

**“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS FACTORES DE ROMPIMIENTO DE  
UN RECUBRIMIENTO EPÓXICO SOBRE EL DESEMPEÑO DE SISTEMAS  
DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC EN  
AMBIENTES MARINOS SIMULADOS”**

**JHON JAIRO JORDAN VALDERRAMA  
2000472**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA**

**Bucaramanga**

**2005**

**“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS FACTORES DE ROMPIMIENTO DE  
UN RECUBRIMIENTO EPÓXICO SOBRE EL DESEMPEÑO DE SISTEMAS  
DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC EN  
AMBIENTES MARINOS SIMULADOS”**

**JHON JAIRO JORDAN VALDERRAMA  
2000472**

**Informe final de la práctica empresarial realizada en la Corporación para la  
Investigación de la Corrosión con el fin de optar al título de Ingeniero  
Metalúrgico**

**Tutor:**

**Msc. CUSTODIO VASQUEZ**

**Cotutor:**

**Msc. OMAR RODRIGO DELGADO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA**

**Bucaramanga**

**2005**

*A mis padres Gilberto y Ana Belsy,  
por el apoyo, afecto y amor que me  
han brindado.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que de una u otra forma me acompañaron durante el desarrollo de este proyecto y durante mi carrera universitaria, y a todas aquellas que crean que con la educación este país puede salir adelante.

Agradecimientos especiales a:

Laura Rodríguez, por su apoyo incondicional, y por ser mi fuente de inspiración

MsC Custodio Vásquez, por su profesionalismo y pasión por la Corrosión

A los funcionarios de la Corporación para La Investigación de la Corrosión, por ser mis maestros y mis amigos, en especial a los Ingenieros: Darío Ruedas, Omar Delgado, Carlos Alberto Rodelo Rueda, y a mi estimado amigo Daniel Rocha

José Ricardo Sandoval Ruiz, Rafael Afanador, mis amigos

Norma Rangel, mi amiga y consejera

A mis compañeros, amigos y maestros de la escuela de Ingeniería Metalúrgica, especialmente a: Jorge Mantilla, Claudia Carreño, Andrés Roa, José Macias, Carlos Melgarejo, Darío Peña, Arnaldo Baquero.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>1.OBJETIVOS</b>	<b>21</b>
<b>1.1 OBJETIVO GENERAL</b>	<b>21</b>
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>21</b>
<b>2. PRINCIPIOS BÁSICOS SOBRE CORROSIÓN</b>	<b>22</b>
<b>2.1 NATURALEZA ELECTROQUÍMICA DE LA CORROSIÓN.</b>	<b>23</b>
<b>2.2 MECANISMOS DE CONTROL DE LA CORROSIÓN</b>	<b>24</b>
2.2.1 Protección catódica	25
2.2.1.1 Protección catódica por ánodos de sacrificio.....	25
2.2.1.2 Protección catódica por corriente impresa.....	26
2.2.2 Uso de recubrimientos	27
2.2.2.1 Métodos por los cuales los recubrimientos protegen al metal de la corrosión.	28
2.2.3 Uso combinado de recubrimientos y protección catódica	29
<b>3. PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA PLANTEADOS POR LA NORMA DNV RP B 401</b>	<b>31</b>
3.1 TIEMPO DE VIDA ÚTIL DEL DISEÑO	31
3.2 DENSIDADES DE CORRIENTE EN EL DISEÑO	32
3.3 FACTOR DE ROMPIMIENTO DEL RECUBRIMIENTO	34
3.4 DESEMPEÑO DE LOS ÁNODOS DE SACRIFICIO	35

3.5 FORMULAS PARA CALCULAR LA RESISTENCIA DE LOS ÁNODOS	35
3.6 RESISTIVIDAD	36
3.7 FACTOR DE UTILIZACIÓN	38
4.1 SUBDIVISIÓN DEL OBJETO Y CÁLCULO DEL ÁREA A PROTEGER	39
4.2 CÁLCULO DE LA DEMANDA DE CORRIENTE	39
4.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE ÁNODO	40
4.4 CÁLCULO DE LA MASA ANÓDICA	40
4.5 CÁLCULO DEL NÚMERO DE ÁNODOS	41
<b>5. METODOLGIA EXPERIMENTAL</b>	<b>43</b>
<b>5.1 RECONOCIMINETO DE LA CELDA TRABAJO</b>	<b>43</b>
<b>5.2 DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR     ÁNODOS DE SACRIFICIO UTILIZANDO ÁNODOS DE ZINC</b>	<b>44</b>
5.2.1 Selección del área a proteger.	45
5.2.2 Cálculo de la demanda de corriente.	46
5.2.3 Selección del tipo de ánodo.	47
5.2.4 Cálculo de la masa anódica	48
5.2.5 Distribución de los ánodos sobre el área superficial de la lámina de acero naval ASTM 131 – A	49
<b>5.3 SELECCIÓN Y APLICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO SOBRE LA     SUPERFICIE DE LA LÁMINA DE ACERO NAVAL ASTM 131-A</b>	<b>51</b>
<b>5.4 MONTAJE DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES EN LOS BANCOS     DE PRUEBA</b>	<b>52</b>
<b>5.5 DISTRIBUCIÓN DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES</b>	<b>53</b>

<b>5.6 PUESTA EN MARCHA DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES</b>	<b>59</b>
<b>5.7 MONITOREO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES</b>	<b>59</b>
<b>6. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES</b>	<b>61</b>
<b>6.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL BANCO DE PRUEBAS No 1</b>	<b>61</b>
6.1.1 GRAFICAS DE POTENCIAL ESTRUCTURA / ELECTROLITO CON RESPECTO AL TIEMPO	61
6.1.1.1 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 1. ....	62
6.1.1.2 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del duplicado 1. ....	63
6.1.1.3 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 2. ....	64
6.1.1.4 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del duplicado 2. ....	65
6.1.1.5 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 3. ....	66
6.1.1.6 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del duplicado 3. ....	67
6.1.1.7 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 4. ....	68
6.1.1.8 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del duplicado 4. ....	69
6.1.1.9 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 5. ....	70
6.1.1.10 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del duplicado 5. ....	71

6.1.1.11 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 6.....	72
6.1.1.12 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del duplicado 6.....	72
6.1.1.13 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 7 .....	73
6.1.1.14 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del duplicado 6.....	74
<b>6.1.2 GRÁFICAS DE CORRIENTE DERENADA CON RESPECTO AL TIEMPO</b>	<b>75</b>
6.1.2.1 Gráfica de corriente drenada con respecto al tiempo de las celdas 1 Y 4. ....	75
6.1.2.2 Gráfica de corriente drenada con respecto al tiempo de las celdas 2 Y 5. ....	76
6.1.2.3 Gráfica de corriente drenada con respecto al tiempo de las celdas 3 Y 6. ....	77
<b>6.2 RESULTADOS OBTENIDOS DEL BANCO DE PRUEBAS No 2 “CEDAS”</b>	<b>77</b>
6.2.1 GRÁFICAS DE POTENCIAL ESTRUCTURA / ELECTROLITO CON RESPECTO AL TIEMPO	78
6.2.1.1 Gráfica de potencial estructura/electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la CEDAS 1 .....	78
6.2.1.2 Gráfica de potencial estructura/electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la CEDAS 2.....	79
6.2.1.3 Gráfica de potencial estructura/electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la CEDAS 3.....	80
6.2.1.4 Gráfica de potencial estructura/electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la CEDAS 4.....	81
6.2.1.5 Gráficas de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del punto de medición 5. ....	82

6.2.2 GRÁFICAS DE CORRIENTE DRENADA CON RESPECTO AL TIEMPO	83
6.2.2.1 Gráfica de corriente drenada con respecto al tiempo de las CEDAS 1 y 2.....	83
6.2.2.2 Gráfica de corriente drenada con respecto al tiempo de las CEDAS 3 y 4.....	84
6.2.3 GRÁFICAS DE DESGASTE DE LOS ÁNODOS DE ACUERDO A LA LEY DE FARADAY	85
6.2.3.1 Gráfica del desgaste del ánodo de la CEDAS 1 .....	86
6.2.3.2 Gráfica del desgaste del ánodo de la CEDAS 2 .....	87
6.2.3.3 Gráfica del desgaste del ánodo de la CEDAS 3.....	88
6.2.3.4 Gráfica del desgaste del ánodo de la CEDAS 4 .....	89
6.2.4 GRÁFICA DE LA RESISTENCIA ANÓDICA DE LA CEDAS CON RESPECTO AL TIEMPO	90
<b>6.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS)</b>	<b>91</b>
6.3.1 Gráficas de impedancia de un recubrimiento de 7 mils bajo la influencia de un sistema de protección catódica.	91
6.3.2 Gráficas de impedancia de un recubrimiento de 4 mils bajo la influencia de un sistema de protección catódica.	92
6.3.3 Gráficas de impedancia de un recubrimiento de 7 mils	94
<b>7. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>96</b>
<b>8. RECOMENDACIONES</b>	<b>110</b>

**9. CONCLUSIONES** 112

**BIBLIOGRAFÍA** 113

## LISTA DE GRAFICAS

	<b>Pág.</b>
<b>GRAFICA 1.</b> Resistividad del agua de mar como función de la temperatura para una salinidad del 30 y 40%	37
<b>GRÁFICA 2.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la celda 1.	62
<b>GRÁFICA 3.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo del duplicado de la celda 1.	63
<b>GRÁFICA 4.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la celda 2.	64
<b>GRÁFICA 5.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo del duplicado de la celda 2.	65
<b>GRÁFICA 6.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la celda 3.	66
<b>GRÁFICA 7.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo del duplicado de la celda 3.	67
<b>GRÁFICA 8.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la celda 4.	68
<b>GRÁFICA 9.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo del duplicado de la celda 4.	69
<b>GRÁFICA 10.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la celda 5.	70
<b>GRÁFICA 11.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo del duplicado de la celda 5.	71

<b>GRÁFICA 12.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la celda 6.	72
<b>GRÁFICA 13.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo del duplicado de la celda 6.	73
<b>GRÁFICA 14.</b> Potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 7.	74
<b>GRÁFICA 15.</b> Potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 8.	74
<b>GRÁFICA 16.</b> Corriente drenada por los ánodos de las cedas 1 y 4 con respecto al tiempo.	75
<b>GRÁFICA 17.</b> Corriente drenada por los ánodos de las cedas 2 y 5 con respecto al tiempo.	76
<b>GRÁFICA 18.</b> Corriente drenada por los ánodos de las cedas 3 y 6 con respecto al tiempo.	77
<b>GRÁFICA 19.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la cedas 1.	78
<b>GRÁFICA 20.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la cedas 2.	79
<b>GRÁFICA 21.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la cedas 3.	80
<b>GRÁFICA 22.</b> Potencial estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la cedas 4.	81
<b>GRÁFICA 23.</b> Potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del punto de medición 5.	82
<b>GRÁFICA 24.</b> Corriente drenada por los ánodos de las cedas 1 y 2 con respecto al tiempo.	83

<b>GRÁFICA 25.</b> Corriente drenada por los ánodos de las cedas 3 y 4 con respecto al tiempo.	84
<b>GRÁFICA 26.</b> Masa pérdida acumulada con respecto al tiempo del ánodo de la cedas 1.	86
<b>GRÁFICA 27.</b> Masa pérdida acumulada con respecto al tiempo del ánodo de la cedas 2.	87
<b>GRÁFICA 28.</b> Masa perdida acumulada con respecto al tiempo del ánodo de la cedas 3.	88
<b>GRÁFICA 29.</b> Masa pérdida acumulada con respecto al tiempo del ánodo de la cedas 4.	89
<b>GRÁFICA 30.</b> Resistencia anódica de las cuatro cedas con respecto al tiempo.	90
<b>GRAFICA 31.</b> Impedancia inicial de un recubrimiento de 7 mils.	91
<b>GRAFICA 32.</b> Impedancia después de transcurridas 1056 horas de un recubrimiento de 7 mils bajo la influencia de un sistema de protección catódica.	92
<b>GRAFICA 33.</b> Impedancia inicial de un recubrimiento de 4 mils.	92
<b>GRAFICA 34.</b> Impedancia después de transcurridas 1056 horas de un recubrimiento de 4 mils bajo la influencia de un sistema de protección catódica.	93
<b>GRAFICA 35.</b> Impedancia inicial de un recubrimiento de 7mils.	94
<b>GRAFICA 36.</b> Impedancia después de transcurridas 1056 horas de un recubrimiento de 7 mils.	95
<b>GRÁFICA 37.</b> Zonas características del comportamiento de la demanda de corriente en un sistema de pc.	102

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
<b>FOTOGRAFÍA 1.</b> Banco de pruebas No 1 para simular sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio.	43
<b>FOTOGRAFÍA 2.</b> Cedas del banco de pruebas No 2	44
<b>FOTOGRAFÍA 3.</b> Ánodos de zinc de 1.4 gr. y 100 gr.	50
<b>FOTOGRAFÍA 4.</b> Lámina recubierta con un porcentaje de daño del 5%.	56
<b>FOTOGRAFÍA 5.</b> Lámina recubierta con un porcentaje de daño del 20%.	56
<b>FOTOGRAFÍA 6.</b> Lámina recubierta con un porcentaje de daño del 40%.	57
<b>FOTOGRAFÍA 7.</b> Lámina recubierta con un porcentaje de daño inducido del 10%.	58
<b>FOTOGRAFÍA 8.</b> Lámina recubierta con un porcentaje de daño inducido del 20%	58
<b>FOTOGRAFÍA 9.</b> Capa de hidróxido de zinc adherida sobre la superficie anódica	98
<b>FOTOGRAFÍA 10.</b> Capa de hidróxido de zinc adherida sobre la superficie anódica de la celda 4.	99

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>TABLA 1.</b> Densidades de corriente inicial y final recomendadas por la DNV RP B 401.para diseños de PC.	33
<b>TABLA 2.</b> Densidades de corriente promedio recomendadas por la DNV RP B 401.para diseños de PC.	34
<b>TABLA 3.</b> Fórmulas para calcular la resistencia anódica (RA).	36
<b>TABLA 4.</b> Factores de utilización de diversos tipos de ánodos.	38
<b>TABLA 5.</b> Características de los bancos de prueba.	45
<b>TABLA 6.</b> Composición de los ánodos de zinc	48
<b>TABLA 7.</b> Resumen de los cálculos realizados para el diseño del sistema de protección catódica para el banco de pruebas No 1	50
<b>TABLA .8.</b> Resumen de los cálculos realizados para el diseño del sistema de protección catódica para el banco de pruebas No 2.	50
<b>TABLA 9.</b> Escalamiento de los ánodos de prueba con respecto a uno comercial ZHS.	53
<b>TABLA 11.</b> Comparación de los tiempos de polarización de los sistemas de protección catódica de las CEDAS.	106
<b>TABLA 12.</b> Perdidas de masa anódica teóricas y experimentales durante el transcurso de las pruebas.	107
<b>TABLA 13.</b> Consolidado de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales del banco de pruebas No 1.	108

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>FIGURA 1.</b> Espontaneidad del proceso de corrosión.	22
<b>FIGURA 2.</b> Mecanismo de corrosión del zinc en ácido clorhídrico.	24
<b>FIGURA 3.</b> Mecanismo de protección catódica con ánodos de sacrificio.	26
<b>FIGURA 4.</b> Esquema de protección catódica con corriente impresa de una tubería enterrada.	27
<b>FIGURA 5.</b> Mediciones discretas de potencial en la lámina y localización de los puntos de medición para el banco de pruebas no 2.	60
<b>FIGURA 6.</b> Mediciones discretas de potencial en la lámina y localización de los puntos de medición en el banco de pruebas no 1 .	60

## RESUMEN DEL PROYECTO

**TÍTULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS FACTORES DE ROMPIMIENTO DE UN RECUBRIMIENTO EPÓXICO SOBRE EL DESEMPEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO DE ZINC EN AMBIENTES MARINOS SIMULADOS\***

JHON JAIRO JORDAN VALDERRAMA\*\*

### PALABRAS CLAVES

- ✓ Protección Catódica.
- ✓ Factor de rompimiento del recubrimiento.

Los diseños de protección catódica por ánodos de sacrificio en estructuras sumergidas, realizados en nuestro país no cuentan con un conocimiento claro del impacto económico que podría traer el estudio del factor de rompimiento. Este parámetro involucra al recubrimiento en el diseño de un sistema de protección catódica y como consecuencia a esto, describe de manera anticipada de reducción de la demanda de corriente de protección, por esta razón el objeto de esta investigación esta enfocado a generar conocimiento sobre el comportamiento de sistemas duales de protección (recubrimientos – protección catódica) con el fin de reducir los costos en la instalación en dichos sistemas.

El objetivo de esta investigación es dar un primer paso para comprender el comportamiento de los niveles de protección catódica por ánodos de sacrificio en láminas de acero naval ASTM 131 Grado A recubiertas, variando el porcentaje de daño y el espesor del recubrimiento.

Para lograr el anterior objetivo se diseñaron una serie de experimentos, en los cuales, se seleccionó un recubrimiento autoimprimante epóxico, apto para inmersión en agua dulce y salada, cuando se prepara la superficie con chorro abrasivo a grado metal blanco según especificación SSPC-SP5.

Los resultados obtenidos en esta investigación, permitieron ratificar la importancia de la integridad del recubrimiento en un sistema dual de protección, establecer las tendencias de drenaje de corriente cuando el nivel de daño inducido del recubrimiento aumenta, y las implicaciones en el sistema de protección catódica cuando el recubrimiento disminuye su capacidad de protección.

\*Trabajo de grado (Práctica Empresarial), \*\*Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director: Custodio Vásquez Quintero

**TITLE: EVALUATION OF THE EFFECT OF THE EPOXIC COATING BREAKDOWN FACTOR OVER CATHODIC PROTECTION SYSTEMS PERFORMANCE BY SACRIFICE ZINC ANODES IN MARINE SURROUNDINGS\***

JHON JAIRO JORDAN VALDERRAMA\*\*

**KEY WORDS**

- ✓ Cathodic protection.
- ✓ Coating breakdown factor.

The designs of cathodic protection for sacrifice anodes in submerged structures made in Colombia, don't have a complete knowledge of the economic impact that coating breakdown factor study could involve. This parameter involves coating into the cathodic protection systems design as a consequence of this, it describes in anticipated way the current demand reduction. For this reason the object of this investigation is focused to generate knowledge on the behavior of dual protection systems (coatings - cathodic protection), with the purpose of reducing the costs in the installation in this systems.

The objective of this investigation is to take a first step to understand the behavior of the levels of cathodic protection for sacrifice anodes in sheets of naval steel ASTM 131 Grade A recovered, varying the percentage of damage and the thickness of the coating.

To achieve the previous objective serial experiments were desing, which, a epoxic coating was selected, capable for immersion in fresh water and salted, when the preparation of surface is white metal according to specification SSPC-SP5.

The results obtained in this investigation, ratified the importance of coating integrity in a dual system of protection (coatings - cathodic protection), to establish the tendencies of current drainage when the level of induced damage of the coating increases, and the implications in the system of cathodic protection when the coating reduces its protection capacity.

\*\* Project (Practical internship)

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Químicas,  
Escuela de Ingeniería Metalúrgica  
Director: Custodio Vásquez Quintero

## INTRODUCCIÓN

La recomendación práctica de mayor uso a nivel mundial para realizar diseños de protección catódica por ánodos de sacrificio en estructuras sumergidas es la norma DNV RP B401, en la cual se interrelacionan una serie de parámetros con el fin de calcular la masa anódica necesaria para proteger un área determinada.

Dentro de los parámetros de diseño planteados en la norma DNV RP B401 el estudio del factor de rompimiento del recubrimiento es limitado tal y como lo reporta la norma, por tal razón en esta investigación se estudia el efecto que ocasionan diferentes factores de rompimiento sobre el desempeño de sistemas de protección catódica.

Para evaluar el desempeño de sistemas de protección catódica se realizan mediciones de corriente de protección drenada por el ánodo y de potencial estructura / electrolito con respecto a un determinado electrodo de referencia, las cuales determinan la efectividad del sistema de protección.

En este informe se presentan los resultados de una serie de pruebas experimentales los cuales permiten entender y conocer el comportamiento de sistemas duales de protección (recubrimiento – protección catódica), bajo diferentes daños inducidos del recubrimiento y diferentes espesores del recubrimiento.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el desempeño de un sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio de zinc con respecto a recubrimientos epóxicos con diferentes porcentajes de daños inducidos en ambientes marinos.

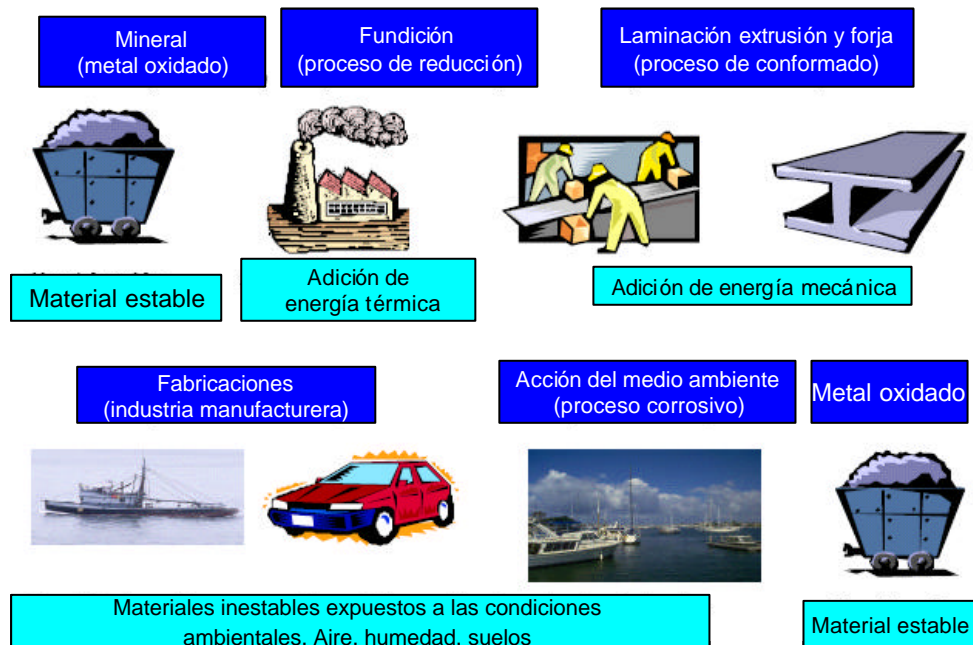
### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Evaluar el nivel de protección obtenido en láminas recubiertas con porcentajes de daño inducido de 5%, 10%, 20% y 40%.
- ✓ Calcular el desgaste acumulado de los ánodos a través del tiempo por medio de la ley de faraday.
- ✓ Analizar el efecto de la categoría del recubrimiento (espesor) en el sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio.
- ✓ Evaluar el comportamiento del recubrimiento epóxico mediante la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).

## 2. PRINCIPIOS BÁSICOS SOBRE CORROSIÓN

La corrosión es un fenómeno espontáneo que se presenta prácticamente en todos los materiales procesados por el hombre. Si bien existen varias definiciones, es común describir a la corrosión como una oxidación acelerada y continua que desgasta, deteriora y que incluso puede afectar la integridad física de objetos o estructuras. Este fenómeno tiene implicaciones industriales muy importantes, la degradación de los materiales provoca interrupciones en actividades fabriles, pérdida de productos, contaminación ambiental, reducción en la eficiencia de los procesos, mantenimientos y sobrediseños costosos. La figura 1 ilustra la espontaneidad del proceso de corrosión.

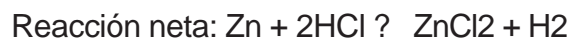
**Figura 1.** Espontaneidad del proceso de corrosión.



## 2.1 NATURALEZA ELECTROQUÍMICA DE LA CORROSIÓN.

La corrosión es un fenómeno de naturaleza electroquímica que cumple con las características fundamentales de una pila o batería. Para que se forme una celda electroquímica, o celda de corrosión, se requiere la presencia de un material que cede electrones en contacto con otro que los acepta, y de un medio conductor de iones. El material que pierde electrones se conoce como ánodo y es el que experimenta la reacción de oxidación, mientras que el material que acepta los electrones se reduce y se le llama cátodo; el medio en el que se encuentran el ánodo y el cátodo y que permite el flujo de iones se le conoce como electrolito. La oxidación, a pesar de la etimología de la palabra, no necesariamente involucra el oxígeno; la definición química es una pérdida de electrones.

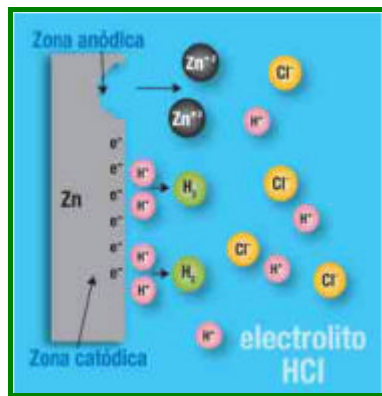
El mecanismo de la corrosión puede ilustrarse a través de un material metálico inmerso en una solución de HCL (ácido clorhídrico). En el caso del zinc, los átomos metálicos Zn ceden electrones convirtiéndose en cationes ( $Zn^{++}$ ) mientras que los iones  $H^+$  aceptan estos electrones formando moléculas de  $H_2$  (figura 2). Las reacciones involucradas son la disolución del zinc para formar  $ZnCl_2$  y la producción de gas  $H_2$ .



Todos los metales presentan una tendencia a perder electrones (oxidarse) cuantificada a través de su potencial de oxidación. Entre más alto sea este potencial se dice que el metal es más noble (se oxida con mayor dificultad). La tabulación de la resistencia de los materiales metálicos a la corrosión se conoce como serie galvánica. Las series galvánicas son particulares al medio

corrosivo, por ejemplo, hay series galvánicas en solución salina, en solución ácida, y son de gran utilidad a la hora de seleccionar un material para una aplicación específica.

**Figura 2.** Mecanismo de corrosión del Zinc en ácido clorhídrico.



## 2.2 MECANISMOS DE CONTROL DE LA CORROSIÓN

Básicamente todos los métodos que existen para lograr controlar la corrosión de los materiales, son intentos para interferir con el mecanismo de corrosión, de tal manera que este sea lo más ineficiente posible.

En la práctica, los sistemas más comúnmente usados para mitigar la corrosión son el uso de recubrimientos y sistemas de protección catódica.

### **2.2.1 Protección catódica**

La protección catódica se puede definir como una técnica que reduce la corrosión de una superficie metálica, haciendo circular por la misma superficie corriente catódica, de tal forma que la velocidad de la disolución anódica llega a ser despreciable. Existen dos tipos de protección catódica mediante los cuales se puede mitigar la corrosión, estos son: protección catódica por ánodos de sacrificio y protección catódica por corriente impresa.

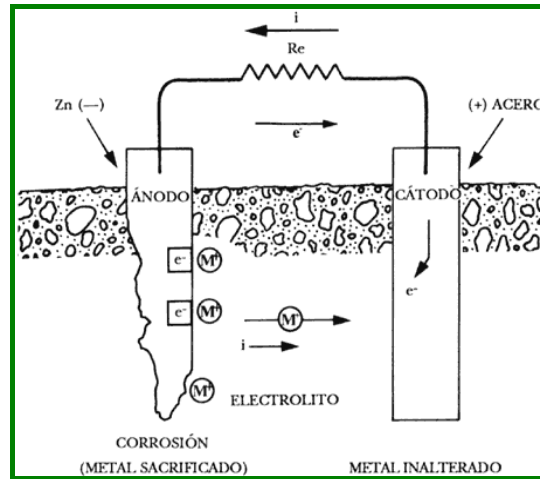
#### **2.2.1.1 Protección catódica por ánodos de sacrificio.**

Se fundamenta en el mismo principio de la corrosión galvánica, en la que un metal más activo es anódico con respecto a otro más noble, corroyéndose el metal anódico (figura 3).

En la protección catódica con ánodos galvánicos, se utilizan metales fuertemente anódicos conectados a la estructura a proteger, dando origen al sacrificio de dichos metales por corrosión, descargando suficiente corriente, para la protección de la estructura.

La diferencia de potencial existente entre el metal anódico y la estructura a proteger, es de un valor bajo debido a que este sistema se usa para pequeños requerimientos de corriente y en medios de baja resistividad.

**Figura 3.** Mecanismo de protección catódica con ánodos de sacrificio.



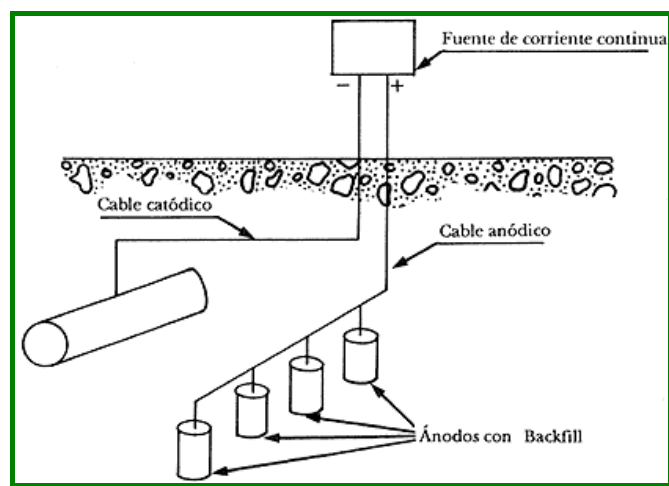
### 2.2.1.2 Protección catódica por corriente impresa

El sistema de protección catódica con corriente impresa se llevó a cabo aproximadamente cien años después que el de ánodos galvánicos. En este sistema de protección catódica se utiliza la corriente suministrada por una fuente continua para imprimir la corriente necesaria para la protección de una estructura (figura 4).

Este procedimiento consiste en unir eléctricamente la estructura que se trata de proteger con el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (pura o rectificadora) y el positivo con un electrodo auxiliar que cierra el circuito. Los electrodos auxiliares se hacen de chatarra de hierro, aleación de ferrosilicio, grafito, titanio platinado, etc. Es completamente indispensable la existencia del electrolito (medio agresivo) que completa el conjunto para que se realice el proceso electrolítico.

Este sistema de protección catódica tiene la característica de que utiliza como ánodo dispersor de la corriente (electrodo auxiliar) materiales metálicos que en mayor o menor grado se consumen con el paso de la corriente. Sin embargo, el intercambio necesario de corriente con el electrolito tiene lugar a través de reacciones electroquímicas, las cuales dependen tanto del material anódico, como del ambiente que rodea al mismo e incluso de la densidad de corriente que éste suministra

**Figura 4.** Esquema de protección catódica con corriente impresa de una tubería enterrada.



### 2.2.2 Uso de recubrimientos

El recubrimiento sobre la superficie de un metal es el método más usado para controlar la corrosión, este no puede ser usado efectivamente sin la presencia de otro método de control de la corrosión, como lo es, el diseño apropiado de los

componentes, la selección de materiales adecuados, la protección catódica y el uso de inhibidores de corrosión.

### **2.2.2.1 Métodos por los cuales los recubrimientos protegen al metal de la corrosión.**

Los recubrimientos tienen básicamente tres mecanismos para proteger al metal de la corrosión. Estos mecanismos son: barrera de protección, protección catódica, e inhibidores de corrosión.

#### **2.2.2.1.2 Barrera de protección**

La mayoría de los recubrimientos proporciona protección a la corrosión por la formación de una barrera relativamente impermeable a la humedad y a electrolitos que ocasionan el proceso corrosivo. Para una óptima protección, la barrera debe ser impermeable, con un espesor que sea continuo y práctico.

#### **2.2.2.1.3 Protección catódica del acero**

Los recubrimientos que protegen al metal por medio de protección catódica son aquellos que están cargados de partículas finas de zinc. Cuando las partículas de zinc están presentes en la película de curado, deben estar en contacto eléctrico tanto entre ellas como con la superficie del sustrato metálico que se está protegiendo, debido a esto se forma un par galvanico donde las partículas de zinc por ser más nobles protegen al acero.

#### **2.2.2.1.4 Pigmentos inhibidores.**

Los recubrimientos que protegen al metal por medio de pigmentos inhibidores son los que presentan pigmentos en la primera capa de pintura (primer) para inhibir la corrosión entre la interfaz recubrimiento/acero.

#### **2.2.3 Uso combinado de recubrimientos y protección catódica**

En la mayoría de estructuras metálicas que están enterradas o sumergidas la primera defensa al daño ocasionado por la corrosión es el uso de recubrimientos, debido al aislamiento que le dan a la estructura del ambiente que la rodea.

La integridad del recubrimiento es la mejor solución para aislar el material que va a ser protegido. Una pobre aplicación del recubrimiento o un daño de este podrían facilitar la ocurrencia de la corrosión. El daño del recubrimiento puede resultar desde un deterioro general de las propiedades con el paso del tiempo, ocasionadas por su exposición a factores ambientales hostiles, sistemas de ataque biológico sobre la superficie o impactos mecánicos. Los recubrimientos son generalmente la mejor forma de protección contra la corrosión, sin embargo el envejecimiento del recubrimiento y los daños ocurridos a través del tiempo, son factores importantes para definir la eficiencia de la protección.

Debido a que los recubrimientos fallan con el transcurso del tiempo se utiliza un segundo sistema de protección contra la corrosión, que es la protección catódica.

La mayor parte de una superficie ya sea de una tubería enterrada, un tanque, el casco de un buque, que esta bien recubierta estaría libre de la corrosión, por tanto la aplicación de un sistema de protección catódica sería relativamente fácil debido a que solo pequeñas áreas de acero expuesto requerirían protección.

Los diseños de los sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio toman en cuenta el uso del recubrimiento por medio de un factor de rompimiento, el cual describe de una manera anticipada la reducción de la demanda de corriente requerida para proteger un área determinada; a continuación se presentan los parámetros utilizados en el diseño de sistemas de protección catódica según la norma DNV RP B401.

### **3. PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA PLANTEADOS POR LA NORMA DNV RP B 401**

Cuando se diseña un sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio se tienen en cuenta diferentes variables que determinan el peso total del metal de sacrificio a instalar como son la resistividad, el área a proteger, la densidad de corriente de corrosión, entre otros factores que se interrelacionan al momento de calcular dicha masa.

Algunos de los parámetros de diseño con los cuales se realiza un sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio son también aplicables a sistemas que requieren protección catódica por corriente impresa.

Los parámetros de diseño vienen dados a continuación y según la literatura y la experiencia es recomendable que estos parámetros excedan la vida útil del diseño.

#### **3.1 TIEMPO DE VIDA ÚTIL DEL DISEÑO**

La vida útil del diseño de un sistema de protección catódica ( $t_f$ ) es especificada por el operador. Debido a que el mantenimiento y reparación de los ánodos de sacrificio de un sistema de protección catódica es muy costoso, es práctico que la vida útil del sistema de PC sea la misma vida del objeto a proteger.

### 3.2 DENSIDADES DE CORRIENTE EN EL DISEÑO

La densidad de corriente hace referencia en protección catódica a la corriente por unidad de área superficial. En el diseño las densidades de corriente iniciales y finales,  $i_c$  (inicial) y  $i_c$  (final), dan una medida anticipada de la necesidad de corriente catódica para lograr que una superficie metálica desnuda sea protegida en un tiempo razonable. Estas densidades son usadas para calcular las demandas de corriente iniciales y finales, las cuales determinan el número y tamaño de los ánodos.

La densidad de corriente inicial se define como la cantidad de corriente que se requiere para efectuar la polarización de una superficie metálica desnuda, sometida a condiciones de trabajo. La densidad de corriente inicial es necesariamente mayor que la densidad de corriente promedio y final, debido a la formación de una película calcárea desarrollada en la fase inicial, después de formada esta película se reducen los requerimientos de corriente gracias a que esta actúa como una capa pasivante. En un apropiado diseño la densidad de corriente inicial implica una rápida formación de película calcárea y una eficiente polarización.

La densidad de corriente final hace referencia a la superficie de metal con un crecimiento marino y una capa calcárea estable. Esta toma en cuenta una cantidad adicional de densidad de corriente, requerida para repolarizar la estructura en el caso de daños en dichas capas, los daños son ocasionados por tormentas severas, impactos u operaciones de limpieza. Esto hace que las densidades de corriente finales en el diseño sean menores que la inicial.

Ambas densidades de corriente inicial y final son referidas a la densidad de corriente a un potencial de  $-0.80$  V con respecto al electrodo Ag/AgCl/ en agua de mar durante la polarización dinámica desde un potencial más positivo (es decir: no protegido) llevado al rango de potenciales de protección.

En el diseño la densidad de corriente promedio es una medida anticipada de la densidad de corriente catódica una vez el sistema de protección ha alcanzado un estado estable del potencial de protección, esta densidad de corriente es mas baja que la inicial y la final, esta es usada para calcular la masa mínima de material anódico necesario para mantener el sistema de protección catódica durante la vida del diseño.

En el diseño las densidades de corriente son dependientes de factores que varían con la localización geográfica y la profundidad de operación de la estructura que va a ser protegida.

Las densidades de corriente recomendadas para diseños están dadas en las tablas 1 y 2

**Tabla 1.** Densidades de corriente inicial y final recomendadas por la DNV RP B 401. para diseños de PC.

Profundidad (m)	Densidades de corriente para diseños (inicial/final) en A/m <sup>2</sup>							
	Tropical (>20° C)		Sub. Tropical (12 – 20° C)		Templado (7-12° C)		Ártico (<7° C)	
0-30	0,150	0.090	0.170	0.110	0,200	0.130	0.250	0.170
>30	0.130	0.080	0,150	0.090	0.180	0.110	0,220	0.130

Fuente: Tomada de la Norma DNV RP B 401.

**Tabla 2.** Densidades de corriente promedio recomendadas por la DNV RP B 401 para diseños de PC.

Profundidad (m)	Densidades de corriente para diseños (promedio) en A/m <sup>2</sup>			
	Tropical (>20° C)	Sub. Tropical (12 – 20° C)	Templado (7-12° C)	Ártico (<7° C)
0-30	0,070	0,080	0,100	0,120
>30	0,060	0,070	0,080	0,100

Fuente: Tomada de la Norma DNV RP B 401.

### 3.3 FACTOR DE ROMPIMIENTO DEL RECUBRIMIENTO

El factor de rompimiento del recubrimiento hace referencia a la reducción anticipada de la demanda de corriente catódica debido a la aplicación de un recubrimiento eléctricamente aislante. Un factor de rompimiento igual a cero ( $F_c = 0$ ) significa que el recubrimiento es 100% aislante, esto hace que la demanda de corriente catódica sea cero y por tanto no sea necesario un sistema de protección catódica, un factor de rompimiento igual a uno ( $F_c = 1$ ) implica que el recubrimiento no tiene propiedades protectoras es decir la demanda de corriente necesaria para la protección es igual a la aplicada a una superficie desnuda.

El factor del rompimiento esta en función de las propiedades del recubrimiento, de parámetros operacionales y del tiempo de vida del recubrimiento. Las propiedades del recubrimiento dependen de la preparación de la superficie y del modo de aplicación.

### **3.4 DESEMPEÑO DE LOS ÁNODOS DE SACRIFICIO**

El desempeño de un ánodo de sacrificio depende principalmente de su composición, el desempeño se refleja en la eficiencia electroquímica del material anódico la cual indica la cantidad de corriente drenada en una unidad de tiempo por unidad de masa, que por lo general para el zinc es de 700 Ah/Kg, mientras que para el aluminio es de 2000 Ah/Kg (estos valores son recomendados por la norma y en la composición de cada aleación se tubo en cuenta la mayor cantidad de impurezas permisibles), aunque el fabricante es el que define la eficiencia de acuerdo a la composición que utilice.

La eficiencia electroquímica ( $e$ ) debe ser aplicada en el diseño para el cálculo de los requerimientos de masa anódica.

### **3.5 FORMULAS PARA CALCULAR LA RESISTENCIA DE LOS ÁNODOS**

La resistencia de un ánodo depende principalmente de su forma geométrica (área superficial expuesta) y de la resistividad del medio al cual va ser sometido, en la tabla 3 se especifican diferentes fórmulas para calcular la resistencia de un ánodo dependiendo de su forma.

La resistencia de un ánodo hace referencia a la resistencia presentada al flujo de corriente que se presenta en la interfase ánodo electrolito.

**Tabla 3.** Fórmulas para calcular la resistencia anódica (Ra).

Tipo de ánodo	Formula de Resistencia
Cilindro largo 'Stand off' L > 4r	$Ra = \frac{r}{2pL} \left( \ln \frac{4L}{r} - 1 \right)$
Cilindro Corto 'Stand off' L < 4r	$Ra = \frac{r}{2pL} \left[ \ln \left\{ \frac{2L}{r} \left( 1 + \sqrt{1 + \left( \frac{r}{2L} \right)^2} \right) \right\} + \frac{r}{2L} - \sqrt{1 + \left( \frac{r}{2L} \right)^2} \right]$
Paralelepípedo largo 'flush mounted'. L > 4 el espesor	$Ra = \frac{r}{2 * S}$
Paralelepípedo corto 'flush mounted', brazaletes y otras formas 'flush mounted'.	$Ra = \frac{0.315 * r}{\sqrt{A}}$

Fuente: Tomada de la Norma DNV RP B 401.

Donde:

? (ohm-m) = resistividad del ambiente.

L (m) = longitud del ánodo.

r (m) = radio del ánodo.

S (m) = media aritmética de la longitud y el espesor.

A (m<sup>2</sup>) = área superficial de exposición del ánodo.

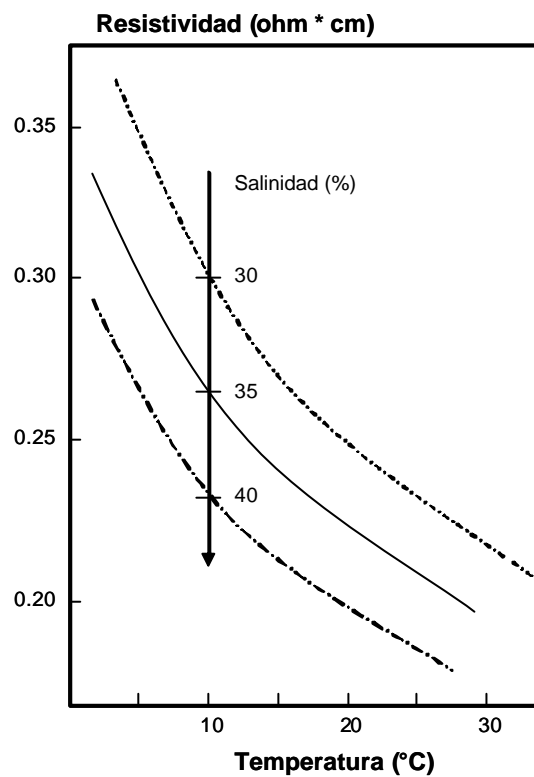
Estas ecuaciones son validas para ánodos con una distancia mínima de 0.3 metros del objeto ser protegido.

### 3.6 RESISTIVIDAD

La resistividad ? (ohm-m) del agua de mar esta en función de la salinidad y de la temperatura. En mar abierto la salinidad no varia significativamente y la temperatura es el principal factor. La relación entre resistividad y temperatura a una salinidad de 30 y 40% (partes por millón) esta dada en la gráfica 1.

El mayor efecto de la salinidad en la protección catódica es su influencia en la resistividad del agua de mar, a una temperatura dada, al aumentar la salinidad se disminuye la resistividad y el contenido de oxígeno disuelto, entonces un incremento en la salinidad es benéfico ya que reduce el oxígeno disuelto y la resistencia del ánodo.

**Grafica 1.** Resistividad del agua de mar como función de la temperatura para una salinidad del 30 y 40%



Como se puede ver en la grafica 1 existe una relación inversamente proporcional entre la salinidad y la resistividad, ya que el espacio que ocupan los iones de cloruros y otras sales desplazan al oxígeno disuelto.

### 3.7 FACTOR DE UTILIZACIÓN

El factor de utilización del ánodo expresa la fracción de material del ánodo que podrá ser utilizada para propósitos de diseño.

Cuando el ánodo es consumido más allá del factor de utilización, el desempeño del ánodo es impredecible. El factor de utilización de un ánodo depende del diseño del ánodo. La tabla 4 muestra diversos factores de utilización según la forma del ánodo.

**Tabla 4.** Factores de utilización de diversos tipos de ánodos.

Tipo de Ánodo	Factor de utilización del Ánodo
Cilindro Corto 'stand off'.	0.90
Paralelepípedo largo 'flush mounted'.	0.85
Paralelepípedo corto 'flush mounted'	0.80
Brazaletes tipo mitad de lamina.	0.80
Brazaletes tipo segmentado.	0.75

Fuente: Tomada de la Norma DNV RP B 401.

## **4. PROCEDIMIENTO RECOMENDADO PARA REALIZAR EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ANODOS DE SACRIFICIO**

Los procedimientos de diseño hacen referencia a los pasos a seguir para realizar un diseño de protección catódica por ánodos de sacrificio. El fin de estos procedimientos es llegar a calcular la masa anódica necesaria para proteger determinada área, esto se logra interrelacionando los parámetros de diseño mencionados anteriormente.

### **4.1 SUBDIVISIÓN DEL OBJETO Y CÁLCULO DEL ÁREA A PROTEGER**

En el diseño de un sistema de protección catódica para objetos largos y complejos, siempre es necesario y conveniente subdividir el objeto en unidades a ser protegidas.

La división en unidades debe ser basada en zonas donde se tenga las mismas condiciones ambientales y los mismos parámetros operacionales, tales como: profundidad de trabajo y temperatura.

Según la subdivisión establecida, el cálculo de cada área superficial debe ser hecho separadamente para áreas donde las condiciones ambientales o aplicación de recubrimientos impliquen diferentes requerimientos de corriente.

### **4.2 CÁLCULO DE LA DEMANDA DE CORRIENTE**

La demanda de corriente ( $I_c$ ) hace referencia a la corriente necesaria para alcanzar la polarización de un área específica a proteger.

El cálculo de la demanda de corriente se realiza mediante la ecuación 1.

$$I_c = A_c * F_c * i_c \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

$I_c$  (amperios) = demanda de corriente para un área específica.

$A_c$ (metros cuadrados) = área que va a ser protegida.

$F_c$  = factor de rompimiento.

$i_c$ (amperios/m<sup>2</sup>) = densidad de corriente

#### 4.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE ÁNODO

El tipo de ánodo a ser utilizado depende de la fabricación, instalación y parámetros operacionales, por tanto el tipo de ánodo a ser utilizado es especificado por el diseñador.

#### 4.4 CÁLCULO DE LA MASA ANÓDICA

La masa neta total requerida para mantener la protección catódica a través del tiempo del diseño es calculada con la demanda de corriente promedio, mediante la ecuación 2.

$$M = \frac{I_{C(PROMEDIO)} \times t \times 8760}{U \times e} \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde:

$e$  (Ah/Kg): eficiencia electroquímica del material anódico. Para el zinc es de 780.

$U$ : factor de utilización.

8760 : factor de conversión a horas por año

$t$  : tiempo de vida del diseño en años.

$I_c$  : demanda de corriente promedio.

#### 4.5 CÁLCULO DEL NÚMERO DE ÁNODOS

La corriente de salida de cada ánodo es calculada mediante la ley de ohm por medio de la ecuación 3.

$$I_a = \frac{E_a - E_c}{R_a} \quad (\text{ecuación 3})$$

Donde:

$E_a$  = potencial del circuito cerrado.

$E_c$  = potencial de protección.

$R_a$  = resistencia del ánodo.

La resistencia del ánodo depende de su forma y geometría, las formulas para el calculo de la resistencia están referenciadas en la tabla 3.

El número total de ánodos para cada área específica se calcula mediante la relación de corriente total requerida y corriente de salida de cada ánodo, o mediante la relación entre la masa total calculada y el peso de los ánodos a utilizar.

$$N = \frac{I_c}{I_a} \quad (\text{ecuación 4})$$

Donde:

$N$  = numero de ánodos a instalar.

$I_c$  = demanda de corriente requerida para la protección.

$I_a$  = corriente drenada por cada ánodo.

$$N = \frac{M_T}{M_a} \quad (\text{ecuación 5})$$

Donde:

$N$  = numero de ánodos a instalar

$M_T$  = masa neta total calculada

$M_a$  = masa del ánodo que a utilizar.

El diseñador define que criterio se utiliza para calcular el número de ánodos

## 5. METODOLGIA EXPERIMENTAL

La metodología experimental para conseguir los objetivos propuestos fue la siguiente:

### 5.1 RECONOCIMINETO DE LA CELDA TRABAJO

En el desarrollo de esta investigación se contó con dos bancos de pruebas en los cuales se pudieron simular sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio, bajo condiciones estáticas en un ambiente marino simulado.

El primer banco de pruebas consta de catorce celdas de acrílico con dimensiones de 20\*20\*20 cm, en la fotografía 1 se puede observar dicho banco.

**Fotografía 1.** Banco de pruebas No 1 para simular sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio.



El segundo banco de pruebas consta de cuatro celdas de fibra de vidrio con dimensiones de 70\*70\*25 cm, cada celda de trabajo fue denominada como **CEDAS**, debido a las iniciales adoptadas de la finalidad de dicho banco (“Celdas Electroquímicas de evaluación del Desempeño de Ánodos de Sacrificio”). En la fotografía 2 se aprecian las CEDAS del banco de pruebas No 2.

**Fotografía 2.** CEDAS del banco de pruebas No 2



En los dos bancos de trabajo se tuvieron en cuenta parámetros ambientales tales como la temperatura, pH, concentración de oxígeno y resistividad del electrolito. El electrolito utilizado fue agua de mar sintética según la norma ASTM D 1141.

## **5.2 DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO UTILIZANDO ÁNODOS DE ZINC**

Como primera instancia para evaluar el desempeño de un sistema de protección catódica bajo la influencia de diversos factores de rompimiento

inducido, se diseñó dicho sistema. El diseño elaborado a nivel de laboratorio sigue las recomendaciones prácticas propuestas por la DNV RP B401.

### 5.2.1 Selección del área a proteger.

Debido a que se contó con dos bancos de prueba en los cuales se desarrolló la fase experimental de la investigación, se diseñaron dos sistemas de protección catódica para cada respectivo banco de prueba.

Cada banco de prueba presenta características particulares las cuales se referencian en la tabla 5

**Tabla 5.** Características de los bancos de prueba.

<b><i>Banco de pruebas No 1</i></b>	<b><i>Banco de pruebas No 2</i></b>
<b>Material:</b> Acrílico.	<b>Material:</b> Fibra de vidrio.
<b>Dimensiones :</b> 20*20*10 cm	<b>Dimensiones:</b> 80*80*25 cm
<b>Área a proteger:</b> 0.0324 m <sup>2</sup>	<b>Área a proteger:</b> 0.49 m <sup>2</sup>

El electrodo de trabajo para los dos bancos de prueba fue una lámina de acero naval ASTM 131 grado A, el área de superficial de cada lámina se reporta en la tabla 5

## 5.2.2 Cálculo de la demanda de corriente.

Después de conocida el área a proteger para cada banco de pruebas, se procedió a calcular la demanda de corriente necesaria para alcanzar la polarización, la cual se calculó con la ecuación 1.

$$I_c = A_c * F_c * i_c$$

Para el banco de pruebas No 1 se tiene:

$$A_c = 0.0324 \text{ m}^2 \text{ (área a proteger)}$$

$$i_c = 0.07 \text{ A/m}^2 \text{ (Seleccionada de la tabla 2)}$$

$$F_c = 1$$

Reemplazando en la ecuación 1 se tiene:

$$I_c = 0.0324 \text{ m}^2 * 0.07 \text{ A/m}^2 * 1$$

$$I_c = 0,002268 \text{ A}$$

La demanda de corriente necesaria para polarizar la lámina de acero naval de 0.0324 m<sup>2</sup> de área superficial es de **0.002268 Amperios**.

Para el banco de pruebas No 2 se tiene:

$$A_c = 0.49 \text{ m}^2 \text{ (área a proteger)}$$

$$i_c = 0.07 \text{ A/m}^2 \text{ (Seleccionada de la tabla 2)}$$

$$F_c = 1.$$

Reemplazando en la ecuación No 1 se tiene:

$$I_c = 0.49 \text{ m}^2 * 0.07 \text{ A/m}^2 * 1$$

$$I_c = 0,0343 \text{ A}$$

La demanda de corriente necesaria para polarizar la lámina de acero naval de 0.49 m<sup>2</sup> de área superficial es de **0,0343 Amperios**.

### **5.2.3 Selección del tipo de ánodo.**

Debido a que los ánodos de zinc presentan: buena eficiencia electroquímica, buen nivel de potencial de protección, bajo costo comparado con ánodos de aluminio y magnesio, se seleccionaron para realizar este trabajo de investigación.

La composición de los ánodos de zinc que se utilizaron se muestra en la tabla 6.

Los ánodos a utilizados son producidos por la industria Colombiana y con ellos se abastece la demanda interna para protección de estructuras enterradas y sumergidas en agua de mar. Las especificaciones técnicas consultadas a los proveedores, cumplen con la Norma MIL-A 18001K y con la norma ASTM F1182-90.

La forma de los ánodos se seleccionó con base en la observación de los sistemas de protección tanto de barcos como de embarcaciones submarinas.

La forma seleccionada para los ánodos corresponde a los conocidos como tipo ZHS (Zinc-Hull-steel-Slap) o tipo trapezoidal, los cuales presentan óptimos valores de drenaje de corriente, relaciones masa/área apropiadas y eficiencias de rendimiento adecuadas para la protección de estructuras metálicas en barcos y submarinos.

**Tabla 6.** Composición de los ánodos de Zinc

<b>Elemento</b>	<b>Concentración (%)</b>
Cu	0.005% máx.
Al	0.3 - 0.5
Si	0.003 máx.
Fe	0.002 máx.
Pb	0.005 máx.
Cd	0.025 – 0.1
Zn	Remanente
eficiencia	85%
potencial	-1.05 Vs Ag/AgCl
capacidad a – h / kg	780

#### 5.2.4 Cálculo de la masa anódica

El cálculo de la masa anódica se realizó mediante la ecuación 2.

$$M = \frac{I_{C(PROMEDIO)} \times t \times 8760}{U \times e}$$

Para el banco de pruebas No 1 se tiene:

$I_{C(\text{promedio})} = 0,002268 \text{ A}$

$t =$  tiempo de vida del diseño de 0.0467 años.

$U =$  factor de utilización de 0.85

$e =$  eficiencia electroquímica de 780 Ah/Kg.

8760 = factor de conversión.

$$M = \frac{0.002268 \times 0.0467 \times 8760}{0.85 \times 780}$$

$$M = 0.0014 \text{ Kg}$$

La masa anódica requerida para polarizar el sistema durante la vida del diseño (tres semanas aproximadamente) es de **1.4 gramos**.

Para el banco de pruebas No 2 se tiene:

$$I_{C(\text{promedio})} = 0,0343A$$

t = tiempo de vida del diseño de 0.22 años.

U = factor de utilización de 0.85

e = eficiencia electroquímica de 780 Ah/Kg.

8760 = factor de conversión.

$$M = \frac{0.0343 \times 0.22 \times 8760}{0.85 \times 780}$$

$$M = 0.10Kg$$

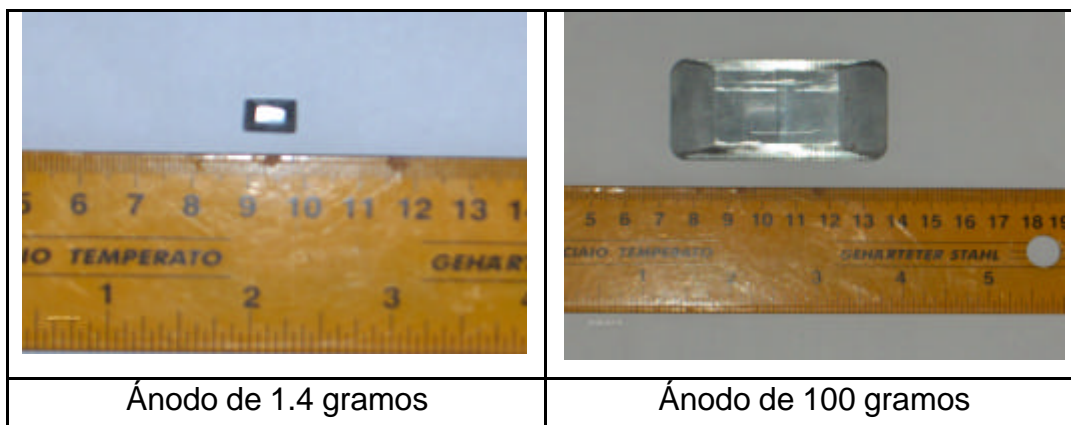
La masa anódica requerida para polarizar el sistema durante la vida del diseño (tres meses aproximadamente) es de **100 gramos**.

### **5.2.5 Distribución de los ánodos sobre el área superficial de la lámina de acero naval ASTM 131 – A**

Debido a que las masas anódicas calculadas para los diseños son relativamente pequeñas, las respectivas masas calculadas se escogieron para fabricar los ánodos a escala, es decir en cada diseño se instaló un ánodo de sacrificio con una masa de 1.4 y 100 gramos respectivamente instalados en el centro de cada área superficial a proteger.

Los ánodos de 1.4 y 100 gramos de zinc tipo ZHS se fabricaron a escala tal y como se puede ver en la fotografía 3.

**Fotografía 3.** Ánodos de Zinc de 1.4 gr. y 100 gr.



En las tablas 7 Y 8 se aprecia un resumen de los cálculos realizados para el diseño de los sistemas de protección catódica de cada banco de pruebas.

**Tabla 7.** Resumen de los cálculos realizados para el diseño del sistema de protección catódica para el banco de pruebas No 1

Corriente Promedio de diseño ic (A)	Tiempo vida de diseño t (Años)	Horas en un año ( Horas)	Factor de Utilización u (%)	Eficiencia electroquímica del ánodo e ( A.h / Kg)	Masa Anódica (kg)
0,002268	0.0467	8.760	0,85	780	0,0014

**Tabla .8.** Resumen de los cálculos realizados para el diseño del sistema de protección catódica para el banco de pruebas No 2.

Corriente Promedio de diseño ic (A)	Tiempo vida de diseño t (Años)	Horas en un año ( Horas)	Factor de Utilización u (%)	Eficiencia electroquímica del ánodo e ( A.h / Kg)	Masa Anódica (kg)
0,035	0,22	8.760	0,85	780	0,102

### **5.3 SELECCIÓN Y APLICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO SOBRE LA SUPERFICIE DE LA LÁMINA DE ACERO NAVAL ASTM 131-A**

El recubrimiento utilizado para esta investigación fue un producto autoimprimante epóxico de altos sólidos en volumen; la selección de este recubrimiento se basa en su flexibilidad para ser utilizado en ambientes de inmersión en cualquier tipo de medios acuosos e incluso ante condiciones atmosféricas normales. Al aplicar el producto como esquema simple, se anula la influencia de otros factores (comportamiento de la interfase entre productos tales como esquemas dobles constituidos por un imprimante y una barrera de dos tipos genéricos diferentes) en los resultados que se esperan obtener en estos ensayos.

El producto se aplicó según las especificaciones dadas en la ficha técnica del fabricante con el fin de obtener un óptimo comportamiento del recubrimiento en el transcurso de las pruebas.

La preparación de la superficie del acero naval se realizó con chorro abrasivo a grado metal blanco SSPC-SP5. Una vez preparada la superficie se aplicó el recubrimiento seleccionado por medio de spray convencional sobre la superficie metálica.

Con el fin de conocer el comportamiento del recubrimiento durante un periodo de prueba bajo la influencia de un sistema de protección catódica, se realizaron pruebas de espectroscopia de impedancia electroquímica a tres laminas recubiertas, de las cuales dos de ellas presentaron un sistema de protección catódica y la restante fue la base para realizar comparaciones debido a que esta no presentó un segundo sistema de protección.

## **5.4 MONTAJE DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES EN LOS BANCOS DE PRUEBA**

Para cumplir con los objetivos de esta experimentación se realizaron 14 pruebas simultáneas en el banco de pruebas No 1 y cuatro pruebas simultáneas en el banco de pruebas No 2, bajo las siguientes condiciones de instalación y operación.

### **Condiciones de instalación:**

- ✓ Se utilizó el mismo electrolito (agua de mar simulada según ASTM 1141).
- ✓ Las láminas de acero naval ASTM 131 Grado A se sometieron previamente a una preparación superficial mediante la técnica de sandblasting a grado metal blanco según especificación SSPC SP5.
- ✓ El sustrato metálico de la lámina de acero naval fue expuesto al electrolito durante la totalidad de la prueba.
- ✓ Los ánodos fueron aislados del sustrato metálico mediante una capa de recubrimiento epóxico de alto desempeño.
- ✓ Se realizó el escalamiento del ánodo de prueba con respecto a la forma del ánodo ZHS, que en la práctica se instalan en nuestros astilleros. En la Tabla 9, se reportan los datos del escalamiento de los ánodos.
- ✓ Se instaló en cada lámina de prueba una masa anódica de 100 y 1.4 gramos respectivamente en cada celda de trabajo.

- ✓ El elemento de continuidad eléctrica entre el ánodo y el cátodo (lámina) fue un conductor de cobre electrolítico calibre #14 AWG. En la figura. 1 se muestra el montaje eléctrico del ánodo en la lámina.
- ✓ El electrodo de referencia fue de Ag/AgCl.

**Tabla 9.** Escalamiento de los ánodos de prueba con respecto a uno comercial ZHS.

Ánodo	Masa [gr]	Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Área superficial total [cm <sup>2</sup> ]	Área superficial de la base [cm <sup>2</sup> ]	Área superficial superior (no incluye la base) [cm <sup>2</sup> ]
ZHS Comercial	10503	1473	1079,09	446,5	632,59
ZHS escalado	100	14,025	48,47	20,32	28,15
ZHS escalado	50	7,012	30,53	12,4	18,13

**Condiciones de operación:**

- ✓ Temperatura ambiente (18 - 25) °C.
- ✓ Condiciones estáticas.
- ✓ Cantidad constante de oxígeno en condición saturada, 6 ppm.
- ✓ pH basico (8 - 8.5).

**5.5 DISTRIBUCIÓN DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES**

Se realizaron 14 pruebas experimentales en el banco de pruebas No 1 instalando en cada celda un ánodo de 1.4 gramos ubicado en el centro de las respectivas laminas, mientras que para las CEDAS (banco de pruebas No 2) se

instaló un ánodo de 100 gramos a escala del ánodo comercial tipo ZHS DE 10 kg, ubicado en el centro de las respectivas láminas; debido a que el objetivo de esta investigación es evaluar el comportamiento de los sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio con respecto a un recubrimiento epóxico con porcentaje de daño inducido del 5,10, 20 y 40%, las pruebas fueron distribuidas de la siguiente manera:

### **Banco de pruebas No 1**

#### ✓ **CELDA 1.**

<u>Categoría del recubrimiento según la norma DNV RP B401</u>	<u>Tipo I</u>
<u>Espesor promedio del recubrimiento</u>	<u>3.7 mils</u>
<u>Daño inducido</u>	<u>5%</u>

✓ **DUPLICADO 1.** Esta celda presenta los mismos requerimientos de la celda 1.

#### ✓ **CELDA 2.**

<u>Categoría del recubrimiento según la norma DNV RP B401</u>	<u>Tipo I</u>
<u>Espesor promedio del recubrimiento</u>	<u>3.95</u>
<u>Daño inducido</u>	<u>20%</u>

✓ **DUPLICADO 2.** Esta celda presenta los mismos requerimientos de la celda 2.

#### ✓ **CELDA 3.**

<u>Categoría del recubrimiento según la norma DNV RP B401</u>	<u>Tipo I</u>
<u>Espesor promedio del recubrimiento</u>	<u>3.5 mils</u>
<u>Daño inducido</u>	<u>40%</u>

✓ **DUPLICADO 3.** Esta celda presenta los mismos requerimientos de la celda 3.

✓ **CELDA 4.**

<u>Categoría del recubrimiento según la norma DNV RP B401</u>	<u>Tipo II</u>
<u>Espesor promedio del recubrimiento</u>	<u>10.4 mils</u>
<u>Daño inducido</u>	<u>5%</u>

✓ **DUPLICADO 4.** Esta celda presenta los mismos requerimientos de la celda 4.

✓ **CELDA 5.**

<u>Categoría del recubrimiento según la norma DNV RP B401</u>	<u>Tipo II</u>
<u>Espesor promedio del recubrimiento</u>	<u>9.95 mils</u>
<u>Daño inducido</u>	<u>20%</u>

✓ **DUPLICADO 5.** Esta celda presenta los mismos requerimientos de la celda 5.

✓ **CELDA 6.**

<u>Categoría del recubrimiento según la norma DNV RP B401</u>	<u>Tipo II</u>
<u>Espesor promedio del recubrimiento</u>	<u>9.6 mils</u>
<u>Daño inducido</u>	<u>40%</u>

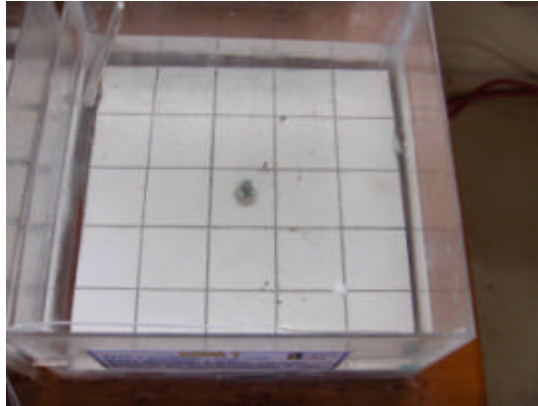
✓ **DUPLICADO 6.** Esta celda presenta los mismos requerimientos de la celda 6.

✓ **CELDA 7.** Se instaló una lámina totalmente recubierta bajo un espesor de categoría I según DNV RP B401.

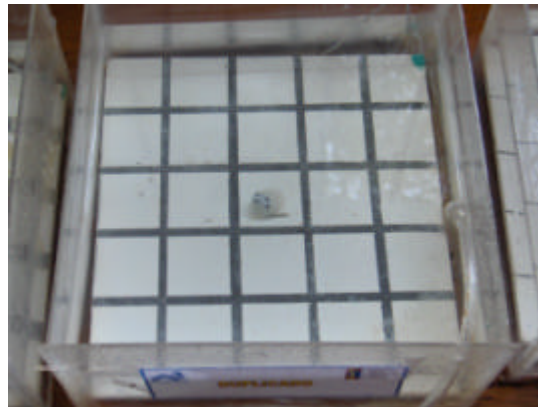
✓ **CELDA 8.** Se instaló una lámina totalmente recubierta bajo un espesor de categoría II según DNV RP B401.

La disposición de los ánodos y la distribución del porcentaje de daño para las celdas 1, 2 y 3 se observa en las fotografías 4, 5, 6 respectivamente.

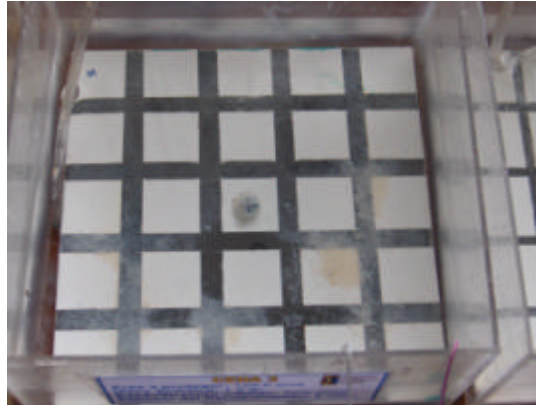
**Fotografía 4.** Lámina recubierta con un porcentaje de daño del 5%.



**Fotografía 5.** Lámina recubierta con un porcentaje de daño del 20%.



**Fotografía 6.** Lámina recubierta con un porcentaje de daño del 40%.



### **Banco de pruebas No 2**

✓ **CEDAS 1.**

<u>Categoría del recubrimiento según la norma DNV RP B401</u>	<u>Tipo I</u>
<u>Espesor promedio del recubrimiento</u>	<u>3,74 mils</u>
<u>Daño inducido</u>	<u>10%</u>

✓ **CEDAS 2.**

<u>Categoría del recubrimiento según la norma DNV RP B401</u>	<u>Tipo II</u>
<u>Espesor promedio del recubrimiento</u>	<u>9.85 mils</u>
<u>Daño inducido</u>	<u>10%</u>

✓ **CEDAS 3.**

<u>Categoría del recubrimiento según la norma DNV RP B401</u>	<u>Tipo I</u>
<u>Espesor promedio del recubrimiento</u>	<u>3,75 mils</u>
<u>Daño inducido</u>	<u>20%</u>

✓ **CEDAS 4.**

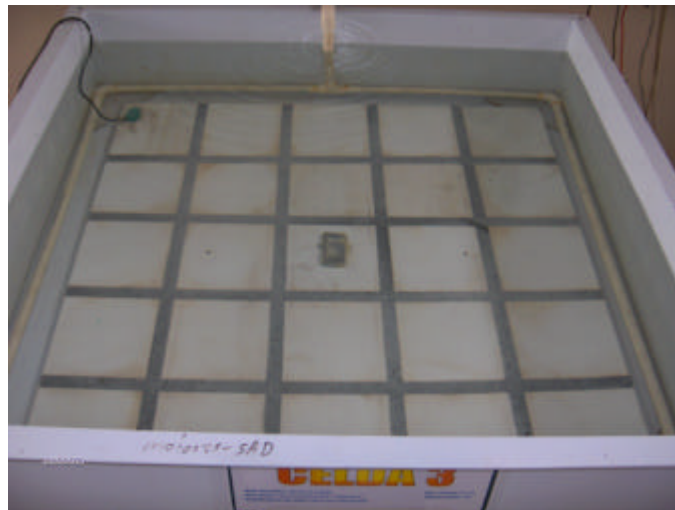
<u>Categoría del recubrimiento según la norma DNV RP B401</u>	<u>Tipo II</u>
<u>Espesor promedio del recubrimiento</u>	<u>10,54mils</u>
<u>Daño inducido</u>	<u>20%</u>

Las fotografías 7 y 8 muestran la distribución de los porcentajes de daño del 10% y 20% sobre la superficie de la lámina.

**Fotografía 7.** Lámina recubierta con un porcentaje de daño inducido del 10%.



**Fotografía 8.** Lámina recubierta con un porcentaje de daño inducido del 20%.



## **5.6 PUESTA EN MARCHA DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES**

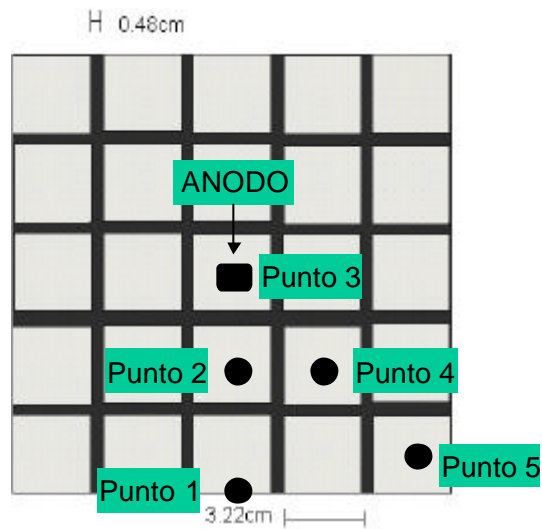
Una vez cumplidas las anteriores disposiciones y corroborando el cumplimiento de las condiciones experimentales establecidas, se procedió a sumergir simultáneamente las láminas de acero naval con sus ánodos en sus respectivas celdas de prueba. De esta manera se inició la actividad de monitoreo.

## **5.7 MONITOREO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES**

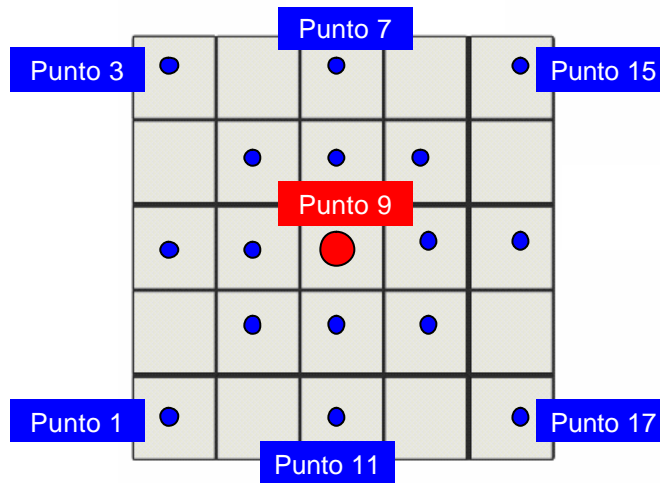
Las medidas de potencial estructura / electrolito con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl se realizaron mediante mediciones discretas siguiendo la disposición planteada en la figura 5 para el banco de pruebas No 2, para el banco de pruebas No 1 se siguió la disposición descrita en la figura 6, mientras que las mediciones de la corriente de protección drenada por el ánodo se realizaron a través de un micro amperímetro digital.

Para el banco de pruebas No 1, la medición de los potenciales se realizó aproximadamente durante 2678 horas momento en el cual se suspendieron las pruebas debido a la tendencia definida que presentaron las curvas tanto de potencial como de corriente con respecto al tiempo, mientras que para el banco No 2 las pruebas se realizaron hasta alcanzar el desgaste total de los ánodos de zinc de 1.4 gramos.

**Figura 5.** Mediciones discretas de potencial en la lámina y localización de los puntos de medición para el banco de pruebas No 2.



**Figura 6.** Mediciones discretas de potencial en la lámina y localización de los puntos de medición en el banco de pruebas No 1.



## **6. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES**

Basados en el principio que las mediciones de corriente de protección drenada por el ánodo y el potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo, permiten evaluar el comportamiento de sistemas de protección catódica, a continuación se presentan los resultados de las pruebas experimentales, los cuales están plasmados mediante la representación gráfica del potencial estructura - electrolito y corriente de protección drenada por el ánodo, con respecto al tiempo transcurrido.

### **6.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL BANCO DE PRUEBAS No 1**

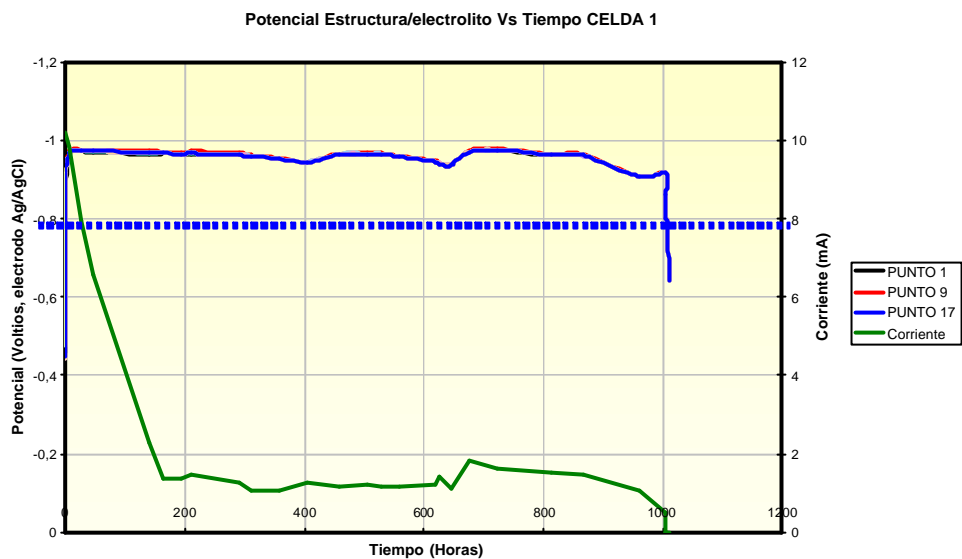
Los resultados de las pruebas de las celdas del banco de pruebas No 1 son presentados a continuación:

#### **6.1.1 GRAFICAS DE POTENCIAL ESTRUCTURA / ELECTROLITO CON RESPECTO AL TIEMPO**

Estas graficas se realizaron definiendo los puntos de medición más lejanos con respecto al ánodo de zinc (puntos 1, 9, 17) tal y como se muestra en la figura 6. Las celdas 7 y 8 solo presentaron un punto de medida debido a que estas no presentaron un sistema de protección catódica.

### 6.1.1.1 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 1.

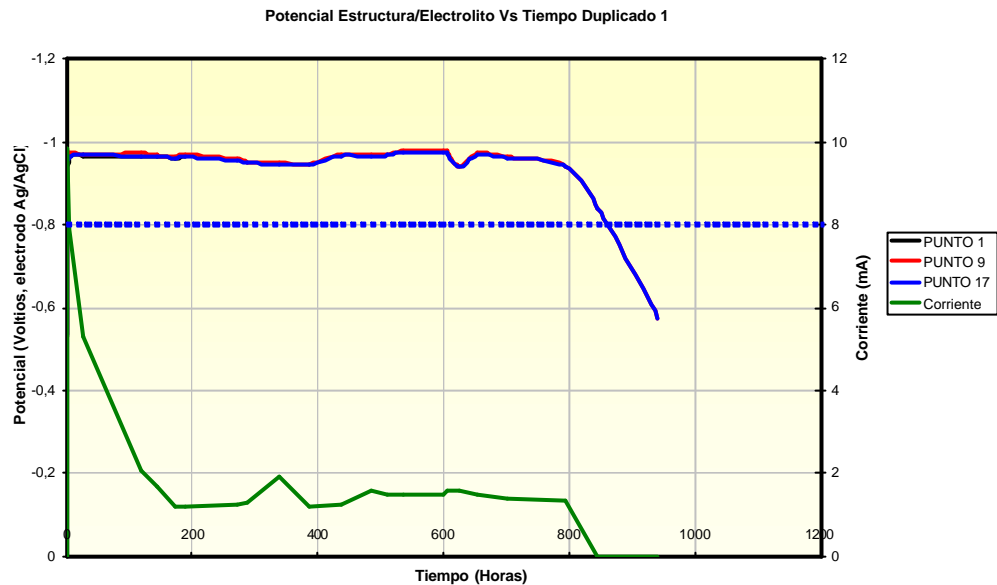
**Gráfica 2.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la celda 1.



De la gráfica 2, se puede observar que los potenciales de protección con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para los puntos de medición 1, 9, 17, durante la fase de estabilización están cercanos a los  $-0,97 V$ , estos puntos de medición son los más lejanos con respecto a la ubicación del ánodo. Además, se observa el comportamiento de la corriente de protección drenada durante el tiempo efectivo de la prueba, la curva de la corriente esta representada en la gráfica con el color verde. La tendencia de esta curva es típica de los sistemas de protección catódica, y la corriente de sostenimiento es del orden de los  $1.30 mA$ . El tiempo de polarización de la lámina de prueba fue de  $1010 horas$ , momento en el cual la masa anódica estaba totalmente desgastada.

### 6.1.1.2 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del duplicado 1.

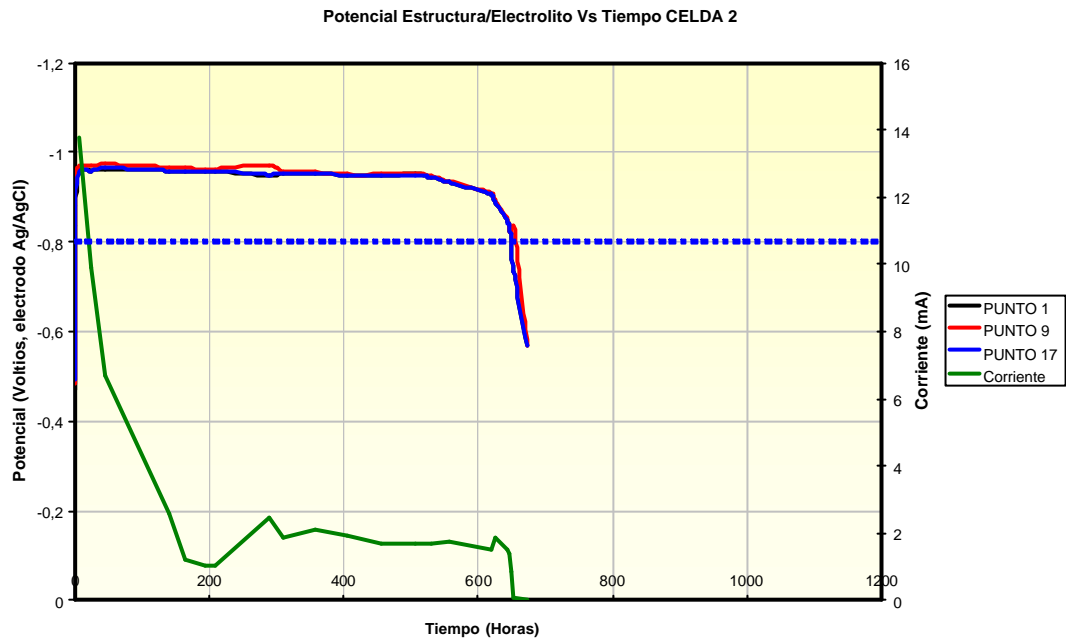
**Gráfica 3.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo del duplicado de la celda 1.



De la gráfica 3, se puede observar que los potenciales de protección con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para los puntos de medición 1, 9, 17, durante la fase de estabilización están cercanos a los  $-0,97 V$ , estos puntos de medición son los más lejanos con respecto a la ubicación del ánodo. Además, se observa el comportamiento de la corriente de protección drenada durante el tiempo efectivo de la prueba, la curva de la corriente esta representada en la gráfica con el color verde. La tendencia de esta curva es típica de los sistemas de protección catódica, y la corriente de sostenimiento es del orden de los  $1.46 mA$ . El tiempo de polarización de la lámina de prueba fue de  $860 horas$ , momento en el cual la masa anódica estaba totalmente desgastada.

### 6.1.1.3 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 2.

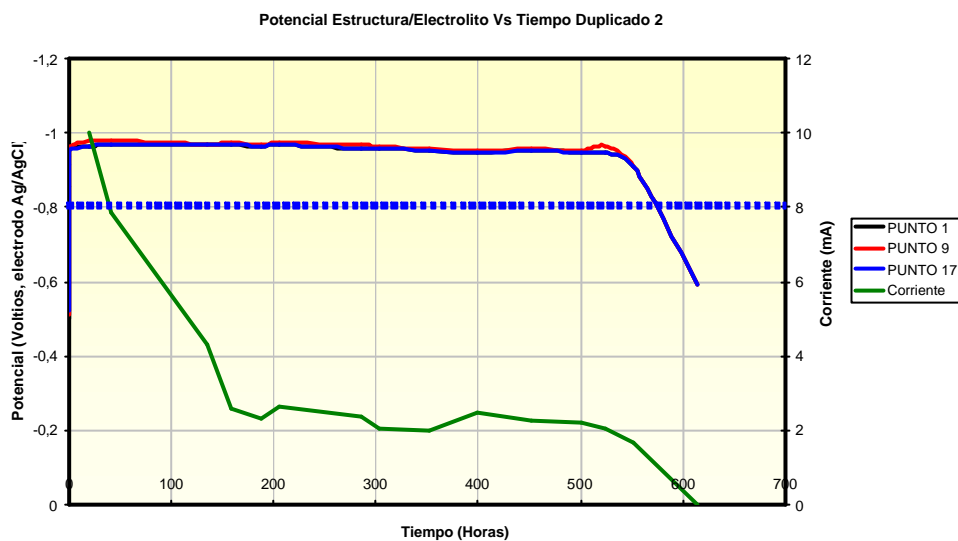
**Gráfica 4.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la celda 2.



De la gráfica 4, se puede observar que los potenciales de protección con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para los puntos de medición 1, 9, 17, durante la fase de estabilización están cercanos a los  $-0,97\text{ V}$ , estos puntos de medición son los más lejanos con respecto a la ubicación del ánodo. Además, se observa el comportamiento de la corriente de protección drenada durante el tiempo efectivo de la prueba, la curva de la corriente esta representada en la gráfica con el color verde. La tendencia de esta curva es típica de los sistemas de protección catódica, y la corriente de sostenimiento es del orden de los  $1,89\text{ mA}$ . El tiempo de polarización de la lámina de prueba fue de  $650\text{ horas}$ , momento en el cual la masa anódica estaba totalmente desgastada.

#### 6.1.1.4 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del duplicado 2.

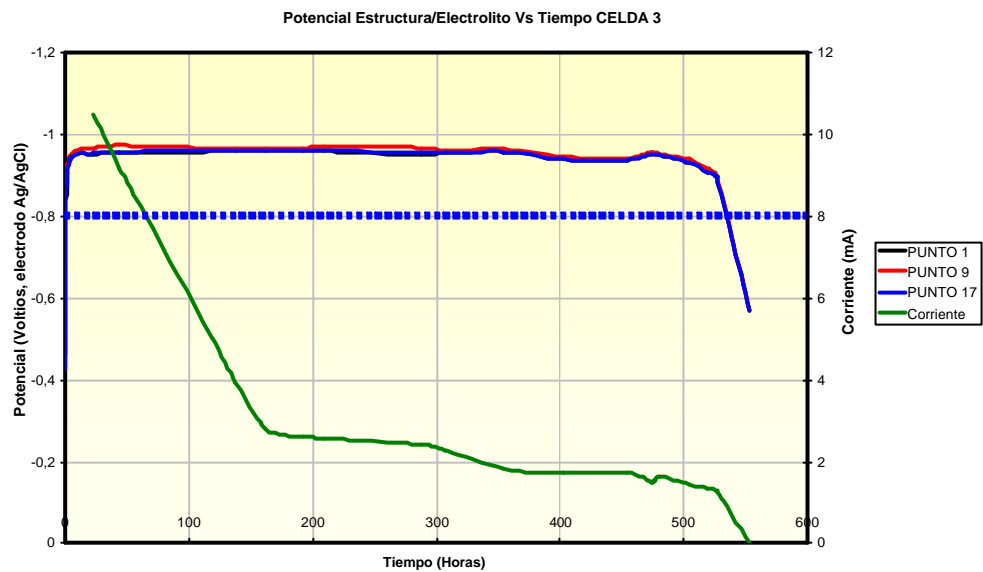
**Gráfica 5.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo del duplicado de la celda 2.



De la gráfica 5, se puede observar que los potenciales de protección con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para los puntos de medición 1, 9, 17, durante la fase de estabilización están cercanos a los  $-0,97 V$ , estos puntos de medición son los más lejanos con respecto a la ubicación del ánodo. Además, se observa el comportamiento de la corriente de protección drenada durante el tiempo efectivo de la prueba, la curva de la corriente esta representada en la gráfica con el color verde. La tendencia de esta curva es típica de los sistemas de protección catódica, y la corriente de sostenimiento es del orden de los  $2,19 mA$ . El tiempo de polarización de la lámina de prueba fue de  $575 horas$ , momento en el cual la masa anódica estaba totalmente desgastada.

### 6.1.1.5 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 3.

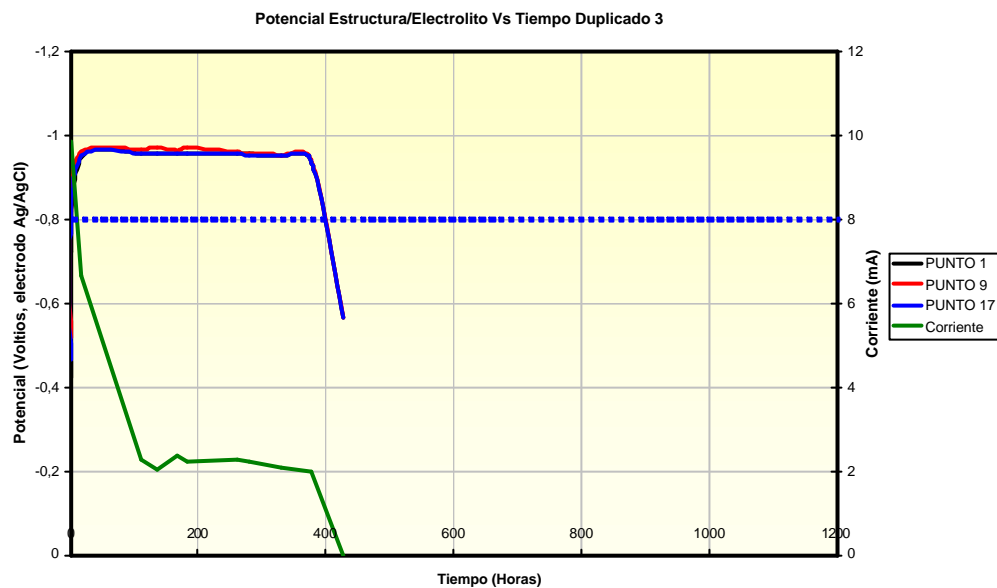
**Gráfica 6.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la celda 3.



De la gráfica 6, se puede observar que los potenciales de protección con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para los puntos de medición 1, 9, 17, durante la fase de estabilización están cercanos a los  $-0,97 V$ , estos puntos de medición son los más lejanos con respecto a la ubicación del ánodo. Además, se observa el comportamiento de la corriente de protección drenada durante el tiempo efectivo de la prueba, la curva de la corriente esta representada en la gráfica con el color verde. La tendencia de esta curva es típica de los sistemas de protección catódica, y la corriente de sostenimiento es del orden de los  $1.81 mA$ . El tiempo de polarización de la lámina de prueba fue de  $535 horas$ , momento en el cual la masa anódica estaba totalmente desgastada.

### 6.1.1.6 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del duplicado 3.

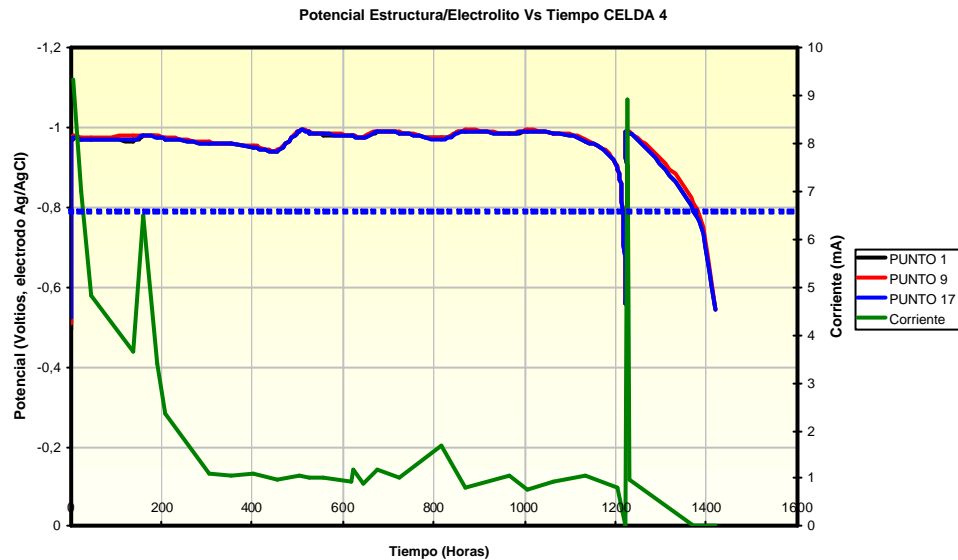
**Gráfica 7.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo del duplicado de la celda 3.



De la gráfica 7, se puede observar que los potenciales de protección con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para los puntos de medición 1, 9, 17, durante la fase de estabilización están cercanos a los  $-0,96\text{ V}$ , estos puntos de medición son los más lejanos con respecto a la ubicación del ánodo. Además, se observa el comportamiento de la corriente de protección drenada durante el tiempo efectivo de la prueba, la curva de la corriente esta representada en la gráfica con el color verde. La tendencia de esta curva es típica de los sistemas de protección catódica, y la corriente de sostenimiento es del orden de los  $2,14\text{ mA}$ . El tiempo de polarización de la lámina de prueba fue de  $400\text{ horas}$ , momento en el cual la masa anódica estaba totalmente desgastada.

### 6.1.1.7 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 4.

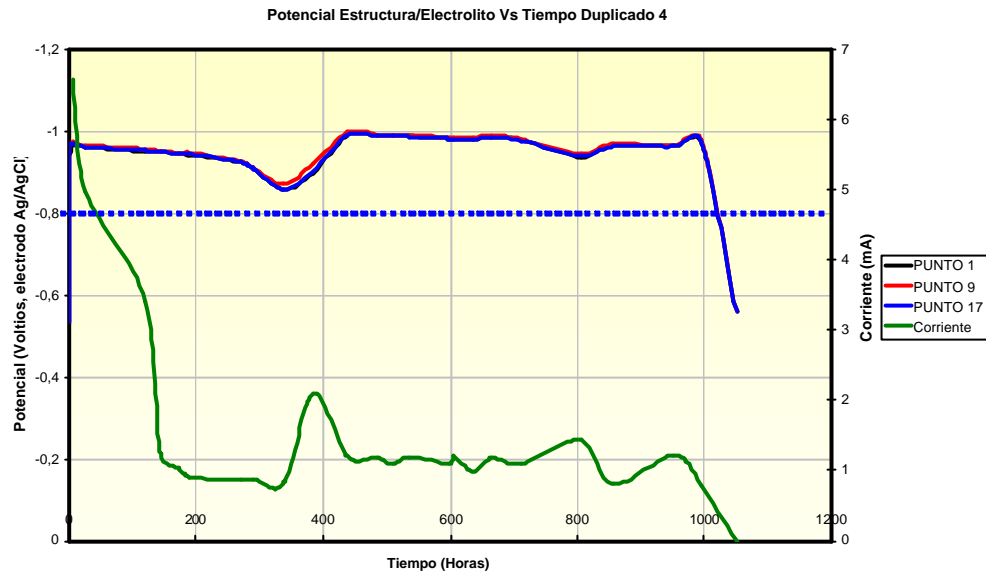
**Gráfica 8.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la celda 4.



De la gráfica 8, se puede observar que los potenciales de protección con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para los puntos de medición 1, 9, 17, durante la fase de estabilización están cercanos a los  $-1.00\text{ V}$ , estos puntos de medición son los más lejanos con respecto a la ubicación del ánodo. Además, se observa el comportamiento de la corriente de protección drenada durante el tiempo efectivo de la prueba, la curva de la corriente esta representada en la gráfica con el color verde. La tendencia de esta curva es típica de los sistemas de protección catódica, y la corriente de sostenimiento es del orden de los  $1.05\text{ mA}$ . El tiempo de polarización de la lámina de prueba fue de  $1360\text{ horas}$ , momento en el cual la masa anódica estaba totalmente desgastada.

### 6.1.1.8 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del duplicado 4.

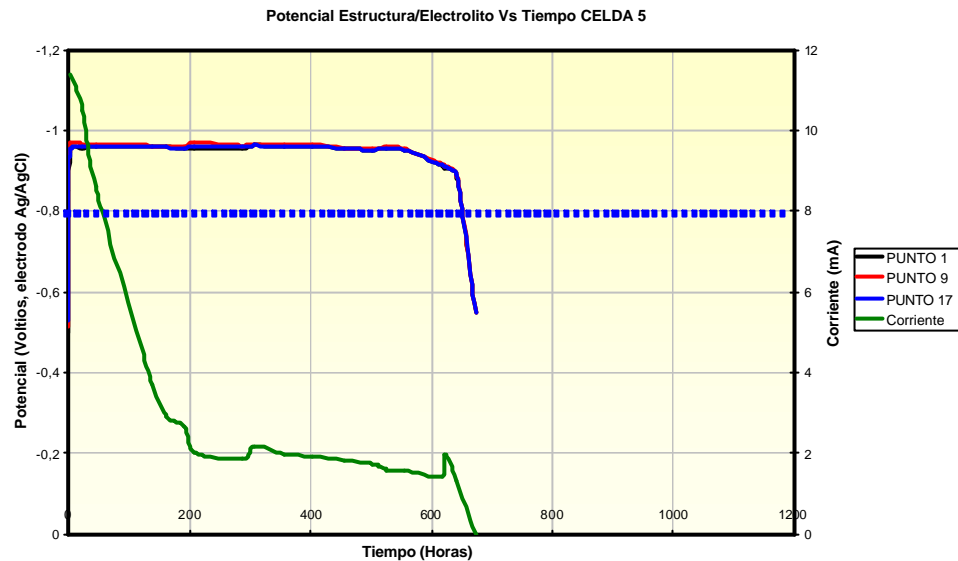
**Gráfica 9.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo del duplicado de la celda 4.



De la gráfica 9, se puede observar que los potenciales de protección con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para los puntos de medición 1, 9, 17, durante la fase de estabilización están cercanos a los  $-1.00\text{ V}$ , estos puntos de medición son los más lejanos con respecto a la ubicación del ánodo. Además, se observa el comportamiento de la corriente de protección drenada durante el tiempo efectivo de la prueba, la curva de la corriente esta representada en la gráfica con el color verde. La tendencia de esta curva es típica de los sistemas de protección catódica, y la corriente de sostenimiento es del orden de los  $1.14\text{ mA}$ . El tiempo de polarización de la lámina de prueba fue de  $1020\text{ horas}$ , momento en el cual la masa anódica estaba totalmente desgastada.

### 6.1.1.9 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 5.

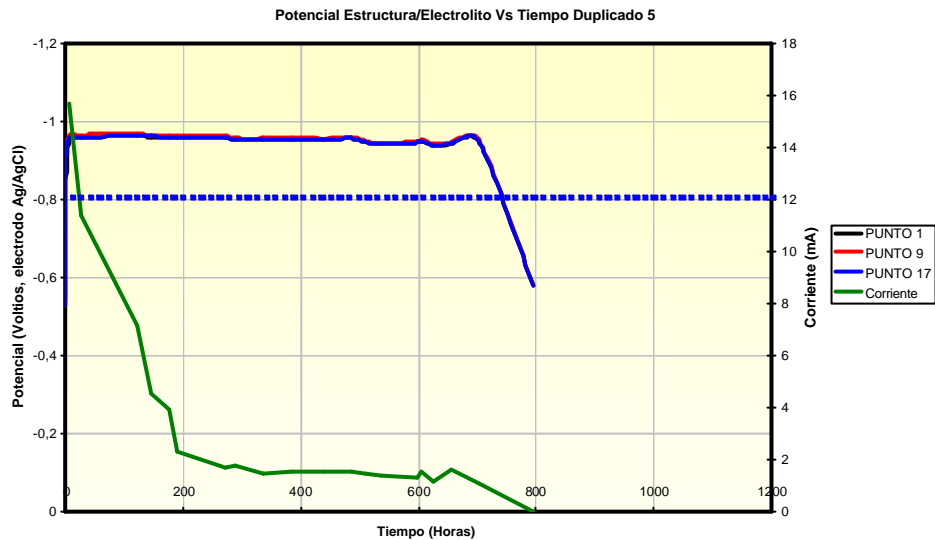
**Gráfica 10.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la celda 5.



De la gráfica 10, se puede observar que los potenciales de protección con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para los puntos de medición 1, 9, 17, durante la fase de estabilización están cercanos a los  $-0.96\text{ V}$ , estos puntos de medición son los más lejanos con respecto a la ubicación del ánodo. Además, se observa el comportamiento de la corriente de protección drenada durante el tiempo efectivo de la prueba, la curva de la corriente esta representada en la gráfica con el color verde. La tendencia de esta curva es típica de los sistemas de protección catódica, y la corriente de sostenimiento es del orden de los  $1.84\text{ mA}$ . El tiempo de polarización de la lámina de prueba fue de  $650\text{ horas}$ , momento en el cual la masa anódica estaba totalmente desgastada.

### 6.1.1.10 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del duplicado 5.

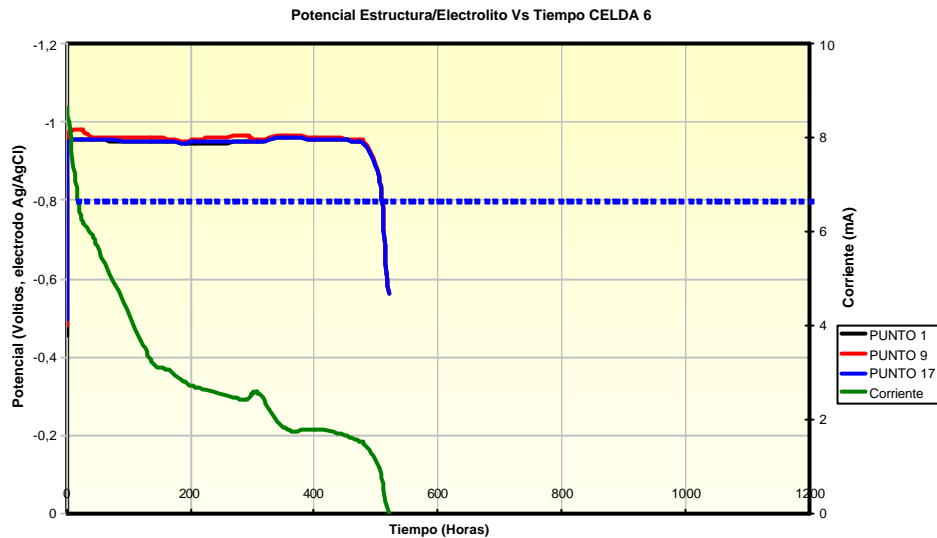
**Gráfica 11.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo del duplicado de la celda 5.



De la gráfica 11, se puede observar que los potenciales de protección con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para los puntos de medición 1, 9, 17, durante la fase de estabilización están cercanos a los  $-0.96 V$ , estos puntos de medición son los más lejanos con respecto a la ubicación del ánodo. Además, se observa el comportamiento de la corriente de protección drenada durante el tiempo efectivo de la prueba, la curva de la corriente esta representada en la gráfica con el color verde. La tendencia de esta curva es típica de los sistemas de protección catódica, y la corriente de sostenimiento es del orden de los  $1.51 mA$ . El tiempo de polarización de la lámina de prueba fue de  $740 horas$ , momento en el cual la masa anódica estaba totalmente desgastada.

### 6.1.1.11 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 6.

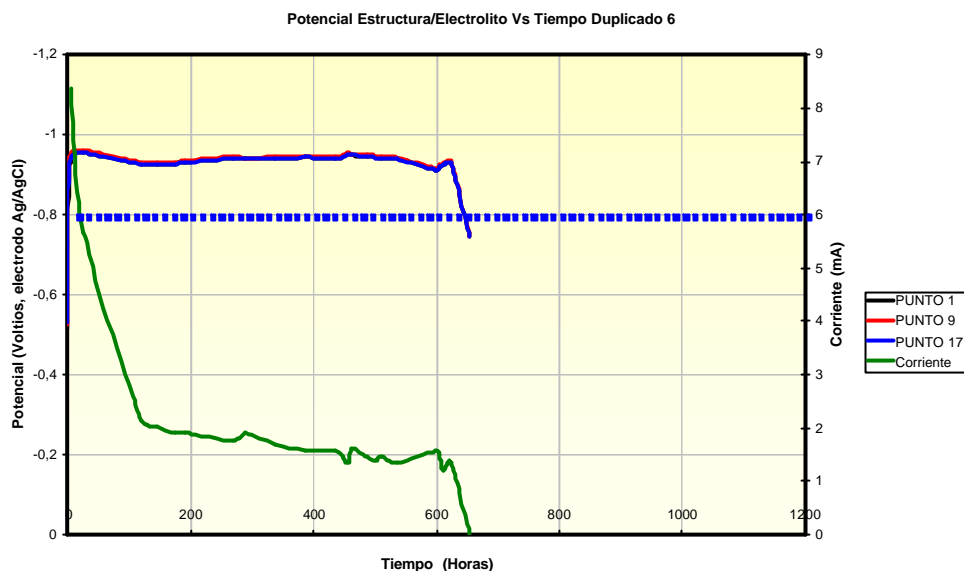
**Gráfica 12.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la celda 6.



De la gráfica 12, se puede observar que los potenciales de protección con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para los puntos de medición 1, 9, 17, durante la fase de estabilización están cercanos a los  $-0.96\text{ V}$ , estos puntos de medición son los más lejanos con respecto a la ubicación del ánodo. Además, se observa el comportamiento de la corriente de protección drenada durante el tiempo efectivo de la prueba, la curva de la corriente esta representada en la gráfica con el color verde. La tendencia de esta curva es típica de los sistemas de protección catódica, y la corriente de sostenimiento es del orden de los  $1.90\text{ mA}$ . El tiempo de polarización de la lámina de prueba fue de  $510\text{ horas}$ , momento en el cual la masa anódica estaba totalmente desgastada.

### 6.1.1.12 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del duplicado 6.

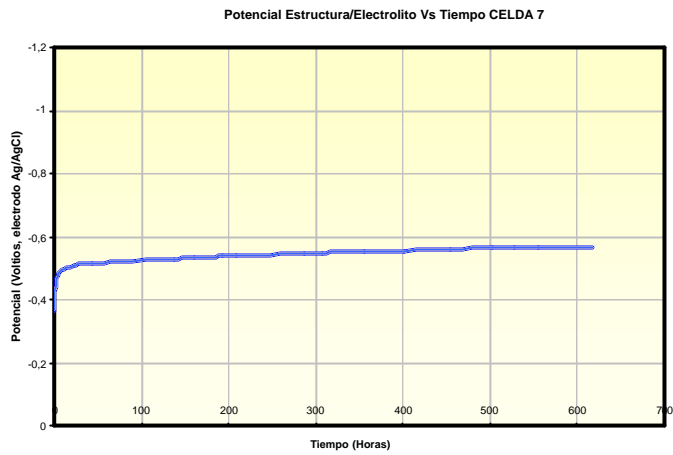
**Gráfica 13.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo del duplicado de la celda 6.



De la gráfica 13, se puede observar que los potenciales de protección con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para los puntos de medición 1, 9, 17, durante la fase de estabilización están cercanos a los  $-0.96\text{ V}$ , estos puntos de medición son los más lejanos con respecto a la ubicación del ánodo. Además, se observa el comportamiento de la corriente de protección drenada durante el tiempo efectivo de la prueba, la curva de la corriente esta representada en la gráfica con el color verde. La tendencia de esta curva es típica de los sistemas de protección catódica, y la corriente de sostenimiento es del orden de los  $1.55\text{ mA}$ . El tiempo de polarización de la lámina de prueba fue de  $650\text{ horas}$ , momento en el cual la masa anódica estaba totalmente desgastada.

#### 6.1.1.13 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 7

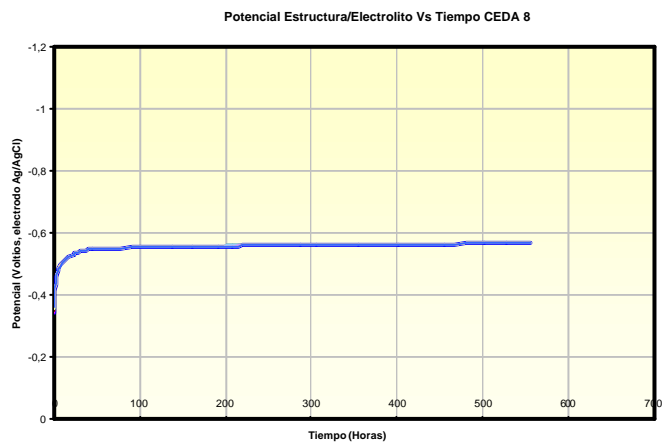
**Gráfica 14.** Potencial Estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 7.



De la gráfica 14, se puede observar que los potenciales de protección con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para los puntos de medición 1, 9, 17, durante la fase de estabilización están cercanos a los  $-0.570$  V.

**6.1.1.14 Gráfica de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del duplicado 6.**

**Gráfica 15.** Potencial Estructura / electrolito con respecto al tiempo de la celda 8.



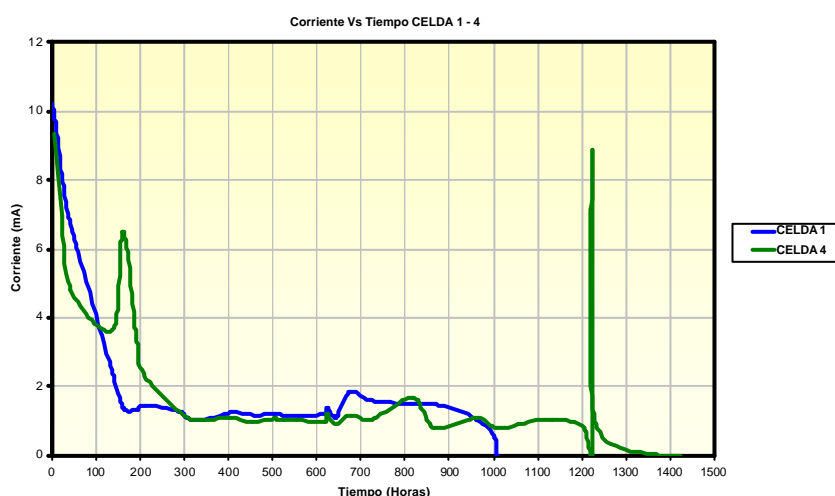
De la gráfica 15, se puede observar que los potenciales de protección con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para los puntos de medición 1, 9, 17, durante la fase de estabilización están cercanos a los  $-0.570$  V.

### 6.1.2 GRÁFICAS DE CORRIENTE DRENADA CON RESPECTO AL TIEMPO

Estas gráficas se realizaron definiendo el porcentaje de daño inducido del 5, 20 Y 40% con respecto al área total de la lámina a proteger. La medición de la corriente se realizó empleando un miliamperímetro digital instalado en serie con el ánodo de prueba.

#### 6.1.2.1 Gráfica de corriente drenada con respecto al tiempo de las celdas 1 Y 4.

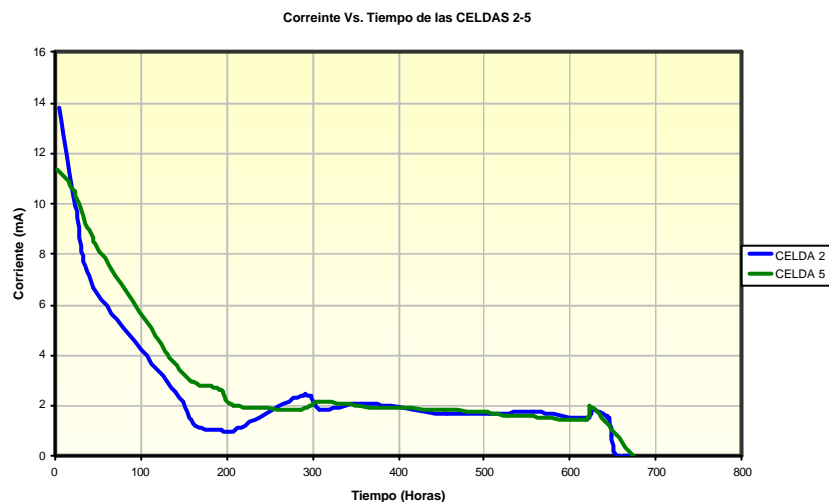
**Gráfica 16.** Corriente drenada por los ánodos de las CEDAS 1 y 4 con respecto al tiempo.



De la grafica 16, se puede observar el comportamiento de la corriente drenada durante el transcurso de la prueba para las celdas 1 y 4, se puede apreciar que el diferencial de corrientes de sostenimiento para estas celdas es de aproximadamente 0.3 mA, los duplicados de estas celdas presentan un diferencial de corriente de 0.31mA.

### 6.1.2.2 Gráfica de corriente drenada con respecto al tiempo de las celdas 2 Y 5.

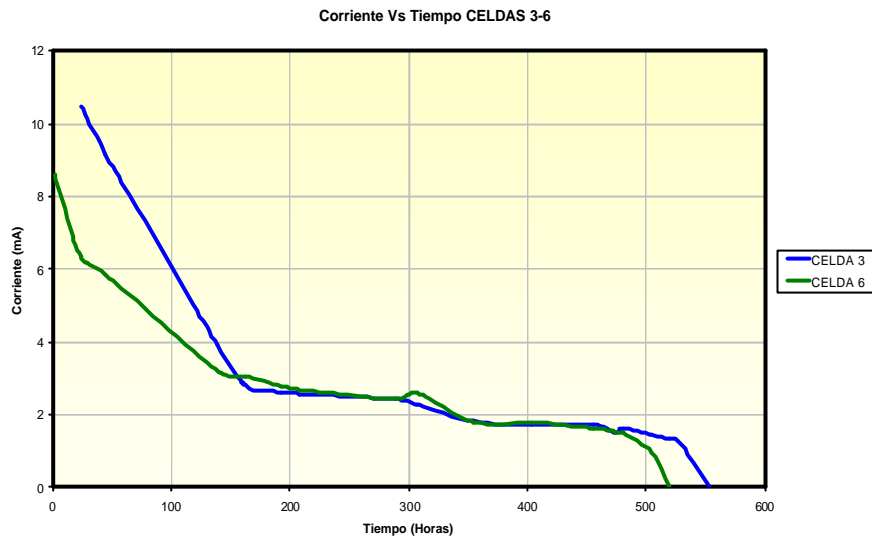
**Gráfica 17.** Corriente drenada por los ánodos de las CEDAS 2 y 5 con respecto al tiempo.



De la grafica 17, se puede observar el comportamiento de la corriente drenada durante el transcurso de la prueba para las celdas 2 y 5, se puede apreciar que el diferencial de corrientes de sostenimiento para estas celdas es de aproximadamente 0.054 mA, los duplicados de estas celdas presentan un diferencial de corriente de 0.68mA, los duplicados de estas celdas presentan un diferencial de corriente de 0.58mA.

### 6.1.2.3 Gráfica de corriente drenada con respecto al tiempo de las celdas 3 Y 6.

**Gráfica 18.** Corriente drenada por los ánodos de las CEDAS 3 y 6 con respecto al tiempo.



De la grafica 18, se puede observar el comportamiento de la corriente drenada durante el transcurso de la prueba para las celdas 3 y 6, se puede apreciar que el diferencial de corrientes de sostenimiento para estas celdas es de aproximadamente 0.081 mA.

## 6.2 RESULTADOS OBTENIDOS DEL BANCO DE PRUEBAS No 2 “CEDAS”

Los resultados de las pruebas de las CEDAS del banco de pruebas No 2 son presentados a continuación:

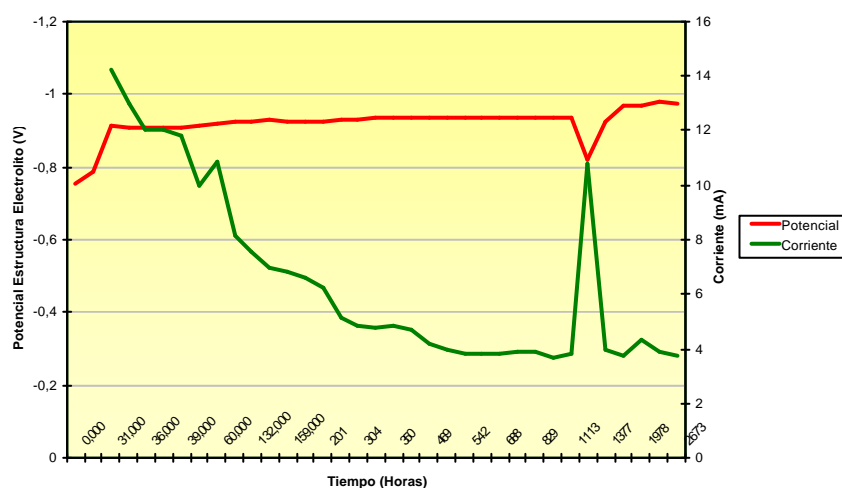
## 6.2.1 GRÁFICAS DE POTENCIAL ESTRUCTURA / ELECTROLITO CON RESPECTO AL TIEMPO

Estas gráficas se realizaron definiendo 5 puntos de medición sobre la lámina, la localización de estos puntos de medición se pueden observar en la Figura 5.

Durante el monitoreo en cada punto de medición se registró el valor del potencial estructura / electrolito.

### 6.2.1.1 Gráfica de potencial estructura/electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la CEDAS 1

**Gráfica 19.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la CEDAS 1.

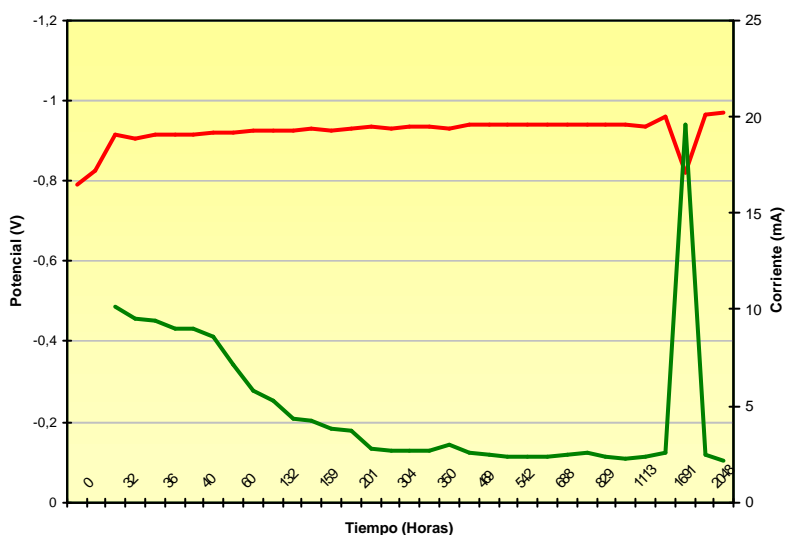


De la gráfica 19, se puede observar que el potencial de protección con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para el punto de medición 5 (rojo) durante la fase de estabilización es cercano a los  $-0,94$  V, este punto de medición es el más lejano con respecto a la ubicación del ánodo. Además, se observa el comportamiento de la corriente de protección drenada durante el tiempo

efectivo de la prueba, la curva de la corriente esta representada en la gráfica con el color verde. La tendencia de esta curva es típica de los sistemas de protección catódica, y la corriente de sostenimiento es del orden de los **3,7 mA**.

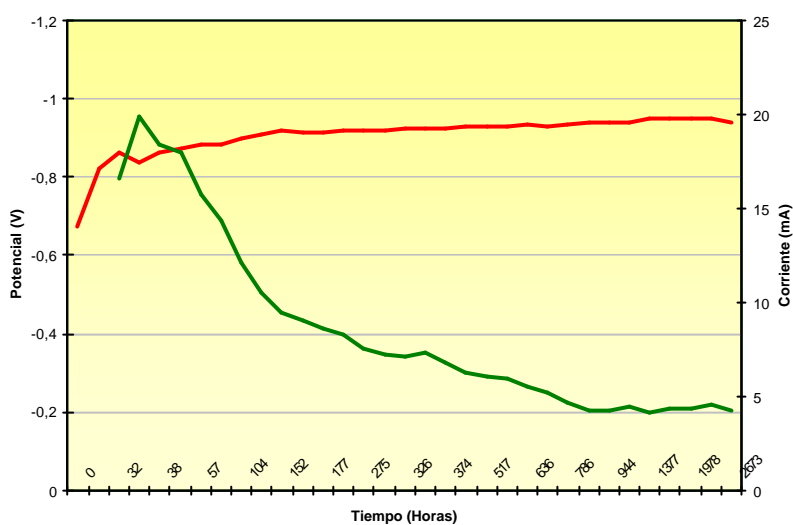
### 6.2.1.2 Gráfica de potencial estructura/electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la CEDAS 2.

**Gráfica 20.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la CEDAS 2.



### 6.2.1.3 Gráfica de potencial estructura/electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la CEDAS 3.

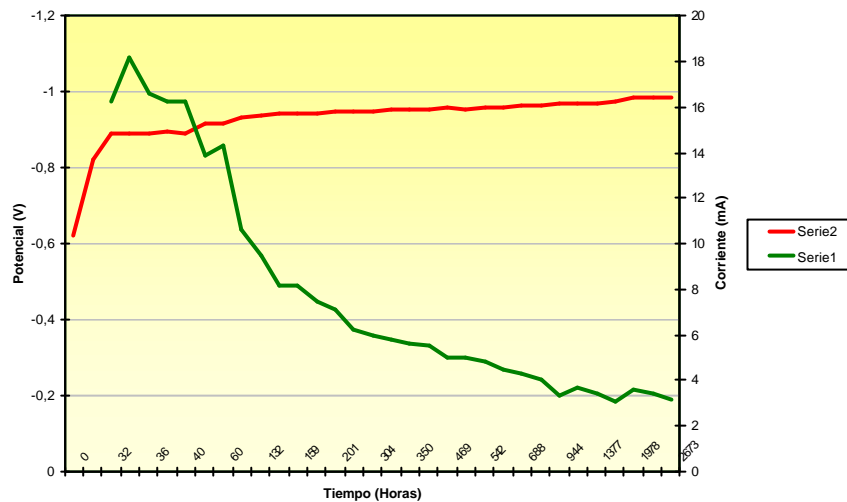
**Gráfica 21.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la CEDAS 3.



De la gráfica 21, se puede observar el nivel de protección con respecto al electrodo Ag/AgCl para el punto de medición 5 (rojo) durante la fase de estabilización es cercano a los  $-0.950$  V, este punto de medición es el más lejano con respecto a la ubicación del ánodo. Además, se observa el comportamiento de la corriente de protección drenada durante el tiempo efectivo de la prueba, la curva de la corriente esta representada en la gráfica con el color verde. La tendencia de esta curva es típica de los sistemas de protección catódica, y la corriente de sostenimiento es del orden de los **4,3 mA**.

#### 6.2.1.4 Gráfica de potencial estructura/electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la CEDAS 4.

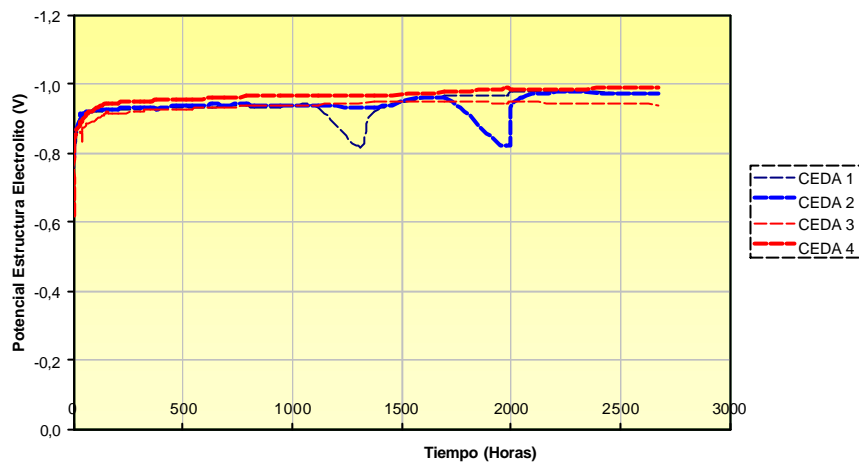
**Gráfica 22.** Potencial Estructura / electrolito y corriente drenada con respecto al tiempo de la CEDAS 4.



De la gráfica 22, se puede observar el nivel de potencial protección con respecto al electrodo Ag/AgCl para el punto de medición 5 (rojo), este punto de medición es el más lejano con respecto a la ubicación del ánodo. Además, se observa el comportamiento de la corriente de protección drenada durante el tiempo efectivo de la prueba, la curva de la corriente esta representada en la gráfica con el color verde. La tendencia de esta curva es típica de los sistemas de protección catódica, y la corriente de sostenimiento es del orden de los **3,45 mA**.

### 6.2.1.5 Gráficas de potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del punto de medición 5.

**Gráfica 23.** Potencial estructura / electrolito con respecto al tiempo del punto de medición 5.



La gráfica 23 permite visualizar claramente los niveles de protección durante el tiempo de ejecución de las pruebas, para ello, se escogió un mismo punto de medición en cada una de las CEDAS, este punto de medición es el punto No.5 y como se puede apreciar en la figura No. 3 es el punto más lejano.

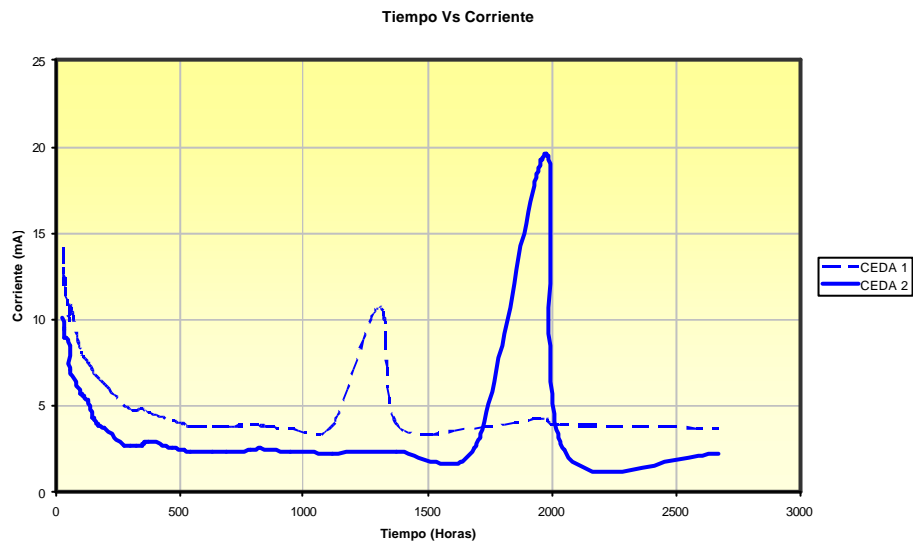
Se logra apreciar que el comportamiento de los niveles de tensión de protección es similar para todas las CEDAS, conservando una tendencia lineal muy cercana a  $-1,000$  voltios.

## 6.2.2 GRÁFICAS DE CORRIENTE DRENADA CON RESPECTO AL TIEMPO

Estas gráficas se realizaron definiendo el porcentaje de daño inducido del 10 y 20% con respecto al área total de la lámina a proteger. La medición de la corriente se realizó empleando un miliamperímetro digital instalado en serie con el ánodo de prueba.

### 6.2.2.1 Gráfica de corriente drenada con respecto al tiempo de las cedas 1 y 2.

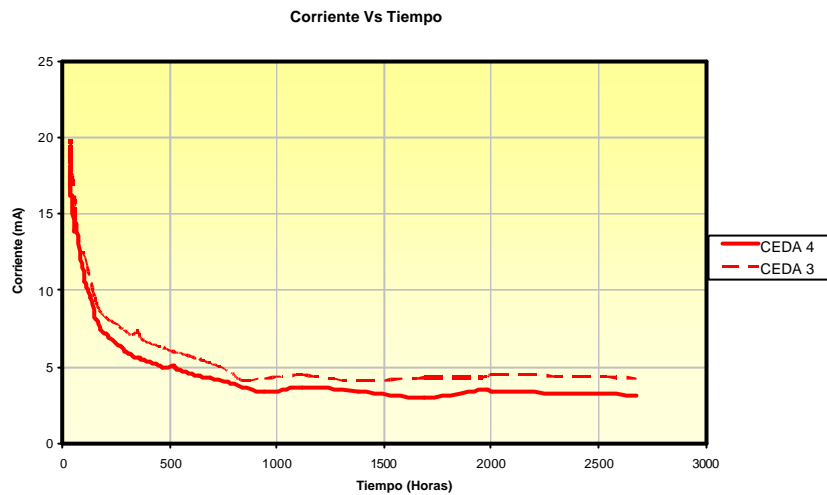
**Gráfica 24.** Corriente drenada por los ánodos de las CEDAS 1 y 2 con respecto al tiempo.



Esta gráfica permite visualizar el comportamiento de la corriente drenada durante la experimentación, teniendo un porcentaje de daño inducido del 10% del área total de la lámina de prueba, se puede apreciar que la diferencia de las corrientes de sostenimiento para estas CEDAS (1 y 2) es de aproximadamente de 1,4 mA.

### 6.2.2.2 Gráfica de corriente drenada con respecto al tiempo de las cedas 3 y 4. y 4.

**Gráfica 25.** Corriente drenada por los ánodos de las CEDAS 3 y 4 con respecto al tiempo.



Esta gráfica permite visualizar el comportamiento de la corriente drenada durante la experimentación, teniendo un porcentaje de daño inducido del 20% del área total de la lámina de prueba, se puede apreciar que la diferencia de las corrientes de sostenimiento para estas CEDAS (3 y 4) es de aproximadamente 0,85 mA.

### 6.2.3 GRÁFICAS DE DESGASTE DE LOS ÁNODOS DE ACUERDO A LA LEY DE FARADAY

Para visualizar el comportamiento del desgaste del ánodo durante el transcurso de las pruebas se utilizó como herramienta la ley de Faraday, esta ley relaciona la cantidad de corriente emitida por un elemento cuando está reaccionando químicamente con la cantidad en gramos que se están disolviendo del mismo material, la ecuación es la siguiente:

$$X = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F} \text{ (ecuación 6)}$$

Donde:

X = masa disuelta (gramos)

M = peso molecular del material (gramos)

I = corriente drenada (amperios)

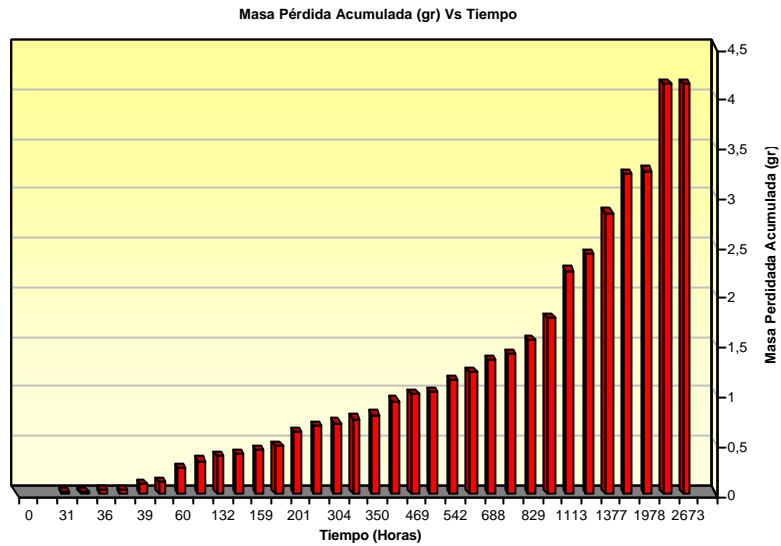
t = tiempo transcurrido (horas)

n = número de electrones transferidos

F = constante de Faraday (96500)

### 6.2.3.1 Gráfica del desgaste del ánodo de la cedas 1

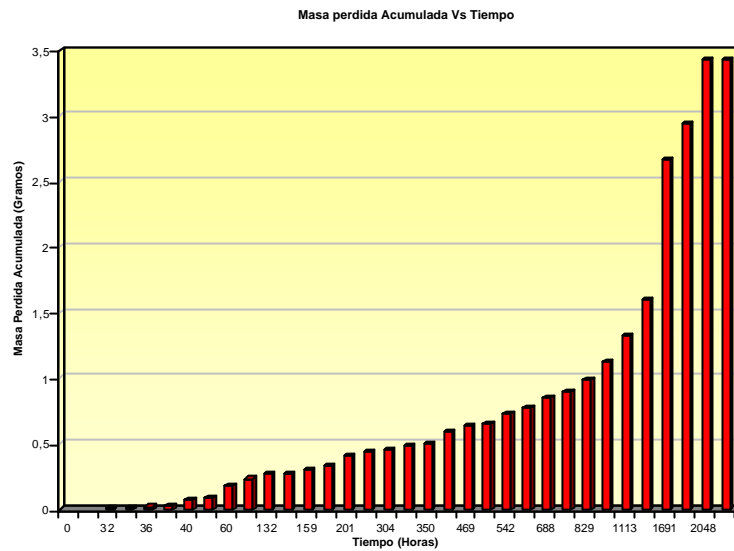
**Gráfica 26.** Masa pérdida acumulada con respecto al tiempo del ánodo de la CEDAS 1.



En la gráfica 26 se puede observar el comportamiento de la pérdida de masa del ánodo de prueba de la CEDAS 1, el peso original del ánodo fue de 100 gramos al inicio de la prueba. De acuerdo a la ley de Faraday la pérdida de masa total fue de 4,13 gramos durante la ejecución de la prueba, en un tiempo de 2673 horas.

### 6.2.3.2 Gráfica del desgaste del ánodo de la CEDAS 2

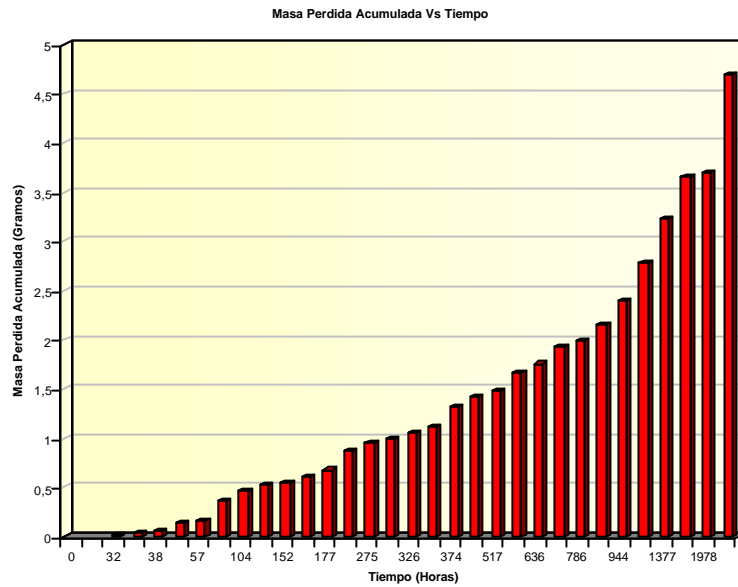
**Gráfica 27.** Masa pérdida acumulada con respecto al tiempo del ánodo de la CEDAS 2.



En la gráfica 27 se puede observar el comportamiento de la pérdida de masa del ánodo de prueba de la CEDAS 2, el peso original del ánodo fue de 100 gramos al inicio de la prueba. De acuerdo a la ley de Faraday la pérdida de masa total fue de 3,44 gramos durante la ejecución de la prueba, en un tiempo de 2673 horas.

### 6.2.3.3 Gráfica del desgaste del ánodo de la cedas 3.

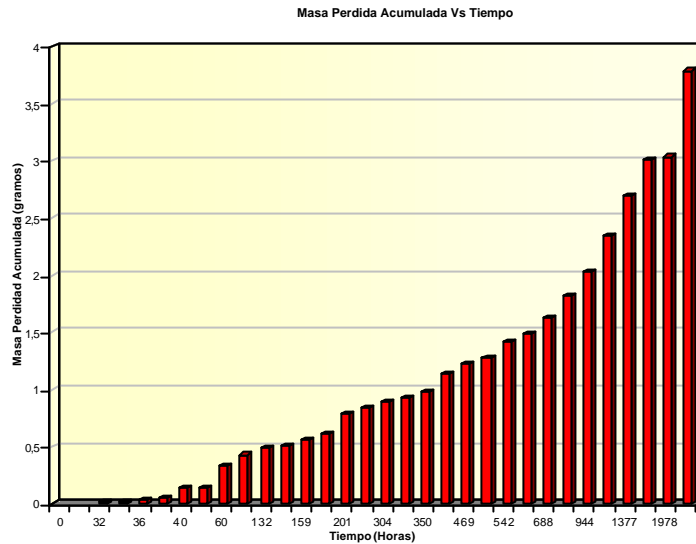
**Gráfica 28.** Masa perdida acumulada con respecto al tiempo del ánodo de la CEDAS 3.



En la gráfica 28 se puede observar el comportamiento de la pérdida de masa del ánodo de prueba de la CEDAS 3, el peso original del ánodo fue de 100 gramos al inicio de la prueba. De acuerdo a la ley de Faraday la pérdida de masa total fue de 4,69 gramos durante la ejecución de la prueba, en un tiempo de 2673 horas.

#### 6.2.3.4 Gráfica del desgaste del ánodo de la cedas 4

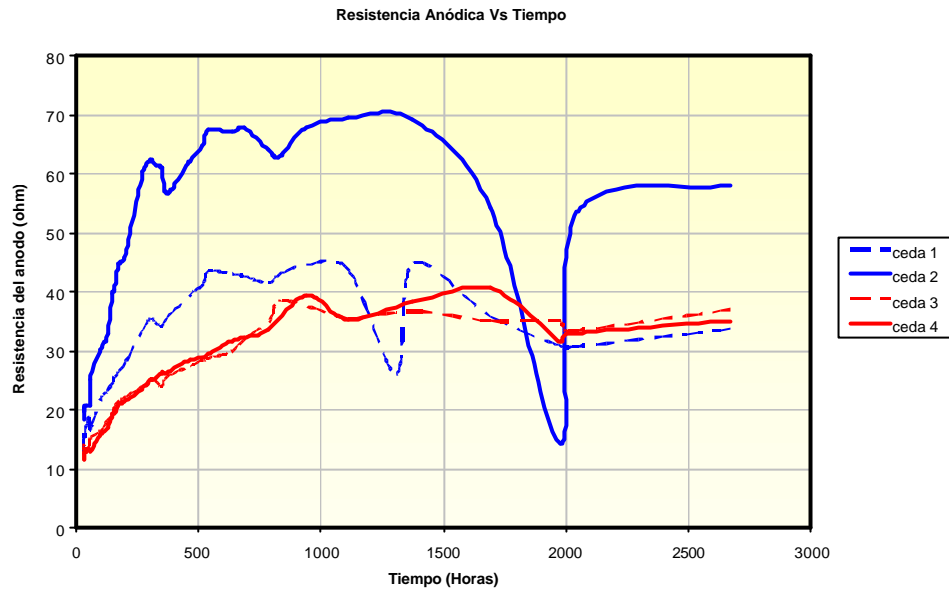
**Gráfica 29.** Masa pérdida acumulada con respecto al tiempo del ánodo de la CEDAS 4.



En la gráfica 29 se puede observar el comportamiento de la pérdida de masa del ánodo de prueba de la CEDAS 4, el peso original del ánodo fue de 100 gramos al inicio de la prueba. De acuerdo a la ley de Faraday la pérdida de masa total fue de 3,79 gramos durante la ejecución de la prueba, en un tiempo de 2673 horas.

## 6.2.4 GRÁFICA DE LA RESISTENCIA ANÓDICA DE LA CEDAS CON RESPECTO AL TIEMPO

**Gráfica 30.** Resistencia Anódica de las cuatro CEDAS con respecto al tiempo.



Esta gráfica presenta el comportamiento de la resistencia del ánodo, calculada de acuerdo a la ecuación 1. Se observa una fuerte variación en el comportamiento de la resistencia del ánodo de la prueba de la CEDAS 2, al 10% de daño inducido y espesor de película de 9,85 mils.

$$E = E_{\text{ÁNODO}} - R I \quad (\text{ecuación 7})$$

Donde:

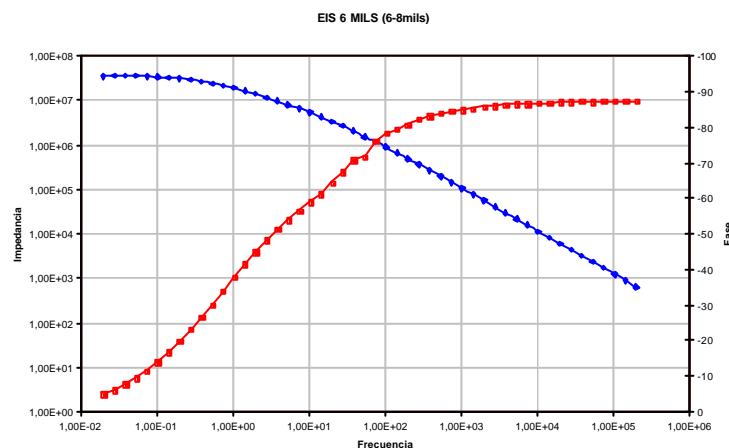
- $E$ : Potencial estructura / electrolito. (Voltios).
- $E_{\text{ÁNODO}}$ : Potencial de operación del ánodo (-1,05 V).
- $R$ : Resistencia del ánodo (?).
- $I$ : Demanda de corriente (A).

### 6.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUIMICA (EIS)

Los resultados presentados a continuación representan la magnitud de Bode (impedancia vs. frecuencia) y el ángulo de Bode (ángulo de fase vs. frecuencia) para recubrimientos de diferente espesor, tanto en su estado inicial como en su estado después de transcurrido un periodo de prueba de 1056 horas bajo la influencia de un sistema de protección catódica.

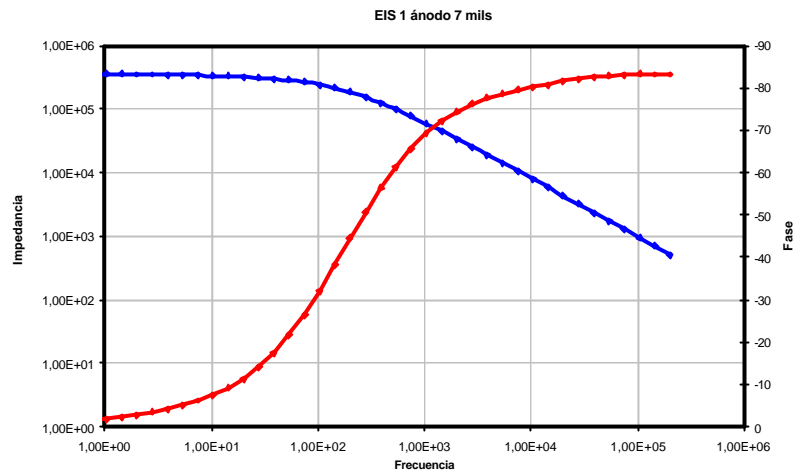
#### 6.3.1 Graficas de impedancia de un recubrimiento de 7 mils bajo la influencia de un sistema de protección catódica.

**Grafica 31.** Impedancia inicial de un recubrimiento de 7 mils.



La gráfica 31 muestra que la diferencia de fases obtenida en esta prueba es cercana a los 90 grados lo cual indica que el recubrimiento presenta un comportamiento capacitivo, además se aprecia que la resistencia de poros ( $R_p$ ) es del orden de  $1,00 \text{ E } 7$  ohmios.

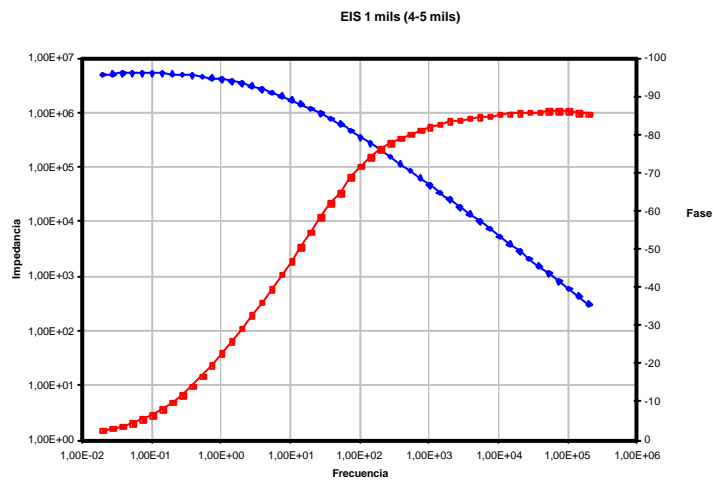
**Grafica 32.** Impedancia después de transcurridas 1056 horas de un recubrimiento de 7 mils bajo la influencia de un sistema de protección catódica.



La gráfica 32 muestra que la diferencia de fases obtenida en esta prueba es cercana a los 80 grados, y su resistencia de poros ( $R_p$ ) es del orden  $1,00 \text{ E } 5$  ohmios.

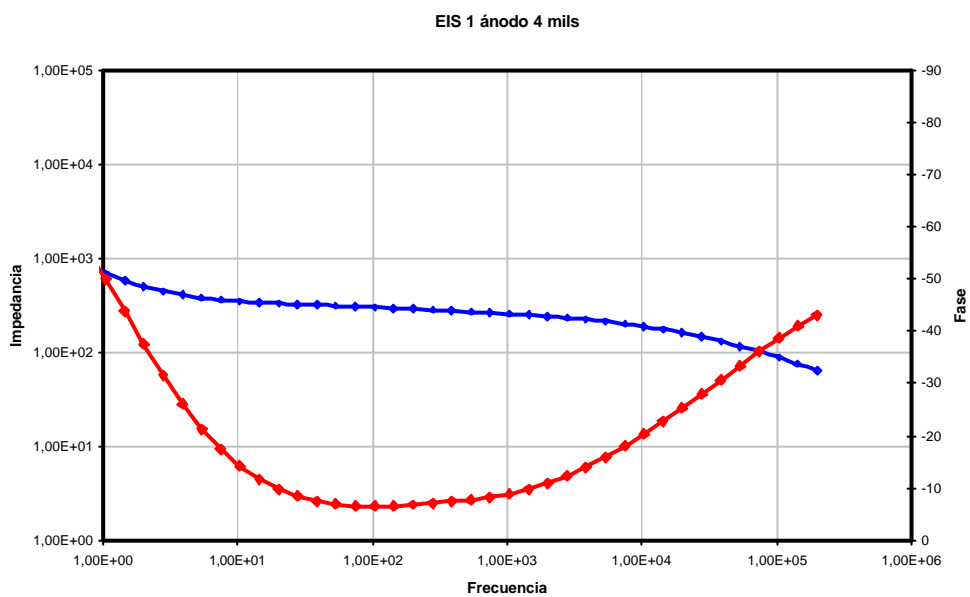
### 6.3.2 Gráficas de impedancia de un recubrimiento de 4 mils bajo la influencia de un sistema de protección catódica.

**Grafica 33.** Impedancia inicial de un recubrimiento de 4 mils.



La gráfica 33 muestra que la diferencia de fases obtenida en esta prueba es cercana a los 90 grados, lo cual indica que el recubrimiento presenta un comportamiento capacitivo, además se aprecia que la resistencia de poros ( $R_p$ ) es del orden de  $1,00 \text{ E } 6$  ohmios.

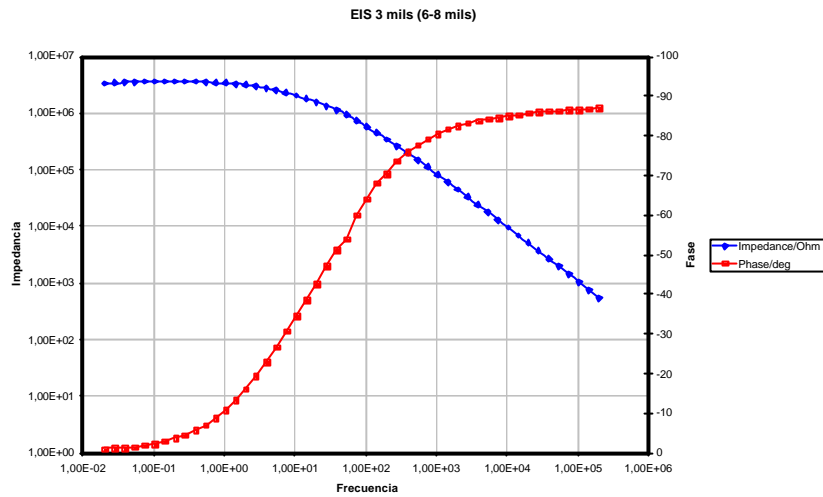
**Grafica 34.** Impedancia después de transcurridas 1056 horas de un recubrimiento de 4 mils bajo la influencia de un sistema de protección catódica.



La gráfica 34 muestra que la diferencia de fases obtenida en esta prueba es cercana a los 40 grados lo cual indica que el recubrimiento no presenta propiedades aislantes, la resistencia de poros para este recubrimiento fue del orden de  $1,00 \text{ E } 2$  ohmios.

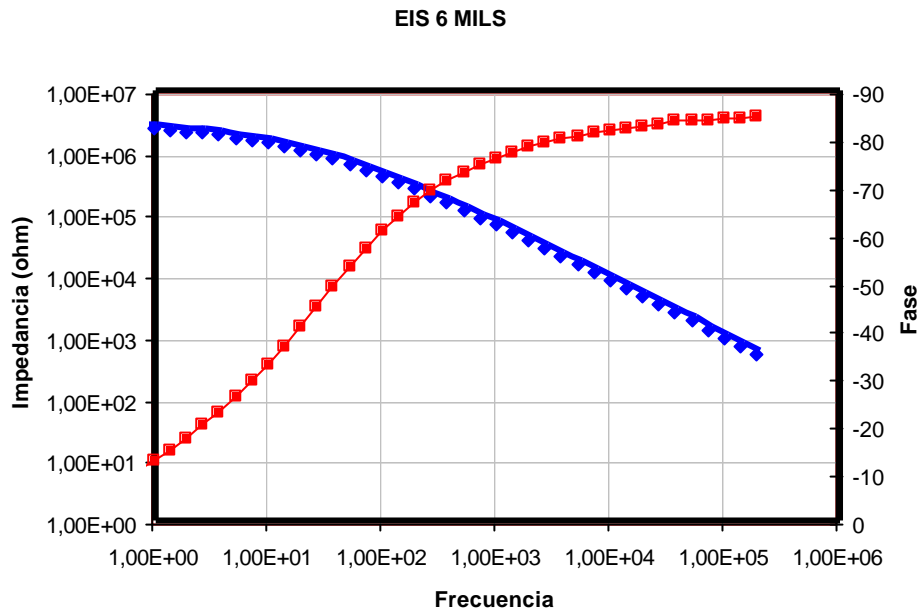
### 6.3.3 Gráficas de impedancia de un recubrimiento de 7 mils

**Grafica 35.** Impedancia inicial de un recubrimiento de 7mils.



La gráfica 35 muestra que la diferencia de fases obtenida en esta prueba es cercana a los 90 grados lo cual indica que el recubrimiento presenta un comportamiento capacitivo, además se aprecia que la resistencia de poros ( $R_p$ ) para este recubrimiento es del orden de  $1,00 \text{ E } 6$  ohmios.

**Grafica 36.** Impedancia después de transcurridas 1056 horas de un recubrimiento de 7 mils.



La gráfica 36 muestra que la diferencia de fases obtenida en esta prueba es cercana a los 90 grados lo cual indica que el recubrimiento presenta un comportamiento capacitivo, además su resistencia de poros ( $R_p$ ) es del orden de 1,00 E 6 ohmios.

## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### *Estado del arte*

La información disponible del tema referenciado en este proceso experimental, es limitada, por no decir escasa. Investigadores como V. G. DeGiorgi con la publicación "Evaluation of Perfect Paint Assumptions in Modeling of Cathodic Protection Systems" de *Engineering Analysis with Boundary Elements* 26 (2002) 435-445, intentó la simulación de sistemas de protección catódica por corriente impresa. En su trabajo, las superficies pintadas fueron definidas como las variaciones de las propiedades del material desde una relativa alta resistencia a una relativa baja resistencia. Otros autores como S. Touzain, Q. Le Thu y G. Bonnet en su trabajo "Evaluation of the organic coatings degradation in seawater using cathodic protection and thermally accelerated test", en donde intentó acelerar la degradación de recubrimientos mediante altas temperaturas y/o ciclos térmicos, para finalmente comparar la compatibilidad de los recubrimientos con la protección catódica.

En virtud de lo anterior, el objeto de esta investigación toma gran importancia debido al poco conocimiento generado y desarrollado sobre el comportamiento de los sistemas de control de corrosión dual recubrimientos orgánicos - protección catódica por ánodos de zinc en agua de mar sintética, ya que toma elementos y esquemas de protección que se emplean en la práctica, evalúa parámetros como potencial de protección, corriente drenada, desgaste de la masa anódica y resistencia del ánodo, a dos diferentes espesores del recubrimiento y cuatro porcentajes de daño inducido de la lámina de prueba.

Para revestir la lámina de prueba se utilizó un esquema simple (barrera autoimprimante) como sistema de protección, para minimizar efectos colaterales tales como, la existencia de interfase imprimante/barrera, la adhesión y la cohesión entre capas y entre productos diferentes.

Basados en las gráficas de potencial, corriente, desgaste y resistencia del ánodo, el esquema de protección del sistema dual recubrimiento - ánodos de sacrificio de zinc, presenta el comportamiento presentado a continuación.

#### *Comportamiento del Potencial estructura -electrolito*

##### ✓ *BANCO DE PRUEBAS No 2 “CEDAS”*

El potencial estructura - electrolito fue similar en cada una de las pruebas realizadas en la CEDAS, con valores muy cercanos a -1.000 voltios y la tendencia de cada una de las curvas es semejante tal y como se observa en la gráfica 23.

##### ✓ *BANCO DE PRUEBAS No 1*

El comportamiento del potencial de las celdas que presentaron un sistema dual de protección (recubrimiento – protección catódica) fue similar y cercano a los -0.97 voltios durante el desarrollo de las pruebas experimentales. Aunque la tendencia de las curvas de potencial con respecto al tiempo fue estable en la mayoría de las celdas, la celda 4 y su duplicado presentaron una inflexión en su comportamiento después de haber transcurrido 1260 y 312 horas respectivamente, la despolarización ocurrida en estas celdas fue debida a la formación de una capa de hidróxido de zinc fuertemente adherida sobre la superficie del ánodo.

Se puede apreciar en las gráficas de los sistemas duales de protección (graficas 2 a 13), que la polarización de la lámina de acero naval ASTM 131 – A se alcanza instantáneamente desde el momento en el cual se realiza la conexión eléctrica entre el ánodo y la lámina.

Los valores de los potenciales de las celdas 7 y 8 fueron similares y cercanos a los -0.57 voltios, la lámina recubierta con un mayor espesor (categoría II según DNV RP B401, celda 8) presentó problemas de corrosión en los bordes debido a que pequeñas zonas quedaron expuestas directamente al electrolito, la corrosión localizada de dicha lámina permitió la formación de óxidos de hierro

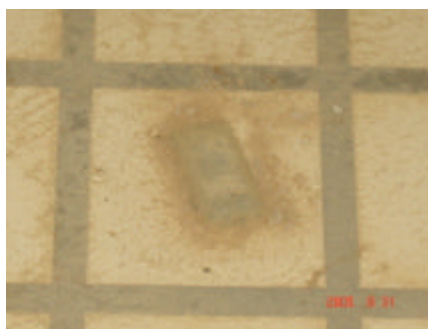
los cuales ocasionaron durante el transcurso del tiempo formar un capa pasiva, traduciéndose esto, en una tendencia casi lineal reflejada en el comportamiento de la grafica 15.

#### *Formación de hidróxido de zinc*

##### ✓ *BANCO DE PRUEBAS No 2 “CEDAS”*

Para la condición de un daño inducido del 10%, se presenta una variación brusca de la tendencia de la curva de potencial de las CEDAS 1 y 2, que obedece a la formación de una capa de hidróxido de zinc fuertemente adherida sobre la superficie anódica (ver fotografía 9), que genera una caída del nivel de protección o tendencia a la despolarización del sistema, esto se traduce en un aumento de la corriente, tal y como se observa en la gráfica 24, y un incremento de la resistencia del ánodo, como se muestra en la gráfica 14.

#### **Fotografía 9.** Capa de hidróxido de zinc adherida sobre la superficie anódica



Para la condición de un daño inducido del 20%, se observó que la capa de hidróxido de zinc no se adhiere fácilmente sobre la superficie anódica, lo cual indica que, la exigencia del sistema de protección catódica, reflejada en la corriente drenada por el ánodo, es mayor para un área desnuda del 20% y por tal razón, no se propicia una fácil adherencia del hidróxido de zinc sobre la superficie anódica, esto se aprecia en una tendencia estable de los potenciales y corrientes drenadas durante el periodo de ejecución de las pruebas

experimentales. En las gráficas 25 y 30 se puede observar este comportamiento.

✓ *BANCO DE PRUEBAS No 1*

Al igual que para las CEDAS, a un daño del 10% se presentó la formación de una capa fuertemente adherida sobre la superficie anódica, la cual ocasionó la despolarización de la lámina de prueba tanto para la celda 4 como para su respectivo duplicado, esto ratifica el hecho de que un recubrimiento que presenta mayor eficiencia puede ocasionar la ineficacia del sistema de protección catódica debido a la obstrucción de la demanda de corriente. La fotografía 10 muestra la capa de hidróxido de zinc formada en la celda 4.

**Fotografía 10.** Capa de hidróxido de zinc adherida sobre la superficie anódica de la celda 4.

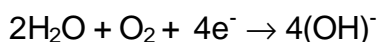


El mecanismo de formación de la capa de hidróxido de zinc se plantea mediante las siguientes reacciones:

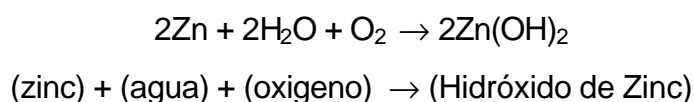


La oxidación del ánodo de zinc está representada por la reacción anterior, en donde el zinc se disuelve como iones  $\text{Zn}^{+2}$  en el electrolito y los electrones, en

este caso, son transferidos a través de un conductor eléctrico hacia el cátodo (lamina de acero naval ASTM 131). Simultáneamente debe ocurrir una reacción catódica en el proceso de corrosión en donde se utilicen los electrones generados en la reacción anódica o de oxidación, la reacción catódica o de reducción es la siguiente:



El mecanismo final de formación de la capa de hidróxido de zinc se propone mediante la suma de la reacción anódica y catódica.



#### *Espesor de recubrimiento vs. requerimiento de corriente*

##### ✓ *BANCO DE PRUEBAS No 2 "CEDAS"*

El espesor de la capa del recubrimiento respecto de la demanda de corriente de protección, bajo un mismo daño inducido, se comportan de manera inversa, tal y como puede observarse en las gráficas 24 y 25.

En las CEDAS con un 10% de daño inducido a espesores de película de 3,74 y 9,85 mils de recubrimiento, el diferencial de corriente de sostenimiento fue de 1,4 mA, mientras que para las CEDAS con un 20% de daño inducido a espesores de película de 3,75 y 10,54 mils de recubrimiento, el diferencial de corriente de sostenimiento fue de 0,85 mA. Con base en lo anterior, se puede inferir que bajo las condiciones de operación de las pruebas experimentales, a medida que aumenta el porcentaje de daño del recubrimiento, el diferencial de corriente con respecto al diferencial de espesor del recubrimiento tiende a ser menor, es decir, se esperaría que a un determinado nivel de daño inducido, el diferencial de corriente drenada con respecto al diferencial de espesor sea igual cero, lo cual se traduciría en que existe un nivel de daño en el

recubrimiento de un sistema dual para el cual, independientemente del espesor de su película el desempeño del sistema de protección sería idéntico.

La tabla 10 presenta los diferenciales de corriente drenada por el ánodo y espesor del recubrimiento.

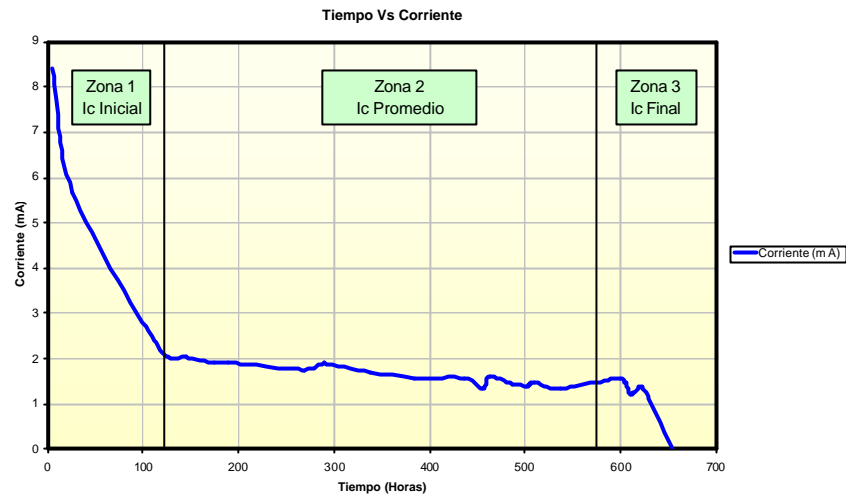
**Tabla 10.** Diferenciales de espesor y corriente drenada por el ánodo.

	<b>CEDAS 1 y 2</b>	<b>CEDAS 3 y 4</b>
<b>Daño inducido</b>	10%	20%
<b>Diferencial de Corrientes (mA)</b>	1,4	0,85
<b>Diferencial de espesores (mils)</b>	6,11	6,8

✓ *BANCO DE PRUEBAS No 1*

El comportamiento de la demanda de corriente durante el transcurso de las pruebas experimentales presentó tres zonas características, estas zonas se pueden apreciar claramente en la grafica 31.

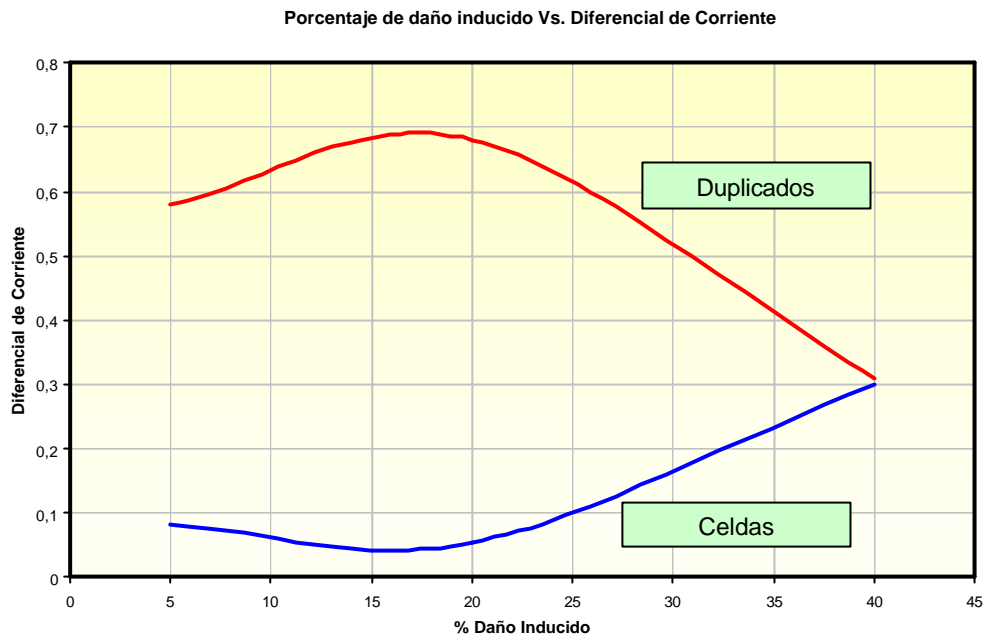
**Gráfica 37.** Zonas características del comportamiento de la demanda de corriente en un sistema de PC.



La zona 1 presenta los mayores requerimientos de corriente, de una manera decreciente hasta alcanzar la demanda de corriente de sostenimiento o promedio la cual se identifica como la zona 2 en la gráfica 37, esta zona es la más extendida durante el tiempo de ejecución de las pruebas, debido a esto, la demanda de corriente promedio ( $I_c$  promedio) es la adoptada en los diseños de protección catódica. La zona 3 presenta los requerimientos de corriente más bajos.

El comportamiento inverso que presentan los diferenciales de corriente con respecto al daño inducido del recubrimiento entre las celdas y los duplicados, es debido a las fluctuaciones de la demanda de corriente. Estas fluctuaciones se ocasionaron en gran parte, por la remoción de la capa de hidróxido de zinc de la superficie anódica, el proceso de remoción se realizó continuamente con el fin de conocer su efecto sobre el desempeño del sistema de protección catódica. Este comportamiento se presenta en la grafica 38.

**Gráfica 38.** Diferencial de corriente con respecto al daño inducido para las celdas y sus respectivos duplicados.



Con base en la gráfica anterior se pueden presentar dos situaciones:

- ✓ Una relación directa entre el porcentaje de daño inducido y el diferencial de la demanda de corriente, esto se traduciría en que el aumento del porcentaje de daño del recubrimiento traería como consecuencia un incremento en el diferencial de corriente, lo cual indicaría la importancia del espesor del recubrimiento en el desempeño de un sistema dual de protección (recubrimiento – protección catódica).
- ✓ Una relación inversa entre el porcentaje de daño inducido y el diferencial de la demanda de corriente, esto se traduciría en que el aumento del porcentaje de daño del recubrimiento traería como consecuencia la disminución del diferencial de corriente hasta llegar a cero, lo cual indicaría que el desempeño de un sistema dual sería el mismo independientemente del espesor aplicado en el recubrimiento.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las CEDAS, se puede inferir que la segunda situación toma mayor relevancia.

### *Resistencia del Ánodo*

#### ✓ *BANCO DE PRUEBAS No 2 "CEDAS"*

La gráfica 30 ilustra el comportamiento de la resistencia del ánodo para todos los casos considerados en este banco de pruebas. Puede observarse que para recubrimientos con bajo espesor de película la resistencia del ánodo es similar independientemente del daño inducido, y a su vez, es similar para el caso de un espesor de película mayor pero con daño inducido mayor; la resistencia del ánodo aumenta, cuando el espesor del recubrimiento es mayor y el daño inducido es menor, lo cual se traduce en que en la medida que el recubrimiento de un sistema dual sea mas eficiente, mayor será la resistencia del ánodo ocasionada por la formación de la capa de hidróxido de zinc.

Al comparar entre sí las CEDAS 1 y 3, y las CEDAS 2 y 4 se encontró que en la medida que el nivel de daño en el recubrimiento aumenta, la adherencia de la capa de hidróxido es menor, con lo cual, un sistema dual en donde el recubrimiento sea de alta eficiencia, presenta mayores probabilidades que la capa adherente formada en la superficie de los ánodos de zinc, disminuya la eficacia del sistema dual, en virtud a la incapacidad que tendrán los ánodos para suministrar la demanda de corriente requerida, y esta situación se mantendría, hasta que la capa de hidróxido de zinc sea retirada.

El desfase de tiempo que presentan las inflexiones de las curvas de las CEDAS 1 y 2 observadas en la gráfica 30, obedece al tiempo de remoción de la capa de hidróxido de zinc; en la CEDAS 1 se removió a las 1307 horas, mientras que en la CEDAS 2 fue a las 1978 horas. Cualitativamente, la incidencia en la resistencia del ánodo es similar independientemente del espesor de película del recubrimiento, siempre que el daño inducido sea menor (10% para este caso), mientras que para un 20% de daño inducido no se observa

cualitativamente una marcada tendencia de inflexión en la curva resistencia vs tiempo, por cuanto la capa de hidróxido es de relativa baja adherencia y se autorremueve.

#### *Vida útil del sistema PC*

##### ✓ *BANCO DE PRUEBAS No 2 "CEDAS"*

Al comparar las graficas de corriente en función del tiempo, tanto para las CEDAS 1 y 3 (graficas 19 y 21) como para las CEDAS 2 y 4 (graficas 20 y 22), se observa que un aumento en el porcentaje de daño inducido bajo un mismo espesor implica un incremento notable en la demanda de corriente de sostenimiento para alcanzar la protección de la estructura, por lo tanto, si en un diseño de un sistema de protección catódica no se emplea una adecuada eficiencia del recubrimiento (la eficiencia del recubrimiento es simulada en el experimento por medio de los daños inducidos, y varían en forma inversa), una disminución de ésta, ocasionará mayor exigencia del sistema de protección catódica y como consecuencia, los ánodos se desgastarán en un tiempo menor al proyectado en el diseño (reducción de la eficacia del sistema de protección catódica), llegando incluso a la condición de perder por completo la eficacia del sistema de protección (equivalente a no disponer de un sistema PC).

El tiempo de vida de expectativa de los sistemas de protección catódica se superó ampliamente en las cuatro CEDAS. La tabla 11 presenta un resumen de los tiempos de polarización alcanzados durante el transcurso de las pruebas experimentales.

**Tabla 11.** Comparación de los tiempos de polarización de los sistemas de protección catódica de las CEDAS.

CEDAS	Tiempo en lograr el potencial de protección (Horas)	Tiempo de permanencia del potencial de protección (Horas)	Tiempo final del potencial de protección <sup>1</sup> (Horas)	Potencial máximo de protección
1 (lámina desnuda)	351	581	932	-0.851
1	0.083	2672	2672	-0.930
2	0.083	2672	2672	-0.940
3	0.083	2672	2672	-0.949
4	0.083	2672	2672	-0.988

La primera fila (CEDAS 1), corresponde a un ensayo en el cual se ubicó un ánodo de 100 gramos en el centro de una lámina desnuda de acero naval ASTM 131-A.

Los resultados que se presentan en la tabla 11 ratifican claramente la influencia del uso de un recubrimiento en el desempeño de los sistemas duales de protección, y el criterio universal de lograr el mejor balance técnico – económico a utilizar para los casos que aplique, revestir las estructuras y aplicar protección catódica para mitigar la porción de área equivalente por no disponer de recubrimientos con eficiencia 100%. Mientras que para una lámina desnuda se alcanzó un tiempo final de protección de 932 horas, las cuatro CEDAS del segundo monitoreo alcanzaron un tiempo de 2672 horas con un desgaste alrededor del 15%, lo cual puede extrapolarse a una vida económicamente útil aproximada de 15000 horas, condición que pone de manifiesto que para un sistema dual y un sistema desnudo, la relación de tiempos de protección sería como mínimo de 15 : 1.

Al comparar la pérdida de masa total calculada según la ley de faraday con respecto a la pérdida de masa según ensayos gravimétricos, se encuentran diferencias en el valor de la masa perdida acumulada durante el desarrollo de

---

<sup>1</sup> El tiempo final del potencial de protección para las CEDAS 1,2,3,4 hace referencia al tiempo en el cual fueron suspendidas las pruebas.

las pruebas en cada una de las CEDAS. Estas diferencias son debidas en gran parte a la remoción de pequeños fragmentos del material anódico, como consecuencia de la remoción de la capa de hidróxido de zinc, y por ello se ve reflejado un error relativo al comparar las pérdidas de masa teórica con respecto a la experimental.

En la tabla 12 se referencia las pérdidas de masa calculadas teóricamente y según los ensayos de gravimetría.

**Tabla 12.** Pérdidas de masa anódica teóricas y experimentales durante el transcurso de las pruebas.

	Perdida de masa según Faraday	Perdida de masa real	Error relativo (%)
<b>ANODO 1</b>	4,13	17,53	13,40
<b>ANODO 2</b>	3,43	4,90	1,46
<b>ANODO 3</b>	4,70	24,60	19,92
<b>ANODO 4</b>	3,79	12,64	8,86

✓ *BANCO DE PRUEBAS No 2 “CEDAS”*

Los sistemas de protección catódica fueron diseñados para un tiempo de vida de aproximadamente tres semanas (409 horas), en los resultados se puede apreciar que el duplicado de la celda 3 (gráfica 7) fue la única celda que no cumplió el tiempo de vida de expectativa, llegando solo hasta 400 horas de polarización de la lamina de prueba.

Las demás celdas superaron ampliamente el tiempo de vida de expectativa del diseño. La tabla 13 muestra los tiempos de polarización alcanzados en las celdas.

**Tabla 13.** Consolidado de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales del banco de pruebas No 1.

Pruebas Experimentales					
Prueba	Tiempo de la Prueba	Tiempo de Polarización	Especificaciones		Ic Promedio (mA)
			Area Desnuda	Recubrimiento	
DUPLICADO CELDA 3	429	400	40%	Tipo I	2,144
CELDA 6	520	510	40%	Tipo II	1,8966
CELDA 3	554	535	40%	Tipo I	1,8148
DUPLICADO CELDA 2	614	575	20%	Tipo I	2,1988
CELDA 2	674	650	20%	Tipo I	1,8927
DUPLICADO CELDA 6	654	650	40%	Tipo II	1,5566
CELDA 5	673	650	20%	Tipo II	1,8379
DUPLICADO CELDA 5	794	740	20%	Tipo II	1,5114
DUPLICADO CELDA 1	942	860	10%	Tipo I	1,4606
CELDA 1	1012	1010	10%	Tipo I	1,3005
DUPLICADO CELDA 4	1051	1020	10%	Tipo II	1,1407
CELDA 4	1421	1360	10%	Tipo II	1,0497

De la tabla anterior se puede apreciar la relación inversa existente entre el área desnuda en cada lámina y el tiempo de vida del sistema de protección catódica, a mayor área desnuda menor tiempo de vida del sistema de protección.

A un menor porcentaje de área desnuda (5%) la influencia del espesor del recubrimiento es notable en el desempeño del sistema de PC debido a que para un mayor espesor bajo un mismo daño inducido, se alcanzó mayor tiempo de polarización del sistema. Para porcentajes de área desnuda del 20 y 40% la influencia del espesor tiende a ser menor, como lo es el caso de las celdas 2 y 5 las cuales presentan igual porcentaje de área desnuda con diferente espesor, el tiempo de polarización para estas láminas fue el mismo, lo cual indica la poca relevancia del espesor del recubrimiento en el desempeño del sistema dual de protección. Desde este punto de vista, de las dos situaciones consideradas anteriormente, de acuerdo a los resultados obtenidos tanto en las celdas como en sus respectivos duplicados, la segunda situación toma mayor validez y se ratifica debido a la relación inversa existente entre el diferencial de corriente y el espesor del recubrimiento.

### *Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)*

Los resultados obtenidos de EIS para los recubrimientos, mostraron que existe una influencia del sistema de protección catódica sobre la eficiencia del recubrimiento cuando su espesor es bajo. Para el recubrimiento de 4 mils de espesor se observó que las propiedades aislantes del recubrimiento son nulas después de transcurridas 1056 horas, reduciéndose la resistencia de poros del recubrimiento casi un 50%, lo cual se traduce en que en la medida que estas propiedades aislantes se pierden, la demanda del sistema de protección catódica se hace mayor, y por tanto el consumo de los ánodos va a hacer mucho más rápido de lo que se esperaba.

Para la lámina de prueba que presentó un espesor de recubrimiento de 7 mils bajo la influencia de un sistema de protección catódica, no se observó un cambio notable de sus propiedades aislantes después de transcurrido el tiempo de prueba, la resistencia de poros inicial y final no varió significativamente, lo cual indica que independientemente de que si el recubrimiento esta o no bajo la influencia de un sistema de protección catódica, éste presentará las mismas propiedades capacitivas en la medida que su espesor se hace mayor.

Para la lamina de prueba con un recubrimiento de 7 mils, la cual no presentó un sistema de protección catódica, la resistencia de poros fue la misma tanto en el inicio como en el final de la prueba.

## 8. RECOMENDACIONES

*Enfocadas a mejorar el conocimiento del comportamiento de los sistemas duales*

- ✓ Establecer con mayor grado de profundización, la incidencia de la formación de productos de corrosión sobre la superficie del material anódico, respecto de la efectividad del sistema de protección catódica. Experimentalmente se enfocaría a evaluar la incidencia de esta capa en función de los requerimientos de corriente (sistemas sobredimensionados, sistemas con mayor y menor porcentaje de daño, entre otras condiciones).
  
- ✓ Establecer bajo el mismo esquema experimental, si efectivamente la tendencia de la disminución del diferencial de corriente por diferencial de espesor de recubrimiento disminuye a cero, como función de la disminución de la eficiencia del recubrimiento.
  
- ✓ Validar el comportamiento del sistema dual, basados en un paralelo entre el sistema de recubrimiento simple (barrera autoimprimante) utilizado, y un sistema de recubrimientos de tipo comercial utilizado actualmente para las embarcaciones (doble: autoimprimante + acabado (antifouling) o triple: imprimante + barrera + acabado (antifouling)).

*Enfocadas al mantenimiento industrial naval*

- ✓ Los resultados obtenidos ratifican una vez mas, que el tratamiento superficial y la aplicación del recubrimiento, deben ser realizados bajo un riguroso control de proceso, con el fin de mantener un alto grado de

certidumbre respecto de la eficiencia del recubrimiento adoptada en el diseño, y de esta forma evitar que daños inducidos en la aplicación, incidan en la efectividad del sistema durante la operación normal de la embarcación, hasta niveles incluso en los cuales la protección catódica tenga una eficacia nula.

- ✓ El sistema de protección catódica debe ser diseñado con factores de seguridad tales que permitan, que en la eventualidad de ocurrencia de daños en el recubrimiento durante la operación normal de la embarcación, pueda asumir por sí solo la eficacia del sistema dual.

## 9. CONCLUSIONES

- ✓ Los sistemas duales de protección contra la corrosión, recubrimientos – ánodos de sacrificio, ratifican ser el sistema con mayor efectividad en el control de la corrosión, y se evidencia que en este tipo de sistemas, la influencia del recubrimiento es determinante en el desempeño del sistema dual, dada la relación inversa que existe entre su eficiencia y la demanda de corriente necesaria para alcanzar los niveles de protección requeridos.
  
- ✓ La eficacia de los sistemas duales de protección puede estar limitada, debido a la formación de una capa de hidróxido de zinc sobre la superficie del ánodo, y su incidencia aumenta, en relación directa con la eficiencia del recubrimiento.
  
- ✓ La influencia del diferencial de corriente drenada por los ánodos con respecto al diferencial de espesores de película seca del recubrimiento, ratifica la importancia de conocer la eficiencia del recubrimiento, debido a que en la medida que ésta disminuye, el diferencial de corriente tiende a ser igual a cero, lo cual indicaría que el sistema de protección tendría el mismo desempeño independientemente del espesor aplicado.
  
- ✓ En la medida que el espesor del recubrimiento aumenta, las propiedades capacitivas de éste tienden a permanecer constantes sin importar la influencia del sistema de protección catódica, lo cual indica que la eficiencia del recubrimiento no se ve afectada por un sistema de PC por ánodos de sacrificio.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] RP B 401-1993. Cathodic protection Design. DET NORSKE VERITAS INDUSTRI NORGE AS.
- [2] NAVAL FACILITIES ENGINEERING COMMAND, Corrosion control. Alexandria, Virginia. 1992.
- [3] W. Von BAECKMANN, Handbook of cathodic protection. Theory and practice of electrochemical protection processes third edition. Houston Texas 1997.
- [4] A. W PEABODY, Control of pipeline corrosion second edition. NACE, Houston Texas 2001.
- [5] MORGAN, John. Cathodic Protection NACE publication second edition. Houston, Texas, 1987.
- [6] LIZCANO, Henry, Curso de protección catódica e inspección. Séptimo congreso de corrosión y protección. Bucaramanga Colombia, 2003.
- [7] Cathodic protection Level I Training manual, 2000. NACE INTERNATIONAL.

- [8] Cathodic protection Level II Training manual, 2000. NACE INTERNATIONAL.
- [9] NORSOK STANDARD. Common Requirements Cathodic Protection. Norway: M 503:1997.
- [10] MEILLIER, A. A review of galvanic anode cathodic protection design procedure 2001. Corrosion Control Services.
- [11] LAQUE, Francis. Marine Corrosion: Causes and Prevention. John Wiley & Sons, New York. 1975
- [13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for the Preparation of Substitute Ocean Water. United States: ASTM, 1999 (D 1141).
- [14] MILITARY SPECIFICATION. Anodes, Sacrificial Zinc Alloy. United States: MIL A 18001k, 1983.
- [15] HERRERA SILVA, Francisco. Efecto del sistema de protección catódica por corriente impresa sobre los recubrimientos por pinturas marinas en agua de mar. Bucaramanga, 1988. Trabajo de grado (Magíster en ingeniería metalúrgica). Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Metalúrgica

- [16] THE SOCIETY FOR PROTECTIVE COATINGS, Joint Surface Preparation Standard, Houston: NACE No. 1 /SSPC-SP 5 White Metal Blast Cleaning 2000.
- [17] RUEDISUELI R.L. Practical Application of ECN / EIS for In-Service Coatings Assessment. Houston NACE Corrosion 2002 paper 02200.
- [18] DWIGHT G. WELDON. Failure Analysis of Paints and Coatings. John Wiley & Sons, New York. 2002.
- [19] BRITISH STANDARD. Cathodic Protection for harbour installations. United Kingdom: BS EN 13174:2001.
- [20] BRITISH STANDARD. General Principles of Cathodic Protection in Sea Water. United Kingdom: BS EN 12473:2000.
- [21] DEPARTMENT OF NAVY SEA SYSTEM COMANDER. Naval Ships Technical Manual: Chapter 633 Cathodic Protection. United States of America, 1993.
- [22] SHREIR, L. L, Corrosion Control. London, 1977. 2V.
- [23] UHILIG, H. H, Corrosion and Corrosion Control. John Wiley & Sons, United States of America, 1963.

[24] DEGIORGI V.G. Evaluation of perfect paint assumptions in modelling of cathodic protection systems. Engineering Analysis with Boundary Elements, Washintong DC, 2002.