofrecen buena cobertura en secciones curvas o confinadas.
- **Ánodos circulares:** adecuados para puntos localizados que requieren una mayor densidad de corriente, como zonas críticas o de alto desgaste.



Figura 28. Ánodos. Fuente: [67]

Para controlar de forma precisa la protección aplicada, el sistema incorpora **electrodos de referencia** (*Figura 29*), que se colocan en zonas representativas del casco bajo la línea de flotación. Estos sensores comparan el potencial eléctrico del casco con un valor estándar y envían esta información a la unidad de control.

Son esenciales para monitorear y controlar el potencial de las estructuras protegidas. Además de las aleaciones de zinc [59], se emplean otros materiales según el entorno y las necesidades específicas:

- Electrodos de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl): Ampliamente utilizados en ambientes marinos debido a su estabilidad y compatibilidad con soluciones salinas. [69]
- Electrodos de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>): Comunes en aplicaciones terrestres, especialmente en suelos, por su potencial estable y facilidad de uso. [70]
- Electrodos inertes: Fabricados con materiales como titanio recubierto con óxidos metálicos mixtos (MMO), ofrecen alta durabilidad y resistencia a la corrosión, siendo ideales para aplicaciones de larga duración en ambientes agresivos. [70]

La selección del tipo de electrodo depende de factores como la resistividad del medio, la composición química del entorno y los requisitos específicos de la estructura a proteger.



Figura 29. Electrodo de referencia. Fuente: [67]

En conjunto, estos componentes aseguran una protección activa y controlada contra la corrosión, permitiendo ajustar la intensidad de la corriente en tiempo real y manteniendo la integridad estructural del buque a lo largo de su vida útil.

## 4.2 RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

Para mitigar este problema, se emplean **recubrimientos protectores** que actúan como barreras físicas, aislando el metal del contacto directo con agentes corrosivos como el agua salada, el oxígeno y los contaminantes atmosféricos.

Existen diversos tipos de recubrimientos utilizados en la protección contra la corrosión:

- Recubrimientos epoxídicos: Ofrecen una excelente adherencia y resistencia química, siendo ideales para áreas sumergidas y tanques de lastre. [71]
- Recubrimientos de poliuretano: Proporcionan resistencia a la abrasión y a los rayos UV, siendo adecuados para superficies expuestas al ambiente. [72]
- Recubrimientos de zinc inorgánico: Actúan como ánodos de sacrificio, protegiendo el acero subyacente mediante protección catódica. [73]
- Recubrimientos avanzados: Como los nanocompuestos de níquel con óxidos metálicos (por ejemplo, Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni/SiC), que ofrecen una resistencia mejorada en entornos agresivos. [74] [75]

En el contexto naval, la aplicación de recubrimientos protectores es esencial para prolongar la vida útil de las embarcaciones y reducir los costos de mantenimiento. Por ejemplo, en los tanques de lastre, que están sujetos a ciclos de llenado y vaciado con agua de mar, se utilizan recubrimientos epoxídicos con pigmentación de aluminio para lograr una vida útil de hasta 25 años, superando los estándares establecidos por la Organización Marítima Internacional (OMI).

Además, en áreas como el casco sumergido, se emplean sistemas de recubrimiento multicapa que combinan imprimaciones epoxídicas con capas de acabado de poliuretano, proporcionando una protección eficaz contra la corrosión y los rayos UV. [72]

Un ejemplo específico es el uso de recubrimientos como Belzona 5811 (*Immersion Grade*) (Figura 30), que ha demostrado una durabilidad significativa en aplicaciones marinas, manteniéndose en condiciones óptimas incluso después de nueve años de servicio. [75]



Figura 30. Belzona 5811 (Immersion Grade). Fuente: [76]

En la Figura 31, se muestra un intercambiador de calor antes y después de la aplicación del recubrimiento Belzona 5811 (*Immersion Grade*), evidenciando una mejora significativa en la protección contra la corrosión y el desgaste en ambientes marinos e industriales.



Figura 31. Aplicación Belzona 5811 en un intercambiador de calor. Fuente: [76]

Es importante centrar la atención en los recubrimientos diseñados específicamente para el casco. El casco de un buque requiere recubrimientos específicos que protejan contra la corrosión y el crecimiento biológico (*biofouling*), dos de los principales problemas en el entorno marino. Entre los recubrimientos más utilizados se encuentran:

- **Imprimaciones epoxídicas:** Ofrecen una excelente adherencia y resistencia química, formando una base sólida que protege el acero contra la corrosión.
- **Recubrimientos de zinc o de zinc en polvo:** Proporcionan protección catódica mediante el sacrificio del zinc, evitando la oxidación del acero.
- **Pinturas antiincrustantes o *antifouling*:** Formuladas con biocidas que se liberan lentamente para impedir la adhesión de organismos marinos como algas, percebes y moluscos, mejorando la eficiencia del buque y reduciendo el mantenimiento.
- **Recubrimientos de poliuretano:** Aplicados como capa final, ofrecen resistencia mecánica y protección contra la radiación ultravioleta, mejorando la durabilidad del sistema de pintura.

Estos recubrimientos, aplicados en sistemas multicapa, garantizan la protección prolongada del casco frente a la agresividad del agua de mar y contribuyen a la eficiencia operativa del buque. [71] [72]

La implementación de recubrimientos protectores adecuados es una estrategia efectiva para controlar la corrosión en buques, contribuyendo a la seguridad operativa y a la sostenibilidad económica de las operaciones navales. La selección del sistema de recubrimiento debe basarse en las condiciones específicas de exposición y en los requisitos de rendimiento a largo plazo.

#### 4.3 INHIBIDORES DE CORROSIÓN

Los **inhibidores de corrosión** son sustancias químicas que, cuando se añaden en pequeñas cantidades a un ambiente agresivo, reducen o detienen las reacciones electroquímicas que causan la corrosión en materiales metálicos. Funcionan principalmente interfiriendo con las reacciones en los electrodos, ya sea formando una barrera protectora o alterando la cinética electroquímica. [77]

Estos inhibidores se clasifican en tres tipos principales:

- Anódicos: que promueven la formación de películas pasivas sobre la superficie metálica.
- Catódicos: que inhiben la reacción de reducción al precipitar en las áreas catódicas.
- Mixtos: que actúan sobre ambos electrodos, proporcionando una protección más completa.

En la industria naval, los inhibidores de corrosión son una herramienta clave para proteger los cascos de los buques, especialmente en zonas donde el uso de recubrimientos físicos es limitado o complementario.

Por ejemplo, en sistemas de agua de lastre, donde el flujo constante y la naturaleza agresiva del agua salada dificultan la protección física, el uso de inhibidores catódicos como los compuestos a base de fosfatos y molibdatos ha demostrado eficacia para reducir la corrosión del acero estructural. Estos inhibidores forman capas pasivas que limitan la disolución metálica, extendiendo la vida útil del casco y disminuyendo los costos de mantenimiento. [78]

Un tipo común de inhibidor usado para el casco de un buque son los inhibidores orgánicos nitrogenados, como las aminas o compuestos heterocíclicos que se adsorben sobre la superficie metálica formando una película protectora que reduce la corrosión en ambientes marinos. Los cuales

han sido efectivos en ambientes marinos debido a su capacidad para adsorberse sobre la superficie metálica y bloquear sitios reactivos. [79]

La selección del inhibidor adecuado debe considerar factores como el tipo de metal, la composición del agua y las condiciones operativas del buque.

## 5 METODOLOGÍA

### 5.1 OBJETO Y ALCANCE DEL PROYECTO

El objetivo principal del proyecto consiste en realizar el diseño de un sistema de **protección contra la corrosión** en el buque hospital del Instituto Social de la Marina (ISM) llamado "El Esperanza del Mar" (*Figura 32*), salvaguardando su casco y permitiendo que continúe brindando servicios médicos vitales en entornos marítimos, de manera segura y eficiente.

Su exposición constante al entorno marino puede dañar su integridad estructural y la eficiencia de sus sistemas. Para abordar este desafío, se propone calcular el diseño necesario para implementar un sistema de protección catódica, ya sea mediante ánodos de sacrificio o corriente impresa, en el buque. Es importante destacar que este sistema de protección siempre se combina con el empleo de recubrimientos. La combinación de recubrimientos y protección catódica ofrece una defensa más robusta contra la corrosión, ya que los recubrimientos actúan como una barrera física, mientras que la protección catódica proporciona una defensa electroquímica. Esta sinergia ha demostrado ser eficaz en ambientes marinos agresivos, como se evidencia en estudios recientes que analizan la integración de sistemas de protección catódica por corriente impresa con recubrimientos conductores, mejorando significativamente la resistencia a la corrosión en estructuras expuestas al ambiente marino. [80] [81]

Además, el proyecto también implicará el **análisis de costos y la elaboración de un presupuesto** para la implementación del sistema de protección catódica. Se realiza la evaluación de los materiales necesarios, los procesos de instalación y mantenimiento, así como los recursos humanos requeridos.

## 5.2 BUQUE UTILIZADO EN EL ESTUDIO

**El Buque Hospital “Esperanza del Mar”** (*Figura 32*), propiedad del Instituto Social de la Marina, el cual depende del Ministerio de Inclusión, Seguridad Social y Migraciones, se encuentra adscrito a la Secretaría de Estado de Seguridad Social y Pensiones. Desempeña un papel crucial en la prestación de servicios médicos en áreas marítimas. Apoya a la flota pesquera española y, desde el 2017, opera en la campaña del bonito junto al buque Juan de la Cosa en el Atlántico norte y el Golfo de Vizcaya.

El buque ha sido diseñado desde cero para brindar servicios médicos de emergencia, apoyo logístico y operaciones de rescate a la flota pesquera. Su construcción se ha regido por rigurosos estándares de calidad, durabilidad y bajo mantenimiento, con el objetivo de maximizar el tiempo en navegación y operar en condiciones climáticas extremas, a gran distancia de la costa y durante largos períodos de tiempo.



*Figura 32. Buque Hospital Esperanza del Mar.* Fuente: Elaboración propia  
Para este estudio, se enfocamos en destacar algunas de las características del buque que resultan relevantes, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Características generales "Esperanza del Mar" Fuente: Elaboración propia.

**Esperanza del Mar**

<b>Armador</b>	Instituto Social de la Marina (ISM)
<b>Fecha de construcción (Quilla)</b>	05/05/2000
<b>Puerto base</b>	Las Palmas de Gran Canaria
<b>Clase de buque</b>	Sanitario de salvamento y asistencia marítima (SSAM)
<b>Nº IMO</b>	9220536
<b>Indicativo</b>	EBUQ
<b>MMSI</b>	224731000
<b>Eslora total</b>	97,83 m
<b>Manga de trazado</b>	17,17 m
<b>Puntal</b>	10,40 m
<b>Calado medio</b>	4,30 m
<b>Peso en rosca (muerto)</b>	2722,9 T
<b>Desplazamiento</b>	4000 T
<b>Arqueo Bruto</b>	4983 GT
<b>Arqueo Neto</b>	1495 NT
<b>Potencia (100% MCR)</b>	2x2700 KW a 750 rpm
<b>Velocidad máxima</b>	12 nudos
<b>Autonomía</b>	6.000 millas

En el **Anexo 1** se incluye el plano de varada del buque, el cual resulta de gran utilidad para la planificación de la puesta en dique seco. Este documento facilita la correcta disposición de los apoyos del casco, y permite una mejor organización de los trabajos, especialmente en lo referente a la instalación de los ánodos de protección catódica en las zonas más comprometidas de la obra viva.

A continuación, y a partir de estos datos, se procede a realizar un cálculo adecuado del número y tipo de ánodos de sacrificio necesarios, con el objetivo de garantizar una protección eficaz contra la corrosión en el casco del buque. Este cálculo tiene en cuenta las condiciones de operación, la superficie sumergida y el periodo de protección requerido, permitiendo así dimensionar correctamente el sistema de protección catódica.

### 5.3 ÁNODOS DE SACRIFICIO

En el siguiente apartado se procederá al cálculo de los ánodos de sacrificio necesarios para garantizar la protección catódica del buque objeto de estudio.

#### 5.3.1 CONSIDERACIONES BÁSICAS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO

Uno de los principios fundamentales en el diseño de sistemas de protección catódica mediante ánodos de sacrificio es la aplicación de la Ley de Ohm (*Ecuación 5*), la cual permite establecer la relación entre el potencial, la corriente y la resistencia en el circuito electroquímico de protección. La cual, establece que la corriente eléctrica ( $I$ ) depende de la diferencia de potencial ( $E$ ) entre ánodo y cátodo, y de la resistencia total del circuito al paso de la corriente, ( $R$ ). Inicialmente, la corriente es elevada debido al alto potencial entre ambos, pero disminuye progresivamente por la polarización del cátodo. La resistencia predominante en este sistema suele ser la del contacto entre el ánodo y el agua de mar, ya que la del metal o los cables se considera despreciable en la mayoría de las aplicaciones.

$$I = E/R \quad (5)$$

Donde:

$I$  = *Flujo de corriente en amperios (A)*

$E$  = *Diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo en voltios (V)*

$$R = \text{Resistencia total del circuito en ohmios } (\Omega)$$

El diseño de los ánodos requiere equilibrio entre forma, superficie y peso. Los ánodos más largos y delgados ofrecen menor resistencia eléctrica, lo que permite proteger una mayor superficie del casco, aunque su vida útil es más corta. En cambio, los ánodos más pesados, con mayor sección transversal, son más eficaces, pues proporcionan corriente durante más tiempo. En resumen, la longitud del ánodo determina su capacidad para proteger superficie, mientras que el peso define su durabilidad. Estas consideraciones son esenciales al dimensionar el sistema de protección catódica de un buque, garantizando una defensa eficaz contra la corrosión durante su operatividad.

A continuación, se procederá a determinar el número y las características de los ánodos de sacrificio requeridos, aplicando los datos técnicos del buque y los principios básicos del diseño de sistemas de protección catódica.

### 5.3.2 CÁLCULO DE LOS ÁNODOS NECESARIOS PARA LA PROTECCIÓN CATÓDICA DEL CASCO

En este apartado se procederá a calcular el número de ánodos requeridos para la protección catódica del casco del buque. Para ello, es fundamental considerar diversos factores estructurales que influirán en la intensidad de corriente necesaria para garantizar una protección efectiva. Una vez obtenida dicha intensidad, se podrá determinar la cantidad y características de los ánodos a instalar.

El primer paso en este proceso consiste en calcular la superficie mojada del casco del buque, ya que ésta determinará el área total expuesta al medio marino que requiere protección. [87]

Para calcular la superficie mojada del casco, se utiliza una fórmula estimativa basada en las dimensiones principales del buque (*Ecuación 6*). Esta fórmula contempla tanto la superficie lateral del casco como la del fondo. El cálculo se realiza en dos partes:

- Se multiplica  $1.8 \times$  eslora entre perpendiculares ( $L_{pp}$ )  $\times$  calado ( $T$ ), lo que representa una estimación de la superficie lateral sumergida.
- A este valor se suma el resultado de  $L_{pp} \times$  coeficiente de bloque ( $C_b$ )  $\times$  manga ( $B$ ), que aproxima la superficie del fondo del casco.

De esta forma, la expresión final queda como: [87]

$$Sm = (1,8 \cdot L_{pp} \cdot T) + (L_{pp} \cdot C_B \cdot B) \quad (6)$$

Donde:

$Sm$  = Superficie mojada ( $m^2$ )

$L_{pp}$  = Eslora entre perpendiculares (m)

$T$  = Calado (m)

$B$  = Manga (m)

$C_b$  = Coeficiente de bloque (adimensional)

Para justificar el valor del coeficiente de bloque ( $C_b$ ) en el caso del buque hospital Esperanza del Mar, es pertinente consultar tablas orientativas que proporcionan valores típicos de  $C_b$  según el tipo de embarcación. Estas tablas sirven como referencia para estimar el  $C_b$  sin realizar cálculos detallados. [82]

A continuación, se muestra una tabla orientativa (*Tabla 2*) con valores típicos del coeficiente de bloque ( $C_b$ ) y para diferentes tipos de buques. Estos valores son útiles para estimar el  $C_b$ , sin realizar cálculos detallados, y sirven como referencia para el diseño y análisis de embarcaciones.

Tabla 2. Coeficiente de bloque dependiendo del tipo de buque Fuente: [82]

<b>Tipo de buque</b>	<b>Coeficiente de bloque (Cb)</b>
Granelero	0,900
VLCC	0,842
Petrolero de 76.000 TPM	0,802
Petrolero 35.000 TPM	0,757
Buque de suministro offshore	0,650
Barco mercante	0,600
Remolcador de puerto	0,850
Portaaviones	0,578
Ro-Ro	0,568
Crucero	0,510

Dado que el Esperanza del Mar es un buque hospital, su diseño y dimensiones pueden compartir características con los barcos offshore por su forma del casco. Por lo tanto, un valor de Cb de 0,65 (adimensional) es una estimación razonable para este tipo de embarcación.

Una vez determinado el valor de Cb, y conocidas las dimensiones principales del buque, se pueden introducir estos datos en la Ecuación 6 para obtener una estimación de la superficie mojada.

Se parte de las dimensiones principales del mismo: eslora entre perpendiculares (Lpp) de 85 metros, manga (B) de 17,7 metros y calado (T) de 4,5 metros. Además, se considera un coeficiente de bloque (Cb) de 0,65, valor adimensional que refleja la forma del casco. Con estos datos, se puede proceder al cálculo de la superficie mojada y, posteriormente, al dimensionamiento del sistema de protección mediante ánodos de sacrificio.

$$Sm = (1,8 \cdot 85 \cdot 4,5) + (85 \cdot 0,65 \cdot 17,7) = 1666,42 \text{ m}^2 \quad (6)$$

$$Sm = 1666,42 \text{ m}^2 \sim 1667 \text{ m}^2$$

Por tanto, con los datos disponibles y aplicando métodos de estimación aceptados en la ingeniería naval, se obtiene que la superficie mojada aproximada del casco del buque Esperanza del Mar es de **1.667 m<sup>2</sup>**.

Para dimensionar correctamente el sistema de protección catódica, es necesario calcular la intensidad de corriente requerida ( $Ir$ ) que asegure la protección del casco frente a la corrosión. Para ello, se utiliza la Ecuación 7: [87]

$$Ir = \frac{(Sm \cdot J)}{100} \quad (7)$$

Donde:

$Ir$  = intensidad de corriente requerida en amperios (A)

$Sm$  = superficie mojada del casco en metros cuadrados (m<sup>2</sup>)

$J$  = densidad de corriente en miliamperios por metro cuadrado (mA/m<sup>2</sup>).

Este cálculo permite estimar cuánta corriente debe entregar el sistema de ánodos para mantener el potencial electroquímico del acero por debajo del umbral de corrosión. La densidad de corriente ( $J$ ) se selecciona en función del entorno marino, y el tipo de recubrimiento del casco. Una vez obtenida la intensidad requerida, se podrá determinar la cantidad, tamaño y disposición óptima de los ánodos de sacrificio.

Para determinar la densidad de corriente adecuada del buque hospital, es esencial considerar tanto el tipo de embarcación como su antigüedad y el estado del recubrimiento del casco. Dado que este buque fue construido en 2001, y ha estado en servicio durante más de dos décadas, es razonable asumir cierto grado de deterioro en su recubrimiento.

Según la norma **ABS – Guidance Notes on Cathodic Protection of Ships** (2017), para cascos revestidos en buques con velocidades normales de operación (entre 1 y 10 nudos), se recomienda utilizar valores de densidad de

corriente que oscilan entre 11 y 28 mA/m<sup>2</sup>, en función del desgaste del recubrimiento y las condiciones operativas del buque. [83]

Además, la norma **ISO 16222:2012**, sobre protección catódica de estructuras marinas, establece que este valor debe ajustarse según parámetros como el estado del recubrimiento, la temperatura del agua y la velocidad de desplazamiento. [84]

Basándome en estas recomendaciones normativas y considerando que el Esperanza del Mar puede presentar un grado moderado de deterioro en el recubrimiento de su casco, se adopta un valor intermedio y conservador de  $J$  de 20 mA/m<sup>2</sup>, como densidad de corriente de diseño. Esta elección garantiza un nivel adecuado de protección frente a la corrosión, sin sobredimensionar innecesariamente el sistema de ánodos de sacrificio. Y con la superficie mojada obtenida anteriormente de 1667 m<sup>2</sup>, sustituyendo los valores de la Ecuación 7:

$$Ir = \frac{(1667 \text{ m}^2 \cdot 20 \text{ mA/m}^2)}{100} = 33,34 \text{ A} \quad (7)$$

$$Ir = 33,34 \text{ A}$$

A partir de este dato, se podrá dimensionar el número, forma y peso de los ánodos necesarios.

El cálculo del peso total de los ánodos se realiza utilizando la siguiente fórmula (Ecuación 8): [80]

$$P = \frac{(Ir \cdot Vu)}{Cm} \quad (8)$$

Donde:

$P$  = peso total de los ánodos en kilogramos (kg)

$Ir$  = intensidad requerida (A)

$Vu$  = vida útil deseada (h en 1año)

$C_m$  = capacidad electroquímica del material del ánodo (A · h/kg)

En este caso, se ha seleccionado zinc como material de los ánodos de sacrificio. La capacidad electroquímica del zinc varía entre 740 y 780 A·h/kg, por lo que se adopta un valor promedio de 760 A·h/kg (Ecuación 9). Este valor está especificado en la ficha técnica del ánodo, que se adjunta en el **Anexo 2** del presente trabajo.

$$C_m = (740 + 780) / 2 = 760 \text{ A} \cdot \text{h/kg} \quad (9)$$

Sustituyendo en la Ecuación 8:

$$P = \frac{(33,34 \text{ A} \cdot 8760 \text{ h})}{760 \text{ A} \cdot \text{h/Kg}} = 384,98 \text{ Kg} \quad (8)$$

**Peso del ánodo = 384,98 Kg ~ 385kg**

Por tanto, el peso total estimado de ánodos de zinc necesario para un año de protección del casco es de aproximadamente **385 kg**. Este valor permitirá dimensionar el número de ánodos, su disposición y distribución a lo largo del casco.

Para dimensionar el número de ánodos, se adopta como referencia un modelo estándar de ánodo de 10 kg (*Ecuación 10*), ampliamente utilizado en buques de tamaño medio. Por tanto:

Número de Ánodos:

$$N = \frac{P}{P_u} = \frac{385 \text{ Kg}}{10 \text{ Kg}} = 38,5 \text{ Ánodos} \quad (10)$$

**38,5 Ánodos ~ 40 Ánodos**

Es importante destacar que, aunque se utilice este valor como base de cálculo, en la práctica, los ánodos instalados no son todos iguales. La elección del tipo y peso de cada ánodo varía en función de la zona del casco que se desea proteger:

- En zonas amplias del casco como quilla, costados y fondo, se emplean ánodos de mayor tamaño, normalmente de 10 kg o incluso superiores.
- En áreas localizadas y más sensibles, como timones, ejes, hélices, tomas de mar, y aletas estabilizadoras, se instalan ánodos más pequeños y específicos para esas formas y necesidades.

Por tanto, si bien el cálculo se basa en un modelo genérico, el diseño final del sistema debe adaptarse a la geometría y características específicas del buque, asegurando una distribución uniforme de la protección y un rendimiento óptimo del sistema a lo largo del tiempo.

En el diseño del sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio para el buque hospital Esperanza del Mar, se ha determinado la necesidad de instalar un total de **40 ánodos de sacrificio de zinc**. Esta decisión se basa en cálculos previos que establecieron una corriente de protección requerida de 33,34 A y un peso total de ánodos de aproximadamente 385 kg para una vida útil de un año. Se ha optado por utilizar ánodos de 10 kg cada uno, lo que resulta en la instalación de 40 unidades.

### 5.3.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS ÁNODOS

Para asegurar una protección eficaz y uniforme del casco y sus componentes, se ha planificado la instalación de 20 ánodos en cada banda del buque. La distribución específica se ha diseñado considerando las áreas más susceptibles a la corrosión y aquellas que requieren una protección adicional debido a su función o exposición al medio marino. La asignación es la siguiente:

► Palas de los timones (*Figura 33*): 10 ánodos



Figura 33. Palas del timón. Fuente: Elaboración propia.

► Aletas estabilizadoras (*Figura 34*): 8 ánodos

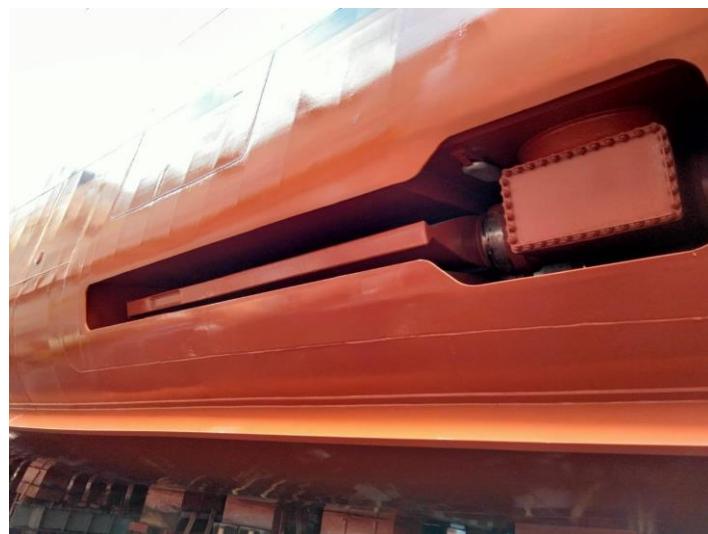


Figura 34. Aletas estabilizadoras. Fuente: Elaboración propia.

- Tomas de mar (Figura 35): 6 ánodos



Figura 35. Tomas de mar. Fuente: Elaboración propia.

- Hélice de proa (Figura 36): 6 ánodos + 2 ánodos en el cuerpo de la hélice.



Figura 36. Cuerpo hélice de proa. Fuente: Elaboración propia.

Esta distribución suma un total de 32 ánodos. Los 8 ánodos restantes se asignarán a otras áreas críticas del casco que requieran protección adicional, como la quilla, las zonas de alta turbulencia y otras estructuras metálicas expuestas.

#### 5.3.4 SELECCIÓN DE LOS ÁNODOS

Se ha seleccionado la marca *BERA*, modelos *Z-20PD* y *Z-20PS* [85], para la fabricación de los ánodos. La principal diferencia entre estos dos modelos radica en el tipo de fijación. Ambos modelos cumplen con las normas internacionales de calidad y eficiencia para ánodos de sacrificio de zinc, garantizando una protección efectiva contra la corrosión. Las especificaciones técnicas detalladas de estos ánodos se encuentran en la ficha técnica adjunta en el **Anexo 2** de este trabajo.

#### 5.3.5 CONSIDERACIONES ADICIONALES

Es importante destacar que, en la práctica, la instalación de ánodos debe evitar áreas donde puedan generar problemas de cavitación, especialmente cerca de la hélice y otras zonas de alta turbulencia. Por ello, la ubicación precisa de cada ánodo se determinará en función de un análisis detallado del flujo de agua alrededor del casco y de las recomendaciones del fabricante.

Además, se debe considerar que la eficiencia de los ánodos puede verse afectada por factores como la temperatura del agua, la salinidad y la velocidad del buque. Por lo tanto, se recomienda realizar inspecciones periódicas y ajustes en la distribución de los ánodos, según las condiciones operativas reales del buque Esperanza del Mar. [86]

En resumen, la selección y distribución de los ánodos *BERA Z-20PD* y *Z-20PS* proporcionarán una protección catódica adecuada al buque hospital Esperanza del Mar, extendiendo la vida útil de su casco y componentes

sumergidos, y garantizando su operatividad en condiciones marinas exigentes. [85]

### 5.3.6 COSTES DE LA UTILIZACIÓN DE ÁNODOS DE SACRIFICIO

Para implementar un sistema de protección catódica con ánodos de sacrificio en el buque Esperanza del Mar, se estima un coste total aproximado de **3.000 €**, considerando tanto los materiales como la mano de obra, detallado a continuación.

#### Materiales:

- Ánodos de sacrificio: Se requieren 40 unidades, con un precio unitario de aproximadamente 45 €, lo que suma **1.800 €** (*Ecuación 11*).

$$40 \text{ Ánodos} \cdot 45 \text{ €/Ánodo} = 1800\text{€} \quad (11)$$

- Costes adicionales: Incluyen materiales auxiliares y posibles gastos imprevistos, estimados en **1.000 €**.

#### Mano de obra:

- Instalación: Cada ánodo requiere alrededor de 20 minutos de trabajo especializado. Con una tarifa promedio de 15 €/h (*Ecuación 12*), el coste por ánodo es de 5 €, totalizando 200 € para los 40 ánodos (*Ecuación 13*).

$$\frac{15 \text{ €/h} \cdot 20 \text{ min}}{60 \text{ min}} = 5 \text{ €} \quad (12)$$

$$40 \text{ ánodos} \cdot 5 \text{ €} = 200\text{€} \text{ Mano de obra} \quad (13)$$

Los ánodos de sacrificio tienen una vida útil limitada, generalmente de 2 a 3 años, dependiendo de las condiciones operativas y ambientales. Esto implica que, a lo largo de la vida útil del buque (estimada en 15 años), será necesario reemplazarlos varias veces, incrementando los costes totales de mantenimiento (*Tabla 3*).

Tabla 3. Costes de la utilización de ánodos de sacrificio. Fuente: Elaboración propia.

Concepto	Frecuencia	Coste aproximado (€)
Material (ánodos)	Cada 2,5 años	1800
Mano de obra	Cada 2,5 años	200
Materiales auxiliares	Cada 2,5 años	500
Contingencias (10%)	Cada 2,5 años	250
Nº de reemplazos (15 años)	5 a 7 veces	-
<b>Coste total estimado en 15 años</b>		<b>16.250 - 22.050</b>

Esto supone un gasto anual aproximado que oscila entre los **230 €** y los **300 €**, en función de la frecuencia de reemplazo y las condiciones operativas del buque.

En conclusión, aunque la protección catódica mediante ánodos de sacrificio supone una inversión inicial moderada, los costes acumulados a lo largo de la vida útil del buque pueden ser significativos debido a la necesidad de reemplazo periódico, lo que convierte a este sistema en una opción eficaz, pero con un mantenimiento económico continuo, a considerar seriamente.

Por otro lado, también se contempla la posibilidad de emplear un sistema de protección catódica por corriente impresa (ICCP). La implementación de este sistema requiere una evaluación técnica y económica previa, así como un diseño específico que se adapte a las características estructurales y operativas del buque.

#### 5.4 CORRIENTES IMPRESAS

Para comprobar que un sistema de protección catódica funciona correctamente, es necesario medir el potencial eléctrico del acero del casco comparándolo con un electrodo de referencia, como el de plata/cloruro de

plata ( $Ag/AgCl$ ) en agua de mar, aunque en algunos casos también se usa uno de zinc.

Cuando el sistema está activo, la corriente que recibe el casco hace que su potencial se vuelva más negativo. La experiencia demuestra que si se alcanza un valor igual o inferior a -0,800 voltios frente al electrodo de  $Ag/AgCl$ , la corrosión se reduce considerablemente. [66]

#### 5.4.1 CÁLCULO DE LA CORRIENTE NECESARIA PARA LA PROTECCIÓN DEL CASCO DEL BUQUE

En el presente estudio se plantea un escenario en el que el buque no dispone de un sistema de protección catódica por corriente impresa instalado de en el astillero durante su construcción. Esto implica que será necesario adquirir e instalar tanto la unidad rectificadora como el sistema de control completo, para su implementación desde cero. A partir de este dato, se podrá seleccionar una unidad de control que se ajuste a los requisitos del buque.

Para dimensionar correctamente un sistema de protección catódica por corriente impresa, el primer paso fundamental es determinar la intensidad de corriente que debe suministrarse para proteger adecuadamente la obra viva del casco. Para ello usamos la Ecuación 7, previamente mencionada y utilizada en cálculos anteriores. Esta corriente dependerá principalmente de la superficie mojada a proteger y de la densidad de corriente seleccionada, tal como se definió en apartados anteriores.

$$Ir = \frac{(Sm \cdot J)}{100} \quad (7)$$

Donde:

$Ir$  = intensidad requerida ( $A$ )

$Sm$  = superficie mojada del buque ( $m^2$ )

$J$  = densidad de corriente ( $mA/m^2$ )

Aplicando la Ecuación 7 para el Esperanza del Mar, con una superficie mojada estimada de **1667 m<sup>2</sup>** y una densidad de corriente seleccionada de **20 mA/m<sup>2</sup>** (valor asumido según normativa DNV-RP-B401 [87], y considerando un buque en operación con revestimiento en buen estado), obtenemos:

$$Ir = \frac{(1667 \text{ m}^2 \cdot 20 \text{ mA/m}^2)}{100} = 33,34 \text{ A} \quad (7)$$

Sin embargo, dado que los sistemas de corriente impresa permiten un control preciso del flujo de corriente, y considerando posibles pérdidas o condiciones adversas (ensuciamiento del casco, daños en el recubrimiento, etc.), se añade un margen de seguridad del 25%, resultando en una corriente total de diseño de:

**33,34 A ~ 35 A**

Esta será la corriente nominal que debe suministrar el sistema rectificador para garantizar una protección efectiva del casco bajo distintas condiciones operativas.

#### 5.4.2 SELECCIÓN UNIDAD DE CONTROL

En este estudio se ha decidido implementar un sistema de protección catódica por corriente impresa (ICCP) mediante un equipo comercial de la marca **Lialco** (*Figura 37*), debido a su fiabilidad, precisión y eficacia demostradas en entornos marinos. Este tipo de sistemas permite una protección activa del casco del buque mediante el suministro controlado de corriente, ajustándose automáticamente en función de las condiciones ambientales y del estado de polarización del casco. [88]



Figura 37. LLALCO Fluid technology. Fuente: [88]

La elección de este equipo responde también a su amplia disponibilidad en el mercado, su soporte técnico especializado y su facilidad de instalación y operación. Además, al tratarse de una solución ya desarrollada comercialmente, se reduce notablemente el riesgo técnico de la implementación, garantizando el cumplimiento de las normativas internacionales y la durabilidad del sistema a lo largo del tiempo.

Además, la unidad Llalco está diseñada para adaptarse a diversas configuraciones de buques, permitiendo una instalación personalizada según las necesidades específicas del Esperanza del Mar. Su capacidad para monitorear y ajustar en tiempo real la corriente de protección garantiza una prolongación de la vida útil del casco y una disminución en los costos de mantenimiento a largo plazo. Para ampliar la información sobre el modelo de protección catódica implementado por la empresa Llalco, se puede consultar el **Anexo 3**.

#### 5.4.3 ESTIMACIÓN DE COSTOS PARA UNA UNIDAD DE 35 A

Para un sistema ICCP que requiera una corriente de aproximadamente 35 amperios, los costes pueden variar según el proveedor y las especificaciones exactas del equipo. Basándonos en datos disponibles, se puede estimar lo siguiente: [88]

 Unidad de control Llalco (35 A):

La unidad de control Llalco es el componente central del sistema ICCP, encargada de suministrar y regular la corriente continua necesaria para

proteger el casco del buque contra la corrosión. Para una capacidad de 35 amperios, el costo estimado de esta unidad se sitúa entre **12.000 € y 15.000 €**, dependiendo de las especificaciones técnicas y opciones adicionales seleccionadas.

 Ánodos de corriente impresa:

Los ánodos utilizados en sistemas ICCP son generalmente de titanio con recubrimiento de óxidos metálicos mixtos, diseñados para operar de manera eficiente en ambientes marinos. Para una capacidad total de 35 amperios, se requerirían aproximadamente de **4 a 6 ánodos**, con un costo unitario estimado entre **1.000 € y 2.000 €**, dependiendo del tamaño y diseño específico.

 Electrodos de referencia:

Los electrodos de referencia, comúnmente de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl), son esenciales para monitorear el potencial eléctrico del casco y permitir ajustes automáticos en la corriente suministrada. Se recomienda la instalación de al menos 2 electrodos, con un costo unitario aproximado de **800 € a 1.200 €**.

 Cableado y accesorios:

La instalación del sistema requiere cables marinos resistentes a la corrosión, bandejas portacables, pasamuros estancos y otros accesorios. El costo total de estos materiales se estima en **2.000 €**, aunque este valor puede variar según la complejidad de la instalación y la disposición del buque.

 Mano de obra:

La instalación del sistema ICCP debe ser realizada por personal especializado, incluyendo soldadores y electricistas navales. Se estima que la instalación completa requerirá aproximadamente 40 horas de trabajo, con una tarifa promedio de 25 €/h, lo que representa un costo total de **1.000 €**.

 Costos Adicionales:

Es fundamental tener en cuenta posibles costos adicionales relacionados con la adaptación de la infraestructura existente del buque, las pruebas de funcionamiento, certificaciones y otros gastos imprevistos. Estos aspectos pueden representar un porcentaje significativo del presupuesto total, por lo

que se recomienda asignar un margen del 10% al 15%. Para visualizar claramente esta estimación y su impacto en el costo global, consulte la Tabla 4, donde se detallan estos costos adicionales y su proporción respecto al presupuesto total.

Tabla 4. Costes de la utilización de corriente impresa. Fuente: Elaboración propia.

Concepto	Costo estimado (€)
Unidad de control (35 A)	12.000 - 15.000
Ánodos de corriente impresa	4.000 - 12.000
Electrodos de referencia	1.600 - 2.400
Cableado y accesorios	2000,000
Mano de obra	1000,000
<b>TOTAL ESTIMADO</b>	<b>20.600 - 32.400</b>

En resumen, la inversión total para implementar un sistema ICCP con una unidad de control Llaco de 35 A en el Esperanza del Mar se estima entre **20.600 € y 32.400 €**, dependiendo de las especificaciones técnicas y condiciones particulares de la instalación. Esta inversión se justifica por la prolongación de la vida útil del casco, la reducción de costos de mantenimiento a largo plazo y el cumplimiento de normativas internacionales de protección contra la corrosión.

Teniendo en cuenta que la vida útil del sistema ICCP será de aproximadamente 15 años, podemos calcular el coste promedio anual dividiendo el coste total de implementación entre los años de funcionamiento:

- Coste total mínimo estimado:  $20.600 \text{ €} \rightarrow 20.600 / 15 = 1.373 \text{ €/año}$
- Coste total máximo estimado:  $32.400 \text{ €} \rightarrow 32.400 / 15 = 2.160 \text{ €/año}$

Aplicando un margen de error del 10% para contemplar posibles desviaciones en los costes (mantenimiento, sustitución de elementos o ajustes técnicos),

se obtiene que los costes anuales aproximados oscilan entre los **1.235 €** y los **2.376 €**.

## 6 COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

En este apartado se realiza una comparación detallada entre los sistemas de protección catódica mediante ánodos de sacrificio y corriente impresa (ICCP). Se analizan las ventajas y limitaciones de cada método, evaluando aspectos operativos, económicos y de mantenimiento. El objetivo es ofrecer una visión clara que facilite la selección del sistema más adecuado según las condiciones específicas del buque y sus necesidades de protección.

### 6.1 VENTAJAS Y LIMITACIONES

En este apartado se presentarán los principales factores que permiten comparar los sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio y por corriente impresa (ICCP), centrándose en sus ventajas, limitaciones y condiciones de aplicación en entornos marinos.

#### Ánodo de Sacrificio (Tabla 5)

Tabla 5. Ventajas y limitaciones ánodos de sacrificio. Fuente: Elaboración propia.

#### Ánodos de Sacrificio

Ventajas	Limitaciones
<b>Instalación sencilla:</b> No requiere fuente de energía externa.	<b>Corriente limitada:</b> Ineficaces en ambientes de alta resistividad o estructuras grandes.
<b>Bajo mantenimiento:</b> Funcionan de forma pasiva y continua hasta su desgaste.	<b>Reemplazo periódico:</b> Necesitan ser sustituidos antes de agotarse.
<b>Costo inicial</b> Particularmente en pequeñas o medianas.	<b>moderado:</b> estructuras <b>Peso adicional:</b> Aumentan el peso estructural del buque.

**Distribución uniforme de corriente:** **Sin control activo:** No permiten Adecuada para estructuras bien ajustar la protección en función de revestidas. condiciones variables.

■ Sistemas de Corriente Impresa (ICCP) (Tabla 6)

Tabla 6. Ventajas y limitaciones corrientes impresas. Fuente: Elaboración propia.

**Sistemas de corriente impresa (ICCP)**

Ventajas	Limitaciones
<b>Control ajustable:</b> Permite regular la corriente según las necesidades específicas.	<b>Costo inicial elevado:</b> Requiere inversión en equipos y sistemas de control.
<b>Eficiencia en grandes estructuras:</b> Adecuado para buques de gran tamaño y ambientes de alta resistividad.	<b>Dependencia de energía externa:</b> Necesita una fuente de corriente continua.
<b>Menor necesidad de mantenimiento físico:</b> Los ánodos inertes tienen una vida útil prolongada.	<b>Mantenimiento especializado:</b> Requiere personal capacitado para su operación y mantenimiento.
<b>Monitoreo continuo:</b> Facilita la supervisión y ajustes en tiempo real.	<b>Riesgo de sobreprotección:</b> Si no se ajusta correctamente, puede dañar los recubrimientos del casco.

## 6.2 COMPARATIVA OPERACIONAL

En esta sección se realiza una comparativa operacional entre los sistemas de protección catódica mediante ánodos de sacrificio y corrientes impresas, evaluando sus características clave en diferentes aspectos. Se analizará el principio de funcionamiento de ambos métodos, su eficiencia para prevenir la corrosión, y los requerimientos de mantenimiento y operación. Asimismo, se examinarán los costos asociados, la adaptabilidad y el control que ofrecen en aplicaciones navales, así como las implicaciones ambientales de cada sistema. Este análisis permitirá identificar las ventajas y limitaciones de cada tecnología para seleccionar la opción más adecuada según las condiciones específicas del buque y su entorno.

### 6.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio funcionan mediante la instalación de metales más reactivos que el acero del casco, como el zinc, el magnesio o el aluminio. Estos materiales, al estar conectados eléctricamente al casco, se corroen en lugar del propio acero, actuando como una barrera de protección pasiva frente a la corrosión. Esta técnica es sencilla, efectiva y ampliamente utilizada, especialmente en embarcaciones que no requieren ajustes continuos del sistema.

En contraste, los sistemas de corriente impresa (ICCP) emplean una fuente externa de corriente continua que transfiere electrones al casco a través de ánodos inertes, generalmente fabricados en titanio recubierto con óxidos metálicos. Este suministro controlado de corriente permite mantener el potencial eléctrico del casco dentro de los márgenes óptimos para prevenir la corrosión, proporcionando así una protección activa y ajustable según las condiciones operativas y ambientales.

### 6.2.2 EFICIENCIA DE PROTECCIÓN

Los ánodos de sacrificio resultan especialmente adecuados para buques o estructuras de tamaño pequeño a mediano, así como para ambientes marinos donde la resistividad del agua es baja. En estas condiciones, su eficiencia es aceptable y proporcionan una protección pasiva efectiva. No obstante, su rendimiento se ve limitado cuando se trata de proteger estructuras de gran envergadura o aquellas expuestas a entornos con alta resistividad, donde la corriente generada por los ánodos no es suficiente para mantener una protección adecuada en toda la superficie.

Por otro lado, los sistemas de corriente impresa (ICCP) están diseñados para superar esas limitaciones, ya que permiten ajustar la cantidad de corriente suministrada en función de las necesidades del buque. Esto los hace especialmente eficaces para proteger estructuras grandes y en entornos

exigentes, como aquellos con alta resistividad. Además, ofrecen una protección más uniforme y controlada, garantizando que toda la superficie sumergida mantenga un potencial adecuado para prevenir la corrosión.

#### 6.2.3 MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

En cuanto a las necesidades de mantenimiento, los ánodos de sacrificio presentan una operativa sencilla, pero su naturaleza consumible implica reemplazos periódicos a lo largo de la vida útil del buque. Esta necesidad recurrente puede traducirse en mayores costes operativos acumulados con el tiempo, especialmente si se requieren varadas frecuentes para su sustitución.

Por otro lado, los sistemas de corriente impresa (ICCP) requieren un mantenimiento más técnico, centrado en la supervisión de la unidad de control, conexiones eléctricas y componentes electrónicos. No obstante, una de sus principales ventajas es que los ánodos inertes utilizados tienen una vida útil mucho más prolongada, lo que disminuye la frecuencia de intervención y puede suponer un ahorro significativo en mantenimiento a largo plazo.

#### 6.2.4 COSTOS OPERACIONALES

Aunque la inversión inicial en ánodos de sacrificio es menor en comparación con sistemas de corriente impresa (ICCP), los costes acumulativos a largo plazo pueden ser superiores debido a la necesidad de reemplazos periódicos y mantenimiento adicional. Además, los sistemas ICCP ofrecen una protección más constante y ajustable, lo que puede resultar en una mayor eficiencia y menor riesgo de corrosión en el casco del buque.

En resumen, mientras que los ánodos de sacrificio representan una opción más económica a corto plazo, es esencial considerar los costes a largo plazo

y la eficacia del sistema al elegir el método de protección catódica más adecuado para el Esperanza del Mar.

#### 6.2.5 ADAPTABILIDAD Y CONTROL

Desde el punto de vista operativo, la capacidad de control es una de las principales diferencias entre ambos sistemas. Los ánodos de sacrificio proporcionan una protección pasiva y constante, sin posibilidad de regulación una vez que han sido instalados. Esto significa que su rendimiento depende de condiciones previamente estimadas, sin adaptarse fácilmente a cambios en el entorno o en el estado del casco a lo largo del tiempo.

En cambio, los sistemas de corriente impresa (ICCP) destacan por su flexibilidad, ya que permiten ajustar la intensidad de corriente en función de las condiciones reales de operación y del entorno marino. Este control activo asegura una protección más eficiente y personalizada, optimizando el rendimiento del sistema y prolongando la vida útil de la estructura protegida, especialmente útil en buques con variaciones de carga, ruta o uso intensivo.

#### 6.2.6 CONSIDERACIONES AMBIENTALES

En términos medioambientales, los sistemas de protección catódica también presentan diferencias relevantes. En el caso de los ánodos de sacrificio, su funcionamiento implica la degradación progresiva del metal que los compone, como zinc o aluminio, lo que conlleva la liberación de partículas metálicas al medio marino. Estos residuos, aunque en pequeñas cantidades, pueden acumularse con el tiempo y suponer un impacto ambiental dependiendo del tipo y cantidad de metal utilizado. Según Vignesh y Sathiya [65], la liberación continua de iones metálicos, especialmente zinc, puede afectar la calidad del agua y la vida marina, por lo que es necesario evaluar y gestionar estos impactos en función del tipo de ánodo empleado y el entorno específico donde se aplique la protección catódica.

Por otro lado, los sistemas de corriente impresa (ICCP) emplean ánodos inertes, que no se consumen durante su funcionamiento. Esto no sólo garantiza una mayor durabilidad, sino que también reduce significativamente la generación de residuos metálicos en el entorno marino. Por este motivo, se consideran una opción más sostenible y respetuosa con el medio ambiente, especialmente en buques que operan de forma intensiva o en zonas ecológicamente sensibles.

## 7 CONCLUSIONES

A lo largo de este estudio se ha llevado a cabo un análisis detallado sobre los sistemas de protección catódica aplicables al buque hospital Esperanza del Mar, valorando tanto el método tradicional, mediante ánodos de sacrificio como la alternativa basada en corrientes impresas (ICCP). La elección de uno u otro sistema depende de múltiples factores operativos, estructurales, económicos y medioambientales, todos ellos analizados con base técnica en este trabajo. A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes obtenidas en el trabajo:

Los **ánodos de sacrificio** presentan una solución sencilla, de bajo coste inicial y fácil implementación, especialmente adecuada para embarcaciones de tamaño reducido o mediano que operan en condiciones moderadas. Sin embargo, sus limitaciones en cuanto a capacidad de protección para estructuras más extensas, su falta de ajuste dinámico y la necesidad de reposiciones periódicas pueden suponer un incremento en los costes de mantenimiento a largo plazo, así como una mayor generación de residuos metálicos en el entorno marino.

Los **sistemas ICCP** ofrecen una protección activa y ajustable, que permite un control más preciso del potencial del casco incluso en condiciones adversas o en estructuras de gran superficie. Aunque su instalación requiere una inversión inicial considerable y un mantenimiento técnico más especializado, la mayor durabilidad de sus componentes y la posibilidad de monitorización en tiempo real lo convierten en una opción muy eficiente a largo plazo, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental.

En conclusión, para el buque Esperanza del Mar, que cuenta con una estructura de dimensiones considerables y opera en entornos exigentes, la implementación de un sistema de corriente impresa representa una opción más robusta, eficiente y sostenible en el tiempo.

Además, cabe señalar que no necesariamente es preciso decantarse por un único sistema de protección catódica. En determinadas aplicaciones, especialmente en buques con alta responsabilidad operativa como el Esperanza del Mar, es posible, e incluso recomendable, combinar ambos métodos: los ánodos de sacrificio y el sistema de corriente impresa.

Esta combinación se utiliza en algunas embarcaciones para reforzar la fiabilidad del sistema. Los ánodos de sacrificio actúan como una protección de respaldo en caso de fallo del sistema ICCP (por ejemplo, por una interrupción en la alimentación eléctrica o un mal funcionamiento del controlador). A su vez, el sistema ICCP puede configurarse para suministrar niveles más moderados de corriente, reduciendo así el desgaste prematuro de los ánodos de sacrificio y extendiendo su vida útil, lo que optimiza los costes de mantenimiento y reduce residuos.

Esta solución híbrida, no sólo garantiza una mayor redundancia y seguridad frente a fallos, sino que también permite adaptar el nivel de protección a distintas zonas del casco con diferentes necesidades. Por ejemplo, áreas de mayor turbulencia o expuestas a condiciones extremas (hélices, tomas de mar, timones) podrían beneficiarse de esta doble protección.

Por tanto, la implementación simultánea de ambos sistemas puede considerarse una estrategia óptima en términos de seguridad, eficiencia operativa y durabilidad de la estructura, especialmente en un buque como el Esperanza del Mar, cuya operatividad y disponibilidad continua son prioritarias.

Por último, en cuanto a los costes, la **estimación económica** calculada en este trabajo refleja diferencias importantes entre los sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio y por corriente impresa. Los ánodos de sacrificio suponen un coste total acumulado estimado entre 16.250 y 22.050 € a lo largo de 15 años, debido a la necesidad de reemplazo periódico cada 2,5 años y a gastos asociados como mano de obra y materiales auxiliares. En cambio, el sistema de corriente impresa requiere una inversión inicial mayor,

con un rango de entre 20.600 y 32.400 €, aunque sus componentes presentan una mayor durabilidad y menores necesidades de sustitución, lo que puede traducirse en ahorro a largo plazo. La elección entre ambos sistemas debe basarse en una evaluación del ciclo de vida completo, considerando tanto la inversión inicial como el mantenimiento operativo.

## 8 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

La protección catódica en buques es un campo en constante evolución, donde los avances tecnológicos y las exigencias de sostenibilidad impulsan nuevas posibilidades de investigación. A continuación, se presentan algunas líneas futuras de investigación que podrían mejorar la operatividad de los buques y optimizar los costes para las empresas navieras, proponiendo diferentes enfoques para poder abordarlas.

### **1. Desarrollo de Nuevos Materiales para Ánodos con Mayor Durabilidad**

Una de las principales líneas de investigación consiste en desarrollar nuevos materiales o aleaciones para los ánodos que prolonguen su vida útil y reduzcan la necesidad de reemplazos frecuentes. Las aleaciones avanzadas de aluminio o zinc con recubrimientos especiales podrían ofrecer una mayor resistencia a la corrosión sin incrementar los costes significativamente. [89]

#### **Enfoque:**

- Realizar ensayos de laboratorio con aleaciones innovadoras en condiciones marinas controladas.
- Implementar prototipos en buques de prueba para evaluar su rendimiento en condiciones reales.
- Analizar el ciclo de vida de los nuevos materiales frente a los actuales para determinar su viabilidad económica.

### **2. Implementación de Sensores para el Monitoreo en Tiempo Real**

La instalación de sensores inteligentes podría proporcionar datos en tiempo real sobre el estado de los sistemas de protección catódica. Esto permitiría una detección temprana de fallos o desgaste excesivo de los ánodos, optimizando las operaciones de mantenimiento. [90]

#### **Enfoque:**

- Desarrollar sensores que midan la intensidad de corriente y el potencial eléctrico.
- Integrar una plataforma digital para recopilar y analizar los datos.
- Programar alertas automáticas que indiquen la necesidad de intervención o reemplazo.

### **3. Modelado Predictivo mediante Inteligencia Artificial (IA)**

La IA puede ser utilizada para crear modelos predictivos que anticipen el desgaste de los ánodos o las zonas propensas a la corrosión, permitiendo a las navieras planificar mantenimientos preventivos de manera más eficiente.

[91]

#### **Enfoque:**

- Recopilar datos históricos de desgaste y corrosión.
- Desarrollar algoritmos de aprendizaje automático que predigan la vida útil restante de los ánodos.
- Integrar el modelo predictivo con los sistemas de gestión de mantenimiento del buque.

### **4. Evaluación del Impacto del Cambio Climático en la Corrosión Marina**

El aumento de la temperatura de los océanos y los cambios en la composición química del agua podrían afectar la efectividad de los sistemas de protección catódica. Investigar cómo estos factores influyen en los mecanismos de corrosión será clave para adaptar futuras estrategias de protección. [92]

#### **Enfoque:**

- Realizar simulaciones de los efectos del aumento de la temperatura y la salinidad.
- Ajustar las densidades de corriente recomendadas en función de estos cambios.

- Desarrollar ánodos adaptados a nuevas condiciones ambientales.

## 9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Schweitzer, P. A. (2010). **Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods** (1st ed.). CRC Press.
2. ECCA. (2011). **The basics of corrosion** [Technical paper]. European Coil Coating Association  
<http://www.prepaintedmetal.eu/repository/Annina/Basic%20of%20corrosion%20021211.pdf>
3. International Organization for Standardization. (2024). **ISO 8044:2024 – Corrosion of metals and alloys — Vocabulary** (6<sup>a</sup> ed.). ISO.  
<https://www.iso.org/standard/83222.html>
4. González Fernández, J. A. (2007). **Control de la corrosión: Estudio y medida por técnicas electroquímicas**. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).
5. Gómez de León Hijes, F. C., & Alcaraz Lorente, D. J. (s.f.). **Manual básico de corrosión para ingenieros**. Marcombo.
6. Salazar-Jiménez, J. A. (2015). **Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales** (Nota técnica). *Tecnología en Marcha*, 28(3), 127–137.  
<https://doi.org/10.18845/tm.v28i3.2417>
7. Wikiwand. (s.f.). **Celda galvánica**  
[https://www.wikiwand.com/es/articles/Celda\\_galv%C3%A1nica](https://www.wikiwand.com/es/articles/Celda_galv%C3%A1nica)
8. Bilurbina Alter, L., Liesa Mestres, F., & Iribarren Laco, J. I. (2003). **Corrosión y protección**. Ediciones de la Universidad Politécnica de Cataluña.
9. Liu, C., Srinivasan, J., & Kelly, R. G. (2021). **Analysis of galvanic corrosion current between an aluminum alloy and stainless-steel exposed to an equilibrated droplet electrolyte**. *Journal of The Electrochemical Society*, 168(4), 041507. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abf5a7>

10. Liu, C., Srinivasan, J., & Kelly, R. G. (2021). **Analysis of galvanic corrosion current between an aluminum alloy and stainless steel exposed to an equilibrated droplet electrolyte**. Journal of The Electrochemical Society, 168(4), 041507. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abf5a7>
11. Ing. Marítima. (2017, marzo). **La corrosión**. <https://ingmaritima.blogspot.com/2017/03/la-corrosion.html>
12. Área Metalurgia. (2023). **Tipos de corrosión que ocurren en sistemas de tuberías industriales**. <https://www.areametalurgia.com/post/tipos-de-corrosi%C3%B3n-que-ocurren-en-sistemas-de-tuber%C3%ADas-industriales>
13. Swagelok. (s.f.). **Pitting corrosion vs. crevice corrosion: What's the difference?** <https://www.swagelok.com/en/blog/pitting-vs-crevice-corrosion>
14. TubingChina. (s.f.). **Intergranular corrosion**. Recuperado de <https://tubinqchina.com/Intergranular-Corrosion.htm>
15. Universitat Politècnica de València. (s.f.). **Corrosión intergranular**. [http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/pfcm12\\_4\\_10.html](http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/pfcm12_4_10.html)
16. Biezma, M. V., Strobl, S., Linhardt, P., Ball, G., & Haubner, R. (2023). **Dezincification in cast and heat-treated alpha-beta brass samples**. Practical Metallography, 60(9), 632–642.
17. Li, D., Li, K., Gao, J., Liu, Y., Qin, C., Li, J., Li, Y., Cao, W., Zhai, Y., & Huang, G. (2023). **Stress corrosion cracking of copper–nickel alloys**. Coatings, 13(10), 1690. <https://doi.org/10.3390/coatings13101690>
18. Federal Highway Administration. (2020). **Steel truss retrofits to provide alternate load paths for cut, blast-damaged, or destroyed members** (Report No. FHWA-HRT-20-055). U.S. Department of Transportation.
19. Briz, B., Biezma, M. V., & Bastidas, D. M. (2018). **Stress corrosion cracking of new 2001 lean–duplex stainless-steel reinforcements**

- in chloride contained concrete pore solution:** An electrochemical study. *Construction and Building Materials*, 183, 554–565. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.131>
- 20.. Calderón-Urízar-Aldaca, I., Briz, E., Matanza, A., Martín, U., & Bastidas, D. M. (2020). **Corrosion fatigue numerical model for austenitic and lean-duplex stainless steel rebars exposed to marine environments.** *Metals*, 10(9), 1217. <https://doi.org/10.3390/met10091217>
21. Calderón Urízar-Aldaca, I. (2014). **Fatiga de elementos estructurales por acciones dinámicas aleatorias en medio ambiente agresivo** (Tesis doctoral, Universidad de Cantabria). Repositorio institucional de la Universidad de Cantabria.
22. Técnica Industrial. (s.f.). **Teorías de daño acumulativo en la fatiga.** <https://www.tecnicaindustrial.es/teorias-de-dano-acumulativo-en-la-fatiga/>
23. Armoloy. (s.f.). **Diagnosing erosive vs. corrosive metal failure.** <https://armoloy.com/diagnosing-erosive-vs-corrosive-metal-failure/>
24. Rao, P. S., & Rajendran, N. (2023). **Erosion–corrosion of materials in industrial equipment.** *ChemElectroChem*, 10(11), e202300152. <https://doi.org/10.1002/celc.202300152>
25. Barracó Serra, M., Adrià Casas, M. A., Torres, R., & Surià Lladó, P. (2000). **Corrosión por cavitación.** Montajes e instalaciones: Revista técnica sobre la construcción e ingeniería de las instalaciones, (336), 65–79.
26. Con B. de Barco. (2016, 31 mayo). **Cavitación en hélices.** Con B. de Barco <https://conbdebarco.wordpress.com/2016/05/31/cavitation-en-helices/>
27. Moraleda, M. V. B., & Ocejo, I. C. (2025, mayo). **Comportamiento en cavitación en agua de mar de uniones soldadas de broncees de elevada aleación.** *Anales de Ingeniería Mecánica*, 1(24).

28. Ingeniero Marino. (s.f.). **Corrosión y tratamiento de superficies:** Tratamiento de la obra viva del buque. <https://ingenieromarino.com/corrosion-y-tratamiento-de-superficies-tratamiento-de-la-obra-viva-del-buque/>
29. Fischer, A., Telouk, P., Beckmann, C., Heermant, S., & Wimmer, M. A. (2024). **Performance of Austenitic High-Nitrogen Steels under Gross Slip Fretting Corrosion in Bovine Serum.** *Tribology International*, 190, 108949. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108949>
30. Tsai, C.-E., Hung, J., Hu, Y., Wang, D.-Y., Pilliar, R. M., & Wang, R. (2020). **Improving fretting corrosion resistance of CoCrMo alloy with TiSiN and ZrN coatings for orthopedic applications..** <https://arxiv.org/abs/2012.06614>
31. Barman, K., Voisey, K. T., Shipway, P. H., & Pattinson, G. (2015). **Fretting wear behaviour of MoS<sub>2</sub> dry film lubricant.** *Tribologia - Finnish Journal of Tribology*, 33(1), 14–20. <https://journal.fi/tribologia/article/view/69240>
32. Maurice, V., & Marcus, P. (2018). **Current developments of nanoscale insight into corrosion protection by passive oxide films.** 1807.10689. <https://arxiv.org/abs/1807.10689>
33. Chen, Y.-S., Huang, C., Liu, P.-Y., Yen, H.-W., Niu, R., Burr, P., Moore, K. L., Martínez-Pañeda, E., Atrens, A., & Cairney, J. M. (2024). **Hydrogen trapping and embrittlement in metals..** <https://arxiv.org/abs/2404.07736>
34. Ingeniería Química Reviews. (2020, 2 de agosto). **Corrosión en materiales metálicos: Definiciones y cómo prevenirla.** <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/08/corrosion-materiales-metalicos.html>
35. Alsimet. (2022). **¿Cuáles son las causas de la corrosión en los materiales metálicos?** Alsimet. <https://alsimet.es/es/noticias/causas-corrosion-metal/>

36. PCC Group. (2022). **Corrosión de metales y métodos para prevenirla.** PCC Group Product Portal.  
<https://www.products.pcc.eu/es/academy/corrosion-de-metales-y-metodos-para-prevenirla/>
37. **Organización Internacional de Normalización.** (s.f.). Acerca de ISO. ISO. <https://www.iso.org/about-us.html>
38. International Organization for Standardization. (2007). **ISO 8501-1: Preparation of steel substrates before application of paints and related products** — Visual assessment of surface cleanliness — Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after removal of previous coatings. ISO
39. **ISO. (s.f.). ISO 9223: Corrosion of metals and alloys** — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation. ISO.
40. International Organization for Standardization. (2021). **ISO 11844-1: Corrosion protection of steel structures** — Part 1: Classification of corrosivity of environments. ISO.
41. International Organization for Standardization. (2003). **ISO 15741: Petroleum and natural gas industries** — Corrosion-resistant materials for oil and gas production systems. ISO.
42. SOCIEMAT. (s.f.). **Sociedad Científica Española de Materiales.**  
<https://sociemat.org>
43. CEFRACOR. (s.f.). **Comité Français de l'Association Internationale de la Corrosion.** <https://cefracor.org>
44. AMPP. (s.f.). **Association for Materials Protection and Performance**  
<https://ampp.org>
45. **Deutsche Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V. (DGK).** (s.f.). About DGK. <https://www.dgk-corrosion.de/en/>
46. Biezma, M. V., & San Cristóbal, J. R. (2005). Methodology to study cost of corrosion. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 40(5), 344–352. <https://doi.org/10.1179/174327805X75821>

47. Zhang, G., Gong, X., & Luo, H. (2019). **Corrosion behavior of metals and alloys in marine environments.** Materials, 12(23), 3853. <https://doi.org/10.3390/ma12233853>
48. Loto, C. A. (2020). **Corrosion and its inhibition on metals in marine environments.** Scientific African, 8, e00464. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00464>
49. Fontana, M. G. (2005). **Corrosion Engineering** (3<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.
50. Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2011). **Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering** (4th ed.). Wiley
51. Eppowergrit. (s.f.). **Construcción y reparación naval.** <https://www.eppowergrit.com/es/productos/soluciones-industriales/construccion-y-reparacion-naval>
52. International Institute of Marine Surveying. (s.f.). **Time to rethink the challenge of global biofouling.** <https://www.iims.org.uk/time-to-rethink-the-challenge-of-global-biofouling/>
53. Corrosionpedia. (2024, 19 de julio). **Anti-Fouling Paint.** <https://www.corrosionpedia.com/definition/100/anti-fouling-paint>
54. Copernicus Marine Service. (s.f.). **Ocean acidification.** <https://marine.copernicus.eu/es/explainers/phenomena-threats/ocean-acidification>
55. Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA). (2023). **Acidificación de los océanos: definición.** <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/acidificacion-oceanos-deficion>
56. Pensemos Verde. (2016, 25 de noviembre). **¿Qué es la acidificación de los océanos?** <https://pensemosverde.com/2016/11/25/que-es-la-acidificacion-de-los-oceanos/>
57. Doney, S. C., Busch, D. S., Cooley, S. R., & Kroeker, K. J. (2020). **The impacts of ocean acidification on marine ecosystems and reliant**

- human communities.** Annual Review of Environment and Resources, 45, 83–112. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>
58. González Fernández, J. A. (s.f.). **Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión.** Marcombo.
- <https://books.google.com/books?id=0jWvEAAAQBAJ>
59. Peabody, A. W. (2001). **Control de la corrosión de tuberías según Peabody** (2<sup>a</sup> ed.). NACE International.
60. Muñoz Portero, M. J. (2011). **Construcción de los diagramas de Pourbaix para los sistemas metal-agua** [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. RiuNet. <https://riunet.upv.es/handle/10251/13709>
61. Zhang, X., Cao, C., Wang, X., Zhang, L., Meng, G., & Wang, F. (2017). **A study on the electrochemical behavior of corrosion product films formed on low alloy steel in a CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S environment.** The Journal of Physical Chemistry C, 121(27), 14524–14534. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b02771>
62. Landolt, D. (2007). Corrosion and surface chemistry of metals. EPFL Press.
63. Inspenet. (s.f.). **Ánodos de zinc en la protección catódica.** <https://inspenet.com/articulo/anodos-de-zinc-en-la-proteccion-catodica/>
64. CathodicProtection101.com. (s.f.). **Protección catódica** <https://cathodicprotection101.com/proteccion-catodica.htm>
65. Vignesh, R. V., & Sathiya, P. (2024). **Sacrificial anode materials to protect marine grade steel structures.** Corrosion Reviews, 42(3), <https://doi.org/10.1515/correv-2023-0099>
66. Sun, X., Shi, X., & Cheng, S. (2021). **Advances in impressed current cathodic protection technology for marine structures.** Corrosion Science, 187, 109495. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109495>

67. Llalco. (s.f.). **Protección catódica por corriente impresa.**  
<https://www.llalco.com/division-naval/proteccion-catodica-por-corriente-impresa/>
68. Xi, Y., Jia, M., Zhang, J., Zhang, W., Yang, D., & Sun, L. (2022). **Evaluating the performance of aluminum sacrificial anodes with different concentration of gallium in artificial sea water.** *Coatings*, 12(1), 53. <https://doi.org/10.3390/coatings12010053>
69. Bates, R. G., & Macaskill, J. B. (1978). **Standard potential of the silver-silver chloride electrode.** *Pure and Applied Chemistry*, 50(11-12), 1701–1706. <https://doi.org/10.1351/pac197850111701>
70. Roberge, P. R. (2019). **Handbook of Corrosion Engineering** (3rd ed.). McGraw-Hill Education.
71. Kausar, A. (2020). **Performance of corrosion protective epoxy blend-based nanocomposite coatings.** *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 59(6), 658–673. <https://doi.org/10.1080/25740881.2019.1673410>
72. Bahramnia, H., Mohammadian Semnani, H., Habibolahzadeh, A., & Abdoos, H. (2020). **Epoxy/polyurethane nanocomposite coatings for anti-erosion/wear applications.** *Journal of Composite Materials*, 54(22), 3171–3190. <https://doi.org/10.1177/0021998320908299>
73. Matin, M., et al. (2020). **Polymer/inorganic nanocomposite coatings with superior corrosion protection performance: A review.** *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 89, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.05.017>
74. Shi, X., et al. (2023). **Biocorrosion behavior of epoxy-based multilayer nanocomposite coatings.** *Journal of Bio- and Tribocorrosion*, 9(45). <https://doi.org/10.1007/s40735-023-00763-8>
75. Huang, Z., et al. (2023). **Recent advances in emerging integrated anticorrosion and antifouling nanomaterial-based coating solutions.** *Frontiers in Chemistry*, 11, 11685274. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.11685274>

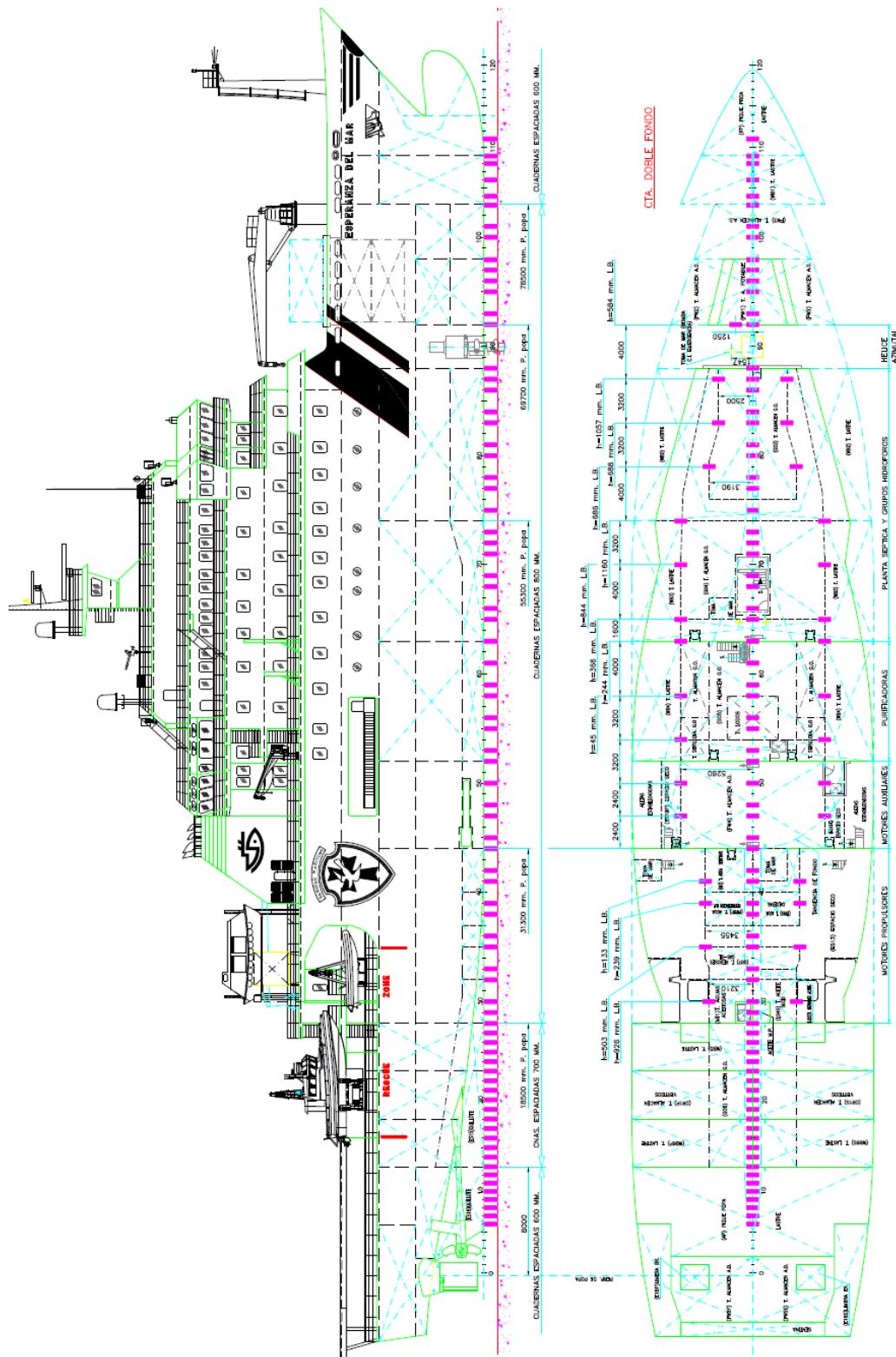
- |              |         |         |       |
|--------------|---------|---------|-------|
| 76. Belzona. | (s.f.). | Belzona | 5811. |
|--------------|---------|---------|-------|
- <https://supply.belzona.com/product/belzona-5811/>
77. Verma, C., Quraishi, M. A., & Ebenso, E. E. (2018). **Recent developments in corrosion inhibitors for mild steel in acidic environments.** Journal of Molecular Liquids, 250, 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.047>
78. Rashid, M. I., Zeng, R., & Hu, L. (2020). **Advances in corrosion inhibitors for steel in marine environments.** Corrosion Science, 173, 108733. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108733>
79. Khaled, K. F. (2017). **Adsorption behavior of organic inhibitors on metal surfaces: A review.** Surface Engineering, 33(3), 173–184. <https://doi.org/10.1080/02670844.2016.1216410>
80. Vasilescu, M. V., Panaitescu, M., & Panaitescu, F. V. (2019). **Marine impressed current cathodic protection system.** Hidraulica, (4), 45–62
81. Deng, P., Shangguan, J., Hu, J., Huang, H., & Zhou, L. (2024). **Anticorrosion method combining impressed current cathodic protection and coatings in marine atmospheric environment.** Coatings, 14(5), 524. <https://doi.org/10.3390/coatings14050524>
82. DTU. (2016). Task 2-3 Report 2: **Analysis of technical data of Ro-Ro ships.** Technical University of Denmark. <http://www.roroseca.transport.dtu.dk/-/media/Subsites/roroseca/Disseminationpapers/Public-Deliverables/Task-2-3-Report-2-Analysis-of-technical-data-of-Ro-Ro-ships-12-July-2016.ashx>
83. American Bureau of Shipping (ABS). (2017). **Guidance notes on cathodic protection of ships. ABS.**
84. International Organization for Standardization (ISO). (2012). **ISO 16222:2012 - Cathodic protection of aluminum and aluminum alloys.**

85. Probris. (s.f.). **Ficha técnica: Ánodos.** <https://www.probris.com/wp-content/uploads/2022/03/Ficha-te%C3%ACcnica-Anodos.pdf>
86. Farooq, A., Hamza, M., Ahmed, Q., & Deen, K. M. (2019). **Evaluating the performance of zinc and aluminum sacrificial anodes in artificial seawater.** *Electrochimica Acta*, 314, 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.04.106>
87. Det Norske Veritas (DNV). (2010). **Cathodic protection design (DNV-RP-B401).** DNV GL.
88. Llalco. (s.f.). **Llalco fabricante.** <https://www.llalco.com/llalco-fabricante/>
89. Yu, F., Camilli, L., Wang, T., Mackenzie, D. M. A., Curioni, M., Akid, R., & Bøggild, P. (2018). **Complete long-term corrosion protection with chemical vapor deposited graphene.** *Carbon*, 132, 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.02.035>
90. Tamhane, D., Thalapil, J., Banerjee, S., & Tallur, S. (2020). **Smart cathodic protection system for real-time quantitative assessment of corrosion of sacrificial anode based on Electro-Mechanical Impedance (EMI).** *IEEE Access*, 9, 12230-12240. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3051953>
91. Refait, P., Grolleau, A.-M., Jeannin, M., & Sabot, R. (2022). **Cathodic protection of complex carbon steel structures in seawater.** *Corrosion and Materials Degradation*, 3(3), 439–453. <https://doi.org/10.3390/cmd3030026>
92. Roberge, P. R. (2010). **Impact of climate change on corrosion risks.** *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 45(1), 27–33. <https://doi.org/10.1179/174327809X442621>



## ANEXOS

## ANEXO 1. PLANO DE VARADA BUQUE HOSPITAL “ESPERANZA DEL MAR”



## ANEXO 2. ÁNODOS DE ZINC (BERA)

### ÁNODOS DE ZINC:

#### ESPECIFICACIONES:

- Anodos de Zinc marca BERA.

Normas Equivalentes:

US MIL-A-18001L,  
ASTM B-418 TIPO 1,  
ASTM F 1182-90, UNS - Z32120.

#### APLICACIONES RECOMENDADAS:

Utilizados como elemento de sacrificio en la protección catódica contra la corrosión de: Cascos de Buques, Tuberías, Tanques de Almacenamiento, etc.

#### Composición Nominal:

- Aluminio (Al): 0.250%  
- Cadmio (Cd): 0.050%  
- Hierro (Fe): 0.004% máximo  
- Cobre (Cu): 0.003% máximo  
- Plomo (Pb): 0.004% máximo  
- Otros: 0.100% máximo  
- Zinc (Zn): Resto

Eficiencia: 90-95%

Densidad: 7.14 g/cm<sup>3</sup>

Capacidad Real:

740 - 780 Amperios Hora/Kg

Consumo Real:

11.2 a 11.7 Kg/Amperio Año

Potencial Anódico (Cu/CuSO<sub>4</sub>):

-1090 a -1100 mV

Punto de ebullición:

907 grado C

### ÁNODOS DE ZINC MARCA BERA.

CÓDIGO ARTÍCULO	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES (mm)*	PESO UNITARIO (Kg)
Z- 02L	Ánodo de Zinc Z BERA modelo ZTS 10 - 2 Patas	L: 110 x A:60 x E:40	1.00
Z - 10L	Ánodo de Zinc Z BERA modelo ZTS 26 - 2 Patas	L: 165 x A:96 x E:40	2.60
Z - 15	Ánodo de Zinc Z BERA modelo ZSS 55 - 2 Patas	L: 260 x A:110 x E:32	5.50
Z - 20PD	Ánodo de Zinc Z BERA modelo ZHS 100 - 4 Patas	L: 300 x A:150 x E:40	10.00
Z - 20PS	Ánodo de Zinc Z BERA modelo ZSS 100 - 2 Patas	L: 300 x A:150 x E:40	10.00
Z - 25	Ánodo de Zinc Z BERA modelo tipo Baldosa	L: 300 x A:300 x E:20	13.50
Z - CL - 0500X06	Ánodo de Zinc Z BERA en Varilla 1/2" x 6".	D: 13 x L:152	0.14
Z - CL - 0625X12	Ánodo de Zinc Z BERA en Varilla 5/8" x 12".	D: 16 x L:304	0.43
Z - CL - 0750X12	Ánodo de Zinc Z BERA en Varilla 3/4" x 12".	D: 19 x L:304	0.61
Z - CL - 1000X12	Ánodo de Zinc Z BERA en Varilla 1" x 12".	D: 25 x L:304	1.05

\*L (Largo), A (Ancho), E (Espesor), D (Diametro)



## ANEXO 3. CORRIENTES IMPRESAS (LLALCO)

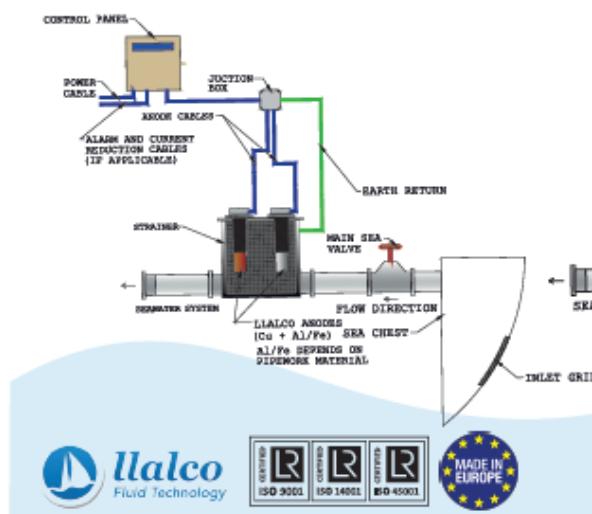


### Marine growth prevention systems

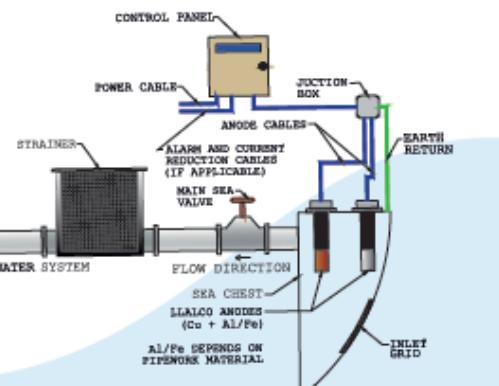
- Prevents blockages caused by barnacles and mussels in ships' engine cooling pipework.
- Ionization – Metallic electrodes are placed into water and subjected to electrical current releasing free metal ions.
- Proven technology: 50,000 plus installations over 60 years. Llalco has designed, supplied and installed, commissioned and maintained over 1,000 installations.
- Installed on commercial, cruise, yacht and naval vessels. Special units available for offshore applications.
- Environmentally benign – concentrations of copper 2 parts per billion.
- Copper purity: 99,9%, massive copper, solid. **Grade C101**
- Biocidal effect: immediate.
- **2 year guarantee.**



### Strainer Installation



### Seachest Installation





## ICCP corrosion control systems for hull wet surface active protection



- Prevents hull corrosion below water line.
- Provides major savings in zinc anodes and maintenance costs.
- Range of anodes available to suit all hull profiles.
- Automatically optimises anode output.
- Performance data is logged enabling systems to be monitored for effectiveness.
- **2 year guarantee.**



## Major savings in maintenance costs





## Anexo V: AVISO DE RESPONSABILIDAD

### AVISO DE RESPONSABILIDAD:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Máster de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Máster así como el profesor/a director no son responsables del contenido último de este Trabajo.