

**INVESTIGACIÓN EN OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN  
CATÓDICA PARA BUQUES QUE OPERAN EN ZONAS MARINAS TROPICALES**

POR JOSE ALFREDO MORALES TORRES.

Ingeniero Metalurgico.

COTECMAR. Colombia, Dirección de Investigación Desarrollo e Innovacion,

Mail: [api-cyt@cotecmar.com](mailto:api-cyt@cotecmar.com) TEL: (571) 3426786 FAX (571) 2439558

La Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial “COTECMAR” en su sistema de innovación para la industria astillera, tomó la bandera de la problemática de la corrosión en las áreas marinas tropicales estructurando el programa de investigación Manejo Integral de la Corrosión Marina – “MIC”. Es así como al establecer el objetivo de dicho programa se propuso desarrollar tecnologías para mitigar integralmente los impactos de este fenómeno en el desempeño de las embarcaciones que navegan en las zonas tropicales marinas, como lo son el Caribe y el Pacífico Norte. Desde un principio el programa MIC se ha dado a la tarea de recopilar información de la problemática de la corrosión marina desde el punto de vista de integridad en las embarcaciones, información que por demás es bastante escasa, así como los trabajos de investigación sobre el tema en aguas tropicales; así mismo se ha propuesto inicialmente estudiar y caracterizar esta problemática mediante la realización de tres proyectos de investigación como sigue:; 1) Control de la corrosión en tuberías que transportan agua de mar mediante el diseño y construcción de sistemas de protección de la corrosión por medio electroquímico, 2) Evaluación de la efectividad anti-incrustante de los recubrimientos aplicados sobre acero ASTM-A-131 Grado A de embarcaciones que operan en zonas marinas tropicales y 3) Optimización del sistema de Protección Catódica por ánodos de sacrificio para la protección contra la corrosión en la obra viva en buques y pequeñas embarcaciones que operan en zonas marinas tropicales, en el cual se aborda el estudio del entendimiento y optimización de los sistemas de la protección catódica por ánodos de sacrificio y cuyos resultados se proponen ser presentados en congreso Panamericano de ingeniería Naval, Transporte Marítimo e ingeniería portuaria XIX COPINAVAL.

## **INTRODUCCIÓN**

La aplicación de la técnica de protección catódica por el método de ánodos de sacrificio para buques y embarcaciones pequeñas, requiere de un claro conocimiento de los mecanismos de acción de este sistema de control para poder obtener resultados eficaces. Es así como hoy en día no esta suficientemente claro, como para asegurar el eficiente desempeño de estos sistemas de control de la Corrosión.

### **MARCO TEORICO**

La corrosión es la tendencia que tienen los metales a volver a su estado combinado; es decir, al mismo estado en que se encuentran en la naturaleza, en forma de óxidos, hidróxidos y sales.

La corrosión también puede definirse como el ataque destructivo de un metal, debido a procesos de oxidación electroquímica en el medio ambiente que le rodea.

En condiciones normales de temperatura los problemas de corrosión son un fenómeno electroquímico que para existir requiere la concurrencia de tres factores: 1) ánodo o superficie anódica, 2) cátodo o superficie catódica y, 3) electrolito.

Estos tres factores forman la pila de corrosión:

- 1) El ánodo o zona anódica corresponde a la zona metálica más electronegativa. De ella sale la corriente al electrolito, provocando su corrosión.
- 2) El cátodo o zona catódica corresponde a la zona metálica más electropositiva. En ella entra la corriente del electrolito, permaneciendo inalterada.
- 3) El electrolito actúa como cable conductor de corriente.

Por tanto, para evitar este tipo de corrosión bastará con anular uno de los tres factores definidos anteriormente.

Si se encuentra un metal cuyo potencial sea más electronegativo que el potencial de las zonas anódicas de la superficie metálica que se quiere proteger y se unen eléctricamente a ella, se forma una pila, en la que la nueva zona anódica es el metal elegido y en la que se produce la corrosión.

De esta forma se ha creado una pila galvánica cuya zona anódica (zona de corrosión) es la elegida previamente, mientras que el resto de superficie forma la zona catódica que permanece inalterable o protegida.

Al corroerse el metal elegido, se va deteriorando o sacrificando en beneficio de la estructura a proteger (ánodo de sacrificio).

No todos los metales, independientemente de su electronegatividad, se pueden utilizar en la industria como ánodos de sacrificio, ya que para dicha función tienen que cumplir una serie de condiciones y tener ciertas características. Normalmente se utilizan aleaciones de zinc, aleaciones de aluminio y aleaciones de magnesio (en resistividades de electrolitos altos), que cumplen con las normas vigentes.

La protección catódica de un metal determinado, consiste en disminuir el potencial (más negativo) del metal a proteger, por debajo de un valor definido para cada metal, en el que termodinámicamente no puede haber corrosión. Por debajo de este valor se elimina la corrosión electroquímica.

Existen 2 técnicas para rebajar este potencial:

- Protección catódica mediante ánodos de sacrificio: Consiste en la aplicación de metales negativos al cátodo (barco) llamados ánodos de sacrificio, que pueden ser, por tanto, de zinc, magnesio o de aluminio. Éstos se disuelven en el mar y se deben cambiar cada cierto tiempo.
- Protección catódica por corriente impresa: Si nos limitamos a aplicar una corriente negativa al metal que hay que proteger y el polo positivo al electrolito (o sea el agua del

mar), conseguiremos el mismo efecto: rebajar el potencial del metal a proteger hasta llegar al potencial de inmunidad de ese metal sin necesidad de ánodos de sacrificio, solamente aplicando la corriente de la batería. Por lo tanto, se protege así el metal de la obra viva del barco por el sistema de corriente impresa.

El presente proyecto estudio a través del diseño de una matrices experimental con las variables que interviene en el diseño de sistemas catódicos, aplicándola por medio de simulaciones en laboratorio y comprobaciones mediante validaciones en ensayos buques, identificando las variables más importantes del proceso de control de Corrosión por el método de ánodos de sacrificio, para optimizar los proceso de protección.

### **OBJETIVO GENERAL DEL ESTUDIO**

Optimizar el diseño y la metodología de aplicación de ánodos de sacrificio para la protección contra la corrosión en la obra viva de embarcaciones pequeñas y buques.

Para lo cual se establecio la siguiente metodología de trabajo:

1. Estudio y Diagnostico del Problema.
2. Diseño y Ejecución de Las Pruebas En Laboratorio.
3. Diseño y Ejecución de las Pruebas en campo.
4. Desarrollo de Modulo de Software Para Protección Catódica.

No es inusual escuchar que los navegantes y propietarios de yates narren historias sobre la desintegración de parte del material de una hélice, un eje propulsor, alguna zona de un casco de aluminio o de acero; la extraña rotura de los bulones de la quilla en un casco de PRFV o el aflojado de los tornillos de las tracas en un casco de madera, refiriéndose genéricamente a que son efectos producidos por la corrosión. Realmente estas causas de corrosión por fenómenos electroquímicos tan notables están ubicadas normalmente en la parte sumergida del casco la que no se puede observar hasta que se pone el yate en seco. Es allí por esa razón donde pueden causar daños más peligrosos.

## **DISEÑO Y EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS EN LABORATORIO.**

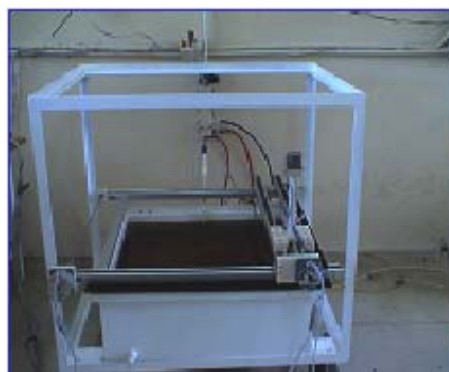
Se diseño y construyo en el laboratorio ocho cedas de monitoreo, con el propósito de generar una herramienta y una metodología electroquímica que me permita estudiar el desempeño de un ánodo o arreglo de ánodos sobre una superficie metálica a través del mapeo de potenciales.

En esta celda se estudiaron el desempeño del sistema de protección catódica cuando se combinan dos geometrías de ánodos, tres geometrías de lámina metálica, tres estados de recubrimiento, en un electrolito de características constantes, temperatura constante, material de la lámina metálica constante, con aireación permanente.

Para cada una de las anteriores combinaciones se generaron las curvas de mapeo de potencial para caracterizar cada sistema.

### Geometría y material de la celda

Para desarrollar las pruebas de laboratorio se construirán celdas en acrílico por que este material no interfiere eléctricamente en las mediciones que se van a realizar. La geometría inicial que se propone es que sean celdas rectangulares de 1.2 x 1.2 x 0.2 metros. Fotografía 1.



Fotografía 1. Celda de monitoreo

Tipo de solución a utilizar.

Agua de mar sintética según la norma ASTM D-1141. Esta especificación cubre la preparación de soluciones conteniendo sales inorgánicas en proporciones y concentraciones representativas del agua de mar.

### **ELECTRODOS DE REFERENCIA A UTILIZAR**

Para tomar los potenciales en la celda se utilizarán electrodos de Ag./AgCl, los cuales son los recomendados para ser utilizados en toma de potenciales en aguas de mar.

Los potenciales se tomaron sobre la superficie de los electrodos de trabajo para poder obtener la información suficiente y elaborando las curvas equipotenciales que se generen durante los experimentos, y compararon entre sí de acuerdo a cada una de las configuraciones que se proponen. En la Figura 1.a se muestran las curvas equipotenciales y de corriente para un ánodo ubicado sobre una lámina metálica desnuda, mientras que en la Figura 1.b se observan las curvas sobre una lámina pintada, con pequeñas áreas desnudas que simulan defectos en el recubrimiento. En la Figura 1.c se observan las mismas curvas sobre una lámina totalmente pintada.

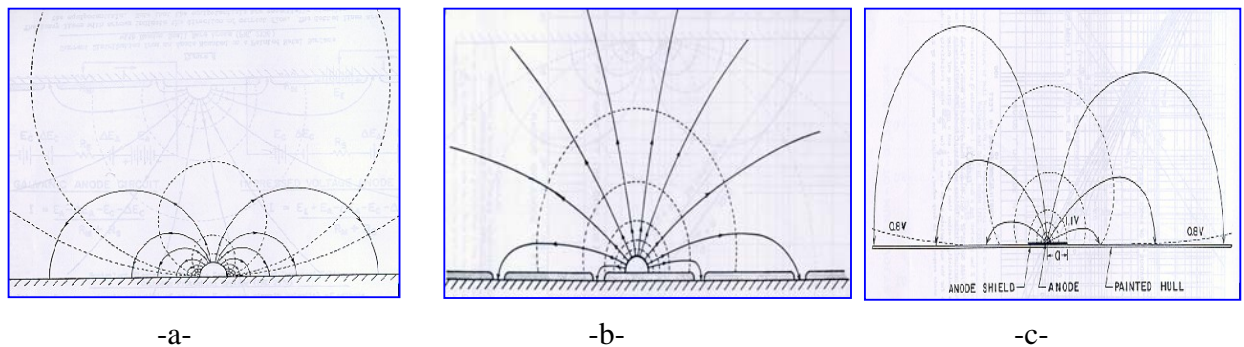


Figura 1 Curvas de equipotencial.

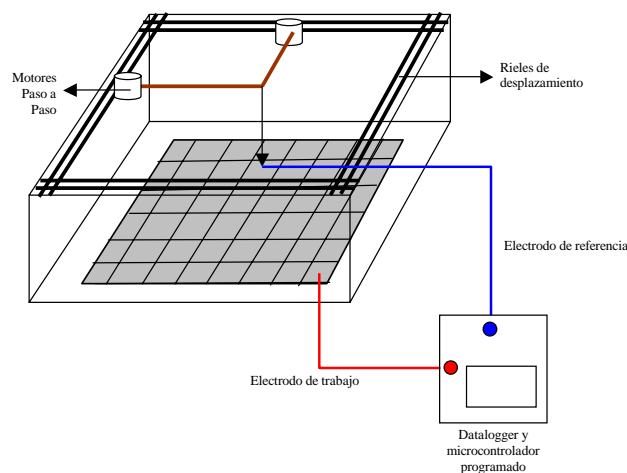
Laminas de trabajo Como laminas de trabajo se utilizarán láminas de acero naval con geometrías que contengan dobleces a 90° y 135°, y láminas sin dobleces, esto con el objeto de poder estudiar el desempeño de los ánodos en superficies con estas características.

Para este estudio se considerarán tres estados del recubrimiento sobre la lámina: desnudas, parcialmente pintadas y pintadas completamente.

Distribuciones de los ánodos sobre la superficie: Para estudiar el desempeño de los ánodos y la mejor metodología de instalación de los ánodos sobre la obra viva de las embarcaciones marinas, se instalar tres tipos de distribuciones de ánodos sobre las superficies: una geométrica, una lineal y otra lineal paralela.

Para la toma de potenciales se diseño y fabrico un sistema automático de adquisición de datos en las cedas, debido a la cantidad de mediciones y con miras a tener un configuración experimental que facilite los monitoreos de potencial. Este sistema se compone de un sistema mecánico para toma de datos y de una herramienta informática para almacenar y procesar las mediciones recolectadas.

El sistema automático de adquisición de datos consiste en el montaje de rieles de desplazamiento sobre la CEDAS. Sobre estos rieles se desplazará un sistema mecánico mediante unos motores de paso sincronizado. En este dispositivo se colocará a su vez el electrodo de referencia.



En la Figura 2 se muestra un esquema del sistema de adquisición de datos.

Mapeo de potenciales en laboratorio: Los datos de potencial recolectados se analizaron mediante un software para obtener los mapas de potencial de cada monitoreo.

Los tres meses de monitoreo para cada probeta de acero naval permitirán establecer las variaciones en los mapas de potencial a medida que el ánodo protege la probeta en el tiempo.

En la Figura 3 se muestra un mapa de potencial que se obtuvo para uno de los ensayos

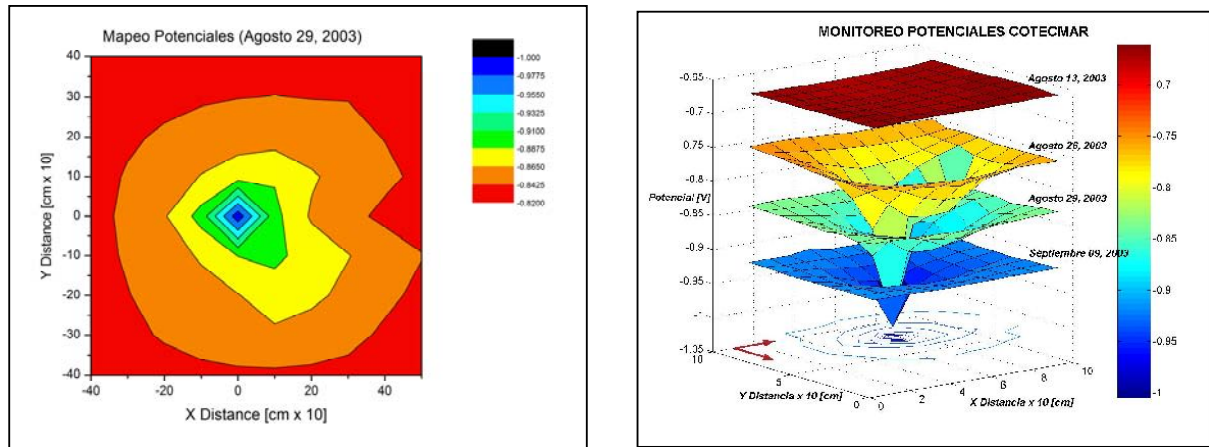


Figura 3 Mapeos de potenciales en dos y tres dimensiones para la protección de acero con un ánodo de Zinc ubicado en el centro.

A partir de estos mapas de potencial se establecieron el alcance protector de un ánodo o de una configuración de ánodos, con esta información se determinaron cuáles diseños de protección catódica son los más eficientes.

Metodología para la evaluación en campo del desempeño de sistemas de protección catódica para embarcaciones

Se diseño y construyo un sistema automático de monitoreo de potenciales es una herramienta que se emplea para determinar el estado de corrosión de la obra viva en condiciones de operación; conociendo el potencial al que se encuentra la lámina de acero naval y el pH de la solución en el cual se encuentra sumergida, se puede, termodinámicamente, predecir si el sistema se encuentra en un estado de corrosión de pasivación o de protección.

Una de la primera conclusiones que se obtuviera que alrededor de cada ánodo los potenciales de protección son elevados; a medida que los puntos de medición se alejan de los ánodos las líneas

equipotenciales se interfieren y se comportan como una sola línea equipotencial aplanada inicialmente, a mayores distancias tienen una forma circular similar a la observada en los ensayos donde se utilizó un ánodo sobre la lámina.

En la Figura 4. se muestra un mapa de potenciales para el anterior sistema.

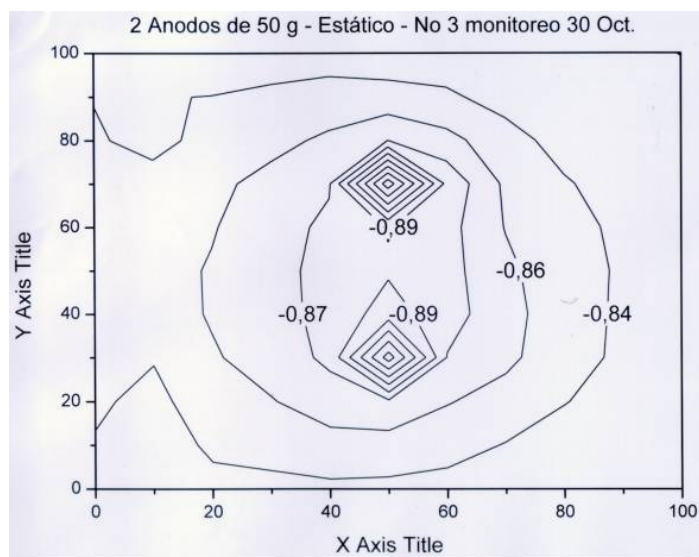


Figura 4. Comportamiento de las curvas equipotenciales utilizando dos ánodos de zinc de 50 g.

Construcción de software de diseño para sistemas de protección catódica por ánodos galvánicos. El software desarrollado está basado en la norma DNV RP B401; se utilizó esta norma pues es una utilizada en el mundo y da mayor soporte teórico durante la fase de diseño.

La norma DNV RP B401 considera la fase de diseño en tres pasos: el primer paso es la fase de cálculo de la corriente necesaria para la protección del material, el segundo es el cálculo de la masa total del ánodo de sacrificio para proteger la lámina y el tercero es un proceso iterativo donde se calcula el número de ánodos a instalar.

El software realiza todos los cálculos y presenta la última fase de presentación de resultados, la ventana se presenta en la figura 5.

**RESULTADOS ESTUDIOS CATÓDICOS**

**Datos del Sistema**

Nombre de la Unidad	<b>ARC - MALPELO</b>
Eslora Total	<b>51</b> (metros)
Manga	<b>10</b> (metros)
Calado	<b>4.4</b> (metros)
Área de la obra viva	<b>614</b> (metros <sup>2</sup> )
Long Vertical area húmeda	<b>2</b> (metros)
Resistividad del mar promedio	<b>0.3</b> (ohms)
Temperatura del mar	<b>20</b> (°C)

**Datos del Recubrimiento**

Categoría del sistema de recubrimientos: **2**

Tiempo en operación del recubrimiento (años): **3**

**Datos del Registro**

Fecha (día mes año): **26 de Noviembre de 2004**

Nombre del diseñador: **Alfredo Morales**

Nombre del Astillero: **Planta Mamonal**

**Resultados**

Masa Anódica: **7.12 (kg)**

Número de ánodos a instalar: **10.0**

**Parametros de Diseño**

Material del ánodo: **1**

Tipo de ánodo: **3**

Peso de ánodo: **Peso de ánodo**

Vida útil sistema PC (años): **2**

**Cerrar**

**CIC**  
Corporación para la Investigación de la Corrosión

Figura 5 Ventana de presentación de resultados

La ventana de presentación de resultados se encuentra relacionada y tiene una estructura muy parecida a la ventana de datos de entrada aunque esta ventana tiene un área más en la cual se ilustra los resultados (área sombreada), aquí se coloca el número de ánodos y la masa de cada ánodo.

Al oprimir el botón CERRAR se sale del programa y se regresa a la ventana de datos de entrada, lo aconsejable es salir del programa y correrlo otra vez ya que en la memoria quedan variables que después podrían alterar los resultados.

## **CONCLUSIONES**

Con los resultados de esta investigación se construyó un manual de especificaciones técnicas con la metodología de aplicación de este tipo de control de Corrosión en buques y embarcaciones pequeñas, que permitirá, a través de la fundamentación científica mejorar el desempeño de estos sistemas de protección.

De igual manera, se desarrolló un módulo software que permite enmarcar los resultados del proyecto en un Programa de integridad. Este programa está basado en la metodología de inspección basada en riesgos, la cual es una herramienta muy importante ya que proporciona directrices para poder estimar cuáles son las probabilidades y las causas que podrían hacer que una estructura en particular falle y predecir su efecto económico. Al aplicar este análisis de riesgos, se facilita la asignación de los recursos necesarios para las actividades de mantenimiento, disminuye la ocurrencia de fallas e incrementa los índices de seguridad de las estructuras.

## **BIBLIOGRAFIA**

- 📖 CHONG H. Quality control for sacrificial anodes. Material Performance Engineering. Malaysia. p.p. 1152-1 to 1152-9
- 📖 GOMEZ G., MERCADO O. Evaluación de ánodos de sacrificio de cinc y magnesio para protección catódica. Universidad Industrial de Santander, 1987.
- 📖 HARVEY P. Designing cathodic protection systems for marine structures and vehicles. ASTM stock number STP1370, 1999.
- 📖 ASTM G97-97. Standard test method for laboratory of magnesium sacrificial anode test specimens for underground applications. 1997.
- 📖 MIL-A1800LK. Military specification anodes, sacrificial zinc alloy. 1983.
- 📖 RISQUE B. Classic Papers and Reviews on anode resistance fundamentals and applications.
- 📖 MORGAN J. Cathodic Protection. NACE, Houston. 1993
- 📖 DET NORSE VERITAS INDUSTRI NORGE AS. Recommended Practice RP B401, Cathodic Protection Design. 1993.
- 📖 DEPARTMENT OF THE NAVY, SEA SYSTEMS COMMAND. Naval Ships Technical Manual, Chapter 633, Cathodic Protection. 1992.
- 📖 ASTM F 1182-90. Standard Specification for anodes, sacrificial zinc alloy. Reapproved 2001.
- 📖 ASTM B 418-01. Standard Specification for cast and wrought zinc anodes.
- 📖 MEILLIER A. A review of galvanic cathodic design procedure. Corrosion control services limited. 1998.
- 📖 CARSON J. Principles of design of cathodic protection systems for the hulls of active ships. Pacific naval Laboratory. 1964..