



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN CIRCUITO DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR
CORRIENTE IMPRESA PARA CAJAS METÁLICAS ELÉCTRICAS.”**

Trabajo de grado presentado ante la Universidad Técnica del Norte previo a la obtención
del título de Ingeniero en Electricidad

Línea de Investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

DEIBY GONZALO QUILCA VARGAS

TUTOR:

ING. ISABEL MARINA QUINDE CUENCA MSc.

Ibarra – Ecuador

2025



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004185672		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Quilca Vargas Deiby Gonzalo		
DIRECCIÓN:	Ibarra - Urcuquí		
EMAIL:	dgquilcav@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	0939069916	TELÉFONO MÓVIL:	0939069916

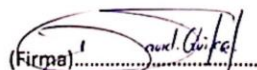
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"Implementación de un circuito de protección catódica por corriente impresa para cajas metálicas eléctricas"
AUTOR (ES):	Quilca Vargas Deiby Gonzalo
FECHA: DD/MM/AAAA	01/09/2025
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Isabel Quinde MSc. Ing. Julio Guerra MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, al 1 día del mes de septiembre de 2025

EL AUTOR:

(Firma) 

Nombre: Quilca Vargas Deiby Gonzalo

**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR**

Yo, Ing. Isabel Marina Quinde Cuenca MSc., en calidad de director del señor estudiante Quilca Vargas Deiby Gonzalo certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: Implementación de un circuito de protección catódica por corriente impresa para cajas metálicas eléctricas.

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobada la defensa, impresión y empastado.



.....
Ing. Isabel Marina Quinde Cuenca MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AGRADECIMIENTO

Al culminar esta etapa tan significativa de mi formación académica, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron al desarrollo de esta tesis y al logro de este objetivo.

En primer lugar, a mi familia, por ser el sostén constante a lo largo de mi vida y mi carrera universitaria. Gracias por su amor incondicional, su paciencia, sus palabras de aliento y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. Cada uno de ustedes ha sido parte esencial de este camino.

A mi amigo Ricardo Minda, por su constante apoyo, por acompañarme con su amistad sincera y por estar presente en los momentos clave de este proceso. Su ayuda personal, ha sido invaluable, y su confianza en mis capacidades me impulsó a seguir adelante.

A mis tutores de tesis, la ingeniera Isabel Quinde y el ingeniero Julio Guerra, mi más sincero reconocimiento y gratitud. Agradezco profundamente su guía profesional, su compromiso, su disposición para compartir conocimientos y su orientación clara y oportuna durante el desarrollo de este trabajo. Su experiencia y exigencia académica fueron fundamentales para alcanzar el nivel de calidad que esta tesis requería. Gracias por su tiempo, su paciencia y por haber creído en mi proyecto desde el inicio.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento a todos los docentes que me acompañaron a lo largo de la carrera de Ingeniería Eléctrica. Cada clase, cada enseñanza, cada consejo ha contribuido a mi crecimiento profesional y personal.

Este trabajo no es solo el resultado de mi esfuerzo, sino el reflejo del acompañamiento, el apoyo y la colaboración de muchas personas que han dejado huella en este proceso. A todos ustedes, gracias.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con profundo respeto y sincero agradecimiento a mis padres y hermano, quienes han sido el pilar fundamental en mi vida. Su amor incondicional, esfuerzo constante y ejemplo de integridad han sido guía y motivación a lo largo de este camino académico. Gracias por enseñarme, desde temprana edad, el valor del trabajo, la disciplina y la perseverancia. Cada logro alcanzado es también reflejo del sacrificio silencioso que han hecho por brindarme una educación de calidad y un futuro lleno de oportunidades.

A Monserrath. P, quien en su momento compartió conmigo etapas significativas y cuya presencia fue fuente de fortaleza a lo largo de este camino académico. Sus palabras de aliento, comprensión y confianza me impulsaron a seguir adelante.

Extiendo también esta dedicatoria a las personas que me acompañaron en estos últimos años, una etapa particularmente exigente pero también profundamente significativa. A ustedes, que supieron brindarme apoyo, ofrecer una palabra de ánimo en los momentos de duda y celebrar cada pequeño avance como si fuera propio, les agradezco sinceramente. Su amistad quedará como uno de los aspectos más valiosos que me llevo de esta experiencia.

Esta tesis, realizada en el marco de la carrera de Ingeniería Eléctrica, no solo representa el cumplimiento de una meta académica, sino también el fruto de un esfuerzo colectivo. A cada uno de ustedes, que formaron parte esencial de este trayecto, les debo una parte importante de este logro.

Con todo mi aprecio, admiración y gratitud profunda

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido	Pág.
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
CAPITULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Contextualización.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Formulación del problema.....	3
1.4. Justificación.....	3
1.5. Alcance.....	3
1.6. Objetivos.....	4
1.6.1. <i>Objetivo general</i>	4
1.6.2. <i>Objetivos Específicos</i>	5
CAPÍTULO 2.....	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Corrosión.....	6
2.1.1. Definición de oxidación reducción.....	6
2.1.2. Mecanismo de corrosión a nivel atómico.....	7
2.1.2.1. Corrosión en ácidos.....	8
2.1.2.2. Corrosión en soluciones neutras y alcalinas.....	8
2.1.2.3. Corrosión en otros sistemas.....	8
2.1.3. Elementos básicos de corrosión electroquímica.....	8
2.1.4. Factores que influyen en la corrosión.....	9
2.1.5. Tipos de corrosión.....	10
2.1.6. Efectos de la corrosión.....	11

2.1.7. Métodos de protección.....	11
2.2. Protección Catódica	12
2.2.1. Aplicación de protección catódica.....	15
2.2.2. Tipos de protección catódica	15
2.2.2.1. Protección catódica con ánodos de sacrificio.....	15
2.2.2.2. Ventajas y desventajas del sistema de protección con ánodos de sacrificio	16
2.2.2.3. Protección catódica con corriente impresa.....	16
2.2.2.4. Equipos para Protección Catódica con Corriente Impresa.....	17
a. Transformadores/rectificadores estándar	17
b. Rectificadores que usan tiristores de silicio (SCR)	18
c. Fuentes de energía solar.....	18
d. Generadores eólicos.....	18
2.2.2.5. Ventajas y desventajas del sistema de protección con corriente impresa	18
2.2.2.6. Requerimientos de corriente	19
2.2.2.7. Fundamentos de la protección catódica por corriente impresa.....	19
2.2.2.8. Tipos de ánodos en corriente impresa.....	20
2.2.2.9. Requisitos previos para instalar un sistema de protección catódica ..	21
2.2.2.10. Criterios para verificar la eficiencia de un sistema de protección catódica del aluminio y del cobre.....	21
a. Estructura de aluminio	21
b. Estructura de cobre	22
c. Estructura de acero.....	22
2.2.2.11. Técnicas para verificar la eficiencia de un sistema de protección catódica del acero.....	22
2.2.2.12. Técnica de la inversión de la polaridad	23

CAPITULO 3	25
METODOLOGÍA Y MATERIALES	25
3.1. Metodología	25
3.1.1. Herramientas de investigación	25
3.1.2. Proceso	27
3.2. Materiales.....	27
3.2.1. Aluminio	28
3.2.2. Caja eléctrica de paso Rapid lock	28
3.2.3. Baterías	29
3.2.4. Conductores eléctricos	29
3.2.5. Sal	30
3.2.6. Vinagre blanco	30
3.2.7. Agua Oxigenada.....	30
3.2.8. Ácido Muriático	30
3.2.9. Osciloscopio de almacenamiento digital OWO PDS6062S	31
3.2.10. Pinza amperimétrica A622	31
3.2.11. Balanza analítica PA313 Ohaus.....	31
3.2.12. AutoCAD	32
3.3. Medio Oxidante	32
3.4. Selección y Dimensión del Ánodo.....	33
3.5. Condición y Dimensión de Piezas de Prueba	34
3.6. Pruebas de laboratorio.....	36
3.6.1. Pruebas con una fuente DC.....	36
3.6.2. Prueba a 9 voltios (9v)	36
3.6.3. Prueba a 3 voltios (3v)	37
3.6.4. Adquisición de Datos (Pesos)	37

3.6.5.	Parámetros del Circuito de Protección.....	38
3.6.6.	Área Total Afectada.....	43
3.7.	Parámetros de diseño del circuito.....	44
3.7.1.	Técnica experimental para evaluar la corrosión	44
3.7.2.	Ecuaciones	45
3.7.3.	Área a proteger.....	45
3.7.4.	Densidad de Corriente Relativa	45
3.7.5.	Corriente de Protección Requerida (<i>Iprot</i>):	46
3.7.6.	Potencial de protección <i>Eprot</i>	46
3.7.7.	Resistencia del Ánodo <i>Rprot</i>	46
3.7.8.	Eficiencia de la corriente (CE).....	47
3.8.	Conexión del circuito.....	47
CAPITULO 4.....		48
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS.....		48
4.1.	Implementación del circuito de protección catódica por corriente impresa.....	48
4.1.1.	Prueba 1	48
4.1.2.	Prueba 2	49
4.1.3.	Prueba 3	51
4.1.4.	Prueba 4	52
4.1.5.	Prueba 5	53
4.1.6.	Prueba 6	54
4.1.7.	Prueba siete	56
4.1.8.	Prueba ocho.....	57
4.1.9.	Prueba nueve.....	58
4.2.	Corriente y Voltaje.....	59
4.2.1.	Datos de Corriente	60

4.2.2. Comportamiento de la corriente en cada prueba.....	60
4.2.3. Comportamiento del Voltaje en cada Prueba.....	62
4.3. Peso final del cátodo	64
4.4. Implementación.....	68
4.5. Implementación Física	68
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA.....	72
ANEXOS.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
Figura 1. Reacción de corrosión electroquímica.....	7
Figura 2. Diagrama de Pourbaix con las zonas de corrosión, inmunidad y pasividad del hierro a 25°C.....	14
Figura 3. Protección catódica con ánodos de sacrificio	16
Figura 4. Protección catódica con corriente impresa	17
Figura 5. Diagrama esquemático de un rectificador	18
Figura 6. Protección catódica por corriente impresa.....	20
Figura 7. Inversión de la polaridad	23
Figura 8. Diagrama de flujo	27
Figura 9. Ánodo de aluminio	28
Figura 10. Caja eléctrica de paso Rapid lock.....	29
Figura 11. Baterías 1.5V	29
Figura 12. Conductores de cobre	30
Figura 13. Osciloscopio de almacenamiento digital OWO PDS6062S	31
Figura 14. Pinza amperimétrica A622	31
Figura 15. Balanza analítica PA313 Ohaus.....	32
Figura 16. Preparación medio ácido.....	33
Figura 17. Ánodo de Aluminio	34
Figura 18. Proceso de lijado de las piezas.....	34
Figura 19. Corte por plasta.....	34
Figura 20. Dimensiones de piezas.....	35
Figura 21. Pieza sumergida en ácido muriático	35
Figura 22. Lado anterior después del ácido muriático. Lado posterior después del ácido muriático	36
Figura 23. Pesaje de piezas de metal.....	37

Figura 24. Instrumentos utilizados.....	38
Figura 25. Distancia entre ánodo y cátodo de 1cm	38
Figura 26. Distancia entre ánodo y cátodo de 3cm	39
Figura 27. Distancia entre ánodo y cátodo de 1cm con 1.58 V	40
Figura 28. Distancia entre ánodo y cátodo de 3cm. Frontal.....	40
Figura 29. Distancia entre ánodo y cátodo de 3cm. Frontal. Lateral	41
Figura 30. Distancia entre ánodo y cátodo de 3cm. Lateral.....	41
Figura 31. Distancia entre ánodo y cátodo de 1cm. Frontal.....	42
Figura 32. Distancia entre ánodo y cátodo de 3cm. Frontal.....	42
Figura 33. Sin protección catódica.....	43
Figura 34. Visualización software ImageJ	44
Figura 35. Representación gráfica proceso experimental	44
Figura 36. Circuito electrónico de protección catódica por corriente impresa	47
Figura 37. Izq. Lado anterior – Prueba 1- Dere. Lado posterior – Prueba 1.....	48
Figura 38. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 1	49
Figura 39. Figura 39. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 2	50
Figura 40. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 2	50
Figura 41. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 3.....	51
Figura 42. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 3	52
Figura 43. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 4.....	52
Figura 44. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 4	53
Figura 45. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 5.....	53

Figura 46. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 5	54
Figura 47. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 6	55
Figura 48. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 6	55
Figura 49. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 7	56
Figura 50. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 7	56
Figura 51. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 8	57
Figura 52. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 8	58
Figura 53. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 9	58
Figura 54. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 9	59
Figura 55. Relación Corriente vs Tiempo	62
Figura 56. Relación Voltaje vs Tiempo	64
Figura 57. Residuos corrosivos	65
Figura 58. Implementación	68
Figura 59. Implementación física de protección catódica	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
TABLA 1 Factores que influyen en la corrosión	9
TABLA 2 Tipos de corrosión	10
TABLA 3 Efectos de la corrosión	11
TABLA 4 Potenciales en reposo de algunos materiales	13
TABLA 5 Ventajas y desventajas del sistema de protección por ánodos de sacrificio	16
TABLA 6 Ventajas y desventajas del sistema de protección	19
TABLA 7 Comportamiento de la corriente en cada prueba	61
TABLA 8 Comportamiento del Voltaje en cada Prueba.....	63
TABLA 9 Peso inicial y final cátodos	67

RESUMEN

La corrosión es un problema costoso que afecta tanto al sector industrial como a la infraestructura urbana, deteriorando maquinaria y estructuras metálicas. Anualmente, entre el 10% y el 20% de la producción mundial de metal se pierde debido a reacciones químicas y electroquímicas con el ambiente.

El uso de recubrimientos protectores y protección catódica ha demostrado ser efectivo, reduciendo la corrosión y prolongando la vida útil de las estructuras metálicas. Las cajas metálicas eléctricas, especialmente susceptibles a la oxidación, requieren un circuito de protección catódica por corriente impresa para asegurar su funcionalidad. El objetivo del estudio fue implementar y evaluar dicho circuito para reducir la velocidad de oxidación según las normativas vigentes.

La metodología experimental incluyó el uso del aluminio como estructura de sacrificio (ánodo) para la protección corrosiva de la caja metálica (cátodo), además de una fuente de corriente directa, conductores de cobre, y tratamientos con ácido muriático. El diseño del circuito consideró variables como el tamaño de la estructura, características del ánodo y parámetros eléctricos. Las pruebas de laboratorio expusieron las muestras a un ambiente controlado con agua oxigenada, vinagre y sal, revelando diferencias significativas en la corrosión entre el lado posterior y anterior de las piezas metálicas.

Los resultados indicaron fluctuaciones en la corriente debido al medio corrosivo y desgaste del ánodo, mientras que el voltaje se mantuvo estable por el envejecimiento de las baterías. El sistema de protección catódica por corriente impresa mostró estabilidad relativa.

Palabras clave: Corrosión, Protección catódica, Reacciones electroquímicas, Ánodo de sacrificio, Corriente impresa.

ABSTRACT

Corrosion is a costly issue affecting both the industrial sector and urban infrastructure, leading to the deterioration of machinery and metallic structures. Annually, between 10% and 20% of global metal production is lost due to chemical and electrochemical reactions with the environment.

The use of protective coatings and cathodic protection has proven effective in reducing corrosion and extending the lifespan of metallic structures. Electrical enclosures, particularly susceptible to oxidation, require an impressed current cathodic protection (ICCP) circuit to ensure their functionality. The objective of this study was to implement and evaluate such a circuit to decrease the oxidation rate in accordance with current standards.

The experimental methodology included using aluminum as a sacrificial anode for the corrosive protection of the metallic enclosure (cathode), along with a direct current power supply, copper conductors, and treatments with hydrochloric acid. The circuit design considered variables such as the size of the structure, characteristics of the anode, and electrical parameters. Laboratory tests exposed the samples to a controlled environment with hydrogen peroxide, vinegar, and salt, revealing significant differences in corrosion between the posterior and anterior sides of the metallic components.

Results indicated fluctuations in current due to the corrosive medium and anode wear, while voltage remained stable due to battery aging. The impressed current cathodic protection system demonstrated relative stability.

Keywords: Corrosion, Cathodic protection, Electrochemical reactions, Sacrificial anode, Impressed current.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Contextualización

El gran desarrollo industrial en las últimas décadas a nivel mundial ha generado un enorme avance tecnológico y el crecimiento estructural exponencial en las ciudades, mejorando las condiciones de vida, así también creando un sin número de edificios, plantas, complejos y otras estructuras empleando grandes cantidades de metal, a la par de este desarrollo industrial se presentaron problemas en la integridad de estas estructuras metálicas, provocadas por el efecto de la corrosión.

La corrosión es un problema muy costoso y no es exclusivo del sector industrial, en la actualidad se puede evidenciar enormes cantidades de acero, hierro, cobre y otros materiales que existen alrededor y que resultan necesarios dentro de los activos estratégicos de toda una nación, solamente en la infraestructura básica de toda ciudad se encuentran puentes, carreteras, edificios, plantas de generación de energía, oleoductos, monumentos, trenes, torres de comunicaciones, industria militar, etc. Por lo que, la corrosión tiene un impacto importante en la economía de cualquier ciudad, con un mayor peso de impacto en aquellas ciudades más industrializadas. Por criterios de seguridad por el coste económico y por sus efectos medioambientales la corrosión es un problema que se debe controlar y minimizar.

Aunque mejoren con el tiempo los medios de protección, las pérdidas no disminuyen, porque simultáneamente aumenta la agresividad de la atmósfera y los progresos tecnológicos imponen condiciones más severas. Debido a que la industria está constituida por un 70% de acero de diferentes composiciones, la corrosión es uno de los agentes de pérdida energética más problemáticos que existen a nivel industrial. Una cifra, de 10 toneladas que se fabrican, anualmente se pierden 2 toneladas por efectos de la corrosión; los costos de pérdida y protección contra la corrosión a nivel mundial son de millones de dólares. Se han desarrollado muchas técnicas durante años para proteger un metal objetivo. Se ha demostrado que el uso de diferentes recubrimientos y protecciones electroquímicas prolonga la vida útil de los metales en entornos propensos a la corrosión. Los métodos conocidos y probados incluyen el uso de un sistema de protección catódica. Los sistemas de protección catódica aplican

corriente sobre un metal a través de una fuente externa para proteger catódicamente un metal; este método se conoce como protección catódica de corriente impresa (Chang et al., 2014). Durante las últimas décadas, la protección catódica se ha considerado el único enfoque eficaz para prevenir directamente la corrosión, siempre y cuando este método se efectúe dentro de las normas, criterios y recomendaciones de acuerdo con las bases teóricas en que se fundamenta (Qiao et al., 2015).

1.2. Planteamiento del problema

Cada año alrededor de un 10 a 20% de la producción mundial de metal se pierde completamente a causa de la corrosión [1], maquinaria y estructuras metálicas son deterioradas de manera irreparable por la corrosión, esto debido a las consecuencias de distintas reacciones químicas y electroquímicas que tienen lugar entre el metal y las condiciones medioambientales a las que está sometido el metal. Estos procesos conducen a la degradación o pérdida de las propiedades físicas y químicas, además del deterioro de las características constructivas de los materiales metálicos. A nivel industrial los deterioros de estructuras metálicas generan un gasto extra en costes de mantenimiento y reposición de materiales, así también en los casos de tuberías, pérdidas y derrames del producto que circula por su interior, en equipos los efectos más importantes son la disminución de la eficiencia traduciéndose en una baja de la productividad de la planta, en fin, la corrosión afecta a todo el sector industrial teniendo un gran impacto económico, social y ambiental.

Al no existir una protección adecuada del metal, la corrosión de este se ve acelerada, este efecto por lo general se percibe a simple vista en los metales como el hierro y el acero, debido a que se crea una capa superficial de color marrón misma que corroe la superficie y perforara el material. La corrosión tiene muchas consecuencias a nivel de seguridad y conservación de materiales, uno de los problemas más frecuentes de corrosión dentro del entorno de las instalaciones eléctricas es la oxidación y degradación de las cajas metálicas eléctricas, problema que, ocasiona inseguridad de los sistemas eléctricos, costos en reparación y mantenimientos, bajo ciclo de vida de las instalaciones e impacto en el ambiente.

1.3. Formulación del problema

¿Qué parámetros intervienen en el diseño e implementación de un circuito de protección catódica por corriente impresa para cajas metálicas eléctricas?

1.4. Justificación

El uso de recubrimientos protectores en conjunto con la protección catódica ha logrado a través de los años un registro de excelente desempeño en la protección de estructuras metálicas. Mediante la aplicación de un sistema de protección catódica se puede conseguir una reducción en la pérdida de las propiedades físicas y químicas que poseen las estructuras metálicas de protección, además de incrementar la vida útil y minimizar los posibles riesgos de contaminación ambiental.

Debido a que las cajas metálicas eléctricas son las más utilizadas en la contención de conexiones eléctricas y el material que la compone es propenso a reacciones oxidantes, se desea implementar el circuito de protección catódica por corriente impresa, mismo que disminuya la velocidad de oxidación del material, de tal forma, que permita asegurar las conexiones y la funcionalidad de las instalaciones eléctricas. Con la implementación de este circuito de protección se busca controlar el tiempo de degradación, conseguir la durabilidad y vida útil de dichas cajas.

El objeto principal es desarrollar un circuito de protección eficiente y de calidad que perdure en el tiempo, garantizando la funcionalidad de las instalaciones eléctricas. El desarrollo de nuevas investigaciones y experimentos prácticos a nivel de laboratorio sobre protección catódica por corriente impresa en estructuras metálicas complementa la información técnica disponible para evaluar factores que contribuyen a la minimización de los efectos corrosivos de estructuras y equipos metálicos, desarrollando nuevas alternativas que puedan constituir una solución efectiva a este problema de ingeniería.

1.5. Alcance

La protección catódica es una técnica utilizada para reducir la corrosión de superficies metálicas mediante el paso de una corriente impresa suficiente, que haga que la disolución de los ánodos sea prácticamente despreciable [2]. Consiste en el uso de electricidad de corriente directa, proveniente de

una fuente externa, con el fin de contrarrestar la descarga de corriente corrosiva en las áreas anódicas de una estructura metálica inmersa en un medio conductor o electrolito, como la tierra o el agua.

Cuando un sistema de protección catódica está correctamente instalado, todas las porciones de la estructura protegida recolectan corriente del electrolito circundante, y la superficie total expuesta pasa a comportarse como una sola área catódica.

El presente trabajo de titulación se enfocó en la implementación de un circuito de protección catódica por corriente impresa, que disminuya la velocidad del proceso de oxidación en cajas metálicas eléctricas Beacoup de 30×30×10 cm, modelo I-0224. Para alcanzar este objetivo, se realizarán pruebas de campo que permitan hacer un seguimiento a placas de muestra tomadas de dichas cajas, las cuales estarán sometidas a reacciones químicas mediante el uso de mezclas y medios oxidantes que provoquen y aceleren el proceso de oxidación.

Una de las placas estará conectada al circuito de protección, con el objetivo de reducir su velocidad de oxidación. Estas pruebas permitirán registrar el tiempo que tarda cada placa en oxidarse, lo que servirá para validar el funcionamiento y rendimiento del circuito de protección. Para verificar la eficiencia del sistema, se presentará una tabla comparativa con los tiempos de oxidación de las placas de prueba.

El circuito de protección estará compuesto por un ánodo tubular, seleccionado por su alta estabilidad química, una fuente de alimentación y cables conductores, cuyo calibre y aislamiento dependerán de la cantidad de corriente necesaria y del medio en el que se exponga el circuito. Se implementarán los ajustes necesarios hasta obtener un sistema de protección catódica por corriente impresa completamente funcional.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Implementar un circuito de protección catódica por corriente impresa para la disminución de la velocidad de oxidación en las cajas metálicas eléctricas conforme a normas vigentes.

1.6.2. *Objetivos Específicos*

- Describir los parámetros requeridos para el diseño del circuito de protección catódica por corriente impresa.
- Realizar el diseño del circuito de protección catódica por corriente impresa.
- Implementar el circuito de protección catódica por corriente impresa.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Este capítulo tiene como objetivo describir los efectos de la corrosión sobre superficies metálicas, así también definir el circuito de protección catódica por corriente impresa y su efecto sobre la velocidad del proceso de oxidación. Por lo tanto, es importante resaltar que es una herramienta con un potencial enorme para minimizar los daños estructurales y económicos que afectan a la conservación de estructuras metálicas que mantienen un contacto directo con el medio exterior [3].

2.1. Corrosión

La corrosión de acuerdo con Jiménez, Martín, Masías, y Anderson [4] es un proceso electroquímico que consiste en la oxidación de un material metálico, de la misma manera Huck [5] define a la corrosión como la degradación y destrucción de un material metálico por su reacción química con el medio ambiente. Las reacciones de corrosión son reacciones de oxidación reducción que ocurren en una celda de corrosión que se forman cuando existe una pequeña diferencia de potencial entre una y otra área de la superficie metálica.

2.1.1. Definición de oxidación reducción

La corrosión según Santibáñez y Heredia [6] es un proceso de oxidación reducción, en donde las reacciones de oxidación se producen en los ánodos y las de reducción en los cátodos. Como se puede observar en la Figura 1. los electrones suministrados por los cátodos viajan a través del electrolito hacia el ánodo, donde se consumen en una reacción de oxidación, al cerrar el circuito con un conductor exterior a la celda de corrosión, de acuerdo con Esteban [7] los electrones producidos en la reacción de oxidación del ánodo viajan desde el ánodo hasta el cátodo a través de este circuito alimentando la reacción de reducción en el cátodo.

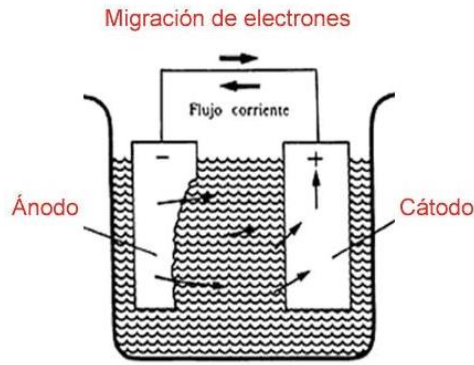


Figura 1. Reacción de corrosión electroquímica

Fuente: Bacelo (2015)

Una reacción de corrosión completa tomando en consideración lo expuesto por Bacelo (2015) requiere de:

- a. **Ánodo:** El lugar donde se produce pérdida de metal
- b. **Cátodo:** El lugar donde se consumen los electrones producidos por el ánodo.
- c. **Electrolito:** Aquello que permite el flujo de iones. Si alguno de estos elementos que intervienen en la corrosión puede ser eliminado, ralentizado o detenido, la corrosión también puede ser disminuida o eliminada

2.1.2. Mecanismo de corrosión a nivel atómico

Perez [7] afirma que durante el proceso metalúrgico, el metal aleado en combinación con otras sustancias adquiere un potencial eléctrico diferente al que exhibía en su forma natural. Desde el punto de vista microscópico, el proceso metalúrgico no es exactamente uniforme, por lo que, al regresar a sus condiciones ambientales originales, estas diferencias provocan que se creen regiones macroscópicas con diferentes potenciales eléctricos entre sí [8].

García [9] considera a la corrosión como una reacción química, para poder comprender el fenómeno corrosivo como el resultado de una reacción química, este autor determina una serie de reacciones químicas con las que se puede entender los diferentes procesos corrosivos:

2.1.2.1. Corrosión en ácidos. Una de las formas de obtener hidrógeno en el laboratorio, es colocar un pedazo de zinc metálico dentro de un vaso conteniendo un ácido diluido, tal como el clorhídrico o el sulfúrico Garcia [9].

2.1.2.2. Corrosión en soluciones neutras y alcalinas. La corrosión de los metales también puede presentarse en agua limpia, agua de mar, soluciones salinas y soluciones alcalinas o básicas. En la mayoría de estos sistemas, la corrosión solamente ocurre cuando éstas contienen oxígeno disuelto [10].

2.1.2.3. Corrosión en otros sistemas. Los metales también pueden ser atacados en soluciones que no contengan oxígeno o ácidos. Las soluciones típicas para este proceso son aquellas soluciones denominadas oxidantes que contienen sales férricas y compuestos cúpricos en los que la corrosión se presenta de acuerdo con las siguientes reacciones [11].

2.1.3. Elementos básicos de corrosión electroquímica

Han [12] afirma que el proceso corrosivo ocurre cuando están presentes cuatro elementos principales: el ánodo, cátodo, conductor metálico y electrolito, en este caso el conductor metálico podría ser la misma superficie de la estructura. De esta manera se establecen las zonas básicas en donde se producen las reacciones electroquímicas correspondientes a la corrosión, de acuerdo con Habishi [13] son:

2.1.3.1. Zona anódica: Es el lugar donde se produce la oxidación, es el material de sacrificio o disolución del metal.

2.1.3.2. Zona del cátodo: Es el área donde no se produce la oxidación, pues llegan los electrones del ánodo e impiden su desgaste, aquí el cátodo se vuelve más electronegativo.

2.1.3.3. Conductor metálico: Es el camino que permite el paso de los electrones desde el ánodo al cátodo, este conductor puede ser una barra, cable metálico o electrolito.

2.1.3.4. Electrolito: puede ser el suelo o cualquier medio acuoso que contiene iones, el suelo posee diferentes tipos de sales disueltas el cual permite el paso de la corriente

2.1.4. Factores que influyen en la corrosión

Tomando como referencia lo citado por la Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión los principales factores que influyen en el desarrollo y velocidad de la corrosión son:

TABLA 1
Factores que influyen en la corrosión

FACTOR	EFECTO
<i>Condición de la superficie</i>	La escasa limpieza de la superficie y presencia de materia extraña pueden ocasionar una fuerte influencia en el inicio y desarrollo de la corrosión.
<i>Efecto de la Temperatura</i>	En principio el aumento de la temperatura incrementa la tasa de corrosión, debido a que la temperatura acelera la cinética de las reacciones.
<i>Diferencia de Potencial (Emf)</i>	Cuando existe diferencia de potencial en los materiales expuestos a las mismas condiciones, el metal con un valor de potencial estándar de oxidación mayor se corroerá y protegerá al metal con el potencial estándar de oxidación menor.
<i>Efecto de la Erosión</i>	La erosión por sí misma no es corrosión, sin embargo, en condiciones abrasivas es posible la remoción de la película protectora del metal dejándolo expuesto al deterioro.
<i>Efecto de Ambientes Contaminados</i>	Los ambientes con contaminantes son factores extremadamente importantes. A menudo, las sustancias presentes únicamente en concentraciones bajas tienen mayor importancia en el comportamiento de la corrosión que las sustancias presentes en elevadas concentraciones.
<i>Efecto del Tiempo</i>	En algunos casos de corrosión existe una relación lineal, es decir conforme se incrementa el tiempo de exposición se incrementa la tasa de corrosión.
<i>Efectos Biológicos</i>	Los organismos macroscópicos y microscópicos influyen en la corrosión creando obstrucciones sobre la superficie lo cual produce celdas de aireación diferencial y absorbiendo

hidrógeno de la superficie del acero, que es un factor de protección en la corrosión.

Fuente: National Association Of Corrosion Engineers (2014)

2.1.5. Tipos de corrosión

Los procesos de corrosión se pueden clasificar de varias formas González (2017), establece dos mecanismos de oxidación: la oxidación directa o seca y la oxidación húmeda, en la siguiente tabla se resumen las características de cada clasificación:

TABLA 2
Tipos de corrosión

Mecanismo	Medio agresivo	Morfología	Acciones físicas simultaneas	Sectores industriales
Oxidación directa (corrosión química seca)	Atmosférica	Uniforme	Erosión corrosión	Transportes
		Galvánica	Corrosión bajo tensión	
	De estructuras sumergidas	Selectiva	Erosión corrosión	Aplicaciones marinas
		Por picaduras	Corrosión bajo tensión	
Corrosión electroquímica o húmeda	De estructuras enterradas	Intergranular	Corrosión bajo tensión	Construcción
		Fisurante bajo tensión	Corrosión por cavitación	
	Por gases calientes	En láminas de cuchillo	Corrosión por frotamiento	Petroquímica
	Por sales fundidas	Exfoliante		Generación de energía
	Por ácidos	En resquicios	Corrosión fatiga	Industria alimentaria

Fuente: González (2017)

El proceso de corrosión es mucho más complejo, hay factores como la calidad del metal, la composición del electrolito, su temperatura, la presión del líquido contenido, la presencia de gases solubles, la velocidad del líquido, la salinidad del agua, la presencia de un sistema de protección

catódica y la presencia de microbios, que aceleran o retardan este proceso [14]. La corrosión también puede desarrollarse a la intemperie y puede ser causado por factores internos o externos como la estimulación hidráulica o la afectación de algún ácido [15].

2.1.6. Efectos de la corrosión

Aunque la corrosión es por lo general indeseable, hay casos donde puede ser utilizada para un fin específico. Los procesos de anodizado, la limpieza de óxidos formados en la superficie de hierros y aceros y las baterías, son algunos ejemplos donde este fenómeno se ha dirigido para producir y no para destruir. Sin embargo, el término corrosión está asociado generalmente a daños y deterioro y sus efectos pueden resumirse así:

TABLA 3
Efectos de la corrosión

Daño	Efectos
Económicos	<ul style="list-style-type: none"> - Aumenta costos de reparación y reemplazo. - Aumenta costos de mantenimiento. - Involucra costos de protección. - Genera pérdida de producto (fugas, contaminación). - Provoca paradas de plantas innecesarias. - Exige sobrediseño de equipos. - Disminuye la eficiencia de equipos
Conservación	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de vidas humanas. - Incrementa el gasto de energía. - Genera necesidad de materia prima adicional.

Fuente: Raichev, Veleva, & Valdez (2009)

2.1.7. Métodos de protección

Para la protección de estos tipos de corrosión existen acciones comunes en la industria de la corrosión dirigidas a la prevención y la disminución de la agresividad [16], algunas de estas acciones de prevención son una selección de material correcta, el uso de recubrimientos, el uso de inhibidores y un diseño adecuado de un sistema de protección catódica [17].

2.1.7.1. Selección del material: Para clasificar la resistencia frente a la corrosión de los distintos materiales y aleaciones, estos se dividen en 2 grupos. El primer grupo son los metales nobles con gran resistencia frente a la corrosión y el otro grupo de baja resistencia ante la corrosión son los conocidos como metales activos [18].

2.1.7.2. Recubrimientos: La función principal de los recubrimientos para la corrosión es aislar el metal del electrolito. Estos se dividen en dos grupos: metálicos y no metálicos. Los recubrimientos metálicos son los metales nobles de mayor resistencia mientras los recubrimientos no metálicos están hechos de sustancias cerámicas y poliméricas, como los carburos y el silicio [19].

2.1.7.3. Inhibidores: En algunos casos los inhibidores son incorporados en los recubrimientos utilizados para proteger distintos materiales. Si el recubrimiento falla, el inhibidor presente en el recubrimiento protege al material frente a la corrosión [8].

2.1.7.4. Diseño: Aplicar los principios del diseño de forma correcta, puede disminuir o incluso eliminar los problemas relacionados a la corrosión y a la vez; reducir tiempos y costos asociados a la reparación y el mantenimiento por corrosión [10].

2.1.7.5. Sistema de Protección catódica: uno de los más eficaces e importantes es la protección catódica la cual consiste en obligar a la estructura que se quiere proteger a que funcione como un cátodo en una celda de corrosión. En la industria catódica, los ánodos son fabricados con ciertas características de peso, dimensiones y forma geométrica [20].

2.2. Protección Catódica

El principio básico de la protección catódica según Trujillo [21] se basa en los principios de la corrosión galvánica, pero en este caso, aplicados a favor del material anódico. La protección catódica se logra haciendo fluir una corriente catódica a través de la interface metal electrolito, proveyendo así una cantidad suficiente de electrones para favorecer la reacción de reducción sin que la reacción anódica de disolución metálica aporte ningún electrón. El flujo de electrones de acuerdo con Aguirre & Ortiz (2013) puede lograrse por alguno de los dos siguientes métodos: imprimiendo una corriente en la

estructura a proteger mediante el uso de un rectificador o conectando eléctricamente a la estructura un metal más anódico, formando así una celda galvánica donde el ánodo se sacrificará para proteger al cátodo.

La protección catódica reduce la velocidad de corrosión polarizando la superficie metálica a valores más negativos que el potencial de corrosión o potencial de reposo. El Acero / hierro tiene un potencial de reposo de -500 mV. Luego de conectarse con un ánodo (Aleación de Magnesio) de potencial en reposo -1550 mV, el acero obtendrá un valor más negativo que su potencial de corrosión en reposo que es -850 mV, obteniéndose así la protección o inmunidad deseada.

TABLA 4

Potenciales en reposo de algunos materiales

Material	Potencial en reposo (mV) Cu/CuSO4
Aleación de magnesio	-1550
Zinc	-1100
Aleación de aluminio	-1050
Acero / hierro	-500
Acero con herrumbre	-300
Cobre / estaño	-200

Fuente: Villacís (2018)

La corriente que circulaba por el metal y salía del antiguo ánodo al electrólito, se ve ahora forzada, por la presencia del ánodo de la protección catódica, a seguir por el conductor, desapareciendo este antiguo ánodo que ahora actúa catódicamente. De acuerdo con el diagrama de Pourbaix, la inmunidad del acero se alcanzará una vez se haya modificado su potencial hasta el valor de -850 mV medido respecto al electrodo de referencia de Cu / SO₄Cu.

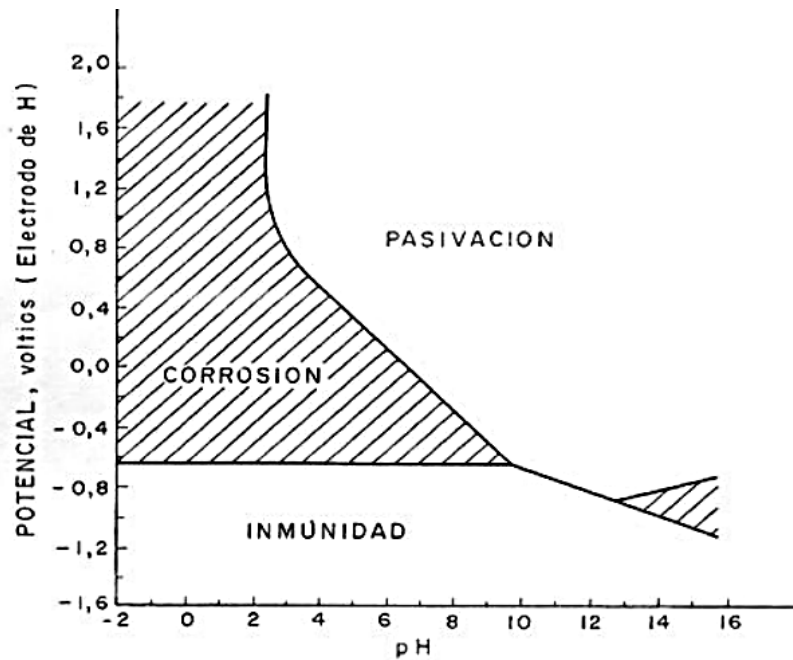


Figura 2. Diagrama de Pourbaix con las zonas de corrosión, inmunidad y pasividad del hierro a 25°C

Fuente: Villacís (2018)

Subramanian et al. [22] afirma que cuando un metal se corroe ocurren múltiples reacciones, todas estas reaccionando al mismo tiempo hacen muy difícil su estudio individual para casos prácticos de ingeniería. El pH es una variable importante en las soluciones acuosas, afecta los potenciales de equilibrio de la mayoría de las reacciones que pueden ocurrir. Con base en esto, Marcel Pourbaix desarrolló y presentó un método gráfico para estudiar estos fenómenos: los diagramas de equilibrio electroquímico en función del pH (abscisas) y el potencial de electrodo (ordenadas). Todas las reacciones, tanto químicas como electroquímicas, que intervienen en los procesos de corrosión, pueden ser estudiadas. Estos diagramas también se conocen como diagramas de potencial – pH, o diagramas de Pourbaix, y se han convertido en una herramienta importante a la hora de determinar la posible presencia de corrosión.

2.2.1. Aplicación de protección catódica

Torres, Meraz, & Veleva, (2017) describen varias aplicaciones del sistema de protección catódica por corriente impresa:

- Requerimientos de corriente elevados.
- Ánodos galvánicos consumidos.
- Grandes intercambiadores de calor.
- Interior de tanques de agua.
- Ductos de gran diámetro.
- Pilotes de fundación.
- Cascos de barcos.
- Cualquier valor de resistividad.
- Compensar corrientes de interferencia.
- Fondos de tanques sobre nivel.
- Tanques de almacenamiento subterráneos.
- Estructuras offshore.

2.2.2. Tipos de protección catódica

La protección catódica se puede lograr obteniendo un flujo de electrones de acuerdo con Aguirre & Ortiz (2013) esto se puede lograr por alguno de los dos siguientes métodos: conectando eléctricamente a la estructura un metal más anódico, formando así una celda galvánica donde el ánodo se sacrificará para proteger al cátodo, denominada protección catódica por ánodos de sacrificio o imprimiendo una corriente en la estructura a proteger mediante el uso de un rectificador conocida como protección por corriente impresa.

2.2.2.1. Protección catódica con ánodos de sacrificio

Utilizando ánodos de sacrificio la corriente se origina debido a la diferencia de potencial existente entre la estructura metálica a proteger y el metal que actúa de ánodo de sacrificio (disolviéndose) en beneficio del metal que se desea proteger y que, como se ha dicho, actúa de cátodo

[8]. La mayoría de los ánodos de sacrificio son aleaciones de magnesio, de cinc o de aluminio. El zinc y el aluminio se pueden utilizar en aplicaciones marinas, en presencia de iones cloruro su rendimiento es óptimo.

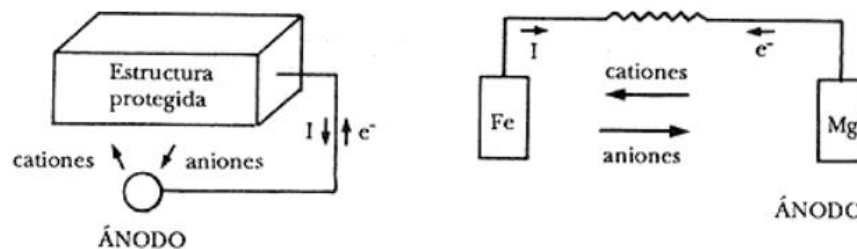


Figura 3. Protección catódica con ánodos de sacrificio

Fuente: Aguirre & Ortiz (2013)

2.2.2.2. Ventajas y desventajas del sistema de protección con ánodos de sacrificio

El principio involucrado en el desarrollo de los ánodos de sacrificio es que la corriente galvánica fluye cuando dos metales disimiles son unidos en un ambiente conductor. Este sistema de protección de acuerdo con Lugo (2004) posee las siguientes ventajas y desventajas:

TABLA 5

Ventajas y desventajas del sistema de protección por ánodos de sacrificio

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> - No dependen de una fuente eléctrica. - Son relativamente simples de instalar. Se pueden emplear ánodos adicionales en caso de que no se logre una protección adecuada. - No existe ningún riesgo de choque eléctrico. - No se ejerce ningún control. - Se pueden corregir los problemas de ajuste del ánodo. - Bajo costo de mantenimiento. - Bajo costo de instalación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Si la vida del ánodo es limitada, es indispensable reemplazarlos periódicamente. - No se puede regular la salida de corriente de acuerdo a la demanda. - No son económicamente viables para proteger tuberías muy largas y con un mal recubrimiento. - Si se requiere un gran número de ánodos aumenta el arrastre por fricción y el peso.

Fuente: Aguirre & Ortiz (2013)

2.2.2.3. Protección catódica con corriente impresa

La protección catódica por corriente impresa consiste en reducir la velocidad de corrosión a través de la polarización de la superficie metálica de la estructura a valores negativos por debajo del

potencial de corrosión o reposo, esto se logra instalando un circuito que impregna corriente, según Caro, López, & Barajas, (2016) esta protección está constituida por 4 elementos básicos: la estructura a proteger, una fuente de corriente, rectificador de onda de corriente alterna (CA) a corriente directa (CD) y ánodos necesarios de acuerdo al diseño unido físicamente entre sí.

El circuito tiene como función convertir a la estructura metálica en cátodo, forzando el flujo de electrones al ánodo, el cual por su composición química se degrada, salvaguardando la estructura molecular del cátodo y así aumentando la vida útil de la estructura a proteger, esta tecnología puede proteger tanques de almacenamiento y/o estructuras metálicas de grandes dimensiones [21]. Este sistema puede utilizar ánodos de aluminio, magnesio, zinc, grafito, titanio platinado, etc. Se debe tener un buen diseño, ya que existe el riesgo de sobreproteger la tubería, lo cual podría aumentar la velocidad de corrosión en lugar de reducirla [22].

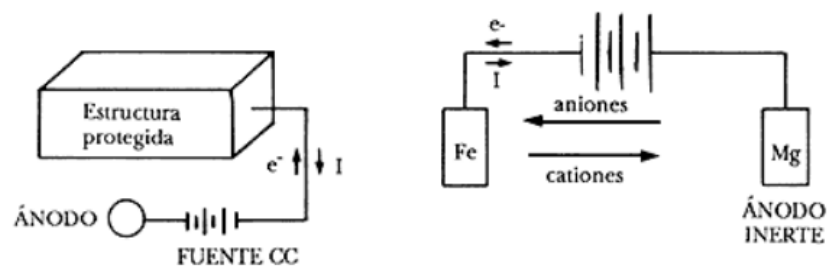


Figura 4. Protección catódica con corriente impresa

Fuente: Pérez (2016)

2.2.2.4. Equipos para Protección Catódica con Corriente Impresa

El sistema de corriente impresa requiere de una fuente de corriente continua, no importa de dónde provenga, a condición de que se mantenga pese al paso del tiempo. Un sistema de corriente impresa debe de poder funcionar de forma permanente al menos durante diez años [23].

- a. Transformadores/rectificadores estándar:** El conjunto transformador-rectificador (transformador acoplado a un rectificador) es el más utilizado para los sistemas de protección catódica. El circuito de rectificación trifásico es más eficiente que el monofásico, pero con mayores costos iniciales [24].

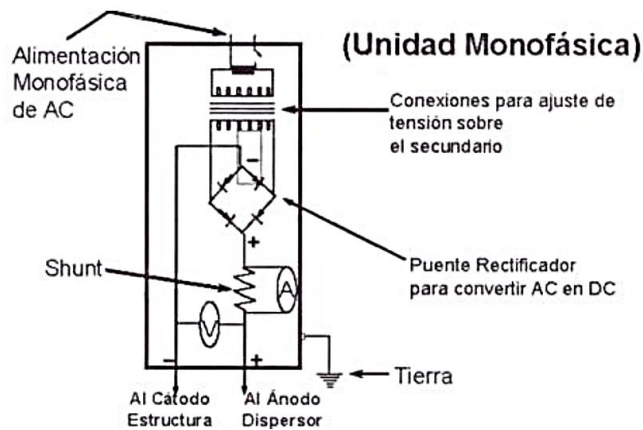


Figura 5. Diagrama esquemático de un rectificador

Fuente: Moscol (2017)

- b. Rectificadores que usan tiristores de silicio (SCR)** Los rectificadores SCR son incluidos en el proceso de rectificación para tener un mayor control de la tensión de rectificación. La diferencia con los rectificadores de diodos es el control en la corriente por los ángulos de disparo en controlador [25]
- c. Fuentes de energía solar** En ausencia de una infraestructura eléctrica, no se emplean transformadores acoplados a rectificadores, porque se carece de red eléctrica. Se emplean sistemas de alimentación en corriente continua. Los sistemas fotovoltaicos están respaldados por un banco de baterías debido a que el uso continuo de energía para el sistema de protección catódica dejará de funcionar durante la noche o cuando no se disponga de irradiación solar suficiente [26].
- d. Generadores eólicos** Los generadores eólicos constituyen otra fuente alternativa para la protección catódica en lugares donde exista la disponibilidad de suficiente energía eólica [27].

2.2.2.5. Ventajas y desventajas del sistema de protección con corriente impresa

Tomando como referencia lo expuesto por Espinoza (2014) y Bejarano (2015), entre los múltiples beneficios y desventajas de la aplicación de la protección con corriente impresa están:

TABLA 6

Ventajas y desventajas del sistema de protección

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">- Disminuye el mantenimiento.- Se pueden utilizar para proteger estructuras grandes, no recubiertas en medios poco conductores.- Se necesitan pocos ánodos.- El nivel de protección del sistema puede ser seguido en tiempo real.	<ul style="list-style-type: none">- Necesidad de una fuente de corriente externa.- Peligro de sobreprotección si se producen fallos, como inestabilidad de corriente.- Dificultad para conseguir niveles de protección homogéneos en estructuras complejas.- Si no se rectifica la corriente llega a generar corrosión.- Es recomendable sólo para sistemas con nivel alto de corrosión.

Fuente: Espinoza (2014) y Bejarano (2015)

2.2.2.6. *Requerimientos de corriente*

El requerimiento de corriente es la cantidad de corriente necesaria para suministrar la protección adecuada, esta demanda de corriente depende de la superficie a proteger y de las características de polarización de la estructura en ese medio. Por lo que el requerimiento de corriente es directamente proporcional a la superficie [28].

2.2.2.7. *Fundamentos de la protección catódica por corriente impresa*

En una instalación típica de rectificadores la corriente alterna es transformada y rectificadas en corriente directa, la que luego es impresa en un lecho de ánodos de grafito u otro material inerte [8]. El lecho de ánodos es conectado al terminal positivo del rectificador mientras que la tubería es conectada al terminal negativo, para completar el circuito. Este tipo de instalación normalmente genera de 10 a 100 amperios o más de corriente protectora en un punto determinado [29].

La protección de un cierto material se logra gracias a la corriente que se le suministra. La fuente de corriente, en el caso de la protección catódica por corriente impresa, se obtiene de un proveedor externo, generalmente un transformador rectificador a partir de una fuente de corriente alterna. El metal

que se desea proteger se conecta al polo negativo de la fuente de poder, y el ánodo se conecta a la terminal positiva [32].

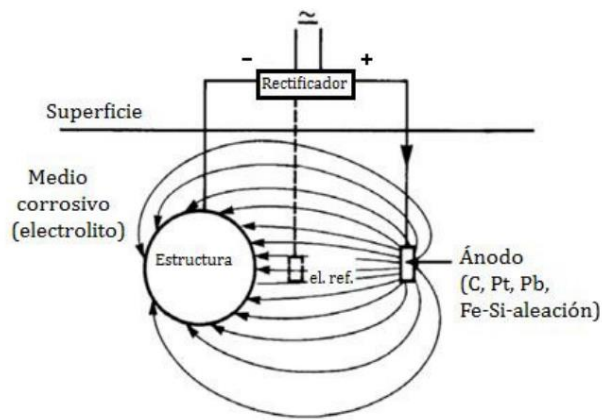


Figura 6. Protección catódica por corriente impresa

Fuente: Terrazas (2012)

Las corrientes de corrosión electroquímica pueden ser invertidas mediante una aplicación adecuada de protección catódica. Esto hace a toda la estructura catódica, eliminando las áreas anódicas naturales con corriente continua impresa en la estructura, desde un ánodo externo de mayor potencia [30].

2.2.2.8. Tipos de ánodos en corriente impresa

Orozco (2018) afirma que los ánodos para corriente impresa más utilizados y con mejores resultados son:

- Grafito
- Hierro con alto contenido de Silicio y Cromo
- Materiales recubiertos con Platino
- Aluminio
- Magnetita
- Titanio recubierto con mezclas de óxidos metálicos
- Polímeros conductores
- Hierro de rezago

- Aleaciones de Plomo-Plata

2.2.2.9. Requisitos previos para instalar un sistema de protección catódica.

La Norma UNE-EN 12954 describe las características que debe poseer una instalación que se desea proteger con protección catódica. Los requisitos se resumen en tres:

- **Continuidad eléctrica:** Debe existir una baja resistencia longitudinal a lo largo de la estructura a proteger, esto se consigue evitando discontinuidades a lo largo de la conducción de materiales distintos al acero [31].
- **Aislamiento eléctrico:** Es esencial que la estructura que se desea proteger no tenga contactos eléctricos con otras estructuras que no se desea proteger. Hay que garantizar que no existen conexiones directas con sistemas de puesta a tierra, y/o con otras estructuras metálicas como los forjados de las arquetas, depósitos, cámaras de válvulas, etc.
- **Recubrimiento externo:** Un buen recubrimiento de la estructura a proteger consigue que haya pocas fugas de corriente y la intensidad sea menor. [23].

2.2.2.10. Criterios para verificar la eficiencia de un sistema de protección catódica del aluminio y del cobre

La Norma NACE SP 0169–2013 establece dos criterios para verificar la protección catódica en estructuras de aluminio y cobre, detallados a continuación:

- Criterio de que se aporten pruebas con evidencia de que se ha controlado la corrosión con efectividad en otras estructuras de idénticas características.
- Un cambio en la polarización catódica (un mínimo polarización de $\pm 0,100$ V) producido por la aplicación de una corriente de protección catódica.
 - a. **Estructura de aluminio** El criterio para verificar la correcta protección catódica de una estructura de aluminio es el del cambio en la polarización catódica (un mínimo de polarización de $\pm 0,100$ V) entre la estructura y un electrodo de referencia en contacto con el electrólito [31]. La medida del potencial polarizado no debe exceder de $-1,200$ V vs. CSE a fin de evitar una acumulación de álcali en la superficie que podría aumentar la corrosión. Así mismo, si el pH

del medio está por encima de 8, la situación se debe evaluar antes de aplicar la protección catódica [32].

- b. **Estructura de cobre:** El criterio para la protección catódica de una estructura de cobre, además de que se puedan aportar datos de tuberías idénticas en las que se haya controlado la corrosión con efectividad, es el del cambio en la polarización catódica (un mínimo de polarización de $\pm 0,100$ V) entre la estructura y el electrodo de referencia en contacto con el electrólito [31].
- c. **Estructura de acero** La protección catódica (PC) de una estructura de acero tiene como fundamento situar el potencial electroquímico de la estructura por debajo de su potencial normal de reducción. Hannig (2019) recomienda trabajar a potenciales comprendidos entre el potencial de corrosión (E_{corr}) o potencial nativo de la estructura de acero y el potencial normal de reducción. A estos potenciales, si bien no se consigue situar al acero en la zona de inmunidad, es posible rebajar su velocidad de corrosión a valores admisibles, desde un punto de vista práctico. Esto hace que la densidad de corriente de protección a aplicar disminuya considerablemente.

2.2.2.11. Técnicas para verificar la eficiencia de un sistema de protección catódica del acero

De acuerdo con Ojeda (2019) las técnicas que se utilizan para verificar la eficiencia de un sistema de protección catódica de una estructura de acero son las siete siguientes:

- Inversión de la polaridad
- Curva de polarización
- Curva de despolarización
- Dirección de la corriente
- Interrupción de la corriente
- Instalación del electrodo de referencia próximo a la estructura de acero
- Instalación del electrodo de referencia a distancia remota de la estructura de acero

2.2.2.12. *Técnica de la inversión de la polaridad*

La utilización de la técnica de la inversión de la polaridad se acepta en el control de la protección catódica en estructuras férreas. La aplicación de dicha técnica supone que la pila de corrosión en la estructura de acero está operando bajo control catódico, por tanto, el potencial de corrosión (E_{corr}) de la estructura está próximo al potencial del ánodo en circuito abierto ($E_{a,oc}$), es decir, menos de 0,100 V, como se indica en la Figura 7.

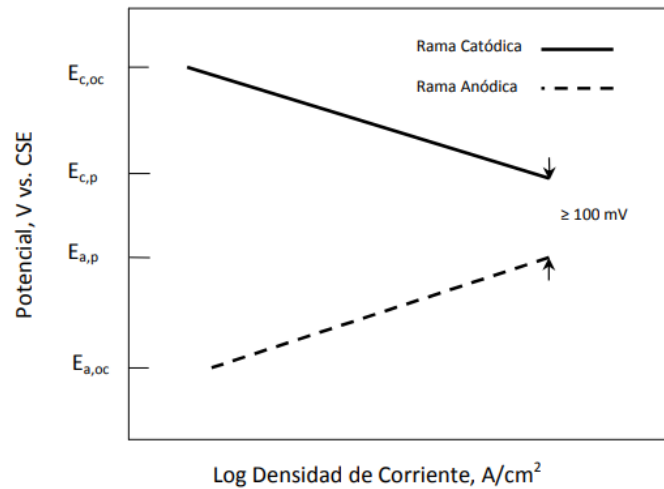


Figura 7. *Inversión de la polaridad*

Fuente: Ojeda (2019)

Si el potencial de corrosión (E_{corr}) se polariza un mínimo de 0,100V en sentido catódico, se considera al material protegido catódicamente. La utilización de esta técnica requiere un registro del E_{corr} , antes de energizar el sistema de protección catódica y después medir el potencial de polarización en los mismos puntos, cuando el sistema se encuentra en funcionamiento [10]. Dado que, como se ha indicado anteriormente la polarización es una función del tiempo, es de utilidad, sobre todo en estructuras sin revestimiento aislante, dejar que el sistema de protección catódica opere un tiempo antes de llevar a cabo la medida del potencial polarizado. El potencial medido, después de la energización, debe estar libre de caída óhmica de modo que se pueda comparar con el E_{corr} . Este procedimiento presenta el inconveniente de que la estructura de acero puede permanecer sin protección catódica durante un período de tiempo y estar expuesta a corrosión [28].

La protección catódica necesita una corriente continua externa negativa capaz de llevar el potencial de corrosión de la pila al potencial del ánodo a circuito abierto. Como primer paso para su aplicación se comienza efectuando un reconocimiento visual del estado superficial de la estructura y midiendo al mismo tiempo los potenciales respecto al medio en diferentes puntos, con referencia a un electrodo impolarizable [22]. El criterio que debe primar es el técnico-económico, teniendo en cuenta el tipo de metal a proteger, las dimensiones de la estructura, estado de su cubierta y condiciones particulares (por ejemplo, disponibilidad de suministro eléctrico, personal capacitado y accesibilidad, problemas de interferencias con estructuras, zonas anegadas, etc.). En consecuencia, para cualquiera metal de la estructura a proteger existe un potencial negativo mínimo respecto al medio que se debe alcanzar mediante la aplicación de los sistemas de protección catódica.

CAPITULO 3

METODOLOGÍA Y MATERIALES

A continuación, se presenta el diseño de un circuito de protección catódica por corriente impresa para cajas metálicas, desarrollando los fundamentos teóricos necesarios, con la finalidad de cumplir los objetivos planteados; culminando con la realización del diseño e implementación de un circuito de protección catódica.

3.1. Metodología

Se aplicó una metodología experimental para investigar el proceso de oxidación de un metal con un sistema de protección catódica por corriente impresa. Se utilizaron herramientas de recopilación bibliográfica para identificar parámetros relevantes y métodos de aceleración de la oxidación, como también datos de fábrica de la caja a proteger. Se investigaron propiedades de líquidos como posibles oxidantes, seleccionando vinagre, agua oxigenada y sal. Se realizaron pruebas experimentales, incluyendo la eliminación de pintura con lijado y baño con ácido muriático para asegurar una superficie limpia, así como también la extracción de pequeñas piezas de la caja para pruebas individuales.

La información recopilada de diversas fuentes como la web, tesis y artículos facilitó la comprensión del circuito de protección catódica por corriente impresa, lo que contribuyó a conclusiones más claras durante la implementación. El principal beneficio de este circuito es su capacidad para detectar protección anticorrosiva mientras circula corriente a través de una estructura, además de identificar la reacción de la estructura protectora (ánodo). Esto permite desarrollar bases de estudio sobre el comportamiento de la corriente frente a agentes corrosivos.

3.1.1. Herramientas de investigación

Recopilación Bibliográfica: Se utilizó para comprender los principios fundamentales de la protección catódica por corriente impresa y obtener información sobre los materiales y métodos adecuados para la realización de las pruebas.

Conjunto de Pruebas de Laboratorio: Se diseñaron y llevaron a cabo una serie de pruebas experimentales para evaluar la eficacia del sistema de protección catódica. Esto incluyó la selección y

preparación de muestras, la exposición a agentes oxidantes, la medición de parámetros eléctricos y la evaluación de los resultados.

Equipo de Laboratorio: Se emplearon diversas herramientas y equipos de laboratorio, incluyendo osciloscopios, multímetros y balanzas analíticas, para medir y registrar datos como corriente, voltaje, peso y área corroída.

Software de Análisis de Imágenes: Se utilizó el software ImageJ para el análisis de imágenes y la determinación del área afectada en las muestras después de las pruebas.

Materiales Químicos y Soluciones: Se emplearon diferentes soluciones químicas, como vinagre, agua oxigenada y sal, para crear un medio oxidante controlado en el laboratorio.

Estructuras y Componentes Metálicos: Se utilizaron estructuras metálicas específicas como muestras de prueba, así como ánodos de cobre y aluminio, para evaluar su respuesta a la protección catódica por corriente impresa.

Herramientas de Manipulación y Preparación: Se emplearon herramientas como lijas, ácido muriático y recipientes plásticos para preparar las muestras antes de las pruebas y manipularlas durante el proceso experimental.

Estas herramientas de investigación se utilizaron en conjunto para llevar a cabo un estudio riguroso y sistemático que permitió evaluar el rendimiento del sistema de protección catódica por corriente impresa en las condiciones específicas de la estructura metálica estudiada.

Como se observa en la figura 19, se presenta el flujograma de trabajo de manera sintetizada y organizada. Para la implementación del circuito de protección catódica por corriente impresa, se consideraron diversas variables de diseño, como el tamaño de la estructura a proteger, el tipo y las características del ánodo, la distancia entre ánodo y cátodo, la posición, el voltaje y la corriente.

Con base en esta información, se lleva a cabo una evaluación para dimensionar el diseño del circuito de protección, específicamente para una caja RAPID LOCK de dimensiones 300x300x100 mm. Todos estos factores se detallan de manera más exhaustiva en secciones posteriores.

3.1.2. Proceso

El procedimiento para la ejecución del proyecto se dividió en las siguientes etapas:

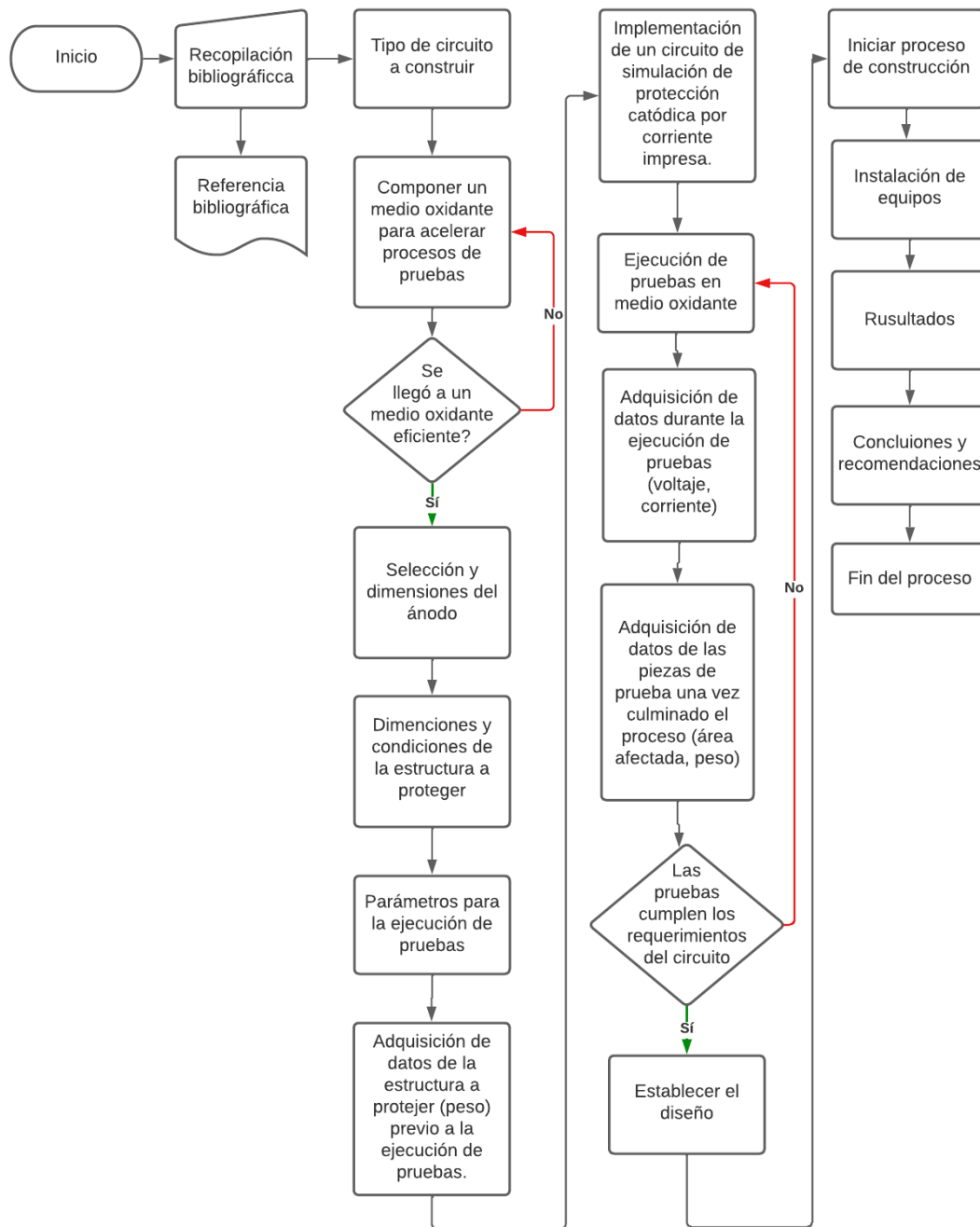


Figura 8. Diagrama de flujo

3.2. Materiales

A continuación, se detalla cada uno de los materiales que fueron seleccionados para la realización de las pruebas de protección catódica por corriente impresa, con el fin de que sea lo más válida posible durante el proceso.

3.2.1. *Aluminio*

El aluminio es un metal ligero con una capa de óxido que lo hace muy resistente a la corrosión, siendo además un excelente conductor de calor y de electricidad.



Figura 9. Ánodo de aluminio

3.2.2. *Caja eléctrica de paso Rapid lock*

Previo al diseño del circuito de protección catódica se debe considerar las características de metal a proteger como: tipo de metal a proteger, las dimensiones de la estructura, estado de su cubierta y condiciones particulares.

- **Material:** Acero laminado en frío
- **Longitud:** 300x300x100mm
- **Espesor:** 0,8 mm
- **Recubrimiento:** resinas de poliéster, aplicadas en un proceso electrostático y horneadas entre 180° y 200° centígrados
- **Resistencia eléctrica:**
- **Protección anticorrosiva:** Proceso químico de desengrase y fosfatizado, previo a la aplicación de pintura.



Figura 10. Caja eléctrica de paso Rapid lock

3.2.3. Baterías

Una batería eléctrica no es más que un acumulador eléctrico, un dispositivo que convierte energía química en energía eléctrica. Es una forma de almacenamiento de energía, ya que no pierde energía con el paso del tiempo.



Figura 11. Baterías 1.5V

3.2.4. Conductores eléctricos

Conductor eléctrico es un material que tiene una baja resistencia al movimiento de una carga eléctrica. Se empleó cables de cobre por su excelente conducción y manejo.



Figura 12. Conductores de cobre

3.2.5. *Sal*

La sal común, conocida como cloruro sódico, es un compuesto natural compuesto por cloro y sodio, con una fórmula química de NaCl. Debido a su alta solubilidad en agua, puede disolverse en aproximadamente 350 gramos por litro, lo que convierte al agua salada en un buen conductor de electricidad (Olivo et al., 2020).

3.2.6. *Vinagre blanco*

El ácido acético, o su forma ionizada conocida como acetato, es un ácido presente en el vinagre. Su fórmula química es $C_2H_4O_2$, y se denomina sistemáticamente ácidoetanoico.

3.2.7. *Agua Oxigenada*

El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) o también conocido como agua oxigenada, es un compuesto químico con características de un líquido incoloro polar, fuertemente enlazado con el hidrógeno tal como el agua, que por lo general se presenta como un líquido ligeramente más viscoso que este. Es conocido por ser un poderoso oxidante.

3.2.8. *Ácido Muriático*

El ácido muriático, conocido como ácido clorhídrico, es una disolución acuosa. Se trata de un producto químico altamente corrosivo y ácido. Su fórmula química es HCl.

3.2.9. Osciloscopio de almacenamiento digital OWO PDS6062S

El osciloscopio de almacenamiento digital portátil PDS6062S es un dispositivo que captura diferentes señales eléctricas y electrónicas, que se obtienen en forma de diferencia de potencial o tensiones.



Figura 13. Osciloscopio de almacenamiento digital OWO PDS6062S

3.2.10. Pinza amperimétrica A622

La sonda de corriente A622 permite que un osciloscopio de uso general muestre señales de corriente CA y CC de hasta 100 amperios de pico (70 A RMS).



Figura 14. Pinza amperimétrica A622

3.2.11. Balanza analítica PA313 Ohaus

La balanza analítica es un instrumento de medida que puede ofrecer valores de precisión de lectura. Está diseñada para el pesaje de rutina básico en una variedad de aplicaciones de laboratorio, industriales y educativas. Se utiliza para medir pequeñas masas de 0.1 μ g a 0.1mg.

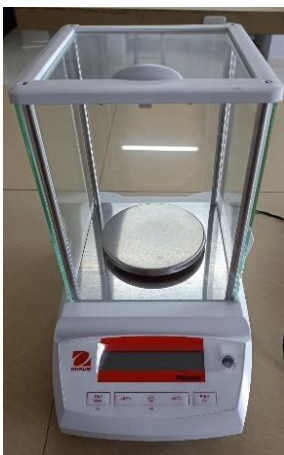


Figura 15. Balanza analítica PA313 Ohaus

3.2.12. AutoCAD

AutoCAD es un Software de diseño que permite la creación y edición profesional de geometría 2D y modelos 3D con sólidos, superficies y objetos.

3.3. Medio Oxidante

La mezcla compuesta por 350 ml de agua oxigenada, 700 ml de vinagre y 75 g de sal originó una solución redox por la presencia del peróxido de hidrogeno (agua oxigenada). El peróxido de hidrogeno actúa como oxidante al liberar oxígeno y, al encontrarse en menor concentración (350 ml), limita la formación de radicales hidroxilos. Por otro lado, el ácido acético al 5% (vinagre blanco casero), al estar en una concentración mayor (700 ml), domina la solución y presenta capacidad corrosiva sobre los metales, ya que este compuesto se adhiere a las superficies metálicas mediante adsorción (López, 2008).

Al combinarse el ácido acético con el peróxido de hidrógeno, se forma el ácido peracético o peróxido de ácido acético, que es un potente oxidante corrosivo en materiales como el acero inoxidable, polipropileno y PVC. Además, se descompone rápidamente en condiciones normales, liberando oxígeno y formando productos menos peligrosos, como agua y dióxido de carbono (Chavarro, 2013). En cuanto a la conductividad eléctrica (CE) el ácido peracético es un mal conductor de electricidad debido a la falta de iones libres. La adición de sal (75 g) en esta solución mejora la conductividad eléctrica ya que al entrar en contacto con la solución de ácido peracético la sal proporciona iones de

sodio (Na⁺) y de cloruro (Cl⁻) encargados de aumentar la cantidad de portadores de carga en la solución, lo que mejora su capacidad para conducir la electricidad (Boards, 2018).

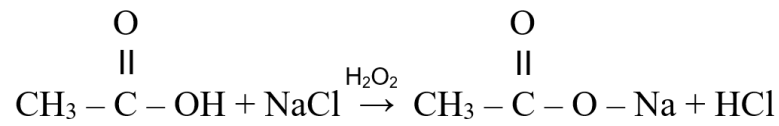


Figura 16. Preparación medio ácido

3.4. Selección y Dimensión del Ánodo

Se empleó una metodología experimental para seleccionar el ánodo, optando por el aluminio debido a su conductividad eléctrica, propiedades anticorrosivas y disponibilidad. Estos materiales fueron elegidos para las pruebas de oxidación y protección catódica por corriente impresa, ajustando visualmente su tamaño de acuerdo con las dimensiones de las pruebas para facilitar la manipulación y el control de los resultados, representando una escala de menor magnitud para la prueba.

El ánodo de aluminio seleccionado presenta un diámetro de 2 mm y una longitud de 9 cm, características que se consideraron para asegurar la capacidad de actuar como ánodo y sacrificar su propia masa mediante el proceso de oxidación, protegiendo así las piezas metálicas contra la corrosión y conseguir una eficiente protección catódica en el entorno específico de aplicación.



Figura 17. Ánodo de Aluminio

3.5. Condición y Dimensión de Piezas de Prueba

Las piezas individuales, obtenidas mediante corte por plasma, fueron sometidas a un proceso de lijado utilizando lijas de numeración #50 y #60, estas permitieron la eliminación de la pintura de protección, mientras que la numeración #120 se utilizó para asegurar una superficie lisa. Es relevante señalar que las dimensiones de las piezas de prueba fueron de 5 cm x 5 cm. Aunque el peso no fue uniforme entre las 9 piezas debido a imprecisiones en el proceso de lijado y corte, se garantizó la homogeneidad en las dimensiones.

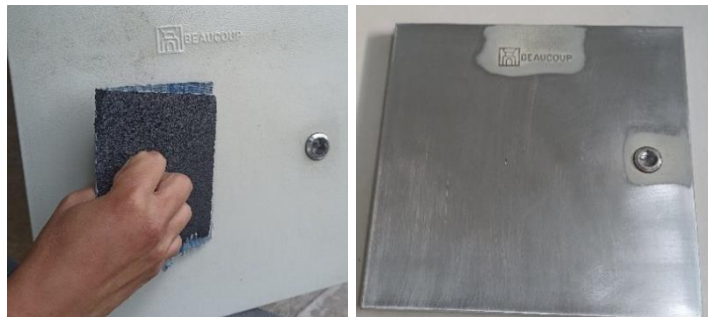


Figura 18. Proceso de lijado de las piezas

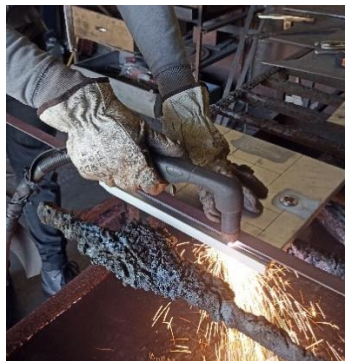


Figura 19. Corte por plasma

Cada una de las piezas metálicas utilizadas en la prueba tenía dimensiones de 5 cm x 5 cm y fueron obtenidas mediante corte por plasma.

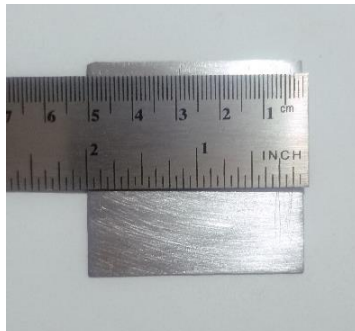


Figura 20. Dimensiones de piezas

La limpieza del metal se llevó a cabo utilizando ácido muriático (muriatol), exponiendo la pieza al medio corrosivo durante 5 minutos. Este procedimiento permitió preparar las piezas para evaluar su comportamiento bajo diversas condiciones de protección catódica por corriente impresa. La acción del ácido muriático contribuyó a la remoción de impurezas, creando una superficie uniforme y propicia para la aplicación de técnicas de protección catódica.

Este proceso de limpieza homogeneizó las condiciones superficiales ideales para llevar a cabo evaluaciones precisas y comparativas del comportamiento del metal en entornos sujetos a protección catódica por corriente impresa.



Figura 21. Pieza sumergida en ácido muriático

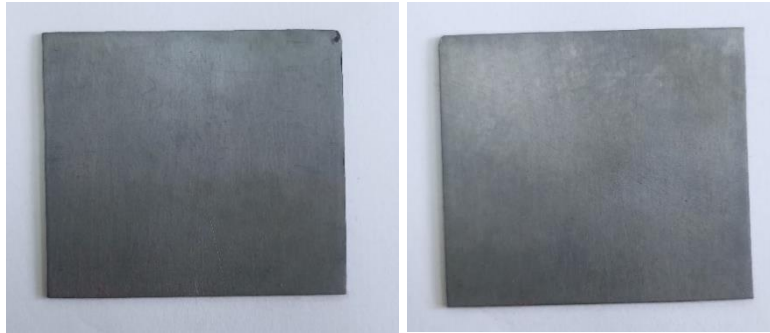


Figura 22. Lado anterior después del ácido muriático. Lado posterior después del ácido muriático

3.6. Pruebas de laboratorio

En esta sección se presentan las distintas pruebas realizadas en laboratorio con el fin de evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación. Cada una de estas pruebas se llevó a cabo siguiendo procedimientos estandarizados y utilizando instrumentos de medición adecuados.

3.6.1. Pruebas con una fuente DC

Se llevaron a cabo dos pruebas iniciales de protección catódica mediante corriente impresa, utilizando una fuente de corriente continua. Estas pruebas se realizaron con dos voltajes diferentes, específicamente a 9 voltios y 3 voltios, con el propósito de verificar y validar el funcionamiento del circuito, así como determinar si el voltaje más alto o bajo era más apropiado para la realización de pruebas adicionales.

3.6.2. Prueba a 9 voltios (9v)

La prueba, que estaba programada para durar dos horas, se completó en tan solo 10 minutos. Esto se atribuye a la utilización de un voltaje elevado de 9 voltios, ya que se observó que el ánodo tiende a desvanecerse rápidamente debido a la reacción en el medio ácido y la corriente que circula a través de él. Durante estos 10 minutos de prueba, el medio ácido incluso experimentó un aumento de temperatura.

3.6.3. Prueba a 3 voltios (3v)

Operando con un voltaje de 3 voltios, la prueba se extendió a las dos horas establecidas. Durante este período, se observó que el ánodo experimentó un impacto menor, cumpliendo así con la función de protección catódica mediante corriente impresa. Esta evidencia sugiere que, al emplear un voltaje más bajo, el circuito logra una mayor estabilidad y funcionalidad.

En ambos casos de prueba, se empleó un ánodo de aluminio en forma de gancho (15 cm), abarcando un área mayor para facilitar la circulación de corriente y la protección del cátodo.

Con estos resultados, se procedió a llevar a cabo pruebas adicionales considerando voltajes más bajos mediante el uso de baterías, así como variando la posición y distancia entre el ánodo y el cátodo.

Para mejorar la parte experimental a mayor escala, se decidió cambiar la forma del ánodo. En las siguientes pruebas, se utilizaron ánodos de aluminio en forma lineal de 9 cm.

3.6.4. Adquisición de Datos (Pesos)

Se realizó la adquisición de datos de cada una de las piezas que fueron sometidas a las pruebas de protección catódica por corriente impresa. Posteriormente, después de llevar a cabo las pruebas, se volvió a pesar cada pieza para determinar la pérdida de peso y realizar la comparación entre las distintas pruebas. El objetivo era identificar cuál prueba resultó más eficaz en términos de protección.



Figura 23. Pesaje de piezas de metal

3.6.5. *Parámetros del Circuito de Protección*

Se llevaron a cabo un total de 9 pruebas bajo diversas condiciones de protección catódica por corriente impresa. Cada una de estas pruebas exhibió las siguientes características:

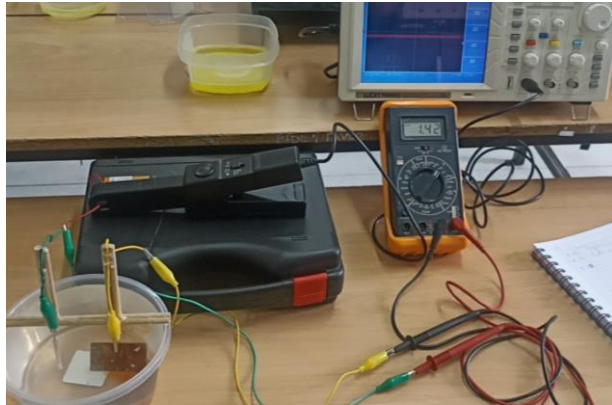


Figura 24. Instrumentos utilizados

Prueba de laboratorio 1:

En esta prueba, se aplicó un voltaje de 2.22V con una batería de 1.5V. La distancia entre el ánodo y el cátodo fue de 1cm, y la posición relativa entre ambos fue lateral.

- Voltaje: 2.22V (Batería: 1.5V)
- Distancia ánodo-cátodo: 1cm
- Posición ánodo-cátodo: Lateral

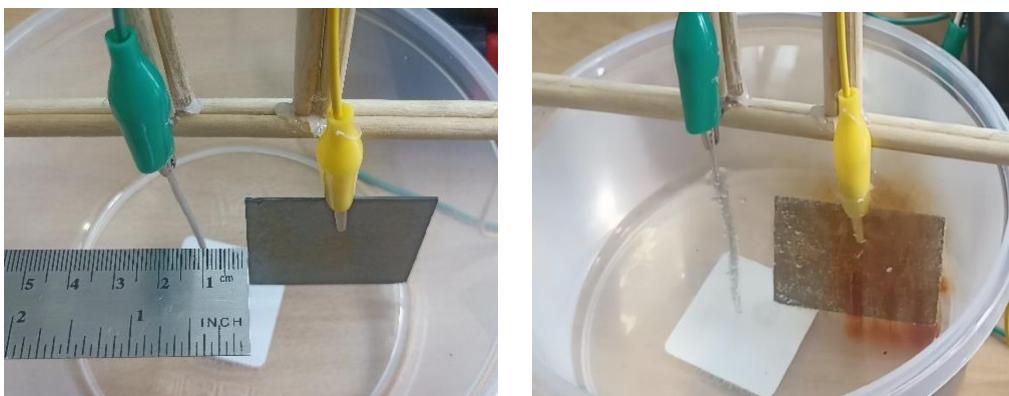


Figura 25. Distancia entre ánodo y cátodo de 1cm

Prueba de laboratorio 2:

La segunda prueba se realizó con un voltaje de 2.22V con una batería de 1.5V. La distancia entre el ánodo y el cátodo se aumentó a 3cm, manteniendo la posición lateral entre ambos.

- Voltaje: 2.22V (Batería: 1.5V)
- Distancia ánodo-cátodo: 3cm
- Posición ánodo-cátodo: Lateral

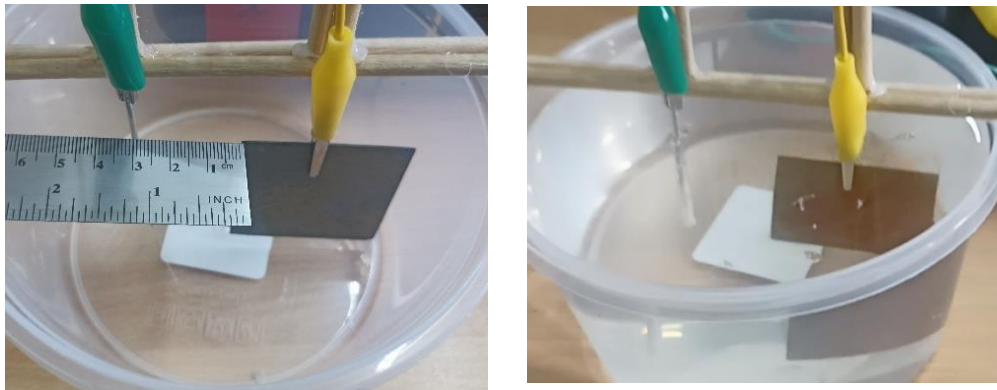


Figura 26. Distancia entre ánodo y cátodo de 3cm

Prueba de laboratorio 3:

Un voltaje de 1.58V con una batería de 1.5V, en esta prueba la distancia entre ánodo y cátodo fue de 1cm, pero la posición relativa cambió a frontal.

- Voltaje: 1.58V (Batería: 1.5V)
- Distancia ánodo-cátodo: 1cm
- Posición ánodo-cátodo: Frontal



Figura 27. Distancia entre ánodo y cátodo de 1cm con 1.58 V

Prueba de laboratorio 4:

Similar a la prueba anterior, se aplicó un voltaje de 1.58V con una batería de 1.5V, pero en esta ocasión la distancia entre ánodo y cátodo fue de 3cm, manteniendo la posición frontal.

- Voltaje: 1.58V (Batería: 1.5V)
- Distancia ánodo-cátodo: 3cm
- Posición ánodo-cátodo: Frontal



Figura 28. Distancia entre ánodo y cátodo de 3cm. Frontal

Prueba de laboratorio 5:

Aumentando el voltaje a 3.19V con una batería de 3V, la quinta prueba tuvo una distancia entre ánodo y cátodo de 1cm y una posición lateral.

- Voltaje: 3.19V (Batería: 3V)
- Distancia ánodo-cátodo: 1cm

- Posición ánodo-cátodo: Lateral



Figura 29. Distancia entre ánodo y cátodo de 3cm. Frontal. Lateral

Prueba de laboratorio 6:

Manteniendo el voltaje en 3.19V con una batería de 3V, la sexta prueba varió la distancia entre ánodo y cátodo a 3cm, con posición lateral.

- Voltaje: 3.19V (Batería: 3V)
- Distancia ánodo-cátodo: 3cm
- Posición ánodo-cátodo: Lateral



Figura 30. Distancia entre ánodo y cátodo de 3cm. Lateral

Prueba de laboratorio 7:

En esta prueba, con un voltaje de 3.15V y una batería de 3V, la distancia entre ánodo y cátodo fue de 1cm, cambiando la posición relativa a frontal.

- Voltaje: 3V (Batería: 3.15V)
- Distancia ánodo-cátodo: 1cm
- Posición ánodo-cátodo: Frontal



Figura 31. Distancia entre ánodo y cátodo de 1cm. Frontal

Prueba de laboratorio 8:

Similares condiciones al caso anterior, con voltaje de 3.19V y una batería de 3V, pero la distancia entre ánodo y cátodo aumentó a 3cm, manteniendo la posición frontal.

- Voltaje: 3.19V (Batería: 3V)
- Distancia ánodo-cátodo: 3cm
- Posición ánodo-cátodo: Frontal



Figura 32. Distancia entre ánodo y cátodo de 3cm. Frontal

Prueba de laboratorio 9:

Esta prueba se llevó a cabo sin protección catódica por corriente impresa, exponiendo directamente el metal al medio corrosivo. Las características específicas de esta exposición directa deben ser analizadas para comprender su comportamiento frente a la corrosión.

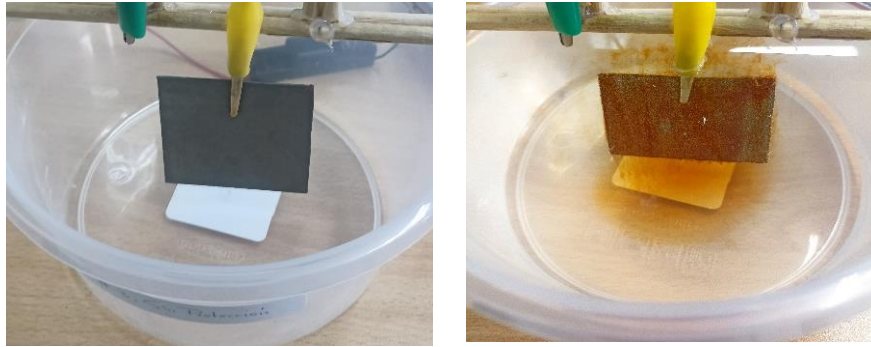


Figura 33. Sin protección catódica

Se debe tener en cuenta que se consideró un margen de error en la medición y adquisición de datos de la corriente, dado que no todas las baterías presentaban la carga especificada por el fabricante. Este procedimiento garantiza una evaluación más precisa de las características eléctricas, considerando las variaciones individuales en la capacidad de las baterías y asegurando resultados más fiables en el análisis de las pruebas realizadas.

Cada una de las pruebas son un modelo a escala de cómo actúa el circuito.

3.6.6. Área Total Afectada

Se utilizó el software ImageJ para determinar tanto el área total afectada por el ácido redox como el área protegida por el circuito sometido a prueba. Cabe destacar que cada pieza contaba con un área de 2500 mm² en ambos lados (anterior y posterior).

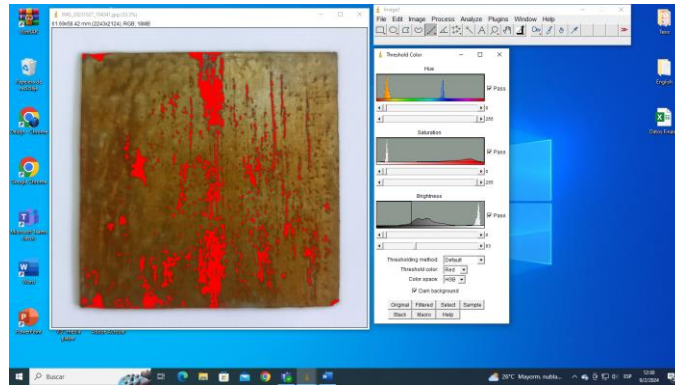


Figura 34. Visualización software ImageJ

3.7. Parámetros de diseño del circuito.

En este apartado se describen los parámetros fundamentales considerados para el diseño del circuito, con el fin de asegurar su correcto funcionamiento y eficiencia. Se analizan aspectos como la selección de componentes, valores de corriente y voltaje, así como las condiciones de operación requeridas para cumplir con los objetivos del sistema

3.7.1. Técnica experimental para evaluar la corrosión

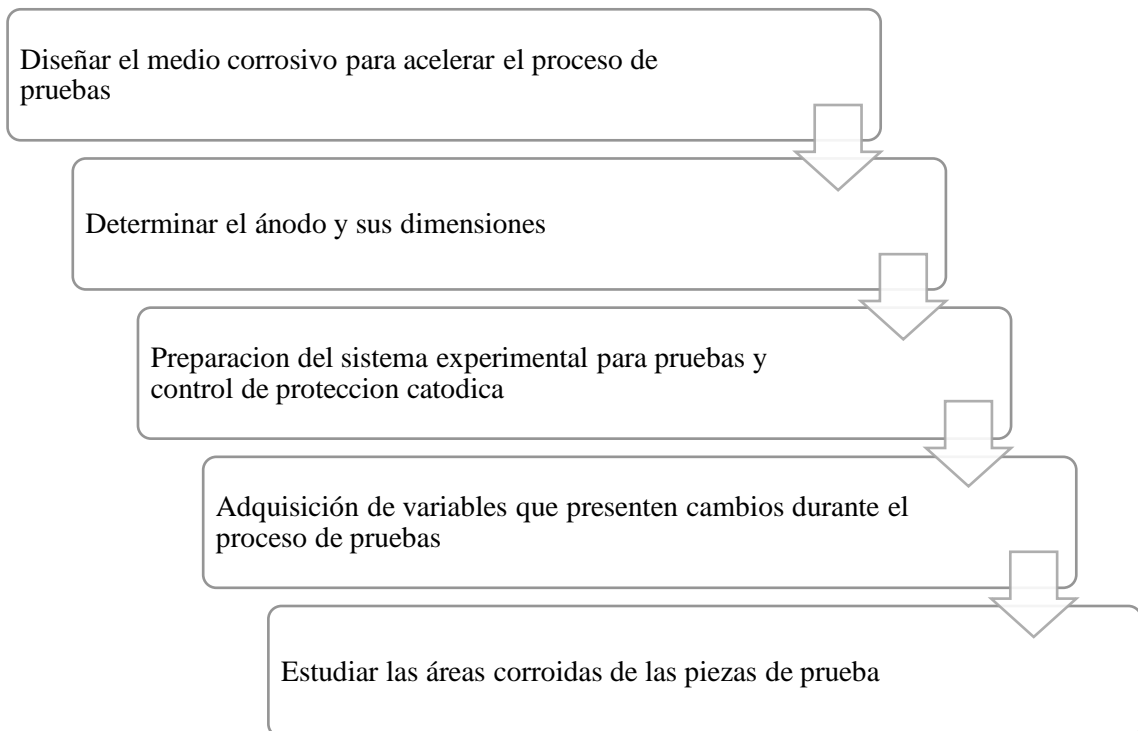


Figura 35. Representación gráfica proceso experimental

Como resultado de estas pruebas de corrosión se pudo determinar las siguientes variables de respuesta

- Área superficial de corrosión (m²)
- Material corroído desprendido de la superficie (g)
- Peso (g)

3.7.2. Ecuaciones

Para el diseño e implementación de un sistema de protección catódica por corriente impresa, es necesario considerar varias ecuaciones y parámetros relacionados con la corrosión. A continuación, se proporcionan las ecuaciones requeridas:

3.7.3. Área a proteger

Esta fórmula para calcular el área de la caja metálica a proteger contra la corrosión se puede dimensionar adecuadamente el sistema de protección para garantizar una cobertura efectiva y prevenir la corrosión en toda la superficie de la caja metálica eléctrica.

$$A_{proteger_caja} = L * W \quad (1)$$

Donde:

- L: Largo de la caja a proteger
- W: Ancho de la caja a proteger

3.7.4. Densidad de Corriente Relativa

Esta fórmula establece la densidad de corriente relativa (DC''), indicando cuánta corriente se requiere para proteger la caja metálica. Valores más altos de DC'' son necesarios para recubrimientos con baja resistividad ρ_{caja} , reflejando la necesidad de una mayor corriente para contrarrestar la corrosión en las áreas recubiertas.

$$DC'' = 73.73 - 13.5 * \ln(\rho_{caja}) \quad (2)$$

Donde:

73.73: Es una constante que se utiliza como punto de referencia. Representa el valor de la densidad de corriente relativa cuando la resistividad (ρ_{caja}) es infinitamente grande.

13.5: Este término se utiliza para ajustar la densidad de corriente relativa en función de la resistividad del recubrimiento (ρ_{caja}).

$\ln(\rho_{caja})$: representa el logaritmo natural de la resistividad del recubrimiento de la caja metálica

3.7.5. Corriente de Protección Requerida (I_{prot}):

La corriente de protección requerida (I_{prot}) es esencial para prevenir la corrosión en la caja metálica. Esta fórmula establece que I_{prot} se obtiene dividiendo la velocidad de corrosión ($V_{corrosión}$) por la Eficiencia del Ánodo. La velocidad de corrosión indica cuánto metal se pierde debido a la corrosión, y la Eficiencia del Ánodo ajusta esta corriente para optimizar la protección. Cuanto mayor sea la Eficiencia del Ánodo, menor será la corriente necesaria para prevenir la corrosión, lo que sugiere una protección más efectiva y eficiente.

$$I_{prot} = \frac{V_{corr}}{Efuciencia\ del\ Anodo} \quad (3)$$

3.7.6. Potencial de protección (E_{prot})

$$E_{prot} = E_{corr} - \frac{I_{prot} * R_{prot}}{\text{Área a proteger}} \quad (4)$$

Donde:

- E_{corr} : Potencial de corrosión
- I_{prot} : Corriente de protección
- R_{prot} : Resistencia del ánodo
- $A_{proteger}$: Área a proteger

3.7.7. Resistencia del Ánodo (R_{prot})

Es la resistencia eléctrica asociada al ánodo. Se calcula dividiendo el voltaje del ánodo por la corriente del ánodo

$$R_{prot} = \frac{\text{Voltaje del \u00c1nodo}}{\text{Corriente del \u00c1nodo}} \quad (5)$$

3.7.8. Eficiencia de la corriente (CE)

Mide la efectividad de la corriente suministrada para la protecci\u00f3n. Se calcula comparando la corriente real entregada con la corriente ideal requerida y expresando el resultado como un porcentaje.

$$CE = \frac{\text{Corriente Real Entregada}}{\text{Corriente Ideal Requerida}} * 100\% \quad (6)$$

3.8. Conexi\u00f3n del circuito

En la Figura 36, se muestra el circuito el\u00e9ctrico propuesto para el desarrollo y evaluaci\u00f3n de los efectos de la protecci\u00f3n cat\u00f3dica por corriente impresa en una estructura met\u00e1lica.

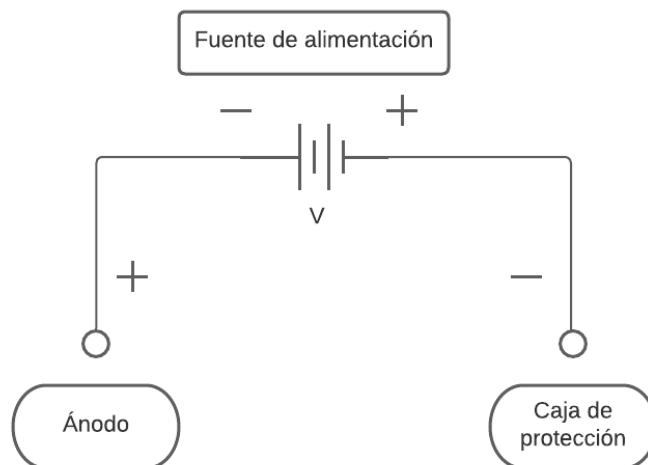


Figura 36. Circuito electr\u00f3nico de protecci\u00f3n cat\u00f3dica por corriente impresa

En este cap\u00edtulo se implement\u00f3 un enfoque experimental para llevar a cabo este estudio, basado en la recopilaci\u00f3n bibliogr\u00e1fica inicial seguida de una serie de pruebas dise\u00f1adas para evaluar la eficacia de un sistema de protecci\u00f3n cat\u00f3dica por corriente impresa en una estructura met\u00e1lica espec\u00edfica. Este m\u00e9todo permiti\u00f3 la manipulaci\u00f3n controlada de variables y la obtenci\u00f3n de datos cuantitativos y cualitativos para analizar el rendimiento del sistema.

CAPITULO 4

PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO Y RESULTADOS

4.1. Implementación del circuito de protección catódica por corriente impresa.

A continuación, se presentan los resultados de las 9 pruebas realizadas en el medio de oxidante, así como el análisis de los resultados obtenidos en cada una de ellas. Estos se discutirán en función de las reacciones observadas, el comportamiento de los reactivos y el nivel de oxidación, proporcionando una visión clara sobre la eficacia del medio de oxidante en cada caso específico.

4.1.1. Prueba 1

Este resultado corresponde a la prueba 1, en la cual se aplicó un voltaje de 2.22 V utilizando una batería de 1.5 V. Es importante considerar que la distancia entre el ánodo y el cátodo fue de 1 cm, y ambos electrodos se ubicaron en posición lateral. Esta configuración influyó en la eficiencia del proceso de oxidación observado durante la prueba.

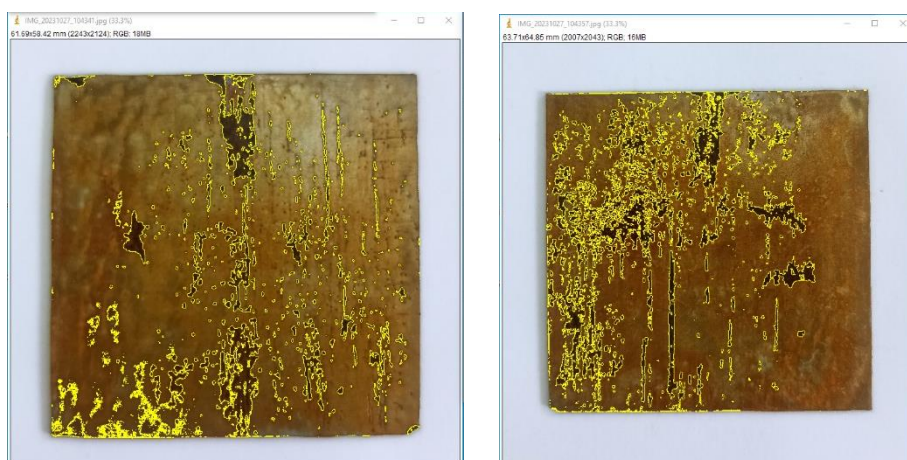


Figura 37. Izq. Lado anterior – Prueba 1- Dere. Lado posterior – Prueba 1

La Figura 37 muestra el área afectada en los lados anterior y posterior de la pieza metálica después de haber sido sumergida la solución de ácido peracético. La pieza se colocó a una distancia de 1 cm entre el ánodo y el cátodo, en posición lateral, y fue sometida a un voltaje de 2.22 V. En el lado derecho de la Figura 37 se observa que la cara posterior presenta un grado de corrosión más pronunciado. Este hallazgo se ve respaldado por la información de la Figura 38, la cual indica que el lado posterior

experimentó un nivel de oxidación del 15.42 %, en contraste con el lado anterior, que presentó una corrosión del 10.05 %.

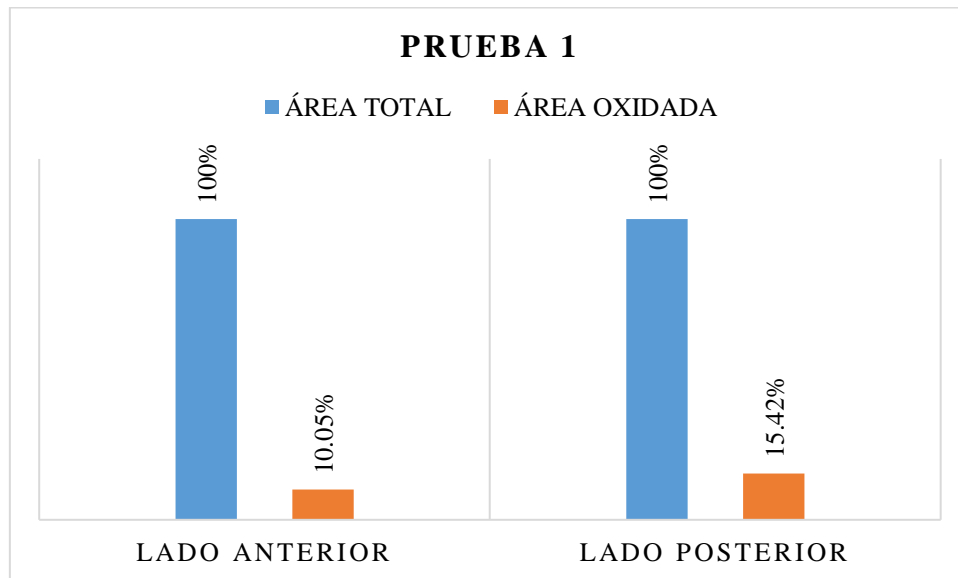


Figura 38. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 1

4.1.2. Prueba 2

Este resultado corresponde a la prueba 2, en la cual se aplicó un voltaje de 2.22 V utilizando una batería de 1.5 V. Es importante considerar que la distancia entre el ánodo y el cátodo fue de 3 cm, y ambos electrodos se ubicaron en posición lateral. Esta configuración influyó en la eficiencia del proceso de oxidación observado durante la prueba.

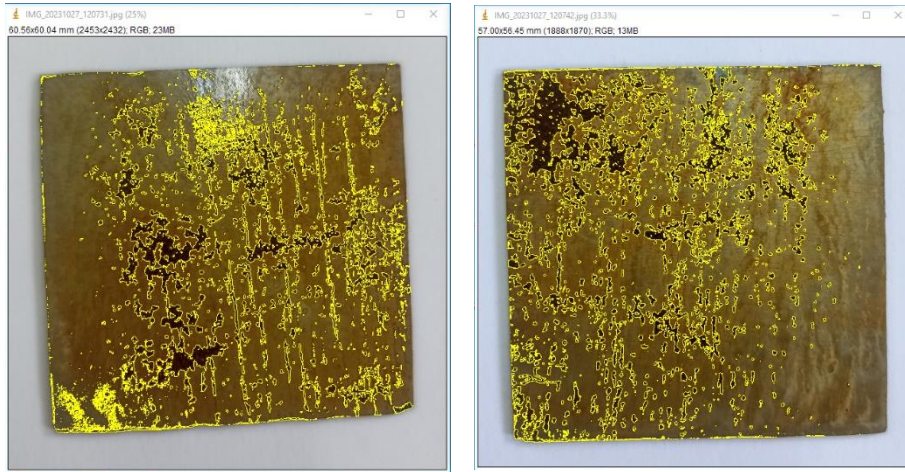


Figura 39. Figura 39. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 2

La Figura 39 muestra los efectos de corrosión que experimentó la pieza metálica después de ser sumergida en la solución de ácido peracético a una distancia de 3 cm, manteniendo una posición lateral entre el ánodo y el cátodo, y sometida a un voltaje de 2.22V. Como se puede apreciar en la Figura 39 es poco notorio la diferencia de corrosión entre los lados ya que las áreas oxidadas tienen similitud. Pese a este resultado la Figura 40, demuestra que la parte posterior presentó mayor corrosión ante el ácido peracético. El valor de corrosión que presentó el lado posterior fue de 17.16% seguido del lado anterior con una corrosión del 16.18%.

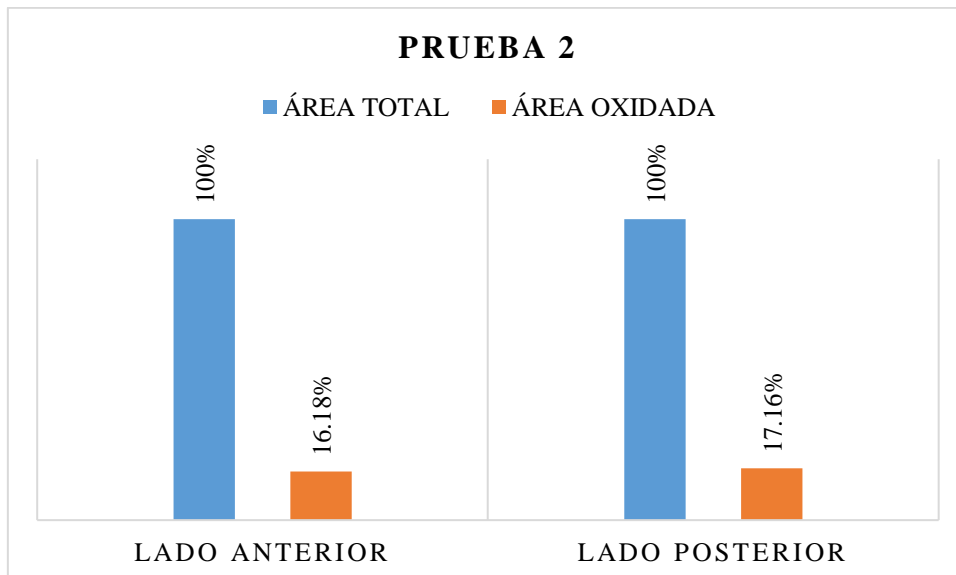


Figura 40. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 2

4.1.3. Prueba 3

Este resultado corresponde a la prueba 3, en la cual se aplicó un voltaje de 1.58 V utilizando una batería de 1.5 V. Es importante considerar que la distancia entre el ánodo y el cátodo fue de 1 cm, y ambos electrodos se ubicaron en posición frontal. Esta configuración influyó en la eficiencia del proceso de oxidación observado durante la prueba.

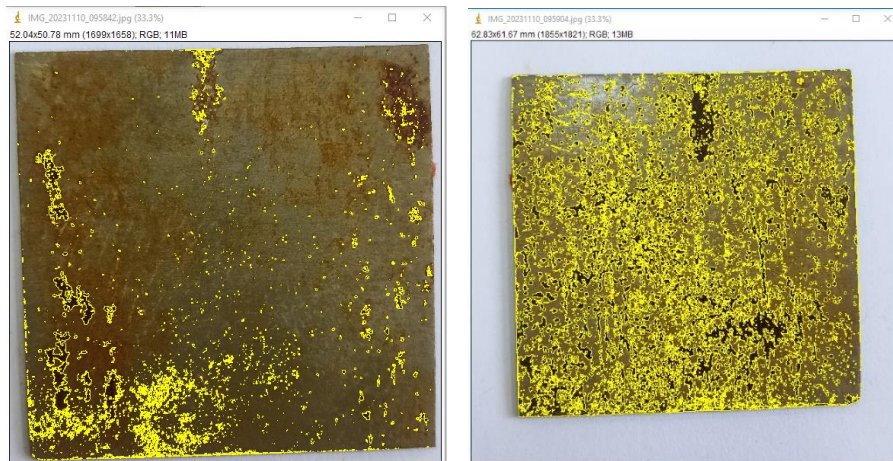


Figura 41. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 3

La Figura 41 muestra como el ácido peracético afecta a la pieza metálica en sus lados anterior y posterior al ser expuesta a un voltaje de 1.58V menor que el resto pruebas aplicadas, a 1 cm de distancia entre ánodo y cátodo manteniendo una posición lateral. Es evidente que el lado posterior mostró mayor corrosión en esta prueba así se lo puede ver en la Figura 42 donde se muestra que el valor de oxidación de esta prueba correspondió a 30.60% difiriendo del lado anterior donde se presentó un valor poco significativo de 3.72%.

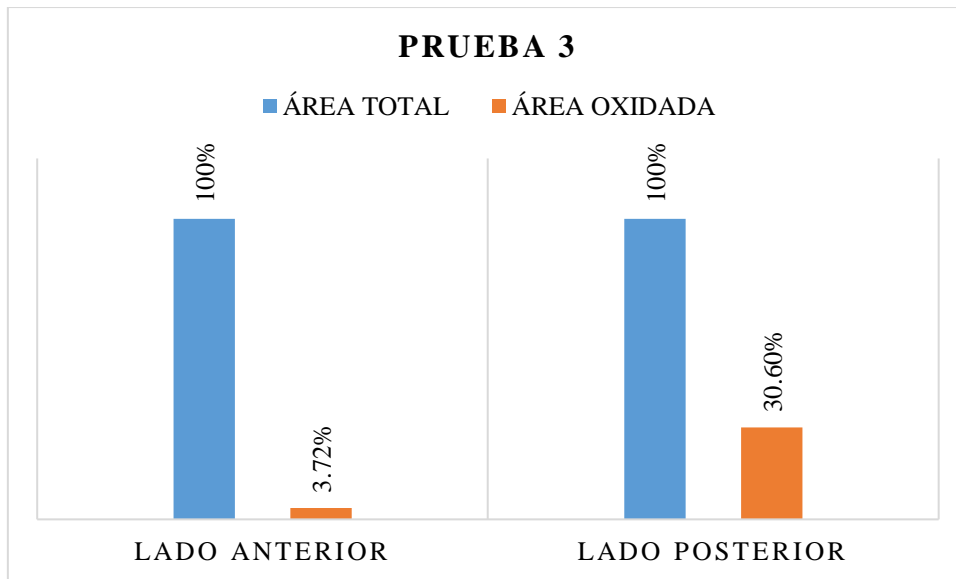


Figura 42. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 3

4.1.4. Prueba 4

Este resultado corresponde a la prueba 4, en la cual se aplicó un voltaje de 1.58 V utilizando una batería de 1.5 V. Es importante considerar que la distancia entre el ánodo y el cátodo fue de 3 cm. El ánodo y cátodo se ubicaron en posición frontal. Esta configuración influyó en la eficiencia del proceso de oxidación observado durante la prueba.

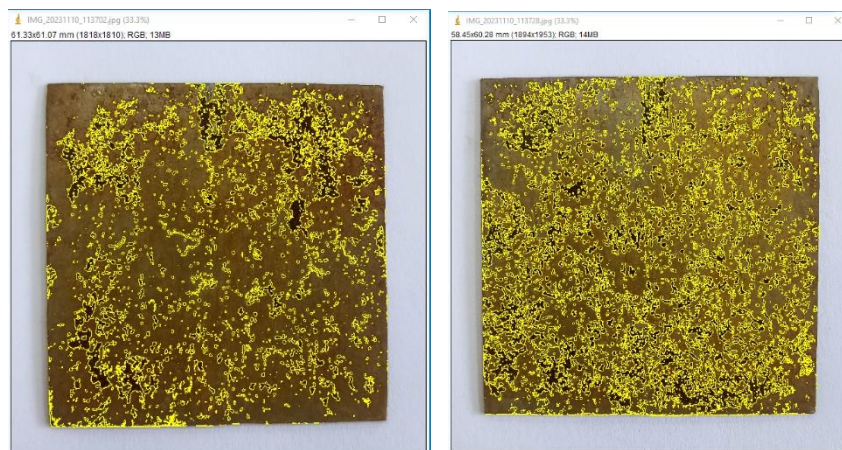


Figura 43. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 4

La pieza metálica al ser expuesta a un voltaje de 1.58V con una distancia entre ánodo y cátodo de 3 cm manteniendo una distancia frontal mostró que en el lado posterior la corrosión fue mayor a diferencia del lado anterior donde los efectos de la corrosión son menores (Figura 43). Esto se puede apreciar en la

Figura 44 donde el lado posterior de la pieza metálica mostró un área oxidada de 27.10% un valor de oxidación significativo a diferencia del 16.38% correspondiente al área oxidada del lado anterior.

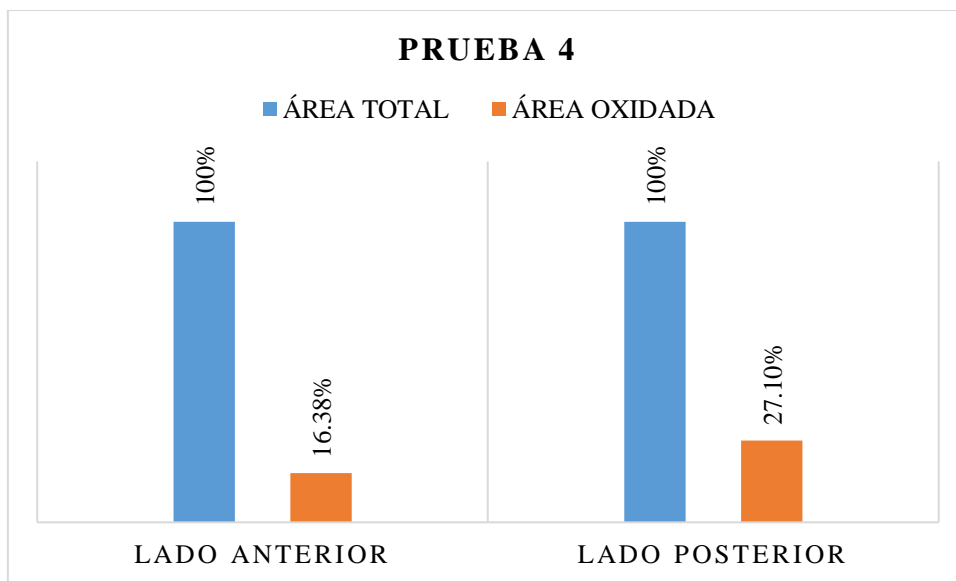


Figura 44. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 4

4.1.5. Prueba 5

Este resultado corresponde a la prueba 5, en la cual se aplicó un voltaje de 3.19 V utilizando una batería de 3 V. Es importante considerar que la distancia entre el ánodo y el cátodo fue de 1 cm. El ánodo y cátodo se ubicaron en posición lateral. Esta configuración influyó en la eficiencia del proceso de oxidación observado durante la prueba.



Figura 45. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 5

En lo que respecta a la prueba 5 donde el voltaje aumentó a 3.19 V. La distancia entre ánodo y cátodo fue de 1 cm, mientras que la pieza metálica mantuvo una posición lateral. La Figura 45 muestra poca significancia en lo que respecta al área afectada por la corrosión en ambos lados de la pieza metálica. Aunque la Figura 46 refuta esta afirmación al presentar un valor de corrosión poco significativo en el lado posterior correspondiente a 8,38%, difiriendo del lado anterior que presentó un valor menor de 3.29% de oxidación.

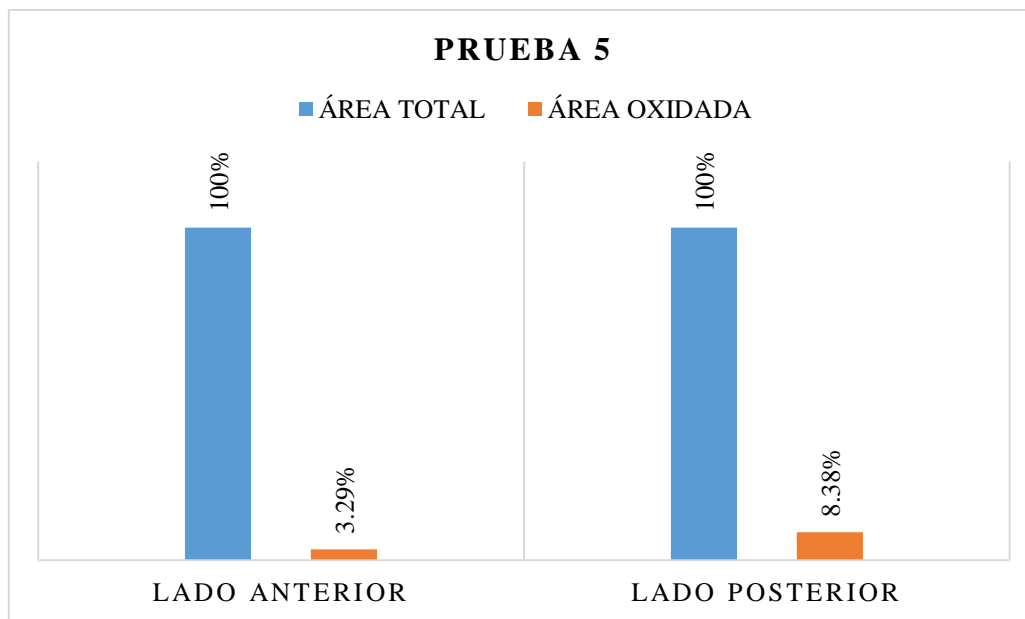


Figura 46. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 5

4.1.6. Prueba 6

Este resultado corresponde a la prueba 6, en la cual se aplicó un voltaje de 3.19 V utilizando una batería de 3 V. Es importante considerar que la distancia entre el ánodo y el cátodo fue de 3 cm. El ánodo y

cátodo se ubicaron en posición lateral. Esta configuración influyó en la eficiencia del proceso de oxidación observado durante la prueba.

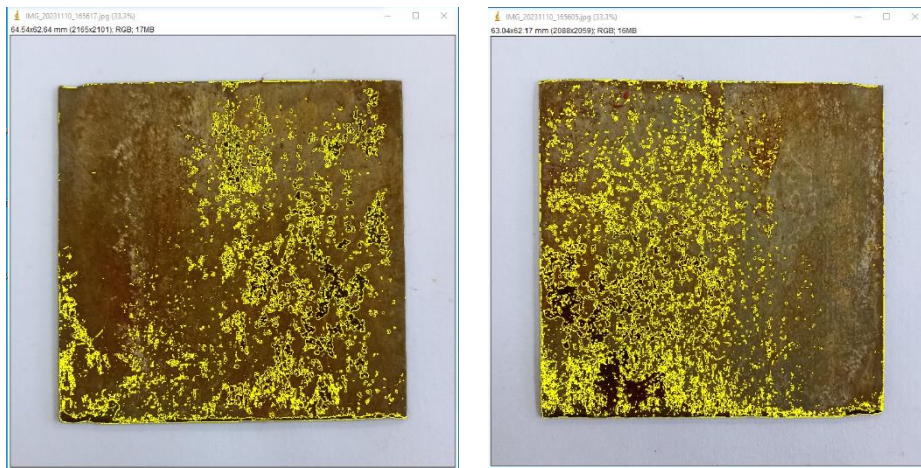


Figura 47. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 6

La pieza metálica al ser expuesta a un voltaje de 3.19 V con una distancia entre ánodo y cátodo de 3 cm manteniendo una posición lateral mostró que en el lado posterior la corrosión fue mayor a diferencia del lado anterior donde los efectos de la corrosión son menores (Figura 47). Esto se puede apreciar en la Figura 48 donde el lado posterior de la pieza metálica mostró un área oxidada de 16.64% un valor de oxidación poco significativo seguido del 13.16% correspondiente al área oxidada del lado anterior.

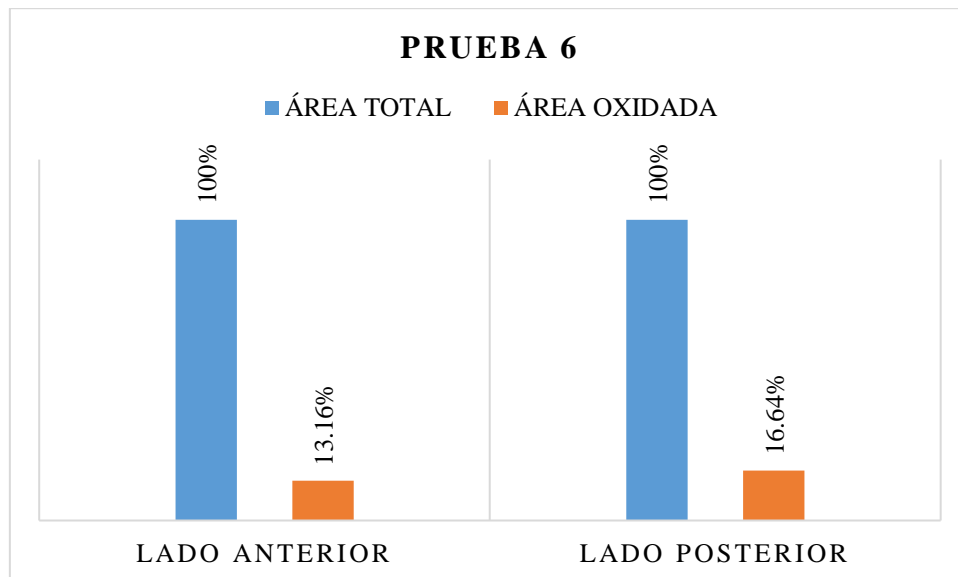


Figura 48. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 6

4.1.7. Prueba siete

Este resultado corresponde a la prueba 4, en la cual se aplicó un voltaje de 3.15 V utilizando una batería de 3 V. Es importante considerar que la distancia entre el ánodo y el cátodo fue de 1 cm. El ánodo y cátodo se ubicaron en posición frontal. Esta configuración influyó en la eficiencia del proceso de oxidación observado durante la prueba.



Figura 49. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 7

En lo que respecta a la prueba 7 donde el voltaje fue de 3 V. La distancia entre ánodo y cátodo fue de 1 cm, mientras que la pieza metálica mantuvo una posición lateral. La Figura 50 muestra que el lado posterior de la pieza metálica presentó un área oxidada de 6.80% a diferencia del lado anterior que presentó un área oxidada de 1.91%.

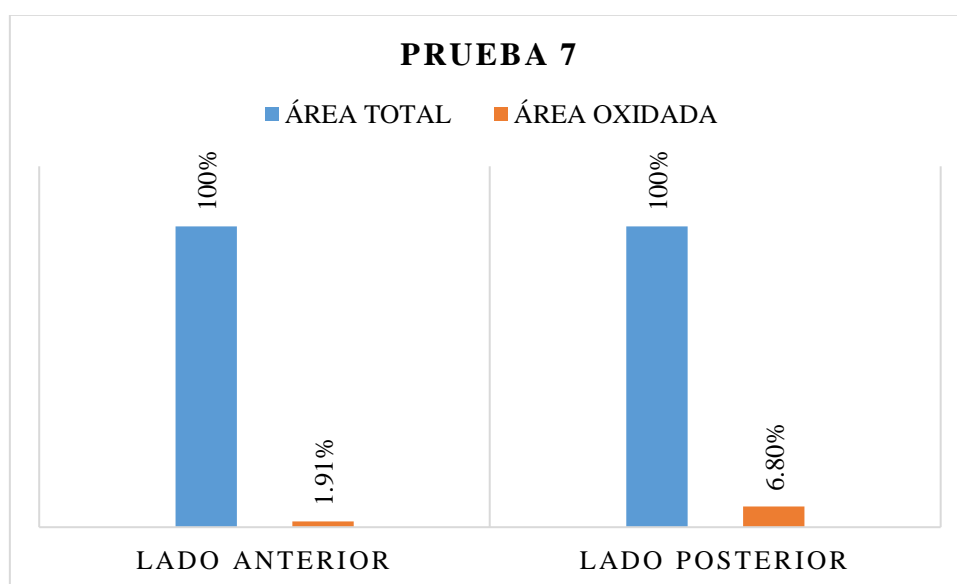


Figura 50. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 7

4.1.8. Prueba ocho

Este resultado corresponde a la prueba 8, en la cual se aplicó un voltaje de 3.19 V utilizando una batería de 3 V. Es importante considerar que la distancia entre el ánodo y el cátodo fue de 3 cm. El ánodo y cátodo se ubicaron en posición frontal. Esta configuración influyó en la eficiencia del proceso de oxidación observado durante la prueba.

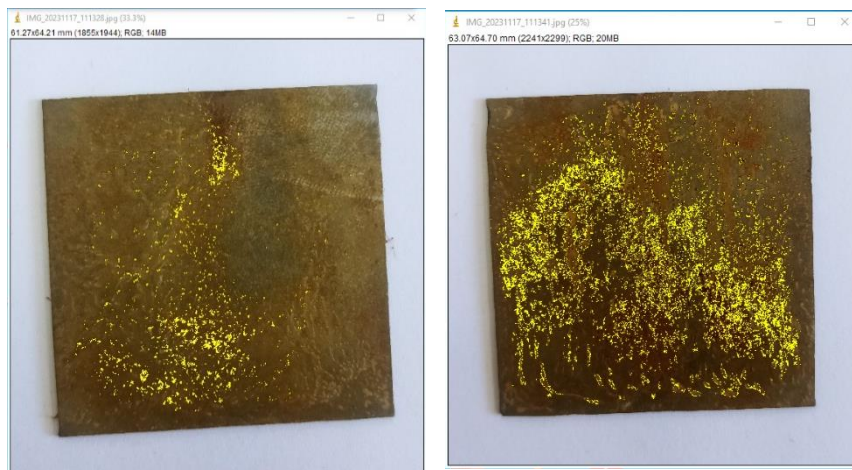


Figura 51. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 8

En esta prueba, la pieza metálica fue expuesta a un voltaje de 3.19V con una distancia entre ánodo y cátodo de 3 cm presentando una posición frontal. Los resultados obtenidos en esta prueba demostraron ser los más idóneos ante la protección de corrosión. Así en la figura 51 en lo que respecta al lado posterior se puede apreciar un área reducida debido a la reacción química presentando un área de oxidación de 1.50%, mientras que en el lado anterior la pieza metálica mostró un área oxidada de 0.42% (Figura 52).

Estos resultados fueron los más adecuados para desarrollar el sistema de protección catódica.

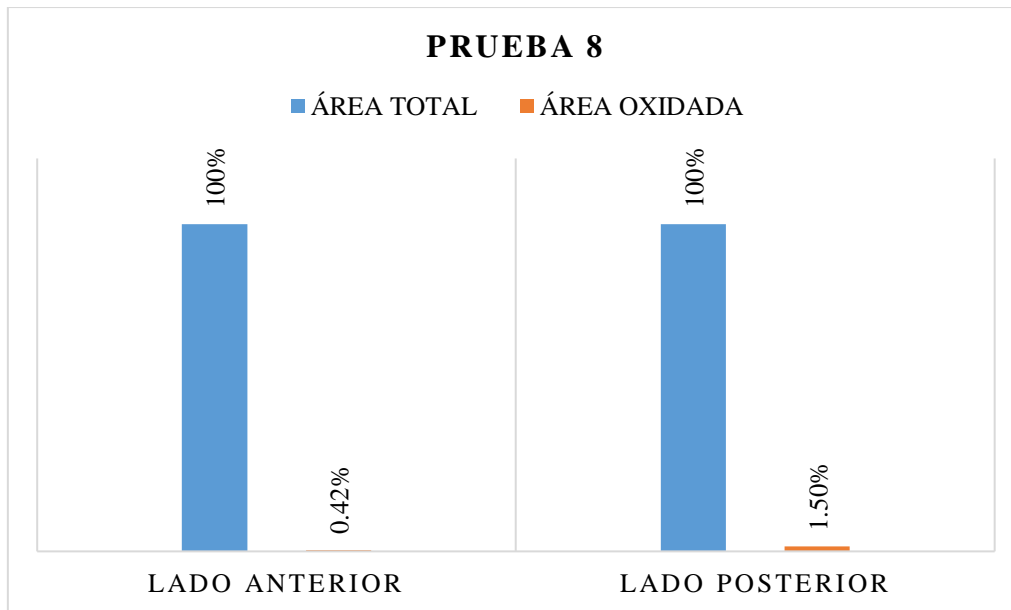


Figura 52. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 8

4.1.9. Prueba nueve

Este resultado corresponde a la prueba 9, en la cual no se aplicó protección catódica mediante corriente impresa, lo que implicó una exposición directa del metal al medio corrosivo. Las características específicas de esta condición deben ser analizadas para comprender el comportamiento del material frente a los procesos de corrosión en ausencia de protección electroquímica.

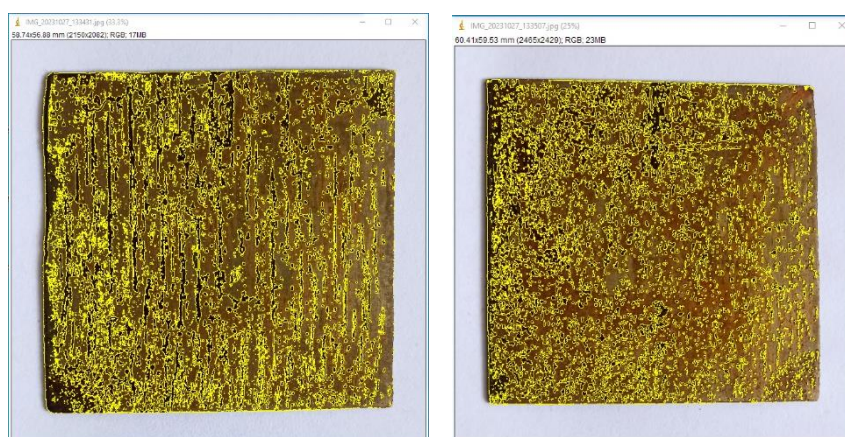


Figura 53. Izq. Lado anterior - Dere. Lado posterior – Prueba 9

Esta prueba se realizó sin la aplicación de protección catódica por corriente impresa, exponiendo directamente el metal al medio corrosivo. Se debe mencionar que se aplicó un margen de error en la medición y adquisición de datos de la corriente, ya que no todas las baterías contaban con la carga especificada por el fabricante. Este enfoque asegura una evaluación precisa de las características eléctricas, considerando las variaciones individuales en la capacidad de las baterías.

Los resultados revelaron un valor de oxidación del 30.59% en el lado anterior, mientras que en el lado posterior se observó una corrosión del 26.64% (Figura 54).

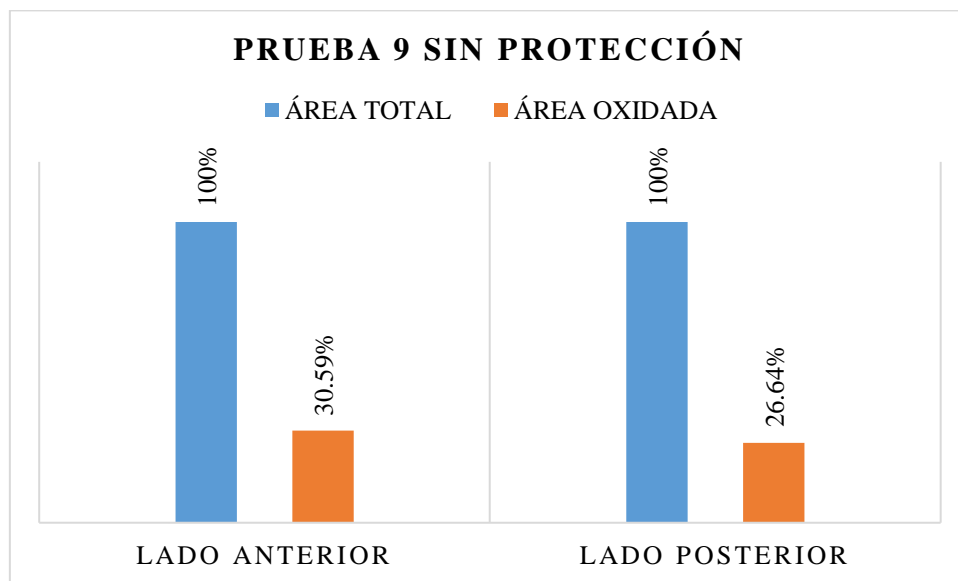


Figura 54. Diagrama de barras que representa el porcentaje de corrosión en Prueba 9

4.2. Corriente y Voltaje

En cada una de las pruebas con protección catódica por corriente impresa, se evidencia una variación de corriente en dos condiciones específicas: en presencia de un medio ácido y durante la desintegración de material tanto del ánodo como del cátodo, generando coloides metálicos.

Con el tiempo, la desintegración de estos coloides metálicos contribuye a la presencia de una solución rica en los mismos. Estos coloides metálicos, al ser conductores, modifican la corriente en función de sus cargas. Por lo tanto, a medida que hay un mayor desprendimiento de coloides, se experimenta una variación más significativa, ya que el medio altera sus cargas.

A pesar de estas variaciones en la corriente, se observa que el voltaje presenta cambios mínimos. Este fenómeno se atribuye al desgaste gradual propio de una batería a medida que transcurre el tiempo. Además, tanto la corriente como el voltaje tienden a descender con el tiempo debido a la reacción del medio corrosivo y al desgaste progresivo del ánodo. Esto ocasiona que el circuito no se mantenga constante y experimente una apertura gradual.

4.2.1. Datos de Corriente

Para la obtención de los valores de corriente mediante el osciloscopio y la pinza amperimétrica, se registraron 3600 valores en milivoltios, con una medición por segundo durante una hora. Estos valores fueron transformados a miliamperios, considerando la relación de $10mV = 1A$. Para estabilizar los datos variables, se tomó un promedio cada 10 segundos, resultando en 360 valores. Posteriormente, se calculó la mediana con un conjunto de 6 valores, logrando así una representación más consistente y una gráfica más estable.

4.2.2. Comportamiento de la corriente en cada prueba

Los datos obtenidos a través del osciloscopio y la pinza amperimétrica revelan un patrón interesante en la variación de corriente y voltaje a lo largo del tiempo en cada una de las pruebas (Anexo 1).

Durante el experimento, se observaron los valores de corriente eléctrica en milamperios (mA) en ocho puntos de medición (P1 a P8) a lo largo de 56 minutos, con registros tomados cada minuto. Al inicio, todos los puntos registraban una corriente de 0 mA, lo que indicaba que en el sistema aún no se aplicaba voltaje. A partir del minuto 1, se produjo un incremento repentino en la corriente en todos los puntos, alcanzando valores máximos entre aproximadamente 200 mA y 990 mA, dependiendo del punto.

En los primeros minutos, las corrientes fueron elevadas y posteriormente mostraron una tendencia general de disminución gradual. El punto P8 inició con un valor cercano a los 990 mA, descendiendo hasta estabilizarse alrededor de 530 mA. Un comportamiento similar se observó en el punto P7, que pasó de valores cercanos a 960 mA a 490 mA hacia el final del periodo registrado.

Algunos puntos, como P3 y P4, presentaron valores menores desde el inicio y mostraron menos variabilidad a lo largo del tiempo. El punto P3 osciló entre 340 mA y 280 mA, mientras que el punto P4 presentó valores entre 170 mA y 230 mA, lo que sugiere que estos puntos podrían estar conectados a partes del sistema con menor demanda eléctrica o mayor resistencia.

TABLA 7

Comportamiento de la corriente en cada prueba

Valores	P1: I (mA)	P2: I (mA)	P3: I (mA)	P4: I (mA)	P5: I (mA)	P6: I (mA)	P7: I (mA)	P8: I (mA)
Max	540,52	554,03	364,32	229,02	766,39	686,91	962,18	989,78
Min	454,56	463,61	237,83	140,82	455,67	435,29	454,39	503,94

La Tabla 8 muestra los valores máximos y mínimos de corriente eléctrica registrados en cada uno de los puntos de medición (P1 a P8) durante el experimento. Estos resultados demuestran variación en el comportamiento eléctrico del sistema, según la ubicación del punto de medición.

El punto P8 alcanzó la corriente más alta, con un valor máximo de 989,78 mA y un mínimo de 503,94 mA, seguido por el punto P7, con un máximo de 962,18 mA y un mínimo de 454,39 mA. De forma similar, el punto P5 también presentó una corriente considerable, con un valor máximo de 766,39 mA y un mínimo de 455,67 mA.

En contraste, los puntos P3 y P4 reflejaron valores menores. P3 registró una corriente máxima de 364,32 mA y una mínima de 237,83 mA, mientras que P4 osciló entre 229,02 mA y 140,82 mA. Estos valores demostraron que ambas ubicaciones corresponden a zonas del sistema con menor demanda eléctrica o con mayor resistencia interna.

Los puntos P1, P2 y P6 mostraron un comportamiento intermedio. P1 alcanzó una corriente máxima de 540,52 mA y mínima de 454,56 mA; P2 presentó valores entre 554,03 mA y 463,61 mA; y P6, entre 686,91 mA y 435,29 mA. Estas mediciones indican una demanda eléctrica moderada en estas zonas del circuito.

Durante la prueba, se observaron fluctuaciones importantes en los valores de corriente, en los primeros minutos. Este comportamiento es característico en sistemas eléctricos dinámicos, donde las

condiciones tienden a estabilizarse con el tiempo. Para obtener una representación clara y uniforme del comportamiento eléctrico, se aplicó un proceso de suavizado, promediando los datos cada 10 segundos y calculando medianas en grupos de seis valores. Este enfoque permitió visualizar de manera más coherente la evolución de la corriente a lo largo de toda la prueba (Figura 55).

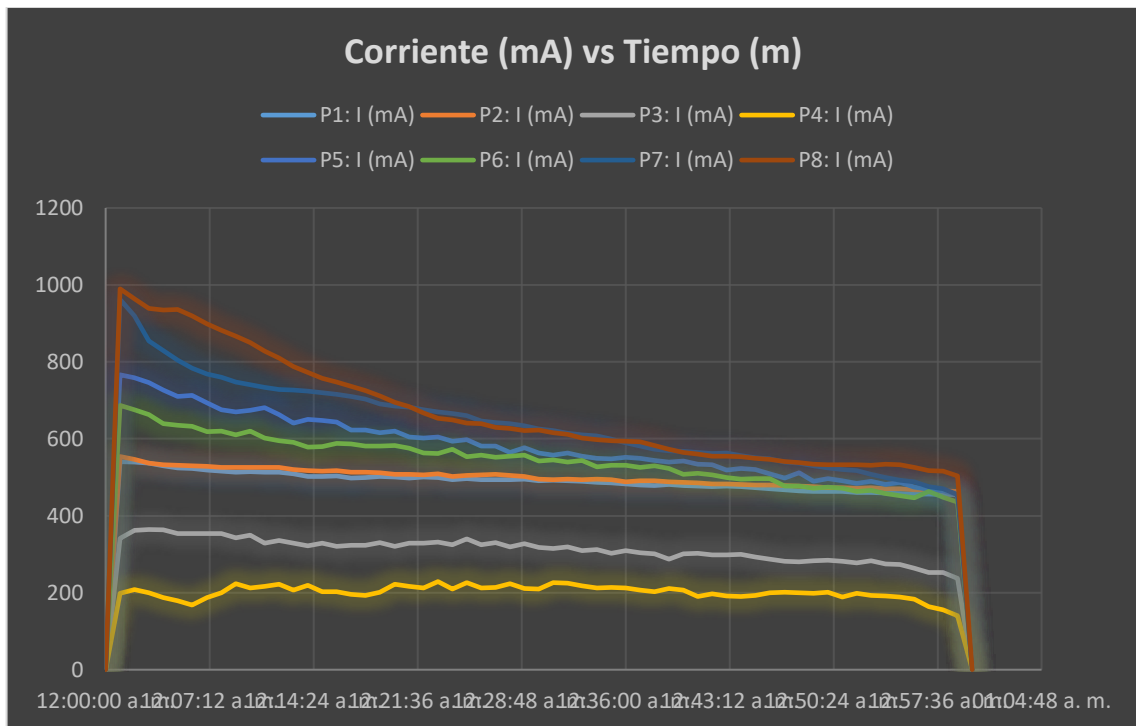


Figura 55. Relación Corriente vs Tiempo

4.2.3. Comportamiento del Voltaje en cada Prueba

La Tabla 9 presenta el comportamiento del voltaje (V) en función del tiempo (minutos) para ocho pruebas distintas, identificadas como P1 a P8. Las unidades utilizadas son voltios (V) para el voltaje y minutos (m), con formato de hora:minuto:segundo, para el tiempo.

Al inicio del experimento (0:00:00), se observó que los valores de voltaje eran altos en todas las pruebas, con máximos de hasta 3.19 V en P5, P6 y P8. A lo largo del experimento, todos los voltajes disminuyeron progresivamente hasta alcanzar valores mínimos que oscilaron entre 1.14 V y 1.86 V, según el caso, antes de aumentar nuevamente en el minuto 60.

Este patrón evidenció una descarga progresiva del voltaje, asociada al uso de una fuente de energía que se agota con el tiempo. En el minuto 1:00:00, se observó un aumento en los valores de voltaje en todas las pruebas, alcanzando, por ejemplo, 2.46 V en P6 y 2.45 V en P8. Esto sugiere una posible recarga del sistema debido a un cambio en las condiciones experimentales.

A pesar de la tendencia general descendente, el comportamiento del voltaje no fue uniforme en todas las pruebas. En P3 y P4 se registraron los valores más bajos durante casi toda la duración del experimento (con descensos desde 1.58 V hasta aproximadamente 0.59 V), mientras que P5 y P6 mantuvieron voltajes relativamente más estables y altos.

TABLA 8

Comportamiento del Voltaje en cada Prueba

Valores	P1: V	P2: V	P3: V	P4: V	P5: V	P6: V	P7: V	P8: V
Max	2,22	2,22	1,58	1,58	3,19	3,19	3,15	3,19
Min	1,16	1,14	0,66	0,59	1,77	1,8	1,78	1,81

La Tabla 9 presenta los valores máximos y mínimos de voltaje medidos en cada uno de los puntos de prueba (P1 a P8) durante el experimento. Estos valores permiten analizar el comportamiento eléctrico del sistema en términos de tensión, mostrando diferencias entre los distintos puntos del circuito.

Los puntos P5, P6, P7 y P8 alcanzaron los valores máximos más altos, todos cercanos a 3,19 V, lo que indica que estas zonas del sistema operaron con mayor tensión eléctrica. Sus valores mínimos oscilaron entre 1,77 V y 1,81 V, presentando mayor estabilidad o una menor pérdida de voltaje en estos sectores.

Los puntos P3 y P4 registraron los voltajes más bajos. En ambos casos, los valores máximos fueron de 1,58 V, y los valores mínimos se situaron en 0,66 V para P3 y 0,59 V para P4. Esta baja tensión podría deberse a una mayor caída de voltaje en estas zonas, posiblemente asociada con una mayor resistencia o un menor aporte energético.

Por su parte, los puntos P1 y P2 mostraron un comportamiento intermedio, con voltajes máximos de 2,22 V y valores mínimos de 1,16 V y 1,14 V. Estos resultados indican que estas áreas del circuito también experimentaron fluctuaciones, aunque menos pronunciadas que las observadas en P3 y P4.

En conjunto, los datos de voltaje permiten identificar variaciones importantes dentro del sistema y sugieren la existencia de zonas con diferentes características eléctricas, posiblemente relacionadas

con la disposición de cargas, resistencias o condiciones de conexión en cada punto. En cuanto al voltaje, se evidencian variaciones menos pronunciadas a lo largo del tiempo, lo cual puede atribuirse al desgaste gradual de la batería, que tiende a mantener un nivel de voltaje relativamente constante en comparación con la corriente (Figura 56).

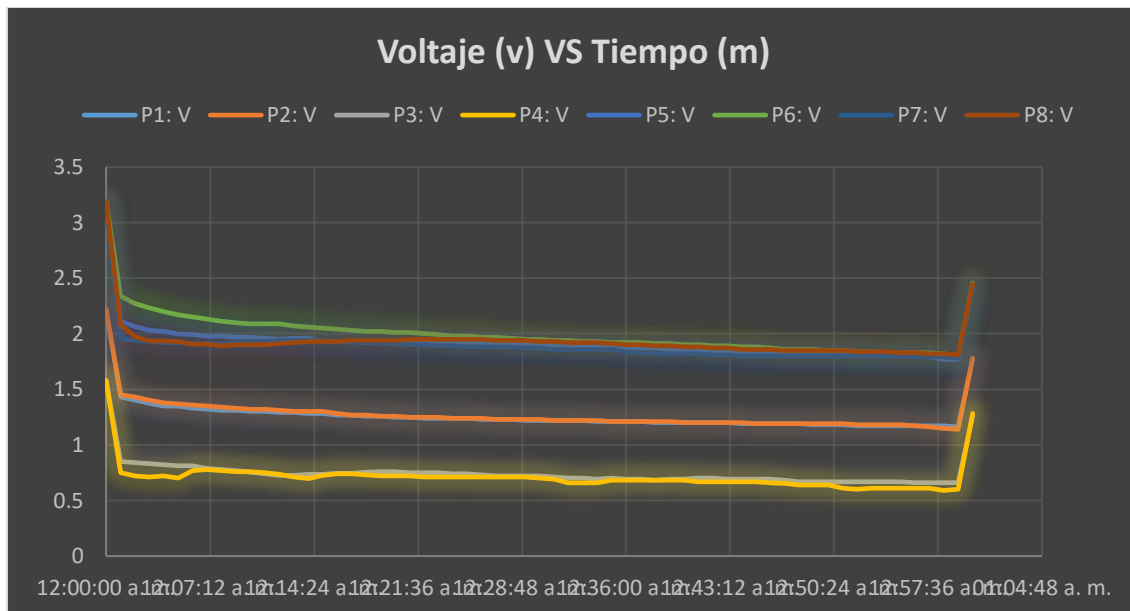


Figura 56. Relación Voltaje vs Tiempo

4.3. Peso final del cátodo

La Tabla 9 presenta los resultados de las pruebas 8 y 9, enfocadas en la evaluación del efecto de la protección catódica sobre la pérdida de masa en los cátodos. Ambas piezas tienen un área de 25 cm². En la Prueba 8, se aplicó protección catódica con un voltaje nominal inicial de 3,18 V y final de 2,46 V. El voltaje real disminuyó de 2 V a 1,81 V, con una disposición frontal entre ánodo y cátodo y una distancia de 3 cm. Bajo estas condiciones, el peso del cátodo pasó de 19,640 gr a 19,489 gr (Peso Final 2), lo que representa una pérdida total de 0,151 gr, incluyendo 0,028 gr de residuo corrosivo.

En la Prueba 9, no se aplicó ningún tipo de protección (voltajes en cero y sin ánodo), funcionando como prueba de control. En este caso, el cátodo sufrió una pérdida de masa mucho mayor, pasando de 19,901 g a 18,880 g, con un residuo corrosivo de 0,052 g. La pérdida neta fue de 1,021 g, significativamente más alta que la observada en la Prueba 8.

Estos resultados demuestran que la protección catódica reduce la corrosión del cátodo. La diferencia entre ambas pruebas evidencia la efectividad del sistema de corriente impresa en minimizar el desgaste por corrosión en estructuras metálicas expuestas.

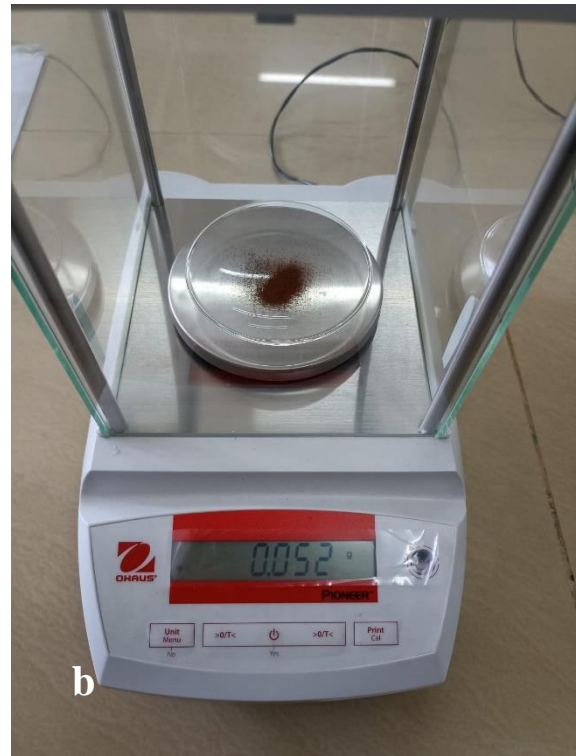
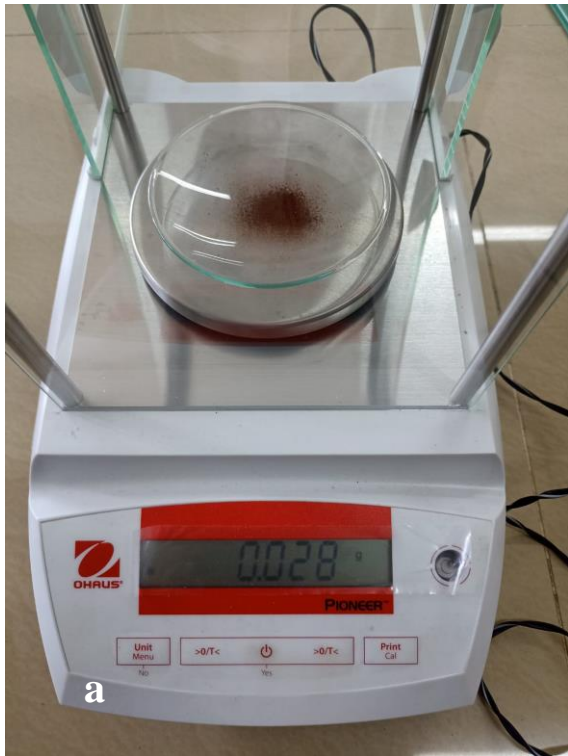


Figura 57. Residuos corrosivos

Nota: La figura demuestra los residuos corrosivos tras la experimentación. a) Residuos corrosivos prueba 8; b) Residuos corrosivos prueba 9

TABLA 9

Peso inicial y final cátodos

Prueba	Pieza	Área cm²	Volt Nominal In	Volt Nominal Fn	Descarga	Voltaje In	Voltaje Fn	Distancia (cm)	Posición (ánodo y cátodo)	Peso Inicial (gr)	Peso Final 1 (gr)	Residuo Corrosivo	Peso Final 2 (gr)
Prueba 8	8	25	3,18	2,46	0,72	2	1,81	3	Frontal	19,64	19,523	0,028	19,489
Prueba 9	9	25	0	0	0	0	0	0	Ninguna	19,901	18,934	0,052	18,88

4.4. Implementación

La Figura 58 muestra el esquema de un circuito eléctrico utilizado para aplicar protección catódica por corriente impresa a una estructura metálica. En este sistema, una fuente de corriente continua (compuesta por dos baterías conectadas en serie) suministra energía al circuito. La terminal positiva está conectada a un ánodo inerte (placa metálica), mientras que la terminal negativa está conectada a la estructura metálica que se desea proteger. Este montaje permite dirigir un flujo controlado de electrones hacia la estructura metálica, con el objetivo de reducir o eliminar su tendencia a corroerse. La implementación experimental de este circuito facilitó la evaluación del comportamiento de la protección catódica bajo condiciones controladas, proporcionando datos útiles sobre su efectividad en la prevención de la corrosión

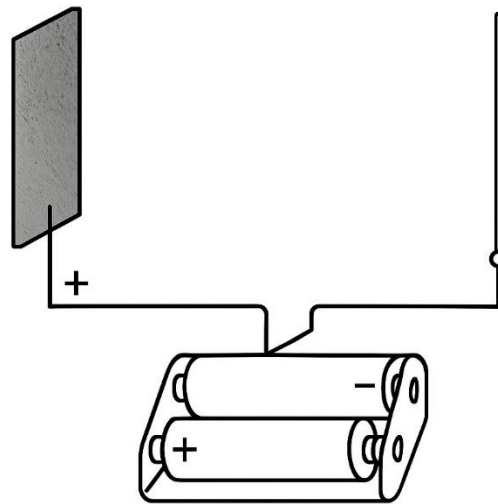


Figura 58. Implementación

4.5. Implementación Física

La Figura 59 muestra el prototipo experimental construido para la evaluación de la protección catódica por corriente impresa, desarrollado como parte de este proyecto de titulación. El montaje incluye una celda de prueba con una placa metálica (ánodo inerte) y un electrodo metálico delgado (estructura protegida) conectados al circuito. Ambos electrodos están montados sobre una base de vidrio que contiene el sistema eléctrico en su interior. La alimentación del circuito se realiza mediante una fuente de corriente continua, lo cual permite inyectar una corriente controlada hacia la estructura metálica a proteger, forzando su comportamiento como cátodo y evitando así su oxidación.

Este modelo práctico fue implementado para validar de manera tangible los principios teóricos de la protección catódica por corriente impresa y analizar su desempeño en condiciones controladas.

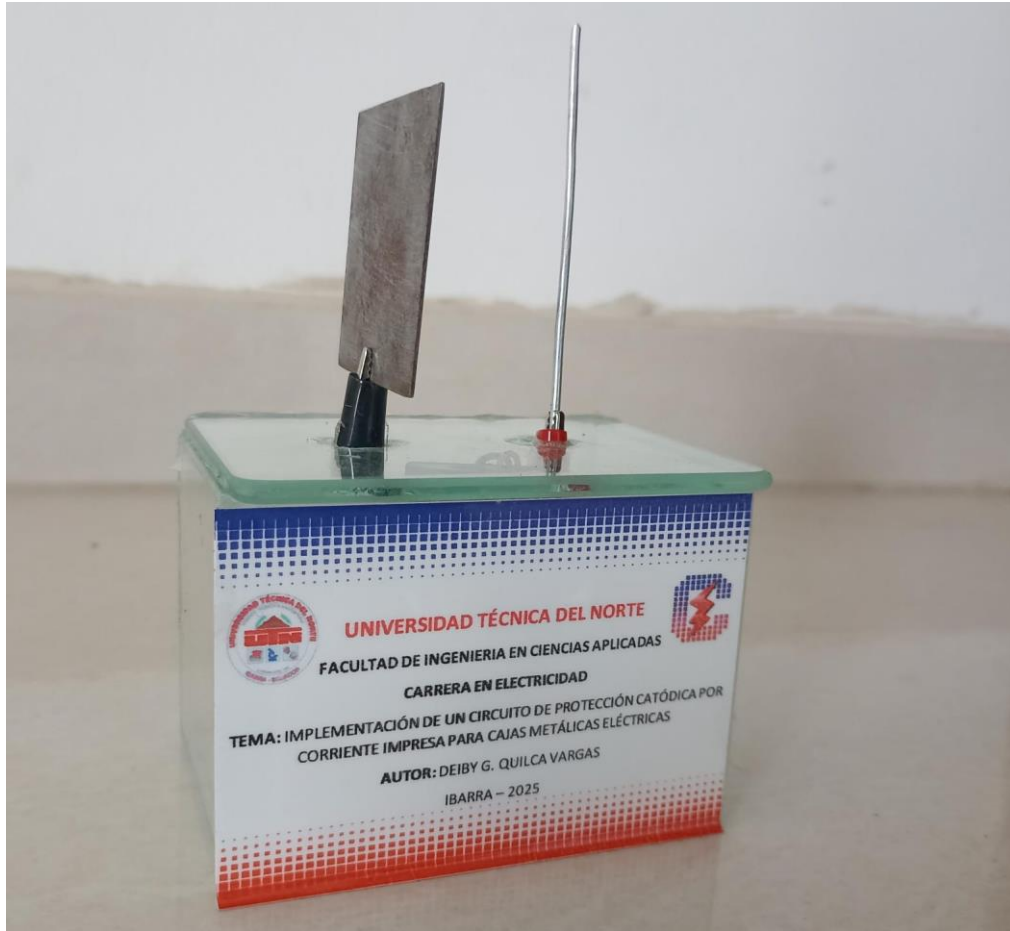


Figura 59. Implementación física de protección catódica

CONCLUSIONES

Tras la revisión bibliográfica, se concluye que niveles de corriente en el orden de 5 A resultan eficaces para la protección de estructuras metálicas. La distancia y la posición entre ánodo y cátodo influyen en la distribución de la corriente; sin embargo, su impacto es reducido cuando se mantiene un voltaje adecuado, lo que permite realizar ajustes en estos parámetros sin afectar significativamente el desempeño del sistema. Además, factores como la forma y el área del ánodo también son relevantes, pero pueden adaptarse siempre que el voltaje sea debidamente controlado.

Se diseñó un circuito de protección catódica por corriente impresa para generar aproximadamente 0,1 mA, suficiente para inhibir la corrosión en estructuras metálicas expuestas a medios oxidantes. Para asegurar su independencia de la red eléctrica, se usaron baterías de 1.5 V y 3 V, configuradas para alcanzar voltajes entre 1.58 V y 3.19 V. El diseño permitió controlar variables como voltaje, distancia entre electrodos (1 cm y 3 cm) y su posición (lateral o frontal). La combinación de 3.19 V con 3 cm en posición frontal (Prueba 8) fue la más eficaz, con niveles mínimos de corrosión (0.42% anterior y 1.50% posterior). El circuito resultó eficiente, de bajo consumo, adaptable y funcional en distintos entornos operativos.

La implementación del circuito de protección catódica por corriente impresa fue exitosa, logrando generar una corriente de aproximadamente 0,09 mA mediante la conexión de dos baterías de 1.5 V. Este diseño permitió operar de forma autónoma, sin depender de la red eléctrica. Los resultados experimentales evidenciaron una reducción de hasta el 80% en el porcentaje de corrosión al comparar piezas protegidas con aquellas sin protección. En particular, configuraciones como la de 3.19 V con 3 cm de distancia en posición frontal (Prueba 8) presentaron los valores más bajos de oxidación (0.42% anterior y 1.50% posterior), demostrando la efectividad del circuito implementado frente a un medio altamente oxidante.

RECOMENDACIONES

Como proyección a futuros trabajos, se recomienda realizar un análisis tridimensional del comportamiento de la corrosión en estructuras metálicas, con el fin de evaluar de manera más precisa el alcance y la efectividad del circuito de protección catódica en distintas direcciones y configuraciones geométricas. Este enfoque permitiría optimizar tanto el diseño del prototipo como su ubicación estratégica en función de los puntos críticos de corrosión, garantizando así una protección más integral de las cajas metálicas

Se sugiere llevar a cabo estudios específicos en ambientes salinos, donde las condiciones de humedad, temperatura y concentración de cloruros representan un desafío mayor para la durabilidad de los materiales. Adaptar el prototipo a este tipo de entornos exigentes mediante ajustes técnicos o nuevas estrategias de protección fortalecería su aplicabilidad en sectores industriales o costeros, ampliando su utilidad y alcance operativo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Bardal, Corrosion and Protection, Londres, Inglaterra.: Editorial Springer-Verlag. Págs. 26-29, 89-156, 237-307., 2004.
- [2] S. Missiego, Artist, *Desarrollo de un sistema de monitorización de la corrosión en estructuras de hormigón armado y pretensado*. [Art]. Universidad de Cantabria, 2023.
- [3] E. G. Juárez, Artist, *Estudio Experimental Sobre la Fenomenología de la Corrosión en Condiciones de Protección Catódica en un Ambiente Simulado: Caso de Estudio Acero A-36*. [Art]. Universidad Veracruzana, 2016.
- [4] C. M. Jonathan Jimnénez, Artist, *“PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA DE UN ACERO ASTM A-36, ENTERRADO EN SUELO FRANCO ARENOSO HÚMEDO*. [Art]. Universidad Nacional de Trujillo, 2016.
- [5] H. Bose, Environmental degradation of metals: Corrosion technology series/, CRC Press, 2002.
- [6] J. V. R. V. Leontina Santibáñez, «La enseñanza de los conceptos de oxidación y de reducción contextualizados en el estudio de la corrosión.» *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, vol. 10, nº 1, 2013.
- [7] S. H. Avalos, «Experimentos de química recreativa con sulfato de cobre pentahidratado.» *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, vol. 3, nº 3, pp. 467-484, 2006.
- [8] C. Aguirre y M. Ortiz, Control Del Ataque Corrosivo En El Campo Pacoa, Aplicando Ánodos De Sacrificio Para La Optimización Del Tiempo De Vida Útil De Las Instalaciones De Superficie, La Libertad: Facultad De Ciencias De La Ingeniería En Petroleos, 2013.
- [9] G. León, Artist, *Evaluación del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir del análisis de la aceleración del proceso de corrosión*. [Art]. Universidad Francisco de Paula Santander Orcaña, 2014.

- [10] J. Barrera, Evaluación de la Distribución de Corrientes y Potenciales Eléctricos en un Sistema de Protección Catódica en Tuberías, Guayaquil: Escuela Superior Politecnica Del Litoral, 2011.
- [11] C. Bejarano, protección catódica por corriente impresa, CISI Noticias. Boletín No. 36, 2015.
- [12] H. Changxing, C. Guansheng, M. Yu, M. Jun, S. Xiong, D. Shanmu, X. Gaojie, Z. X. Zhou, C. Zili, Q. Lixin y C. Guanglei, «Strategies towards inhibition of aluminum current collector corrosion in lithium batteries,» *Energy Materials*, vol. 3, nº 1, pp. 1-26, 2023.
- [13] H. Fathi y B. Ahmet, «Evidence of the existence of cathodic and anodic zones during the leaching of minerals and metals,» *Hydrometallurgy*, vol. 144, nº 1, pp. 148-150, 2014.
- [14] J. Gutiérrez, A. León, C. Gaytán y C. Rojas, Velocidad de corrosión en el sistema acero-concreto: enfoque al método de curado, *Cult. Científica y Tecnológica*, no. 52, 2016.
- [15] R. Zeng, X. Yin, X. Chen y F. Xu, Corrosion Types of Magnesium Alloys, Texas: Magnesium Alloys-Selected Issue, 2018.
- [16] V. Del Aguila y C. Albert, . [9] V. Del Aguila and C. Albert, Corrosión galvánica de la amalgama en la interacción con aleaciones de acero-cromo y con cromo-cobalto, in vitro, Panamá, 2017.
- [17] L. Borrero y K. Andre, Evaluación de titanio anodizado para su uso en sistemas de protección catódica por corriente impresa, España, 2017.
- [18] Torres, Meraz y Veleza, Evaluación de un sistema de protección catódica de un gasoducto enterrado, Mexico: *Rev. Latinoam. Metal. y Mater.*, vol. 37, no. 1, pp. 19–26, 2017.
- [19] E. Caro, A. López y H. Barajas, Diseño e implementación de un sistema de adquisición y monitoreo de datos (shm) para un rectificador de protección catódica usado en ductos, España: *Respuestas*, vol. 21, no. 1, pp. 45–55, 2016.

- [20] M. Tan y Y. Huo, Cathodic Protection Affected by Anodic Transients: Critical Duration and Amplitude, Madrid: Corrosion 2018, 2018.
- [21] J. Pérez, Electrochemical Corrosion, Florida: Electrochemistry and Corrosion Science, pp. 1–23., 2016.
- [22] J. Bacelo, Diseño y Control de un Sistema de Protección Galvánica por Corriente Impresa para Conducción de Gas, Perú: Universidad de Ica. Facultad de Ingeniería Electronica Industrial, 2015.
- [23] M. Lugo, Corrosion Y Proteccion Catodica En La Industria Petrolera., Venezuela: Universidad del oriente Venezuela , 2004.
- [24] T. Moscol, Mejoras para la protección anticorrosiva en la zona splash de los pilotes en el muelle del Terminal Bayóvar, Madrid, 2017.
- [25] F. Candia, C. Contreras, J. Robles, L. Arizpe y M. de Gante, Convertidor semi controlado CA-CD, Arequipa: Sci. Technol. Educ. Res., vol. 6, no. 1, pp. 334–342, 2018.
- [26] M. Villacís, Prototipo de dopaje por magnetrón, con tecnología de pulverización catódica, para la creación de celdas solares fotovoltaicas, Ambato: Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, 2018.
- [27] C. Clavijo, Sistemas de protección catódica para tuberías enterradas de transmisión de gas natural, Peru: TESIS Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico AUTO, 2014.
- [28] V. Ojeda, Avances En La Medida De La Protección Catódica De Estructuras Metálicas Enterradas Mediante Métodos De Desconexión Cíclica, Venezuela: Centro nacional de investigaciones metalurgicas, CSIC, 2019.
- [29] J. Echarri, C. Gervasi, P. Bilmes, P. Llorente, F. Bonvicini y A. Martinez, Efecto de la segregación de molibdeno sobre la resistencia a la corrosión localizada de soldaduras de aceros AL6XN®, El Rosario: XXII Conferencia del Acero IAS, 2018.
- [30] R. Aksu, M. Uguz, H. Erdogan, O. Meco y I. Karakaya, Investigation, Modeling and Design of a Cathodic Protection System for Hull Structures in Marine Environment, España: ECS Trans., vol. 72, no. 17, pp. 163–170, 2016.

- [31] CISI, *NORMATIVA DE OBRA PARA INSTALACIONES DE SEPTIEMBRE 2014 PROTECCIÓN CATÓDICA VERSIÓN 1.0 MCT-ET-02.003*, 2015.
- [32] SP0169-2013, *Control de la corrosión externa en sistemas de tuberías metálicas enterradas o sumergidas*, Association for Materials Protection and Performance All Rights Reserved, 2013.
- [33] Jiménez, Z. Martín, Masías y Anderson, *Protección catódica con corriente impresa de un acero astm a-36, enterrado en suelo franco arenoso húmedo*, Colombia: Trabajo de investigación previo a obtener el título de ingeniero industrial, 2016.
- [34] T. Huck, *Cathodic protection cuts corrosion costs*. Power engineering., Orlando : Powergen International, Págs. 50-54 , 2002.
- [35] E. Bardal, *Corrosion and Protection.*, Londres, Inglaterra.: Editorial Springer-Verlag. Págs. 26-29, 89-156, 237-307., 2004.
- [36] L. Raichev, Veleva y Valdez, *Corrosión de metales y degradación de materiales*, España: Editor. UABC, pp. 155–170, 2009.
- [37] Zavareh, Sarhan, Karimzadeh y Singh, *Analysis of corrosion protection behavior of Al₂O₃-TiO₂ oxide ceramic coating on carbon steel pipes for petroleum industry*, Ceram. Int., 28 vol. 44, no. 6, pp. 5967–5975, 2018.
- [38] R. Medina, *La corrosión y protección catódica como método de control en oleoductos, gasoductos, tanques de almacenamiento y tuberías en general*, Mexico : México Ltd, pp. 23–53, 2007.
- [39] S. Barros, S. Vega, A. Calderón y M. Thiriel, *Elaboración de una matriz de toma de decisión para el plan de análisis y control de corrosión en la línea de descarga de pozo en facilidades de producción del campo*, España: Fundación Universidad de América, 2019.
- [40] I. Bernal, *Evaluación técnico financiera de la resistencia del fosfatado en caliente como material de recubrimiento en las conexiones de los estabilizadores tubulares de la tubería de perforación*, España: Fundación Universidad de América, 2018.

- [41] R. Xiao, B. Huang, J. Feng y Q. Wang, Corrosion failure cause analysis and evaluation of corrosion inhibitors of Ma Huining oil pipeline, Eng. 29 Fail. Anal., vol. 68, pp. 113–121, 2016.
- [42] M. Fontana, Corrosion Engineering, N.Y. City, USA: Editorial McGrawHill. Tercera edición. Págs. 39-152, 278-316, 378, 379, 2018.
- [43] J. González, Control de la corrosión. Estudio y medida por técnicas electroquímicas., Madrid, España. : Centro nacional de investigaciones metalúrgicas. Págs. 23, 24., 2019.
- [44] J. González, Control de la corrosión. Estudio y medida por técnicas electroquímicas., Madrid, España.: Centro nacional de investigaciones metalúrgicas. Págs. 23, 24., 2017.
- [45] C. Espinoza, Protección catódica por corriente impresa para control de corrosión externa de tanques sumideros enterrados usados en la producción de petróleo PavayacuLoreto, Chile: Universidad Santiago de Chile, 2014.
- [46] M. Hannig, Calculation of the assembled grounding resistance from complex grounding systems by using analytical considerations only, España: IEEE Int. Conf. High Volt. Eng. Appl., no. 3, pp. 1–4, 2019.
- [47] J. Vera, Sistemas de protección catódica en tuberías enterradas de acero. Implantación, puesta en marcha y mantenimiento, Peru: GULDAGER ELECTROLISIS, S.A., 2018.
- [48] G. Sierra, Diseño Del Mejoramiento Del Sistema De Protección Catódica Tipo Impresa Para Proteger Contra La Corrosión Externa A La Tubería De Impulsión De Acero 1800 Mm Que Transporta Agua Cruda Desde La Estación De Bombeo Hasta La Planta Nueva, Guayaquil: Universidad de Guayaquil, 2018.
- [49] S. Rosario, Protección Catódica-Diseño De Ánodos De Sacrificio, Santiago de Chile: Revista del Instituto de Investigación FIGMMG Vol 7, N.º 13, 37-44 , 2014.

- [50] A. Coronado, Diseño De Sistema De Proteccion Catodica Para Tuberia En Campo De Producción De Petroleo, Colombia: Monografia Para Obtener El Titulo De Especialista En Gestión De La Integridad Y Corrosión , 2021.
- [51] R. Orozco, PROTECCIÓN CATÓDICA, Mexico: Instituto de Ingeniería Universidad Veracruzana, 2018.
- [52] National Association Of Corrosion Engineers, Corrosion Basics, Houston Texas: NACE pp 5,11,12,99,221-223., 2014.
- [53] UNE-EN 12954:2020, Principios generales de la protección catódica de estructuras metálicas terrestres enterradas o sumergidas, España: Asociación Española de Normalización, 2020.

ANEXOS

Anexo 1. Valores de Comportamiento de Corriente

Tiempo (m)	P1: I (mA)	P2: I (mA)	P3: I (mA)	P4: I (mA)	P5: I (mA)	P6: I (mA)	P7: I (mA)	P8: I (mA)
0:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0
0:01:00	540,52	554,0	341,5	198,19	766,39	686,91	962,18	989,78
0:02:00	540,28	545,9	362,0	207,94	759,17	674,81	919,93	963,95
0:03:00	537,30	537,5	364,3	199,90	746,78	663,18	854,68	938,61
0:04:00	530,54	533,3	363,1	187,71	726,34	639,31	829,33	935,11
0:05:00	524,62	530,9	354,2	179,80	709,72	634,90	804,51	935,78
0:06:00	522,54	529,2	353,8	167,49	712,50	632,19	783,46	918,95
0:07:00	519,38	528,9	353,4	187,85	693,83	618,74	768,03	899,11
0:08:00	516,50	525,8	354,4	199,87	675,39	620,07	760,46	882,11
0:09:00	512,58	526,3	342,5	223,30	669,74	610,41	747,76	867,28
0:10:00	514,08	525,1	349,6	212,66	674,38	620,44	740,36	849,53
0:11:00	512,68	525,7	329,3	216,24	680,99	602,48	733,13	828,38
0:12:00	512,80	525,5	336,1	222,05	662,52	595,00	728,78	810,08
0:13:00	508,80	520,1	329,0	207,19	641,45	591,15	726,36	787,10
0:14:00	502,56	517,7	321,3	219,66	650,72	578,73	723,86	771,85
0:15:00	502,48	515,9	328,9	202,29	647,60	579,16	720,26	757,68
0:16:00	503,28	517,2	321,0	202,14	644,24	587,46	715,38	747,16
0:17:00	497,50	513,6	324,0	196,29	622,44	586,82	710,58	735,93
0:18:00	499,01	512,6	323,4	193,18	622,10	580,89	702,53	725,60

0:19:00	501,70	512,4	330,0	201,41	615,34	581,61	690,91	711,28
0:20:00	501,36	507,4	320,8	222,04	620,09	582,67	685,26	695,16
0:21:00	497,76	508,0	329,2	216,45	604,92	575,71	682,51	683,10
0:22:00	500,30	507,0	329,0	212,97	602,22	563,34	675,76	667,35
0:23:00	498,98	508,8	331,9	229,02	604,97	561,59	670,31	653,86
0:24:00	494,40	501,9	324,2	209,69	593,70	573,20	666,31	649,16
0:25:00	495,98	505,0	339,6	225,61	597,47	553,80	659,58	641,30
0:26:00	494,48	506,5	324,5	212,22	581,70	557,96	645,71	639,16
0:27:00	493,78	508,1	330,7	213,83	581,53	551,55	642,76	630,15
0:28:00	494,26	504,4	319,0	223,31	564,67	554,42	639,58	627,08
0:29:00	495,52	502,2	326,8	210,70	576,80	557,80	633,23	621,30
0:30:00	490,72	495,9	318,5	209,78	563,27	542,30	625,21	623,10
0:31:00	492,72	493,7	315,1	226,65	557,48	544,75	621,06	615,71
0:32:00	491,42	495,0	319,7	224,36	562,79	539,69	614,63	611,36
0:33:00	489,78	493,6	308,9	218,17	555,28	543,71	610,06	602,50
0:34:00	486,44	494,8	312,4	211,74	549,06	526,93	606,86	598,35
0:35:00	486,22	494,5	302,7	213,51	548,46	531,06	598,66	595,46
0:36:00	483,16	488,8	310,0	211,91	552,27	530,94	589,03	593,45
0:37:00	480,56	491,5	304,6	206,39	548,75	525,45	581,21	591,70
0:38:00	478,58	491,4	301,3	202,76	543,69	530,28	573,18	582,68
0:39:00	480,80	487,9	287,4	210,59	539,62	523,06	568,13	573,25
0:40:00	479,10	487,4	301,0	207,28	542,81	507,63	567,08	565,16

0:41:00	477,62	485,5	302,4	189,69	533,80	510,36	564,83	560,65
0:42:00	476,40	482,6	297,8	197,19	532,73	507,00	561,51	555,35
0:43:00	477,06	482,1	297,8	192,28	518,62	500,09	563,73	555,40
0:44:00	475,40	481,3	300,2	190,12	522,44	495,77	556,11	553,65
0:45:00	472,76	479,3	292,5	193,52	519,82	496,81	551,23	548,96
0:46:00	470,34	479,4	286,8	199,96	509,45	496,73	547,46	546,46
0:47:00	467,64	478,7	281,5	201,48	498,05	476,77	539,03	541,33
0:48:00	464,88	477,6	280,6	199,75	511,40	477,17	536,91	538,36
0:49:00	464,02	476,0	283,8	198,61	489,32	472,02	529,93	534,60
0:50:00	462,88	473,4	283,9	201,68	496,99	474,90	524,23	532,66
0:51:00	463,30	473,0	281,5	188,31	491,23	471,68	520,18	532,91
0:52:00	461,02	471,3	278,3	199,08	484,77	463,43	517,96	532,56
0:53:00	460,50	473,5	283,1	193,15	489,85	466,32	507,61	530,80
0:54:00	459,08	470,1	274,6	191,24	481,13	458,11	499,61	534,51
0:55:00	458,28	469,8	273,7	188,97	487,44	452,74	492,56	532,46
0:56:00	456,88	467,5	263,8	182,74	474,92	446,44	487,66	526,06
0:57:00	456,28	467,2	252,4	163,69	468,85	463,86	476,21	517,96
0:58:00	455,03	465,0	252,1	155,57	465,00	447,75	470,48	516,10
0:59:00	454,56	463,6	237,8	140,82	455,67	435,29	454,39	503,94
1:00:00	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Anexo 2. Valores de comportamiento de Voltaje

Tiempo (m)	P1: V	P2: V	P3: V	P4: V	P5: V	P6: V	P7: V	P8: V
0:00:00	2,22	2,22	1,58	1,58	3,19	3,19	3,15	3,19
0:01:00	1,43	1,45	0,85	0,75	2,11	2,34	1,96	2,08
0:02:00	1,4	1,43	0,84	0,72	2,063	2,27	1,94	1,975
0:03:00	1,375	1,4	0,83	0,71	2,03	2,23	1,93	1,937
0:04:00	1,35	1,38	0,82	0,72	2,02	2,2	1,92	1,937
0:05:00	1,35	1,37	0,81	0,7	1,995	2,17	1,92	1,93
0:06:00	1,33	1,36	0,81	0,77	1,99	2,15	1,91	1,905
0:07:00	1,32	1,35	0,79	0,78	1,98	2,13	1,91	1,905
0:08:00	1,31	1,34	0,78	0,77	1,98	2,11	1,91	1,89
0:09:00	1,31	1,33	0,77	0,76	1,97	2,1	1,92	1,9
0:10:00	1,3	1,32	0,755	0,76	1,97	2,09	1,93	1,9
0:11:00	1,3	1,32	0,74	0,75	1,96	2,09	1,93	1,9
0:12:00	1,29	1,31	0,725	0,735	1,95	2,09	1,94	1,91
0:13:00	1,29	1,3	0,725	0,71	1,96	2,07	1,94	1,92
0:14:00	1,28	1,3	0,735	0,695	1,96	2,06	1,94	1,93
0:15:00	1,28	1,3	0,734	0,725	1,93	2,05	1,94	1,93
0:16:00	1,27	1,28	0,745	0,74	1,93	2,04	1,93	1,93
0:17:00	1,27	1,27	0,745	0,74	1,93	2,03	1,93	1,94
0:18:00	1,26	1,27	0,755	0,73	1,92	2,02	1,92	1,94
0:19:00	1,26	1,26	0,76	0,72	1,93	2,02	1,92	1,94

0:20:00	1,25	1,26	0,76	0,72	1,93	2,01	1,91	1,94
0:21:00	1,25	1,25	0,75	0,72	1,93	2,01	1,9	1,95
0:22:00	1,24	1,25	0,75	0,71	1,93	2	1,9	1,95
0:23:00	1,24	1,25	0,75	0,71	1,93	1,99	1,89	1,95
0:24:00	1,24	1,24	0,74	0,71	1,92	1,98	1,89	1,95
0:25:00	1,24	1,24	0,74	0,71	1,92	1,98	1,88	1,95
0:26:00	1,23	1,24	0,73	0,71	1,92	1,97	1,88	1,95
0:27:00	1,23	1,23	0,72	0,71	1,91	1,97	1,88	1,94
0:28:00	1,23	1,23	0,72	0,71	1,91	1,96	1,88	1,94
0:29:00	1,22	1,23	0,72	0,71	1,91	1,95	1,87	1,94
0:30:00	1,22	1,23	0,72	0,7	1,9	1,95	1,87	1,93
0:31:00	1,22	1,22	0,71	0,69	1,9	1,94	1,86	1,93
0:32:00	1,22	1,22	0,7	0,66	1,89	1,94	1,86	1,92
0:33:00	1,22	1,22	0,7	0,66	1,89	1,93	1,86	1,92
0:34:00	1,21	1,22	0,69	0,66	1,88	1,93	1,86	1,92
0:35:00	1,21	1,21	0,7	0,68	1,88	1,92	1,86	1,91
0:36:00	1,21	1,21	0,69	0,68	1,87	1,92	1,84	1,9
0:37:00	1,21	1,21	0,69	0,68	1,87	1,92	1,83	1,9
0:38:00	1,2	1,21	0,68	0,68	1,87	1,91	1,82	1,89
0:39:00	1,2	1,21	0,69	0,68	1,86	1,91	1,82	1,89
0:40:00	1,2	1,2	0,69	0,68	1,86	1,9	1,82	1,88
0:41:00	1,2	1,2	0,7	0,67	1,85	1,9	1,82	1,88

0:42:00	1,2	1,2	0,7	0,67	1,84	1,89	1,81	1,87
0:43:00	1,2	1,2	0,69	0,67	1,84	1,89	1,81	1,87
0:44:00	1,19	1,2	0,69	0,67	1,83	1,88	1,8	1,86
0:45:00	1,19	1,19	0,69	0,67	1,83	1,88	1,8	1,86
0:46:00	1,19	1,19	0,69	0,66	1,83	1,87	1,8	1,86
0:47:00	1,19	1,19	0,68	0,655	1,82	1,86	1,8	1,85
0:48:00	1,19	1,19	0,67	0,64	1,82	1,86	1,8	1,85
0:49:00	1,18	1,19	0,67	0,64	1,82	1,86	1,8	1,85
0:50:00	1,18	1,19	0,67	0,64	1,82	1,85	1,8	1,85
0:51:00	1,18	1,19	0,67	0,61	1,81	1,85	1,8	1,85
0:52:00	1,17	1,18	0,67	0,6	1,81	1,84	1,8	1,84
0:53:00	1,17	1,18	0,67	0,61	1,81	1,84	1,8	1,84
0:54:00	1,17	1,18	0,67	0,61	1,8	1,83	1,8	1,84
0:55:00	1,17	1,18	0,67	0,61	1,8	1,83	1,8	1,83
0:56:00	1,17	1,17	0,66	0,61	1,8	1,83	1,79	1,83
0:57:00	1,17	1,16	0,66	0,61	1,79	1,83	1,79	1,82
0:58:00	1,17	1,15	0,66	0,59	1,77	1,82	1,79	1,82
0:59:00	1,16	1,14	0,66	0,6	1,77	1,8	1,78	1,81
1:00:00	1,77	1,78	1,26	1,28	2,43	2,46	2,41	2,45

Anexo 3. Implementación experimento

