

**EVALUACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN
CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA EN FONDOS EXTERIORES DE
TANQUES DE ALMACENAMIENTO**

LISSETTE MARCELA RODRÍGUEZ RINCÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2011

**EVALUACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN
CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA EN FONDOS EXTERIORES DE
TANQUES DE ALMACENAMIENTO**

LISSETTE MARCELA RODRÍGUEZ RINCÓN

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniera Metalúrgica**

Director:

Msc. Custodio Vásquez

Codirector:

Ing. Darío Ruedas

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2011

DEDICATORIA

*A Dios, porque me ha brindado sabiduría y entendimiento, y por darme
fortaleza en los momentos difíciles*

*A mi mamá Luz Marina Rincón, por su esfuerzo, apoyo y motivación en todo
momento, por la confianza que deposito en mi y sobre todo por su amor.*

Gracias mamita linda

*A mis hermanos Susana, Didier y Rubby, porque me brindaron su apoyo
incondicional*

*A mi lindo amor, porque siempre estuvo a mí lado brindándome su cariño,
comprensión y apoyo constante. Gracias por estar conmigo y recuerda que eres
muy importante para mí.*

Lisette Marcela

AGRADECIMIENTOS

La autora expresa sus agradecimientos a:

Ing. CUSTODIO VÁSQUEZ, Director del proyecto, por su valiosa orientación en la realización del presente trabajo.

Ing. DARÍO RUEDAS, Codirector del proyecto, por compartir sus conocimientos en protección catódica.

Al Señor AMBROSIO CARRILLO, Técnico, por su colaboración durante el montaje de las pruebas.

Al GIC, por permitirme realizar pruebas de laboratorio con sus equipos.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	18
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	19
2.1 CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA.....	19
2.2 CONCEPTO DE PROTECCIÓN CATÓDICA	20
2.3 TIPOS DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA	21
2.3.1 SISTEMAS POR ÁNODOS DE SACRIFICIO.....	21
2.3.2 SISTEMAS POR CORRIENTE IMPRESA.....	23
2.4 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA PARA TANQUES DE ALMACENAMIENTO	24
2.4.1 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA CON ÁNODOS CONVENCIONALES.....	25
2.4.2 SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA CON MALLAS MMO	26
2.5 CRITERIOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA SEGÚN LA NACE	27
3. METODOLOGÍA	29
3.1 FASE I: RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	30
3.2 FASE II: PRUEBAS DE LABORATORIO	30
3.3 FASE III: DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....	31
3.4 FASE IV: DISEÑO DE CELDAS DE EVALUACIÓN EN LABORATORIO	31
3.5 FASE IV: ADQUISICIÓN DE MATERIALES Y MONTAJES DE CELDAS DE EVALUACIÓN EN LABORATORIO	32
3.6 FASE VI: PRUEBAS EXPERIMENTALES Y MONITOREO DE LAS CELDAS	34
3.7 FASE VII: ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES E INFORME FINAL ...	35
4. PRUEBAS DE LABORATORIO	36
4.1 PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS.....	36
4.1.1 CURVAS DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL LPR.....	39

4.1.2 PENDIENTES TAFEL	40
4.2 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL ELECTROLITO	43
5. DISEÑOS DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.....	45
5.1 DISEÑO DE PROTECCIÓN CATÓDICA USANDO MALLAS TIPO MMO	45
5.1.1 PARÁMETROS GENERALES DE DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA USANDO MALLAS TIPO MMO	45
5.2 DISEÑO DE PROTECCIÓN CATÓDICA USANDO ÁNODOS VERTICALES.....	54
5.2.1 PARÁMETROS GENERALES DE DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA USANDO ÁNODOS CONVENCIONALES (VERTICALES)	54
6. RESULTADOS.....	61
7. CONCLUSIONES	68
8. RECOMENDACIONES	70
9. BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXOS.....	72

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Pruebas experimentales</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 2. Condiciones de ensayos.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 3. Valores de la resistencia de polarización y pendientes Tafel.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4. Valor de la densidad de corriente obtenida.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 5. Potenciales obtenidos en el ensayo 3.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 6. Caídas de voltajes Vs CSE.....</i>	<i>62</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Celda de corrosión.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2. Polarización de una estructura</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3. Sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 4. Sistema de protección catódica por corriente impresa</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5. Sistema de protección catódica por corriente impresa con ánodos convencionales en tanques de almacenamiento</i>	<i>25</i>
<i>Figura 6. Sistema de protección catódica por corriente impresa con mallas MMO en tanques de almacenamiento.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 7. Esquema de la metodología</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8. Diseño de la celda electroquímica de evaluación en laboratorio</i>	<i>32</i>

LISTA DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 1. Curvas de LPR para el Acero ASTM A 36, en solución de NaCl al 3%.</i>	40
<i>Gráfica 2. Pendientes Tafel obtenidas para el Acero ASTM A 36, en Solución de NaCl al 3%.....</i>	41
<i>Gráfica 3. Potenciales obtenidos en el sistema 1: ánodos verticales, ensayo 3....</i>	63
<i>Gráfica 4. Potenciales obtenidos en el sistema 2: ánodos tipo mallas MMO, ensayo 3.....</i>	63
<i>Gráfica 5. Comparación de los sistemas en los puntos 1</i>	64
<i>Gráfica 6. Comparación de los sistemas en los puntos 2</i>	65
<i>Gráfica 7. Comparación de los sistemas en los puntos 3</i>	65
<i>Gráfica 8. Comparación de los sistemas en los puntos 4</i>	66
<i>Gráfica 9. Comparación de los sistemas en los puntos 5.....</i>	66
<i>Gráfica 10. Corriente drenada por cada sistema de evaluación, ensayo 3.....</i>	67

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

<i>Fotografía 1. Celdas de evaluación en marcha.....</i>	<i>33</i>
<i>Fotografía 2. Electrodo de Trabajo para Evaluaciones Electroquímicas.....</i>	<i>37</i>
<i>Fotografía 3. Equipos y montaje empleado en la determinación de la densidad de corriente.....</i>	<i>38</i>
<i>Fotografía 4. Medidor de resistividades eléctricas Mc Miller.....</i>	<i>44</i>
<i>Fotografía 5. Medición de resistividad eléctrica</i>	<i>44</i>

LISTA DE ANEXOS

<i>Anexo A. Materiales usados en el montaje de las celdas de evaluación.....</i>	<i>72</i>
<i>Anexo B. Montaje de las celdas de evaluación.....</i>	<i>75</i>
<i>Anexo C. Distribución de la malla MMO</i>	<i>78</i>
<i>Anexo D. Resumen de los cálculos realizados para el sistema de mallas MMO...78</i>	<i>78</i>
<i>Anexo E. Distribución de los ánodos verticales</i>	<i>79</i>
<i>Anexo F. Resumen de los cálculos realizados para el sistema de ánodos convencionales (verticales).....</i>	<i>80</i>
<i>Anexo G. Datos obtenidos en el ensayo 1</i>	<i>81</i>
<i>Anexo H. Datos obtenidos en el ensayo 2</i>	<i>87</i>

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA EN FONDOS EXTERIORES DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO *

AUTORA: LISSETTE MARCELA RODRÍGUEZ RINCÓN **

PALABRAS CLAVES: protección catódica, ánodos, mallas MMO, metodología

En este trabajo de grado se formuló y se implementó una metodología de evaluación de sistemas de protección catódica para tanques de almacenamiento con ánodos perimetrales y mallas tipo MMO, a nivel de laboratorio.

El marco metodológico incluye 7 fases: la fase I consideró la revisión bibliográfica orientada a definir el estado del arte referente al tema de investigación; en la fase II se emplearon pruebas electroquímicas de resistencia de polarización lineal y pendientes Tafel, para establecer la densidad de corriente requerida para protección catódica; en la fase III se diseñaron dos (2) sistemas de protección catódica: uno con ánodos perimetrales y otro con mallas tipo MMO; en la fase IV se diseñaron las celdas de evaluación en laboratorio para cada sistema; en la fase V se llevó a cabo la adquisición de equipos y materiales para el montaje de las celdas de evaluación en laboratorio; en la fase VI se realizaron las pruebas experimentales y se hizo monitoreo de las celdas; y en la fase VII se realizó el análisis de resultados, conclusiones y se elaboró el informe final.

Uno de los resultados tangibles de esta metodología es la evaluación en condiciones similares de dos (2) sistemas de protección catódica, en los cuales se monitorearon los niveles de polarización (potenciales ON) y corriente drenada por cada sistema, durante 550 horas, con el fin de determinar su eficiencia en términos de distribución de corriente. A partir del análisis de resultados se logró establecer a nivel de laboratorio que el sistema de protección catódica por mallas MMO para tanques de almacenamiento reflejó el mejor desempeño en términos de distribución de corriente.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Msc. Custodio Vásquez, codirector: Ing. Darío Ruedas.

ABSTRACT

TITLE: LABORATORY EVALUATION OF CATHODIC PROTECTION SYSTEMS BY IMPRESSED CURRENT ON EXTERNAL FUNDS STORAGE TANKS *

AUTHOR: LISSETTE MARCELA RODRÍGUEZ RINCÓN**

KEY WORDS: Cathodic protection, anodes, grid MMO, methodology.

In this graduation project was formulated and implemented a methodology for evaluating cathodic protection systems for storage tanks by perimeter anodes and grid type MMO, at laboratory level.

The methodological frame includes 7 phases: the phase I considered the bibliographical review to be orientated to define the condition of the art relating to the topic of investigation; in the phase II tests were used electrochemical linear polarization resistance and Tafel slopes to establish the current density required for cathodic protection; in the phase III were designed two (2) a cathodic protection systems: one with perimeter anodes and other with grid type MMO; In the phase IV were designed the cells of evaluation in laboratory for each system; in the phase V there was carried out the acquisition of equipments and materials for the assembly of the cells of evaluation in laboratory; in the phase VI were tested was experimental and monitoring of the cells; and in the phase VII was performed the analysis of results, conclusions and final report was prepared.

One of the tangible results of this methodology is the evaluation in similar conditions of two (2) systems of cathodic protection, in which there were monitored the levels of polarization (potentials ON) and current drained by each system for 550 hours, with the to determine their efficiency in terms of current distribution. From the analysis of results achieved at the laboratory established that the cathodic protection system for grid MMO for storage tank showed the best performance in terms of current distribution.

* Graduation Project

** Physico - Chemical Engineering Faculty. Metallurgical Engineering and Material Science School. Director: Msc. Custodio Vásquez, codirector: Ing. Darío Ruedas.

INTRODUCCIÓN

Los fondos exteriores de los tanques de almacenamiento generalmente cuentan con sistemas de protección catódica como mecanismo de mitigación de la corrosión externa. En los tanques de almacenamiento de hidrocarburos de Colombia se han encontrado sistemas de protección catódica que han operado de acuerdo a lo establecido en las memorias de cálculo del diseño del sistema de protección catódica. Sin embargo, durante las inspecciones mecánicas mediante ultrasonido y pérdida de flujo magnético “MFL” (Magnetic Flux Leakage) se han encontrado procesos de corrosión externa activos y pérdidas de metal considerables. La mayoría de las fallas encontradas se encuentran ubicadas en cercanías al anillo perimetral del tanque (entre 0,5 a 5 metros desde la pestaña del tanque) y en la parte central del tanque.

Las fallas encontradas en cercanías al anillo perimetral del tanque han sido atribuidas a fenómenos de corrosión externa localizada por el ingreso de agua a través de la rendija existente entre la lámina del fondo exterior del tanque y el anillo perimetral de concreto del tanque.

Las fallas ubicadas en la parte central del tanque son atribuidas a deficiencias de los sistemas de protección catódica. Una de las principales hipótesis que se ha planteado es la atenuación de la corriente de protección catódica que puede presentarse en las laminas del tanque al aplicar la corriente desde la parte exterior del anillo perimetral del tanque.

En la última década se han desarrollado sistemas de protección catódica no convencionales, los cuales tienen como principal objetivo mejorar la distribución de la corriente en el fondo exterior de los tanques de almacenamiento. Los sistemas más recientes se conocen comercialmente como mallas MMO (Mixed Metal Oxide). La distribución de las mallas de forma homogénea debajo del tanque favorece una óptima distribución de corriente y, por consiguiente, niveles de

polarización aceptables a la luz de los criterios de protección establecidos en las normas NACE RP 0193, "External Cathodic Protection of on-grade carbon steel storage tanks bottoms" y API RP 651 "Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks". A pesar de que teóricamente los sistemas de protección catódica por corriente impresa con mallas MMO favorecen una óptima distribución de corriente, recientemente se han encontrado pérdidas de metal por corrosión externa en el fondo de tanques que disponen de sistemas con mallas MMO. La hipótesis más probable que se ha planteado para la ocurrencia de dicho fenómeno de corrosión son las diferencias en el grado de corrosividad en el suelo. A pesar de que los tanques de almacenamiento que disponen de sistemas de protección catódica con ánodos convencionales perimetrales tienen probabilidades similares de presentar corrosión localizada como consecuencia de variaciones en la corrosividad del suelo, la hipótesis más recurrente es la ineficacia del sistema de protección catódica como consecuencia de la atenuación del nivel de protección desde el anillo perimetral hacia el centro del tanque. La anterior hipótesis no ha sido validada debido a la dificultad de instalar electrodos de referencia permanentes debajo del fondo de un tanque cuando se encuentra en operación.

Teniendo en cuenta el escenario planteado anteriormente, dentro del alcance del presente proyecto se propone evaluar a nivel de laboratorio la posible influencia de la distribución de la corriente de los sistemas de protección catódica convencionales con ánodos perimetrales, y comparar simultáneamente el desempeño con respecto a sistemas de protección catódica con mallas MMO.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar a nivel de laboratorio sistemas de protección catódica por corriente impresa con ánodos convencionales y mallas MMO, para fondos exteriores de tanques de almacenamiento.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.2.1 Determinar en laboratorio mediante pruebas electroquímicas pendientes Tafel, curvas de resistencia a la polarización R_p y la densidad de corriente de corrosión para establecer la densidad de corriente requerida para protección catódica en el diseño de sistemas de protección catódica (PC).

1.2.2 Diseñar a nivel de laboratorio un sistema de protección catódica por corriente impresa con ánodos convencionales instalados alrededor de la lámina a evaluar y un sistema por corriente impresa con mallas tipo MMO.

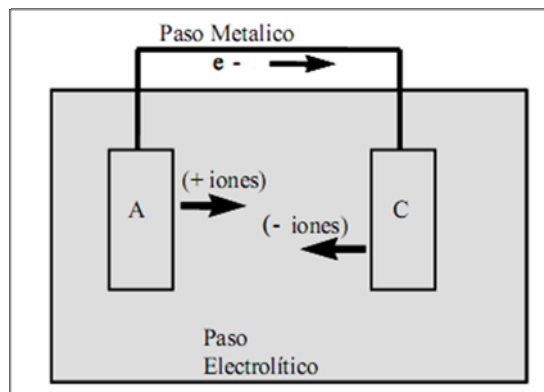
1.2.3 Poner en marcha un sistema de protección catódica por corriente impresa con ánodos convencionales y mallas MMO, para monitorear los niveles de polarización (potenciales ON) y corriente drenada por cada sistema durante 560 horas con el fin de determinar su eficiencia en términos de distribución de corriente.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA

La corrosión externa es una de las principales amenazas que inciden negativamente en la integridad de tanques de almacenamiento de hidrocarburos. El fenómeno de corrosión que ocurre en las láminas de los fondos de tanques corresponde a un fenómeno de corrosión electroquímico. La corrosión tiene lugar dentro de una celda de corrosión, la cual consta de cuatro (4) elementos: Ánodo, cátodo, electrolito, camino metálico (celda de corrosión) (Ver figura 1).

Figura 1. Celda de corrosión



Fuente: CP 2–Cathodic Protection Technician Course Manual NACE International

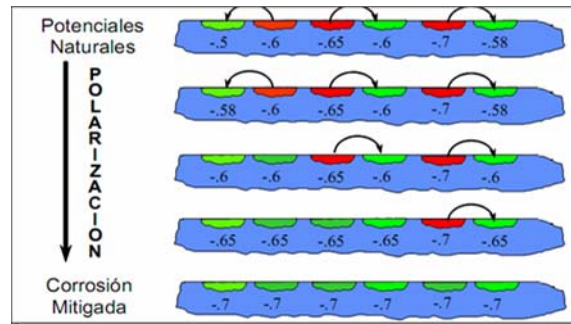
El cátodo en los tanques de almacenamiento corresponden a laminas de acero (de 2x5 metros aproximadamente) soldadas entre sí mediante soldadura por arco eléctrico convencional (SMAW). Dichas láminas estarán en contacto directo con el suelo y por consiguiente estarán a expuestas a fenómenos de corrosión con el transcurso del tiempo. El grado de corrosión dependerá del nivel de corrosividad del suelo. Como mecanismo de mitigación se emplean recubrimientos y protección catódica. Los sistemas de recubrimiento son considerados de baja eficiencia debido a que durante el montaje de las láminas sufren deterioros, de igual forma el calor generado durante el proceso de soldadura afectan drásticamente la calidad del recubrimiento; en virtud de lo anterior, los recubrimientos para este tipo de aplicaciones no son considerados un mecanismo de mitigación eficiente, por tal razón se hace necesario la instalación de sistemas de protección catódica.

2.2 CONCEPTO DE PROTECCIÓN CATÓDICA

La protección catódica es un mecanismo de mitigación de la corrosión electroquímica, que está fundamentado en la aplicación de una corriente eléctrica mediante un electrodo externo (ánodos de sacrificio o ánodos de corriente impresa), con el objeto de polarizar las zonas catódicas existentes en la estructura de interés en dirección electronegativa.

La polarización se lleva a cabo en etapas: son los sitios más positivos o catódicos los que primero se polarizan. A medida que el potencial de los sitios más catódicos iguala el potencial de los otros sitios, la polarización comienza en otros sitios (Ver la figura 2).

Figura 2. Polarización de una estructura



Fuente: CP 2–Cathodic Protection Technician Course Manual NACE International

2.3 TIPOS DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

2.3.1 Sistemas por ánodos de sacrificio

La protección catódica galvánica funciona según el principio de que un metal más activo conectado a un material menos activo formará una celda de corrosión galvánica. Esto se aprovecha, para proteger el metal menos activo. La aleación más activa se corroerá (se “sacrificará”) para proteger el otro metal; por lo tanto, estos ánodos se llaman *ánodos de sacrificio*.

Entre las aplicaciones más importantes de los sistemas de ánodos de sacrificio se encuentran las siguientes:¹

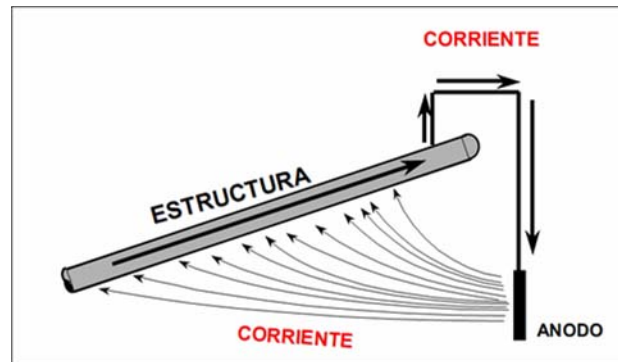
- Cuando se requiere una corriente relativamente baja.
- Generalmente en electrolitos de baja resistividad.
- Para proveer corriente de protección catódica en forma localizada sobre una zona específica de una estructura. Muchas veces se instalan ánodos galvánicos en aquellas zonas donde ha sido detectada y posteriormente reparada una falla, más que instalar sobre la totalidad de la estructura.

¹ *CP 2–Cathodic Protection Technician Course Manual NACE International*

- Cuando es necesario agregar corriente de protección en algún área problemática. Algunas estructuras con sistemas integrales de corriente impresa pueden presentar algunos puntos aislados donde es necesario proveer corriente adicional.
- Válvulas enterradas con recubrimiento deficiente.
- Interior de tanques de almacenamiento de agua.
- Tanques de almacenamiento enterrados.
- Tramos aislados donde el recubrimiento ha sido considerablemente dañado.
- Áreas donde un apantallamiento eléctrico impide una buena distribución de corriente provista por sistemas de corriente impresa instalados en forma remota de la estructura.
- Proveer corriente de protección a estructuras que están muy cerca de otras estructuras metálicas, y en donde puede ser difícil instalar corriente impresa sin el peligro de crear corriente de interferencia.
- En estructuras off-shore (costa afuera) donde, en general, se utilizan grandes ánodos galvánicos para proteger los componentes sumergidos.

En un sistema de protección catódica con ánodos galvánicos hay cuatro componentes básicos: (1) el ánodo, (2) el relleno anódico (backfill), (3) una forma de conexión entre el ánodo y la estructura, y (4) la estructura (Ver figura 3).

Figura 3. Sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio.



Fuente: CP 2–Cathodic Protection Technician Course Manual NACE International

2.3.2 Sistemas por corriente impresa

Los sistemas por corriente impresa usan ánodos semi-inertes (semisolubles) para suministrar corriente de protección. Al ser relativamente inertes, estos ánodos tienen potenciales electroquímicos relativamente nobles. Para producir un flujo de cargas en dirección a la estructura de acero, es necesario conectar una fuente de energía externa en serie entre el ánodo semi-inerte y la estructura de acero. Antes de poder suministrar los primeros incrementos de corriente de protección a la estructura, esta fuente deberá superar la diferencia de potencial galvánica entre el ánodo más noble y la estructura de acero.

Los sistemas por corriente impresa se usan comúnmente:²

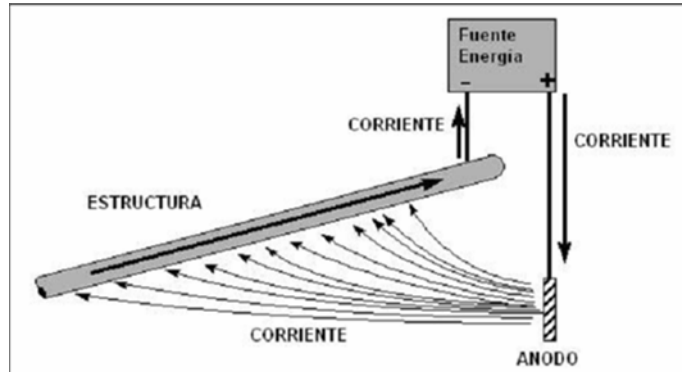
- Para requerimientos de corriente grandes, especialmente en estructuras desnudas ó mal recubiertas.
- En electrolitos de cualquier resistividad.
- Como una forma económica de proteger estructuras en las que los ánodos galvánicos se han consumido.

² *CP 2–Cathodic Protection Technician Course Manual NACE International*

- Para corregir problemas de corrientes vagabundas o interferencia catódica.
- Para proteger grandes cajas de agua en condensadores, calentadores de petróleo, y otros recipientes.
- Para el interior de tanques de almacenamiento de agua.
- Para el exterior de fondos de tanques de almacenamiento a nivel.
- Para tanques de almacenamiento enterrados.
- Para componentes sumergidos en estructuras marítimas (off-shore).

Los componentes de un sistema de protección catódica por corriente impresa son ánodos, relleno anódico, una fuente de energía (rectificador), cableado y conexiones (Ver figura 4).

Figura 4. Sistema de protección catódica por corriente impresa



Fuente: CP 2—Cathodic Protection Technician Course Manual NACE

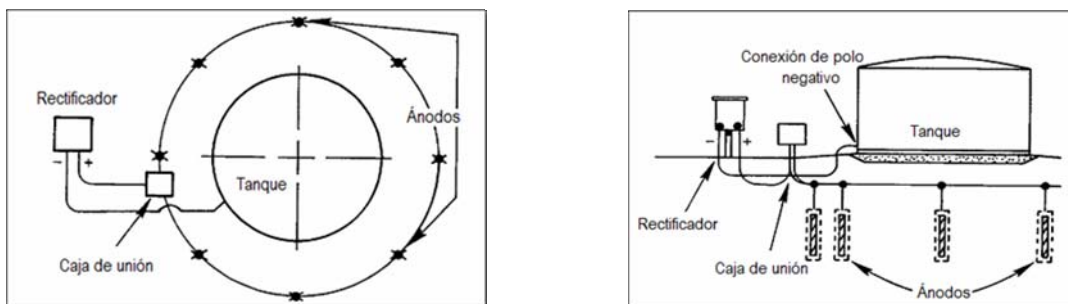
2.4 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA PARA TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Para proteger catódicamente los fondos exteriores de tanques de almacenamiento de hidrocarburos se emplean sistemas por ánodos de sacrificio y sistemas por corriente impresa. Los sistemas por ánodos de sacrificio están limitados a tanques de baja capacidad (diámetros pequeños) debido al bajo drenaje de corriente de dichos sistemas. Los sistemas por corriente impresa son los de mayor aplicación en el sector de los hidrocarburos. En el presente proyecto se evaluarán a nivel de laboratorio sistemas de protección catódica por corriente impresa empleando sistemas convencionales con ánodos instalados perimetralmente y sistemas con mallas tipo MMO, los cuales se especifican a continuación.

2.4.1 Sistemas de protección catódica por corriente impresa con ánodos convencionales

Estos sistemas emplean ánodos convencionales consumibles (tipo grafito, ferro-silicio, entre otros) o ánodos tubulares inertes o dimensionalmente estables (tipo MMO), los cuales son instalados alrededor del tanque a distancias comprendidas entre 3 y 20 metros y a profundidades que pueden variar entre 2 y 5 metros (Ver figura 5).

Figura 5. Sistema de protección catódica por corriente impresa con ánodos convencionales en tanques de almacenamiento



Vista superior

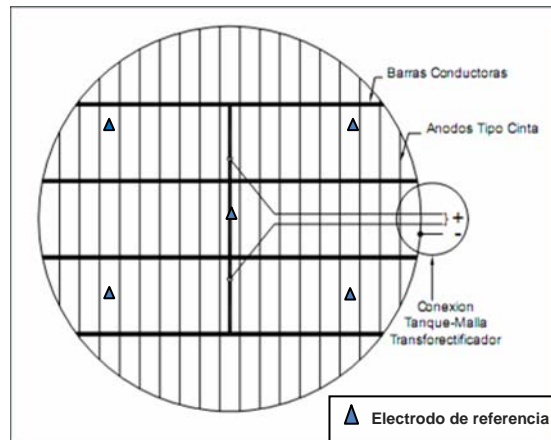
Vista lateral

Fuente: API RP 651 "Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks"

2.4.2 Sistema de protección catódica por corriente impresa con mallas MMO

Este sistema dispone de un reticulado de cintas anódicas MMO conectadas eléctricamente entre sí mediante barras conductoras de titanio. Las mallas son instaladas debajo del tanque a profundidades del orden de 50 a 100 cm. Las mallas son soldadas mediante soldaduras por puntos a las barras conductoras o barras de distribución de corriente. Una vez soldadas las mallas y las barras conductoras se llevan a cabo conexiones eléctricas (entre 1 y 5 conexiones) debajo del tanque con cables de cobre calibre tipo AWG # 8 tipo HMWPE, las conexiones anteriores son denominadas power feeds, y son llevadas hasta una caja de conexiones para finalmente enviar una sola conexión al circuito positivo del rectificador. Adicionalmente se recomienda instalar electrodos de referencia permanente Cu/CuSO_4 debajo del fondo del tanque al momento de instalar las mallas MMO, entre 1 a 5 electrodos de referencia Cu/CuSO_4 (Ver figura 6).

Figura 6. *Sistema de protección catódica por corriente impresa con mallas MMO en tanques de almacenamiento*



Fuente: CP 4–Cathodic Protection Specialist Course Manual NACE International

- Las mallas MMO tienen las siguientes especificaciones:

Cinta de titanio comercial, con un recubrimiento de óxidos de metal, bajo especificación ASTM B-265 – Titanium, Grado 1 de dimensiones 0,25” (6,35 mm) ancho x 0,025” (0,635 mm) espesor.

Las dimensiones de la barra conductora son: 0,5” (12,7 mm) ancho x 0,035” (0,9 mm) de espesor.

2.5 CRITERIOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA SEGÚN LA NACE³

- **Un potencial negativo (catódico) de mínimo 850 milivoltios** con la corriente de protección catódica aplicada: este potencial se mide contra un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre saturado en contacto con el electrolito. Las caídas de voltaje distintas de las que ocurren a través de la interfase estructura-electrodo, deben considerarse para hacer una interpretación válida de esta medición.

$$E_{-850} = E_{on} - IR$$

³ NACE Standard Recommended Practice RP0193, “External Cathodic Protection of on-grade carbon steel storage tanks bottoms”, revised 2001 (Houston, TX:NACE)

Donde:

E_{on} : Corresponde al potencial "ON" (mV)

IR : Es la caída óhmica generada por la resistencia del electrolito y el flujo de corriente (mV)

- **Un potencial polarizado negativo de al menos 850 milivoltios** con respecto a un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre saturado (potencial denominado como Instant Off)
- **Un mínimo de 100 milivoltios de polarización catódica** entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable en contacto con el electrolito. A fin de satisfacer este criterio, puede medirse la formación o la pérdida de la polarización.

$$\Delta E_{100} = E_{OFF} - E_{DESPOLARIZADO} \quad \text{ó}$$

$$\Delta E_{100} = E_{OFF} - E_{CORR}$$

Donde:

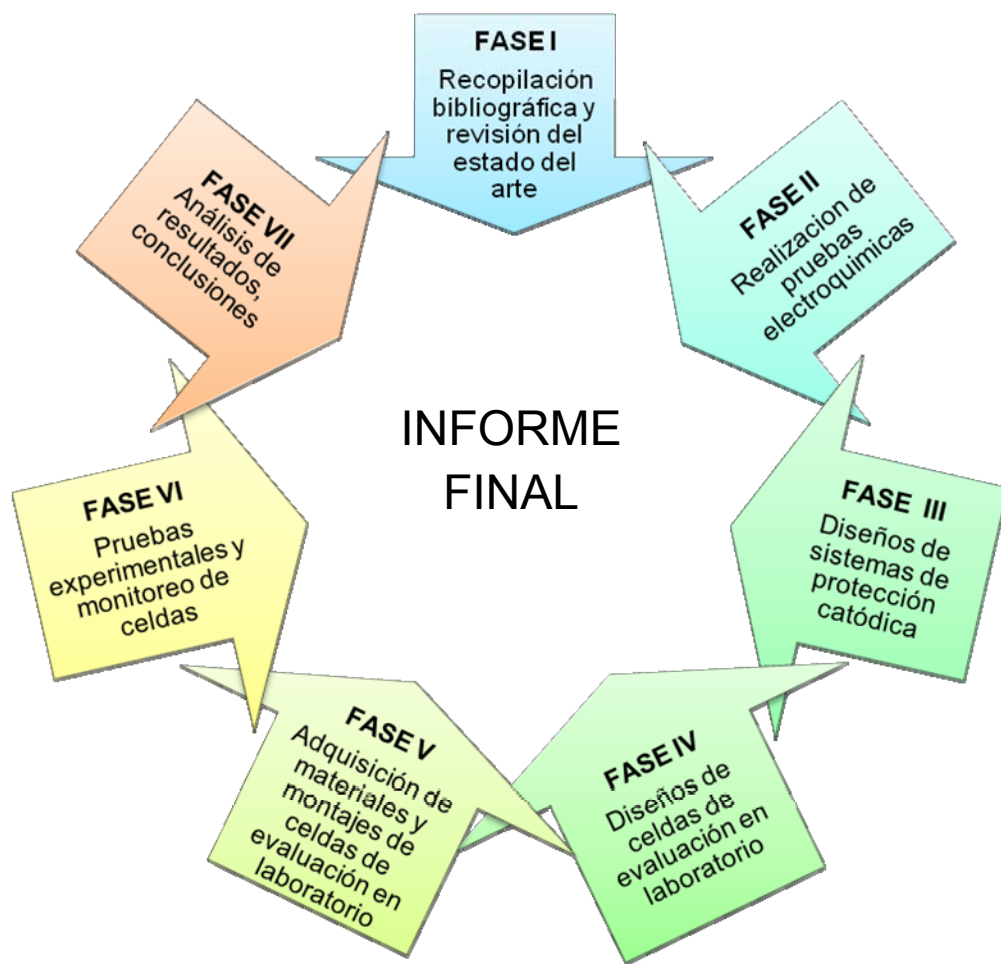
E_{OFF} : Corresponde al potencial "Instant Off"(mV)

E_{CORR} : Corresponde al potencial de corrosión o potencial natural de la estructura (m V)

3. METODOLOGÍA

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos se ejecutaron las fases descritas en la metodología que se presentan a continuación: (Ver figura 7).

Figura 7. Esquema de la metodología



Fuente: El autor

3.1 FASE I: RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica orientada a definir el estado del arte referente al tema de investigación. Basados en normatividad NACE, API y ASTM aplicables a sistemas de protección catódica.

3.2 FASE II: PRUEBAS DE LABORATORIO

Para elaborar los diseños de protección catódica fue necesario emplear las técnicas electroquímicas de Resistencia de Polarización lineal (LRP) y Pendientes

Tafel, con el fin de determinar la densidad de corriente de corrosión y posteriormente fijar la densidad de corriente de protección catódica; además se realizó la prueba de resistividad del electrolito que también es indispensable para los diseños de protección catódica (Ver capítulo 4).

3.3 FASE III: DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Las celdas de evaluación en laboratorio de los sistemas de protección catódica fueron diseñadas de acuerdo a los cálculos definidos en la normatividad NACE (National American Corrosion Engineers) y literatura relacionada con diseños de sistemas de protección catódica (Ver capítulo 5).

3.4 FASE IV: DISEÑO DE CELDAS DE EVALUACIÓN EN LABORATORIO

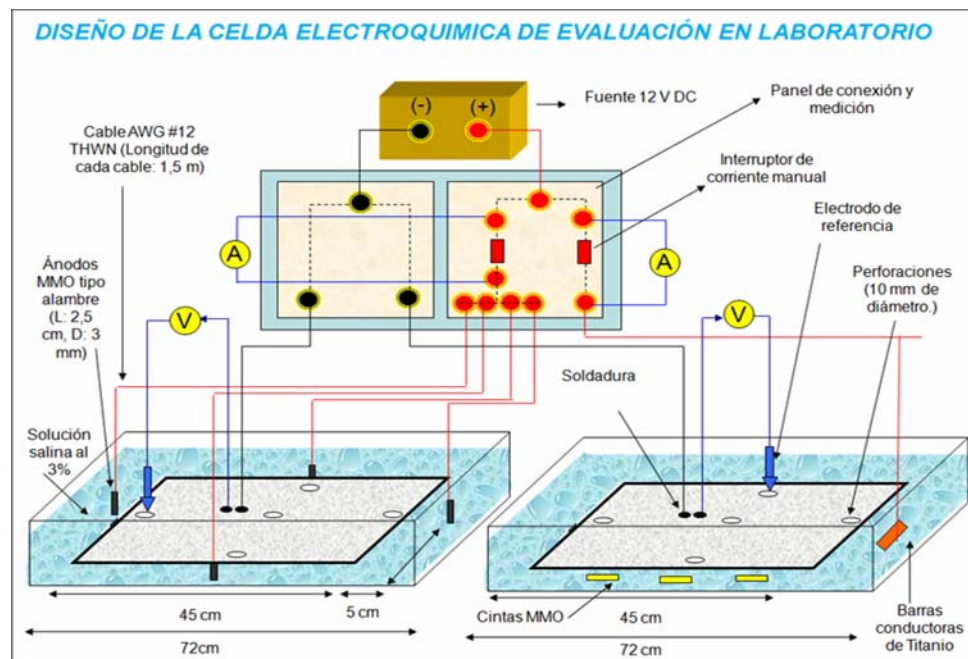
Las celdas de evaluación en laboratorio fueron diseñadas de acuerdo a las configuraciones y geometrías consideradas en las memorias de cálculos de los sistemas de protección catódica. De igual manera se diseñaron los circuitos de medición de corriente y voltaje (Ver figura 8).

Se diseñaron e instalaron sistemas de protección catódica independientes (uno mediante ánodos convencionales perimetrales y otro mediante sistema de mallas MMO) conectados en paralelo a una misma fuente (DC) y protegiendo cátodos (láminas de acero) con áreas similares, en un electrolito común, operando en forma continua durante un mismo periodo de tiempo. Las variables respuesta fueron los niveles de potencial (V) registrados en cinco (5) puntos sobre cada lámina, y la corriente eléctrica (I) drenada por cada sistema. Las mediciones anteriores se realizaron de manera simultánea, por consiguiente se pudo analizar la tendencia en el transcurso del tiempo.

Para que los sistemas fueran representativos la superficie del material anódico consistían en ánodos de MMO que son una mezcla de óxidos de metal, (tales

como óxidos de iridio, rutenio, tántalo y titanio) depositados sobre un sustrato de titanio. Como la superficie activa se encuentra preoxidada, la velocidad de consumo del recubrimiento superficial es muy baja, está en el orden de 1 mg/A-año. Este material anódico viene generalmente en forma de barras, cables, tubos o malla.

Figura 8. Diseño de la celda electroquímica de evaluación en laboratorio



Fuente: El autor

3.5 FASE IV: ADQUISICIÓN DE MATERIALES Y MONTAJES DE CELDAS DE EVALUACIÓN EN LABORATORIO

Una vez realizados los diseños de sistemas de protección catódica y las celdas de evaluación, se llevó a cabo la adquisición de equipos y materiales para el montaje de las celdas en laboratorio.

El montaje de las celdas de evaluación en laboratorio consideradas en el marco del proyecto, se llevó a cabo de acuerdo a las especificaciones y consideraciones

de los diseños teóricos realizados y se dispuso, entre otros de los siguientes elementos:

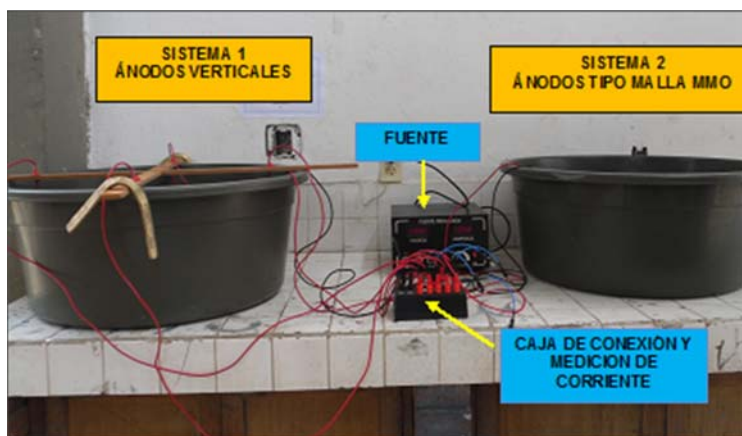
- Fuente de voltaje variable
- Láminas de acero al carbono a proteger (cátodos)
- Cables de conexión tipo AWG # 12 THWN
- Ánodos: cintas MMO y ánodos MMO tipo alambre
- Multímetro digital
- Electrodo de referencia calomel
- Electrolito: solución salina al 3% en peso
- Caja de medición
- Contenedores plásticos
- Conectores eléctricos

En el anexo A, se pueden observar los materiales usados en el montaje de las celdas de evaluación.

En la anexo B, se puede observar el montaje de las celdas de evaluación para sistemas de protección catódica por corriente impresa usando ánodos perimetrales y mallas MMO.

En la fotografía 1 se muestran las celdas de evaluación puestas en marcha.

Fotografía 1. Celdas de evaluación en marcha



Fuente: El autor

3.6 FASE VI: PRUEBAS EXPERIMENTALES Y MONITOREO DE LAS CELDAS

Se realizaron los ensayos que se relacionan a continuación: Ver tabla 1

Tabla 1. Pruebas experimentales

ENSAYO	TIPO DE SISTEMA	TIEMPO DE EVALUACIÓN	VARIABLES REGISTRADAS	
			VARIABLES INDEPENDIENTES	VARIABLES DEPENDIENTES
1	Corriente impresa con cintas MMO	550 horas	<ul style="list-style-type: none"> V (voltaje de salida de la fuente) 	<ul style="list-style-type: none"> I (corriente drenada por cada sistema) Potencial (Calomel convertidos a Cu/CuSO₄) en los 5 puntos de cada sistema
	Corriente impresa con ánodos convencionales			
2	Corriente impresa con cintas MMO	550 horas	<ul style="list-style-type: none"> V (voltaje de salida de la fuente) 	<ul style="list-style-type: none"> I (corriente drenada por cada sistema) Potencial (Calomel convertidos a Cu/CuSO₄) en los 5 puntos de cada sistema
	Corriente impresa con ánodos convencionales			
3	Corriente impresa con cintas MMO	550 horas	<ul style="list-style-type: none"> V (voltaje de salida de la fuente) 	<ul style="list-style-type: none"> I (corriente drenada por cada sistema) Potencial (Calomel convertidos a Cu/CuSO₄) en los 5 puntos de cada sistema
	Corriente impresa con ánodos convencionales			

Fuente: El autor

3.7 FASE VII: ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES E INFORME FINAL

Una vez culminado el tiempo de exposición de los ensayos propuestos se analizó el comportamiento del nivel de polarización de las estructuras protegidas, la tendencia de la magnitud de la corriente con respecto al tiempo, la posible influencia de la distribución de la corriente en los niveles de polarización obtenidos. Los registros de cada una de las variables fueron comparados gráficamente con el objeto de definir el efecto de la distribución de la corriente de protección catódica.

Al terminar los procedimientos experimentales se compilaron y analizaron todos los datos obtenidos, procediendo a realizar el respectivo informe final con las conclusiones, análisis y observaciones del proceso (Ver capítulos 7 y 8).

4. PRUEBAS DE LABORATORIO

4.1 PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS

Con el fin de obtener la densidad de corriente de corrosión de un acero ASTM A 36 inmerso en una solución salina al 3% en peso, se emplearon las técnicas electroquímicas de Resistencia de Polarización lineal (LRP) y Pendientes Tafel.

A continuación, se describe el proceso implementado para la determinación de las densidades de corriente:

- Preparación del electrolito (Solución de NaCl al 3% en peso)
- Preparación de probeta
- Montaje del Ensayo
- Cálculo de densidad de corriente y Velocidades de corrosión

➤ **Preparación del electrolito (Solución de NaCl al 3% en peso)**

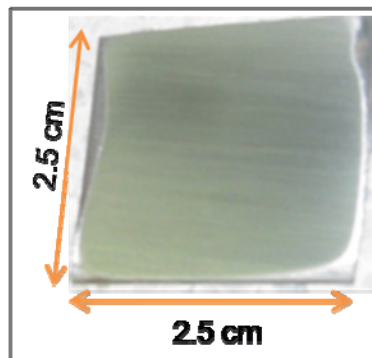
Para efectuar las pruebas electroquímicas se requiere simular en laboratorio las condiciones a las cuales estarán expuestas las estructuras a proteger, por lo tanto, se preparó una solución de NaCl al 3% en peso, el cual fue el electrolito utilizado en las celdas de evaluación planteadas en este proyecto de grado.

Para llevar a cabo la determinación de la densidad de corriente por pruebas electroquímicas, se emplearon doscientos mililitros (200ml) de solución de NaCl al 3% en peso.

➤ **Preparación de la probeta de trabajo**

Para preparar los electrodos de prueba se utilizó acero al carbono ASTM A 36, que corresponde al material con el cual se construyeron las celdas de evaluación consideradas en el marco del proyecto. Con este material, se maquinó un electrodo cuadrado, el cual fue pulido con papel esmeril hasta grado 600. La Fotografía 2, muestra la forma de la probeta utilizada para las evaluaciones electroquímicas.

Fotografía 2. Electrodo de Trabajo para Evaluaciones Electroquímicas



Fuente: El autor

➤ **Montaje del ensayo**

Una vez preparada la solución y el material de ensayo, se realizó el montaje de la celda respectiva. En primer lugar, se monitoreó la estabilidad del potencial de corrosión corriendo un prueba de E_{corr} Vs Tiempo, esta prueba se realizo durante el tiempo necesario en el que alcanzó la estabilidad, que fue asumida bajo condiciones en la que el potencial presentó una variación no mayor a ± 1 mV/min. Alcanzada la estabilidad en el potencial de corrosión se prosiguió a las pruebas electroquímicas de Resistencia de Polarización Lineal y Tafel.

Las condiciones a las que se desarrollaron los ensayos, se encuentran descritas a continuación: (Ver tabla 2).

Tabla 2. Condiciones de ensayos

Barrido LPR:	± 20 mV a $170\mu\text{V}/\text{seg}$.
Barrido Curvas Tafel:	± 250 mV Vs. E corr a $125\mu\text{V}/\text{seg}$
Material del electrodo de trabajo:	Acero al carbono ASTM A 36
Electrodo de Referencia:	Ag/AgCl 0,1 M KCl
Electrodo Auxiliar:	Electrodo de grafito
Electrolito:	Solución de NaCl al 3% en peso

Fuente: El autor

Para determinar la densidad de corriente de corrosión se empleó un sistema de tres (3) electrodos: Un (1) electrodo de referencia de Ag/AgCl 0,1M, un (1) contraelectrodo de grafito y como electrodo de trabajo acero ASTM A 36. El sistema de electrodos se dispuso en una celda electroquímica, de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM G3-99⁴. Como electrolito se utilizó solución de NaCl al 3% en peso.

En la fotografía 3 se puede observar el montaje con el cual se realizó la determinación de la densidad de corriente.

Fotografía 3. Equipos y montaje empleado en la determinación de la densidad de corriente



⁴ ASTM G3-99: "Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing".

Fuente: El autor

El desarrollo experimental para la determinación de la densidad de corriente, se basó en las Curvas LPR y las Pendientes Tafel.

4.1.1 Curvas de resistencia a la polarización lineal LPR

Se efectuó el montaje de la celda electroquímica, según lo establecido en la norma ASTM G3-99⁵ y las condiciones de prueba descritas en la tabla 2.

Previamente, se purgó la celda electroquímica y posteriormente se adicionó 200 mL de la solución de NaCl al 3% en peso. Se instaló el electrodo de trabajo en el portaelectrodo con posterior verificación de la continuidad eléctrica entre el terminal y el electrodo. El electrodo de referencia se dispuso en un *luggin* o puente salino, el cual se ubicó a una distancia de 2 a 3 mm de la superficie del electrodo de trabajo.

Una vez verificadas las condiciones, se efectuó el barrido de potencial para curvas de resistencia de polarización lineal LPR. Se registraron los valores de potencial aplicado y corriente obtenida, para graficar la curva de polarización como Potencial Vs. Densidad de corriente. Luego, se determinó gráficamente la resistencia a la polarización, R_p , como la tangente a la curva en el origen de la gráfica ($\Delta E = 0$), según norma ASTM G59-97⁶. El valor de resistencia de polarización se obtiene del polinomio (el grado cuatro es el que corresponde al mejor) como el coeficiente de grado 1. Según norma ASTM G59-97⁷.

Lo anterior, se aprecia en la Gráfica 1, donde se muestran las curvas de las Resistencias de Polarización obtenidas para el Acero ASTM A-36 en solución de NaCl al 3% en peso, con sus respectivos polinomios. Las curvas de resistencia de

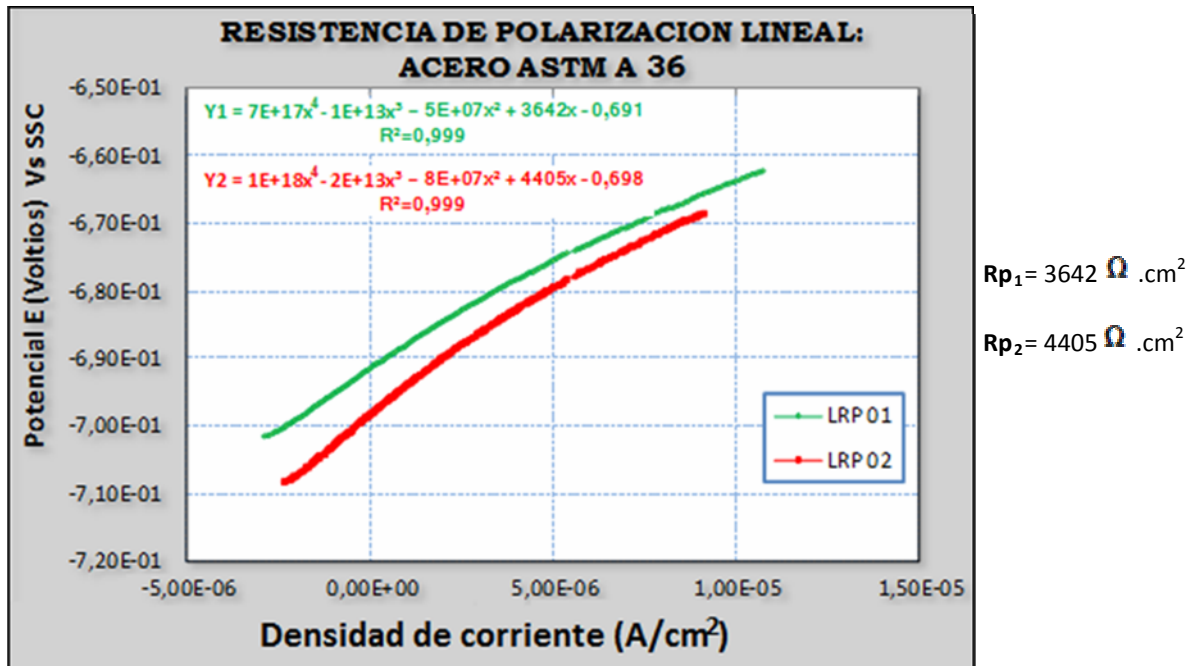
⁵ ASTM G3-99: "Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing".

⁶ ASTM G59-97: "Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements".

⁷ ASTM G59-97: "Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements".

polarización se efectuaron por duplicado y se calculó el valor promedio de la resistencia de polarización, buscando determinar la densidad de corriente. El valor de la resistencia obtenida se encuentra registrado en la Tabla 3.

Gráfica 1. Curvas de LPR para el Acero ASTM A 36, en solución de NaCl al 3%



Fuente: El autor

4.1.2 Pendientes Tafel

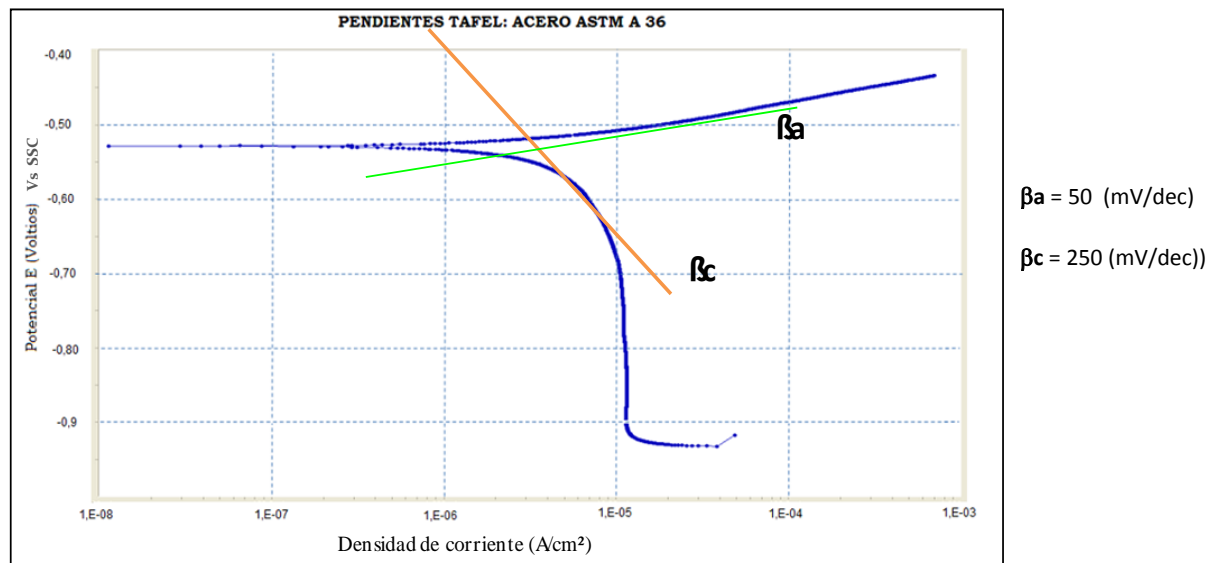
El acondicionamiento previo del sistema para la determinación de las Pendientes Tafel es el mismo que se empleó para el ensayo de LPR. Se registraron los valores de potencial aplicado y corriente obtenida para luego construir la curva de polarización como E Vs. *log*i. Las pendientes Tafel anódica y catódica se determinaron gráficamente a partir de ± 50 mV del potencial de corrosión E_{corr}

hasta ± 150 mV del potencial de corrosión E_{corr} , de acuerdo a la norma ASTM G3-99⁸ y ASTM G59-97⁵

Las pendientes Tafel son la porción de una línea recta de una curva de polarización. Usualmente, se encuentran a cincuenta (50) mV, a partir del potencial de corrosión, cuando se presentan en una gráfica semilogarítmica (Potencial Vs. Log Corriente) en términos de milivoltios por década de corriente, tal como lo muestra la Gráfica 2 para el Acero ASTM A-36 en solución de NaCl al 3% en peso.

En la Tabla 3 se puede apreciar la beta catódica (β_c) y beta anódica (β_a) calculadas.

Gráfica 2. Pendientes Tafel obtenidas para el Acero ASTM A 36, en Solución de NaCl al 3%



Fuente: El autor

⁸ ASTM G3-99: "Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing".

➤ **Determinación de la densidad de corriente**

Con cada uno de los valores de Resistencia de Polarización y Pendientes Tafel obtenidos a partir de los ensayos electroquímicos, se determinó la densidad de corriente para cada uno de los sistemas evaluados, según lo establecido en la norma ASTM G102-99⁹:

$$\beta = \frac{\beta_a \cdot \beta_b}{2.3(\beta_a + \beta_b)A} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

$$i_{corr} = \frac{\beta}{R_p} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde: i_{corr} = Corriente de corrosión.

β_c y β_a = Pendientes catódica y anódica, respectivamente, dadas en mV/dec.

R_p = Resistencia de Polarización en ohmio/cm².

A = Área de la superficie del electrodo en contacto con el electrolito en cm².

Tabla 3. Valores de la resistencia de polarización y pendientes Tafel

Acero	Electrolito	R _p (Ohmios/cm ²)	β _a (mV/dec)	β _c (mV/dec)	β (mV/dec)
ASTM A 36	Solución NaCl al 3%	3642	50	250	18,12
		4405	50	250	18,12

⁹ ASTM G102-99: "Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements".

Fuente: El autor

Los resultados de la densidad de corriente obtenidos a partir de los valores de resistencia de polarización y pendientes Tafel según la ecuación (2) descrita en la norma ASTM G102-99¹⁰, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Valor de la densidad de corriente obtenida

Acero	Electrolito	Área (cm ²)	β (mV/dec)	Rp (Ohmios/cm ²)	i_{corr} (μ A/cm ²)
ASTM A 36	Solucion NaCl al 3%	1,00	18,12	4023,5	4,50

Fuente: El autor

Por tanto, al convertir los valores de densidad de corriente de μ A/cm² a mA/m², se obtiene lo siguiente:

- Densidad de Corriente para Acero ASTM A 36: **45 mA/m²**

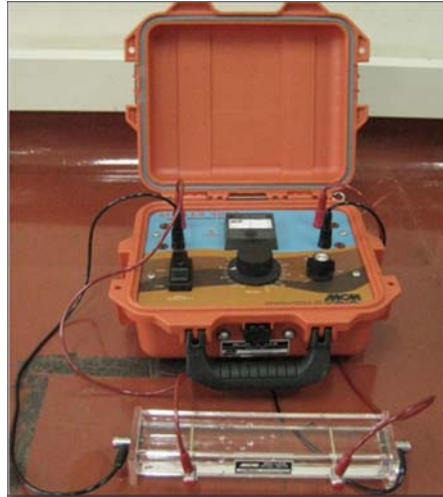
4.2 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL ELECTROLITO

La resistividad eléctrica del electrolito (solución salina al 3% en peso) se determinó en laboratorio, de acuerdo a los lineamientos establecidos en la norma ASTM G57 - 06 "Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method",¹¹ empleando una caja de medición de resistividades eléctricas marca Mc Miller adaptado a un equipo medidor de resistencias eléctricas marca Mc Miller modelo Miller 400^a (Ver fotografía 4).

¹⁰ ASTM G102-99: "Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements".

¹¹ ASTM G57 - 06 "Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method"

Fotografía 4. Medidor de resistividades eléctricas Mc Miller



Fuente: El autor

El valor de resistividad eléctrica obtenida fue de **25 ohm*cm.** (Ver fotografía 5)

Resistividad eléctrica = ajuste grueso x ajuste fino

Resistividad eléctrica = 2,5 x 10 = 25 ohm*cm

Fotografía 5. Medición de resistividad eléctrica



Fuente: El autor

5. DISEÑOS DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Con el propósito de dar continuidad a la metodología que se desarrolló a nivel de laboratorio del desempeño de los sistemas de protección catódica por corriente impresa, donde se contemplan dos (2) sistemas, por medio de ánodos distribuidos y malla MMO, se realizó el diseño de protección catódica para cada uno de los sistemas.

Los diseños de protección catódica por corriente impresa se elaboraron de acuerdo a los cálculos definidos en la normatividad NACE y literatura relacionada con diseños de sistemas de protección catódica.

5.1 DISEÑO DE PROTECCIÓN CATÓDICA USANDO MALLAS TIPO MMO

5.1.1 Parámetros generales de diseño de sistemas de protección catódica usando mallas tipo MMO

- **Cálculo del área metálica a proteger:** el área a proteger se encuentra desnuda (sin ningún tipo de revestimiento), la cual corresponde al 100% del área; para este diseño el área constituye una sección cuadrada de 0,45m.

Los cálculos del área a proteger se relacionan a continuación:

Área Total A_T

$$A_T = A_f + A_g$$

(Ecuación 3)

$$A_f = L^2$$

$$A_e = (b \times a) \times 4$$

Donde: A_t = área total (m^2)
 A_f = área del fondo de la lámina (m^2)
 A_e = área perimetral del espesor de la lámina (m^2)
 b = base (0,45m)
 a = altura (0,001m)
 L = es el lado de la lámina (0,45m)

Área a proteger A_P

$$A_P = A_T \left(1 - \frac{E}{100} \right) \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde: E : es la eficiencia del recubrimiento

Al sustituir los datos de diseño en las ecuaciones se obtuvo:

$$A_f = (0,45m)^2 = 0,2025 m^2$$

$$A_e = (0,45m \times 0,001m) \times 4 = 0,0018 m^2$$

$$A_T = 0,2025m^2 + 0,0018m^2 = 0,2043 m^2$$

$$A_P = 0,2043 \left(1 - \frac{0}{100}\right) = 0,2043m^2$$

- **Cálculos de los requerimientos de corriente (I):** Los resultados obtenidos en la prueba electroquímica, para la determinación de la densidad de corriente de corrosión para el acero ASTM A 36 en una solución salina al 3% en peso, indicaron una densidad de corriente de corrosión de 45 mA/m²; para efectos de diseño de los sistemas de protección catódica debe emplearse una densidad de corriente de protección catódica mayor o igual a dicho valor. En los cálculos de diseño de los sistemas de protección catódica a nivel de laboratorio, se adoptó un valor de densidad de corriente de protección catódica de 60 mA/m², el cual incluye un factor de seguridad de aproximadamente el 30%.

Los cálculos de corriente requerida para la lámina que se usó como fondo son:

$$I_R = A_P * J \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Donde: I_R = corriente requerida

A_P = área a proteger

J = densidad de corriente

$$I_R = 0,2043m^2 * 60 \frac{mA}{m^2} = 12,26mA$$

$$I_R = 0,01226A$$

- **Tipo de Ánodo:** Para este diseño se ha considerado el uso de una cinta de titanio, con las siguientes especificaciones:

Cinta de titanio comercial, con un recubrimiento de óxidos de metal, bajo especificación ASTM B-265 – Titanium, Grado 1 de dimensiones 0,25” (6,35 mm) ancho x 0,025” (0,635 mm) espesor.

Las dimensiones de la barra conductora son: 0,5” (12,7 mm) ancho x 0,035” (0,9 mm) de espesor.

La capacidad de corriente (C_a) de las cintas que se emplearon en el diseño es de 16 mA/m de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

- **Resistividad del electrolito:** De acuerdo a las pruebas de resistividad realizadas en laboratorio al electrolito que se usó en la celda de evaluación, para este diseño se utilizó una resistividad de **(25 Ω - cm)**
- **Profundidad de las mallas:** los valores típicos de profundidad de mallas anódicas utilizadas en tanques de almacenamiento de hidrocarburos, varían entre 50 y 100 cm; con el objeto de establecer una escala de 1:100 se definió una profundidad de instalación de las cintas de **1 cm**.

- **Longitud mínima total de cinta requerida:** la longitud de cinta requerida para drenar los 0,01226 Amperios calculados se obtiene con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{I_R}{C_a} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Donde: L = longitud de cinta requerida (m).
 I_R = corriente requerida (0,01226 A).
 C_a = capacidad (0,016 A/m).

$$L = \frac{0,01226A}{0,016 \frac{A}{m}} = 0,77m$$

- **Cantidad de cintas MMO requeridas:** la cantidad de cintas requeridas se obtuvieron usando la siguiente fórmula:

$$n = \frac{4 \times L}{\pi D} \quad \text{(Ecuación 7)}^{12}$$

Donde: n = número de cintas requeridas.
 L = longitud de cinta requerida (m).
 D = diámetro de la lamina (0,45m)¹³

$$n = \frac{4 \times 0,77}{\pi \times 0,45} = 2,18$$

¹² Demoz, Alabachew and Friesen, Wally "Resistance of Impressed Current Parallel Grid and Concentric Circular Ribbon Anode Beds Underneath Tank Bottoms" CORROSION/2005, paper no. 05045

¹³ El diámetro de la lamina (D), hace referencia a una circunferencia en la cual esta circunscrita la lamina cuadrada a emplear

El anterior valor corresponde a la cantidad mínima de cintas a emplear, sin embargo por efectos de geometría se emplearon **3 cintas** en el montaje de la celda de evaluación

- **Longitud de cada cinta:** De acuerdo a la geometría que tenía la lámina, la longitud de cada cinta fue de 0,45 m

La longitud total de cinta anódica requerida para una cobertura apropiada del fondo de la lámina es:

$$L = 0,45 \times 3 = 1,35 \text{ m}$$

Al disponer de **1,35 m** de cinta anódica, la capacidad de corriente drenada por el sistema, usando la ecuación 6 fue:

$$I = 1,35 \text{ m} \times 0,016 \frac{\text{A}}{\text{m}} = 0,0216 \text{ A}$$

La capacidad de corriente drenada por el sistema es mayor a la corriente requerida para el diseño. De acuerdo a lo anterior se concluye que los valores calculados son coherentes, y el sistema estará en capacidad de drenar valores de corriente superiores al calculado por diseño, en el eventual caso de requerirse posibles ajustes al drenaje de corriente durante la puesta en marcha y calibración del sistema.

- **Separación entre cinta:** la separación entre cinta se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$S = \frac{D}{n}$$

(Ecuación 8)¹⁴

Donde: **S** = separación entre cintas (m).
D = diámetro de la lámina (0,45m)
n = número de cintas requeridas.

$$S = \frac{0,45m}{3} = 0,15m$$

Debido a la geometría y para una mejor distribución de corriente se usó una separación entre cinta de **0.1125 m**. Ver anexo C.

- **Cantidad de barras de titanio:** de acuerdo a la experiencia relacionada con los diseños de protección catódica la cantidad de barras que se usaron en el diseño fue una (1); con una longitud de 0,45m. En el anexo C se observa el esquema.

- **Resistencia del sistema anódico (R_a):** esta resistencia se calculó usando la siguiente ecuación:

¹⁴ Demoz, Alabachew and Friesen, Wally "Resistance of Impressed Current Parallel Grid and Concentric Circular Ribbon Anode Beds Underneath Tank Bottoms" CORROSION/2005, paper no. 05045

$$R_a = \frac{\rho h}{L(S - w)} \ln \frac{S}{w}$$

(Ecuación 9)¹⁵

- Donde:
- R_a = resistencia del sistema anódico
 - S = separación entre cintas (**0,11m**).
 - ρ = resistividad del electrolito (**0,25 Ω - m**)
 - L = longitud total de la cinta (**1,35 m**)
 - w = ancho de la cinta anódica (**0,0064 m**)
 - h = profundidad a la que se ubicara la cinta anódica (**0,01 m**)

$$R_a = \frac{0,25 \times 0,01}{1,35(0,11 - 0,0064)} \ln \frac{0,11}{0,0064} = 0,051 \Omega$$

- **Resistencia de los cables de conexión (R_{cc}):** La resistencia del cable No. 12 AWG es de 5.208 Ω /1000 m.

$$R_{cc} = R_{AWG} \times \text{Longitud total de cable} \quad \text{(Ecuación 10)}$$

- Cable negativo = 3 m
- Cable positivo = 3 m
- CABLE TOTAL = 6 m

$$R_{cc} = 6 \times \frac{5.208}{1000} = 0,03\Omega$$

- **Resistencia del cátodo (R_c):** Este valor fue asumido teóricamente

¹⁵ Demoz, Alabachew and Friesen, Wally "Resistance of Impressed Current Parallel Grid and Concentric Circular Ribbon Anode Beds Underneath Tank Bottoms" CORROSION/2005, paper no. 05045

$$R_C = 1 \Omega$$

- **Resistencia total del circuito (R_T):**

$$R_T = R_a + R_{CC} + R_C \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$R_T = 0,051 + 0,03 + 1 = 1,1 \Omega$$

- **Selección del voltaje de la fuente (V):** Para realizar el cálculo del valor nominal de la potencia de la fuente que se empleó, se usó la ecuación de la ley de Ohm:

$$V_R = [(I)_T \times R_T] + E' \quad (\text{Ecuación 12})$$

- Donde:
- V_R = Voltaje del rectificador (V)
 - I_T = Corriente requerida (A)
 - R_T = Resistencia total del sistema (Ω)
 - E' = fuerza contraelectromotriz (V)

$$V_R = (0,012264 \times 1,1\Omega) + 2V = 2,01 V$$

En el anexo D se muestra de manera resumida los cálculos realizados.

5.2 DISEÑO DE PROTECCIÓN CATÓDICA USANDO ÁNODOS VERTICALES

5.2.1 Parámetros generales de diseño de sistemas de protección catódica usando ánodos convencionales (verticales)

- **Cálculo del área metálica a proteger:** el área a proteger se encuentra desnuda (sin ningún tipo de revestimiento), la cual corresponde al 100% del área; para este diseño el área constituye una sección cuadrada de 0,45m.

Área Total A_T

$$A_T = A_f + A_e \quad \text{(Ecuación 13)}$$

$$A_f = L^2$$

$$A_e = (b \times a) \times 4$$

Donde: A_t = área total (m^2)
 A_f = área del fondo de la lámina (m^2)
 A_e = área perimetral del espesor de la lámina (m^2)
 b = base (0,45m)
 a = altura (0,001m)
 L = es el lado de la lámina (0,45m)

Área a proteger A_P

$$A_P = A_T \left(1 - \frac{E}{100}\right)$$

(Ecuación 14)

Donde: E: es la eficiencia del recubrimiento

Al sustituir los datos de diseño en las ecuaciones se obtuvo:

$$A_f = (0,45m)^2 = 0,2025 m^2$$

$$A_e = (0,45m \times 0,001m) \times 4 = 0,0018 m^2$$

$$A_T = 0,2025m^2 + 0,0018m^2 = 0,2043 m^2$$

$$A_P = 0,2043 \left(1 - \frac{0}{100}\right) = 0,2043m^2$$

- **Cálculos de los requerimientos de corriente (I):** Los resultados obtenidos en la prueba electroquímica, para la determinación de la densidad de corriente de corrosión para el acero ASTM A 36 en una solución salina al 3% en peso,

indicaron una densidad de corriente de corrosión de 45 mA/m²; para efectos de diseño de los sistemas de protección catódica debe emplearse una densidad de corriente de protección catódica mayor o igual a dicho valor. En los cálculos de diseño de los sistemas de protección catódica a nivel de laboratorio, se adoptó un valor de densidad de corriente de protección catódica de 60 mA/m², el cual incluye un factor de seguridad de aproximadamente el 30%.

Los cálculos de corriente requerida para la lámina que se usó como fondo son:

$$I_R = A_P \cdot J \quad \text{(Ecuación 15)}$$

Donde: I_R = corriente requerida

A_P = área a proteger

J = densidad de corriente

$$I_R = 0,2043\text{m}^2 \cdot 60 \frac{\text{mA}}{\text{m}^2} = 12,26\text{mA}$$

$$I_R = 0,01226\text{A}$$

- **Tipo de Ánodo:** Para este diseño se ha considerado el uso de ánodos convencionales perimetrales tipo MMO. Estos ánodos se obtuvieron a partir de ánodos MMO tipo alambre y tenían unas dimensiones de 2,5 cm de altura y 0,3 mm de diámetro siendo una escala de 1:100 respecto a una escala real.

➤ **Resistividad del electrolito:** De acuerdo a las pruebas de resistividad realizadas en laboratorio al electrolito que se usó en la celda de evaluación, para este diseño se utilizó una resistividad de **(25 Ω - cm)**

➤ **Cantidad de ánodos:** mediante cálculos iterativos se estableció el valor de resistencia eléctrica del sistema anódico para diferentes números de ánodos a instalar (N). Los cálculos de resistencia eléctrica mediante la ecuación 16, indicaron que al instalar cuatro (4) ánodos era adecuado por simetría y porque al determinar el valor de voltaje de la fuente, necesario para el sistema de protección catódica por ánodos perimetrales, era similar al valor de voltaje de la fuente para el sistema de PC de las malla MMO. La anterior condición debe cumplirse, debido a que se empleó una sola fuente de corriente para suministrar la corriente eléctrica a ambos sistemas. Es importante señalar que al garantizar valores similares de resistencia eléctrica de las camas anódicas, se obtendrá un voltaje de salida de la fuente similar para ambos sistemas, debido a que la corriente eléctrica requerida para ambos sistemas es igual.

Los ánodos fueron instalados en posición vertical a una distancia de 5 cm desde la lámina y a una profundidad de 2 cm, de esta manera se mantuvo una escala 1:100 en relación con las distancias que se usan en campo (real). Ver anexo E.

➤ **Resistencia del sistema anódico (R_a):** esta resistencia se calculó usando la ecuación de Sunde; esta ecuación es simplemente la ecuación de Dwight dividida por N, más la corrección por el factor de “congestionamiento”:

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi N L \left\{ \left(\ln \frac{8L}{d} \right) - 1 + \frac{2L}{S} \ln(0,65N) \right\}}$$

(Ecuación 16)¹⁶

- Donde:
- R_a = resistencia del sistema anódico
 - S = separación entre ánodos (45 cm).
 - ρ = resistividad del electrolito (25 Ω - cm)
 - L = longitud del ánodo (2,5 cm)
 - N = número de ánodos (4)
 - d = diámetro del ánodo (0,3 cm)

$$R_a = \frac{25}{2\pi \cdot 4 \cdot 2,5} \left\{ \ln \left(\frac{8 \cdot 2,5}{0,3} \right) - 1 + \frac{2 \cdot 2,5}{45} \ln(0,65 \cdot 4) \right\} = 1,31 \Omega$$

- **Resistencia de los cables de conexión (R_{cc}):** La resistencia del cable No. 12 AWG es de 5.208 Ω /1000 m.

$$R_{cc} = R_{AWG} \times \text{Longitud total de cable} \quad (\text{Ecuación 10})$$

- Cable negativo = 3 m
- Cable positivo = 7,5 m
- CABLE TOTAL = 10,5 m

$$R_{cc} = 10,5 \times \frac{5.208}{1000} = 0,05 \Omega$$

¹⁶ CP 3—Cathodic Protection Technologist Course Manual NACE International

- **Resistencia del cátodo (R_c):** Este valor fue asumido teóricamente

$$R_c = 1 \Omega$$

- **Resistencia total del circuito (R_T):**

$$R_T = R_a + R_{CC} + R_c \quad \text{(Ecuación 11)}$$

$$R_T = 1,31 + 0,05 + 1 = 2,4 \Omega$$

- **Selección del voltaje de la fuente (V):** Para realizar el cálculo del valor nominal de la potencia del rectificador empleado, se usó la ecuación de la ley de Ohm:

$$V_R = [(I_T \times R_T) + E'] \quad \text{(Ecuación 12)}$$

Donde: V_R = Voltaje del rectificador (V)
 I_T = Corriente requerida (A)
 R_T = Resistencia total del sistema (Ω)
 E' = fuerza contraelectromotriz (V)

6. RESULTADOS

Los resultados que se muestran son los obtenidos en el ensayo 3, en el cual se presentaron las mejores tendencias en términos de la corriente drenada por cada sistema y niveles de potenciales eléctricos.

Los resultados de los ensayos 1 y 2 se muestran como los anexos G y H respectivamente.

En tabla 5 se muestran los resultados de los potenciales de los dos sistemas de protección catódica evaluados (ánodos perimetrales y mallas MMO) Vs el tiempo de evaluación.

Tabla 5. Potenciales obtenidos en el ensayo 3

TIEMPO (Horas)	SISTEMA 1 ÁNODOS CONVENCIONALES					SISTEMA 2 MALLAS MMO					VDC DE LA FUENTE (V)	I1 (A)	I2 (A)
	Puntos de medición VDC Cu/CuSO4 (V)					Puntos de medición VDC Cu/CuSO4 (V)							
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5			
0	-0,561	-0,561	-0,562	-0,561	-0,566	-0,538	-0,545	-0,55	-0,553	-0,559	0	0	0
0	-1,017	-1,018	-1,018	-1,018	-0,975	-1,093	-1,045	-1,085	-1,048	-1,09	3,117	0,296	1,26
1	-0,993	-0,987	-0,992	-0,994	-0,96	-1,038	-1,006	-1,035	-0,999	-1,039	3,146	0,227	1,233
4	-0,986	-0,985	-0,986	-0,987	-0,958	-1,038	-0,991	-1,04	-0,991	-1,038	3,288	0,248	1,198
21	-0,987	-0,985	-0,987	-0,986	-0,955	-1,04	-0,992	-1,042	-0,99	-1,04	3,28	0,23	1,126
45	-0,985	-0,982	-0,984	-0,988	-0,956	-1,039	-0,994	-1,041	-0,99	-1,041	3,235	0,246	1,292
70	-0,985	-0,985	-0,983	-0,99	-0,95	-1,039	-0,992	-1,038	-0,991	-1,041	3,256	0,233	1,131
142	-0,994	-0,992	-0,994	-0,995	-0,954	-1,04	-0,987	-1,041	-0,989	-1,043	3,256	0,259	1,192
148	-0,951	-0,95	-0,951	-0,951	-0,929	-1,013	-0,964	-1,014	-0,963	-1,016	3,283	0,245	1,185
166	-0,943	-0,942	-0,943	-0,943	-0,93	-1,008	-0,962	-1,012	-0,961	-1,006	3,261	0,212	1,194
190	-0,94	-0,94	-0,938	-0,94	-0,915	-1,009	-0,964	-1,007	-0,963	-1,01	3,261	0,265	1,183
214	-0,942	-0,943	-0,942	-0,944	-0,913	-1,003	-0,959	-1,001	-0,96	-1,013	3,262	0,244	1,152
238	-0,94	-0,94	-0,941	-0,941	-0,907	-1,004	-0,959	-1,002	-0,961	-1,005	3,275	0,241	1,176
244	-0,942	-0,943	-0,945	-0,945	-0,913	-1,004	-0,958	-1,003	-0,959	-1,004	3,326	0,203	1,231
262	-0,943	-0,943	-0,942	-0,942	-0,91	-1,002	-0,956	-1	-0,956	-1,003	3,224	0,242	1,147
310	-0,94	-0,94	-0,941	-0,943	-0,909	-1,003	-0,955	-1	-0,956	-1,003	3,362	0,291	1,145
316	-0,938	-0,94	-0,941	-0,944	-0,911	-1,001	-0,956	-0,999	-0,957	-1,002	3,323	0,251	1,151
333	-0,929	-0,928	-0,929	-0,93	-0,905	-0,999	-0,954	-0,996	-0,955	-1	3,324	0,248	1,248
382	-0,928	-0,93	-0,93	-0,928	-0,904	-0,994	-0,952	-0,992	-0,953	-0,998	3,325	0,266	1,145
406	-0,93	-0,929	-0,931	-0,929	-0,905	-0,99	-0,95	-0,989	-0,951	-0,99	3,364	0,247	1,198
412	-0,928	-0,928	-0,93	-0,928	-0,906	-0,984	-0,947	-0,983	-0,948	-0,986	3,368	0,215	1,143
430	-0,925	-0,926	-0,925	-0,925	-0,904	-0,982	-0,946	-0,981	-0,947	-0,984	3,361	0,247	1,239
478	-0,927	-0,927	-0,926	-0,925	-0,905	-0,978	-0,943	-0,976	-0,945	-0,979	3,37	0,264	1,185
502	-0,92	-0,922	-0,921	-0,921	-0,904	-0,976	-0,942	-0,983	-0,944	-0,976	3,368	0,243	1,146
526	-0,921	-0,921	-0,92	-0,919	-0,903	-0,976	-0,943	-0,984	-0,944	-0,976	3,365	0,243	1,238
550	-0,92	-0,922	-0,921	-0,921	-0,903	-0,975	-0,942	-0,974	-0,943	-0,975	3,364	0,242	1,136

Fu

ente: El autor

En la gráfica 3, se muestran los potenciales obtenidos Vs el tiempo de evaluación del sistema 1: Protección catódica usando ánodos verticales, y en la gráfica 4 los potenciales obtenidos Vs el tiempo de evaluación del sistema 2: protección catódica usando ánodos tipo malla MMO.

Para las pruebas se usó el criterio de **Un potencial negativo (catódico) de mínimo 850 milivoltios** establecido en la NACE. Para determinar las caídas de voltaje ($V=IR$) se llevaron a cabo dos (2) ensayos en los cuales se interrumpió la corriente y se midieron los potenciales “ON” e “Instant Off” (Ver tabla 6). A partir de los ensayos se estableció como criterio de protección un potencial de 900 milivoltios, el cual incluye una caída de voltaje de 50 milivoltios, el cual es superior a la caída de voltaje obtenido en las pruebas 1 y 2: 27 y 20 milivoltios respectivamente

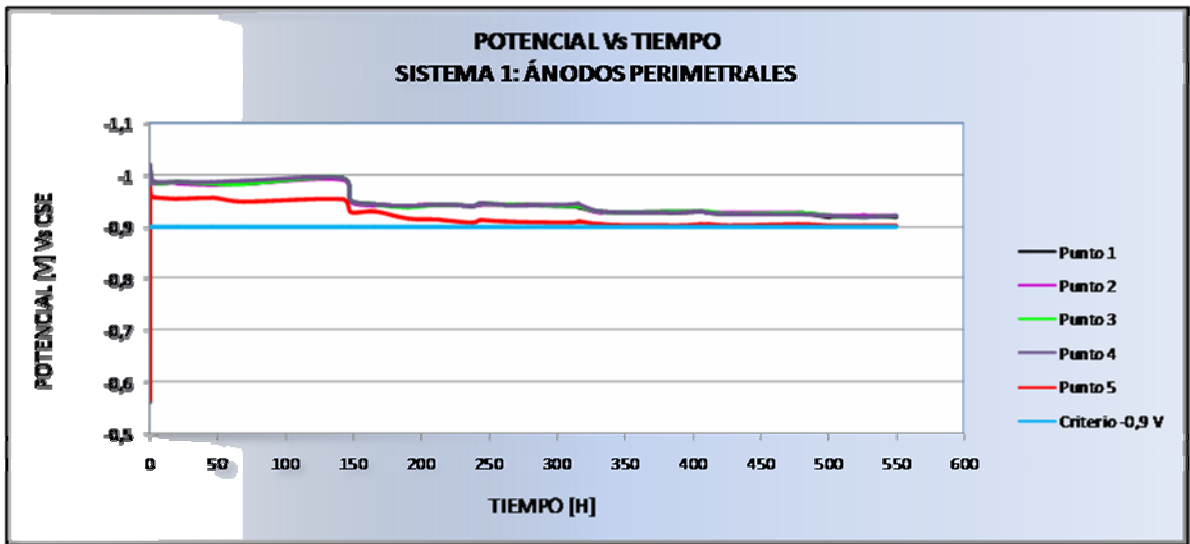
$$E_{-850} = E_{on} - IR$$

Tabla 6 Caídas de voltajes Vs CSE

	Medida 1	Medida 2
Potencial ON	-0,944	-0,955
Potencial Instant OFF	-0,917	-0,935
	↓	↓
DIFERENCIA	0,027	0,02

Fuente: El autor

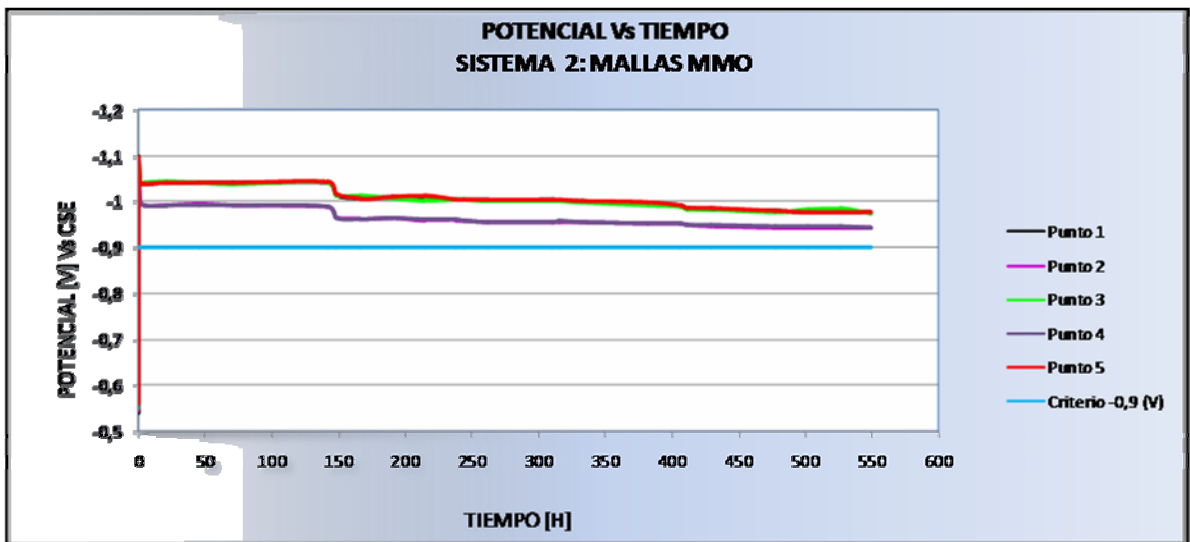
Gráfica 3. Potenciales obtenidos en el sistema 1: ánodos verticales, ensayo 3



Fuente: El autor

En la grafica 3, se observa que los potenciales medidos en el punto 5, el cual se encuentra en el centro de la lámina son menores que los potenciales medidos en los puntos localizados alrededor de la lámina, de esta manera se muestra que se presenta una atenuación de la corriente de protección catódica hacia el centro de la lámina.

Gráfica 4. Potenciales obtenidos en el sistema 2: ánodos tipo mallas MMO, ensayo 3

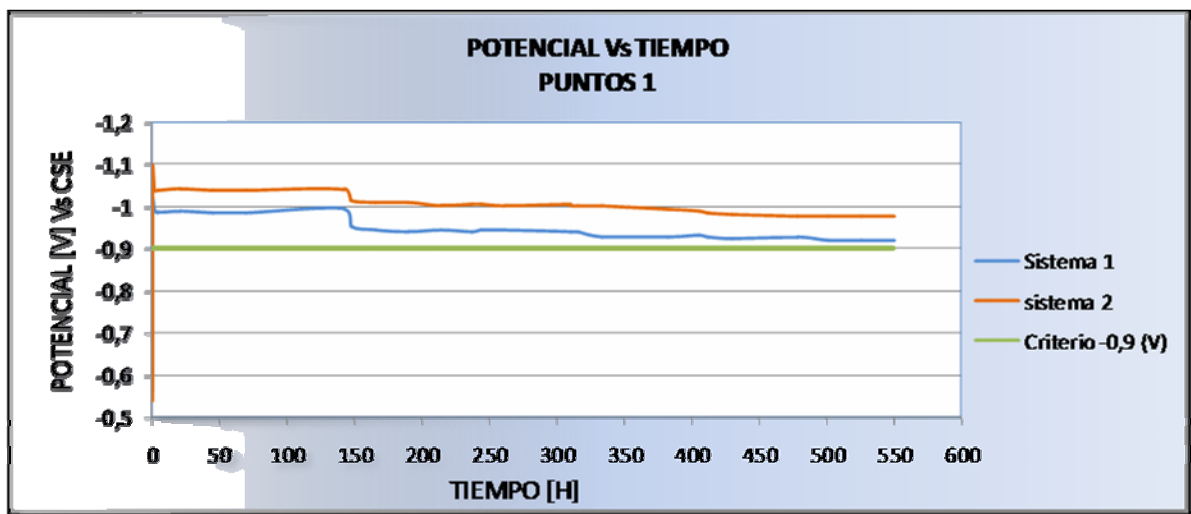


Fuente: El autor

Los valores de potenciales mostrados en la grafica 4 comparados con el sistema 1 (ánodos perimetrales) son más altos, lo que indica que el sistema 2 (ánodos tipo mallas MMO) drena más corriente. Además, tiene una mejor distribución de la misma a pesar de que en los puntos 2 y 4 hay una disminución del valor de los potenciales, esto se debe a la geometría usada en la malla, lo cual se puede mejorar en la práctica.

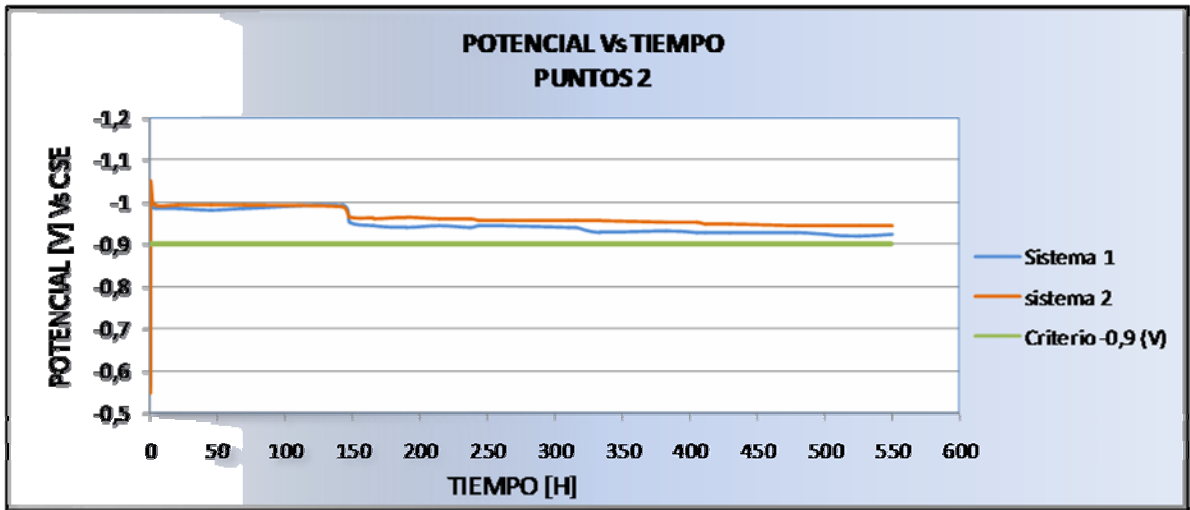
Las gráficas 5, 6, 7, 8 y 9 muestran la comparación punto a punto de los dos sistemas de protección catódica evaluados.

Gráfica 5. Comparación de los sistemas en los puntos 1



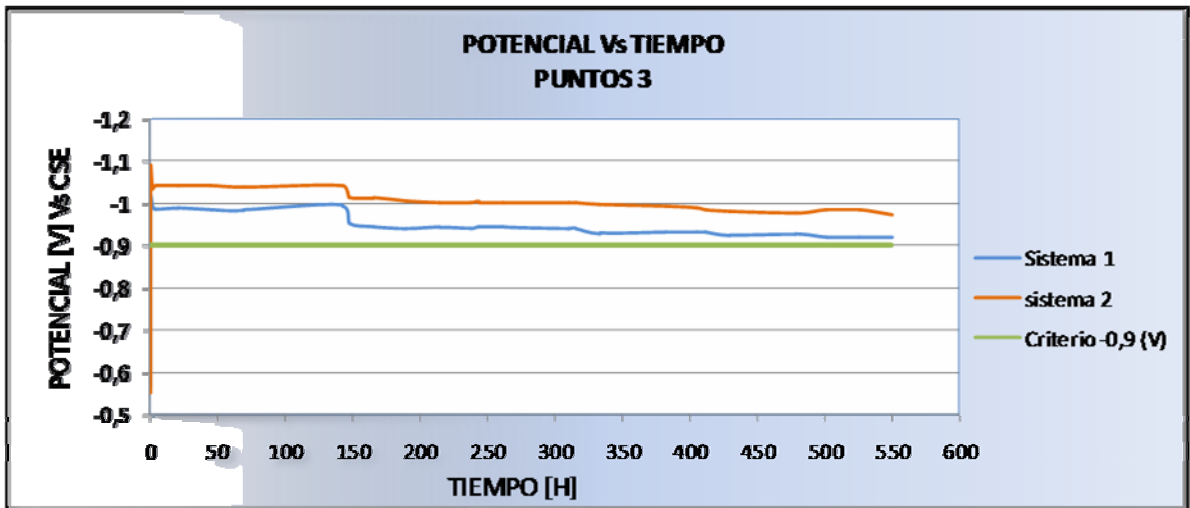
Fuente: El autor

Gráfica 6. Comparación de los sistemas en los puntos 2



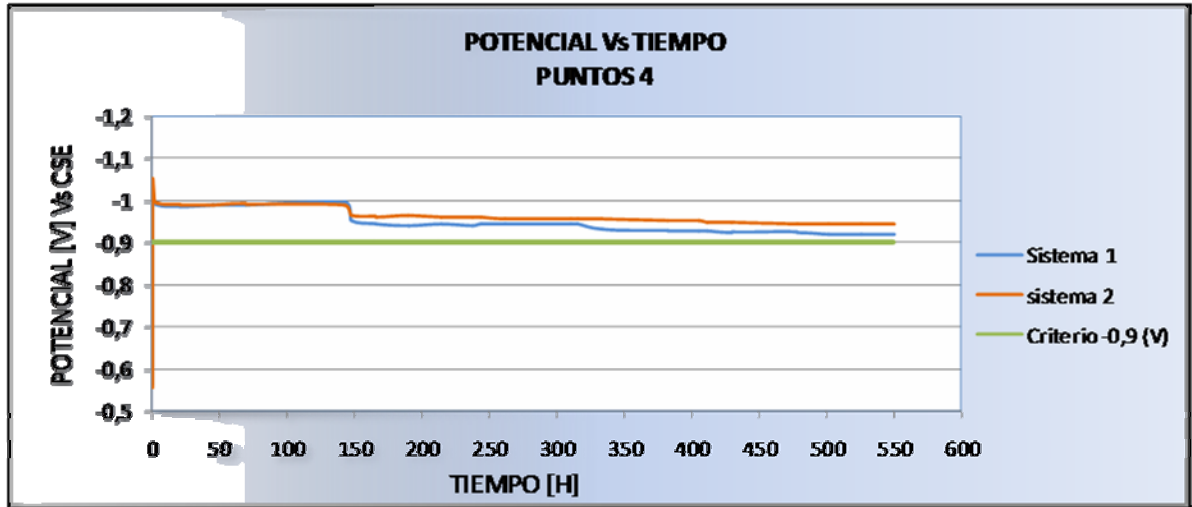
Fuente: El autor

Gráfica 7. Comparación de los sistemas en los puntos 3



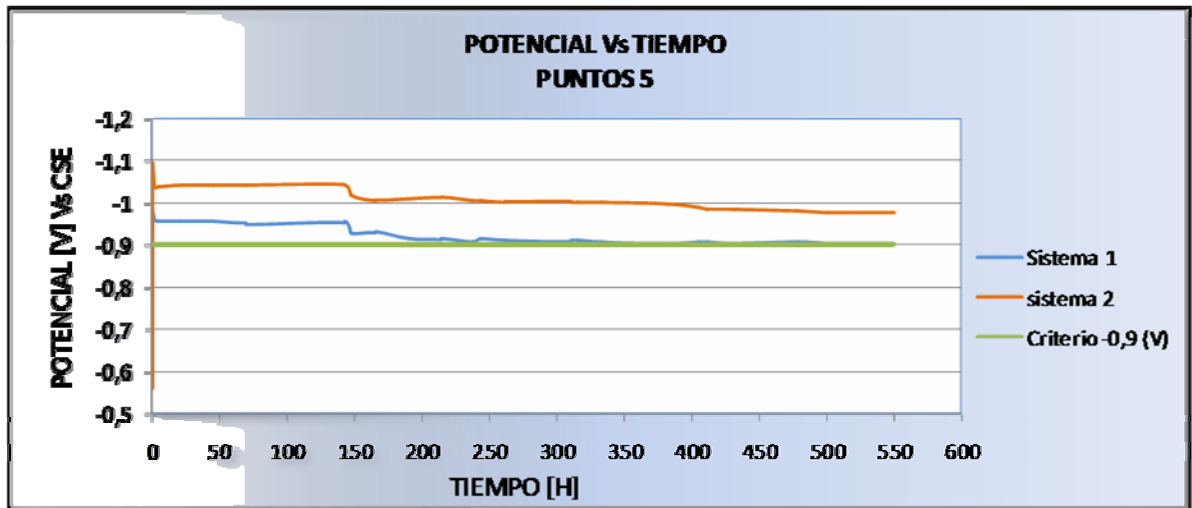
Fuente: El autor

Gráfica 8. Comparación de los sistemas en los puntos 4



Fuente: El autor

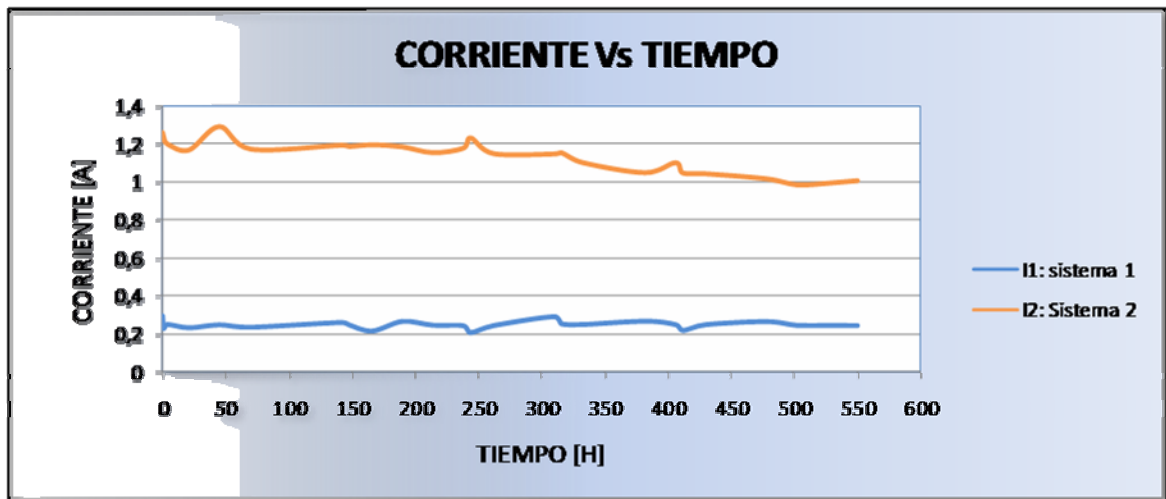
Gráfica 9. Comparación de los sistemas en los puntos 5



Fuente: El autor

En la gráfica 10 se muestra la corriente drenada por cada sistema Vs el tiempo de evaluación.

Gráfica 10. Corriente drenada por cada sistema de evaluación, ensayo 3



Fuente: El autor

Es evidente una diferencia en los valores de la corriente drenada por cada sistema, el sistema 2 (ánodos tipo mallas MMO) es el sistema que más drena corriente, esto se puede atribuir a la relación de áreas de los ánodos, esta relación está en el orden de 1: 8, valor que es aproximado a la relación de corriente.

7. CONCLUSIONES

- Los niveles de protección catódica obtenidos en cada uno de los puntos de medición en las láminas, fueron superiores en el sistema de mallas MMO (sistema 2) con respecto al sistema de ánodos perimetrales (sistema 1); dichos niveles de potencial pueden ser atribuidos a una mayor magnitud y a una mejor distribución de la corriente de protección catódica en los sistemas con mallas MMO distribuidas simétricamente debajo del cátodo.
- La magnitud de la corriente drenada por el sistema de mallas MMO (sistema 2) fue superior a la del sistema de ánodos perimetrales (sistema 1). La condición anterior se puede atribuir a la relación de áreas de los ánodos, esta relación está en el orden de 1: 8, valor que es aproximado a la relación de corriente.
- Se evidenció una disminución del nivel de potencial eléctrico en el punto de medición cinco (5), el cual corresponde al punto más distante en el sistema del sistema de ánodos distribuidos (sistema 1) con respecto a los ánodos. La situación anterior puede ser atribuida a un fenómeno de atenuación de la corriente eléctrica desde el punto de drenaje de corriente en los ánodos, hacia el centro de la lámina. La disminución del potencial eléctrico en el centro de la lámina de prueba es consistente con el comportamiento de los sistemas de protección catódica de tanques de almacenamiento, que actualmente se emplean en el sector de los hidrocarburos.
- A pesar de que en los sistemas de protección catódica evaluados se presentaron variaciones en los niveles de protección catódica en los puntos de medición, se garantizó el cumplimiento del criterio de protección adoptado. A

partir de lo anterior se puede inferir que los cálculos de diseño y las configuraciones establecidas durante la etapa de construcción de las celdas de evaluación fueron realizados correctamente.

- Las condiciones operacionales de los sistemas de protección catódica durante las pruebas, en términos de voltaje y corriente de salida de la fuente, variaron con respecto a lo estimado en los cálculos de diseño. La situación anterior puede considerarse normal cuando se diseñan sistemas de protección catódica, en donde se emplean ecuaciones de diseño, que permiten estimar el comportamiento las condiciones de operación del sistema, pero que no necesariamente se ajustan a la realidad; las variaciones mencionadas anteriormente, se incrementan aún más a nivel de laboratorio, debido a que las ecuaciones de cálculo han sido validadas principalmente en campo.

- La metodología de evaluación de sistemas de protección catódica por corriente impresa, para fondos de tanques de almacenamiento a nivel de laboratorio formulada e implementada en el presente proyecto, permitió evaluar simultáneamente el comportamiento de dos (2) sistemas de protección catódica que presentan cálculos de diseño y configuraciones de instalación totalmente diferentes.

- La metodología de evaluación de sistemas de protección catódica formulada en el presente trabajo, es adaptable a la evaluación de otro tipo sistemas de protección catódica, variando parámetros como el área a proteger, geometría de la lámina, electrolito, entre otras.

8. RECOMENDACIONES

- Con el ánimo de continuar profundizando en el comportamiento de los sistemas de protección catódica en tanques de almacenamiento, se recomienda para futuros proyectos incrementar las superficies del cátodo a evaluar, con el objeto de identificar mayores niveles de atenuación de la corriente de protección catódica en la parte central de las láminas de prueba; de igual manera se recomienda incluir en la matriz de experimentos el uso de otro tipo de electrolitos, como agua dulce y suelos homogéneos con diferentes niveles de resistividad eléctrica.
- En futuras evaluaciones de sistemas de protección catódica a nivel de laboratorio o a nivel piloto en campo, se recomienda diseñar y construir sistemas de adquisición de datos (datalogger), para el monitoreo de los valores de corriente y potenciales eléctricos de las estructuras. Los sistemas de adquisición de datos permitirán el monitoreo continuo de las principales variables del sistema de protección catódica y disminuir posibles errores humanos al momento de llevar a cabo los monitoreos de forma manual.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] NACE Standard Recommended Practice RP0193, “External Cathodic Protection of on-grade carbon steel storage tanks bottoms”, revised 2001 (Houston, TX:NACE)
- [2] API RP 651 “Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks”
- [3] CP 2–Cathodic Protection Technician Course Manual NACE International
- [4] CP 3–Cathodic Protection Technologist Course Manual NACE International
- [5] CP 4–Cathodic Protection Specialist Course Manual NACE International
- [6] PEABODY’S, Control of Pipeline Corrosion, Segunda Edición
- [7] MOHAMMED, Ali and BEED, Ali “Titanium Ribbon Anode Grid Type Cathodic Protection System For Above Ground Storage Tank Bottoms With Double Containment - A Case Study CORROSION/99, paper no. 289
- [8] MEIER, Craig K and FITZGERALD III, John H. “Monitoring The Effectiveness Of Cathodic Protection, Leak Detection And The Installation Of Impressed Current Cathodic Protection Under In-Service Above Ground Storage Tanks” CORROSION/99, paper no. 520
- [9] WHITED, Tim “Techniques For Accurate Evaluation Of Aboveground Storage

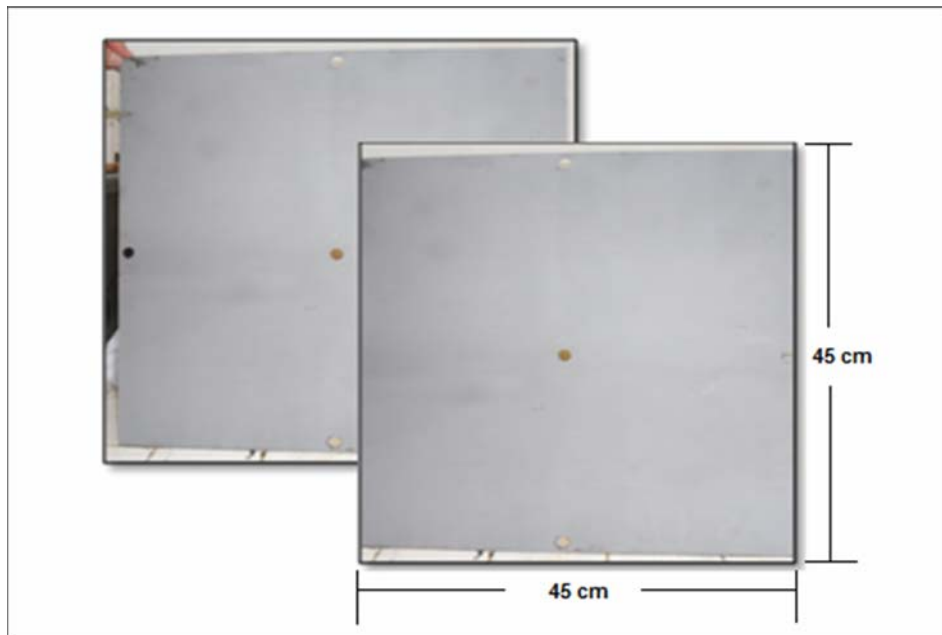
Tank Cathodic Protection System Effectiveness” CORROSION/2000, paper no. 00829

[10] KOSZEWSKI, Louis “Improved Cathodic Protection Testing Techniq For Aboveground Storage Tank Bottoms” CORROSION/2002, paper no. 02109

ANEXOS

Anexo A. *Materiales usados en el montaje de las celdas de evaluación.*

Figura A-1 Láminas de acero ASTM A-36, sanblasteadas: grado metal blanco SSPC-SP5



Fuente: El autor

Figura A-2 Ánodos verticales



Fuente: El autor

Figura A-3 Ánodos tipo malla MMO, soldada con soldadura por



puntos

F

uente: El autor

Figura A-4 Contenedores plásticos con diámetro de 72



cm

Fue

nte: El autor

Figura A-5 Caja de conexiones, parte exterior e



interior

Fuente: El autor

Figura A-6 Fuente Hewleh Packard: 6282A DC Power Suppy, capacidad 12 voltios, 12



amperios

Fuente: El autor

Figura A-7 Electrodo de referencia (Calomel)



Fuente: El autor

Figura A-8 Multímetro



Fuente: El autor

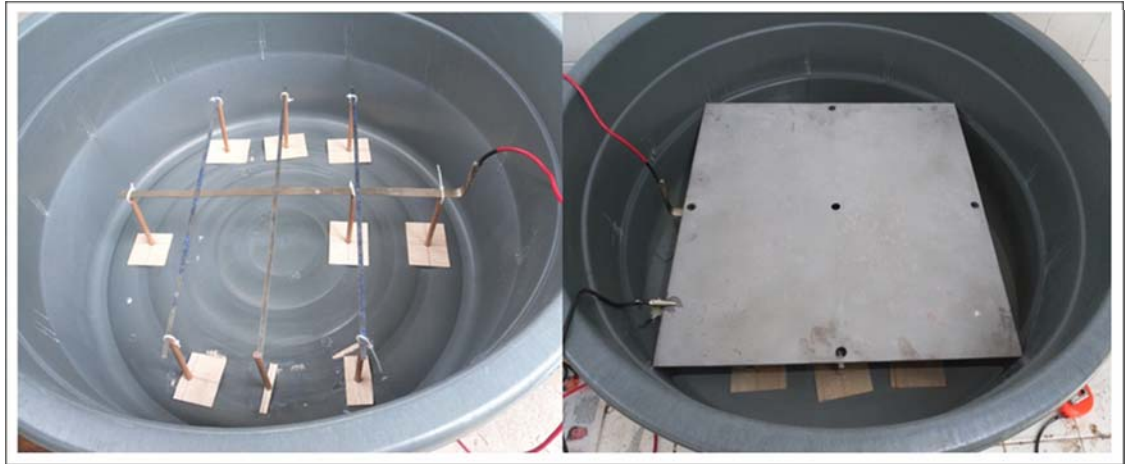
Figura A-9 Cables AWG # 12 y AWG # 18



Fuente: El autor

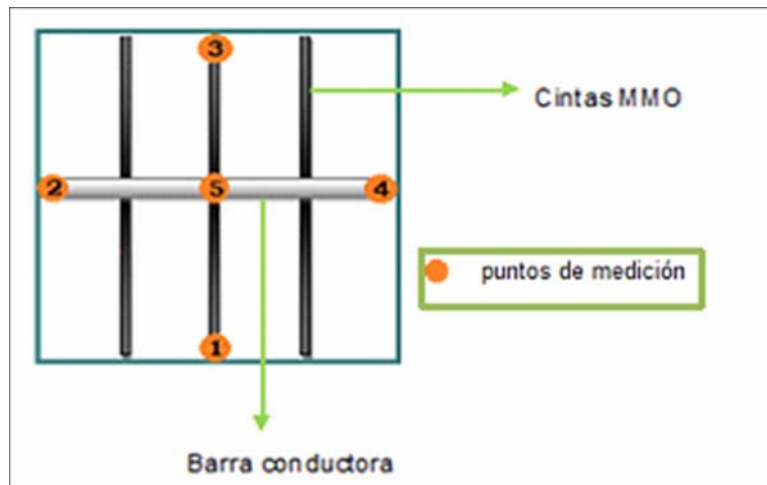
Anexo B. Montaje de las celdas de evaluación

Figura B-1 Montaje de la celda de evaluación usando mallas MMO



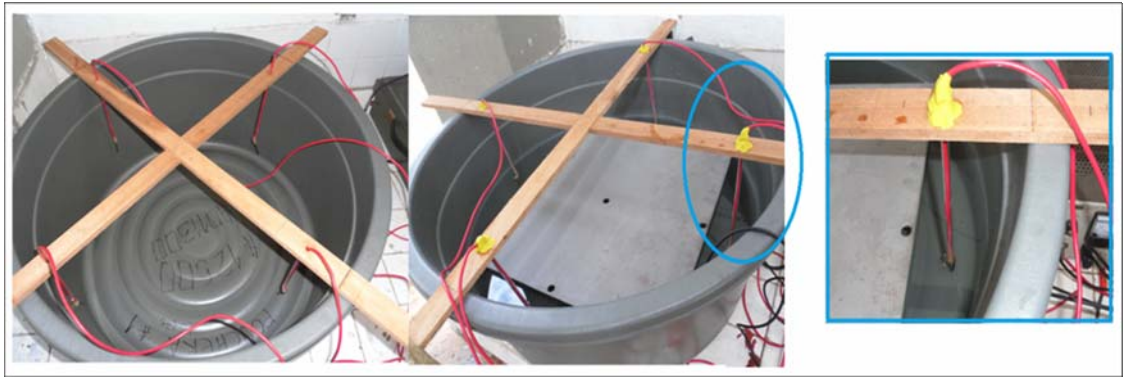
Fuente: El autor

Figura B-2 Esquema de los puntos de medición de potenciales en la celda usando mallas MMO



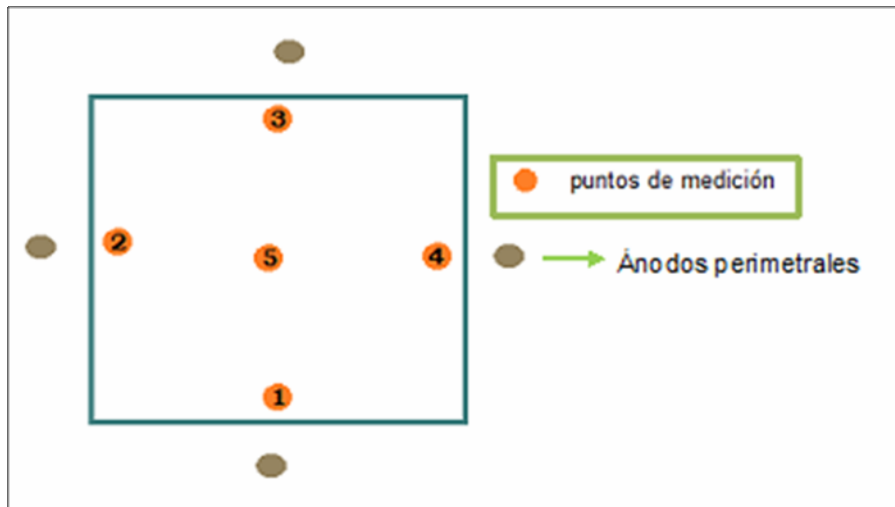
Fuente: El autor

Figura B-3 Montaje de la celda de evaluación usando ánodos perimetrales



Fuente: El autor

Figura B-4 Esquema de los puntos de medición de potenciales en la celda usando ánodos perimetrales



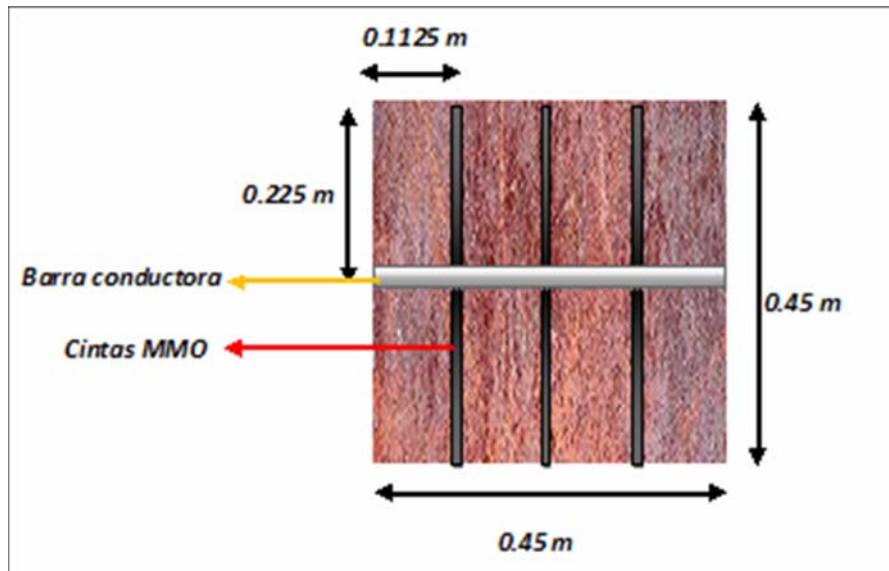
Fuente: El autor

Figura B-5 Celdas de evaluación en marcha



Fuente: El autor

Anexo C. Distribución de la malla MMO



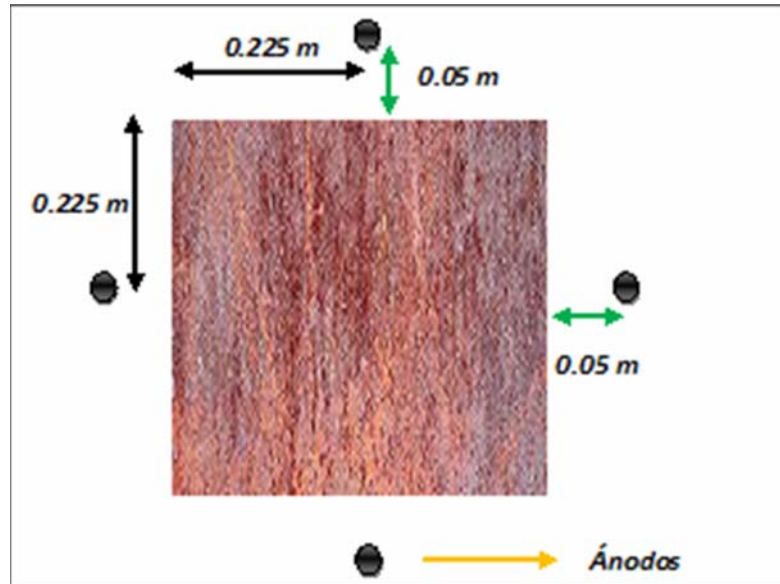
Fuente: El autor

Anexo D. Resumen de los cálculos realizados para el sistema de mallas MMO

DISEÑO DEL SISTEMA PC POR CORRIENTE IMPRESA CON MALLAS MMO		
Variable	Valor	Unidad
1. Cálculo de la corriente requerida para protección Catódica		
Longitud del lado de la lámina cuadrada	0,45	m
Espesor de pared de lámina en contacto con el electrolito	1	mm
Área del fondo de la lámina	0,2025	m ²
Área perimetral del espesor en contacto con el electrolito	0,0018	m ²
Area Total (A)	0,2043	m ²
Densidad de corriente requerida para protección catódica (J)	60	mA/ m ²
CORRIENTE REQUERIDA PARA PROTECCIÓN CATÓDICA (I)	12,26	m A
2. Cálculo de la longitud total de cinta anódica requerida (L)		
Corriente requerida para protección catódica (I)	12,26	m A
Corriente requerida para protección catódica (I)	0,01226	A
Corriente drenada por unidad de longitud recomendada por el fabricante de la cinta	0,016	A/m
Longitud total de cinta anódica requerida (L)	0,77	m
Longitud total de cinta anódica requerida (L)	77	cm
3. Cálculo de la resistencia de la malla anódica (RA)		
Resistividad del electrolito	25	ohm*cm
Longitud total de la cinta anódica utilizada (L)	1,35	m
Profundidad de instalación de la cinta con respecto a la lámina (h)	0,01	m
Espaciamiento entre cintas medido entre centros (S)	0,11	m
Ancho de la cinta anódica (w)	0,0064	m
Resistencia del sistema anódico (RA)	0,051	Ohmios
3. Cálculo de la resistencia total del circuito		
Resistencial eléctrica lineal del cable AWG #12 THWN	0,00520864	ohm/m
Longitud total de los cables del circuito	10,5	m
Resistencia de los cables de conexión (RCC)	0,03	Ohmios
Resistencia del cátodo (RC)	1	Ohmios
Resistencia total del circuito (RA+RCC+RC)	1,1	Ohmios
4. Cálculo del voltaje de la fuente (V)		
Corriente Requerida para protección catódica (I)	12,26	m A
Resistencia total del circuito (RT)	1,1	Ohmios
Fuerza contraelectromotriz teorica (Backvoltage)	2	Voltios
VOLTAJE DE SALIDA DE LA FUENTE (V)	2,01	Voltios

Fuente: El autor

Anexo E. Distribución de los ánodos verticales



Fuente: El autor

Anexo F. Resumen de los cálculos realizados para el sistema de ánodos

convencionales (verticales)

DISEÑO DEL SISTEMA PC POR CORRIENTE IMPRESA ÁNODOS CONVENCIONALES		
Variable	Valor	Unidad
1. Cálculo de la corriente requerida para protección Catódica		
Longitud del lado de la lámina cuadrada	0,45	m
Espesor de pared de lámina en contacto con el electrolito	1	mm
Área del fondo de la lámina	0,2025	m ²
Área perimetral del espesor en contacto con el electrolito	0,0018	m ²
Area Total (A)	0,2043	m ²
Densidad de corriente requerida para protección catódica (J)	60	mA/ m ²
CORRIENTE REQUERIDA PARA PROTECCIÓN CATÓDICA (I)	12,26	m A
2. Cálculo de la resistencia del sistema Anódico (4 ánodos en posición vertical)		
Resistividad del electrolito	25	ohm*cm
Longitud de cada ánodo	2,5	cm
Diámetro de cada ánodo	0,3	cm
Separación entre ánodos	45	cm
Cantidad de ánodos	4	
RESISTENCIA DEL SISTEMA ANODICA PARA 4 ANODOS	1,316	Ohmios
3. Cálculo de la resistencia de los cables de conexión		
Resistencial eléctrica lineal del cable AWG #12 THWN	0,00520864	ohm/m
Longitud total de los cables del circuito	10,5	m
Resistencia de los cables de conexión (RCC)	0,05	Ohmios
Resistencia del cátodo (RC)	1	Ohmios
Resistencia total del circuito (RA+RCC+RC)	2,4	Ohmios
4. Cálculo del voltaje de la fuente (V)		
Corriente Requerida para protección catódica (I)	12,26	m A
Resistencia total del circuito (RT)	2,4	Ohmios
Fuerza contraelectromotriz teorica (Backvoltage)	2	Voltios
VOLTAJE DE SALIDA DE LA FUENTE (V)	2,03	Voltios

Fuente: El autor

Anexo G. Datos obtenidos en el ensayo 1

La tabla G-1 muestra los resultados de los potenciales Vs el tiempo de evaluación obtenidos en el ensayo 1.

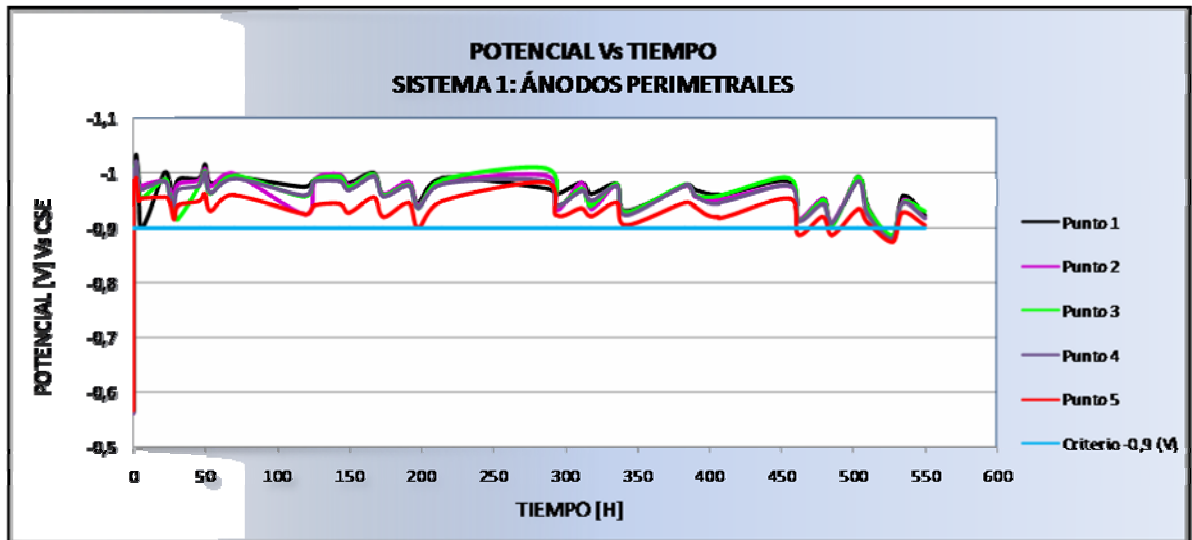
Tabla G-1. Potenciales obtenidos en el ensayo 1

TIEMPO (Horas)	SISTEMA 1 ÁNODOS CONVENCIONALES Puntos de medición VDC Cu/CuSO4 (V)					SISTEMA 2 MALLAS MMO Puntos de medición VDC Cu/CuSO4 (V)					VDC DE LA FUENTE (V)	I1 (mA)	I2 (mA)
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5			
	0	-0,561	-0,561	-0,562	-0,561	-0,566	-0,538	-0,545	-0,55	-0,553			
0	-0,999	-1,002	-1,006	-1,003	-0,983	-1,045	-1,002	-1,036	-1,011	-1,053	3,322	0,208	0,841
1	-0,997	-0,991	-0,999	-0,987	-0,976	-1,049	-0,993	-1,03	-0,995	-1,057	3,403	0,208	0,974
2	-1,031	-1,011	-1,016	-1,02	-0,988	-1,035	-0,998	-1,027	-1,003	-1,07	3,197	0,198	1,335
4	-0,98	-0,971	-0,971	-0,971	-0,948	-1,028	-0,968	-1,013	-0,978	-1,04	3,03	0,231	1,066
6	-0,899	-0,975	-0,953	-0,969	-0,952	-1,055	-0,979	-1,018	-0,979	-1,018	3,172	0,188	1,092
22	-0,998	-0,986	-0,987	-0,984	-0,955	-1,089	-0,989	-1,043	-0,995	-1,065	3,18	0,198	1,075
25	-0,981	-0,971	-0,96	-0,959	-0,944	-1,06	-0,989	-1,022	-0,985	-1,061	3,17	0,194	1,076
28	-0,955	-0,954	-0,942	-0,94	-0,914	-1,043	-0,981	-1,013	-0,984	-1,061	3,192	0,224	1
31	-0,987	-0,978	-0,916	-0,967	-0,94	-1,042	-0,984	-1,018	-0,983	-1,049	3,215	0,284	0,955
46	-0,989	-0,985	-0,975	-0,975	-0,947	-1,066	-1,006	-1,035	-1,002	-1,061	3,175	0,205	0,73
50	-1,014	-1,006	-1,002	-1	-0,961	-1,014	-0,975	-0,985	-0,976	-1,023	3,205	0,206	1,11
54	-0,98	-0,975	-0,961	-0,963	-0,931	-1,055	-0,955	-1,033	-0,951	-1,063	3,155	0,228	1,526
70	-0,992	-0,997	-0,993	-0,988	-0,959	-1,103	-1,001	-1,095	-0,992	-1,091	3,177	0,237	1,362
119	-0,973	-0,924	-0,956	-0,959	-0,924	-1,005	-0,923	-0,985	-0,911	-1,024	3,113	0,157	0,904
126	-0,987	-0,986	-0,985	-0,983	-0,94	-1,002	-0,895	-0,988	-0,893	-1,01	3,225	0,25	1,313
143	-0,993	-0,995	-0,991	-0,984	-0,943	-1,015	-0,922	-0,988	-0,917	-1,014	3,282	0,29	1,115
150	-0,98	-0,976	-0,973	-0,967	-0,927	-0,963	-0,867	-0,93	-0,852	-0,964	3,297	0,196	1,16
167	-0,999	-0,997	-0,997	-0,993	-0,955	-1,016	-0,942	-0,998	-0,93	-1,021	3,305	0,244	1,11
174	-0,96	-0,96	-0,959	-0,955	-0,92	-0,984	-0,911	-0,969	-0,895	-0,995	3,288	0,22	1,165
191	-0,979	-0,983	-0,978	-0,975	-0,944	-1,001	-0,93	-0,993	-0,918	-1,005	3,286	0,25	1,09
198	-0,945	-0,941	-0,936	-0,935	-0,9	-0,951	-0,876	-0,911	-0,865	-0,947	3,271	0,176	1,055
215	-0,99	-0,981	-0,986	-0,979	-0,948	-0,961	-0,902	-0,955	-0,891	-0,961	3,252	0,241	0,865
287	-0,97	-0,994	-1,007	-0,984	-0,981	-0,925	-0,982	-1,024	-0,965	-1,02	3,304	0,197	0,806
294	-0,96	-0,932	-0,94	-0,94	-0,921	-0,949	-0,894	-0,928	-0,88	-0,939	3,368	0,261	0,831
311	-0,982	-0,981	-0,97	-0,966	-0,934	-0,953	-0,911	-0,943	-0,9	-0,973	3,338	0,26	0,899
318	-0,96	-0,934	-0,939	-0,949	-0,92	-0,993	-0,925	-0,964	-0,912	-0,987	3,254	0,256	1,047
335	-0,979	-0,978	-0,978	-0,975	-0,944	-0,983	-0,927	-0,976	-0,928	-0,981	3,357	0,178	0,838
342	-0,93	-0,927	-0,926	-0,923	-0,903	-0,981	-0,926	-0,975	-0,915	-0,992	3,41	0,166	0,875
383	-0,977	-0,975	-0,978	-0,977	-0,944	-1,036	-0,982	-1,013	-0,967	-1,028	3,397	0,172	0,912
390	-0,969	-0,956	-0,958	-0,957	-0,937	-0,954	-0,912	-0,955	-0,888	-0,983	3,416	0,188	0,94
407	-0,959	-0,951	-0,957	-0,944	-0,918	-0,911	-0,877	-0,918	-0,875	-0,926	3,403	0,153	0,743
455	-0,984	-0,975	-0,989	-0,977	-0,952	-0,923	-0,864	-0,883	-0,865	-0,909	3,424	0,18	0,625
462	-0,915	-0,916	-0,914	-0,912	-0,886	-0,882	-0,857	-0,88	-0,836	-0,905	3,454	0,175	0,618
479	-0,952	-0,953	-0,95	-0,943	-0,92	-0,886	-0,843	-0,879	-0,831	-0,883	3,477	0,203	0,624
486	-0,907	-0,91	-0,905	-0,908	-0,886	-0,822	-0,786	-0,815	-0,779	-0,817	3,472	0,192	0,635
503	-0,988	-0,992	-0,991	-0,984	-0,933	-0,797	-0,755	-0,789	-0,747	-0,793	3,486	0,206	0,558
510	-0,938	-0,935	-0,936	-0,925	-0,909	-0,783	-0,748	-0,771	-0,745	-0,787	3,456	0,204	0,617
527	-0,878	-0,881	-0,886	-0,88	-0,873	-0,812	-0,774	-0,816	-0,77	-0,789	3,503	0,208	0,542
534	-0,957	-0,949	-0,946	-0,944	-0,926	-0,8084	-0,779	-0,8	-0,765	-0,808	3,48	0,225	0,604
550	-0,921	-0,917	-0,93	-0,918	-0,904	-0,91	-0,872	-0,926	-0,873	-0,913	3,498	0,231	0,552

Fuente: El autor

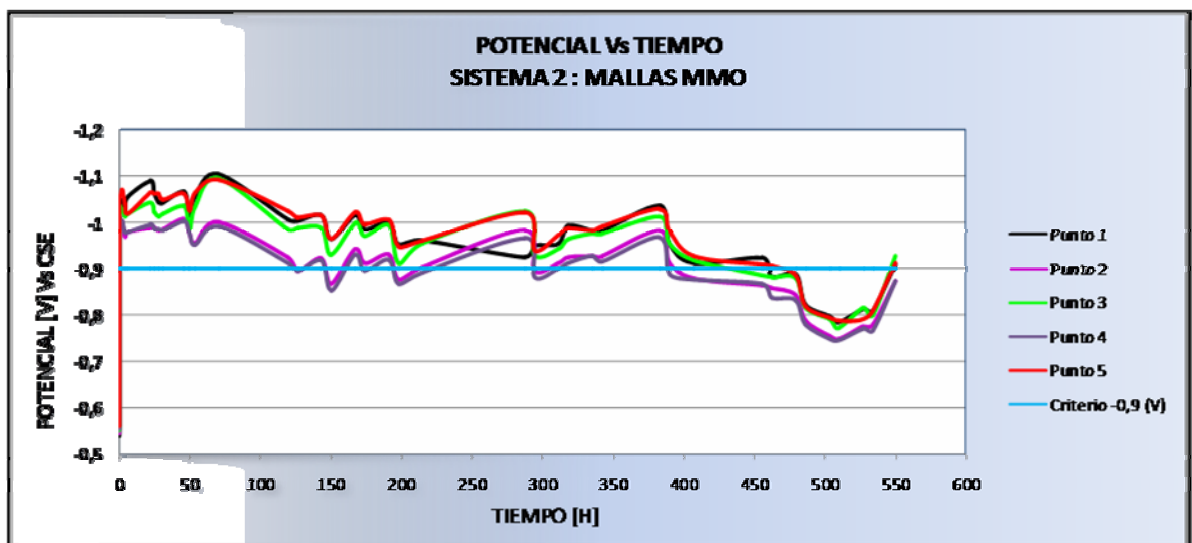
Las gráficas G-2 muestra los potenciales obtenidos Vs el tiempo de evaluación del sistema 1: Protección catódica usando ánodos verticales, y la gráfica G-3 los potenciales obtenidos Vs el tiempo de evaluación del sistema 2: protección catódica usando ánodos tipo malla MMO. Del ensayo 1

Gráfica G-2. Potenciales obtenidos en el sistema 1: ánodos verticales, ensayo 1



Fuente: El autor

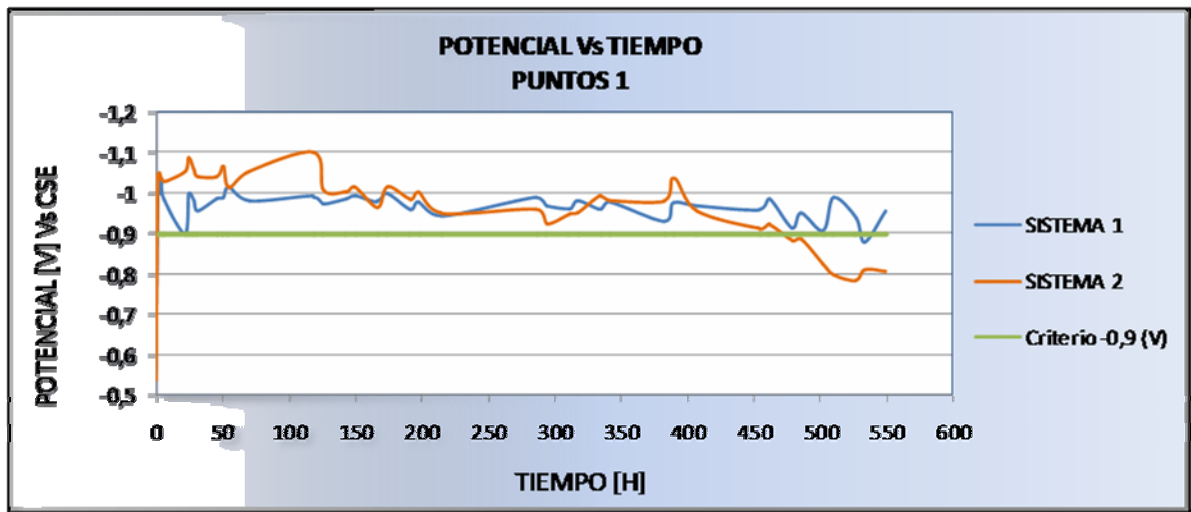
Gráfica G-3. Potenciales obtenidos en el sistema 2: ánodos tipo mallas MMO, ensayo 1



Fuente: El autor

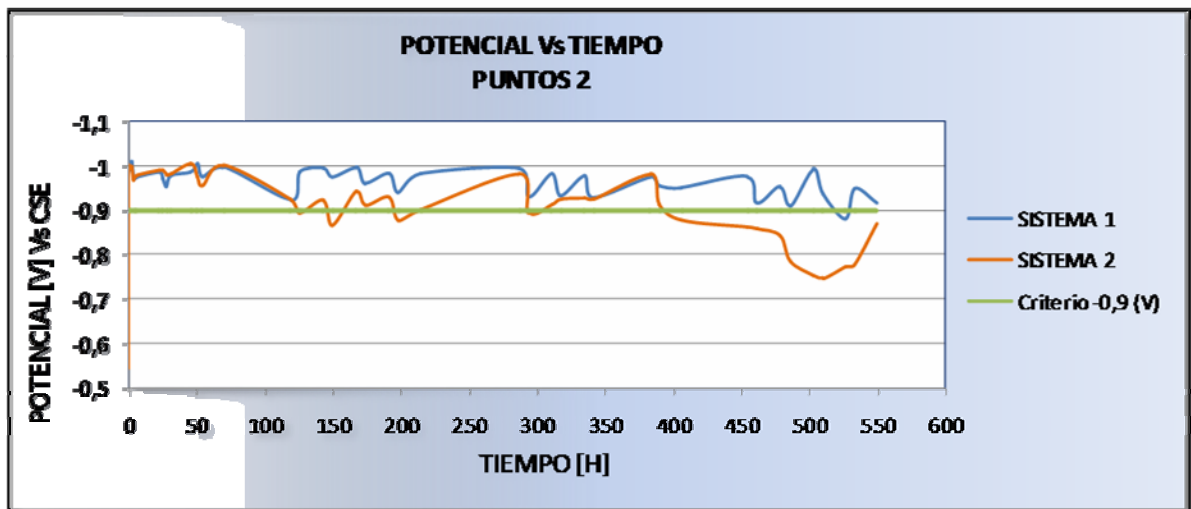
Las gráficas G-4, G-5, G-6, G-7 y G-8 muestran la comparación punto a punto de los sistemas de protección catódica evaluados. Del ensayo 1

Gráfica G-4. Comparación de los sistemas en los puntos 1



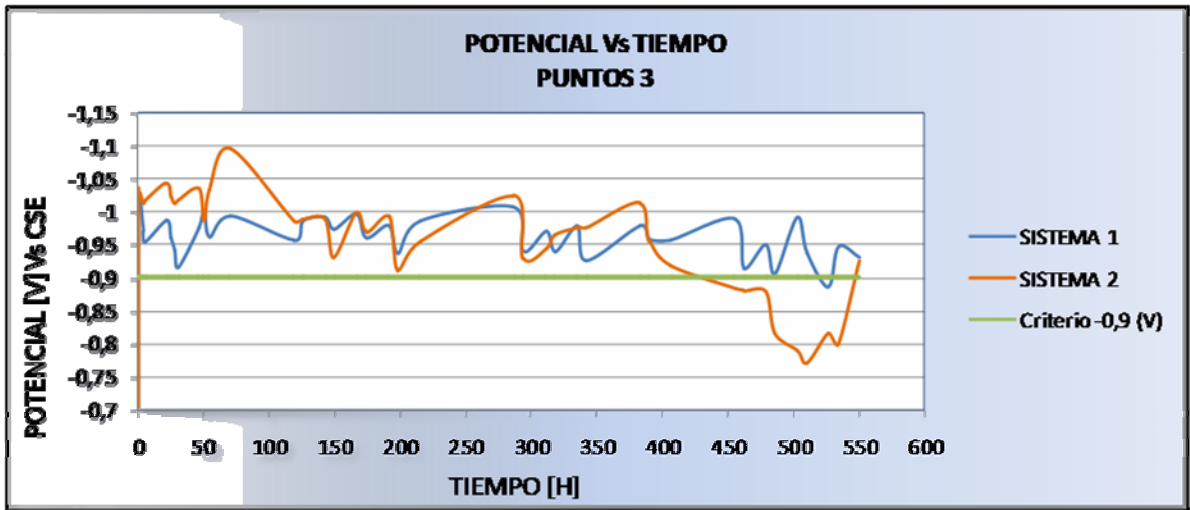
Fuente: El autor

Gráfica G-5. Comparación de los sistemas en los puntos 2



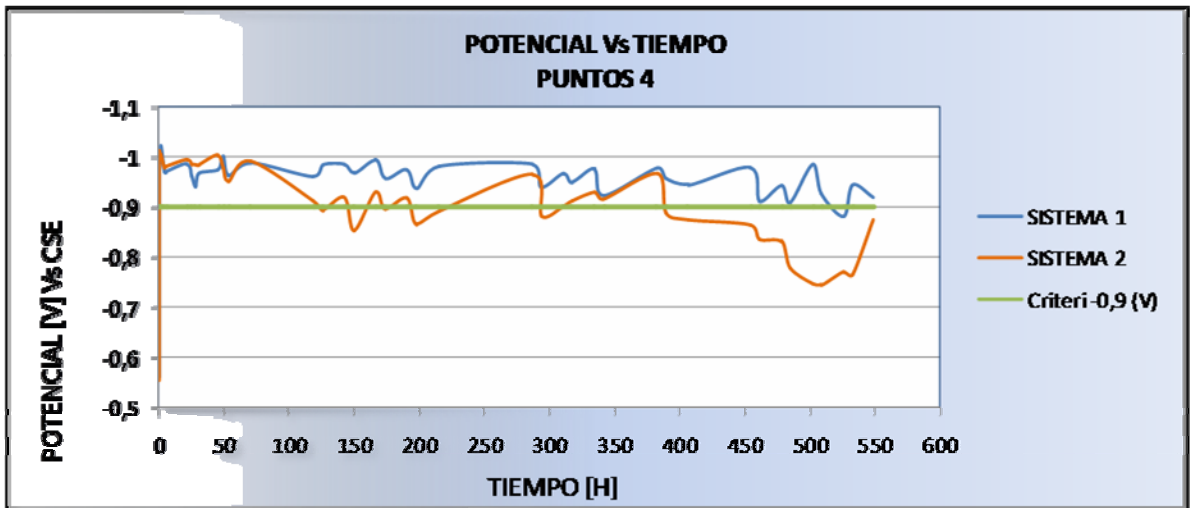
Fuente: El auto

Gráfica G-6. Comparación de los sistemas en los puntos 3



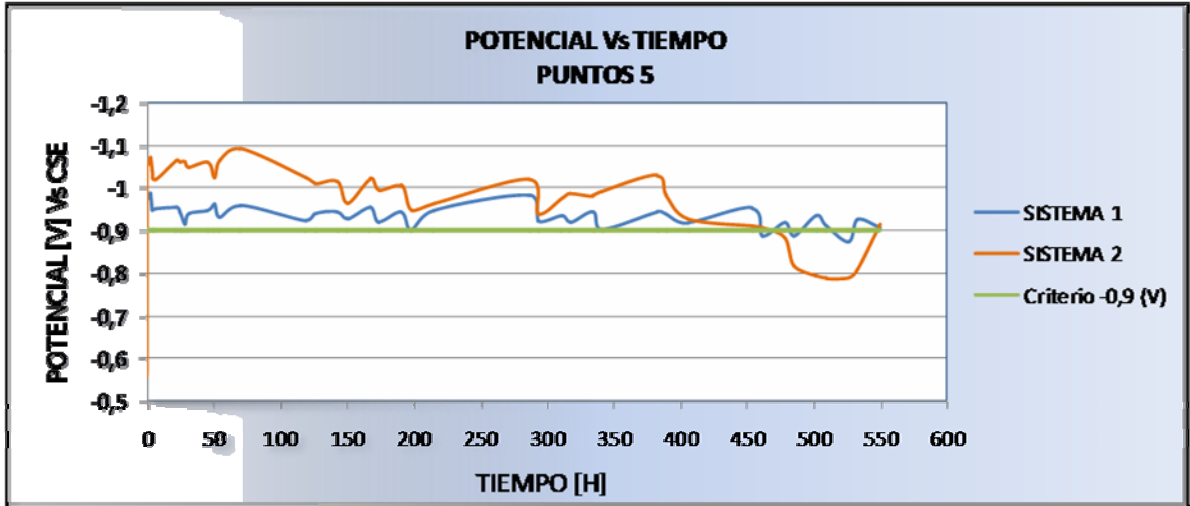
Fuente: El autor

Gráfica G-7. Comparación de los sistemas en los puntos 4



Fuente: El autor

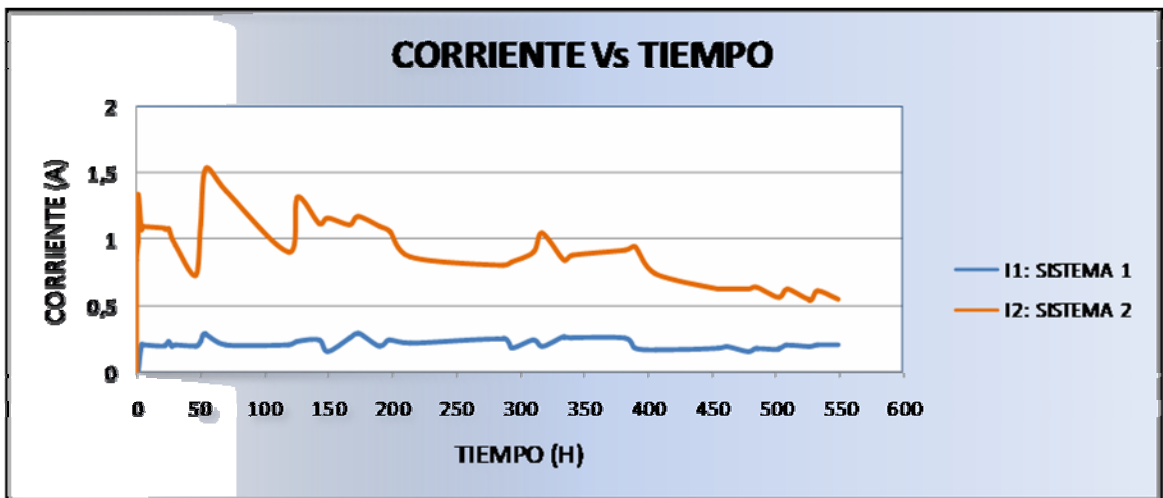
Gráfica G-8. Comparación de los sistemas en los puntos 5



Fuente: El autor

La gráfica G-9 muestra la corriente drenada por cada sistema Vs el tiempo de evaluación. Del ensayo 1

Gráfica G-9. Corriente drenada por cada sistema de evaluación



Fuente: El autor

Anexo H. Datos obtenidos en el ensayo 2

La tabla H-1 muestra los resultados de los potenciales Vs el tiempo de evaluación obtenidos en el ensayo 2.

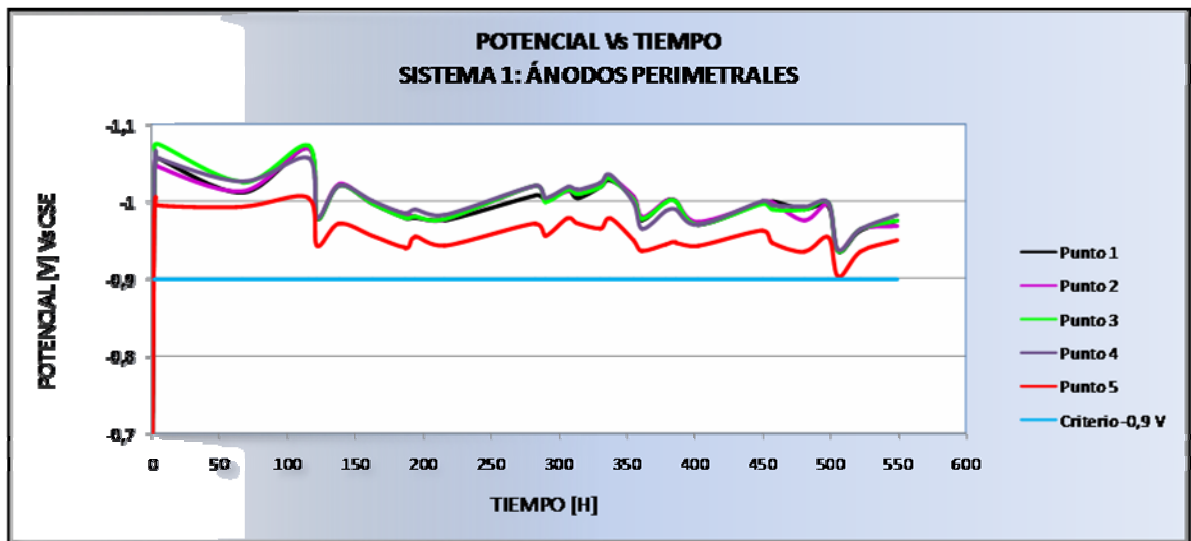
Tabla H-1. Potenciales obtenidos en el ensayo 2

TIEMPO (Horas)	SISTEMA 1 ÁNODOS CONVENCIONALES					SISTEMA 2 MALLAS MMO					VDC DE LA FUENTE (V)	I1 (A)	I2 (A)
	Puntos de medición VDC Cu/CuSO4 (V)					Puntos de medición VDC Cu/CuSO4 (V)							
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5			
0	-0,534	-0,533	-0,531	-0,528	-0,529	-0,502	-0,507	-0,511	-0,513	-0,513	0	0	0
2	-1,03	-1,025	-1,02	-1,02	-0,981	-1,125	-1,032	-1,105	-1,045	-1,099	3,945	0,466	2,515
3	-1,058	-1,058	-1,058	-1,065	-1,006	-1,103	-1,051	-1,095	-1,075	-1,088	3,983	0,558	2,348
4	-1,057	-1,046	-1,074	-1,057	-0,995	-1,103	-1,019	-1,093	-1,03	-1,097	3,98	0,538	2,302
67	-1,012	-1,014	-1,025	-1,026	-0,993	-1,081	-1,028	-1,095	-1,019	-1,075	3,96	0,306	1,465
115	-1,069	-1,069	-1,073	-1,056	-1,005	-1,117	-1,056	-1,08	-1,031	-1,095	3,964	0,529	2,273
122	-0,978	-0,98	-0,978	-0,979	-0,942	-0,981	-0,921	-0,975	-0,902	-0,977	3,963	0,463	1,868
138	-1,021	-1,023	-1,02	-1,021	-0,971	-1,013	-0,965	-1,008	-0,948	-1,007	3,94	0,386	1,586
163	-0,996	-0,997	-0,997	-1	-0,955	-0,979	-0,945	-0,978	-0,936	-0,982	3,963	0,382	1,356
187	-0,978	-0,984	-0,978	-0,985	-0,94	-0,959	-0,923	-0,925	-0,908	-0,958	3,965	0,249	1,38
194	-0,979	-0,981	-0,98	-0,99	-0,954	-0,964	-0,92	-0,946	-0,941	-0,955	3,96	0,301	1,46
216	-0,976	-0,977	-0,977	-0,983	-0,943	-0,968	-0,944	-0,969	-0,93	-0,975	4,11	0,286	1,438
283	-1,008	-1,02	-1,02	-1,021	-0,971	-0,971	-0,923	-0,947	-0,907	-0,966	4,1	0,294	1,276
290	-1,003	-1,003	-0,999	-1,004	-0,955	-0,965	-0,91	-0,95	-0,887	-0,93	4,13	0,2861	1,325
307	-1,015	-1,014	-1,015	-1,018	-0,978	-1,035	-0,995	-1,016	-0,975	-1,035	4,04	0,261	1,34
314	-1,005	-1,01	-1,01	-1,015	-0,972	-0,992	-0,957	-0,975	-0,937	-0,985	4,03	0,298	1,26
331	-1,018	-1,021	-1,018	-1,024	-0,965	-1,015	-0,977	-1,015	-0,961	-1,021	4,08	0,299	1,463
338	-1,028	-1,031	-1,03	-1,035	-0,978	-1,015	-0,955	-1	-0,96	-1,008	4,1	0,24	1,54
355	-1,006	-1,006	-1,003	-0,999	-0,949	-1,027	-0,995	-1,028	-0,977	-1,027	4,15	0,271	1,415
362	-0,976	-0,98	-0,977	-0,965	-0,936	-1,007	-0,955	-1,008	-0,936	-1,005	4,16	0,28	1,43
379	-1	-1	-0,999	-0,987	-0,944	-1,043	-1,01	-1,042	-0,989	-1,042	4,08	0,27	1,446
386	-1	-1,001	-1	-0,99	-0,947	-1,01	-0,966	-1,008	-0,953	-1,013	4,06	0,21	1,31
403	-0,97	-0,973	-0,97	-0,97	-0,942	-1,012	-0,964	-0,997	-0,934	-1,013	4,15	0,266	1,287
451	-0,999	-0,999	-0,997	-1,001	-0,962	-0,999	-0,963	-0,996	-0,951	-0,998	4,1	0,241	1,135
458	-1	-0,998	-0,99	-0,995	-0,947	-0,983	-0,932	-0,965	-0,972	-0,978	4,09	0,235	1,206
482	-0,99	-0,975	-0,99	-0,993	-0,935	-0,993	-0,961	-0,991	-0,941	-0,995	4,12	0,304	1,133
499	-0,994	-0,995	-0,998	-0,998	-0,954	-0,967	-0,954	-0,969	-0,92	-0,973	4,12	0,217	1,077
506	-0,935	-0,936	-0,936	-0,938	-0,903	-0,885	-0,836	-0,857	-0,803	-0,867	4,11	0,216	1,056
523	-0,963	-0,965	-0,964	-0,964	-0,935	-0,989	-0,953	-0,987	-0,93	-0,985	4,08	0,255	1,019
550	-0,975	-0,969	-0,975	-0,983	-0,949	-0,958	-0,925	-0,956	-0,907	-0,96	4,08	0,239	1,019

Fuente: El autor

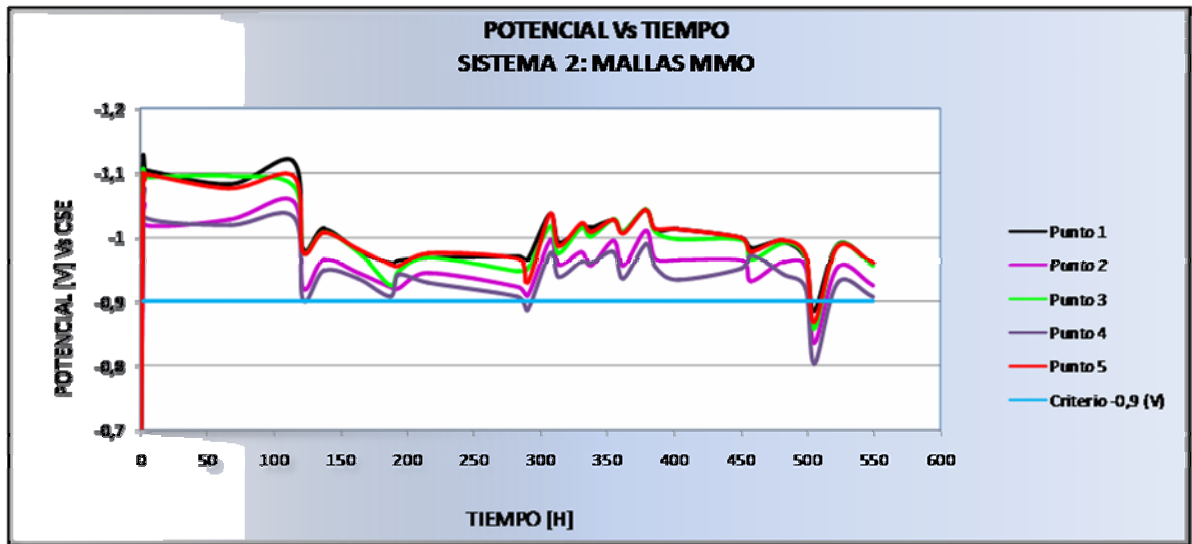
Las gráficas H-2 muestra los potenciales obtenidos Vs el tiempo de evaluación del sistema 1: Protección catódica usando ánodos verticales, y la gráfica H-3 los potenciales obtenidos Vs el tiempo de evaluación del sistema 2: protección catódica usando ánodos tipo malla MMO. Del ensayo 2

Gráfica H-2. Potenciales obtenidos en el sistema 1: ánodos verticales, ensayo 2



Fuente: El autor

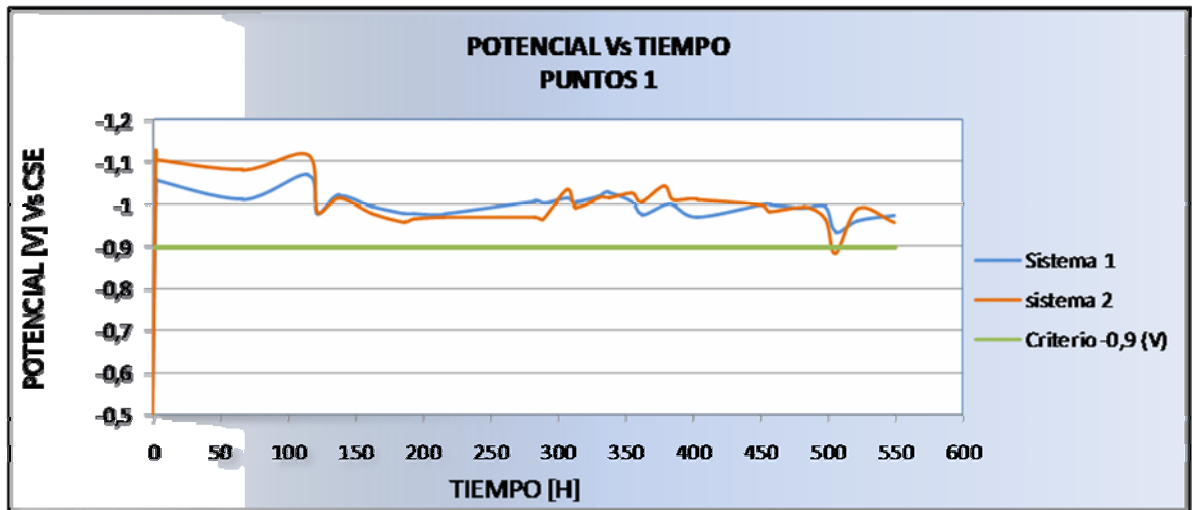
Gráfica H-3. Potenciales obtenidos en el sistema 2: ánodos tipo mallas MMO, ensayo 2



Fuente: El autor

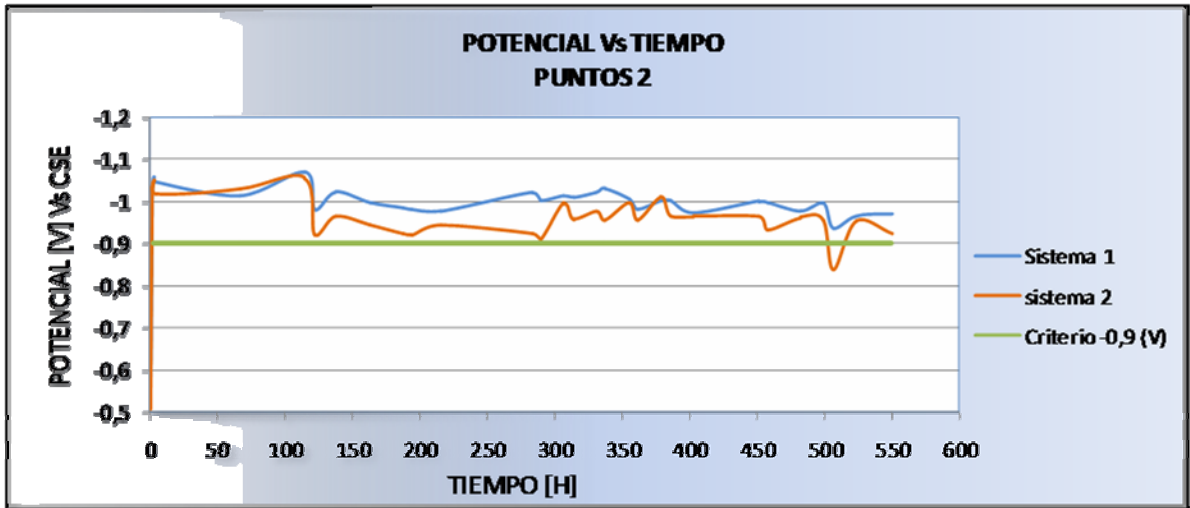
Las gráficas H-4, H-5, H-6, H-7 y H-8 muestran la comparación punto a punto de los sistemas de protección catódica evaluados. Del ensayo 2

Gráfica H-4. Comparación de los sistemas en los puntos 1



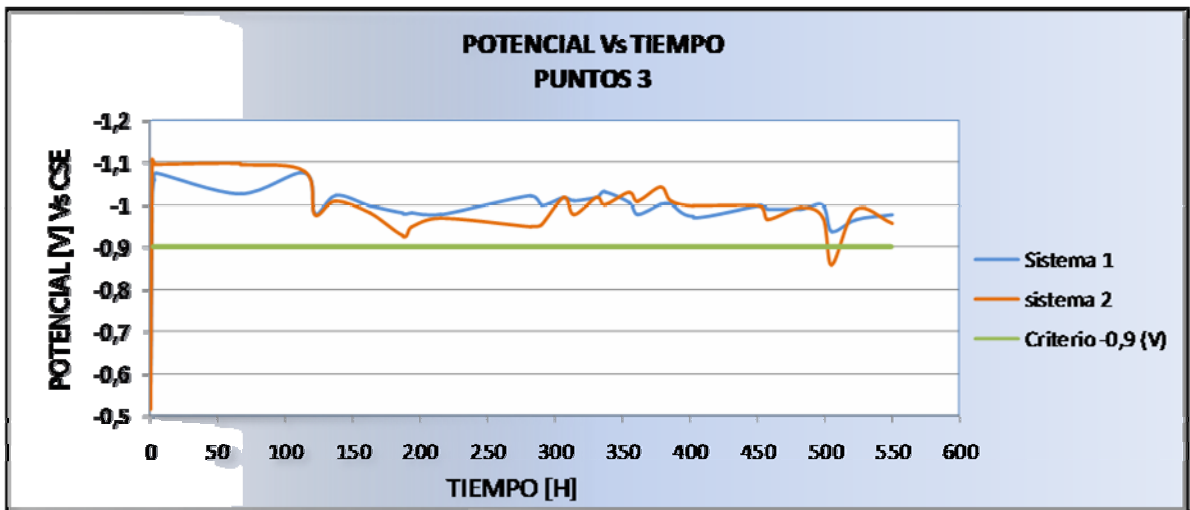
Fuente: El autor

Gráfica H-5. Comparación de los sistemas en los puntos 2



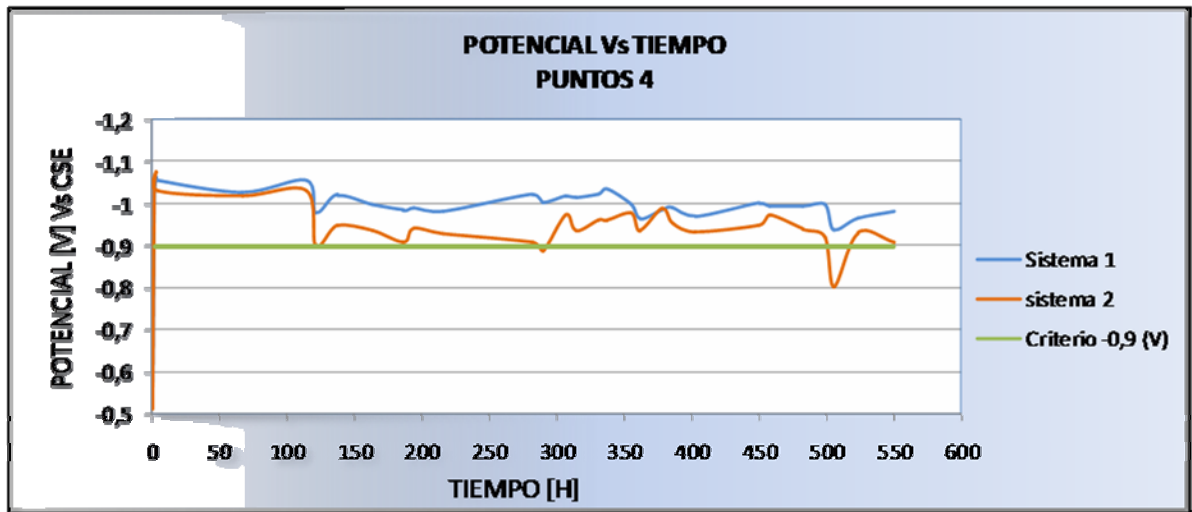
Fuente: El autor

Gráfica H-6. Comparación de los sistemas en los puntos 3



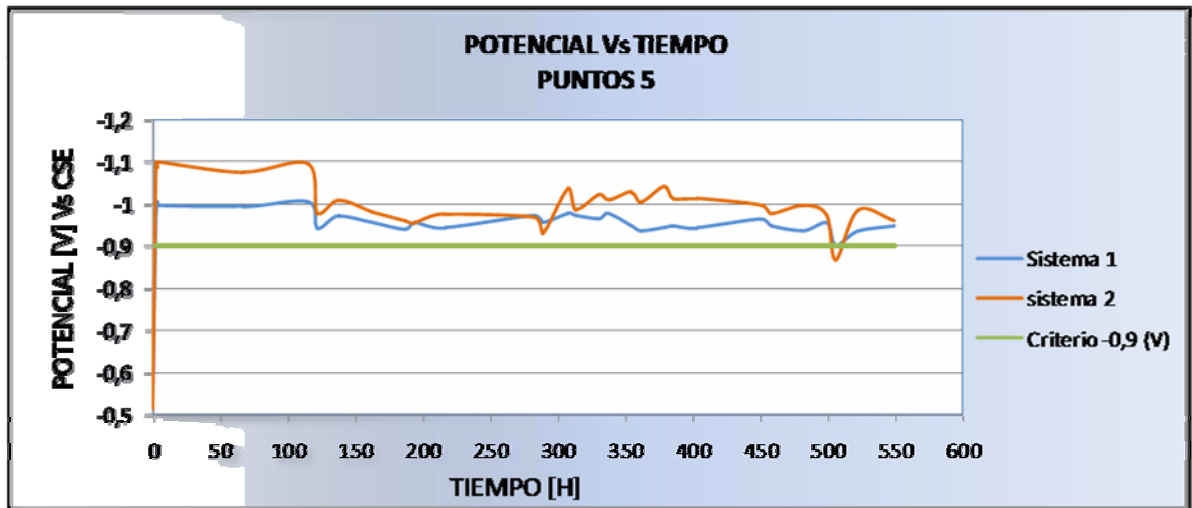
Fuente: El autor

Gráfica H-7. Comparación de los sistemas en los puntos 4



Fuente: El autor

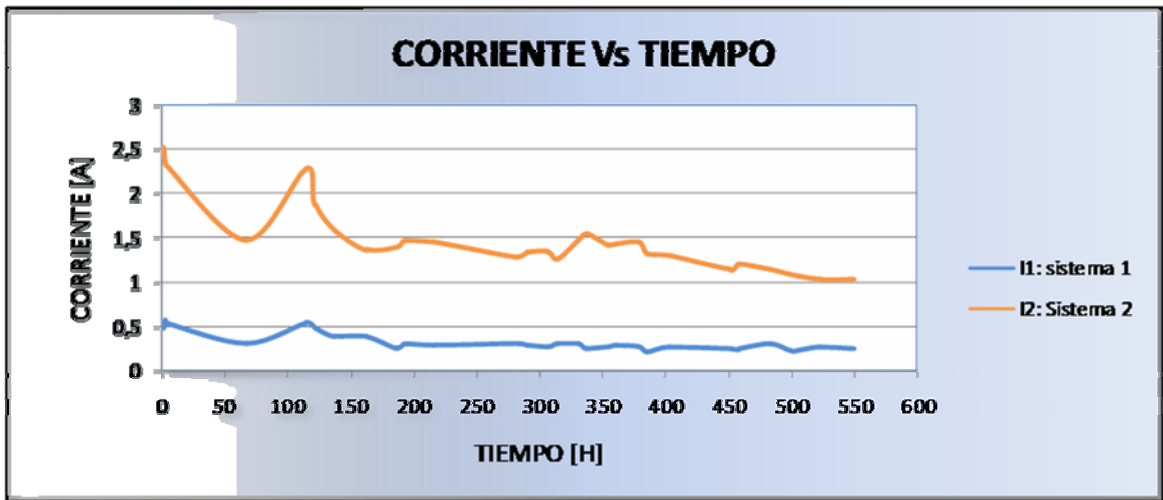
Gráfica H-8. Comparación de los sistemas en los puntos 5



Fuente: El autor

La gráfica H-9 muestra la corriente drenada por cada sistema Vs el tiempo de evaluación. Del ensayo 2

Gráfica H-9. Corriente drenada por cada sistema de evaluación



Fuente: El autor