



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**PLAN DE MANTENIMIENTO ELÉCTRICO PARA PROTECCIONES  
CATÓDICAS DE MUELLE DE EMBARCACIONES DE CONCENTRADO DE  
COBRE**

Profesor guía:

Jonathan Agüero Ferrera

Diego Gabriel Cortés Flores

Javier Alejandro Ponce Álvarez

Copiapó, Chile 2025



# UNIVERSIDAD **DE ATACAMA**

FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

## **PLAN DE MANTENIMIENTO ELÉCTRICO PARA PROTECCIONES CATÓDICAS DE MUELLE DE EMBARCACIONES DE CONCENTRADO DE COBRE**

Proyecto de titulación para optar al título de Ingeniero en Ejecución en Electricidad

Profesor guía:

Jonathan Agüero Ferrera

Diego Gabriel Cortés Flores

Javier Alejandro Ponce Álvarez

Copiapó, Chile 2025

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a mi familia, en especial a mis padres, quienes me entregaron valores y educación, y cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental a lo largo de todos estos años.

Agradezco también a Lyann, amiga, compañera y esposa. Sin ti, nada de esto habría sido posible. Tu ayuda, dedicación y empuje desde el primer día han sido esenciales. Solo tengo palabras de gratitud por todo lo que haces por mí y por nuestra familia cada día.

A mis amigos, les agradezco por estar siempre presentes, por sus palabras de aliento y por cada consejo oportuno. Muchas gracias por acompañarme en este camino.

Diego Cortés Flores.

## **DEDICATORIA**

Esta tesis se la dedico a mi familia, porque gracias a ellos soy quien soy hoy.

A mis padres, especialmente, por estar siempre conmigo, por su apoyo, por los consejos que me han guiado, por su paciencia, por su amor y por acompañarme incluso en los momentos más difíciles.

Gracias por creer en mí cuando yo dudaba y por darme fuerzas para seguir adelante.

Este logro también es de ustedes.

Javier Ponce Álvarez.

## **AGRADECIMIENTO**

Sólo expresar el más sincero agradecimiento a nuestros profesores de la carrera, quienes, con su dedicación, experiencia y constante disposición, contribuyeron de manera esencial a nuestra formación académica y profesional. Sus enseñanzas fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Expresar también, un agradecimiento especial al profesor Jonathan Agüero Ferrera, por su guía, apoyo y compromiso durante el proceso de elaboración de esta tesis. Su orientación académica y su disposición para compartir conocimientos fueron clave para avanzar con claridad y confianza en cada etapa del proyecto.

Agradecemos también a la Universidad de Atacama, institución que nos brindó las herramientas, el espacio y los recursos necesarios para nuestro desarrollo formativo. Extendemos este reconocimiento a todos sus trabajadores y colaboradores, cuyo esfuerzo y dedicación permiten el adecuado funcionamiento de la casa de estudios y facilitan el desarrollo de nuestras actividades académicas.

A todos ellos, muchas gracias por su apoyo y por ser parte de este importante proceso.

## INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO.....	v
RESUMEN.....	x
ABSTRACT .....	xi
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Objetivo General .....	4
1.2 Objetivos Específicos .....	4
1.3 Planteamiento del Problema.....	5
1.4. Metodología.....	6
1.4.1 Recolección y análisis de información existente .....	6
1.4.2 Trabajo de campo y entrevistas técnicas.....	6
1.4.3 Elaboración del procedimiento de trabajo .....	7
1.4.4 Diseño de herramientas de control y registro .....	7
1.4.5 Validación del plan de mantenimiento .....	7
1.5. Resumen de los capítulos .....	8
CAPITULO II .....	9
MARCO TEORICO .....	9
2.1 Antecedentes y relevancia de la corrosión en muelles portuarios.....	9
2.2 Corrosión .....	11
2.2.1 Tipos de Corrosión.....	13
2.2.1.1 Corrosión Generalizada o Uniforme .....	14
2.2.1.2 Corrosión Localizada .....	14
2.2.1.2.1 Corrosión Galvánica.....	15

2.3 Fundamentos de la protección catódica.....	17
2.3.1 Mecanismo de Corrosión y su relación con protección catódica.....	18
2.4 Tipos de Protección Catódica.....	20
2.4.1 Ánodos de sacrificio .....	20
2.4.1.1 Propiedades de Ánodos de Sacrificio.....	21
2.4.1.2 Características electroquímicas del Zinc, Magnesio y Aluminio.....	23
2.4.2 Protección Catódica por Corriente impresa (ICPP).....	32
2.5 Normativa y estándares Internacionales.....	37
CAPITULO III .....	39
ANÁLISIS DE INDICADORES DE MANTENIMIENTO.....	39
3.1. MTBF (tiempo medio entre fallos).....	39
3.2. MTTR (tiempo medio de reparación).....	41
3.3 Disponibilidad .....	42
3.4. Confiabilidad .....	43
3.5. CMF (costo de mantenimiento sobre la facturación) .....	44
3.6. CPMV (costo de mantenimiento sobre valor de reposición).....	46
3.7. Distribución por tipos de mantenimiento .....	47
3.8. Resumen de resultados de indicadores de mantención.....	47
CAPITULO IV .....	48
DESARROLLO DE PROTOCOLO DE TRABAJO.....	48
1.OBJETIVO.....	51
2.ALCANCE .....	51
3.DOCUMENTOS RELACIONADOS .....	51
4.DEFINICIONES.....	51
5.RESPONSIBILIDAD.....	51

5.1	Supervisores.....	51
5.2	Operadores.....	52
6.	MODO OPERATIVO .....	53
6.1	identificación de peligros y Riesgos. ....	53
6.2	Medición de Parámetros Eléctricos en Losa muelle.....	55
6.3	Medición de parámetros eléctricos de Protecciones catódicas en Postes de amarre y Boya.....	56
7.	SEGURIDAD, SALUD OCUPACIONAL Y MEDIO AMBIENTE. ....	58
	CAPITULO V .....	59
	ANÁLISIS ECONÓMICO Y TÉCNICO DEL PROTOCOLO .....	59
5.1	Evaluación del cumplimiento normativo.....	59
5.2	Análisis de indicadores de mantenimiento.....	59
5.2.1	Resumen de comparación de indicadores.....	61
5.3	Vida útil.....	62
5.5	Requerimientos técnicos.....	62
	CAPITULO VI.....	64
	CONCLUSIÓN .....	64
	BIBLIOGRAFIA.....	64
	ANEXO 1 .....	69

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 2.1 propiedades de los ánodos de sacrificio.....	21
Tabla 2.2 Propiedades físicas y electroquímicas del zinc, magnesio y aluminio Giudice & Pereira (2016).....	25
Tabla N°3.1 Resumen de indicadores sin proyecto .....	47
Tabla 5.1 comparación de resultados de indicadores con proyectos y sin proyecto...	61
Tabla N°5.2 Resumen de los requerimientos técnicos.....	63

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1.1: vista área de puerto punta padrones Pier .....	1
Figura 2.1 imagen referencial de causas de corrosión .....	11
Figura 2.2 imagen referencial de causas de corrosión .....	13
Figura 2.3 imagen referencial de tipos de corrosión.....	13
Figura 2.4 corrosión generalizada.....	14
Figura 2.5 corrosión galvánica.....	15
Figura 2.6 imagen referencial de corrosión por griet.....	16
Figura 2.7 corrosión por picadura.....	17
Figura 2.8 propiedades del ánodo y cátodo.....	19
Figura 2.9 imagen referencial de flujo de electrones .....	21
Figura 2.10 Propiedades físicas y electroquímicas .....	24
del zinc , magnesio y aluminio Giudice & Pereira (2016).....	24
Figura 2.11 protección catódica por corriente impresa.....	33
Figura 2.12 Rectificador ICC.....	34

## **RESUMEN**

Este trabajo propuso un plan de mantenimiento orientado a optimizar los sistemas de protección catódica por corriente impresa (ICCP) del muelle de embarque de concentrado de cobre de Minera Candelaria, en Caldera, Región de Atacama. La investigación aborda la problemática de la corrosión en estructuras metálicas portuarias expuestas al ambiente marino, donde el mantenimiento reactivo actual genera altos costos y riesgos operacionales.

En el primer capítulo se presentó los objetivos generales y específicos del presente proyecto, el planteamiento del problema, el contexto de la investigación, los alcances y la metodología utilizada para la realización de este proyecto.

En el segundo capítulo se interiorizo de manera técnica en las protecciones catódicas, los tipos de protecciones existentes en el mercado y el de tipo corrosión mas comunes en estructuras portuarias.

En el tercer capítulo se presentó una explicación de los indicadores de mantenimiento previos al proyecto y se realizaron los cálculos correspondientes, basados en la información recopilada durante la investigación.

En el cuarto capítulo se desarrolló el procedimiento de trabajo, definiendo el paso a paso de la tarea, definiendo sus riesgos y peligros asociados.

En el quinto capítulo se evaluó, desde una perspectiva técnica y económica, el protocolo de trabajo, estimándose las mejoras obtenidas tras la implementación del proyecto.

En síntesis, el plan de mantenimiento planteado permite optimizar recursos, prolongar la vida útil de las estructuras portuarias y asegurar la sostenibilidad técnica y económica de las operaciones marítimas de exportación.

## **PROTOCOLO DE TRABAJO-PROTECCIONES CATODICAS ELECTRICAS- INDICADORES DE MANTENIMIENTO**

## **ABSTRACT**

This study proposes a maintenance plan designed to optimize the impressed current cathodic protection (ICCP) systems installed at the copper concentrate loading dock of Minera Candelaria, located in Caldera, Atacama Region. The research addresses the issue of corrosion in metallic port structures exposed to the marine environment, where the current reactive maintenance approach leads to elevated costs and operational risks.

The first chapter presents the general and specific objectives of the project, the problem statement, the research context, the scope of the study, and the methodology employed for its development.

The second chapter provides a technical overview of cathodic protection systems, detailing the types of protection available in the market and the most common forms of corrosion affecting port infrastructure.

In the third chapter, an explanation of the maintenance indicators prior to the project was presented, and the corresponding calculations were carried out based on the information collected during the research.

The fourth chapter develops the work procedure, defining the step-by-step execution of the tasks, along with the associated risks and hazards.

The fifth chapter presents a technical and economic evaluation of the proposed work protocol.

In summary, the proposed maintenance plan enables the optimization of resources, extends the service life of port structures, and ensures the technical and economic sustainability of maritime export operations.

**WORK PROTOCOL – ELECTRICAL CATHODIC PROTECTION –  
MAINTENANCE INDICATO**

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

La minera Candelaria se ubica a 29 km al sur de Copiapó, en la comuna de Tierra Amarilla, Región de Atacama. Se trata de una operación combinada de explotación a cielo abierto y minería subterránea, con reservas probadas y probables estimadas en 676 millones de toneladas de mineral de cobre. Para materializar la exportación del concentrado, en 1995 se construyó el Puerto Limpio Mecanizado Punta Padrones, emplazado en Caldera, a 110 km de las faenas mineras, infraestructura que desde entonces constituye un eslabón fundamental en la cadena logística de la compañía.

**Figura 1.1: vista área de puerto punta padrones Pier**



Como toda instalación portuaria, esta infraestructura se encuentra constantemente expuesto a procesos de corrosión, fenómeno que compromete no solo su integridad estructural, sino también su funcionalidad y seguridad operativa. Para mitigar este problema, una de las estrategias más utilizadas es la protección catódica, técnica que consiste en inducir que la superficie metálica de interés se comporte como el cátodo de una celda electroquímica. Este principio se lleva a cabo mediante suministro de electrones que impiden la oxidación del metal, lo que se logra principalmente a través de dos métodos: el uso de ánodos de sacrificio o la aplicación de corriente impresa.

En el presente estudio se centrará la atención en esta última técnica, dada su mayor eficiencia en la protección de estructuras portuarias de gran envergadura. La aplicación de corriente impresa permite ejercer un control más estable sobre los potenciales eléctricos, garantizando con ello un nivel de protección uniforme en toda la superficie metálica expuesta al medio marino. En este contexto, se plantea el diseño de un plan de mantención integral, orientado a asegurar el monitoreo sistemático y control periódico de los equipos involucrados. Este enfoque busca garantizar la continuidad operativa de las protecciones catódicas, optimizar su desempeño, en consecuencia, contribuir a la prolongación de la vida útil de las instalaciones sometidas a condiciones ambientes altamente corrosivas.

La protección contra la corrosión en estructuras portuarias reviste especial relevancia para la compañía, puesto que el muelle constituye un punto estratégico en el proceso de exportación de concentrado de cobre. El deterioro ocasionado por la corrosión no se limita a un aspecto superficial o estético, sino que afecta directamente la resistencia estructural, la seguridad de las operaciones y la durabilidad de las instalaciones. De este modo, asegurar la correcta mantención de los equipos destinados a mitigar este fenómeno se convierte en una tarea prioritaria y estratégica para la operación minera en su conjunto.

En la actualidad, sin embargo, las labores de mantención que se ejecutan sobre los sistemas de protección catódica son mayoritariamente de carácter reactivo. Esto implica que las intervenciones se realizan una vez que falla o el deterioro ya se ha manifestado, lo

que incrementa significativamente los costos asociados a cada reparación y prolonga los tiempos de respuesta frente a contingencias. Esta situación genera no solo mayores gastos económicos, sino también riesgos adicionales al comprometer la continuidad de la operación portuaria y, en caso extremos, la seguridad estructural del muelle.

Ante este escenario, se hace necesario establecer un plan de mantención preventiva y predictiva, que permita anticiparse a las fallas y asegurar un funcionamiento confiable de los sistemas. Dicho plan debe contemplar la planificación detallada de tareas a realizar a cada intervención, la identificación de los riesgos inherentes a la labor del personal encargado y la definición de protocolos claros para el registro y sistematización de los parámetros recolectados durante el proceso. Solo de esta manera será posible garantizar un control eficiente y permanente de los equipos, fortaleciendo a la vez la cultura de prevención dentro de la organización.

La implementación de este plan integral generará múltiples beneficios. En primer lugar, permitirá optimizar los tiempos de respuesta en la detección de desviaciones en los parámetros eléctricos de las protecciones catódicas, lo que facilitará la ejecución de ajustes oportunos. En segundo lugar, contribuirá a la reducción de los tiempos medios de reparación y de falla, mejorando de manera significativa la disponibilidad y confiabilidad de los equipos. Finalmente, al mantener en condiciones óptimas los sistemas de protección, se logrará extender la vida útil del muelle, disminuyendo al mismo tiempo los costos asociados a intervenciones correctivas y evitando interrupciones en el proceso de exportación.

En síntesis, la gestión adecuada de la corrosión no debe concebirse únicamente como una exigencia técnica enfocada en la preservación de materiales, sino como una estrategia integral de gestión de activos que articula de manera coordinada la eficiencia operativa, la seguridad estructural, la sostenibilidad ambiental y la responsabilidad económica. Al tratarse de un fenómeno natural e inevitable en ambiente altamente agresivos como el marino, la corrosión exige un enfoque preventivo que permita anticipar daños y minimizar su impacto en los costos de reparación y en la disponibilidad de las instalaciones.

En este marco, la implementación de un plan de mantención preventiva y predictiva mediante sistemas de protección catódica por corriente impresa se vuelve fundamental. Este tipo de planificación asegura la continuidad de las operaciones portuarias al optimizar el uso de recursos, reducir los tiempos de falla y mejorar la confiabilidad de los equipos. El monitoreo sistemático y las rutinas de control entregan información precisa sobre el estado real de las estructuras, facilitando decisiones técnicas basadas en datos concretos y evitando fallas imprevistas que podrían comprometer la operación del muelle.

Además, este enfoque contribuye a extender la vida útil de la infraestructura portuaria, disminuyendo la necesidad de intervenciones correctivas de alto costo y garantizando la seguridad en las faenas de carga y descarga. Desde una perspectiva estratégica, incorporar un plan de mantenimiento predictivo refuerza la integridad física de las instalaciones y mejora la posición de la compañía frente a las exigencias de eficiencia y sostenibilidad.

### **1.1 Objetivo General**

Diseñar un procedimiento de trabajo que permita mejorar indicadores de mantenimiento eléctrico de protecciones catódicas, disminuyendo los gastos asociados y los tiempos de respuesta.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- a) Describir de manera técnica los equipos de protección catódica, considerando sus principios de funcionamiento, componentes principales y criterios de selección aplicables a infraestructuras portuarias en ambientes marinos corrosivos.
- b) Analizar y sistematizar los datos disponibles, las normativas vigentes y los antecedentes de mantenciones anteriores, con el propósito de identificar patrones de desempeño, brechas en la gestión y oportunidades de optimización en los planes de control de corrosión
- c) Establecer protocolos de seguridad para el operador eléctrico durante la medición de parámetros eléctricos, garantizando el cumplimiento de estándares técnicos y de prevención de riesgos laborales asociados a la operación de sistemas de protección catódica.

d) Evaluar de manera comparativa la propuesta técnica y económica de implementación del sistema de protección catódica, ponderando costos, beneficios y su contribución a la extensión de la vida útil de la infraestructura portuaria.

### **1.3 Planteamiento del Problema**

En los sistemas de protección catódica con ánodos de corriente impresa, el adecuado control y medición de los parámetros eléctricos —tales como potencial, corriente de salida y voltaje de rectificación— resulta fundamental para garantizar la efectividad del sistema y la integridad de las estructuras metálicas protegidas. Sin embargo, en numerosos casos, las actividades de mantenimiento asociadas a estas instalaciones se desarrollan bajo un enfoque reactivo, es decir, se ejecutan solo cuando se detectan fallas, anomalías o pérdida de protección efectiva.

Este enfoque reactivo provoca una serie de inconvenientes técnicos y económicos. Desde el punto de vista operativo, la falta de monitoreo y medición preventiva de los parámetros eléctricos impide identificar desviaciones tempranas del comportamiento esperado del sistema, tales como disminución del potencial de protección, fallas en los rectificadores, degradación prematura de ánodos o problemas de conexión en los cables de retorno. Estas deficiencias, al no ser tratadas oportunamente, pueden conducir a pérdidas de protección catódica, aumento en las tasas de corrosión, y eventualmente, daños estructurales en las estructuras portuarias.

Desde la perspectiva económica, el mantenimiento reactivo genera costos significativamente más altos en comparación con un esquema preventivo o predictivo. Las reparaciones no planificadas, la necesidad de reemplazos prematuros de componentes y las interrupciones operacionales implican un aumento en el gasto de materiales, mano de obra y tiempo de inactividad. Además, la ausencia de un registro sistemático de los parámetros eléctricos limita la capacidad de análisis histórico y dificulta la toma de decisiones basadas en datos, perpetuando la dependencia de intervenciones correctivas.

Por lo tanto, la problemática central radica en la carencia de un programa de mantenimiento basado en la medición sistemática y el análisis de los parámetros eléctricos del sistema de protección catódica. Esta situación conduce a un ciclo continuo de

mantenimiento reactivo, deterioro prematuro de los equipos, riesgo de fallas en la protección contra la corrosión y sobre costos asociados a la operación.

En consecuencia, se hace necesario evaluar y establecer un enfoque de mantenimiento predictivo o preventivo, sustentado en la medición periódica, registro y análisis de parámetros eléctricos, que permita optimizar la confiabilidad del sistema, reducir los costos operativos y extender la vida útil de los componentes de ánodos de corriente impresa.

#### **1.4. Metodología**

La metodología empleada en esta investigación se basa en un enfoque descriptivo y aplicado, orientado al diseño de un plan de mantenimiento optimizado para sistemas de protección catódica, con especial énfasis en ánodos de corriente impresa (ACI). El propósito es establecer procedimientos estandarizados que permitan mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y garantizar la continuidad del servicio de protección anticorrosiva.

##### **1.4.1 Recolección y análisis de información existente**

Como punto de partida, se realizará la compilación y revisión de registros históricos de mantenimiento, provenientes de planillas de control y reportes técnicos de años anteriores. Estos datos permitirán identificar tendencias de fallas, frecuencia de intervenciones y comportamiento de los parámetros eléctricos de los rectificadores y ánodos. Se analizarán variables como voltaje de salida, densidad de corriente, potencial catódico y tiempo de operación, con el fin de detectar desviaciones o patrones de degradación en el sistema.

##### **1.4.2 Trabajo de campo y entrevistas técnicas**

Se llevarán a cabo charlas y entrevistas con los operadores y técnicos encargados de las mantenciones, quienes aportarán información práctica respecto a los procedimientos actuales, las dificultades recurrentes y las condiciones reales de trabajo en terreno. Esta etapa cualitativa permitirá complementar los datos históricos con experiencia

operativa directa, asegurando que el plan de mantenimiento propuesto sea aplicable y acorde a la realidad del sistema.

#### **1.4.3 Elaboración del procedimiento de trabajo**

Con base en la información recopilada y el diagnóstico técnico, se desarrollará un procedimiento de mantenimiento estructurado, el cual incluirá las etapas de inspección, medición, registro, y acciones correctivas.

Este procedimiento considerará las buenas prácticas de la industria, buscando estandarizar la ejecución de las mantenciones y asegurar la trazabilidad de los resultados.

#### **1.4.4 Diseño de herramientas de control y registro**

Se elaborarán planillas automáticas en Microsoft Excel, programadas mediante fórmulas y macros simples, que permitan automatizar el registro, procesamiento y análisis de datos obtenidos durante las mantenciones.

Estas herramientas estarán orientadas a reducir errores de digitación, facilitar la generación de informes y permitir el seguimiento de la condición de cada sistema de protección catódica a lo largo del tiempo.

#### **1.4.5 Validación del plan de mantenimiento**

Finalmente, se realizará una validación técnica del plan propuesto mediante la comparación de los resultados históricos con los obtenidos a partir de la aplicación del nuevo procedimiento. Esto permitirá evaluar su eficiencia, aplicabilidad y potencial de mejora continua, asegurando que las recomendaciones finales se basen en evidencia técnica y operacional.

## **1.5. Resumen de los capítulos**

En el capítulo I se introducirá sobre que son las protecciones catódicas, sus principales funciones, la importancia de su buen funcionamiento y la problemática a solucionar.

En el capítulo II se abordará de manera más técnica las protecciones catódicas mencionando sus partes, su funcionamiento y las normas que rigen estas protecciones.

En el capítulo III se explicará se forma breve los indicadores de mantenimiento, se calcularán los indicadores de las protecciones catódicas y por último se analizará los resultados.

En el capítulo IV se desarrollará el protocolo de mantenimiento mencionando el paso a paso a realizar, mencionando los equipos, herramientas, la cantidad de trabajadores entre otros puntos.

En el capítulo V se analizará y evaluará de forma económica y técnica el protocolo de trabajo de las protecciones catódicas.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

El capítulo desarrolla los fundamentos de forma conceptual necesarios para comprender la problemática de la corrosión en estructuras metálicas de muelles portuarios expuestas a ambientes marinos altamente agresivos, se describen antecedentes históricos y casos actuales que evidencian el impacto estructural y operativo de este fenómeno, se presentan los principios electroquímicos que explican la corrosión, junto con sus principales tipologías y factores acelerantes, finalmente, se abordan los fundamentos de la protección catódica y el rol de los ánodos de sacrificio como método de mitigación, estableciendo la base teórica para la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo orientadas a preservar la integridad y prolongar la vida útil de las infraestructuras portuarias.

#### **2.1 Antecedentes y relevancia de la corrosión en muelles portuarios**

Las infraestructuras integradas de sostenibilidad en los muelles de carguío de mineral de concentrado en el ambiente portuario, representa un desafío constante para la industria minera ya que las estructuras metálicas que forman parte del entorno del medio marino están constantemente expuestas a factores de salinidad, humedad y condiciones climáticas adversas contribuyendo gradualmente a un desgaste y debilitamiento prematuro de las infraestructuras debido a la Corrosión.

La importancia de la Corrosión en la industria portuaria radica sobre el riesgo que conlleva la exposición de las estructuras metálicas a factores externos no solo desde la visión de productividad propiamente tal como el impacto económico que genera el debilitamiento de sus sistemas y las mantenciones, reparaciones, incluso sustitución completa de las estructuras metálicas sino también a los riesgos que están expuestos los trabajadores. Al analizar dicho planteamiento se puede constatar que la efectividad de la seguridad en la prevención de la corrosión busca minimizar la susceptibilidad de la integralidad estructural.

En Chile existen documentaciones de fallas estructurales en muelles debido a la exposición de la corrosión( Brebi & Irarrázaval, 2018), si bien no todos están relacionados a la función portuaria de exportación de mineral, si habla de incidencias a nivel de Historia

y como esto evidencia que la exposición con los años a los factores ambientales conlleva a daños estructurales como es el caso del Muelle Salitrero Ex Compañía Melbourne Clark impulsado para la explotación de mineral en 1868, dicha infraestructura se ubicó en la ciudad de Antofagasta y que debido a los debilitamientos de sus cimientos producto de la corrosión obligó el cierre de su accesos. (Lugares de Ciencia, 2023).

Actualmente todos los puertos que desempeñan exportaciones importantes requieren de intervenciones periódicas, como es el caso del informe de evaluación de integridad en el Puerto de Angamos en Mejillones (Brebí & Irarrázabal, 2018) donde evidenció los efectos de la corrosión en sus estructuras, lo que nos da una visión mucho más amplia respecto a la importancia de buscar mecanismos de control y prevención en el deterioro de las infraestructuras portuarias.

Los mecanismos que intervienen en la mitigación de la corrosión son la implementación de protecciones catódicas que son un método electroquímico que busca prevenir el deterioro de cualquier superficie metálica, dicha intervención está regulada bajo normas internacionales que busca estandarizar su instauración como mecanismo regulatorio ya que es una alternativa real para minimizar los daños estructurales en el ámbito portuario.

Dado los antecedentes de alteración de estructuras metálicas basados en hechos históricos y actuales, el Puerto Punta Padrones ubicado a 29 kilómetros de Copiapó en la Región de Atacama, busca prevenir fallas en sus sistemas operacionales y estructurales de embarque debido al riesgo de exposición de los factores medioambientales mediante la implementación de un protocolo de mantención eléctrica predictiva la cual permita asegurar una detección temprana de la corrosión, de tal manera de contribuir a la optimización de mantenimiento y a la minoración de los costos asociados a la corrosión de las estructuras metálicas portuarias.

Para contextualizar el funcionamiento preventivo en la corrosión se deben definir e identificar conceptos fundamentales para el entendimiento de los procesos electroquímicos que participan en los mecanismos de acción del desgaste de las estructuras metálicas y como cada uno de ellos tienen un rol importante para su mitigación futura en las instalaciones portuarias.

## 2.2 Corrosión

El concepto “Corrosión” se define como “desgaste paulatino de los cuerpos metálicos por acción de agentes externos, persista o no su forma”. (Real Academia Española, s.f.), sin embargo, no sólo depende de factores medioambientales sino también de la naturaleza de la estructura metálica y de los métodos preventivos que se utilizan para evitar el deterioro paulatino y progresivo en lugares marinos. Siguiendo dicha conceptualización se entiende que la forma más común de corrosión es aquella en que todo metal que está expuesto a un medio húmedo comienza a acelerar el proceso por la concentración alta de cloruros, variaciones en la humedad y la temperatura propia de las zonas costeras desencadenando una reacción electroquímica.

El proceso de corrosión es “básicamente de naturaleza electroquímica, es decir con transferencia de carga eléctrica e involucra no solo la disolución del metal si no a una o más reacciones complementarias de reducción, como por ejemplo la del agua, oxígeno u otras presentes” (Elsner, 2003, p.1). Es importante destacar que esta reacción se convierte en un sistema electroquímico donde la superficie del metal funciona como ánodo y cátodo, en la primera el metal se disuelve y en la segunda el oxígeno se reduce. Entre ambos circula una película de agua con sales provenientes del mar y electrones que están dentro del metal, al estar en contacto con cloruros, humedad y temperatura, las estructuras metálicas se van a corroer dependiendo de la velocidad con la que se lleve el proceso.

**Figura 2.1 Imagen referencial de causas de corrosión**



OpenIA (2025)

En referencia a los factores ambientales que inciden en la corrosión se detallan que la afectación de las estructuras metálicas tiene participación los iones de cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) que se encuentran en grandes cantidades en el agua del mar, esta exposición que se define como agresiva, rompen la delgada capa protectora que naturalmente se forma en el metal favoreciendo la formación de perforaciones profundas y localizadas donde se mantiene el proceso activo, que en términos simples son las llaves que abren el paso para que el metal se oxide más rápido, ahora bien , otro punto importante a destacar es la participación de la humedad ambiental que en conjunto con el agua del mar genera salpicaduras o condensación sobre el metal actuando como un puente conductor, permitiendo así que los electrones e iones se muevan entre el ánodo y cátodo, por otro lado las sales marinas son higroscópicas que según la definición de la Real Academia Española (2025) se refiere “que absorbe o expulsa la humedad atmosférica” lo que en el proceso de corrosión se comporta como la absorción del agua del aire y mantención de la humedad en la superficie incluso sin lluvia, ya que cuando la humedad cursa con ciclos de mojado o secado las sales se concentran, lo que vuelve a la solución mucho más corrosiva. Por último, cuando nos referimos a la temperatura las reacciones químicas ocurren con mayor rapidez, lo que se conoce como el efecto Arrhenius quien describe que la cinética de una reacción química aumenta en función a la temperatura (enciclopedia británica, 2025). Por otro lado, la conductividad de la solución de sales producto de la reacción de aceleración mejora, facilitando el movimiento de los iones. Aunque a mayor temperatura el oxígeno presente se disuelve menos en el medio acuoso por lo que su transporte y rapidez aumentan por la corrosión haciendo que sea mucho más intensa, además el calor acelera la evaporización del agua concentrando los cloruros a la superficie metálica.

**Figura 2.2 Imagen referencial de causas de corrosión**

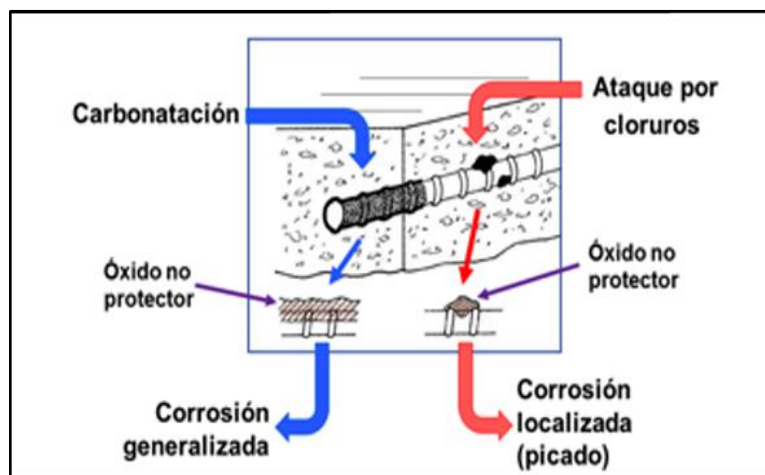


Open IA (2025)

### 2.2.1 Tipos de Corrosión

En el proceso de degeneración estructural en los muelles portuarios es fundamental comprender y entender los diferentes tipos de corrosión ya que cada uno posee características específicas que van a determinar la velocidad de deterioro del metal, según esto es como se deben evaluar los mecanismos de daño y las estrategias de prevención y control. Los tipos de corrosión pueden clasificarse en dos grandes grupos:

**Figura 2.3 Imagen referencial de tipos de corrosión**



Fuente: Duffó-Farina (2019)

### 2.2.1.1 Corrosión Generalizada o Uniforme

La Corrosión generalizada según McGraw (s.f), es aquella que “afecta a toda la superficie de un activo, puede manifestarse como una pérdida más o menos uniforme de material superficial o un adelgazamiento generalizado que abarca toda la superficie metálica” (párr.3). Conforme a lo mencionado lo que se busca entender es que el metal sufre un deterioro de manera pareja lo que causa una reducción progresiva y constante de su espesor, si esto lo llevamos a los factores de riesgo expuesto entenderemos que la corrosión reacciona más fácilmente al oxígeno y la humedad del ambiente haciéndolo visiblemente más predecible, por eso Reyes (2025) menciona que dicha corrosión “facilita su medición y control mediante inspecciones periódicas.

**Figura 2.4 Corrosión generalizada**



**OpenIA (2025)**

### 2.2.1.2 Corrosión Localizada

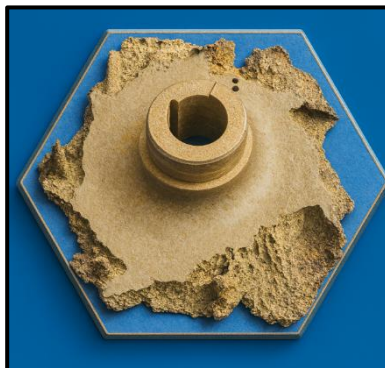
La corrosión localizada según Reyes (2025) la define como aquella “degradación electroquímica del metal que no afecta de manera uniforme toda la superficie expuesta, si no que se concentra en áreas específicas y limitadas, generando daños severos en puntos concretos del material” lo que lo hace difícil de manejar dado que puede avanzar rápidamente sin ser detectada fácilmente. Si aplicamos a este tipo de corrosión los factores

ambientales que influyen en la aceleración del proceso podemos identificar que la exposición de iones de cloruros que son abundantes en la zona costera logrando penetrar fácilmente imperfecciones estructurales en el metal acelerando la formación de picaduras lo que hace que el electrolito se mantenga activo en ambientes de relativa humedad y salinidad acelerando los procesos electroquímicos. Por otro lado, la temperatura también juega un papel crucial ya que el electrolito aumenta la solubilidad y movilidad de los iones de cloruros favoreciendo la penetración a las grietas o imperfecciones del metal. Es por esto que este tipo de corrosión es la más crucial en los métodos de prevención en muelles portuario. Para McGraw (s.f) la corrosión localizada se subclasifica en galvánica, por grietas y por picadura (pitting).

#### **2.2.1.2.1 Corrosión Galvánica**

Se presenta cuando dos metales diferentes en contacto o conectados por medio de un conductor eléctrico, son expuestos a una solución conductora. En este caso, existe una diferencia de potencial eléctrico entre los metales diferentes y sirve como fuerza directriz para el paso de corriente eléctrica a través del agente corrosivo, de tal forma que el flujo de corriente corroe uno de los metales del par formado. (Martínez-Pérez, 2023, p.5). La severidad de la corrosión depende del tipo de cantidad de humedad presente. Así la corrosión en la costa es mayor que el campo seco. Además, la condensación en la costa contiene sal y es más conductora (Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, s.f, p.11).

**Figura 2.5 Corrosión galvánica**



Fuente: Martínez-Pérez (2023)

- **Corrosión por grietas:** es aquella que se desarrolla en espacios ocluidos entre superficies metálicas y no metálicas. En estas zonas restringidas se produce una disminución en la concentración de oxígeno y un aumento de iones agresivos como los cloruros, lo que genera diferencias químicas entre el interior y exterior de la grieta, estableciendo celdas electroquímicas que aceleran la disolución del metal. Con el tiempo, la película pasiva de óxido se degrada, facilitando la penetración de sustancias corrosivas, favoreciendo la progresión del daño. Las aleaciones más afectadas son aluminio, zinc, cobre se ven afectadas en ambientes marinos, el titanio o las aleaciones de níquel pueden volverse vulnerable en condiciones de elevada temperatura y soluciones ricas en cloruros (Voliro, 2025, sección What is Crevice Corrosion)

**Figura 2.6 Imagen referencial de corrosión por grieta**



Fuente: Armoly (2024)

- **Corrosión por picadura (pitting):** es aquella que se desarrolla en áreas pequeñas y específicas de la superficie metálica. Su inicio suele estar asociado a defectos en su exterior, impurezas o zonas con menor concentración de oxígeno, donde se establece una celda electroquímica: un área afectada actúa como ánodo y se disuelve progresivamente, mientras que otra circundante funciona como cátodo. Esto provoca la formación de hoyos o cavidades que se profundizan con el tiempo, debilitando la integridad estructural del material ya que ocurre en un punto

reducido, pero de alta penetración. Este tipo de corrosión es común en ambientes marinos y afecta especialmente a metales con películas pasivas protectoras (acero inoxidable o aluminio), cuando estas se dañan se vuelven inestables. Los iones de cloruro presentes en el agua del mar son uno de los principales factores que favorecen este mecanismo ya que atacan zonas heterogéneas del metal relacionadas con su microestructura o acabo superficial. (Calderón Freire, Cuadrado Pumalema, Punina Guerrero, & Hidalgo Viteri, 2024, p.25).

**Figura 2.7 Corrosión por picadura**



Fuente: Paredes, D. NCH LATAM (2022)

### **2.3 Fundamentos de la protección catódica**

La protección catódica es un método electroquímico diseñado para evitar el deterioro de estructuras metálicas expuestas a ambiente altamente corrosivos, como ocurre en instalaciones portuarias y marinas. Su principio central consiste en forzar a que toda la superficie del metal a proteger funcione como cátodo dentro de un medio electrolítico. Al alcanzarse esta condición, se eliminan los procesos de oxidación responsables de la corrosión y se asegura que únicamente ocurran reacciones de reducción en la superficie metálica (Cáceres, 2014, p.42).

La eficacia de un sistema de protección catódica depende de una evaluación adecuada de variables técnicas y ambientales. Entre las más relevantes se encuentran el tipo de

estructura metálica a proteger, la naturaleza del medio corrosivo, la resistividad eléctrica del entorno. Estos factores condicionan el desempeño y la durabilidad del sistema, por lo que deben analizarse desde la etapa del diseño para garantizar resultados efectivos. El funcionamiento del sistema requiere que el ánodo y el cátodo (este último siendo la estructura a proteger) mantengan un contacto eléctrico directo y se encuentren inmersos en un electrolito. En Infraestructuras marinas, el agua de mar actúa como conductor, completando el circuito electroquímico. De esta forma, se modifica el potencial eléctrico del metal, haciéndolo más electronegativo, con lo cual la velocidad de corrosión se reduce hasta volverse insignificante. (Zavarce, 2024).

### **2.3.1 Mecanismo de Corrosión y su relación con protección catódica**

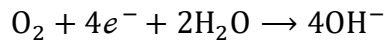
Para comprender de manera adecuada la protección catódica, es necesario entender cómo se origina la corrosión en los metales. Para que se produzca deben coincidir tres condiciones fundamentales.

- Presencia de dos zonas metálicas con distinta actividad electroquímica (pueden ser metales completamente diferentes, como acero y aluminio o variaciones microestructurales dentro de una pieza.
- Existencia de un electrolito, es decir, un medio líquido que conduzca la corriente eléctrica (agua de mar).
- Un trayecto metálico conductor que permita el flujo de electrones entre las zonas de distinta reactividad.

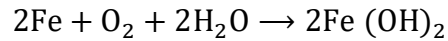
Baxter y Britton (s.f) Plantean que cuando estas condiciones están presentes, se forma una célula electroquímica natural en la superficie metálica. En las zonas más activas del acero (ánodos), los átomos de hierro tienen a oxidarse, liberando electrones mediante la siguiente reacción:



Estos electrones liberados viajan a través del trayecto metálico hacia las zonas menos activas (cátodos), donde reaccionan con el oxígeno disuelto en el agua y forman iones de hidroxilo, de acuerdo a la siguiente reacción:

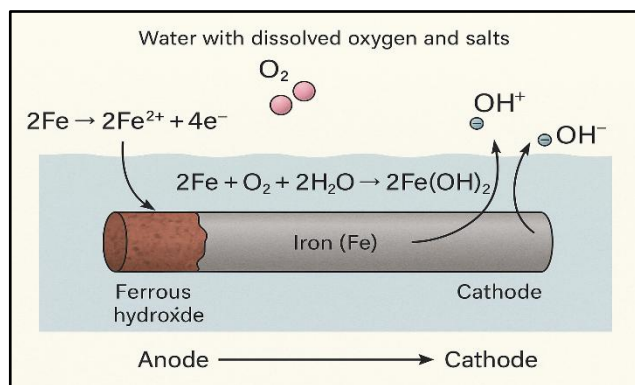


La combinación de los iones Ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ) con los iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) da lugar al hidróxido ferroso, el cual constituye el producto inicial de la corrosión del acero:



En términos prácticos, este proceso puede explicarse como un flujo de corriente eléctrica a través del electrolito (agua con sales) desde el ánodo hacia el cátodo. En el ánodo ocurre la oxidación (pérdida del metal), mientras que en el cátodo tiene lugar la reducción (reacciones del oxígeno). Las protecciones catódicas actúan interrumpiendo este mecanismo por eso, ya que transforma toda la superficie metálica en un cátodo, anulando así las reacciones de oxidación que originan la corrosión y asegurando la integridad de la estructura metálica (Baxter y Britton, s.f).

**Figura 2.8 Propiedades del ánodo y cátodo**



OpenIA (2025)

## **2.4 Tipos de Protección Catódica**

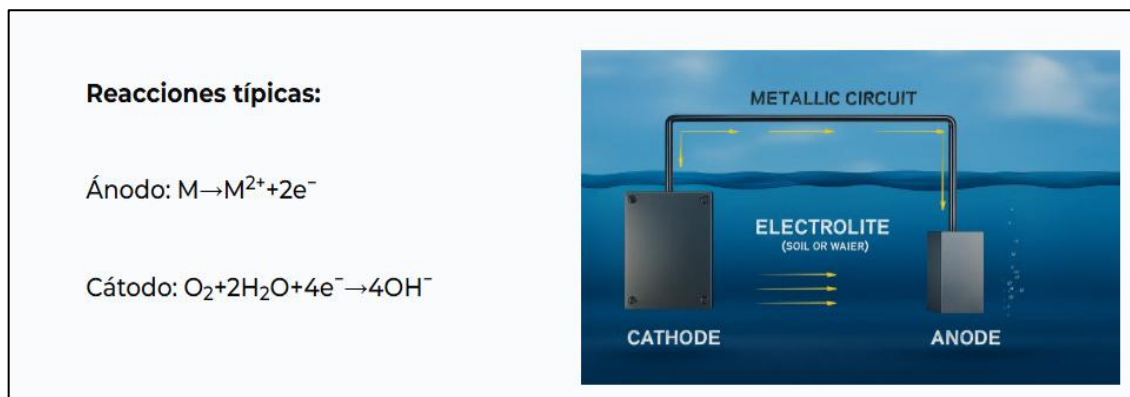
### **2.4.1 Ánodos de sacrificio**

Los ánodos de sacrificio, también denominados ánodos galvánicos, constituyen un método fundamental dentro de las técnicas de protección catódica empleadas para mitigar los procesos de corrosión en estructuras metálicas expuestas a medios agresivos, como el agua de mar. Su principio de funcionamiento se basa en la creación deliberada de una celda galvánica, en la cual el material del ánodo de naturaleza más activa electroquímicamente que el metal que sea desea proteger se oxida de forma preferente, entregando electrones al sistema y forzando al metal base a comportarse como un cátodo (ESC Group, 2021).

En términos prácticos, el ánodo de sacrificio actúa como un elemento que asume voluntariamente el deterioro de la corrosión, preservando así la integridad del material protegido. Estos ánodos se fabrican comúnmente de metales como el magnesio, el zinc o el aluminio, seleccionados por su potencial electroquímico más negativo respecto al del acero u otros metales estructurales. Su instalación suele realizarse en tuberías enterradas, cascos de embarcaciones, tanques de almacenamientos o pilotes metálicos en zonas portuarias, donde las condiciones electroquímicas favorecen la corrosión acelerada.

Aunque este sistema no elimina de manera absoluta los fenómenos corrosivos, si logra reducir significativamente su velocidad y sus efectos destructivos, extendiendo la vida útil de los componentes metálicos. El principio de “sacrificio” se refiere, precisamente a que el ánodo se consume progresivamente con el tiempo, transfiriendo su desgaste al elemento menos noble para proteger la estructura principal. En consecuencia, el mantenimiento periódico consiste en la reposición de los ánodos consumidos, garantizando la continuidad del proceso de protección (ESC Group, 2021).

**Figura 2.9 Imagen referencial de flujo de electrones**



Fuente: Reyes, Y. INSPENET (2025)

Según Reyes (2025) “El flujo de electrones protege la superficie metálica de la estructura, manteniendo su potencial por debajo del potencial de corrosión. Por lo cual, la eficiencia de corriente del ánodo y su potencial de trabajo estable son indicadores estables de desempeño en sistemas de protección catódica.

#### 2.4.1.1 Propiedades de Ánodos de Sacrificio

**Tabla 2.1 Propiedades de los ánodos de sacrificio**

Equilibrio	d.d.p. (Voltios)	Equilibrio	d.d.p. (Voltios)
$Mg \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2 e^{-}$	-2,34	$Co \rightleftharpoons Co^{2+} + 2 e^{-}$	-0,277
$Ti \rightleftharpoons Ti^{2+} + 2 e^{-}$	-1,75	$Ni \rightleftharpoons Ni^{2+} + 2 e^{-}$	-0,230
$Al \rightleftharpoons Al^{3+} + 3 e^{-}$	-1,61	$Sn \rightleftharpoons Sn^{2+} + 2 e^{-}$	-0,136
$Mn \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2 e^{-}$	-1,05	$Pb \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2 e^{-}$	-0,126
$\rightarrow Zn \rightleftharpoons Zn^{2+} + 2 e^{-}$	-0,762	$H_2 \rightleftharpoons H^{2+} + 2 e^{-}$	$\pm 0,000$
$Cr \rightleftharpoons Cr^{3+} + 3 e^{-}$	-0,71	$Cu \rightleftharpoons Cu^{2+} + 2 e^{-}$	+0,345
$\rightarrow Fe \rightleftharpoons Fe^{2+} + 2 e^{-}$	-0,441	$Ag \rightleftharpoons Ag^{1+} + 1 e^{-}$	+0,800
$Cd \rightleftharpoons Cd^{2+} + 2 e^{-}$	-0,402	$Au \rightleftharpoons Au^{3+} + 3 e^{-}$	+1,42

Fuente: Giudice & Pereira (s.f)

La serie electroquímica de los metales constituye una referencia fundamental para comprender el comportamiento de los materiales metálicos frente a la corrosión. En ella se ordenan los elementos de acuerdo a su potencial estándar de electrodo ( $E^\circ$ ), medido en voltios respecto al electrodo estándar de hidrógeno ( $E^\circ = 0,00 \text{ V}$ ). Este potencial refleja la tendencia de cada metal a perder electrones (oxidación) o a ganarlos (reducción).

Los metales con potenciales más negativos poseen una elevada tendencia a oxidarse, es decir, a actuar como ánodos en un par galvánico, mientras que aquellos con potenciales más positivos son más nobles y tienden a comportarse como cátodos, manteniéndose protegidos frente al ataque corrosivo (Giudice & Pereira, s.f., p. 8)

Desde el punto de vista eléctrico, este comportamiento define la dirección el flujo de electrones. Cuando dos metales distintos se ponen en contacto eléctrico dentro de un medio conductor (agua de mar), el metal con potencial más negativo actúa como ánodo, liberando electrones y corroyéndose progresivamente, mientras que el metal con potencial más positivo actúa como cátodo, recibiendo los electrones y permaneciendo protegido frente a la oxidación.

Según Giudice & Pereira (s.f) en la Tabla 1, el magnesio (-2,34 V) es uno de los metales menos activos como el hierro (-0.44 V). De forma similar, el hierro será anódico respecto al cobre (+0,345 V), pero catódico con relación al zinc (-0,762 V). Este principio constituye la base de la protección catódica con ánodos de sacrificio, donde se instala un metal más activo que el acero (como el zinc, el magnesio o el aluminio) para que se corroa en su lugar y mantenga a la estructura protegida en estado catódico.

Para Giudice & Pereira (2016) un adecuado ánodo de sacrificio debe cumplir ciertas propiedades eléctricas y físico químicas:

- **Potencial suficientemente negativo:** el ánodo debe poseer un potencial de disolución lo bastante bajo (entre -0,95 V y -1,7 V) para garantizar que la estructura metálica, normalmente acero, se mantenga polarizada a un valor protector cercano a -0.80 V. Un potencial excesivamente negativo provocaría un gasto innecesario de corriente y una disolución acelerada del ánodo.

- **Baja tendencia a la polarización:** el material o debe desarrollar películas pasivantes (como óxidos densos o capas aislantes) que interrumpan el flujo eléctrico. Un ánodo activo debe mantener una superficie capaz de liberar electrones de forma continua, asegurando un contacto galvánico estable con el electrolito.
- **Elevado rendimiento eléctrico:** se expresa con amperio-hora por kilogramo (A.h/kg) y representa la cantidad de corriente que el ánodo puede suministrar antes de consumirse totalmente. Cuanto mayor sea esta capacidad, más eficiente será el material en términos de vida útil y costo por amperio-año de protección.
- **Disolución uniforme:** el desgaste del ánodo debe producirse de manera homogénea sobre su superficie, evitando zonas de ataque localizado o pasivación parcial que comprometan la distribución de la corriente.
- **Facilidad de manufactura y costo razonable:** el material debe ser fácilmente fundible, moldeable y económicamente viable, de modo que su uso permita un sistema de protección duradero y de bajo mantenimiento.
- En conjunto, estas características aseguran que el ánodo se oxide de forma controlada, entregando electrones al metal protegido y manteniendo un potencial estable que impide su corrosión. Así, el principio eléctrico fundamental de la protección catódica es mantener la estructura en un estado catódico permanente, a expensas del sacrificio del material anódico.

#### 2.4.1.2 Características electroquímicas del Zinc, Magnesio y Aluminio.

Las exigencias técnicas y electroquímicas necesarias para que un material funcione de manera eficiente como ánodo de sacrificio son rigurosas y limitan considerablemente las opciones disponibles. En la práctica, solo el Zinc (Zn), el Magnesio (Mg), el Aluminio (Al) y sus respectivas aleaciones cumplen de forma simultánea las condiciones requeridas para desempeñar con éxito esta función en sistemas de protección catódica.

Esto se debe a que estos metales presentan potenciales electroquímicos suficientemente negativos, lo que les permite actuar como fuentes de electrones y generar una corriente galvánica capaz de mantener a la estructura metálica protegida (generalmente acero) en un estado catódico. En otras palabras, cuando se los conecta eléctricamente a la estructura,

estos materiales se oxidan preferencialmente, sacrificándose de manera controlada para impedir la corrosión del metal base.

A diferencia de otros elementos metálicos, el zinc, magnesio y aluminio poseen un equilibrio adecuado entre reactividad y estabilidad, lo que garantiza un desempeño eficaz en distintos medios (marinos, subterráneos o acuosos). Son lo suficientemente activos como para proporcionar la corriente protectora necesaria, pero no tan reactivos como para disolverse de manera violenta o incontrolada. (Giudice & Pereira, 2016., p. 227)

**Figura 2.10 Propiedades físicas y electroquímicas del zinc, magnesio y aluminio**

<i>Propiedades</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Al</i>
peso atómico (g)	24.32	65.38	26.97
peso específico a 20°C, g/cm <sup>3</sup>	1.74	7.14	2.70
punto fusión (°C)	651	419.4	660.1
resistividad eléctrica (Ω-cm)	4.46 10 <sup>-6</sup>	6.0 10 <sup>-6</sup>	2.62 10 <sup>-6</sup>
valencia	2	2	3
equivalente-gramo	12.16	32.69	9.00
equivalente electroquímico (mg/C)	0.12601	0.3387	0.0931
capacidad eléctrica teórica (A-h/kg)	2204	820	2982
capacidad eléctrica teórica (A-h/dm <sup>3</sup> )	3836	5855	8051
capacidad eléctrica práctica (A-h/kg)	1322	738	1491
rendimiento corriente (%)	60	90	50
consumo teórico (kg/A-año)	3.98	10.69	2.94
consumo teórico (dm <sup>3</sup> /A-año)	2.3	1.5	1.1
potencial normal a 25°C (V vs. Ag/AgCl)	-2.63	-1.05	-1.93
potencial disolución en agua de mar (V vs. Ag/AgCl)	-1.55	-1.05	-1.85

Fuente: Giudice & Pereira (2016)

**Tabla 2.2 Propiedades físicas y electroquímicas del zinc, magnesio y aluminio Giudice & Pereira (2016)**

Clasificación	Definición	Zinc	Aluminio	Magnesio	
<b>Propiedades Físicas</b>	<b>Peso atómico g/mol</b>	A menor peso atómico mayor átomos para oxidarse. Mide el grado de corrosión.	Moderada corrosión	Menor corrosión	Mayor corrosión
	<b>Peso específico g/cm3</b>	Mide la densidad del metal. Según el tamaño del ánodo es su nivel de protección	Mayor Densidad. Corrosión más lenta	Densidad Intermedia. Menor corrosión	Menor Densidad. Mayor corrosión
	<b>Punto de fusión</b>	Estabilidad térmica del metal. A menor punto de fusión mayor degradación	Menor estabilidad térmica. Fácil corrosión	Mayor estabilidad térmica	Media estabilidad térmica

		o deformación del metal.			
	<b>Resistividad Eléctrica</b>	A menor resistividad mayor conductividad eléctrica	Resistividad intermedia. Conductividad media	Menor resistividad. Mayor conductividad	Mayor resistividad. Menor conductividad
<b>Propiedades Electroquímicas</b>	<b>Valencia</b>	Determina cuantos electrones se transfieren cuando el metal se oxida. Mayor valencia Mayor liberación de electrones Mayor corriente protectora	2 electrones liberados durante la reacción electroquímica $Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$ $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$	2 electrones liberados durante la reacción electroquímica $Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$ $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$	3 electrones liberados durante la reacción electroquímica $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$

<p><b>Equivalente gramo</b></p> <p><b>Peso atómico /valencia</b></p>	<p>Masa de metal que se disuelve cuando pasa electricidad equivalente a 1 mol de electrones. Mientras menor sea el valor mas eficiente es el metal para generar corriente por unidad de masa.</p>	<p><b>32,69 g/equiv</b></p> <p>Requiere mayor masa para producir corriente eléctrica, tiene mayor estabilidad y mejor conductividad electrolítica en agua marina.</p>	<p><b>8,99 g/equiv</b></p> <p>A menor cantidad de aluminio produce la misma carga eléctrica que a mayor masa de Zinc y Mg, pero se debe controlar la formación de películas pasivas de oxido</p>	<p><b>12,6 g/equiv</b></p> <p>Genera una corriente protectora elevada. Ideal en ambientes de baja conductividad suelos o agua dulce</p>
<p><b>Equivalente electroquímico</b></p>	<p>Miligramos de metal que se disuelven por cada Culombio © de carga transferida. A menor</p>	<p>Menor eficiencia, necesita disolverse en mayor cantidad para generar</p>	<p>Mayor eficiencia. Libera mas corriente con poca masa disuelta</p>	<p>Eficiencia intermedia, produce buena corriente protectora, pero se disuelve</p>

		valor Mayor eficiencia eléctrica	misma corriente		más rápido.
	<b>Capacidad eléctrica teórica</b> (A.h/kg) o (A.h/dm <sup>3</sup> )	Cantidad máxima de electricidad que puede generar un metal al oxidarse. A mayor valor Mayor corriente protectora	Menor capacidad eléctrica, genera menor corriente eléctrica por kilogramo	Mayor capacidad eléctrica por lo que genera mayor corriente por kilogramo	Alta capacidad eléctrica pero menor que aluminio, produce una intensa corriente protectora en suelos secos o agua dulce
	<b>Capacidad eléctrica práctica</b> (A.h/kg)	Rendimiento del ánodo en servicio. Cuanta corriente genera efectivamente durante su uso	Menor capacidad eléctrica práctica. Reacción más lenta y controlada	Alta capacidad eléctrica práctica. Reacción menos eficiente.	Menor capacidad eléctrica práctica que el aluminio. Reacción más continua y eficiente.

<p><b>Rendimiento de corriente (%)</b></p> <p><b>Capacidad práctica/capacidad teórica *100</b></p>	<p>Porcentaje total de corriente eléctrica generada para proteger el metal. A mayor rendimiento mejor protección de la estructura anódica.</p>	<p><b>90%</b></p> <p>Mayor rendimiento o ya que la corriente que genera se utiliza en la protección</p>	<p><b>50%</b></p> <p>menor rendimiento o ya que genera fácilmente una capa pasiva de oxido, la cual impide que todos los electrones que son liberados participen en la protección</p>	<p><b>60 %</b></p> <p>Rendimiento intermedio ya que parte de la energía se pierde por la generación de hidrogeno limitando su eficiencia.</p>
<p><b>Consumo Teórico (Kg/A x año)</b></p>	<p>Cantidad de metal (kg) que se disuelve i cuando un ánodo suministra una corriente de 1 amperio durante un año</p>	<p>Mayor consumo, menor duración, pero proporcion a una corriente estable y de alto rendimiento</p>	<p>Consumo lento, excelente durabilidad por su baja tasa de disolución.</p>	<p>Mayor consumo que el aluminio, su vida útil es menor.</p>

		completo. A mayor valor, el metal se disuelve más rápido; A menor valor el metal se disuelve lentamente.	electroquímico		
	<b>Potencial Normal</b>	Indica la tendencia natural del metal a oxidarse o corroerse. Un potencial más negativo indica que el metal cede electrones con mayor facilidad, Un potencial menos negativo	Potencial - 1.05 V es menos negativo entrega menos corriente, pero es más estable y predecible	Potencial intermedio -1,93 V proporcion a una buena diferencia de potencial respecto a la estructura protegida	Potencial es más activo, pero se oxida con mayor facilidad - 2,63 V

		<p>tiende a ser menos propenso a la corrosión</p>			
	<p><b>Potencial de disolución en agua de mar</b></p>	<p>Determina la actividad real del ánodo. Mas negativo mayor es la tendencia del metal a oxidarse generando una corriente protectora mas intensa. Menos negativo genera un comportamiento mas estable, el metal se disuelve lentamente y entrega una</p>	<p>Metal menos activo, potencial más noble implica menor corriente de salida, pero mayor control y estabilidad a largo plazo</p>	<p>Muy activo, más estable, entrega una buena corriente con un bajo peso de consumo</p>	<p>Muy activo, genera un flujo de corriente elevado al inicio, pero puede sufrir pasivación parcial por formación de hidroxilos reduciendo su eficiencia</p>

		corriente moderada			
--	--	-----------------------	--	--	--

#### **2.4.2 Protección Catódica por Corriente impresa (ICPP)**

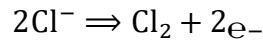
El sistema de protección catódica por corriente impresa se basa en el principio electroquímico de inducir a una estructura metálica a comportarse como cátodo dentro de una celda electroquímica. Para ello, se utiliza energía eléctrica suministrada por una fuente externa de corriente continua regulada, la cual proporciona la intensidad necesaria para desplazar el potencial del metal hacia valores más negativos, reduciendo su tendencia a la oxidación y, por ende, a la corrosión (Tecna ICE, s.f., párr.1)

La fuente de alimentación, generalmente un rectificador, que convierte la corriente alterna (AC) en corriente continua (CC) de bajo voltaje, la cual es controlada mediante un panel de regulación. Este panel permite ajustar los parámetros eléctricos de operación, tales como el voltaje y la densidad de corriente, de acuerdo con las características del medio electrolítico y del material estructural. De esta forma, se consigue alcanzar el potencial de protección óptimo, evitando tanto la sobreprotección, que puede generar desprendimiento de hidrogeno o daños en los recubrimientos.

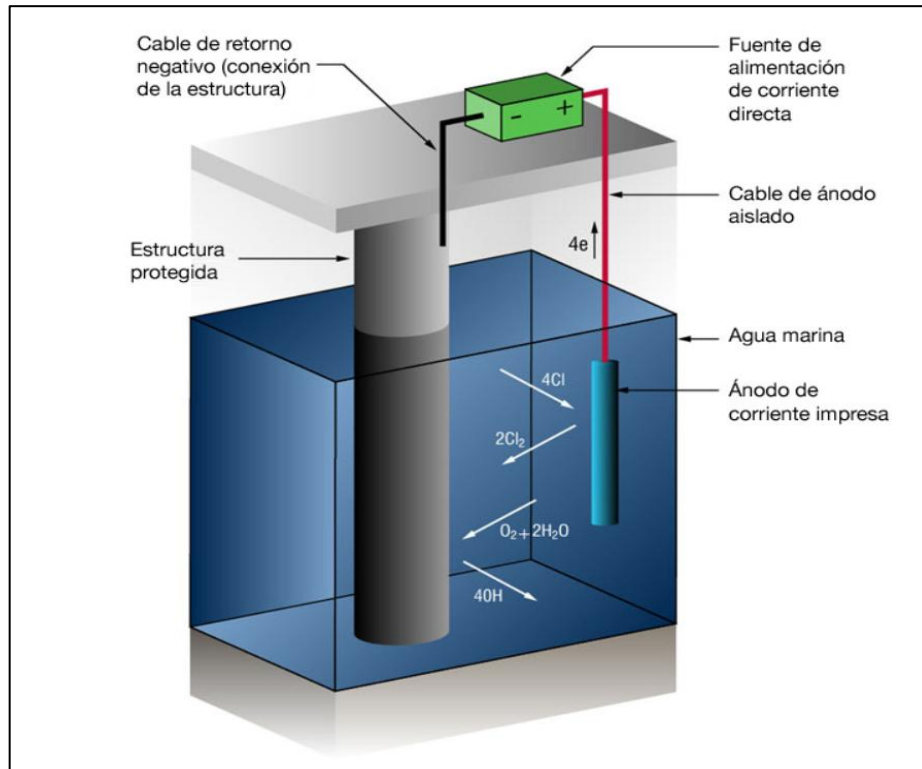
La corriente protectora se distribuye a través de ánodos inertes o no consumibles, diseñados para resistir la corrosión en condiciones severas. Estos ánodos actúan como dispersores de corriente dentro del electrolito y suelen estar fabricados con materiales de alta conductividad y gran resistencia química, tales como grafito, silicio ferroso, platino o titanio recubierto con óxidos metálicos mixtos (MMO). Su función principal es permitir el paso de la corriente hacia el medio sin sufrir pérdidas significativas del material, garantizando una operación estable y prolongada (Tecna ICE, s.f., párr.2).

La protección catódica por sistema de corriente impresa (ICPP) es un sistema que el puerto Candelaria utiliza como mecanismo de prevención en la corrosión. Baxter y Britton (2021) mencionan que, debido a las altas corrientes involucradas en mucho de los sistemas de agua marina, no es inusual utilizar este tipo estrategia. Dichos sistemas utilizan una clase

de ánodos que no se disuelven fácilmente en iones metálicos, si no que mantienen una reacción alternativa: la oxidación de los iones de cloruros disueltos.



**Figura 2.11 Protección catódica por corriente impresa**



Fuente: Baxter y Britton, DEEPWATER (2021)

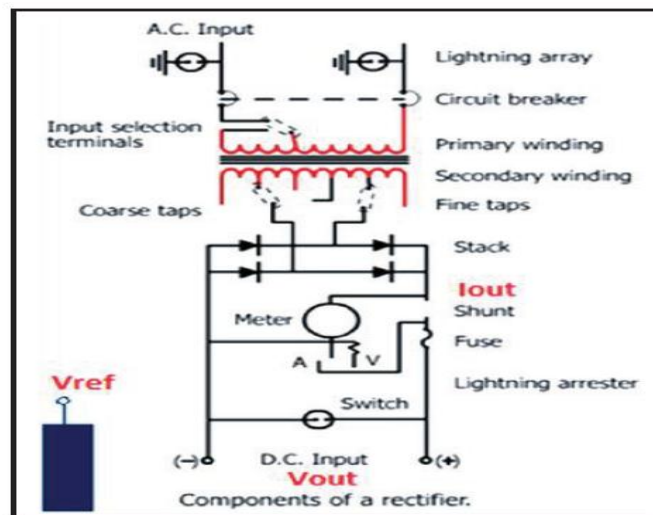
La Figura 2.11 Muestra el principio de funcionamiento de un sistema de protección catódica por corriente impresa, utilizado para evitar la corrosión de estructuras metálicas sumergidas. El sistema se basa en el suministro de una corriente continua proveniente de una fuente externa de energía, que impone un flujo controlado de electrones hacia la estructura metálica que se desea proteger.

En el esquema, la fuente de alimentación de corriente directa (rectificador) convierte la corriente alterna (AC) en corriente continua (CC). El polo negativo del rectificador se

conecta eléctricamente a la estructura protegida, mientras que el polo positivo se une al ánodo de corriente impresa, el cual se encuentra sumergido en el mismo medio electrolítico (agua marina). Este ánodo está fabricado con materiales de alta resistencia a la corrosión y buena conductividad eléctrica, tales como el titanio recubierto con óxidos metálicos mixtos (MMO),

Desde el punto de vista eléctrico, el rectificador impulsa electrones hacia la estructura metálica, lo que la mantiene a un potencial negativo y la transforma en cátodo dentro del circuito. De este modo, el acero o metal de base no se oxida, ya que no pierde electrones. En cambio, las reacciones de oxidación se producen en el ánodo, donde los iones de cloruro del agua marina se transforman en gas cloro ( $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$ ) y, en condiciones aeróbicas, también pueden generarse oxígeno mediante la reacción ( $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ ). Estas reacciones garantizan el cierre del circuito eléctrico, permitiendo que los electrones liberados en el ánodo viajen por el cable conductor hasta la estructura, donde se desarrollan las reacciones de reducción. En la superficie del metal protegido, el oxígeno disuelto en el agua reacciona con los electrones recibidos para formar iones hidroxilo ( $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ ), lo que mantiene el potencial de la estructura en un nivel seguro, normalmente entre -0,80 V y -1,10 V respecto a un electrodo de referencia. (Baxter & Britton, 2021).

**Figura 2.12 Rectificador ICCP**



Fuente: Rodríguez, Vera & Muñoz (2016)

En la Figura 2.12 se observa la entrada de corriente alterna (A.C. input) que atraviesa una serie de componentes destinados a proteger y regular el suministro eléctrico. El “circuit breaker” (interruptor termomagnético) actúa como dispositivo de seguridad, interrumpiendo el paso de corriente en caso de sobrecarga o cortocircuito. A continuación, la corriente pasa por el transformador, que este compuesto por dos bobinados: el primario y el secundario.

El bobinado primario recibe la corriente alterna y genera un campo magnético que induce, el bobinado secundario, una corriente de igual frecuencia, pero con diferente voltaje, ajustando según los requerimientos del sistema. Este proceso permite reducir o aumentar la tensión, garantizando que el voltaje de salida sea el adecuado para el proceso de rectificación.

El rectificador propiamente dicho está formado por un conjunto de diodos (stack), los cuales permiten que la corriente fluya en un solo sentido, eliminando el componente alterno y produciendo una corriente continua estable. En este punto, el circuito influye también un medidor (meter) que registra los valores de corriente (I) y voltaje (V), permitiendo controlar el nivel de polarización aplicado a la estructura protegida.

La corriente continua generada en la salida del rectificar (D.C. input) se distribuye a través de los terminales positivo y negativo. El terminal positivo se conecta con el ánodo inerte o semiactivo del sistema (titanio, grafito o silicio hierro). Mientras que el terminal negativo se conecta directamente a la estructura metálica protegida, que actúa como cátodo. De esta forma, los electrones fluyen desde la fuente hacia la estructura, polarizándola negativamente y deteniendo su tendencia natural a oxidarse.

En el circuito también se incluyen elementos de seguridad adicionales, como el Shunt, que permite medir con precisión la corriente de salida (Iout), el fusible (fuse), que protege contra sobre corrientes, y el light Ning arrester, que actúa como pararrayos, desviando las descargas eléctricas que pudieran dañar los componentes electrónicos.

El componente  $V_{ref}$  representa el electrodo de referencia, utilizado para medir el potencial real de la estructura con respecto al medio. Esta medición es esencial para verificar que el

potencial aplicado mantenga el metal dentro del rango de protección, generalmente como se mencionó entre -0,80 V y -1,10 V.

En conjunto, este sistema asegura un flujo controlado de corriente continua desde el ánodo hacia la estructura protegida, garantizando su estado catódico. El Rectificador es, por tanto, el corazón del sistema ICCP, ya que regula la intensidad y el voltaje de protección, asegurando una operación eficiente y estable a lo largo del tiempo.

La eficacia de un sistema de protección catódica por corriente impresa (ICCP), se fundamenta en los principios establecidos por la Ley de Faraday de la electrolisis. Esta ley describe la relación directa entre la cantidad de materia que se transforma en un proceso electroquímico y la carga eléctrica que circula a través del sistema. En el contexto de la protección catódica, este principio permite cuantificar la corriente necesaria para mantener una estructura metálica en un estado catódico libre de corrosión (Gopal, 2024).

Gopal (2024) menciona que “según la Ley de Faraday, la masa del metal que se disuelve o deposita en un electrodo es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa por el circuito”. Matemáticamente, esta relación se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$I = (W \times D) / (n \times F \times Z)$$

Donde:

- I representa la corriente eléctrica necesaria (amperios).
- W es la masa del metal implicado en el proceso electroquímico (gr o kg).
- D corresponde a la densidad del material o a una constante específica del metal.
- N indica el número de electrones intercambiados por átomo en la reacción redox.
- F es la constante de Faraday, cuyo valor es 96,487 C/mol, que representa la carga eléctrica contenida en un mol de electrones.
- Z es el factor de equivalencia del metal considerado.

Esta Ley explica que la protección contra la corrosión se logra cuando la corriente aplicada de la fuente externa (rectificador) compensa exactamente la tendencia natural del metal a oxidarse. Al imponer una corriente suficiente, los electrones proporcionados por el sistema se dirigen hacia la estructura metálica, reduciendo su potencial y transformándola

en cátodo. Así, se evita la pérdida de electrones característicos de la oxidación, deteniendo el proceso de corrosión.

En términos prácticos, este tipo de sistema permite ajustar y controlar la intensidad de la corriente protectora según las condiciones del entorno y el tamaño de la estructura. Su principal ventaja radica en la regulación precisa del potencial de protección, lo que garantiza un funcionamiento eficiente y prolonga la vida útil de la infraestructura expuesta a ambientes agresivos, como lo de naturaleza marina.

## **2.5 Normativa y estándares Internacionales.**

La aplicación de las protecciones catódicas está regulada por diversas normas internacionales, estas normas buscan estandarizar los criterios de diseño, instalación y operación, las más importantes son las siguientes:

- **NACE-SP0169 “National Association of Corrosion Engineers”** (NACE International,2013). Es uno de los principales referentes internacionales en materia de prevención de la corrosión. Su objetivo es establecer criterios técnicos y de seguridad en la correcta aplicación de la protección catódica en estructuras metálicas expuestas a suelos o medios acuosos, garantizando su integridad, confiabilidad y durabilidad operativa. El documento define el alcance, materiales aplicables y condiciones para la implementación del sistema, destacando que debe ser ejecutado por personal calificado en ingeniería de corrosión. Además, incorpora una terminología electroquímica estandarizada, como ánodo, cátodo, densidad de corriente y potencial polarizado, necesaria para uniformar los procedimientos técnicos y asegurar la coherencia en los informes y auditorías de control.

Entre sus apartados más relevantes, la norma establece los criterios para determinar cuándo una instalación requiere protección catódica, considerando parámetros como la resistividad del suelo, el contenido de humedad, sales y la influencia de corrientes. Así mismo, orienta el diseño físico y eléctrico de las tuberías, promoviendo la integración del control de corrosión desde la fase de

Ingeniería, lo que optimiza el mantenimiento y prologa la vida útil de las estructuras.

La NACE SP169 también detalla la correcta selección de recubrimientos externos, los valores eléctricos mínimos de protección (como el potencial -850 mV), y los métodos de cálculo para dimensionar el sistema, considerando la corriente requerida, tipo de ánodos y resistividad del terreno. Además, define buenas prácticas de instalación, monitoreo y mantenimiento, junto con medidas de mitigación frente a corrientes que pueden alterar la eficacia del sistema (NACE International, 2013, p 1-60).

- **Det Norse Veritas DNV-RP-B401 (DNV, 2021):** Es un organismo internacional independiente con sede en Noruega, especializado en certificación, aseguramiento técnico y desarrollo de normas para la industria marítima y energética. Constituye una referencia internacional esencial para el diseño y aplicación de sistemas de protección catódica mediante ánodos galvánicos en estructuras marinas y submarinas. Su edición más reciente, publicada en mayo del 2021 (DNV, 2021), establece los principios técnicos, parámetros de diseño y criterios de control necesarios para garantizar la integridad y durabilidad de las instalaciones metálicas al medio marino.

La norma define los principios electroquímicos de la protección catódica y los parámetros de diseño que aseguran la eficacia del sistema, como el potencial de protección, la densidad de corriente y la vida útil. Además, promueve la integración entre recubrimientos protectores y sistemas catódicos, estableciendo procedimientos normalizados para el cálculo de ánodos y la distribución de corriente en distintos ambientes. En el ámbito normativo, la DNV-RP-B401 (DNV,2021) tiene un papel clave en la gestión de integridad estructural, pues estandariza los procesos de diseño, inspección y mantenimiento, garantizando la fiabilidad y sostenibilidad de las estructuras metálicas expuestas a ambientes marinos agresivos. (DNV, 2021, p. 1-71)

## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS DE INDICADORES DE MANTENIMIENTO.

En el capítulo se calcularán y evaluarán los indicadores de mantenimiento de los equipos de protección catódica del muelle de embarcaciones de concentrado de cobre de Minera Candelaria, utilizando para ello los registros de mantención correspondientes a los 12 meses comprendidos entre enero y diciembre del año 2024.

Los indicadores de mantenimiento es una herramienta que se usa para medir y evaluar el desempeño y la eficiencia de las actividades de mantenimiento en una organización, estos se basan en datos concretos los que los hace fiables para evaluar el rendimiento, estos se establecen a través de diferentes parámetros específicos, como son los tiempos de inactividad, costo de mantenimiento etc. También permite evaluar de forma precisa la eficiencia de operaciones de mantenimiento, facilita la toma de decisiones de manera informada al proporcionar datos que respaldan la selección de estrategia y prioridades permitiendo un seguimiento constante del progreso hacia objetivos específicos.

#### 3.1. MTBF (tiempo medio entre fallos)

Es un indicador que consiste en medir el tiempo medio de funcionamiento entre cada falla de un equipo reparable, este parámetro permite determinar la disponibilidad y fiabilidad de los activos, ya que entrega un promedio del tiempo que una máquina puede operar antes de presentar una falla o avería, es uno de los indicadores de mantención más relevantes, porque un MTBF elevado refleja un incremento en la productividad y eficiencia de cada activo. Para administrarlo adecuadamente, se recomienda aplicarlo a cada equipo por separado, lo que facilita la planificación de intervenciones. El cálculo del MTBF se obtiene mediante la siguiente ecuación

$$MTBF = \frac{\text{tiempo total de operacion}}{\text{numero de fallas presentadas}}$$

En el caso de las protecciones catódicas, se registra que mensualmente fallan entre 4 y 5 equipos, para realizar el cambio de cada equipo se requieren 3 horas de trabajo. Para efectos de cálculo, se considera la condición más crítica, es decir 5 equipos con fallas por mes, si el mes tiene aproximadamente 730 horas y el reemplazo de cada equipo demanda 3 horas de trabajo, se obtiene que las protecciones catódicas eléctricas operan 715 horas en buen funcionamiento durante el mes, al calcular el MTBF con la ecuación previamente presentada, se obtiene lo siguiente:

- Si en un mes se cuenta con 715 horas de buen funcionamiento, en un período de 12 meses se acumulan 8.580 horas.
- Se presentan 5 fallas de equipo al mes, por lo que en 12 meses se registran 60 fallas en total.

La ecuación queda planteada de la siguiente manera:

$$\text{MTBF} = \frac{8.580}{60} = 143 \text{ horas}$$

De la ecuación se obtiene que el tiempo de funcionamiento de las protecciones catódicas eléctricas antes de que ocurra una falla es de 143 horas, esto significa que el equipo se mantiene en buen estado operativo durante aproximadamente 6 días antes de presentar una avería. Este valor corresponde a un MTBF reducido, considerando que la operación de estos sistemas debe ser continua y estable, esta situación compromete la integridad de las estructuras metálicas que dependen de la protección catódica, lo que evidencia la necesidad de mejorar las condiciones operativas mediante la implementación de mantenimientos preventivos y el análisis de las causas de las fallas recurrentes.

### 3.2. MTTR (tiempo medio de reparación)

Es el indicador que mide el tiempo medio requerido para reparar una falla en un equipo y restablecer su funcionamiento normal, este parámetro es fundamental en la gestión de mantenimiento, ya que su cálculo permite identificar la eficiencia con la que se responde ante una avería, es decir si la reparación se está realizando de manera rápida y efectiva, n MTTR elevado indica que el tiempo necesario para solucionar la falla es excesivo, lo que sugiere la necesidad de implementar acciones que permitan reducir este valor, por el contrario mientras más bajo sea el MTTR, mejor será el tiempo de respuesta. El cálculo del MTTR se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\text{MTTR} = \frac{\text{suma de los tiempos de reparacion}}{\text{numeros de intervenciones realizadas}}$$

Para reparar las fallas en las protecciones catódicas es necesario contratar una empresa externa que también cuente con personal especializado en buceo, debido a que estas labores deben realizarse bajo el mar. En este caso, el trabajo es ejecutado por la empresa Servisub. Tal como se mencionó anteriormente, el reemplazo de un equipo requiere 3 horas de intervención. Para efectos de cálculo, se considera la condición más crítica, correspondiente a 5 fallas mensuales.

- Se contabilizan 15 horas de mantención al mes, lo que en un período de 12 meses corresponde a un total de 180 horas.
- El número de intervenciones mensuales es de una por mes para efectuar el reemplazo de los equipos dañados, por lo que en 12 meses se realizan 12 intervenciones en total.

$$\text{MTTR} = \frac{180}{12} = 15 \text{ horas}$$

De la ecuación se obtiene que el tiempo medio de reparación es de 15 horas, lo cual no resulta ideal, ya que cada hora en que la protección catódica eléctrica permanece inhabilitada por mantención representa un riesgo de corrosión acelerada, considerando que las fallas ocurren con una frecuencia de 5 veces al mes y que el equipo se interviene una vez al mes para resolver todas las fallas acumuladas, por lo que a lo largo de un año implica que el equipo permanece 180 horas fuera de operación.

### 3.3 Disponibilidad

Es el indicador que refleja la capacidad de un sistema o equipo para operar correctamente y estar disponible cuando se requiere, su valor puede verse afectado por diversos factores, como la rapidez con la que se detectan y reparan las fallas, así como la efectividad de las prácticas de mantenimiento, ya sean preventivas o predictivas, en términos generales, la disponibilidad se determina a partir de los valores de MTBF y MTTR, calcular este indicador es fundamental para evitar tiempos de inactividad no planificados, identificar los períodos en que las máquinas están disponibles y prevenir pérdidas o retrasos en la producción, un valor elevado de disponibilidad contribuye a reducir costos, mejorar la planificación productiva, aumentar la confiabilidad y apoyar una toma de decisiones más acertada. La disponibilidad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \times 100$$

Como se obtuvo el MTBF que es 143 horas y el MTTR 15 horas se reemplaza en la ecuación.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{143}{143 + 15} \times 100 = 90\%$$

Una disponibilidad del 90% para las protecciones catódicas eléctricas resulta insuficiente, ya que estos sistemas requieren un funcionamiento continuo para evitar el incremento del

riesgo de corrosión acelerada. Para considerar una disponibilidad adecuada, el valor debería situarse por encima del 95%. Si bien no existe un porcentaje específico establecido como referencia para la disponibilidad óptima de una protección catódica, diversas normas, como NACE/AMPP SP0169 Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems e ISO 15589-1 y 15589-2 Cathodic Protection of Pipeline Transportation Systems, señalan que la protección catódica debe ser continua y estable. El incumplimiento de estas condiciones aumenta la probabilidad de perforaciones en las estructuras metálicas, reduce la vida útil del sistema y genera otros riesgos operativos.

### **3.4. Confiabilidad**

Es la probabilidad de que un equipo desempeñe su función bajo sus condiciones de operación en un periodo de tiempo determinado, se basa en el estudio de fallos en equipo o componentes por ejemplo si el equipo no tiene fallos quiere decir que el equipo es 100% confiable, al calcular la confiabilidad se obtiene información importante como la condición del equipo, la probabilidad de fallo, la duración del equipo, tiempo medio de posible fallo etc. Existen algunos factores importantes que se deben considerar para poder pronosticar la confiabilidad de los equipos o componentes es la tasa de fallo, el nivel de operación del equipo, cantidad de ciclo de conexión y desconexión, número de horas de funcionamiento, las condiciones del entorno y distribución del fallo, para calcular la confiabilidad se realiza con la siguiente ecuación.

$$\text{Confiabilidad} = R(T) = e^{-\lambda \times t}$$

Donde:

- $\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}}$
- $t = \text{tiempo}$
- $e = \text{número de Euler (2,71)}$

Para calcular la confiabilidad actual de las protecciones catódicas, se utiliza un MTBF de 143 horas. Considerando que un mes cuenta con aproximadamente 730 horas, la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} = \frac{1}{143} = 0,0069$$

$$R(730) = 2,71^{-0,0069 \times 730}$$

$$R(730) = 0,0065$$

$$\text{Confiabilidad} = 6,5\%$$

El sistema de protección catódica en este caso entrega una confiabilidad del 6.4%, este resultado indica que existe una probabilidad del 6.4% de que el equipo opere sin presentar fallas o viéndose de otro punto de vista hay una probabilidad de un 93.6% de que el equipo falle antes de cumplir su tiempo promedio, es un valor bajo para un sistema que debe operar de forma continua debido a que estos equipos están diseñados para trabajar meses sin fallas por lo que la confiabilidad esperada debe ser superior al 70%, evidenciando un comportamiento inestable y una probabilidad alta de fallas recurrentes, considerando los resultados del MTBF y el MTTR el sistema no garantiza una protección anticorrosiva adecuada, permaneciendo en riesgo durante la mayor parte de su operación.

### **3.5. CMF (costo de mantenimiento sobre la facturación)**

Indicador que relaciona los gastos totales de mantenimiento con los ingresos generados por la producción, evalúa si la inversión en el mantenimiento esta ajustado con la rentabilidad del negocio debido a que el costo de mantenimiento puede afectar directamente en el precio del producto ya que si se gasta mucho dinero en mantenimiento el precio del producto será más alto, este costo de mantenimiento involucra todos los gastos como, por ejemplo, personal, materiales, contratación de servicios externos, perdida de facturación, etc. Para realizar el cálculo del CMF se realiza con la siguiente ecuación.

$$\text{CMF} = \frac{\text{coste total de mantenimiento}}{\text{facturación en bruto}} \times 100$$

Para el cálculo de CMF se tiene que el coste total del mantenimiento es de \$2.400.000 pesos y la factura en bruto que es el monto total de que gana la empresa en un tiempo x que no incluye los impuestos, por lo que la facturación en bruto de la empresa en un mes es de \$140.000.000 de pesos aproximadamente teniendo en cuenta solo cuantas toneladas de cobre se embarcaron, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$\text{CMF} = \frac{2.400.000}{140.000.000} \times 100$$

$$\text{CMF} = 1,71\%$$

El porcentaje del costo de mantenimiento sobre la facturación es de 1.71% esto quiere decir que el 1.71% de los ingresos generados se destinan a cubrir los costos de mantenimiento de sistema de protección catódica, es un porcentaje bueno considerando que bajo el 2% se considera muy eficiente en costos, puede indicar un control adecuado del gasto de mantenimiento, un buen uso del presupuesto asignado y un mantenimiento económico en comparación con lo facturado, pero aunque el porcentaje de CMF sea bueno no indica que el mantenimiento sea el adecuado se puede ver con los indicadores anteriores que el desempeño de las protecciones catódicas es deficiente por lo que en este caso el CMF indica un mantenimiento insuficiente, falta de intervención preventiva, falta de inversión para mejorar la confiabilidad y posible deterioro futuro del sistema por falta de recursos por lo que es necesario aumentar la inversión en actividades de mantenimiento preventivo y correctivo para así poder mejorar la confiabilidad y disponibilidad del sistema de protección catódica.

### 3.6. CPMV (costo de mantenimiento sobre valor de reposición)

Indicador que compara el costo anual destinado a la mantención con el valor de reposición del activo, ayuda a poder planificar los presupuestos a largo plazo, a ver cuál es la mejor opción si es reemplazar el equipo por uno nuevo o reparar, cuanto menor sea el porcentaje de este indicador es mejor debido a que quiere decir que no es necesario reemplazar la maquina o equipo, enfocado en el área de la industria es muy importante manejar este costo ya que estos datos pueden estimar el precio de mantener una planta, por ejemplo cuánto costará mantener una planta antigua o cuánto costará una planta nueva durante sus primeros 25 o 30 años de vida, para realizar el cálculo del CPMV se realiza con la siguiente ecuación.

$$\text{CPMV} = \frac{\text{coste total de mantenimiento}}{\text{precio de compra de los nuevos equipos}} \times 100$$

Para el cálculo de CPMV se tiene que el coste total del mantenimiento es de \$2.400.000 pesos y el precio de 1 ánodo de sacrificio es de \$3.000.000, en el mes fallan 5 ánodos de sacrificio por lo que se tendrían que comprar 5 ánodos quedando en un precio de \$15.000.000 de pesos si se lleva a la formula queda lo siguiente:

$$\text{CPMV} = \frac{2.400.00}{15.000.000} \times 100$$

$$\text{CPMV} = 16\%$$

El porcentaje de CPMV (costo de mantenimiento sobre el valor de reposición) es de un 16% lo que indica que el costo anual destinado a mantener el sistema de protecciones catódicas equivale a un 16% del valor total necesario para reemplazar dicho equipo, es un valor alto basándose en los estándares de gestión de activos, ya que normalmente un CPMV superior al 15% sugiere que el equipo está siendo costoso de mantener en relación con su valor de reposición, analizándolos con los resultados de los otros indicadores se

evidencia que el sistema presenta un desempeño deficiente, con frecuentes fallas y tiempos de reparación prolongados. Por lo tanto, el CPMV del 16% no solo refleja un alto costo de mantenimiento, sino que también indica una ineficiencia económica por lo que la opción de reponer con nuevos equipos no es viable por lo que se debe mejorar el indicador CMF.

### **3.7. Distribución por tipos de mantenimiento**

Indicador que expresa en porcentaje la aplicación de cada tipo de mantenimiento que se esté desarrollando que puede ser correctivo, preventivo o predictivo, estos porcentajes pueden variar los dependiendo del tipo de instalación o equipo y se recomienda que el mantenimiento correctivo no planeado no supere el 20%.

Considerando los resultados de los indicadores se muestra que el 100% de las actividades de mantenimiento realizadas es de forma correctiva por lo que no se realiza intervenciones preventivas ni predictivas, esta estrategia de mantención explica los resultados obtenidos en los demás indicadores de mantenimiento: baja confiabilidad (6.4%), baja disponibilidad (90%), MTBF reducido (143 h) y MTTR elevado (15 h), en sistemas críticos como son las protecciones catódicas la ausencia de mantenimiento preventivo o predictivo incrementa los riesgos de corrosión, reduce la vida útil de los activos y genera interrupciones costosas.

### **3.8. Resumen de resultados de indicadores de mantención**

En la tabla 3.1 se indica de manera resumida los valores y análisis de indicadores de mantenimiento de protecciones catódicas eléctricas con los valores actuales aproximados antes de la realización del proyecto.

**Tabla N°3.1 Resumen de indicadores sin proyecto**

Indicador	Valor	Interpretación	Implicación
MTBF	143 h	Tiempo promedio entre fallas	Indica fallas frecuentes, bajo MTBF refleja baja confiabilidad del equipo
MTRR	15 h	Tiempo promedio de reparación	Reparaciones relativamente largas, impactando disponibilidad
Disponibilidad	90%	Porcentaje de tiempo que el equipo está operativo	Baja para un sistema crítico, significa 10% del tiempo fuera de servicio
Confiabilidad	6.4%	Probabilidad de operar sin fallas durante el intervalo de MTBF	Muy baja, alto riesgo de falla durante operaciones normales
CMF	1,71%	Porcentaje de facturación destinado a mantenimiento	Bajo costo financiero, pero no refleja desempeño; mantenimiento insuficiente
CPMV	16%	Porcentaje del valor del equipo destinado a mantenimiento	Alto costo relativo, indica que mantener el equipo es caro debido a fallas frecuentes
Distribución por tipo de mantenimiento	100% correctivo	Todo el mantenimiento se realiza después de fallas	Estrategia correctiva, aumenta riesgo de paradas inesperadas y reduce confiabilidad

## **CAPÍTULO IV**

### **DESARROLLO DE PROTOCOLO DE TRABAJO**

Para la elaboración del presente protocolo fue necesario coordinar y articular diversos factores técnicos y administrativos dentro de la organización. En una primera instancia,

se sostuvo una reunión con el Departamento de Mantenición, en la cual se presentó el proyecto de tesis junto con sus objetivos y alcances. Durante esta reunión, dicho departamento facilitó documentación relevante del puerto, incluyendo información estructural, antecedentes de construcción, planos eléctricos y planillas históricas de mediciones recopiladas a lo largo del tiempo.

Posteriormente, y una vez analizada la información entregada, se confeccionaron calendarios de asistencia para acompañar a los operadores responsables de las actividades de medición en los sistemas de protección catódica. Durante estas visitas a terreno, se registraron detalladamente las etapas del procedimiento operativo, se identificaron los riesgos y peligros asociados a la labor, y se verificaron las herramientas y equipos adecuados para la ejecución eficiente y segura de las tareas.

Tras la recopilación de la información en campo, se solicitó al Departamento de Operaciones el acceso a los procedimientos internos de la compañía. Una vez aprobada la solicitud y recibidos los documentos formales, se procedió a elaborar el protocolo siguiendo estrictamente los estándares corporativos establecidos, incluyendo formato, lineamientos gráficos, tipografía y estructura documental.

Finalmente, el documento resultante fue sometido a diversas revisiones y ajustes, tras lo cual se integró como anexo técnico dentro del proyecto de tesis para su correspondiente evaluación por parte del profesor guía.



**Candelaria**  
lundin mining

**Manual de Procedimientos Gerencia Operaciones Procesamiento Puerto Punta  
Padrones**

**“Medición de parámetros eléctricos de protecciones catódicas”**

<b>Revisión</b>	<b>Fecha</b>	<b>Preparó</b>	<b>Revisó</b>	<b>Aprobó</b>	<b>Autorizó</b>
<b>1</b>	<b>Julio 2025</b>				

## **1.OBJETIVO**

Es política y compromiso de CCMC proteger las personas, medio ambiente y equipos, por lo que este procedimiento entrega normas y estandariza los pasos requeridos para controlar los riesgos críticos en la “Medición de parámetros eléctricos en protecciones catódicas”, con el objetivo que se pueda realizar este trabajo de forma segura e informada.

## **2.ALCANCE**

Este procedimiento se aplica a todo el personal de mantención de C.C. Minera Candelaria.

## **3.DOCUMENTOS RELACIONADOS**

## **4.DEFINICIONES**

Protección Catódica: Método electroquímico utilizado para prevenir la corrosión de metales, especialmente en estructuras enterradas o sumergidas.

TAP: Es una conexión intermedia en el devanado que permite ajustar el voltaje de salida o entrada del transformador sin cambiar su diseño físico.

Dolphin: Es una estructura compuesta por un grupo de pilotes hincados en el lecho marino, conectados entre sí por encima del nivel del agua.

Chaza: Una estructura auxiliar o plataforma construida para apoyar el ingreso hacia embarcaciones menores.

## **5.RESPONSIBILIDAD**

### **5.1 Supervisores**

5.1.1 Es responsabilidades de los supervisores de puerto punta padrones conocer, instruir, velar, cumplir y hacer cumplir los procedimientos involucrados en esta labor.

5.1.2 Debe verificar previamente que se cuente con los recursos adecuados (equipos y materiales requeridos), que se haya cumplido con las medidas de seguridad, para la correcta ejecución de la tarea.

5.1.3 Las situaciones no consideradas en el presente procedimiento, deberán ser evaluadas por el supervisor del área, quien determinará la forma correcta de continuar con el trabajo. En tal caso deberá realizar la identificación del riesgo y confeccionar el análisis de riesgo operacional (ARO) o procedimiento de trabajo seguro, el cual debe considerar todas las medidas de control a los riesgos identificados e informar a todo el personal involucrado.

## **5.2 Operadores**

5.2.1 Es responsabilidad de todos los empleados de C.C. Minera Candelaria, velar, cumplir y hacer cumplir los procedimientos involucrados en esta labor.

5.2.2 Es responsabilidad de todos los empleados de C.C. Minera Candelaria, portar sus equipos de protección personal (EPP) adecuados para este tipo de trabajo, en especial su chaleco salvavidas.

5.2.3 Es responsabilidad de los operadores mantener sus equipos de medición en buen estado y calibrados.

5.2.4 Es responsabilidad de los operadores registrar los datos obtenidos en las planillas creadas especialmente para este trabajo y enviarlas a su jefatura a no más tardar el término del día.

## 6.MODO OPERATIVO

### 6.1 identificación de peligros y Riesgos.

PELIGRO	RIESGO	CONTROL
Tránsito por pisos irregulares	Caída al mismo o distinto nivel, golpeado contra.	Mantener áreas despejadas. Estar atento a las condiciones del piso
Caída al Mar.	Ahogamiento	Estar atento a condiciones del mar, al momento de ingresar y salir de lancha de apoyo, chaleco salvavidas.
Condiciones climáticas adversas	Insolación, golpes de calor, Velocidad de viento, heladas, lluvia.	Bloqueador Solar, lentes, chaqueta térmica, primera capa protección UV
Trabajos en altura	Caídas desde distinto nivel	Arnés, Cola, ganchos, retráctil, Barrote de anclaje, cinta anti-trauma
Tránsito vehicular	Atropello, colisión	Respetar señalética, respetar velocidad, respetar paso peatonal.

Electrocución	Quemaduras, desfibrilación cardiaca.	Epp especializados dieléctricos
Aprisionamiento	Daño en manos o pies, golpeado por.	No intervenir equipos sin pruebas de LOTOTO
Aplastamiento		No transitar por lugares habilitados, informar entrada y salida de puerto.
Atrapamientos en puntos móviles	Lesiones por atrapamiento o amputación	Guardas de protección en poleas y rodillos, Procedimiento de bloqueo y etiquetado (LOTOTO) Inspecciones diarias, Capacitación en operación segura

## **6.2 Medición de Parámetros Eléctricos en Losa muelle.**

6.2.1 El operador deberá acercarse a muelle con todos sus equipos de protección personal (EPP) y equipos de medición de parámetros eléctricos.

6.2.2 Antes del ingreso se deberá acreditar al ingreso de garita muelle y recibir el visto bueno de ingreso del jefe de turno vía radial.

6.2.3 El operador deberá realizar una limpieza general del equipo.

6.2.4 Al momento de ingresar a losa muelle y acercarse al punto de medición de parámetros eléctricos, deberá retirar gratings de protección con cuidado de no atrapar sus dedos con la estructura.

6.2.5 El operador deberá realizar limpieza y reapriete de conexiones.

6.2.6 El operador deberá realizar chequeo general del “Tap” del transformador y registro de este.

6.2.7 El operador deberá chequear la condición general de fusibles.

6.2.8 Al momento de realizar las mediciones deberá dejar anotados cada uno de los valores en planilla de ingreso de datos.

6.2.9 El operador deberá instalar el multímetro digital con selector en mVolts, el polo positivo del instrumento deberá estar conectado al punto de prueba y el polo negativo al electrodo de referencia.

6.2.10 El registro de las lecturas de las mediciones se anotarán de forma separada, por una parte, las mediciones con instrumento analógico y por otra la lectura con instrumento digital.

6.2.11 Todo material desecho que se genere por esta tarea deberá ser depositado en los contenedores destinados para esto.

6.2.12 Al momento de terminar la labor y al retirarse de losa muelle, el operador deberá comunicarle vía radial al jefe de turno su salida y esperar confirmación.

### **6.3 Medición de parámetros eléctricos de Protecciones catódicas en Postes de amarre y Boya.**

6.3.1 Se deberá coordinar con jefe de turno puerto la embarcación de servicio para iniciar trabajos de medición de parámetros eléctricos en postes de amarre y boya.

6.3.2 El Operador deberá acercarse a muelle con todos sus equipos de protección personal (EPP), chaleco salvavidas y equipos de medición de parámetros eléctricos.

6.3.3 Antes del ingreso se deberá acreditar al ingreso de garita muelle y recibir el visto bueno de ingreso del jefe de turno vía radial.

6.3.4 El operador deberá acercarse al Dolphin número cuatro, abrir candados y bajar escala para acceder a chaza.

6.3.5 El operador deberá ingresar a la embarcación de servicio, siempre teniendo cuidado de no caer al mar.

6.3.6 Una vez dentro de la embarcación de servicio, se dirigirá hacia las estructuras de los postes de amarre o boya, una vez ahí y con cuidado de no caer al mar, deberá acceder a la chaza de dicho poste de amarre y subir hacia la losa, en caso de la boya deberá subir a su estructura tomando todas las precauciones de no caer al mar.

6.3.7 El Operador en losa de poste de amarre o boya deberá ubicar el punto de prueba.

6.3.8 El operador deberá instalar el multímetro digital con selector en mVolts, el polo positivo del instrumento deberá estar conectado al punto de prueba y el polo negativo al electrodo de referencia.

6.3.9 El operador deberá realizar como mínimo cuatro lecturas alrededor del punto de prueba y registrar los valores negativos.

6.3.10 El registro de las mediciones se anotarán de forma separada, por una parte, las cuatro mediciones en postes de amarre y su promedio y las cuatro mediciones en boya con su respectivo promedio.

6.3.11 Una vez realizadas todas las mediciones, la embarcación de servicio se acercará a chaza de Dolphin cuatro para que el operador pueda bajar de ella, el operador hará esta maniobra tomando las precauciones de no caer al mar.

6.3.12 El operador una vez se encuentre en la chaza del Dolphin cuatro, deberá subir por las escaleras, asegurarlas y cerrar el ingreso al Dolphin con candado.

6.3.13 Todo material desecho que se genere por esta tarea deberá ser depositado en los contenedores destinados para esto.

6.3.14 Al momento de terminar la labor y al retirarse de losa muelle, el operador deberá comunicarle vía radial al jefe de turno su salida y esperar confirmación.

## **7. SEGURIDAD, SALUD OCUPACIONAL Y MEDIO AMBIENTE.**

7.1 Se debe mantener una actitud proactiva respecto a la protección del medio ambiente.

7.2 Conservar espacio de trabajo limpio y depositar la basura en los lugares habilitados para tal efecto.

7.3 Manejo responsable de residuos y basuras, depositar en tambores y contenedores habilitados según corresponda.

7.4 Se debe reportar accidentes medio ambientales que puedan ocurrir, tanto durante el trabajo a realizar, como el provocado por terceros que efectúen trabajos en el área.

7.5 Cualquier trabajo que requiera Intervenir un equipo, se deberá realizar procedimiento de bloqueo LOTOTO

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS ECONÓMICO Y TÉCNICO DEL PROTOCOLO

En el capítulo V se llevará a cabo un análisis económico y técnico del protocolo de mantenimiento aplicado a las protecciones catódicas eléctricas del puerto de embarque de la empresa Candelaria. Asimismo, se estimarán los resultados esperados en los indicadores de mantenimiento tras la implementación del nuevo protocolo, y se realizará una comparación directa con los indicadores obtenidos antes de su aplicación, esta evaluación permitirá determinar el impacto del nuevo procedimiento en la eficiencia operativa y en la gestión global del mantenimiento.

#### 5.1 Evaluación del cumplimiento normativo

El protocolo de mantención cumple con los estándares de la empresa Candelaria, ya que se basa en un protocolo interno que fue revisado por el área de mantención de la compañía, con el fin de asegurar el cumplimiento de los estándares corporativos establecidos, incluyendo el formato, los lineamientos gráficos, la tipografía y la estructura documental.

#### 5.2 Análisis de indicadores de mantenimiento

Dado que el nuevo protocolo de mantención aún no ha sido implementado, se realizará una estimación del comportamiento esperado de los indicadores de mantenimiento una vez que el protocolo entre en operación, esta proyección permitirá anticipar posibles mejoras en el desempeño técnico y operativo del sistema, considerando los efectos previstos de las nuevas actividades y procedimientos incorporados.

- **MTBF:** Se estima que el valor del MTBF aumentará de manera significativa con la implementación del nuevo protocolo de mantención, esto se debe a la incorporación de un plan de mantenimiento preventivo que permitirá anticipar posibles fallas, por lo que se proyecta una disminución de la tasa de fallas, pasando de cinco fallas mensuales a un máximo de una o dos, como resultado, el equipo alcanzaría aproximadamente 724 horas de buen funcionamiento al mes, equivalentes a 8.688 horas anuales, considerando que, como máximo dos equipos presentarían fallas cada mes, es decir 24 fallas al año y aplicando la fórmula de

MTBF descrita en el capítulo III, se obtiene un MTBF de 362 horas de operación sin fallas, lo que corresponde aproximadamente a 15 días de buen funcionamiento.

- **MTTR:** Dado que se estima una reducción de las fallas del equipo a dos por mes, se proyecta un tiempo de mantención de aproximadamente 6 horas mensuales, lo que equivale a 72 horas en un período de doce meses. Las intervenciones continuarían realizándose una vez al mes, sin embargo, se espera que la cantidad de fallas a reparar sea menor, aplicando la fórmula del MTTR, se obtiene un tiempo medio de reparación de 6 horas.
- **Disponibilidad:** Este indicador de mantenimiento se relaciona directamente con los resultados del MTBF y el MTTR. Dado que ambos indicadores presentan mejoras, la disponibilidad del equipo también debería reflejar un aumento en su porcentaje. Aplicando la fórmula correspondiente al indicador de disponibilidad, se obtiene un valor de 98,3%.
- **Confiabilidad:** La confiabilidad se encuentra directamente relacionada con el MTBF, por lo que, al incrementarse este indicador, la confiabilidad del equipo también debería mejorar, considerando que se proyecta un MTBF de 362 horas y aplicando la ecuación de confiabilidad, se obtiene que, con el nuevo protocolo de mantención, la confiabilidad alcanzaría un 13,4% evidenciando una mejora respecto a la condición anterior.
- **CMF y CPMV:** En el caso del costo de mantenimiento sobre la facturación y del costo de mantenimiento respecto al valor de reposición, no se observarán cambios significativos. Esto se debe a que la empresa continuará incurriendo en los mismos gastos, ya que requiere de una empresa externa para la reparación de los equipos. Aunque la cantidad de fallas disminuya, el proveedor externo mantendrá los mismos costos de servicio. Al comparar ambos indicadores, se concluye que a la

empresa le sigue resultando más conveniente mantener el costo de mantenimiento sobre la facturación.

- Distribución por tipo de mantenimiento: Con la implementación del nuevo protocolo de mantención, se estima que la empresa dejará de depender exclusivamente del mantenimiento correctivo y aumentará de forma considerable las actividades de mantenimiento preventivo, en consecuencia, se proyecta que, dentro de un año, el porcentaje de mantenimiento preventivo experimente un incremento significativo, mientras que la necesidad de mantenimiento correctivo disminuya.

### 5.2.1 Resumen de comparación de indicadores

En la Tabla 5.1 se comparan los resultados de los indicadores de mantenimiento registrados antes de la implementación del nuevo protocolo con las estimaciones proyectadas tras su aplicación.

**Tabla 5.1 comparación de resultados de indicadores con proyectos y sin proyecto**

Indicador	Valor sin proyecto	Valor con proyecto
MTBF	143 h	362 h
MTTR	15 h	6 h
Disponibilidad	90%	98.3%
Confiabilidad	6,4%	13,4%
CMF	1,71%	1,71%
CPMV	16%	16%

Distribución por tipo de mantenimiento	100% correctivo	Aumento de porcentaje de mantenimiento preventivo
--	-----------------	---

### 5.3 Vida útil

Se estima un aumento en la vida útil del sistema de protecciones catódicas a partir de la implementación del nuevo protocolo de mantenimiento, debido a que este incorpora actividades preventivas que antes no se realizaban, bajo el procedimiento anterior, las intervenciones eran exclusivamente correctivas y no existía un control del estado de los ánodos, rectificadores o cables de continuidad, lo que favorecía la aparición de fallas y aceleraba la corrosión.

El nuevo protocolo establece inspecciones periódicas, medición de potenciales y análisis de tendencias, permitiendo detectar tempranamente anomalías y aplicar correcciones antes de que se generen daños mayores. Esta gestión planificada reduce la probabilidad de fallas inesperadas y asegura un funcionamiento continuo del sistema, lo que contribuye a extender la vida útil tanto de los equipos de protección catódica como de las estructuras metálicas que protege.

### 5.5 Requerimientos técnicos

En la Tabla 5.2 se presentan los tipos de requerimientos técnicos y se indica si el nuevo protocolo cumple o no con cada uno de ellos.

**Tabla N°5.2 Resumen de los requerimientos técnicos**

<b>Tipo de Requerimiento</b>	<b>Definición</b>	<b>Cumple / No cumple</b>
Funcionales	Establece protocolos y secuencia de las actividades operacionales	Cumple
Operacionales	Establece los recursos necesarios y el periodo de tiempo que se debe realizar el protocolo de mantención	Cumple
Seguridad	Se identifican los peligros, las medidas preventivas y el cumplimiento de normativas de seguridad y salud	Cumple
Normativo y corporativos	Cumple con los estándares internos de la empresa	Cumple
Recursos	Se determinan la disponibilidad de herramientas, materiales y competencias del personal para realizar la actividad	Cumple
Registro y control	Establece documentación de respaldo de las actividades a realizar	Cumple

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIÓN

El desarrollo de este estudio permitió comprender en profundidad el principio de funcionamiento de las protecciones catódicas utilizadas en un puerto de embarque, junto con la relevancia que tiene el flujo eléctrico dentro de la estructura de la defensa del muelle y su interacción con el sistema de protección. El análisis teórico entregó una visión clara sobre la criticidad de estos equipos y la necesidad de mantenerlos de manera adecuada y sostenida en el tiempo.

La recopilación de datos en terreno, sumada al análisis de costos y registros históricos, evidenció que la estrategia de mantención aplicada hasta ahora no era la más eficiente. Los indicadores de mantenimiento utilizados, MTBF, MTTR, disponibilidad y confiabilidad, reforzaron esta conclusión al mostrar un desempeño por debajo de lo esperado.

Con el fin de mejorar esta situación, se diseñó un protocolo de mantención orientado a un enfoque preventivo y predictivo para las protecciones catódicas. Su elaboración se basó en entrevistas con los operadores responsables y en observaciones directas en terreno. Este protocolo se estructura en un procedimiento de trabajo que detalla las etapas a seguir, identifica los riesgos y peligros asociados, especifica los elementos de protección personal necesarios y subraya las medidas para resguardar el medio ambiente.

Además, se desarrolló una planilla de trabajo inteligente que facilita al personal la identificación de distintos niveles de desgaste en los equipos, permitiendo programar intervenciones de manera más eficiente. Esta herramienta contribuye a una planificación de mantención más precisa, reduce tiempos de intervención y disminuye los costos asociados, mejorando así la gestión global de estos sistemas.

Se recomienda avanzar en una estrategia de mantención en puerto, la oxidación es un problema muy frecuente en este tipo de estructuras portuarias y muy dañina en el largo plazo, como ya se ha mencionado en este estudio, el mantenimiento reactivo no es opción para poder mantener bien controlado el avance de este fenómeno.

## BIBLIOGRAFIA

- Brebi, C., & Irarrázabal, A. (2018). Informe de evaluación de integridad: Puerto Angamos, Mejillones. [Informe técnico]. Puerto Angamos. <https://es.scribd.com/document/393613159/Evaluacion-Integridad-Pto-Angamos-Rev-2>
- Baxter, R., & Britton, J. (s.f.). ¿Qué es y cómo funciona la protección catódica? En Protección Catódica: Recuperado de <https://cathodicprotection101.com/proteccion-catodica.htm>
- Calderón Freire, E. F., Cuadrado Pumalema, C. F., Punina Guerrero, D. J., & Hidalgo Viteri, L. C. (2024). Atlas de corrosión (Cap. 1, p. 25). Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador (CIDE). <https://doi.org/10.33996/cide.ecuador.AC2679048>
- Clavijo Cáceres, C. C. (2014). Sistemas de protección catódica para tuberías enterradas de transmisión de gas natural [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos
- Corrosionpedia. (2024). Impressed current cathodic protection (ICCP). Recuperado el 4 de noviembre de 2025, de <https://www.corrosionpedia.com/definition/1237/impressed-current-cathodic-protection-iccp>
- DNV. (2021). DNV-RP-B401: Cathodic protection design (Recommended Practice, ed. May 2021). Det Norske Veritas AS. <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-rp-b401-cathodic-protection-design>
- Elsner, C.I (2003). Corrosión de las estructuras metálicas. Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Pinturas (CIC-CONICET).
- Enciclopedia Británica. (2025). Ecuación de Arrhenius. Recuperado de <https://www.britannica.com/science/Arrhenius-equation> [08 septiembre 2025]
- ESC Group. (2021). Entrega de soluciones de ingeniería de alto grado al mercado global durante casi 40 años [Imagen]. Recuperado de

<https://www.escglobalgroup.com/es/post/qu%C3%A9-es-un-nodo-de-sacrificio>

Giudice, C. A., & Pereyra, A. M. (s. f.). Protección catódica con ánodos galvánicos. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata. Recuperado de <https://s1c9970f41675ea15.jimcontent.com/download/version/1510332827/module/13699221678/name/proteccioncatodica.pdf>

Giúdice, C. A., & Canosa, G. (2016). Protección de materiales metálicos (1.ª ed.). edUTecNe – Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata. [https://www.edutecne.utn.edu.ar/pinturas\\_recubrimientos/proteccion\\_materiales\\_metalicos.pdf](https://www.edutecne.utn.edu.ar/pinturas_recubrimientos/proteccion_materiales_metalicos.pdf)

Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa. (s. f.). IV. Protección catódica con ánodos galvánicos . La Ciencia para Todos. Vol. 2 (Ciencia 3). Recuperado de [https://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec\\_7.htm](https://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_7.htm)

Importancia del Backlog para el mantenimiento. (n.d.). TRACTIAN. <https://tractian.com/es/blog/backlog-importancia-para-el-mantenimiento>

Lugares de Ciencia. (2023). 1880 Muelle Salitrero Ex Compañía Melbourne Clark. Lugares de Ciencia. <https://www.lugaresdeciencia.com>

McGraw, D. (s.f.). What is corrosion? Thomas Industrial Coatings. <https://thomasindcoatings.com/the-different-types-of-corrosion/>

Martinez-Perez, F (2023). Corrosion. Types. Prevention. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 32(2), e10. Universidad Agraria de la Habana

Mkt. (2025, October 21). Qué es la Disponibilidad y cómo calcularla en mantenimiento. Blog Engeman® Software De Mantenimiento GMAO/CMMS. <https://blog.engeman.com/es/que-es-disponibilidad-y-como-calcularla-en-mantenimiento/#que-es-la-disponibilidad-en-mantenimiento>

- NACE International. (2013). NACE SP0169-2013: Control de la corrosión externa en sistemas de tuberías metálicas subterráneas o sumergidas [PDF]. Departamento de Conservación Ambiental del Estado de Nueva York. <https://www.nace.org/Pipelines-Tanks-Underground-Systems>
- 8 indicadores de mantenimiento para la gestión de activos. (n.d.). TRACTIAN. <https://tractian.com/es/blog/8-indicadores-indispensables-para-la-gestion-del-mantenimiento>
- ¿Que es MTBF? Definición, fórmula y aplicaciones. (n.d.). GMAO / LATAM. <https://www.dimomaint.com/latam/guias/que-es-mtbf/>
- Reyes, Y. (2025). Tipos de corrosión: clasificación, técnica y monitoreo predictivo. INSPENET <https://inspenet.com/articulo/tipos-de-corrosion-clasificacion-y-monitoreo/>
- Real Academia Española. (s.f). Diccionario de la lengua Española [version en línea]. Recuperado de <https://dle.rae.es/corrosi%C3%B3n?m=form> [08 septiembre 2025]
- Real Academia Española. (2025). Diccionario de la Lengua Española [Versión en línea]. Recuperado de <https://www.rae.es/dhle/higrosc%C3%B3pico> [08 septiembre 2025].
- Reyes, Y. (2025, 20 de octubre). Ánodos de sacrificio en protección catódica. Inspenet. <https://inspenet.com/articulo/anodos-de-sacrificio-en-proteccion-catodica/>
- Rodríguez-Caro, D. A., Vera-López, E., & Muñoz-Barajas, H. M. (2016). Diseño e implementación de un sistema de adquisición y monitoreo de datos (SHM) para un rectificador de protección catódica usado en ductos [Design and implementation of an acquisition and data monitoring system (SHM) for a cathodic protection rectifier used in pipelines]. *Respuestas*, 21(1), 45-55.
- Tecna ICE. (s. f.). La protección catódica explicada. Tecna ICE. <https://tecna-ice.com/la-proteccion-catodica-explicada/>
- USACH Departamento de Ingeniería Metalúrgica. (s. f.). Apuntes de ingeniería metalúrgica: Corrosión de metales [Archivo PDF]. Universidad de Santiago de

Chile.

<https://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgia/files/documentos/capitulo27.pdf>

Voliro. (2025). Crevice Corrosion: Causes, Detection, and Prevention. Recuperado de

<https://voliro.com/blog/crevice-corrosion/>

Zavarce, A. (2024). Protección catódica en concreto marino: claves del

monitoreo. Inspenet recuperado en <https://inspenet.com/articulo/proteccion-catodica-infraestructuras-marinas/>

## ANEXO 1

Planilla de Excel diseñada para apoyar a los trabajadores en la ejecución del mantenimiento preventivo de las protecciones catódicas eléctricas, facilita el registro, control y seguimiento de las actividades programadas, estandarizando la información y contribuyendo a una gestión más eficiente del mantenimiento

Fecha:	LECTURA DE PROTECCIONES CATODICAS												
	<b>Lectura de potenciales</b>										<b>Σ</b>	<b>Promedio</b>	<b>Criterio</b>
	Dolphin #1 en mV												
	Dolphin #2 en mV												
	Dolphin #3 en mV												
	Dolphin #4 en mV												
	Loza Frontal en Mv test 1												
	Loza Frontal en Mv test 2												
	Loza acceso en mV test 1 derecha												
	Loza acceso en mV test 2 izquierda												
<b>910RE01</b>													
Lectura Dolphin #1 (Adc)						Lectura Dolphin #2 (Adc)							
N°1						N°1							
N°2						N°2							
N°3						N°3							
N°4						N°4							
N°5						N°5							
I total						I total							
<b>Lectura Rectificador</b>			Voltaje (DC)			Amperaje (DC)							
Lectura Analógico													
Lectura digital (fluke 289)													
<b>910RE02</b>													
Lectura Dolphin #3 (Adc)						Lectura Dolphin #4 (Adc)							
N°1						N°1							
N°2						N°2							
N°3						N°3							
N°4						N°4							
N°5						N°5							
I total						I total							
<b>Lectura Rectificador</b>			Voltaje (DC)			Amperaje (DC)							
Lectura Analógico													
Lectura digital (fluke 289)													
<b>910RE03</b>													
Loza Frontal (Adc)													
N°1													
N°2													
N°3													
N°4													
N°5													
N°6													
N°7													
I Total													
<b>Lectura Rectificador</b>			Voltaje (DC)			Amperaje (DC)							
Lectura Analógico													
Lectura digital (fluke 289)													
<b>910RE04</b>													
Loza de Acceso (Adc)													
N°1													
N°2													
N°3													
N°4													
N°5													
N°6													
N°7													
N°8													
N°9													
I Total													
<b>Lectura Rectificador</b>			Voltaje (DC)			Amperaje (DC)							
Lectura Analógico													
Lectura digital (fluke 289)													