

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**“SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN  
CATÓDICA EN UN REMOLCADOR DE 55 TM DE  
BOLLARD PULL”**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO NAVAL**

**JOSEPH GERALD IBAÑEZ ECHEVARRIA**

**PROMOCIÓN 2009-II**

**LIMA – PERU**

**2013**

A MI MAMÁ, FAMILIARES,  
AMIGOS Y COMPAÑEROS DE  
TRABAJO QUE SUPIERON  
APOYARME Y ORIENTAR  
SIEMPRE CON SUS  
CONSEJOS POR EL CAMINO  
DEL ÉXITO.

## INDICE

<b>PRÓLOGO</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>1.1. ANTECEDENTES</b>	<b>3</b>
<b>1.2. OBJETIVOS</b>	<b>5</b>
<b>1.3. ALCANCES</b>	<b>5</b>
<b>1.4. LIMITACIONES</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO DE LA CORROSIÓN</b>	<b>7</b>
<b>2.1. CORROSIÓN Y MECANISMO DE CORROSIÓN</b>	<b>7</b>
2.1.1. <u>Mecanismo de corrosión electroquímico</u>	<b>7</b>
2.1.2. <u>Elementos de corrosión electroquímico</u>	<b>11</b>
2.1.2.1. <u>Ánodo</u>	<b>11</b>
2.1.2.2. <u>Cátodo</u>	<b>12</b>
2.1.2.3. <u>Conexión eléctrica</u>	<b>13</b>
2.1.2.4. <u>Electrolito</u>	<b>13</b>
<b>2.2. FORMAS DE CORROSIÓN</b>	<b>14</b>
2.2.1. <u>Corrosión uniforme</u>	<b>16</b>
2.2.2. <u>Corrosión por picadura</u>	<b>16</b>

2.2.3.	<b><u>Corrosión por fisura</u></b>	18
2.2.4.	<b><u>Corrosión galvánica</u></b>	19
2.2.5.	<b><u>Lixiviación selectiva</u></b>	20
2.2.6.	<b><u>Corrosión por erosión</u></b>	21
2.2.7.	<b><u>Corrosión intergranular</u></b>	21
2.3.	<b>CONTROL DE LA CORROSIÓN</b>	22
2.4.	<b>PROTECCIÓN CATÓDICA</b>	23
2.4.1.	<b><u>Fundamento de la protección catódica</u></b>	25
2.4.1.1.	<u>Pasividad</u>	27
2.4.1.2.	<u>Diagrama de potencial</u>	28
2.5.	<b>PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO</b>	29
2.5.1.	<b><u>Características de los ánodos de sacrificio</u></b>	29
2.5.2.	<b><u>Aleaciones para ánodos de sacrificio</u></b>	30
2.5.3.	<b><u>Diseño de ánodos de sacrificio</u></b>	30
2.5.3.1.	<u>Cálculo de resistencia</u>	32
2.5.3.2.	<u>Cálculo de la corriente de salida</u>	34
2.5.4.	<b><u>Cálculo del peso y cantidad de ánodos</u></b>	34
2.5.5.	<b><u>Radio de acción del ánodo</u></b>	37
2.5.6.	<b><u>Métodos de fijación</u></b>	37
2.6.	<b>PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA</b>	37
2.6.1.	<b><u>Ánodos cerámicos de titanio con recubrimiento de MMO</u></b>	39
2.6.2.	<b><u>Rectificador</u></b>	40
2.6.3.	<b><u>Cables conductores</u></b>	42

2.6.4.	<u>Electrodo o celdas de referencia permanentes</u>	43
--------	---	----

### CAPÍTULO III: CALCULO Y DISTRIBUCIÓN DE ÁNODOS DE SACRIFICIO

	Y CORRIENTE IMPRESA	45
3.1.	CALCULOS DE ÁNODOS DE SACRIFICIO	45
3.2.	CÁLCULOS DE CORRIENTE IMPRESA	48
3.3.	DISTRIBUCIÓN DE LOS ÁNODOS DE SACRIFICIO Y CORRIENTE IMPRESA	50

### CAPÍTULO IV: SELECCIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICO

		51
4.1.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE ÁNODOS DE SACRIFICIO	51
4.1.1.	<u>Ventajas</u>	51
4.1.2.	<u>Desventajas</u>	52
4.2.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE CORRIENTE IMPRESA	53
4.2.1.	<u>Ventajas</u>	53
4.2.2.	<u>Desventajas</u>	53
4.3.	CUADRO COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA	55

<b>CAPÍTULO V: COSTOS</b>	<b>57</b>
<b>5.1. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA</b>	<b>57</b>
<b>5.1.1 <u>Costos implementación de ánodos de sacrificio</u></b>	<b>57</b>
<b>5.1.2 <u>Costos implementación de corriente impresa</u></b>	<b>58</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>60</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>61</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>64</b>

## PRÓLOGO

El presente trabajo describe los sistemas de protección catódica; por ánodos de sacrificio y corriente impresa, y las ventajas y desventajas en relación a los beneficios técnicos y económicos para la implementación en un remolcador de 55 TM de Bollard Pull, construido en la empresa Sima Chimbote. Este proyecto, de la empresa Sima Chimbote, se desarrolló a solicitud de la Autoridad del Canal de Panamá, y es la construcción de 2 remolcadores iguales para realizar trabajos dentro de las aguas del Canal de Panamá.

En el capítulo I se indica el objetivo del presente trabajo, el alcance y las limitaciones que se ha considerado para el desarrollo de este informe.

Luego, en el capítulo II se describirá el mecanismo y forma de corrosión, así como las formas de protección catódica; por ánodos de sacrificio y corriente impresa. Además se presentarán las formulaciones principales para el cálculo de la cantidad, distribución y peso de ánodos; también la descripción general de los equipos utilizados para la protección por corriente impresa.

El cálculo real con datos de nuestro objeto de estudio, remolcador de 55 TM de Bollard Pull, se verá en el capítulo III. Se realizará e cálculo de la cantidad de

ánodos de sacrificio y la selección de equipos para la protección por corriente impresa

Y en el capítulo IV realizaremos un cuadro comparativo para ver las ventajas y desventajas de cada uno de los sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio y corriente impresa.

Finalmente, en el capítulo V se analizará el costo que podría tener la implementación de cada uno de los sistemas de protección catódica. Estos costos estarán basados en cotizaciones enviadas por proveedores y por costos que se utilizan en el astillero Sima Chimbote.

Con este estudio nos servirá para tener un sustento y/o forma de analizar para la selección de un sistema de protección catódica que podría implementarse en alguna embarcación.

Un agradecimiento especial al área de la División de Diseño y desarrollo de la empresa Sima Chimbote y al personal que labora en ella, los cuales apoyaron en todo momento para el buen desarrollo del presente informe.

Además quiero extender mi agradecimiento al Ing. Luciano Zamora Ramos por sus aportes y recomendaciones en el análisis de este trabajo.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES

El agua de mar es un medio muy agresivo que propicia rápidamente el fenómeno de corrosión, y como sabemos las embarcaciones operan en estos medios, poniendo en riesgo las superficies metálicas expuestas.

En una publicación de 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”. Y uno de sus proyectos es la “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. Con los resultados de esta investigación se desarrolló un módulo software 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.

El astillero **CINAVE** publicó un artículo donde hace recomendaciones para evitar la corrosión por corrientes parásitas, “cada metal presenta en su estado natural una electro valencia. La combinación de varios metales a bordo de una nave lleva la tendencia a producir corrosión galvánica. La necesidad inevitable de emplear baterías o generadores para los distintos servicios a bordo, inducen a la generación de corrientes no deseadas o parásitas, llamada por algunos autores también electrólisis. Estas corrientes producen un estado de corrosión, que en la mayoría de las veces termina con la destrucción de los equipos o fisuras en la estructura”.

Si bien es muy conocido que el efecto de la corrosión está latente en todas las embarcaciones, no hay estudios profundos o guías que nos conlleven a la selección de un método de protección; el presente informe se podrá emplear como guía para poder tener un sustento técnico y económico, de los métodos de protección catódica, y poder seleccionar e implementar en una embarcación.

El presente informe compara la aplicación de los sistemas de protección catódica en un remolcador de 55 TM de Bollard Pull, construido en la empresa Sima Chimbote, este sustento estará basado en las relaciones técnico-económico de ambos métodos. Además podrá utilizarse como base

para evaluar la implementación de un método de protección catódica en cualquier tipo de embarcación y como base para otros estudios posteriores.

## 1.2. OBJETIVO

Aplicar técnicas de protección contra la corrosión, específicamente protección catódica por ánodos de sacrificio y corriente impresa, y comparar los beneficios técnicos y económicos entre ambos sistemas; aplicados a un remolcador de 55 TM de Bollard Pull.

## 1.3. ALCANCES

El presente trabajo abarca la descripción de los sistemas de protección catódica; por ánodos de sacrificio y por corriente impresa, cuyo objeto de estudio es en un remolcador de 55 TM de Bollard Pull que fue construido en el astillero Sima Chimbote; el cual tiene las siguientes características:

- Eslora total = 29.70 m
- Manga moldeada = 12.40 m
- Puntal moldeado = 4.90 m
- Calado a máxima carga = 3.80 m
- Máxima velocidad = 12 nudos
- Bollard Pull (Ahead) = 55 TM
- Bollard Pull (Astern) = 36 TM

Con estos datos se identificará y desarrollará el mecanismo de protección; por ánodos de sacrificio y por corriente impresa, de esta forma veremos

cuáles son las ventajas y desventajas técnicas y el costo que tendría al implementar cualquiera de los sistemas mencionados.

El informe está basado en un solo objeto de estudio, pero las conclusiones y recomendaciones podrán generalizarse para otros tipos de embarcaciones que requiera utilizar uno de los métodos de protección catódica.

#### **1.4. LIMITACIONES**

- El marco teórico está enfocado básicamente al tipo de corrosión electroquímica, ya que está relacionado con nuestro tema de estudio.
- El presente informe no abarca recubrimientos protectores y otros tipos que se utilizan de forma adicional al método de protección catódica.
- Se considera que el objeto de estudio, remolcador de 55 TM, realizará sus operaciones en las aguas de Perú. Además sólo se considera la protección del casco y apéndices, más no tanques u otros elementos.
- Las formulaciones para el cálculo de ánodos de zinc están basados en estudios realizados en otras instituciones y por estándares de organizaciones reconocidas. Mientras que para el caso de la corriente impresa se basa en estándares y recomendaciones de fabricantes.
- La evaluación del sistema de corriente impresa sólo toma en cuenta el aspecto de protección y no los requerimientos para instalación al interior de la embarcación.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO DE LA CORROSIÓN**

#### **2.1. CORROSIÓN Y MECANISMO DE CORROSIÓN**

La corrosión puede definirse como la degradación de un metal por la interacción con el medio que lo rodea. De acuerdo con el tipo de interacción la corrosión será química o electroquímica; la primera implica la reacción del metal con un medio no iónico y se presenta a elevadas temperaturas; la segunda involucra en forma simultánea un transporte de electricidad a través de un electrolito, generando una disminución espontánea en la energía de la celda o pila de corrosión, a éste grupo pertenecen la corrosión atmosférica, la corrosión en soluciones salinas, en agua de mar, en soluciones ácidas y la corrosión en suelos entre otras. En cualquiera de los casos se presenta una transformación del metal a su forma nativa como mineral. La corrosión en sentido más amplio es un fenómeno natural, por medio del cual los sistemas químicos expresan su tendencia hacia un estado de equilibrio estable.

##### **2.1.1. Mecanismo de corrosión electroquímico**

La corrosión electroquímica, es la forma más común de ataque de los metales, y ocurre cuando los átomos del metal pierden

electrones y se convierten en iones. Conforme se consume gradualmente el metal, se forma un subproducto de este proceso llamado herrumbre.

La corrosión electroquímica ocurre con mayor frecuencia en un medio acuoso, donde estén presentes iones en el agua o en el aire húmedo. En este proceso se crea un circuito eléctrico y el sistema se conoce como una celda electroquímica.

Para que un proceso de corrosión electroquímico se presente son necesarias condiciones tales como:

- Un ánodo y un cátodo.
- Una diferencia de potenciales entre el ánodo y el cátodo, la cual puede deberse a: Contacto entre metales diferentes, variación en la composición química en diferentes puntos sobre la superficie de un metal, imperfecciones superficiales del metal, tensiones residuales como resultado de los procesos de fabricación, presencia de bacterias sulfato reductor.
- Conexión eléctrica entre el cátodo y el ánodo (generalmente están en la misma estructura).
- El ánodo y el cátodo deben estar en contacto con un electrolito. La humedad atmosférica o del suelo satisfacen ésta condición.

Una vez alcanzadas éstas condiciones en el ánodo el metal se corroe o disuelve, esto puede visualizarse como el paso del metal a un ión metálico o como la pérdida de uno o más electrones del átomo metálico, lo que eléctricamente puede escribirse como:



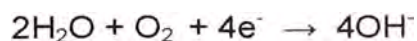
como etapa posterior a ésta reacción el ión metálico pasa al estado mineral de menor potencial, generalmente a óxidos.

En el cátodo el metal no reacciona pero sobre su superficie se presentan reacciones de reducción, que dependiendo del electrolito serán:

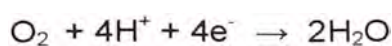
- Desprendimiento de hidrógeno en medios acuosos:

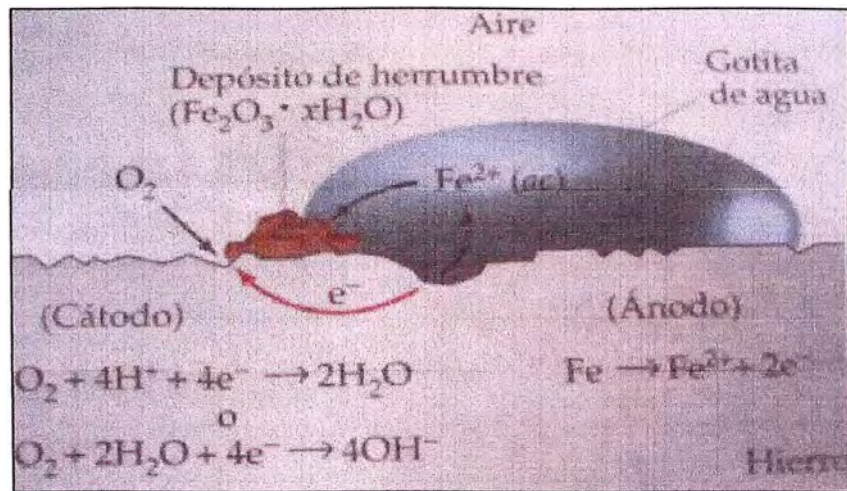


- Reducción del oxígeno si este está presente en medios neutros o alcalinos:



- Reducción del oxígeno si esta presenta en medios ácidos y aireados, la cual puede darse en forma simultánea con el desprendimiento de hidrógeno:





**Figura 2.1** Celda electroquímica.

La diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo es la diferencia algebraica de sus potenciales individuales en relación con un mismo electrodo de referencia. Como normalmente no se emplean metales puros sino aleaciones, es fundamental conocer el comportamiento electroquímico de dichos materiales, por ello se han desarrollado las series galvánicas prácticas en diversos electrolitos, como la presentada en la Tabla 2.1, donde los metales con menores potenciales se denominan activos o anódicos y se corroen cuando se encuentran unidos a metales de mayor potencial.

La velocidad de disolución de un metal es directamente proporcional a la cantidad de corriente que fluye y la cantidad total de metal disuelto es proporcional a la cantidad de electricidad que ha circulado por él; según la ley de Faraday.



**Tabla 2.1**

Serie galvánica práctica (suelos neutrales y agua, referida al electrodo de cobre/sulfato de cobre)

METAL	POTENCIAL (V)
Magnesio comercialmente puro	-1.75
Aleación de magnesio (6 % Al, 3 % Zn, 0.15 % Mn)	-1.6
Zinc	-1.1
Aleación de aluminio (5 % Zn)	-1.0
Aluminio comercialmente puro	-0.8
Acero medio	-0.5 a -0.8
Hierro dulce	-0.2 a -0.5
Hierro fundido	-0.5
Plomo	-0.5
Acero en concreto	-0.2
Cobre, latón y bronce	-0.2
Hierro fundido alto silicio	-0.2
Acero inoxidable	-0.2
Carbón, grafito y coque	+0.3

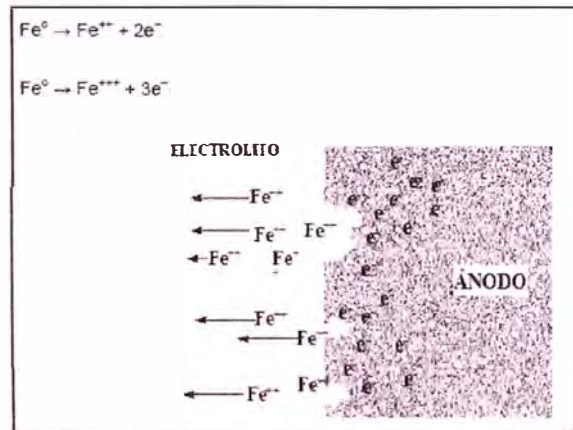
### 2.1.2. Elementos de corrosión electroquímico

Los elementos principales son: ánodo, cátodo y electrolito; además el ánodo y cátodo deben estar siempre conectados eléctricamente.

#### 2.1.2.1. Ánodo

El ánodo es un electrodo de la celda electroquímica o pila de corrosión, y es el sitio en el cual existe pérdida de metal, por la reacción de oxidación que básicamente es la pérdida de uno o más electrones, que pasan a ser iones positivos.

Por ejemplo, cuando un átomo neutro de hierro ( $\text{Fe}^0$ ) se oxida, puede perder dos o tres electrones, produciendo iones de hierro con carga positiva ( $\text{Fe}^{++}$  o  $\text{Fe}^{+++}$ ), ver figura 2.2.



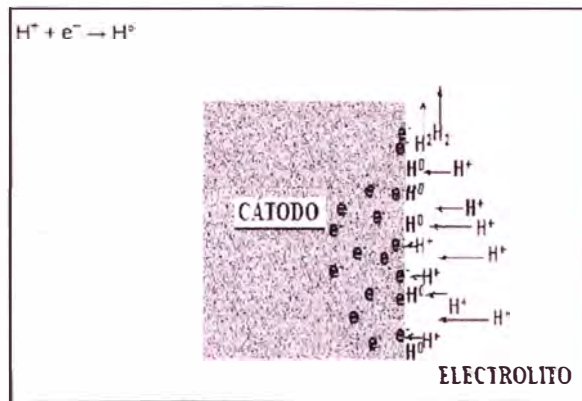
**Figura 2.2** Oxidación del hierro.

#### 2.1.2.2. Cátodo

El cátodo es un electrodo de la celda de corrosión, en el cual los electrones producidos en el ánodo son consumidos y la reacción principal es la reducción.

La reducción es la ganancia de uno o más electrones que pasan a ser unos iones con carga negativa o elementos neutros.

Por ejemplo, cuando se reduce un ión hidrogeno ( $\text{H}^+$ ), gana un electrón, produciendo un átomo de hidrogeno neutro. Como se esquematiza en la figura 2.3.



**Figura 2.3** Reducción del hidrógeno.

#### 2.1.2.3. Conexión eléctrica

Es el camino que conduce los electrones desde los sitios anódicos a los sitios catódicos.

En ciertos casos el propio metal puede presentar partes anódicas y catódicas, conocidas como celdas localizadas, razón por la cual, la conexión eléctrica viene a ser el mismo material.

#### 2.1.2.4. Electrolito

El electrolito es el medio en el cual deben estar inmersos los electrodos para cerrar el circuito, este medio puede ser acuoso o sólido (suelo) y es en el cual los iones pueden fluir.

Una celda de corrosión denota siempre la existencia de estos cuatro elementos y es imprescindible que todos ellos se encuentren en contacto para que el circuito este completo y por ende se produzca el proceso corrosivo.

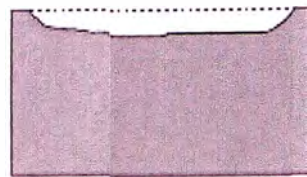
Cuando el circuito de la celda de corrosión se cierra, provoca las diferentes formas de corrosión.

## **2.2. FORMAS DE CORROSIÓN**

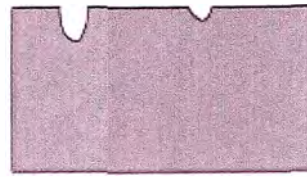
Las diferentes formas de corrosión representan fenómenos de corrosión categorizados de acuerdo a su apariencia. Se pueden dividir en 3 grupos según la forma de identificarlos: por inspección visual, con herramientas especiales o examinación microscópica.

Una descripción de cada forma básica, de la corrosión es como se muestra en la siguiente página.

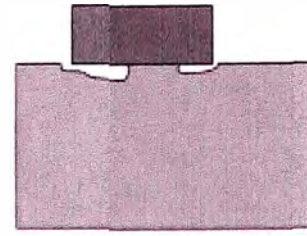
**Group I: identifiable by visual inspection**



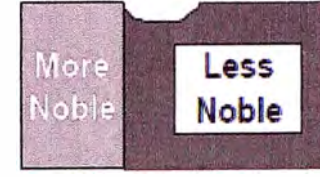
Uniform Corrosion



Pitting

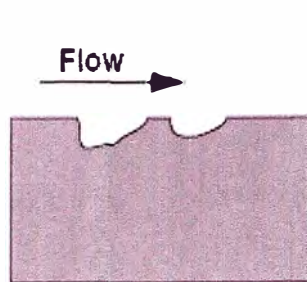


Crevice Corrosion

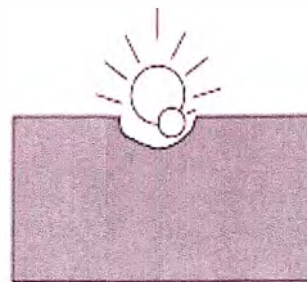


Galvanic Corrosion

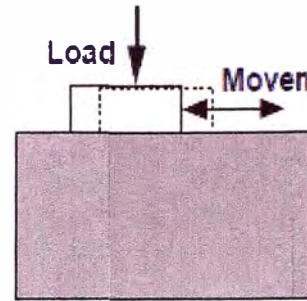
**Group II: identifiable with special inspection tools**



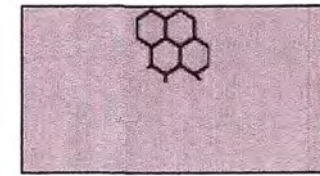
Erosion



Cavitation

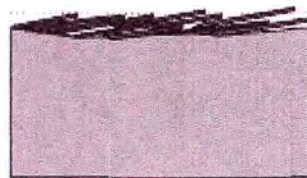


Fretting

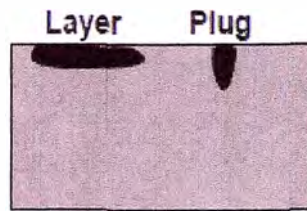


Intergranular

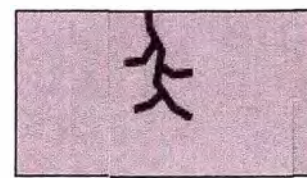
**Group III: identifiable by microscopic examination**



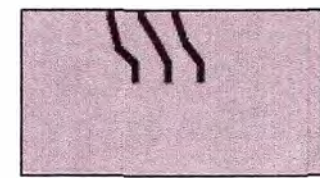
Exfoliation



De-Alloying



Stress Corrosion Cracking



Corrosion Fatigue

**Figura 2.4** Formas principales de corrosión, reagrupados para fácil reconocimiento.

### 2.2.1. **Corrosión uniforme:**

Se caracteriza por el procedimiento de ataque corrosivo de manera uniforme sobre toda la superficie o una gran fracción de la superficie total. En general se inicia un adelgazamiento progresivo y uniforme hasta el fallo. Sobre la base de las toneladas desperdiciadas, esta es la forma más importante de la corrosión.

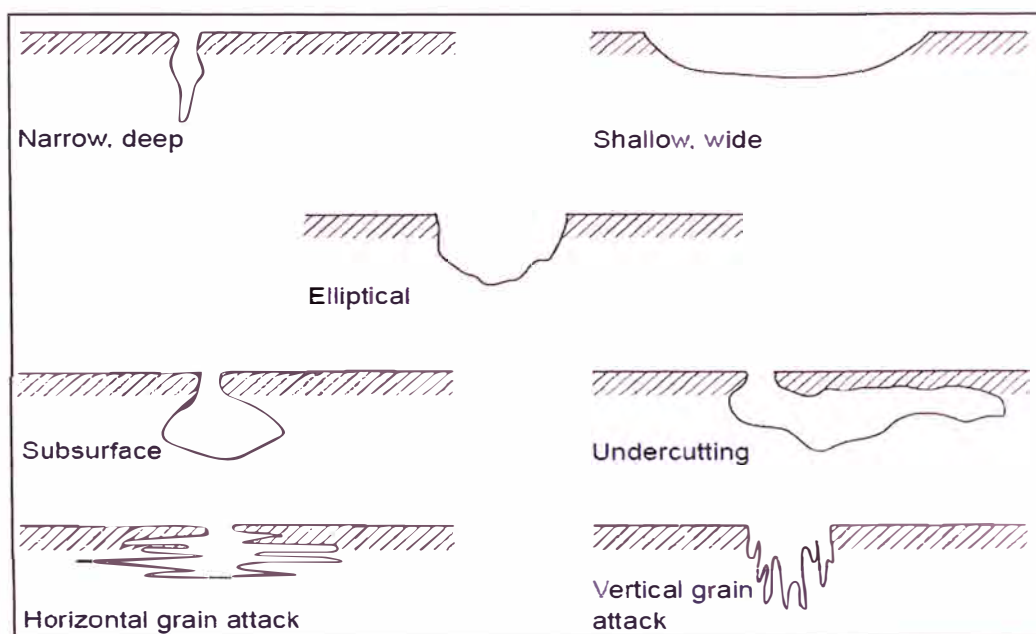
Sin embargo, la corrosión uniforme es relativamente fácil de medir y predecir, por lo que las fallas desastrosas son relativamente raras.

En muchos casos, es sólo objetable desde un punto de vista de la apariencia. La ruptura de los sistemas de recubrimiento de protección de estructuras a menudo conduce a esta forma de corrosión. La corrosión de la superficie puede indicar una avería en el sistema de revestimiento protector, sin embargo, y se debe examinar de cerca para ataques más avanzados. Si la corrosión de superficie se permite que continúe, la superficie puede volverse áspera, y la corrosión de la superficie puede dar lugar a tipos más graves de la corrosión.

### 2.2.2. **Corrosión por picadura:**

La corrosión por picaduras es una forma localizada de la corrosión por el cual las cavidades, o "agujeros", se producen en el material. Las picaduras se considera que es más peligroso que los daños por corrosión uniforme, ya que es más difícil de detectar, predecir y

diseñar en contra. Los productos de corrosión a menudo cubren las picaduras. Una picadura pequeña y estrecha con una mínima pérdida de metal en general puede llevar al fracaso de un sistema de ingeniería. La corrosión por picaduras, que, por ejemplo, es casi un denominador común de todos los tipos de ataque de la corrosión localizada, puede asumir diferentes formas, como se ilustra en la figura 2.5. La corrosión por picaduras puede producir picaduras con boca abierta (no cubierto) o cubierta con una membrana semipermeable de productos de corrosión. Las picaduras pueden ser semiesférica o en forma de copa. En algunos casos son planas de pared, revelando la estructura cristalina del metal, o pueden tener una completamente forma irregular.



**Figura 2.5** Variaciones típicas en el área seccional de formas de picadura.

### 2.2.3. Corrosión por fisura:

La corrosión por fisuras es una forma localizada de corrosión generalmente asociada con una solución estancada en el nivel micro ambiental. Estos estancamientos micro ambientales tienden a ocurrir en las fisuras (zonas protegidas) como las que se forman bajo las empaquetaduras, arandelas, material de aislamiento, tornillos de cabeza, depósitos superficiales, revestimientos desunidos, roscas, juntas solapadas y abrazaderas. Debido a la difusión de oxígeno en la fisura estará restringido; una célula con diferencial de aireación tiende a ser establecido entre la fisura (microambiente) y la superficie externa (entorno a granel).

La reacción catódica de reducción del oxígeno no es sostenible en el área de fisura, dándole un carácter anódico en la celda de concentración. Este desequilibrio anódica puede conducir a la creación de condiciones micro ambientales altamente corrosivos en la fisura, que conducen a una mayor disolución del metal. La formación de un microambiente ácido, junto con una alta concentración de iones de cloruro, se ilustra en la figura 2.6.



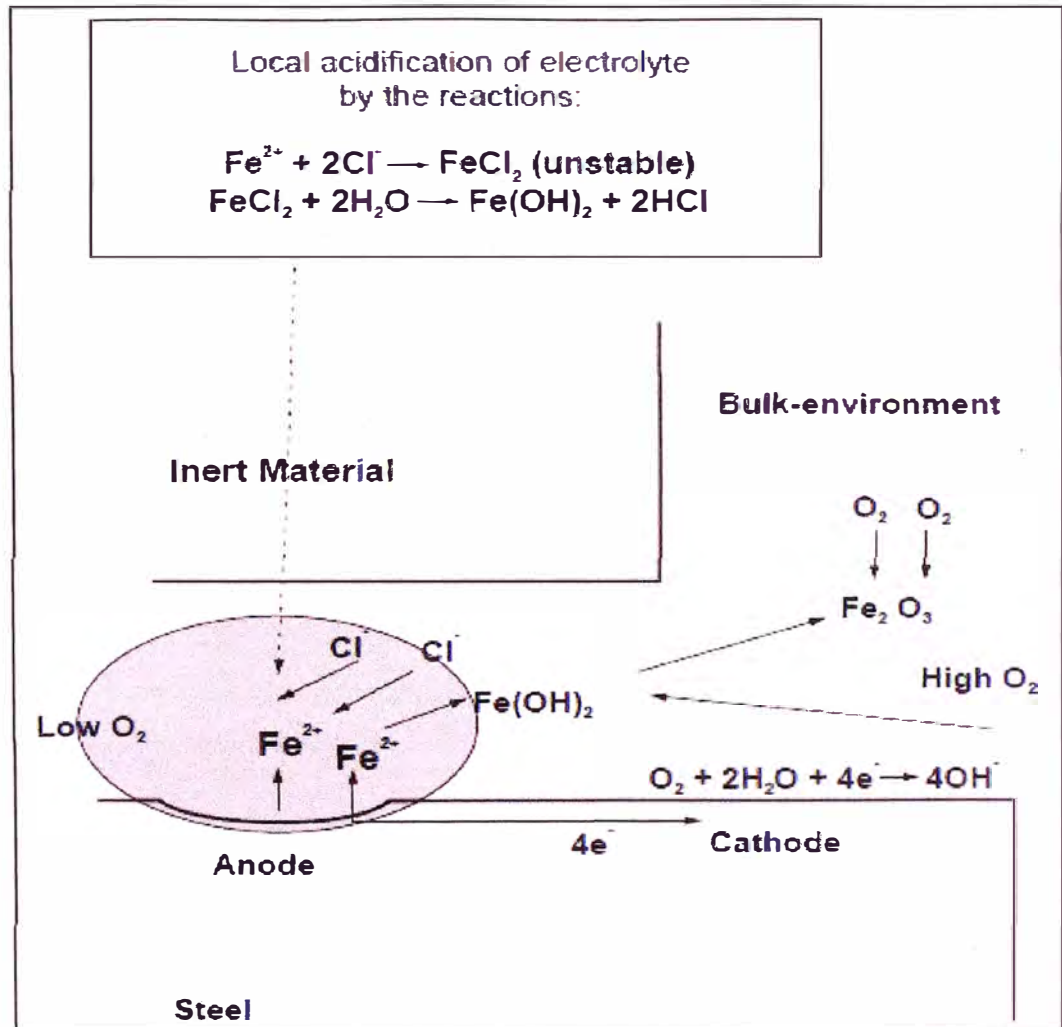
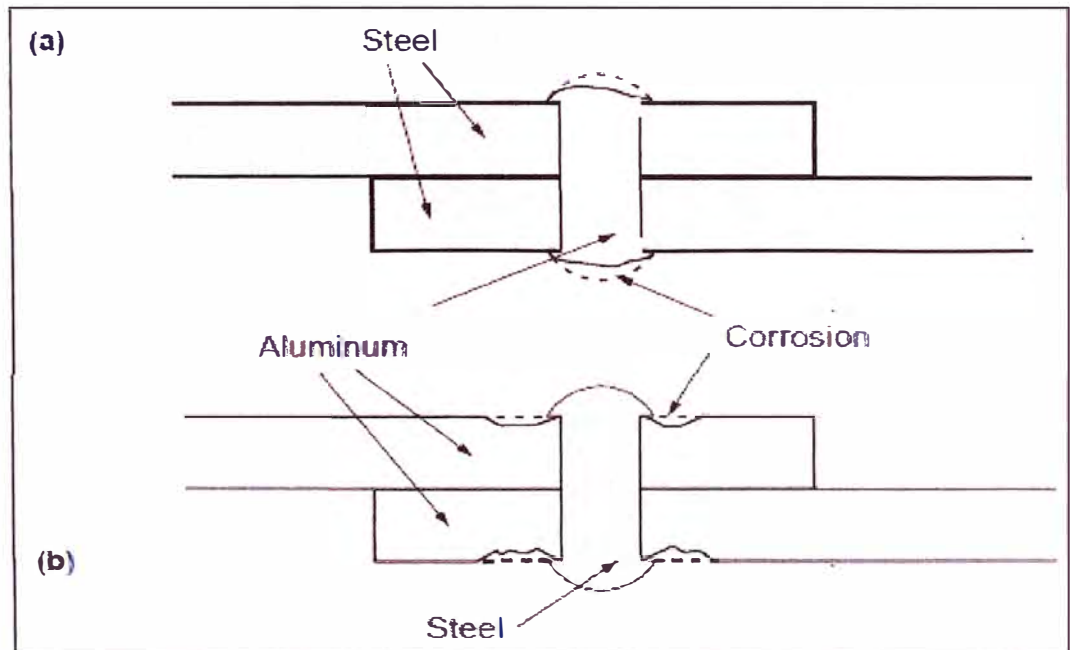


Figura 2.6 Microambiente creado por corrosión en una fisura.

#### 2.2.4. Corrosión galvánica:

La corrosión galvánica se produce cuando diferentes materiales metálicos se ponen en contacto en presencia de un electrolito. Tal daño puede ocurrir también entre los metales y aleaciones y otros materiales conductores tales como el carbono o el grafito. Una célula de corrosión electroquímica se establece debido a diferencias en los potenciales de corrosión de los materiales distintos. El material con el potencial de corrosión más noble se convierte en el cátodo de la celda de corrosión, mientras que el

material menos noble es consumido por disolución anódica. Por ejemplo, si remaches de aluminio se utiliza en placas de acero, los remaches se corroen muy rápidamente (Figura 2.7).



**Figura 2.7** Unión galvánica causada por planchas remachadas.

### 2.2.5. Lixiviación selectiva:

Lixiviación selectiva se refiere a la eliminación selectiva de un elemento de una aleación por proceso de corrosión. Un ejemplo común es la deszincificación del latón no estabilizado, con lo cual se debilita y produce poros en estructuras de latón. La eliminación selectiva de zinc puede proceder de una manera uniforme o en una localizada (del tipo tapón). Es difícil racionalizar la deszincificación en términos de disolución preferencial de Zn de la estructura reticular de latón.

### **2.2.6. Corrosión por erosión:**

La corrosión por erosión es el daño acumulativo inducido por las reacciones de corrosión electroquímica y los efectos mecánicos de movimiento relativo entre el electrolito y la superficie que se corroe.

La corrosión por erosión se define como la degradación acelerada en presencia de este movimiento relativo. El movimiento es generalmente una de alta velocidad, con el desgaste mecánico y los efectos de la abrasión. Biseles, bordes redondeados, y las ondas en la superficie por lo general indican direccionalidad y caracterizan a este tipo de daño. La erosión se encuentra en sistemas tales como tuberías (especialmente en codos y articulaciones), válvulas, bombas, boquillas, intercambiadores de calor, palas de turbina, pantallas y molinos.

El pinzamiento y la cavitación son formas especiales de corrosión por erosión. En el primero, se desplazan las partículas de líquido para causar el daño, mientras que en el segundo se hunden (inestables) burbujas de vapor para inducir daños en la superficie.

### **2.2.7. Corrosión intergranular:**

La microestructura de los metales y aleaciones se compone de granos, separadas por límites de grano. La corrosión intergranular se localiza en el ataque a lo largo de los bordes de grano, o inmediatamente adyacentes a los límites de grano, mientras que el

grueso de los granos permanecen en gran parte no afectados. Esta forma de corrosión se asocia generalmente con efectos de segregación químicos (impurezas tienen una tendencia a ser enriquecido en los límites de grano) o fases específicas precipitados en los límites de grano. Tal precipitación puede producir zonas de resistencia a la corrosión reducida en la vecindad inmediata.

### **2.3. CONTROL DE LA CORROSIÓN**

Los sistemas y métodos para la reparación, prevención y protección contra la corrosión son muy variados y constantemente aparecen nuevos productos que tratan de evitar y controlar este fenómeno. Existen diversas maneras de luchar contra la corrosión:

- Aislamiento eléctrico del material, mediante empleo de pinturas o resinas, depósitos metálicos de espesor suficiente, o por aplicación de recubrimientos diversos.
- Polarización del mecanismo electroquímico. Esto se logra eliminando el oxígeno disuelto mediante la adición de inhibidores, los cuales pueden llegar a polarizar uno de los electrodos de la pila de corrosión, y llegar a detener o disminuir sus efectos.
- Utilización de materiales resistentes a la corrosión de acuerdo con el medio de exposición.

- Cambio del sentido de la corriente en la pila de corrosión. Por ejemplo, al unir acero con un metal más activo (zinc o magnesio) se puede llegar a suprimir la corrosión del acero, ya que dejará de actuar como ánodo y pasará a comportarse como cátodo, dejando el papel de ánodo al metal más activo (zinc o magnesio). Este es el principio de la protección catódica. Debido al enfoque del presente informe nos basaremos en analizar los sistemas de protección catódica, es decir por ánodos de sacrificio y por corriente impresa.

## **2.4. PROTECCIÓN CATÓDICA**

Cuando los cascos de madera se remplazaron por los de acero, se hizo tradicional acoplar placas de Zn a todos los buques del Almirantazgo Inglés. Estas placas de zinc dieron protección localizada en especial contra la acción galvánica de las hélices de bronce, pero la protección catódica total de las embarcaciones marinas no se volvió a explorar de nuevo hasta alrededor de 1950; esta vez por la marina canadiense, mediante un empleo adecuado de pinturas anti organismos, en combinación con pinturas anticorrosivas, con lo que se demostró la factibilidad de protección catódica de embarcaciones, y que pueden obtenerse economías considerables en los costos de mantenimiento.

La primera aplicación de protección catódica por corriente impresa para la protección de estructuras enterradas se efectuó en Inglaterra y en Estados Unidos; desde entonces, el empleo de la protección catódica se ha usado con éxito, extendiéndose su aplicación por todo el mundo.

Sin embargo, no fue hasta 1970 cuando este método se comenzó a emplear en estructuras de concreto reforzado, ya que se considera el único capaz de detener el proceso de corrosión, aún en concentraciones elevadas de cloruros y con deterioros muy avanzados en las estructuras.

La protección catódica se considera el único sistema de verdadero control de la corrosión al permitir que la estructura se comporte como cátodo, llegando a disminuir la velocidad de corrosión, y garantizar así la vida de servicio de la estructura. El desarrollo de esta técnica ha sido tan exitoso que condujo a formar la Asociación de Protección Catódica en Estados Unidos en 1936, la cual sirvió como punto de partida para la creación de la NACE (National Association of Corrosion Engineers), institución reconocida mundialmente para la prevención y control de la corrosión.

La protección catódica opera al producir un flujo de corriente directa de una fuente externa a la estructura metálica que se quiere proteger (cátodo). Cuando la corriente es adecuada y propiamente distribuida, la corrosión puede ser mitigada y la estructura protegida catódicamente.

Para que el sistema de protección catódica funcione, la corriente debe descargarse del ánodo al electrolito; al descargar la corriente, el ánodo se corroe.

### 2.4.1. Fundamento de la protección catódica

La protección catódica tiene fundamento en la ley de Ohm.

$$I = \frac{E_{(a-c)}}{R}$$

Donde:

I : Corriente de corrosión desde el ánodo al cátodo (A).

$E_{(a-c)}$  : Diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo (V)

R : Resistencia del sistema ( $\Omega$ )

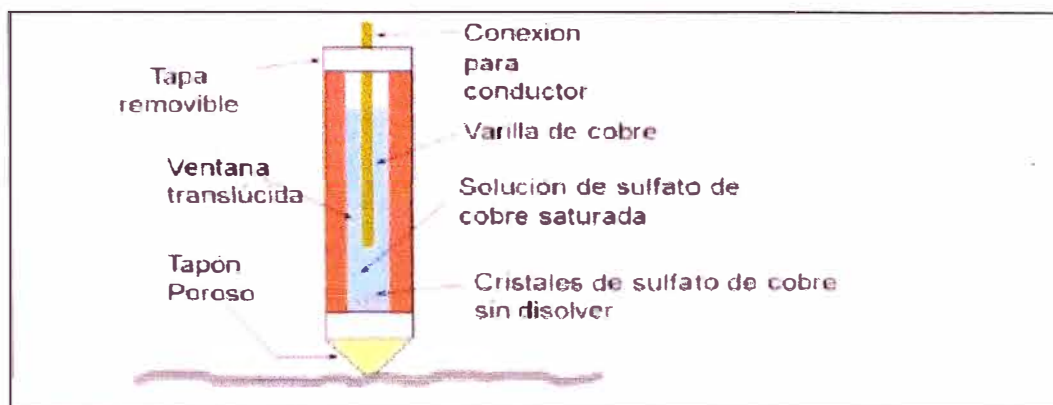
Dependiendo de la diferencia de potencial, la corrosión puede aumentar o decrecer, razón por la cual es necesario forzar a que la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo sea casi nula.

Esto se logra mediante la protección catódica, ya que ésta suministra energía a la estructura por intermedio de ánodos galvánicos o por corriente impresa, y se conoce como polarización.

Para tener conocimiento del grado de polarización de una estructura es necesario medir su potencial con respecto al del electrodo de referencia.

Muchos tipos de electrodos de referencia pueden ser construidos, y cada uno de ellos es particularmente útil para un fin específico. Entre los electrodos de referencia más utilizados están los siguientes:

El electrodo de cobre sulfato de cobre el cual es usado en la medición en suelos y en agua fresca, cuya estructura se muestra en la figura 2.8.



**Figura 2.8** Electrodo cobre sulfato de cobre.

Otro electrodo es el de plata cloruro de plata que es utilizado bajo condiciones de laboratorio. Y el electrodo de hidrógeno al cual se le asigna un valor de potencial cero el mismo que sirve de referencia para los otros electrodos. Dichos potenciales se pueden observar en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2** Potenciales de electrodos de referencia.

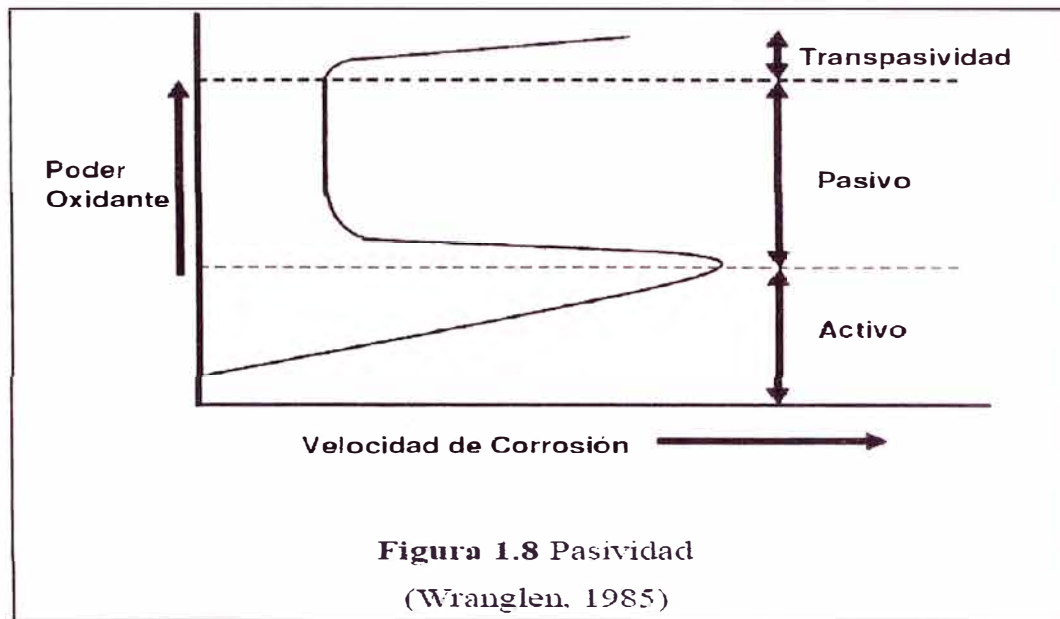
ELECTRODO DE REFERENCIA	POTENCIAL (V)
Hidrógeno	0.0000
Calomel saturado	+0.2415
Calomel <i>normal</i>	+0.2800
Plata-Cloruro de plata (húmedo)	+0.2250
Plata-Cloruro de plata (seco)	+0.5000
Cobre sulfato de cobre	+0.3160



La norma NACE RP 169 emite los criterios para la interpretación de potenciales en los sistemas de protección catódica. En el caso de tuberías de acero y hierro, el criterio más importante es que se debe tener un potencial más negativo que 850 mV (referido a un electrodo de cobre sulfato de cobre), con la corriente de protección catódica aplicada.

#### 2.4.1.1. Pasividad

La pasividad es la reducción de reactividad química de un metal o aleación bajo ciertas condiciones. Se refiere a la formación de una película relativamente inerte, sobre la superficie de un material, que lo enmascara de la acción de agentes externos. Es de esperar que el aluminio, con su muy activa posición en las series galvánicas, se corroa rápidamente. Pero debido a la presencia de una delgada y fuertemente adherida película de óxido de aluminio que se forma bajo exposición al aire, el aluminio y sus aleaciones tienen buena resistencia a la corrosión en muchos medios donde la película de óxido responsable de su pasividad es estable y protectora.



**Figura 1.8** Pasividad  
(Wranglen, 1985)

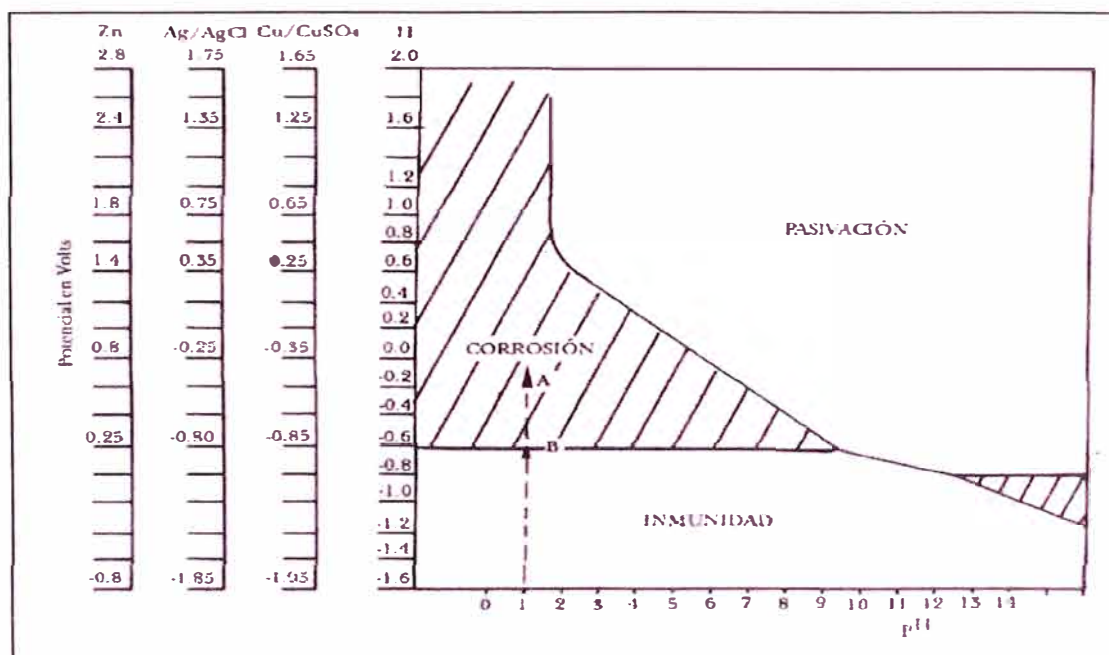
**Figura 2.9** Pasividad.

#### 2.4.1.2. Diagrama de potencial

Los diagramas de potencial indica cuando un metal, expuesto a condiciones ambientales de pH puede encontrarse en las zonas de pasividad, inmunidad o corrosión.

El diagrama de potencial más utilizado es el del hierro y acero, que se muestra en la figura 2.10, por ser el material más usado para construcciones mecánicas.

Éste muestra una zona de inmunidad para pH inferiores a 11, a partir de un potencial estándar de  $-0.53$  V con respecto al electrodo de hidrógeno, o  $-0.85$  V con respecto al electrodo de referencia de cobre sulfato de cobre, que constituye el fundamento de la protección catódica de aplicación industrial.



**Figura 2.10** Diagrama potencial pH para el hierro (Fe)

## 2.5. PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODOS DE SACRIFICIO

Con este método, prevalece la acción galvánica para proveer corriente de protección. La superficie de la estructura se hace catódica conectándola a un metal menos noble (ánodo) en un electrolito común. Los elementos más usados para este fin son el magnesio, el aluminio y el zinc. Estos ánodos comúnmente se conocen como ánodos de sacrificio porque la protección de la estructura va acompañada del consumo simultáneo de los ánodos por corrosión electroquímica.

### 2.5.1. Características de los ánodos de sacrificio

Desde el punto de vista técnico y económico, un ánodo tiene que reunir una serie de propiedades esenciales como las siguientes:

- Tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo para polarizar la estructura (en el caso del acero a -0,8 V).

- El material debe tener un elevado rendimiento eléctrico en A/h kg, además el ánodo deberá corroerse uniformemente.
- El metal será de fácil adquisición y deberá poder fundirse en diferentes formas y tamaños.

### **2.5.2. Aleaciones para ánodos de sacrificio**

La composición química de los ánodos de sacrificio incide en el comportamiento de ellos y particularmente sobre las propiedades que los caracterizan: Potencial de disolución, Rendimiento de corriente, Polarización y Homogeneidad de la corrosión anódica.

Asimismo, la composición química ejerce influencia sobre las propiedades del producto de corrosión como: Porosidad, Adherencia, Dureza y Conductividad eléctrica.

La norma A.S.T.M.- B6-46 y la especificación norteamericana U.S. Mil-A 18001 H (anexo 1) definen la composición para ánodos de sacrificio de aleación de zinc, magnesio y aluminio.

### **2.5.3. Diseño de ánodos de sacrificio**

Es necesario decidir sobre el tamaño de los ánodos que darán la corriente eléctrica requerida. Muchos fabricantes publican la corriente eléctrica de su gama de productos estándar a una determinada resistividad del agua que normalmente es de 25 a 30 Ohm-cm, pero muchas veces es necesario diseñar ánodos para

aplicaciones específicas y también puede requerirse la utilización de los ánodos en aguas con otra resistividad. Por tanto, se necesita calcular la corriente individual.

El diseño de ánodos de sacrificio para proteger estructuras, estructuras sumergidas, así como submarinos y barcos requiere el conocimiento de la resistencia óhmica de éstos, aplicando la Ley de Ohm, estimando la corriente de salida y evaluando el número de ánodos requerido en la fase de diseño y más tarde, verificando si los ánodos instalados son los más adecuados. Las fórmulas de resistencia usadas en protección catódica y de mayor uso se detallan en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3** Resistividad del agua de mar en diferentes partes del mundo

Lugar	Resistividad ( $\rho$ ) ohm-cm	Temperatura (°C)	Densidad de corriente típica para diseño	
			mA/m <sup>2</sup>	mA/ft <sup>2</sup>
Golfo de México	20	22	54-65	5.0-6.0
Costa oeste U.S.	24	15	76-106	7.0-10
Mar del norte	26-33	0-12	86-216	8.0-20
Golfo Pérsico	15	30	54-86	5.0-8.0
Indonesia	19	24	54-65	5.0-6.0
Perú-Costa Sur	24	18	54-65	5.0-6.0

Generalmente la ecuación modificada de Dwight es la más usada para el ánodo tipo barra o ánodos delgados (de sección transversal rectangular o trapezoidal), libremente suspendidos o separados, sin

embargo se puede aplicar para ánodos montados apoyados al mismo nivel de la superficie a proteger. La ecuación de Waldron y Peterson se usa para ánodos rectangulares y planos con respaldo de madera, brazaletes seccionado sobre línea de tubos y estructuras. La fórmula de Lloyd's ha sido propuesta para el tipo de ánodo de placa delgada expuesta por un solo lado, aunque puede aplicarse a brazaletes y montados al mismo nivel de la superficie a proteger.

#### 2.5.3.1. Cálculo de resistencia

De la ecuación de Dwight, la resistencia de un ánodo de forma cilíndrica en un electrolito es igual a la resistividad específica del electrolito y a algunos factores relacionados con la forma geométrica del ánodo.

**Tabla 2.4** Fórmulas de resistencia de mayor uso en la protección catódica en estructuras sumergidas.

Nombre	Fórmula	
Modificada de Dwight	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \times \left( Ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$	<p><math>\rho</math>=Resistividad específica del agua de mar (ohm-cm)  <math>L</math>=Longitud del ánodo (cm)  <math>a</math>=Radio efectivo medio del ánodo (<math>A</math>=área de la sección transversal/<math>\pi</math>, cm)  <math>A</math>=área de la superficie del ánodo (cm<sup>2</sup>)  <math>S</math>=Media aritmética de la longitud y ancho del ánodo (cm)</p>
McCoy	$R = \frac{0.315 \times \rho}{\sqrt{A}}$	
Waldron y Peterson	$R = \frac{\rho}{0.58 \times A^{0.727}}$	
Lloyd's	$R = \frac{\rho}{2 \times S}$	

Dónde:

R = Resistencia ánodo-electrolito (Ohm).

$\rho$  = Resistividad del electrolito (Ohm-cm).

$K = 1/2\pi = 0.159$

L = Longitud del ánodo (cm).

a = Radio equivalente del ánodo. Para otras formas:

$a = C/2\pi$ , donde "C" es el perímetro de la sección transversal.

**Tabla 2.5** Valores de resistividad en función de la temperatura y clorinidad.

Clorinidad p.p.m.	Temperatura °C					
	0	5	10	15	20	25
19	35.1	30.4	26.7	23.7	21.3	19.2
20	33.5	29.0	25.5	22.7	20.3	18.3

**Tabla 2.6** Densidades de corriente de protección en distintos medios agresivos.

Estado superficial	Medio agresivo	Densidad de corriente	
		mA/m <sup>2</sup>	mA/ft <sup>2</sup>
Acero desnudo	Agua de mar Velocidad 0.5 m/s	86-130	8.0-12.0
Acero desnudo	Agua de mar Velocidad 1-15 m/s	150-600	14-56
Acero pintado (epoxi, vinílica, clorocaucho)	Agua de mar	25-35	2.3-2.5
Acero pintado sujeto a roces de fondo	Agua de mar	50-210	5.0-20.0
Acero pintado (aluminio bituminoso)	Agua de mar	35-50	3.25-5.0
Tanque carga lastre petróleo	Agua de mar	100	9.0
Tanque carga lastre limpio	Agua de mar	190	18
Acero desnudo	Agua dulce estanca	56	5.2
Acero desnudo	Agua dulce en movimiento	56-66	5.2-6.0
Acero desnudo	Agua dulce turbulenta/caliente	56-170	5.2-6.0

### 2.5.3.2. Cálculo de la corriente de salida

Con las ecuaciones de Dwight y Ohm tenemos la ecuación:

$$I_a = \frac{\Delta E \times L}{0.159 \times \rho_m \times \left[ \ln \left( \frac{4L}{a} \right) - 1 \right]}$$

Dónde:

$\Delta E$ : Diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo (V)

$\rho_m$  : Resistividad del electrolito (Ohm-cm).

L: Longitud del ánodo (cm).

a : Radio equivalente del ánodo. Para otras formas:

$a = C/2\pi$ , donde "C" es el perímetro de la sección transversal.

### 2.5.4. Cálculo del peso y cantidad de ánodos

Para conocer el número de ánodos que se van a necesitar para llevar a efecto la protección catódica, es fundamental determinar la intensidad total de corriente necesaria, la superficie a proteger y conocer la densidad de corriente de protección (Tabla 2.6).

Es conveniente, cuando se calcula la superficie de la estructura a proteger, observar si existe en ella posibles zonas escondidas, motivadas por refuerzos o cualquier otra circunstancia, ya que hay que tener muy en cuenta estas zonas en el momento de hacer la distribución de los ánodos, de lo contrario estarán sometidas a la acción de la corrosión. La intensidad total necesaria para protegerla está dada por:



$$I_{total} = d_{corriente} \times \text{área a proteger}$$

Debemos tener en cuenta que cuando la estructura se encuentra con áreas mojadas y fangosas se calculan separadamente y luego se suman obteniéndose el total de corriente necesaria.

$$I_{\text{área mojada}} = d_{\text{corriente en electrolito}} \times \text{área mojada a proteger}$$

$$I_{\text{área fangosa}} = d_{\text{corriente en fango}} \times \text{área fangosa a proteger}$$

Tendremos que el mínimo número de ánodos es:

$$N_{\text{mínimo}} = I_{\text{total}} / I_a$$

Otro factor a tener en cuenta es el tiempo de vida de los ánodos. La vida para cada valor de “ $I_a$ ” será en función del peso del ánodo y no del número que pudiera ser colocado. Así, pues, si conocemos la intensidad que es capaz de suministrar un ánodo “ $I_a$ ”, su peso (kg), la capacidad de corriente calculada teóricamente (Tabla 2.4), así como su rendimiento y su factor de utilización, se calcula la vida del ánodo. El factor de utilización “ $F_u$ ” puede ser el 85%, ya que cuando un ánodo se ha consumido en ese porcentaje debe sustituirse porque el material restante es insuficiente para mantener un porcentaje razonable de la intensidad de corriente que inicialmente era capaz de suministrar. El cálculo es el siguiente:

$$t = \frac{C \times P \times n \times f_u}{I_a}$$

Donde:

$t$  = Tiempo de vida del ánodo (h)

$C$  = Capacidad de corriente (A-h/Kg)

$P$  = Peso (kg)

$\eta$  = rendimiento

$f_u$  = Factor de utilización

$I_a$  = Corriente de salida del ánodo (A)

De la información anterior podemos reordenar y tener el peso requerido total para la protección catódica:

$$P = \frac{A \times \delta \times t}{C \times f_u \times n \times 1000}$$

Donde:

$A$  = Área total a proteger ( $m^2$ )

$\delta$  = Densidad de corriente de protección (mA/  $m^2$ )

$t$  = Tiempo de vida del ánodo (h)

Una forma de validar la formula anterior podría ser con las formulaciones que se encuentran en: SNAME T&R Report R-21, "Fundamentals of Cathodic Protection for Marine Service":

$$P = \frac{A \times \delta \times f \times t}{C \times fu \times 1000}$$

Donde:

$P$  = Peso requerido para protección (kg)

$A$  = Área total a proteger ( $m^2$ )

$\delta$  = Densidad de corriente de protección (mA/  $m^2$ )

f = Factor de inmersión en agua (0.5)

t = Tiempo total que deben proteger los ánodos (h)

C = Capacidad de corriente (A-h/Kg)

$f_u$  = Factor de utilización (0.85)

### 2.5.5. Radio de acción del ánodo

Cada ánodo protege un área determinada que se determina por la relación  $I_a$ /corriente.

$$\text{Área de control} = \frac{I_a}{\delta_{\text{corriente}}} \quad r = \sqrt{\text{Área}/\pi}$$

### 2.5.6. Métodos de fijación

Los ánodos se fijan en la estructura a proteger por distintos procedimientos, con la ayuda del alma que los atraviesa, tipo platina, varilla o barra de acero que se suelda, o con grapas, espárragos o simplemente atomillados; en este caso la corriente calculada disminuirá en un 20 ó 25% aproximadamente. Su distribución está en función del área que protege cada ánodo, dependiendo de las condiciones particulares de la zona.

## 2.6. PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA

El otro medio de aplicación en la protección catódica, es el que se realiza mediante el suministro de energía eléctrica al sistema por medio de una fuente generadora de energía externa regulable, conocido con el nombre de corriente impresa.

Este sistema está conformado por una fuente de corriente continua, que alimentada por corriente alterna ofrece una corriente continua de salida apta para la protección de la estructura (las fuentes más utilizadas son los rectificadores), necesarias para la eliminación de las pilas de corrosión existentes en la superficie del metal que se va a proteger.

En los sistemas de protección catódica por corriente impresa, se crea una pila electrolítica en la cual por medio de la corriente continua (DC) suministra a los electrodos auxiliares (ánodos inertes), se hace que la estructura a ser protegida actúe como un cátodo y en la cama de ánodos (conjunto de ánodos instalados para suministrar la corriente de protección) actúe el intercambio iónico entre ellos y el electrolito, trasladando así las zonas anódicas de la estructura metálica a proteger hacia el lugar donde se descarga la corriente: los ánodos.

En el caso del presente trabajo nos especificaremos al estudio de los diferentes factores involucrados en la instalación del sistema de protección catódica por corriente impresa.

Para la instalación de un sistema de protección catódica por corriente impresa, se tienen ya establecidos los elementos básicos para su puesta en marcha. Para esto se realizará una descripción breve de los elementos más importantes, entre los cuales se encuentran:

### 2.6.1. Ánodos cerámicos de titanio con recubrimiento de MMO

Los ánodos son empleados como materiales que aportan o distribuyen la corriente eléctrica hacia la estructura a proteger, por esta razón son los elementos más importantes dentro de un sistema de protección catódica.

Los ánodos utilizados con mayor frecuencia en la implementación de sistema de protección catódica son generalmente los de Fe-Si-Cr pero en los últimos años se han desarrollado otros tipos de ánodos con innovadora tecnología que los han ido desplazado del mercado. Estos ánodos son: ánodos cerámicos fabricados de titanio, ánodos de óxidos férricos, ánodos de metales nobles (platino), etc. En este informe estudiaremos sólo las nuevas tecnologías de ánodos cerámicos fabricados de titanio con recubrimiento de MMO.

Estos ánodos cerámicos se basan fundamentalmente en una sección central o alma de titanio bien sea en forma de alambre, lámina o tubo conductor, recubierta con una capa cerámica de óxidos de metales nobles mezclados como: titanio, telurio, niobio y platino, llamada MMO por sus siglas en inglés "Mixed Metal Oxides".

Esta mezcla de óxidos de metales nobles (MMO) es una capa inerte altamente conductora, la cual activa al titanio y le permite drenar fácilmente la corriente de salida necesaria.

También hace que se obtengan una baja tasa de consumo, medida en términos de miligramos por año, por lo que las dimensiones del ánodo permanecen constantes durante todo el periodo de vida útil.

### 2.6.2. **Rectificador**

Son los equipos más utilizados en el empleo de los sistemas de protección catódica por corriente impresa. Es un dispositivo diseñado para proveer las necesidades de potencial y corriente requeridas en el sistema.

Consiste fundamentalmente de un mecanismo de transformación de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC). Tienen como componentes; un transformador de reducción del voltaje de alimentación en la línea de corriente alterna, un puente rectificador construido por diodos de rectificación, comúnmente de selenio o silicio, y sistemas de control manual o automático como voltímetros y amperímetros, a fin de regular el voltaje y la corriente según las necesidades del sistema a proteger.

Los rectificadores pueden dividirse según el número de fases en monofásico o trifásico y pueden ser utilizados para su construcción elementos como el silicio o el selenio, presentando una eficiencia de 90% y 60% respectivamente, la decisión de elegir uno u otro, se toma en función de la eficiencia y costo.

Según su forma de refrigeración se dividen en: sistemas de enfriamiento por aire (uso general) o sistemas de enfriamiento en el cual son sumergidos en aceite (los más empleados en atmósferas corrosivas), y generalmente, por estar ubicados en áreas exteriores, se usan rectificadores para instalación a la intemperie, a prueba de agua y resistentes a la corrosión.

Según su forma de control de salida se dividen en: manuales por barra, manuales por selectores, automáticos por tensión constante y automáticos por corriente constante.

La corriente drenada por los rectificadores es suministrada a electrodos auxiliares (ánodos), mediante una interconexión eléctrica entre el terminal positivo del rectificador y los ánodos, esto para forzar la descarga de corriente de protección y ocurra una migración de cargas iónicas hacia la estructura a través del electrolito del medio. El terminal negativo del rectificador se conecta a la estructura a proteger para cerrar el circuito eléctrico.

Las condiciones de diseño que se deben estimar para escoger un rectificador son:

- Características constructivas del rectificador básicamente en del medio ambiente donde va a operar (rectificador por aire o por aceite).

- Características de la corriente alterna disponible en el área (Voltaje, frecuencia, número de fases).
- Requerimiento máximo de salida en corriente directa (Intensidad de corriente y Voltaje).
- Sistema de seguridad, control y monitoreo: alarmas, interruptores, sistemas de monitoreo remoto, etc.
- Instrumentación: voltímetros y amperímetros, sistemas de regulación.

La selección del rectificador estará en función de los parámetros requeridos en cuanto al voltaje y corriente de salida en corriente directa (DC), que serán definidos por variables de cálculo como la resistencia total del circuito eléctrico. Por eso es de gran importancia la determinación de criterios de selección de todos estos factores involucrados. Estos equipos pueden conseguirse en un amplio rango de dimensiones con valores de salida para voltajes que va desde 12 a 240 Voltios y de corriente que varía entre 3 a 200 Amperios.

### 2.6.3. **Cables conductores**

La función de los cables conductores dentro de un sistema de protección catódica, es la de transmitir o conducir la corriente por todo el circuito eléctrico, que es suministrada por el rectificador para



energizar a los ánodos, formando de esta manera el circuito positivo, y por otra parte, conectar el fondo y/o pared del tanque al punto negativo del rectificador, para garantizar un retomo adecuado de corriente.

Generalmente se emplean cables de cobre, con doble cubierta protectora, fabricados para entrenamiento directo y con calibre que varía de acuerdo a la intensidad de corriente que puedan conducir.

#### **2.6.4. Electrodo o celdas de referencia permanentes**

Cuando se aplica protección catódica a una estructura, es extremadamente importante saber si esta se encontrará realmente protegida contra la corrosión en toda plenitud. Varios criterios pueden ser adoptados para comprobar que la estructura en mención está exenta de riesgo de corrosión, basados unos, en función de la densidad de corriente de protección aplicada y otros en función de los potenciales de protección obtenidos.

No obstante, el criterio más apto y universalmente aceptado es el de potencial mínimo que debe existir entre la estructura y el medio.

El criterio de potencial mínimo se basa en los estudios realizados por el profesor Marcel Pourbaix, en 1939, quién estableció a través de un diagrama de potencial de electrodo vs pH del medio.

## CAPÍTULO III

# CÁLCULO Y DISTRIBUCIÓN DE ÁNODOS DE SACRIFICIO Y CORRIENTE IMPRESA

### 3.1 CÁLCULO DE ÁNODOS DE SACRIFICIO

En este capítulo aplicamos las fórmulas y conocimientos anteriores para el cálculo de la protección con ánodos de sacrificio a nuestro objeto de estudio.

Parámetros de diseño:

Área a proteger	= 520 m <sup>2</sup> , calculado a máximo calado (3.8 m) (ver anexo 2)
Densidad de corriente	= 25 mA/m <sup>2</sup> (ver tabla 2.6)
Factor de inmersión	= 1.0 (ver anexo 3)
Tiempo	= 5 años = 43800 h, según requerimiento de cliente para protección con ánodos.
Capacidad de corriente	= 820 A-h/Kg (ver anexo 1)
Factor utilización de ánodo	= 0.85 (ver anexo 3)
Rendimiento del ánodo	= 0.95 (ver anexo 1)

- Cálculo de peso total de ánodos para proteger la estructura:

$$P = \frac{A \times \delta \times t}{C \times f_u \times n \times 1000}$$

$$P = \frac{520 \times 25 \times 43800}{820 \times 0.85 \times 0.95 \times 1000} = 859.93 \text{ Kg}$$

Comparemos este peso total requerido con el estándar internacional, según Sname Technical and Research bulletin N° R-21 "Fundamentals of cathodic protection for marine service":

$$P = \frac{A \times \delta \times f \times t}{C \times f_u \times 1000}$$

$$P = \frac{520 \times 25 \times 1.0 \times 43800}{820 \times 0.85 \times 1000} = 816.93 \text{ Kg}$$

Se observa que el peso calculado con el estándar internacional es menor, ya que no considera el rendimiento de cada ánodo, por tal se utilizaremos como válido el peso de 859.93 Kg.

- Por requerimiento del cliente estos ánodos deben ser de 24 Lb (11 Kg) aproximadamente, por lo tanto se requerirán **80 ánodos de 11 Kg** en total.
- Estos ánodos se confeccionarán de forma rectangular con agujeros para empemar, y de acuerdo a la densidad de la aleación de zinc y al peso individual estos serán de **302x150x37 mm**.

- Ahora, para calcular el radio de acción de cada ánodo hallaremos primero la corriente individual de cada ánodo, aplicando las formulaciones de Dwight para la resistencia del ánodo y la ley de Ohm tendremos:

$$I_a = \frac{\Delta E \times L}{0.159 \times \rho_m \times \left[ \ln \left( \frac{4L}{a} \right) - 1 \right]}$$

Reemplazando tendremos:

E (V)	=	0.25 (ver anexo 1)
L (cm)	=	30.20
resistividad (ohm-cm)	=	18.00 (tabla 2.3)
Perímetro (cm)	=	37.40
a (cm)	=	5.95
<b>I (A)</b>	=	<b>1.31</b>

- Ahora calculamos el área de control, que es el espacio que protege cada ánodo (para una densidad de corriente de 25 mA/m<sup>2</sup>).

$$\text{Área de control} = \frac{I_a}{\delta_{\text{corriente}}}$$

Tenemos que el área de control es 52.4 m<sup>2</sup>, la cual reemplazamos en:

$$r = \sqrt{\text{Área}/\pi}$$

Y podemos hallar el radio de acción de dicho ánodo, que es **4.08 m**. Este valor nos servirá de referencia al momento de realizar la distribución de cada ánodo.

- Calculamos la resistencia eléctrica de los ánodos:

$$R = \frac{0.00521 \times \rho}{NL} \times \left( \left[ \ln\left(\frac{4L}{a}\right) - 1 + \left(\frac{2L}{S}\right) \ln(0.656N) \right] \right)$$

R = Resistencia ánodo-electrolito (Ohm).

L = Longitud del ánodo (pies).

N = Número de ánodos.

S = Espaciamiento entre ánodos (pies)

a = Radio equivalente del ánodo (pies).

$\rho$  = Resistividad del electrolito (Ohm-cm).

L (pies)	=	1.64
N	=	2
S(pies)	=	82.0
Perímetro (mm)	=	46.0
a (pies)	=	0.024
Resistividad (Ohm-cm)=		18.0
<b>R (ohm)</b>	<b>=</b>	<b>0.132</b>

- Calculamos la resistencia en los cables:

Seleccionamos cables AWG N°8 y consideramos 25 m de longitud hacia cada ánodo, esto incluye demasías.

$$R = \frac{2 \times \rho \times l}{A}$$

R = Resistencia de los conductores (Ohm).

$\rho$  = Resistividad del conductor (Ohm-mm<sup>2</sup>/m).

l = Longitud del conductor (m).

A = Sección del conductor (mm<sup>2</sup>).

$\rho$ (Ohm-mm <sup>2</sup> /m)	=	0.018
l (m)	=	50.0
A (mm <sup>2</sup> )	=	8.36
<b>R (ohm)</b>	=	<b>0.215</b>

- Selección del Rectificador:

La resistencia total será:  $0.132 + 0.215 = 0.347$  Ohm, el voltaje:  $13 \times 0.347 = 4.52$  V  $\rightarrow (150\%) \times 4.52 = 6.78$  V.

Por tanto se requiere un rectificador de **6.78 Voltios** y suministre **13 amperios** como mínimo.

### 3.3 DISTRIBUCIÓN DE ÁNODOS DE SACRIFICIO Y CORRIENTE IMPRESA

En los anexos 08 y anexo 09 se ha realizado esquemas para la distribución de ánodos de zinc y corriente impresa.

En el caso de lo ánodos de zinc se ha realizado en base a los cálculos realizados y a la buena práctica que el astillero Sima Chimbote realiza para estos tipos de sistemas.

Pero para la corriente impresa, sólo se ha realizado un bosquejo de los lugares que podrían estar instalados los equipos que conforman este sistema y está en base a información encontrada en la página web del proveedor.

## CAPÍTULO IV

### SELECCIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICO

#### 4.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE ÁNODOS DE SACRIFICIO

Los ánodos galvánicos son aplicables y efectivos donde los requerimientos de corrientes son bajos, donde la estructura a proteger se encuentra bien revestida y donde existe baja o media resistividad del medio circundante.

##### 4.1.1. Ventajas

- Fácil de instalar, no necesariamente la mano de obra debe ser calificada para que instale los ánodos.
- No se necesita de una fuente de corriente continua ni de un regulador de voltaje, ya que es el propio ánodo quien emite corriente.
- No necesita cables ni de un sistema que aporte energía eléctrica, son los propios ánodos que emiten energía.

- No provoca problemas de interferencia con equipos electrónicos u otros.
- Bajo costo de mantenimiento, sólo es necesario realizar cambio de ánodos. Es bajo sin considerar el costo por varada de la embarcación en algún astillero.
- Permite obtener una distribución de corriente uniforme.
- Se puede aumentar el número de ánodos, con el sistema en operación.

#### 4.1.2. **Desventajas**

- Corriente suministrada limitada, debido la cantidad de ánodos; y conforme se vayan consumiendo suministrarán menos corriente.
- Ineficaz en ambientes de resistividad elevada, ya que sólo está calculado para una determinada resistividad.
- Alto consumo de ánodos para estructuras sin revestimiento en agua de mar.



## 4.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE CORRIENTE IMPRESA

La aplicación de este sistema es para reduce significativamente los costos de mantenimiento a través de la vida de operación.

### 4.2.1. Ventajas

- Con una sola instalación se pueden proteger superficies muy grandes. Es eficaz para proteger estructuras no recubiertas o mal recubiertas.
- El número de ánodos dispersores es mucho menor, y su peso también. Además tiene un control preciso de la cantidad de corriente suministrada.
- Se puede utilizar en ambientes de resistividad elevada, se puede ajustar para niveles de protección.
- Se puede suministrar grandes cantidades de corriente a las estructuras, dependiendo de la capacidad del rectificador seleccionado.

### 4.2.2. Desventajas

- Puede causar problemas de interferencia, se requiere de una fuente de corriente continua

- Está sujeto a rotura de la fuente de corriente, requiere de una inspección periódica y de mantenimiento.
- Posibilidad de condiciones de sobreprotección con daños a recubrimientos y problemas de fragilización por la acción del hidrógeno.
- Potencia externa tiene que ser comprada, riesgo de conectar con polaridad incorrecta.
- Más complejo y menos robusto que el sistema de ánodos de sacrificio en ciertas aplicaciones.
- La instalación del lecho de ánodos debe estar limitada a las zonas con menor resistividad, lo cual puede influir de manera representativa en la distribución de la corriente eléctrica.
- En caso de sobrepasar los valores de potencial recomendados, genera daños al recubrimiento.

### 4.3. CUADRO COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

La tabla 4.1 resume las ventajas y beneficios que se tiene al hacer uso de los ánodos de sacrificio como protección catódica en embarcaciones, se puede observar que la protección catódica es mucho más fácil de instalar, mantener y el costo es bajo; además de no causar interferencias ni problemas con otros equipos que tiene instalado el remolcador.

En contra con la corriente impresa que es un sistema que necesita mantenimiento y mano de obra especializada para su instalación, además de ser más costoso al inicio.

**Tabla 4.1** Ventajas de los ánodos de sacrificio de zinc respecto a la corriente impresa.

<b>Ánodos de sacrificio</b>	<b>Corriente impresa</b>
Fácil de instalar, no necesariamente la mano de obra debe ser calificada para que instale los ánodos.	Para la puesta en marcha se requiere mano de obra calificada, normalmente lo hace el proveedor.
No se necesita de una fuente de corriente continua ni de un regulador de voltaje.	Requiere de una fuente de corriente continua.
No necesita cables ni de un sistema que aporte energía eléctrica.	Conexiones y cables sujetos a roturas.
No provoca problemas de interferencia.	Puede causar problemas de interferencia.
Bajo costo de mantenimiento.	Requiere de una inspección periódica y de mantenimiento.

La tabla 4.2 resume las ventajas y beneficios que se tiene al hacer uso de la protección con corriente impresa, se puede observar que este sistema se puede utilizar en altas resistividades, y la protección puede ser hasta en cascos sin recubrimientos incluso; además se puede suministrar grandes corrientes, por tal para grandes áreas es ideal.

**Tabla 4.2** Ventajas de corriente impresa respecto a los ánodos de sacrificio.

<b>Corriente impresa</b>	<b>Ánodos de sacrificio</b>
Se puede suministrar grandes cantidades de corriente a las estructuras, dependiendo de la capacidad del rectificador seleccionado.	Corriente suministrada limitada, debido la cantidad de ánodos; y conforme se vayan consumiendo suministrarán menos corriente.
Se puede utilizar en ambientes de resistividad elevada.	Ineficaz en ambientes de resistividad elevada, ya que sólo está calculado para una determinada resistividad.
Alto consumo de ánodos para estructuras sin revestimiento en agua de mar	Alto consumo de ánodos para estructuras sin revestimiento en agua de mar.

## CAPÍTULO V

### COSTOS

#### 5.1. COSTOS DE IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE PROTECCION CATÓDICA

Los costos que a continuación se presentan son aproximados, tomados de referencias los que se utilizan en el astillero SIMA Chimbote o de algunas cotizaciones. Se considera un tipo de cambio aproximado de 1U\$ = S/ 2.55, y 1 € = S/ 3.33.

##### 5.1.1. Costos implementación de ánodos de sacrificio

Los costos que se presentan a continuación son los que el cliente tendría que pagar a algún astillero para instalar todos los ánodos.

1. Costo ánodos de zinc (ver anexo 05):

Se cotizó los ánodos de zinc a un proveedor nacional, siendo el costo de 36.6 \$ por cada ánodo. **Total : S/ 7466.4**

2. Costo de instalación de sobreplanchas:

Según plano N° JI-2013-0001, cada sobreplancha es de 370x200x8.0 mm, por lo cual se necesitará un retazo de plancha de 4000x1800x8.0 mm, esto hace un peso de 452.16 Kg. Siendo el costo de acero instalado 2.5 \$/Kg (incluye material, insumos y mano de obra) tenemos: **Total : S/ 2882.5 aproximadamente.**

3. Costo pernos y tuercas (ver anexo 6):

Según plano N° JI-2013-0001, los ánodos se instalarán con pernos y tuercas, se necesitarán 160 pernos de acero inoxidable AISI 316, de ½" diámetro x 1. ½" longitud, con sus respectivas tuercas. El precio por cada perno y tuerca es de S/ 1.74. **Total : S/ 278.4**

4. Costo de instalación de pernos y ánodos:

Cada perno se deberá soldar a la sobreplancha y luego instalar el ánodo con su respectiva empaquetadura. Este costo será por las horas hombre que se utilicen, será 160 h-h aproximadamente, el costo por cada h-h es de S/ 15.0. **Total : S/ 2400.0**

5. El resumen de todos los costos:

**Tabla 5.1** Costos de implementación de ánodos de sacrificio.

<b>ACTIVIDAD</b>	<b>COSTO (S/)</b>
Costo ánodo de zinc	7466.4
Costo instalación de sobreplanchas	2882.5
Costo de pernos y tuercas	278.4
Costo de instalación de pernos y ánodos	2400.0
<b>TOTAL (S/)</b>	<b>13027.3</b>

**5.1.2. Costos implementación de corriente impresa**

1. Costo del sistema (ver anexo 07):

Con los datos que se presenta en este informe (áreas, densidades, resistividad, etc.) se envió a un proveedor de sistemas de corriente

impresa (CATHELCO) para que nos cotice el sistema completo. El proveedor cotizó un precio ex-work de 5700 €, se deberá incrementar en un 40% aproximadamente por gastos de fletes y desaduanaje, esto sería 7980 € (para que el producto llegue hasta el astillero). **Total : S/ 26573.4**

2. Costo de instalación del sistema ICCP:

El sistema de corriente impresa llega completo, pero la instalación debe realizarse en las instalaciones del astillero, esta cotización incluye accesorios, bases, cables, etc. **Total : S/ 8500.0**

3. Costo de puesta en marcha:

Será necesario que 1 técnico del proveedor que vendió el equipo esté en la puesta en marcha del sistema (2 días), se ha estimado un costo de: **Total : S/ 4000.0**

4. En resumen:

**Tabla 5.2** Costos de implementación de corriente impresa.

<b>ACTIVIDAD</b>	<b>COSTO (S/)</b>
Costo del sistema	26573.4
Costo de instalación	8500
Costo puesta en marcha	4000
<b>TOTAL (S/)</b>	<b>39073.4</b>

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Según los cálculos de la página 46 se puede observar que cada año disminuirá el peso de los ánodos en 25.79 Kg, tal es así que en 5 años habrá disminuido en 128.98 Kg, lo cual representa 15% del total del peso de ánodos; a partir de este momento cada vez que disminuya el peso conforme pasa el tiempo ya no emitirá la misma corriente (13 A), por lo cual se recomendará realizar el cambio de ánodos.
2. Se puede observar que para la corriente impresa, los ánodos de titanio emiten 12 A de corriente, en relación a los ánodos de sacrificio que emiten 1.32 A; esto significa que para la protección con corriente impresa se requerirán menos ánodos para proteger los 520 m<sup>2</sup> (ver página 47 y 48) además será mucho mayor debido a que tiene menor consumo respecto a los ánodos de sacrificio.
3. Para este remolcador se recomienda hacer uso de ánodo de zinc como protección catódica, ya que el costo es mucho menor (64% menos), además que el mantenimiento de carena es cada 4 o 5 años y se puede aprovechar para el cambio de ánodos.



## BIBLIOGRAFIA

1. **“Protección Catódica - Diseño de Ánodos de Sacrificio”**

Samuel Rosario Francia

Revista del Instituto de Investigación FIGMMG Vol 7, N°13,37-44

Año 2004

2. **“Handbook of Corrothion Engineering”**

Pierre R. Roberge – McGraw Hill

Año 1999

3. **“Investigación en optimización del Sistema de Protección Catódica para buques que operan en Zonas Marinas Tropicales”**

Ing. Jose Alfredo Morales Torres

COTECMAR. Colombia, Dirección de Investigación Desarrollo e Innovación

4. **“Fundamentals of Cathodic Protection for Marine Service”**

Technical and research bulletin No. R-21

Publicado por: The Society of Naval Architects and Marine Engineers

Año 1976

5. **“Análisis Técnico Económico de los Sistemas de Protección Catódica en fondos externos de Tanques de Almacenamiento con Ánodos de Titanio”**

Eric Alexander Guilarte Silva

Tesis de Grado para optar el título de Ing. Metalúrgico – Universidad Central  
de Venezuela

Año 2002

**6. “Catalogo CELSA - Capacidad de Corriente Permisible”**

Conductores Eléctricos Lima S.A.

Sección Técnica

**7. “Corrosión” Información sobre publicaciones de la ETSIN**

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales

Universidad Politécnica de Madrid

**8. “Electrical Design, Cathodic Protection”**

Technical Manual TM5-811-7. Department of the Army Washington D.C.

Año 1985

**9. “Impressed Current Cathodic Protection – Automatic Systems for  
Ships Hulls”**

Publicado por: MG Duff International

**10. “Protección Catódica con Ánodos Galvánicos”**

Carlos A. Giudice y Andrea M. Pereyra

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional La Plata

Carrera de Ingeniería Química

**11. “Protección Catódica de un Buque RoRo de 210 Plataformas”**

Ismael Diez Ortega

Proyecto de Fin de Carrera de Ingeniería Técnica Naval - Universidad de  
Cádiz

Año 2008

**12. [www.procast.com.ar/pc/index.html](http://www.procast.com.ar/pc/index.html)**

**13. [www.sorena.cl/es/pcatodica.htm](http://www.sorena.cl/es/pcatodica.htm)**

**14. [www.zineti.com/info/info.php](http://www.zineti.com/info/info.php)**

**15. [www.wilsonwaltoncaribbean.com/anodos\\_proteccion\\_catodica.html](http://www.wilsonwaltoncaribbean.com/anodos_proteccion_catodica.html)**

**16. [www.wilsonwaltoncaribbean.com/proteccion\\_catodica.html](http://www.wilsonwaltoncaribbean.com/proteccion_catodica.html)**

## ANEXOS

1. Tabla de propiedades de ánodos de zinc, de acuerdo a especificación norteamericana MIL-A 18001-H.
2. Curvas de forma del remolcador de 55 TM de Bollard Pull.
3. Boletín N° R-21, "Fundamentals of Cathodic Protection for Marine Service", SNAME.
4. Ficha de ánodos de titanio activado DSA en forma de platina.
5. Cotización de ánodos de zinc de la empresa: Zinc Industrias Nacionales S.A.
6. Cotización de pernos y tuercas de la empresa: FerriPem.
7. Cotización de sistema de protección catódica CATHELCO, de la empresa: Llalco (España)
8. Plano N° JI-2013-0001, Disposición de ánodos de zinc.
9. Plano N° JI-2013-0002, Disposición de equipos de corriente impresa.

	Ánodo de zinc	Ánodo de Magnesio	Ánodo de aluminio		
Designación	MIL-A 18001-H	MIL-A 24412-A	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Composición %	Cd = 0,025 - 0,15 Al = 0,10 - 0,50 Fe = 0,005 máx. Pb = 0,006 máx. Cu = 0,005 máx. Si = 0,125 máx.	Cu = 0,1 máx. Al = 5 - 7 Si = 0,3 máx. Fe = 0,003 máx. Mn = 0,15 mín. Ni = 0,003 máx. Zn = 2 - 4 Otros = 0,3 máx.	Si = 0,11 - 0,21 Fe = 0,10 máx. Zn = 0,3 - 0,5 Sn = --- Mg = --- Hg = 0,02 - 0,05 In = --- Cu = 0,006 máx. Otros = 0,02 máx.	Si = 0,10 máx. Fe = 0,13 máx. Zn = 3,5 - 5,0 Sn = --- Mg = 0,3 - 0,8 Hg = --- In = 0,02 - 0,05 Cu = 0,006 máx. Otros = 0,02 máx.	0,10 máx. Fe = 0,13 máx. Zn = 4 - 5 Sn = 0,08 - 0,16 Mg = --- Hg = --- In = --- Cu = 0,01 máx. Otros = 0,02 máx.
Gravimétrico	0.95	0.5	0.95	0.9	0.5
Potencial de trabajo mV / AgCl	-1050	-1550	-1050	-1100	-1100
Potencial vs protegido	-250	-700	-250	-350	-350
Capacidad teórica (A-h / lb)	820 (368)	2210 (1100)	2830 (1290)	2700 (1231)	variable
Capacidad real (A-h / lb)	780 (356)	1100 (503)	2689 (1226)	2430 (1110)	variable,
Consumo ánodo A-año	11,00	8,00	3,00	10,00	5,50
Consumo A-año	23,8	17,5	6,8	21,9	12
Densidad / dm3	7,3	1,77	2,75	2,81	2,81
Densidad pulg.3	0,258	0,063	0,098	0,10	0,10

**CURVAS DE FORMA – PROY. REMOLCADOR DE 55 TM DE BOLLARD PULL**

**Hull Form Coefficients (with appendages)**

Draft is from Baseline

Trim: zero

Heel: zero

Draft m	Volume m <sup>3</sup>	Coefficients						WS Area m <sup>2</sup>
		Cp	Cb	Cms	Cwp	Cvp	Cws	
0.100	3.82	0.575	0.562	0.979	0.761	0.739	10.676	53.36
0.200	10.11	0.575	0.553	0.962	0.776	0.713	7.848	72.62
0.300	18.20	0.577	0.546	0.946	0.794	0.688	6.670	89.62
0.400	27.72	0.577	0.537	0.931	0.798	0.673	5.964	104.73
0.500	38.70	0.579	0.530	0.916	0.793	0.669	5.460	118.49
0.600	50.94	0.578	0.522	0.903	0.785	0.665	5.073	131.15
0.700	64.41	0.579	0.531	0.917	0.804	0.661	4.813	144.41
0.800	78.87	0.580	0.538	0.927	0.810	0.664	4.559	155.67
0.900	94.21	0.581	0.543	0.935	0.821	0.661	4.383	167.72
1.000	110.45	0.582	0.548	0.942	0.821	0.668	4.177	176.96
1.100	127.39	0.582	0.551	0.947	0.823	0.670	4.028	187.10
1.200	145.17	0.583	0.554	0.951	0.833	0.666	3.923	198.27
1.300	163.23	0.584	0.556	0.952	0.812	0.684	3.902	212.78
1.400	181.82	0.584	0.556	0.952	0.808	0.688	3.800	222.36
1.500	201.14	0.584	0.556	0.952	0.816	0.681	3.726	233.08
1.600	221.14	0.584	0.556	0.952	0.815	0.682	3.644	242.64
1.700	241.75	0.584	0.556	0.952	0.817	0.681	3.574	252.30
1.800	263.00	0.584	0.556	0.952	0.825	0.674	3.539	264.29
1.900	284.99	0.583	0.555	0.952	0.821	0.676	3.464	273.14
2.000	307.52	0.580	0.552	0.952	0.817	0.676	3.402	282.70
2.100	330.74	0.577	0.549	0.952	0.823	0.667	3.373	295.02
2.200	354.76	0.572	0.545	0.952	0.822	0.663	3.329	306.33
2.300	379.42	0.567	0.539	0.952	0.816	0.661	3.276	316.91
2.400	404.83	0.556	0.529	0.952	0.810	0.654	3.235	329.98
2.500	431.06	0.506	0.482	0.952	0.753	0.640	3.080	343.44
2.600	458.96	0.516	0.491	0.952	0.805	0.610	3.190	367.88
2.700	488.73	0.527	0.502	0.952	0.846	0.593	3.259	388.63
2.800	519.93	0.539	0.513	0.952	0.884	0.580	3.316	408.48
2.900	552.30	0.551	0.525	0.952	0.903	0.582	3.311	420.84
3.000	585.65	0.564	0.537	0.952	0.932	0.575	3.337	437.44
3.100	619.67	0.576	0.548	0.952	0.934	0.587	3.288	443.93
3.200	653.79	0.587	0.559	0.952	0.935	0.598	3.242	450.00
3.300	688.02	0.598	0.570	0.952	0.938	0.607	3.202	456.40
3.400	722.48	0.609	0.580	0.952	0.946	0.613	3.175	463.98
3.500	757.61	0.619	0.590	0.953	0.963	0.612	3.169	474.60
3.600	793.09	0.628	0.600	0.955	0.968	0.620	3.140	481.28
3.700	828.70	0.638	0.609	0.956	0.970	0.628	3.110	487.42
<b>3.800</b>	<b>864.39</b>	<b>0.646</b>	<b>0.618</b>	<b>0.957</b>	<b>0.971</b>	<b>0.637</b>	<b>3.082</b>	<b>493.44</b>
3.900	900.24	0.655	0.627	0.958	0.982	0.639	3.076	502.76
4.000	936.44	0.663	0.636	0.959	0.985	0.646	3.053	509.01

Note: Coefficients calculated based on waterline length at given draft

El área de 493.4 m2 no considera appendices (2 toberas, 2 palas principals y 4 palas secundarias), teniendo estos un área de aproximadamente 25 m2.

Por tanto los cálculos para protección catódica serán para **520 m2**.



**TECHNICAL AND RESEARCH BULLETIN NO. R-21**

# **Fundamentals of Cathodic Protection for Marine Service**

Published by  
The Society of Naval Architects and Marine Engineers  
601 Pavonia Avenue  
Jersey City N.J. 07306

TECHNICAL AND RESEARCH REPORT R-21

**FUNDAMENTALS OF CATHODIC PROTECTION  
FOR MARINE SERVICE**

Prepared by

**PANEL O-23 (SHIPS' PAINTS)  
of  
SHIP TECHNICAL OPERATIONS COMMITTEE**

Published by

**THE SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS  
74 Trinity Place, New York, New York 10006**

JANUARY, 1976

© Copyright 1976 by The Society of Naval Architects and Marine Engineers



## ACKNOWLEDGEMENTS

Work on this publication was done by the Subcommittee for Cathodic Protection of Panel O-23, under the guidance and leadership of Subcommittee Chairman Donald F. Koenecke, Exxon Research and Engineering Company.

## INTRODUCTION

This report, prepared by Panel O-23 (Ships' Paints) of the Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME) Technical and Research Program, describes the fundamentals of cathodic protection as a means of controlling corrosion. Its purpose is to familiarize marine personnel with the technical or electrochemical principles which apply and the basic methods for introducing cathodic protection to hulls, ballasted tanks, propellers, and sea water circulating systems.

To do this, the corrosion mechanism is described as an electrochemical reaction which results in oxidation or corrosion of ships components upon exposure to salt water. Cathodic protection is defined as a method of arresting that electrochemical reaction thus desirably preserving metal. Both methods; galvanic anodes and impressed current systems, are outlined and compared for control, applicability, reliability, and maintenance. In addition, precautionary observations relating to their use and to potential problems are discussed.

## ABSTRACT

This report at first discusses in fundamental terms the nature of galvanic corrosion and electron flow, and then examines the behavior of dissimilar metals in a sea water electrolyte, and of how applied currents can protect steel surfaces. With this background, the report then details the design, application and maintenance of both galvanic anode systems and impressed current systems, covering types of anodes and shields, method of attachment, power supplies and current requirements, monitoring and precaution to be taken during docking.

CONTENTS

	<u>Page</u>
THE NATURE OF CORROSION . . . . .	1
Flashlight Cells	
Electrochemical Reactions	
Reaction Rates	
Passivation	
CORROSION IN SEA WATER. . . . .	4
Opposed Reactions	
External Energy Applied	
Galvanic Couples	
Obtaining Passivity	
DESIGN AND APPLICATION OF CATHODIC PROTECTION . . . . .	8
Galvanic Anode Systems	
Sacrificial Anodes	
Costs	
Requirements	
Impressed Current Systems	
System Capacity	
Distribution and Control	
Anodes and Shields	
Protecting Other Equipment	
MAINTENANCE OF CATHODIC PROTECTION. . . . .	14
Galvanic or Sacrificial Anodes	
Expected Renewals	
Redistribution	
Impressed Current Systems	
Power Units	
Cells, Anodes and Shields	
Monitoring	
Attention During Docking	

## FUNDAMENTALS OF CATHODIC PROTECTION FOR MARINE SERVICE

### THE NATURE OF CORROSION

Corrosion of metals in sea water and other aqueous environments is electrochemical in nature. This means that a flow of electricity (electrons) occurs between certain areas of metal surface through a solution capable of conducting an electric current (electrolyte). This electrochemical action causes deterioration or eating away of a metal at areas which are called anodes where electrons leave the metal, flow internally to a cathode (more electro-positive area), and enter the solution. The solution or electrolyte must also be in contact with the anode completing the circuit for corrosion to continue. These electrodes (anodes and cathodes) may consist of two different metals or they may be different areas on the same piece of metal, due to impurities on the surface, differences in surface structure, steel renewals, or to differences in the environment next to metal (oxygen concentration).

### Flashlight Cells

A common example of an electrochemical action is the flashlight battery. Its principles of operation will illustrate the basic electrochemical corrosion processes. A brief comparison with an unprotected hull in sea water will provide an easy understanding of the problem to be confronted.

Figure 1 shows a simplified version of a flashlight and particularly the "dry" cell which provides the electrical energy making it useful. The cell consists of a negative zinc anode, a moist paste electrolyte, and a carbon cathode. The similarity with an unprotected hull in sea water is also illustrated.

It is of particular interest to note that, as illustrated, when the flashlight switch is open, there is no electrochemical reaction, no electrons can flow through the broken circuit,

and no corrosion occurs at the zinc anode. Once the switch is closed and the circuit is complete, electrons flow, providing energy to light the bulb. The source of the energy is the corrosion of the zinc anode which releases the electrons with sufficient drive or potential to maintain the light. The process at the anode is chemically termed oxidation of the zinc. Other reactions (reduction) at the graphite cathode utilize the electrons enabling the process to continue until the zinc is spent.

The similarity of an unprotected ship's hull in sea water is also illustrated in Figure 2. Primary differences are that no switch exists to cut off the flow of electrons and the reaction is undesirable. Since the earth is a near infinite acceptor of electrons, the process tends to continue until the hull is spent or wasted away. As long as the electron flow follows an unimpeded path of low resistance, the rate of wastage will be rapid.

### Electrochemical Reactions are Precise and Measurable

Chemical reactions depending upon electron flow are based on a fixed number of those electrons per atom. Furthermore, in a given environment, there is a definite measurable driving force causing the reaction to proceed. Just as in the dry cell (which provides a known voltage) this is a fixed value, electrochemically known as the corrosion potential, measured in volts. For example, carbon steel in sea water has a corrosion potential of about -0.6 volts. These facts make it possible to calculate the amount of metal which may be lost to corrosion and to determine the energy levels that are involved. For these same reasons it is possible to exercise some control.

### Electrochemical Corrosion Reaction Rates

The preceding illustration (Figure 1) based on a flashlight made note

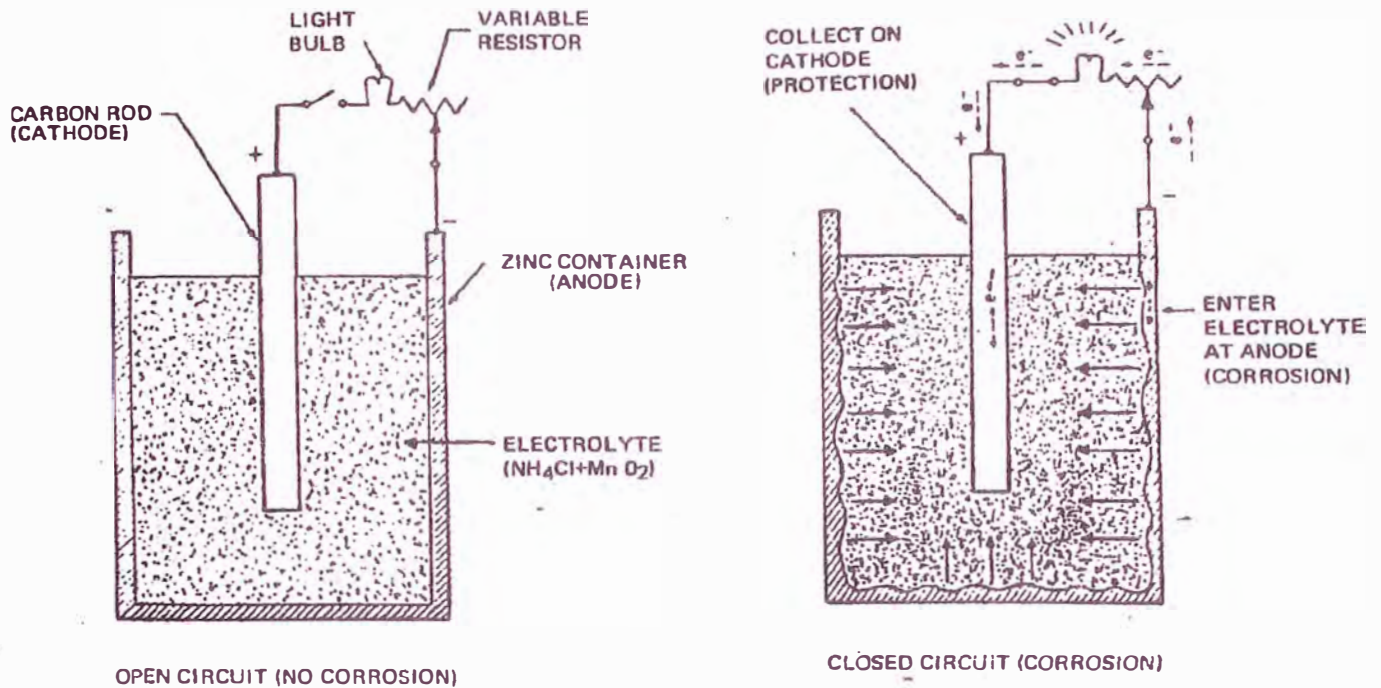


FIG. 1 - ELECTROCHEMICAL CORROSION OF A DRY CELL

of an important fact. When the switch was open, no electrons could flow and the zinc did not corrode. This is the basic premise for corrosion control. Prevention of electron loss (or prevention of oxidation) from the metal to be saved will prevent metal loss. The approach is quite obvious. Some method must be employed to interfere with the electrical circuit.

Since a switch is not a practical solution for a structure such as a ship's hull, other means must be employed. One common way is the use of protective coatings. They barricade the steel from the electrolyte (sea water), thus arresting electron flow. As long as they are intact, they further prevent local galvanic cells from forming by insulating the anode from the cathode. If such cells are allowed to continue in the active state, they result in local pitting.

When the coating functions ideally, without faults, holidays (voids), damage, or degradation, no corrosion normally occurs. In practice, these weaknesses always appear sooner or later. Then, corrosion, the electrochemical reaction, can initiate. Consequently, added protection through re-painting or some other means is necessary to avoid drastic local effects, often in the form of deep pitting.

It was noted above that the uncontrolled process has a finite drive or force tending to continue the reaction. If an equal or greater opposing force is applied, the rate is greatly reduced or corrosion is stopped altogether. This can be done by supplying enough electrons from another more powerful source so that the supply will make the structure protect the cathode. As noted in Figure 1, corrosion does not occur at the cathode.

This application of an opposing force, thus providing a surplus of electrons without loss of steel, is cathodic protection.

#### Polarization, The State of Passivation

For the present purposes, suppression or arrest of electron flow results in no corrosion or a passive state. It must apply to the complete structure being preserved or protected. At the same time, it must not be at the expense of other equally indispensable equipment. For these reasons, design and understanding are critical.

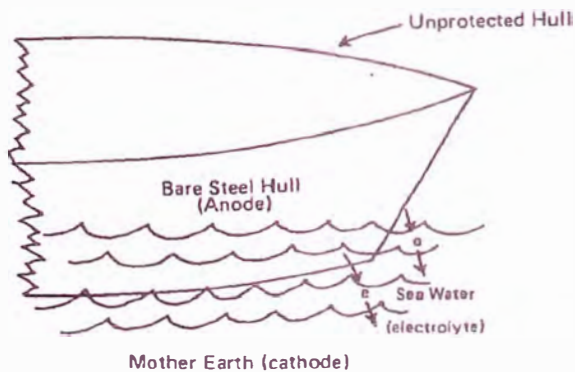


FIG. 2



A previous paragraph noted that a perfect or ideal organic coating may prevent electron flow thus providing a passive state. Small faults or voids interrupting the "perfect" condition result in rapid electron loss--and rapid pitting corrosion--under some circumstances. Since the "perfect" condition is difficult to attain and to maintain, supplementary protection is usually necessary.

Further analysis suggests that a more direct or general approach is needed. Elimination of the electrolyte (sea water) is not a possibility (other than through the use of coatings) since the hull must float in it. The remaining alternate is to oppose the undesirable flow of electrons with a more powerful source. This means being prepared to sacrifice another material --or energy--for the purpose. This is the area of cathodic protection to be considered and applied.

Understanding the process of corrosion in a simple form is helpful. The tendency for materials to seek a stable state, often that found in nature, is often quoted as a fundamental principle. Thus iron as a dominant element in steel tends to oxidize or corrode to form rust. Examining this reaction leads to an understanding of its control.

The chemist's concept of a metal is a solid composed of atoms strongly or rigidly attracted to each other to form a stable shape or structure. Yet, the atoms are in constant motion if only in the form of vibration. The environmental conditions such as temperature, water, air, determine the degree. In addition, the chemist visualizes the outer portion of the atom as a cloud of electrons rotating in a series of orbits. The outer orbit does not have enough electrons to be stable, and therefore, will yield them in the urge to reach a stable, natural form. The force or energy available to encourage that release determines the stability of the metal. Gold, for example, is much less energetic about giving up electrons than is iron. Thus, it resists tarnishing or corrosion and, in fact, is found as a metal in nature.

If iron is placed in water, the motion and urge to react will cause some atoms to lose 2 electrons, forming a new particle called an ion. It is now electropositive since the 2 negative electrons were lost, is soluble in water, and this ion is much more mobile.

If the mother iron is isolated from other conductive materials, it

then must be negative, because it carries the 2 extra electrons which cannot escape. Their energy level is too low to overcome the resistance of their surroundings. However, as the process continues and more positive particles go into solution, the charge on the mother metal builds up. Ultimately, the negative charge, due to the electron buildup, attracts the positive ions back in an electromagnetic fashion and neutralizes them. When the number of returning ions is equal to the number of atoms forming new ions, equilibrium is reached. No further corrosion (metal loss) results.

It is equally apparent that if the released electrons can depart from the mother metal via a low resistance electrical path, the solution process can continue. Unfortunately, the equilibrium state is theoretical for iron or carbon steel structures and corrosion usually does continue to ultimate destruction. In practical situations, the free electrons can flow to some other surface which has a more positive potential (cathodic) and where they enter into a reaction. The rate is dependent upon the driving force or potential difference (voltage) between the corroding site (anode) and the protected site (cathode).

It has been noted that common metals and alloys tend to revert to a stable natural form via a known energy level. Usually, this is the corroded form, iron oxide in the case of steel. If two dissimilar metals are immersed in sea water and are connected or bonded together by a low resistance path, a competition results. Both tend to yield free electrons and dissolve. The electrons from each source want to follow the low resistance conductor. It is immediately apparent that those from the low energy source cannot make it to the more negative area at the higher energy level. In fact, the reverse occurs and the electron flow is from the more energetic source creating an unusually high energy level at the less vigorous electrode. It may be compared to pumping water uphill. A sufficient pressure head overcomes the tendency to flow back and carries upward.

In this way, an energetic metal, which may normally corrode (as an anode), becomes a cathode receiving electrons from an "outside" source at a potential or energy level too high for the release of its own electrons. Thus corrosion does not occur. It is "cathodically protected". Positively charged ions which may exist in the nearby electrolyte are, in fact, attracted back to deposit.

TABLE I

REPRESENTATIVE CORROSION RATES IN SEA WATER

<u>Metal</u>	<u>Corrosion Rate in Quiet Sea Water<sup>(1)</sup></u>	
	<u>Mils per Year</u>	<u>Millimeters per Year</u>
Aluminum	1-50 <sup>(2)</sup>	0.02-1.2
Zinc	1-10	0.02-0.25
Lead	>1-15 <sup>(2)</sup>	>0.02-0-0.38
Iron (Steel)	4-10	0.1 -0.25
Silicon Iron	0-3	0-0.07
Stainless Steel	0-5	0-0.12
Copper Alloys	0.5-15 <sup>(2)</sup>	0.01-0.38
Nickel Alloys	0-1	0-0.02
Titanium	Nil	Nil
Silver	Nil	Nil
Platinum	Nil	Nil

Notes: (1) Rates are ranges of general loss in sea water at ambient temperatures and velocities no greater than 3 feet (1 M) per second. Pitting penetration is not considered.

(2) Various alloys display widely different rates.

CORROSION IN SEA WATER

However, in the process, the higher energy metal continues to yield electrons to support the flow. It corrodes and is a sacrificial anode.

Metals differ in the energy level or potential for continuing the reaction. This is evident from the range of corrosion rates in sea water shown in Table I. Higher rates mean the metal yields electrons more vigorously and dissolves away more readily. The comparative energy levels are usually expressed in terms of the steady state potential in volts. A more elaborate comparison of metals which may be used in construction of a vessel is listed in Figure 3. Metals with more negative potentials corrode or dissolve more readily. Thus, the voltage of magnesium at -1.64 is indicative of a distinctly more energetic corrosion tendency than a mild steel at -0.62 volts. This difference enables magnesium to protect galvanically.

(The values in Figure 3 are noted as compares to a saturated calomel reference cell. Measurement against other reference cells such as copper-copper sulfate or silver-silver chloride will vary for individual metals but their relative values remain the same. For example, the values for mild steel will be 60 millivolts more negative when compared to copper-copper sulfate and 10 compared to silver-silver chloride.)

External Energy Sources Give Similar Results

The metal which is to be preserved (usually steel) is not selective regarding the source of energy which may retard solution or corrosion. If it is bonded to a direct current source as a cathode, it will be protected by the electrons supplied assuming their potential (voltage) or energy is high enough and the quantity (amperes) is great enough for the area concerned.

In a basic sense, it is the same problem described using the zinc and steel combination. Enough electrons must be supplied to the steel to overcome the tendency for the metal to yield its own. Usually, this means a relatively low voltage high-current system. Then, anodic steel (that tending to corrode) is forced to act as a cathode and conduct the excess externally supplied electrons to the electrolyte (sea water).

When an outside source of direct current is employed, it is an "impressed current" system. The anode is usually a resistant metal (see page 13) which will not deteriorate rapidly because of the reentry of electrons and the reaction byproducts. (The latter includes chlorine, oxygen, hypochlorous acid, etc., which are usually classed as corrosive chemicals. They must be dissipated without severe effect on the anode or its protective shield.)

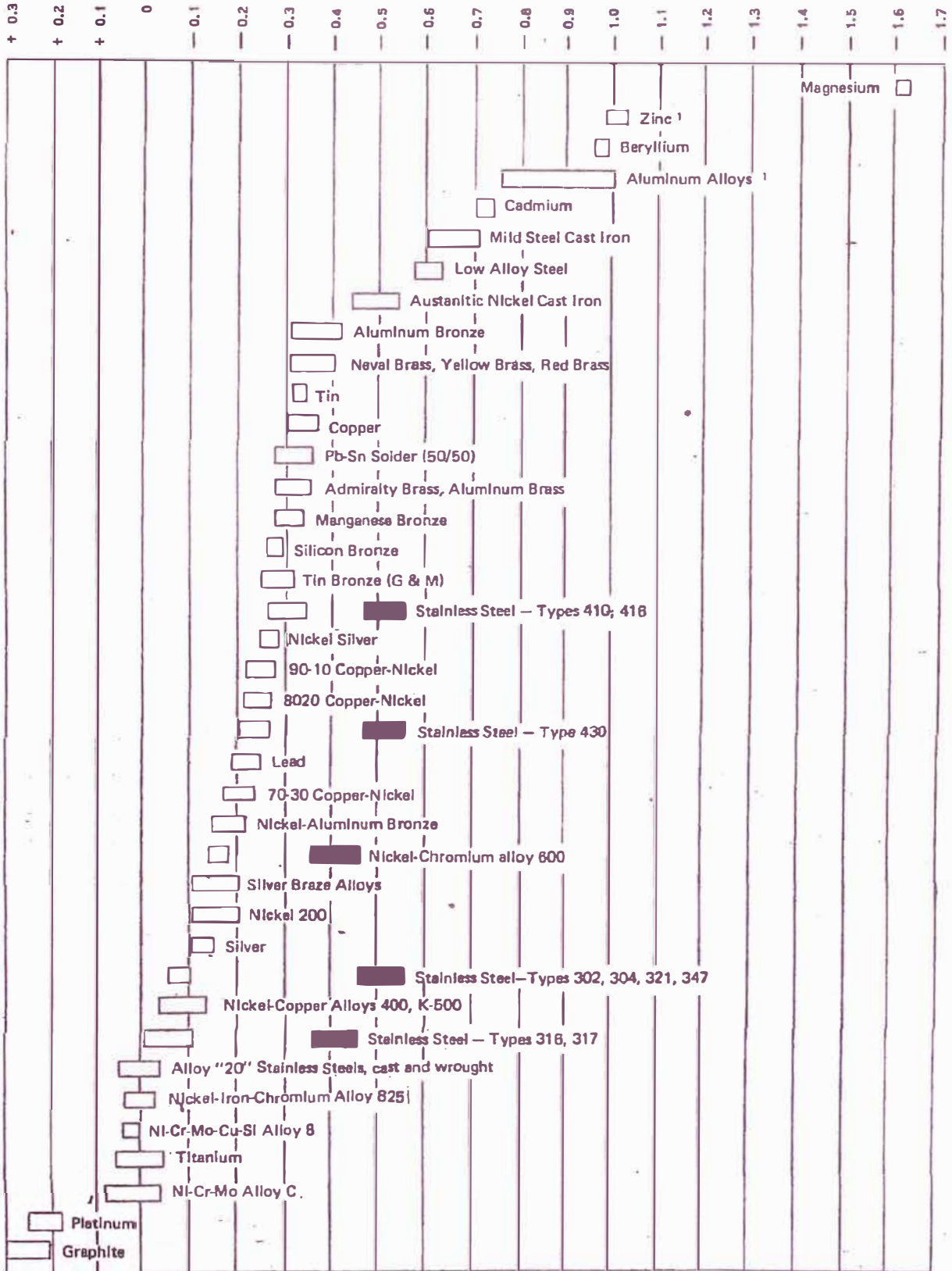
Galvanic Couples



FIGURE 3

CORROSION POTENTIALS IN FLOWING SEA WATER <sup>1</sup>  
 (8 TO 13 FT./SEC.) TEMP RANGE 50° - 80°F

VOLTS: SATURATED CALOMEL HALF-CELL REFERENCE ELECTRODE



Alloys are listed in the order of the potential they exhibit in flowing sea water. Certain alloys indicated by the symbol:  In low velocity or poorly aerated water, and at shielded areas, may become active and exhibit a potential near -0.5 volts. Data is from Inco Bulletin A404, "Guidelines for Selection of Marine Materials".

<sup>1</sup> The metals are primarily for construction. Anode alloys may be expected to differ.

TABLE II

GALVANIC ANODE SYSTEM MERITS

Advantages

- Self-contained electrical source
- Needs no operating supervision
- Current cannot be supplied in wrong direction
- Simple to install
- Automatic current regulation of zinc or aluminum as anodes, and mild steel as a cathode

Disadvantages

- Expensive method of generating electricity
- Current output is limited by number, size and geometry of the anodes
- Poor current regulation in the case of magnesium in open sea water
- Thorough inspection is required to insure proper installation
- Small lead resistance (or contact resistance of the mounting) greatly effects anode output in sea water
- Greater weight, bulk, and flow obstruction than for impressed currents systems
- Frequent galvanic anode renewal
- Dielectric shields are required for hull mounted magnesium

At this point, it is important to note that these natural galvanic reactions can result in undesirable drastic corrosion. It occurs when two metals or alloys of different natural corrosion potentials (Figure 2) are electrically connected and in contact with sea water (an electrolyte). The conditions are identical to previously described combinations in the dry cell and in zinc anodes passivating steel. Inadvertent couples, however, can rapidly destroy an important vessel component.

Some examples are:

- a) Bronze propeller coupled to a steel hull
- b) Mill scale on a ship's steel plate, internal or external
- c) Steel water boxes coupled to copper-nickel tube sheets of a condenser
- d) Bronze impeller in a steel pump casing
- e) Brass valve in a steel piping system
- f) Aluminum fairwaters fastened to steel hulls
- g) Corrosion of steel hull plates subjected to uneven cold work during forming
- h) Corrosion of a steel hull in which a copper-based anti-fouling paint is applied over an inadequate barrier coating (primer)
- i) New Forebodies or midsections added to older vessels

In each case, the more anodic metal (more negative potential, Figure 2) will be sacrificed while "protecting"

the cathodic half. Obviously, there are instances where serious corrosion failures may result. For example, a steel water box would waste when bonded electrically to a copper-nickel tube sheet. An early water box leak may result but the tube sheet would be protected.

Recognition of these galvanic couples is important for ship design and materials selection as well as for maintenance. In many instances, maintenance can be avoided by proper materials selection (as indicated in Table I and Figure 2), by corrosion control via coatings, cathodic protection (in sea water), inhibitors, or, at times, by the judicious use of corrosion allowances. Frequently, combinations of these methods provide the more effective and economical control.

Obtaining a Passive State

By now, it is apparent that the goal is to preserve all ship components in a passive state during the predetermined design life. This should be done within reasonable economic limits considering initial investment, maintenance, and service factor. Experience has demonstrated that the more practical means of approaching that goal is a combination of protective coatings and cathodic protection. Their general relationship should be considered before investigating cathodic protection specifics.

It was previously noted that an ideal coating system provides a passive state by blocking out the electrolyte and by insulating cathodes from anodic areas. For most large surfaces such as the hull, decks, and tanks, coatings are the primary contributor to passivation. Their efficiency is dependent upon the surface preparation, the selected coating system, and the proficiency of application. Each factor must be carefully considered and monitored for the best results.

It is not the intent to provide coating details here but, rather, to relate their use to cathodic protection. Considerable information about surface preparation and coating systems can be obtained from the suppliers and/or SNAME Technical and Research Bulletins 4-9 and 4-10.

The greatest coating problem short of catastrophic failure is encountered in attempting to avoid small faults and bare spots frequently called "holidays" rather than to control them. Catastrophic coating failure such as massive peeling, blistering, etc., is usually a judgment error in coating selection, surface preparation, time allowed for drying, or some other factor. Cathodic protection can save some situations such as extensive failure in tank coatings or grounding damage on hulls.

Small faults or holidays usually must be expected in spite of several coats of paint. Complete elimination would require prohibitive testing for them and endless repair. Even then, some would probably appear early in service. Frequently, they can be accepted in a small degree without serious consequences. For example, a hundred little holidays per 1000 ft<sup>2</sup> of coated hull would create no serious problem except for some underfilm corrosion which leads to bottom roughness. Most holidays can also be protected by cathodic protection.

There are situations where a single holiday is intolerable. Our previous reference of a steel water box and a copper nickel tube sheet provides an excellent example. If the steel were completely coated except for a 5 mil hole or holiday, as salt water went through the system, corrosion would concentrate there and penetrate as if it were drilled. Such rates are experienced when the area ratio of the anode to cathode is small. Then, even small areas corroding can have a crippling effect on the vessel. Electrical isolation of the water box and tube sheet would help and, theoretically, would prevent excessive corrosion. Usually, such precautions are not included in the design.

Yet, most of the steel water box is

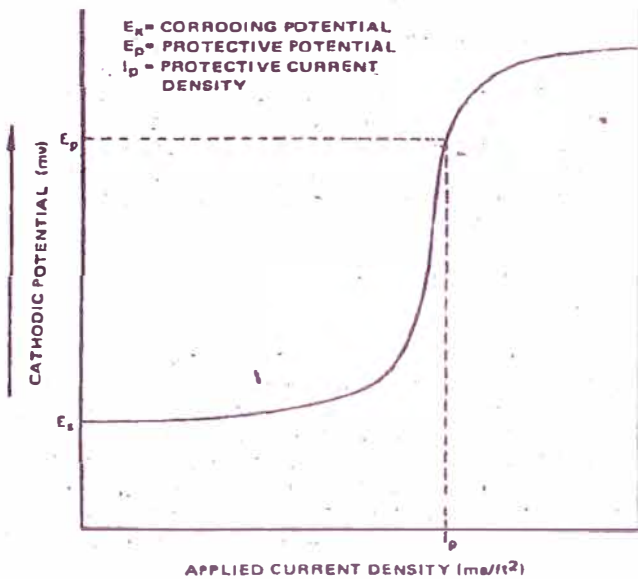


FIG. 4 - SCHEMATIC POLARIZATION CURVE

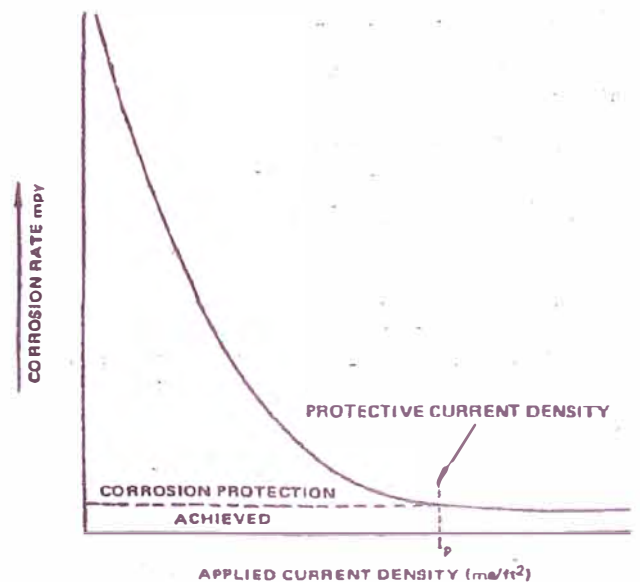


FIG. 5 - SCHEMATIC CORROSION RATE VS. APPLIED CURRENT CURVE



effectively protected by the good coating system. In order to prevent occurrences like that described above, cathodic protection is used to complement the coating. An anode designed as original equipment to be bonded to the water box insures a complete passive state. Since the area is small, the anode requirement is small. However, if holidays exist or develop, the underlying surfaces are in a "passive state" because the anode provides electrons to prevent loss of steel. The remaining structure, that which is coated, is in a "passive state" because the steel is insulated or separated from the electrolyte. Referring back to the flashlight cell analogy, the switch is off.

There are numerous situations in marine service where coatings and cathodic protection are complementary. The large obvious one is the hull. It could be protected, at least theoretically, by cathodic protection alone but the requirements would be immense and expensive. Therefore, it is common practice to coat and to provide a cathodic protection system to protect bare steel at holidays and scrapes on the immersed hull.

It becomes apparent then that it is prudent to design or plan the system if the optimum results are to be obtained. All types of coatings are not equally adaptable to use with cathodic protection. For example, one of the chemical reactions at the cathode when cathodic protection is functional is the formation of "hydroxyl ions." Their concentration constitutes an alkaline or caustic condition which may attach or destroy sensitive coatings. Paints based heavily on vegetable oils including many of those classified as "conventional" fall in this class.

The paint film properties which are desirable include:

- Good caustic resistance
- Salt water resistance
- Low permeability
- Abrasion resistance
- High adhesion

Proper selection of the paint to provide serviceability will allow the cathodic protection to hold up its end of the system without an overload. The alternate can be degrading paint and an excessive burden on the system resulting in expensive corrosion.

#### The Passive State

Corrosion control is usually exercised in the way that is both effective and economical. For this reason, cathodic protection alone is elected for certain purposes. Frequently, segregated ballast tanks may be uncoated

and protected with sacrificial anodes. Piping, water boxes, and propellers are other examples.

Usually this decision should be made at building but frequently it becomes necessary to protect after service. Bare ballast tanks, for example, may need protection after a few years. The time out of service for cleaning and application often prohibits painting, and cathodic protection is the remaining alternative.

It is important to remember that this method only applies to salt water immersed members. To be "passive", the structure must be maintained at a negative potential or voltage that prevents loss of its electrons. It must be polarized. The efficiency is dependent upon approaching continuous immersion.

The cathodic protection system must have enough drive to passivate and polarize the structure. In the case of anodes, this driving potential is fixed by the electrochemistry of the anode material. (Impressed current systems are adjustable and can be regulated.) There must be enough drive (voltage) and capacity or the structure will never reach the polarized passive state and the steel will continue to corrode although probably at a reduced rate.

Polarization or a passive state is not reached instantaneously. A segregated ballast tank, for example, when first loaded may require 2-3 days to become protected. For this reason protection may reduce the corrosion to 30 percent of the unprotected rate. Greater efficiency requires longer immersion cycles than noted above or greater cathodic protection drive than may be completely economical.

These factors, however, are most pertinent to the selection and design of the system which is discussed next. Properly employed cathodic protection can reduce or control corrosion to reduce maintenance and repair. It should not, however, be expected to stifle corrosion completely.

#### APPLICATION AND DESIGN OF CATHODIC PROTECTION

While it is not the intent of this Guide to provide a cathodic protection design, the reasons for selecting anodes or an impressed current system for a given purpose may prove to be helpful. Usually, the actual plan is prepared using the expertise of the vendor with the guidance of the owner's engineer.

The objective of cathodic protection is to avoid renewals due to corrosion. Properly designed and installed anode systems reduce steel wastage to

TABLE III

IMPRESSED CURRENT SYSTEM MERITS

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Versatile control of current output</li> <li>• Can be adapted for automatic regulation</li> <li>• Anodes are light weight, streamlined, fewer in number</li> <li>• Long life (with inert anodes) without depending on drydocking for corrosion protection</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Complex installation requires electrical, structural, engineering, etc. support.</li> <li>• Inspection of component installation and wiring is critical</li> <li>• Anode must be installed in conjunction with dielectric shields</li> <li>• Shields require frequent renewal</li> <li>• Initial first cost may be higher than a galvanic system depending on size</li> <li>• Anode replacement is expensive</li> <li>• Continuous electrical power is required</li> <li>• Hull penetration is necessary for anode connection</li> <li>• System operation requires training</li> </ul> |
|---|---|

30 percent (or less) of that experienced in unprotected structures which see salt water. Service histories also show that pitting is effectively arrested. These benefits are often sufficient to prevent expensive renewals. Thus the need for cathodic protection should be established through careful consideration of corrosion experience. For existing vessels, corrosion effects may be assessed by qualified inspectors or repair superintendents who may require confirmation via thickness surveys. Newly built vessels or those in design may have an anode scheme as part of the corrosion control program. In this event, the anticipated effects of sea water have been considered based on the corrosion experiences of existing ships.

Once the need for cathodic protection has been indicated, it is necessary to determine the amount of protective current that will be required to prevent corrosion. Frequently vendors or corrosion engineers use different design parameters. Different anode characteristics also result in widely variable design possibilities. This Guide establishes these factors for the minimum standards which should be used for corrosion control to prevent steel renewals. Proposals based on lesser amounts of protection should still be 70 percent efficient--i.e., reduce steel wastage by 70 percent. This efficiency is predicated on a reasonable amount of time in ballast for the steel to be polarized or protected. Often, five days is a practical minimum since 24-48 hrs may be required to reach the polarization voltage with a reasonable current density level. These details are emphasized in later paragraphs.

With this objective in mind, the merits of galvanic anode (sacrificial) and impressed current systems can be compared to choose the more desirable one. The following tables help develop perspective, but the final selection may depend upon cost, safety, and convenience.

Of course, any final choice of system and its design must be acceptable to the appropriate classification society and/or the U.S. Coast Guard. Some general guidelines are:

Tanks are protected with sacrificial anodes because of electrical connections and chlorine generation with impressed current systems plus resulting safety problems.

Magnesium anodes are not acceptable for tanks which may see explosive mixtures.

Hulls and propellers may use either.

Cooling systems and condensers may use either.

Galvanic Anode Systems

Sacrificial Anodes

Previous paragraphs have described how nature has provided the material properties which enable one metal to protect another. The engineer needs only to make the choice and to insure a working environment. Environment includes the salt water electrolyte, electrical bonding and time. Anodes then work by wasting away in a readily visible manner. If they remain as new, one of these three elements is inade-

quate. With the three most common anode metals: zinc, aluminum, or magnesium; it is impossible to reverse electrical polarity. Fundamentally, the system is simple.

Another important feature of zinc and aluminum is that of self regulation. That is, if the steel or other metal to be protected is polarized, the anodes waste at about half the initial rate. Thus, their protective life is extended. Overdesign can result in an increased investment and a longer life for the system but not waste. Table IV shows a comparison of the basic properties of the three anode metals most frequently used.

The higher driving potential as a primary advantage of magnesium is offset by safety restrictions regarding use in tankers and by the need for shields for use on exterior hulls. Greater emphasis is therefore placed on zinc and aluminum. Magnesium is reliable for uses such as ballast tanks in dry cargo vessels.

#### Costs May Govern Decisions

At an equal price per lb, aluminum provides a significantly greater amount of protection by virtue of the greater current capacity. Historically, zinc has been much less expensive (in 1974, prices were actually quite similar for the two). Consequently, cost comparison in terms of amperes per dollar is usually a desirable design step assuming applicable restrictions permit a choice. In order to compare costs, it may be necessary to prepare a preliminary design. For uses other than tanks, a comparison with an impressed current system may be included for a complete analysis.

#### Requirements are Based on Current Capacity and Output

Once galvanic anodes have been selected (or for preliminary design estimates) as the appropriate protective system, these steps provide the basic information:

Determine the sea water immersed surface area to be protected.

Select the service factor or percent of time under immersion conditions.

Decide on the current level needed for protection during immersion.

Calculate the total weight of galvanic anode metal required for the design life.

Calculate the number and size of anodes required.

Prepare (or have a vendor prepare) a distribution scheme.

Select the installation method and arrange for the required classification society and/or U.S. Coast Guard approvals.

The immersed area, if not available, can be calculated from blueprints or measurements. The service factor may be estimated from the projected or known sailing patterns. For example, the exterior hull may be immersed 100 percent of the time and a segregated ballast tank 50 percent of the time.

The following guidelines may be used to select a current level for several common galvanic anode uses.

The weight of metal required may or may not fulfill all requirements. Actual or experienced efficiency is a critical factor. Usually, it is assumed that the galvanic anode instantaneous output is the maximum that the geometry (actually, the internal resistance) and metal will permit. On a four-year life basis, the number of anodes to provide capacity also provides sufficient output or coverage. As an illustration, example a) above is based on a need for 40 amperes at any given time; i.e.  $4 \text{ ma} \times 10,000 \text{ ft}^2$ . Common 70 lb nominal-weight zinc anodes put out 1.8 amperes as a practical level. On such a basis, 23 anodes would be required. However, 4433 lb is equal to almost 64 anodes, the number necessary for a 4-year life. The greater number enables better distribution of protective current. Each case must be considered for proper balance of protective current output and life or total capacity.

It is essential that the vendor supply output information on the proposed anode in order that the designer can check potential coverage. Variation with the anode geometry is substantial.

Distribution of the anodes over the structure to be protected is usually determined with the benefit of the vendor's expertise. Good galvanic protection tends to follow "line of sight" from the anode to the structure. Care must be exercised to avoid "blind spots."

At times, it is a good efficiency measure to adjust the distribution when renewing anodes to improve coverage. In general, protective current will flow to the closest non-polarized (lower negative potential) structure preferentially. As polarization proceeds, the anode may "throw" protection about 15 ft (5 m). To some extent, distribution is based on experience and calculated guesses until a protection pattern is evident.



TABLE IV

## BASIC PROPERTIES OF ANODE ALLOYS

PROPERTY	ZINC	ALUMINUM	MAGNESIUM (Practical)	
Specific Gravity	7.1	2.7	1.8	
Driving Potential, <sup>1</sup> volts	1.1	1.1 - 1.2	1.4 - 1.6	
Theoretical Capacity (on a 100% efficiency electrochemical basis)				
(Ampere hours/pound)	372 <sup>2</sup>	1350	1000	(500)
(Ampere hours/kilogram)	820	2980	2200	(1100)
(Pounds/ampere year)	23	6.5	9	(17.5)
Self Regulating	YES	YES	NO	
Restrictions	6000 ft-lb <sup>3</sup>	200 ft-lb <sup>3</sup>	YES	

<sup>1</sup> Versus copper/copper sulfate half-cell

<sup>2</sup> Some anode alloys have much less efficiency. The type should be monitored. Preferred alloys are low in iron content and include small amounts of mercury. In the case of magnesium efficiencies above 50% are rare. J.H. Morgan in "Cathodic Protection" p. 89 states... "If magnesium is considered to corrode by a divalent reaction then its theoretical electrochemical equivalent is 1000 ampere hours per lb or 9 lb per ampere year. There is some doubt on this point and magnesium may corrode by a univalent reaction giving 500 ampere hours per lb or 17.5 lb per ampere year."

<sup>3</sup> When explosive mixtures can exist in tanks, potential impacts for zinc and aluminum are limited and magnesium is prohibited.

Installation methods vary from direct welding of the core to the structure to clamps with lock nuts and bolts. All methods must provide sound electrical bonding to the structure to achieve protection. The selection of the installation method must be made by the owner and vendor subject to the approval of regulatory agencies.

- a) A reference electrode
- b) A controller
- c) A saturable reactor
- d) A power supply
- e) An anode

### Impressed Current Systems

Previous discussion described advantages attributed to ICCP (Impressed Current Cathodic Protection) and noted that use in tanks is generally conceded to be impractical due to gas generation. In spite of the latter restriction and inherently greater complexity, the use of ICCP has been quite common for exterior hulls, rudders, propellers, and salt-water circulating systems. Versatility and long term service make the systems attractive.

The complexity which contributes to high initial installation is inherent in the system. For the above uses, however, ICCP systems prove to be the more effective and, for the longer term, more economical choice.

Impressed current cathodic protection systems require an external source of direct current and some means of regulating this current. Therefore, the components of the system are of necessity greater than that of a galvanic anode system. The ICCP system consists of five major components:

Those units are electrically connected together to form a closed loop with the ship hull or other structure for maintaining a selected constant potential.

Thus, the combination results in a sophisticated electrical system varying somewhat with the vendor's design. For present purposes, it is primarily important to appreciate the function of the components and to understand changes during operation or a malfunction. In particular, a malfunction needs to be recognized as a signal of lost protection or potential damage.

The system components listed above perform the following functions:

- a) The reference electrode (generally zinc or silver/silver chloride) measures a voltage difference between itself and the steel hull which is directly related to the amount of protection received by the hull.
- b) The controller compares the voltage difference of current produced by the reference electrode with an in-

TABLE V

## CURRENT DENSITY FOR VARIOUS SERVICES

SERVICE	Current Density Requirements	
	Milliamperes per ft <sup>2</sup>	Milliamperes per m <sup>2</sup>
Segregated ballast <sup>1</sup>	14	150
Washed cargo/clean ballast <sup>1</sup>	12	130
Dirty ballast tanks	8 <sub>3</sub>	86
Coated Tanks	1 <sub>3</sub>	11
Exterior Hulls	2-5	22-54
Rudders (Coated & Static) <sup>2</sup>	40	490
Propellers <sup>2</sup>	14-16	150-170

1 Assumed to be uncoated. If part of the tanks are coated, that fraction of the area should be included at 1.0 ma per ft<sup>2</sup> or 11 ma per m<sup>2</sup>.

2 These values are for static conditions or velocities less than 5 knots. Current demand for polarization underway may be 3 or more times higher. If corrosion is experienced, greater density can be considered.

3 Tank geometry may not permit a level this low while providing adequate coverage.

The total galvanic anode metal required is usually calculated for a four-year life to correspond to the special survey schedule. Current installation costs favor longer design life particularly when aluminum anodes are acceptable. An example of the amount of metal based on 85 percent of the capacity to allow for efficiency and discarding the last bit of spent anode follows:

$$\text{Weight of metal} = \frac{\text{Area} \times \text{Current Density (ma)}}{\text{Amperes/Unit Weight} \times 0.85 \times 1000} \times \frac{\text{Sea water Immersion Factor (as a decimal)}}{\text{Hours/year} \times \text{years}}$$

As examples:

- a) A coated hull (10,000 ft<sup>2</sup>) requiring 4 ma per ft<sup>2</sup> at 100 percent immersion time for a 4-year life using zinc.

$$\text{Weight of zinc} = \frac{10,000 \times 4 \times 1.0 \times 8760 \times 4}{372 \times 0.85 \times 1,000} = 4433 \text{ lbs}$$

- b) a segregated ballast tank (1000 m<sup>2</sup> immersed surface) requiring 150 ma per m<sup>2</sup> ballasted 50 cent of the time for 4 years life using aluminum.

$$\text{Weight of aluminum} = \frac{1000 \times 150 \times 0.5 \times 8760 \times 4}{2980 \times 0.85 \times 1000} = 1037 \text{ kg}$$

ternal voltage manually set by the operator (protective potential). The output of the controller is automatically adjusted to maintain the reference voltage equal to the manually set voltage.

c) The saturable reactor, in response to the signal from the controller, regulates the amount of shipboard alternating current fed into the power supply.

d) The power supply or rectifier converts the regulated AC to direct current which is impressed on the anode.

e) The anode is mounted on the ship hull in an insulated plastic holder. The DC from the power supply is fed to the anode, which in turn flows into the sea water and then back to the hull, thus completing the electrolytic circuit.

Current output is determined by many factors: Current capacity of the system, by the number and geometry of the anodes, voltage and power capacity of the rectifier, and the size of the dielectric shield; the operating current demand is governed by the wetted surface area of ship and propellers, condition of the paint on the hull, temperature, pH, conductivity of the seawater, and the speed of the ship.

It is difficult to predict the operating output of the system at any given instant due to these variable environmental conditions. However, when the anode current is increased the potential of the hull also increases gradually (see figure 3) if other conditions are static. Figure 4 shows that as applied current is increased, the hull corrosion rate decreases substantially until the protective polarization level is reached. Increasing the



current beyond this point gives no further reduction in corrosion. In fact, over-protection only wastes current and may promote paint damage on the hull, similar to that with magnesium anodes. The manually set voltage on the controller is usually -0.8 to -0.85 volt for silver/silver chloride or +0.20 to +0.25 for zinc under normal operating conditions. When the reference electrode potential is beyond these ranges, the controller adjusts current flow until the reference electrode potential equals the pre-set voltage. A reference electrode potential greater than the pre-set voltage causes a decrease in controller output.

In general it is advisable to solicit the assistance of an experienced, knowledgeable specialist.

### System Capacity

As noted above, the components of the ICCP system should be an integrated unit. This basically means that it should be supplied by a single vendor. (Installation and trial supervision may also wisely be included in the contract.) However, it is necessary for the owner to assist in determining the capacity required. The size and number of rectifiers depend upon the design and layout of the ship as well as the maximum amperes needed for protection under almost any conceivable circumstances. That maximum is simply the multiplication product of the area to be protected and the highest coverage level considered practical. The balance may best be established by a review of related corrosion experiences.

A precautionary note: The vessels generating capacity must be great enough to supply all the C.P. rectifiers at their maximum without penalizing other electrical services. For example, every 100 amperes of current required need about 3kW generating capacity.

Because of the area involved, the exterior wetted hull creates the greater demand on most ICCP systems. The current coverage level is dependent upon the type of coatings and anticipated damage or grounding experiences. Modern sophisticated coatings with little damage expectation have been effectively supplemented with as little as 22-55 ma/m<sup>2</sup> (2-5 ma/ft<sup>2</sup>). To insure protection for local bare areas, the designed capacity is frequently much higher. The number of rectifiers is partially a design option with the choice being based on total current requirements, cost, and the operating efficiency of one or more units. Equipment and installation costs should both be considered.

### Distribution and Control

After ample current capacity has been provided, the next important consideration is distribution and control of the driving potential. The signals for current are provided by the reference electrodes or cells and the controllers respond by adjusting the driving potential. It is necessary to include enough reference cells to prevent inadequate or excessive excursions in current or voltage on any structure even though it is not close to the reference point. To accomplish this, reference cells must be reasonably spaced on conjunction with the anodes. If the separation is too great, an excess potential near the anode may result. If it is too small, remote structure may not be protected.

As a general rule, a minimum of two reference electrodes should be supplied for each controller/power unit and a minimum of four per ship assuming anodes are installed fore and aft on the external hull. Larger areas will be better served by a more frequent spacing of reference cells. Other components such as salt water circulation systems require separate cells in order to maintain a protective potential independently.

If the proper number of reference electrodes has been provided, distribution is then dependent upon the number and location of the anodes and the effectiveness of the attendant shields,

### Anodes and Shields

While the power supply components differ somewhat with various vendors, they must be selected as a balanced assembly. Key factors such as total current capacity, reference cells, and solid state controllers are assumed to be design considerations that are essentially predetermined for load and reliability.

Anode materials for ICCP and the required shields may offer some choices. Basically, the anode material and assembly must be inert to the environment created during operation. Consequently, noble metal combinations are used. Among those which have proven effective are platinum, platinized titanium, platinized tantalum, lead silver, and dimensionally stable ruthenium oxide (DSA). Non-resistant materials may function with excessive anode losses which result in high maintenance costs. Early experiences in U.S. Navy service revealed that lesser anode materials such as graphite, Duriron, and steel were consumed in 0.5-3 years, frequently with significant maintenance costs.

The recommended materials noted above have provided good service on commercial vessels. Platinum clad tantalum and lead silver after about 10 years of service promise at least a 20-year life. Replacement for reasons other than physical damage is apparently a rare occurrence.

The output per anode is also dependent upon size and geometry. Common commercial components range up to 150 amperes or more. Usually, good distribution is achieved with a larger number of smaller anodes. Sizes may be mixed if good distribution results.

Anode shields are necessary to prevent localization of the driving potential and current which may destroy adjacent protective coatings. Usually, they are composed of thick layers of glass fabric reinforced epoxy or polyester resins applied 6 mm (250 mils) thick and for a distance of 1 - 1.6 m (3-5 ft) in all directions around the anode. Their purpose is to prevent shorting out the current flow to a nearby bare spot or fault in the regular coatings and thus permit protection to reach the more remote structure as well as to prevent paint damage.

Well constructed and designed shields are very important if good distribution is to be achieved and maintenance is to be low.

It was previously pointed out that any coatings used beyond the anode shields should have good physical properties and resistance to salt water and caustic as generated by C.P. reactions. A good shield is not compensation for a weak coating, so proper selection must be part of the design. Caution should be exercised with underwater zinc-rich coatings which are not caustic-resistant. Barrier topcoats may help.

#### Protecting Other Equipment

As previously noted, ICCP systems are frequently used for protecting salt-water circulating systems, sea chests, propellers and rudders as well as for hulls. The same principles apply. Steel circulating system components such as pipe and water boxes and the rudder are often coated. Current requirements then are quite similar to the hull. Distribution in circulating systems may require more care in design because of the more complex configurations.

Propellers must have proper electrical connections such as a slip-ring on the shaft or a similar device. Polarization can be achieved by supplying 20-50 ma per m<sup>2</sup>. Proper design can avoid undesirably draining hull protective current to a more noble alloy propeller. Most vendors have design experience to offer.

Since the initial investment is higher than for a galvanic anode installation, ICCP systems should be designed for a relatively long life. If a 20-year design can be approached, it then is usually the economic choice. Previous information described anode life. Reference cells may need occasional replacement. The other components should exhibit good durability if responsible care and maintenance are applied.

#### MAINTENANCE OF CATHODIC PROTECTION SYSTEMS

Properly designed, properly installed, and properly maintained cathodic protection systems will provide effective, economical protection with only modest attention. However, as a critical element in the corrosion control scheme, they must be monitored to insure the expected results. Some check points to assist periodic monitoring are offered:

#### Galvanic or Sacrificial Anodes

The simple way to determine whether or not galvanic anodes are functioning is a visual inspection. As they work, a white deposit of zinc or aluminum oxides and salts form in a "crust-like" fashion on the surface. This is normal. If it does not form and the anodes retain a "like-new" appearance, they are not protecting the structure. Additional or confirming checks can be made by potential measurements or the pH at the metal interface (under rust or blistered paint. pH should be 7 or higher for good control.)

In the event anodes are not working, one of four conditions probably exist:

the anode is not electrically bonded to the structure

the time in electrolyte (sea water) is not adequate

the alloy was not suitable for galvanic anodes

the coating on the structure is still in near perfect condition.

Of course, the third condition only applies when the anodes are used to supplement anticorrosive coatings.

A quantitative measure of performance for anodes which are wasting can be made by determining weight loss versus the time in service. The resulting rate can be compared with the design life of the system.

No operational concern is necessary regarding the voltage. As previously



noted, the electrochemistry of the anode materials determines the driving potential. As the structure becomes polarized, zinc or aluminum exercise the self-regulating feature and "shut-off" while holding the protective potentials. The rate of anode consumption is greatly reduced.

Thus, as long as the anodes are visibly working and wasting, little attention is demanded.

Expected Renewals. Previous discussion pointed out that sacrificial anodes are designed for a finite life based on need, investment, total weight effect on lost cargo, etc. Normal operation predicts an approximate time when the anodes will be spent and renewal becomes a factor in maintenance planning.

If the results are judged completely satisfactory following a thorough inspection of the structure or component, a direct replacement of the initial installation is the logical step provided the projected service life warrants it. Obviously, a six-year system is not prudent for a vessel with only a four-year life remaining.

Judgement of the results is based on one or more of three factors:

the absence of active, aggressive corrosion

the presence of an even, continuous covering of white, calcareous deposits on all the protected structure which is not coated

satisfactory thickness or scantlings as determined by micrometers or ultrasonic thickness surveys.

Redistribution. If one or more of the bases described above suggest that protection falls short of the objectives, the anode system should be reviewed. If corrosion control is generally low in efficiency, more anodes should be added to provide adequate coverage. This procedure will not overcome salt-water immersion time cycles which are too brief (less than about five days).

If the results are variable from one area to another, these steps should be considered:

more anodes may be added where needed.

anodes can be redistributed to overcome shielding or line-of-sight blockages.

There is no need to wait until renewals are in order to make adjustments. However, if they have not been made earlier,

revision when fresh anodes are being installed can result in the minimum of inconvenience and cost.

### Impressed Current Systems

Generally, ICCP systems have provisions for both automatic and manual control of protective current output. Under normal operating circumstances, no adjustment is required. Daily recordings should be mandatory. If voltage readings and current output are reasonably constant, it can be assumed that protection is being provided. However, gradual increase in current demand can be expected for a painted hull system. An operations manual should be provided for the system which should advise the engineer about such trends.

In addition, a guide should be provided to account for wide irregularities, loss of power, and malfunctions in general. Most manufacturers stipulate what action, if any, should be taken. Specifically, information on service characteristics should preclude any necessity for cutting off the system for any reason other than a complete operational failure. Terminating ICCP can result in drastic, expensive, uncontrolled corrosion. For example, loss of the ICCP on a coated steel water box of a main condenser can cause a perforation at a fault or holiday in two to four weeks.

Power Units. Assuming the power unit and internal circuits are well designed, supplied by a reputable vendor, and carefully installed, maintenance of ICCP systems should be straightforward. Servicing at all regular dockings is frequently adequate. The availability of solid-state components and other heavy-duty parts permits a 20-year life expectancy of the electronics.

Cells, Anodes and Shields. However, reference cells, anodes, and anode shields may require maintenance or renewal. Silver-silver chloride reference cells, for example, may serve for ten years if they sustain no damage.\* Some operators choose to replace these sensor units in six to seven years. Zinc cells are more durable, will provide adequate sensitivity, and may serve 20 years. Vendor-supplied instructions should advise about the necessary procedure.

\*It should be noted that the current remains on full if silver-silver chloride reference cells are damaged to the point of inoperability! Paint damage may result. Zinc reference cells damage results in the current being shut off.

Anode life is dependent upon the construction materials as described on

Page 4. Of course, operating conditions also have an effect. Higher driving voltages tend to increase wastage. Therefore, the initial specification should be developed following consideration of ultimate maintenance requirements. Replacement is usually recommended rather than attempting anode repairs.

Anode shields, as distribution aids and paint protectors, need regular inspection at every docking or more frequently if any signals suggest it. They are subject to damage and degradation. When they cease to be electrically insulating, current distribution will falter and parts of faying surfaces may be destroyed by higher voltages. Repairs can usually be made via fresh application of glass fabric reinforced epoxy or polyester resins.

Monitoring. Instrumentation of the ICCP system provides information regarding proper functioning. Frequent monitoring, therefore, assures protection or signals the need for attention. In addition, changes reflected by the instruments can inform about the vessel's service experiences.

For example, vessels which frequent shallow waterways or docking harbors may suffer hull coating damage. Frequently the result is a sharp increase in current output from the power supply. That signal indicates an increase in bare steel needing protection. A gradual rise may similarly indicate progressive coating deterioration. Generally, ICCP systems are designed with sufficient capacity to provide the necessary pro-

tection. Knowledge of the deteriorating condition can be useful in planning repairs.

If current demand fluctuates abnormally--i.e., beyond that expected from a change in draft or temperature--the reference cell or anodes may have been damaged or may be experiencing electrical contact problems. Maintenance may be required. Vendor's operating manuals and troubleshooting guides should be consulted.

Docking Precautions. Operation of the CP system can be upset when the vessel is docked for loading or repair. Underwater pilings at docks usually require more protective current than the hull. If none is provided, the on-board system will lose current to the pilings. Alternatively, if the pilings are protected at a higher level, the hull may receive current from shore. Either effect may interfere with controller reaction and result in inadequate local protection or lead to paint damage. Experience may suggest shutting down an ICCP system.

Welding for repairs (or a new building if fitted out afloat) can also cause rapid corrosion via stray current effects unless proper grounding is insured. Reference cells can also be adversely affected and actually permit accelerated corrosion. It is advisable to shut down the system if it is not possible to insure proper grounding during welding.

These possibilities are provided as warnings only. Careful checking during docking is a sound preventative step



**WWI PROCAT; S.L.**

## Ficha de producto

### Ánodos de titanio activado DSA en forma de pletina

\* DENOMINACIÓN: “**Ánodos de Ti activado DSA en forma de pletina**”.

\* CÓDIGO: “**Ti-DSA STRIP**”

## 1) APLICACIONES

Estos ánodos pueden instalarse, como dispersores de corriente de sistemas de protección catódica por corriente impresa, enterrados con relleno de coque, en agua dulce. En aguas sucias o fangales y en agua de mar.

También se los suele llamar Ti-MMOX (Titanio activado o recubierto de mezcla de óxidos de metales), pero nosotros adoptamos la norma Europea que los designa como DSA (aunque en ocasiones, para hacernos entender mejor escribamos Ti-MMOX)

## 2) CARACTERÍSTICAS

Los ánodos serán de titanio activado con mezcla de óxidos de metales nobles, de dimensiones 20 x 3 x 1.000 mm (esta es la longitud más corriente pero se pueden fabricar en longitudes de 250, 500, 750, 1.000, 1.500, 2.000 y 3.000 mm).

Los ánodos estarán formados por pletina de titanio revestida con una mezcla de óxidos de rutenio, iridio y otras sales de los metales del Grupo VIII. Este revestimiento es aplicado por proyección en caliente sobre el sustrato de titanio, y tiene propiedades electroquímicas para mantener su función como ánodo. El titanio soporte es de grado 1 (ASTM B 348-83) con un espesor de 3 mm.

### PROPIEDADES DEL REVESTIMIENTO ELECTROCATALÍTICO


- Tiene una estructura cristalina con una densidad entre 6 y 12 g/cm<sup>3</sup>
- Resistencia específica de 0,00001 Ω\*cm
- Presenta una gran área superficial debido a su rugosidad (20 a 50 m<sup>2</sup>/g)
- Presenta una curva de Tafel con una inclinación que se encuentra entre 0,03 y 0,05 voltios para la generación de cloro y de 0,04 a 0,06 voltios para la formación de oxígeno.

### DENSIDAD DE CORRIENTE Y DURACIÓN DEL ÁNODO

Con relleno de grafito o coque de petróleo alrededor del ánodo, la máxima densidad de corriente anódica recomendada para una duración de 20 años, es de 100 A/m<sup>2</sup>. En agua dulce y lodos la densidad de corriente anódica es 50 A/m<sup>2</sup> y en agua de mar es de 600 A/m<sup>2</sup>, para una duración de 15 a 20 años (según la salida de corriente y el medio)

**DIMENSIONES DEL ÁNODO:** 20 x 3 x 1.000 mm. (0,04 m<sup>2</sup> por ánodo) o con longitudes de 250 mm (0,01 m<sup>2</sup>) 500 mm (0,02 m<sup>2</sup>), 750 mm (0,03 m<sup>2</sup>), 2.000 mm (0,08 m<sup>2</sup>) y 3.000 mm (0,12 m<sup>2</sup>)

**PESO DE CADA ÁNODO:** 0,27 Kg (para el de 1 m de longitud). Densidad de corriente del titanio 4,5 kg/dm<sup>3</sup>.

WWI PROCAT, S.L	Ánodos de titanio DSA en forma de pletina	Revisado: FJM 	05/06/02	Pág. 1/2
-----------------	---	---	----------	----------



**RANGO DE TEMPERATURAS DE FUNCIONAMIENTO:** 5° C a 50° C

**CARACTERÍSTICAS DEL CABLE DE LOS ÁNODOS Y DE SU CONEXIÓN (cable estándar)**


- Resistencia específica (20° C) de  $0,388 \times 10^{-3} \Omega \times \text{cm}$
- Resistencia de aislamiento (20° C) 0,6/1KV
- Construido con conductor flexible
- Capa externa de aislamiento de polietileno reticulado de alto peso molecular.
- Capa interna de PVC.
- Resistencia eléctrica de la conexión cable-ánodo 0,01  $\Omega$
- Sección del conductor de cobre: 10 mm<sup>2</sup>.
- Longitud: 2 m (esta longitud puede variar en el diseño o bajo pedido cuando se trate de llegar con el cable de cada ánodo a una caja de conexiones o equilibrio sin empalmes por medio)

**Otros cables que se pueden utilizar:**

En los casos de que el cable vaya a instalarse en un medio especialmente agresivo o pozos profundos (normalmente por su acidez o contenido en cloruros) se recomienda la utilización de acales de tipo Kynar o EPR-CSPE (éste último más recomendable)

**4) VENTAJAS**

- La principal ventaja de este tipo de ánodo es su poco peso y facilidad de manejar, además de la gran capacidad de salida de corriente que tiene comparado con los otros típicos de grafito o Fe/SI y Fe/Si/Cr.
- Otra ventaja que tiene, comparado con los anteriormente citados, es que no son quebradizos.
- Por último la mayor ventaja es que no sufren el llamado efecto terminal, por el cual, los otros tipos de ánodos se descabezan en suelos de baja resistividad y especialmente si dan una salida de corriente medianamente alta.

WWI PROCAT, S.L	Ánodos de titanio DSA en forma de pletina	Revisado: FJM 	05/06/02	Pág. 2/2
-----------------	---	---	----------	----------





## ZINC INDUSTRIAS NACIONALES S.A.

COTIZACION: Ref. MKT - 256 - 13

Código: 95401-R02  
Aprobado: AQR  
Versión: 01  
Fecha: 28/12/2009

Callao, 12 abril de 2013

### VISION

Ser líderes en la elaboración y comercialización de productos no ferrosos a nivel nacional e internacional, buscando la calidad total en nuestros procesos, superando las expectativas de nuestros clientes, el desarrollo de nuestros trabajadores y colaboradores, así como la protección del medio ambiente.

Sres.  
Servicios Industriales de la Marina S.A. - SIMA CHIMBOTE

Estimados Sres.,  
Por medio del presente le enviamos nuestra cotización:

Producto : Ánodos de zinc

Descripción ZINSA	Cantidad	\$/Pzas
ANODOS DE ZINC ABI III (11 KG)	80	36.60

\*Los precios no incluyen IGV

Forma de Pago : LETRA 60 DIAS  
Entrega : Puesto en su almacén  
Despacho : 30 días  
Validez : Abril 2013  
Observaciones : No incluye accesorios (pernos, sobre plancha, empaquetaduras, etc)

Se entregará certificado de calidad emitido por nuestra empresa.  
Quedamos a su disposición para cualquier consulta adicional que pudieran requerir.

Atentamente,

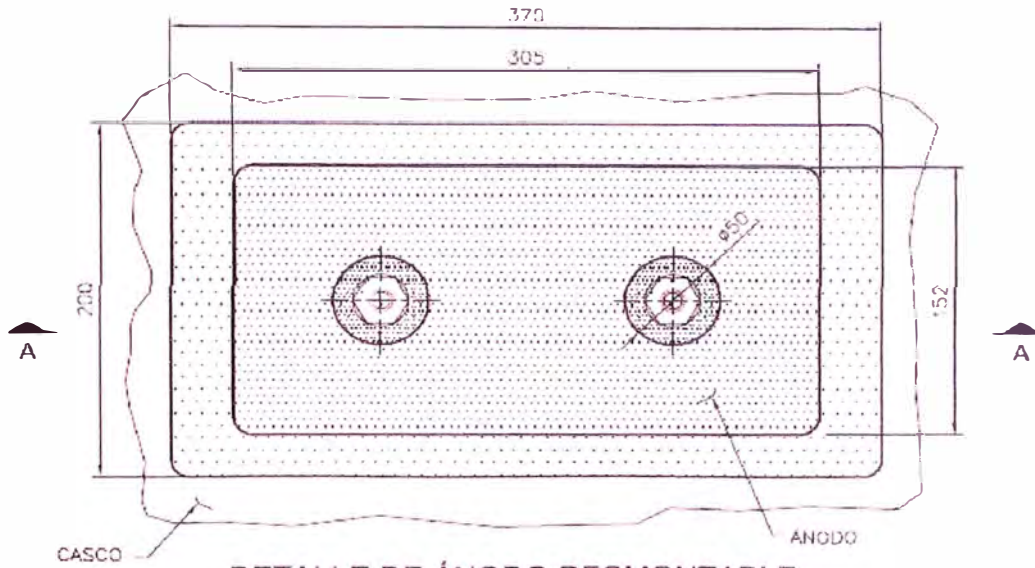
Javier Rivero A.  
Gerente Comercial  
ZINC INDUSTRIAS NACIONALES S.A.

César Salinas M.  
Ventas Locales & Marketing  
ZINC INDUSTRIAS NACIONALES S.A.

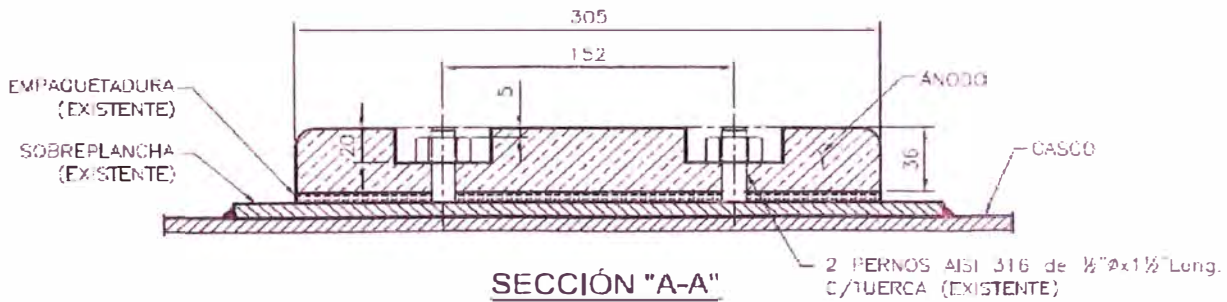
Adj.: Diagrama con medidas

Av. Néstor Gambetta 9053 - Callao - Perú - P.O. Box 18-1441 Lima - Perú  
Telf.: (511) 613-7500 Anexos 215-217 Fax: (511) 577-6459 Anexo 217 / 577-6452 Nextel: 815\*2354  
E-mail: [cesar.salinas@zinsa.com.pe](mailto:cesar.salinas@zinsa.com.pe) ; [peru@zinsa.com.pe](mailto:peru@zinsa.com.pe)  
Web: [www.zinsa.com](http://www.zinsa.com)

## DIAGRAMA CON MEDIDAS



**DETALLE DE ÁNODO DESMONTABLE  
(ÁNODO DE 11 KG)**







## COTIZACION N° S-2013-04-127

Lima, 15 de Abril del 2,013

Señores

SIMA

Atencion : Sr. Joseph Ibañez

Presente.-

Estimados señores:

En atención a su amable solicitud, nos es grato cotizarle lo siguiente:

ITEM	CANT	UND	DESCRIPCION	P. UNIT. S/	P. TOTAL S/
1	160	PZ	PERNO HEXAG. AC. INOX.C-316 UNC 1/2 X 1.1/2" ROSCA CORRIDA	1.740	278.40
2	160	PZ	TUERCA HEXAG. AC. INOX.C-316 UNC 1/2"	0.590	94.40
				Sub Total	278.40
				IGV 18%	50.11
				Importe Total S/	328.51

Condiciones de Venta:

Forma de Pago : CONTADO

Plazo de entrega : STOCK

Lugar de entrega : SUS ALMACENES DE LIMA

Validez de Oferta : CUATRO DIAS, SUJETO A VARIACION STOCK MATERIA PRIMA

Atentamente,

*Sonia Ayala*

**Asunto:** RE: Quote ICCP - Project tug  
**De:** Javier Llamas <javier.llamas@llalco.com>  
**Fecha:** 03/04/2013 12:11 p.m.  
**Para:** "jibanez@sima.com.pe" <jibanez@sima.com.pe>  
**CC:** Margarita Cardenas <margarita.cardenas@llalco.com>

Estimado Sr. Ibañez Echebarria,

Gracias por su petición de oferta a nuestra central de Cathelco UK.  
Llalco es el Distribuidor Oficial para Latino América y tenemos mucho gusto en ofertarles y ofrecerles nuestra colaboración y ayuda.

Sistema de Protección Catódica por Corrientes Impresas (ICCP: Impress Currect Cathodic Protection).  
Para la superficie mojada de 520m<sup>2</sup> y la protección de la hélice y timón se requiere un equipo de 10Amp.

Alcance de Suministro  
Sistema Cathelco MiniTek de 20 Amp

1 x Panel de Control MiniTek 20AMP, 220V AV  
2 x Anodos Titanio de 10 Amp  
2 x Coferdams para los ánodos  
2 x Escudo Dielectrico  
2 x Electrodo de Referencia de Zinc  
2 x Coferdams para los electrodos  
1 x Sistema de Tierra (masa) para el eje de la hélice  
1 x Sistema de Tierra (masa) para el timón.  
1 x Juego de repuestos eléctricos  
1 x Manual de Instalación/Operaciones.

Precio ex-work Madrid: € 5.700 EUR

Plazo de entrega 3-4 semanas.

Quedo a su entera disposición para cualquier información adicional que necesite.

Un saludo.

Javier Llamas  
Director Comercial  
[javier.llamas@llalco.com](mailto:javier.llamas@llalco.com)

Natalia de Silva, 3 A 28027 Madrid  
T: +34 917 423 057 | F: +34 913 204 578  
[www.llalco.com](http://www.llalco.com)

“Failure cannot cope with persistence..”

-----Original Message-----

From: Joseph Ibañez Echevarria [<mailto:jibanez@sima.com.pe>]  
Sent: 25 March 2013 16:10  
To: [sales@cathelco.com](mailto:sales@cathelco.com)  
Subject: Quote ICCP - Project tug

Mr. Cathelco

: ICCP - Project tug

Please, could send quote for application a System Cathodic Protection.  
This is a Project TUG, we need system complete: A reference electrode,  
controller, saturable reactor, power supply, anode, etc.

The characteristic are:

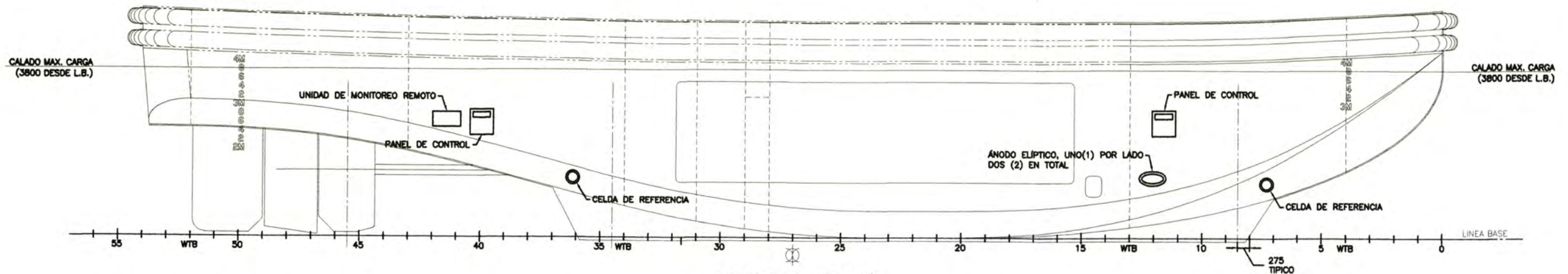
-Hull	Steel ASTM A131-A
-Area	: 520 m2 (include apendice)
-Density current	: 25 mA/m2
-Capacity current	: 820 A-h/Kg
-Resistivity	: 18 ohm-cm
-Time	: 5 year o more.

Please, send us if you need any information; we hope the soon answer,  
thank you.

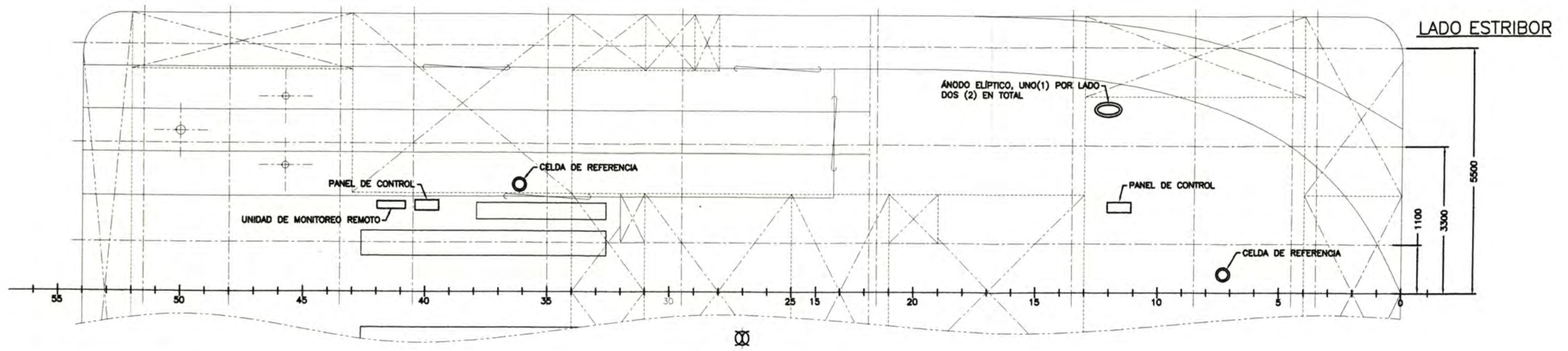
Atte.

Joseph G. Ibañez Echevarria  
Jefe de Proyecto Diseño(e)  
#966655869  
(+51)43-350721-Anexo:239  
[www.sima.com.pe](http://www.sima.com.pe)

"Empresa peruana líder en la industria naval y metal mecánica"



VISTA DE ELEVACIÓN  
(LADO DE ESTRIBOR)



VISTA DE PLANTA  
LADO DE ESTRIBOR  
ESCALA 1:50

NOTAS:

1. EL OBJETIVO DEL PRESENTE PLANO ES MOSTRAR LA DISTRIBUCIÓN DONDE SE UBICARÁN LOS EQUIPOS PARA PROTECCIÓN CON CORRIENTE IMPRESA.
2. EL EQUIPAMIENTO PARA ESTA PROTECCIÓN FUERON RECOMENDADOS POR EL PROVEEDOR (CATHELCO-LLALCO).
3. LAS ESPECIFICACIONES DE CADA EQUIPO SERÁN ENVIADAS POR EL PROVEEDOR UNA VEZ QUE SE ACEPTA LA COMPRA DEL SISTEMA.

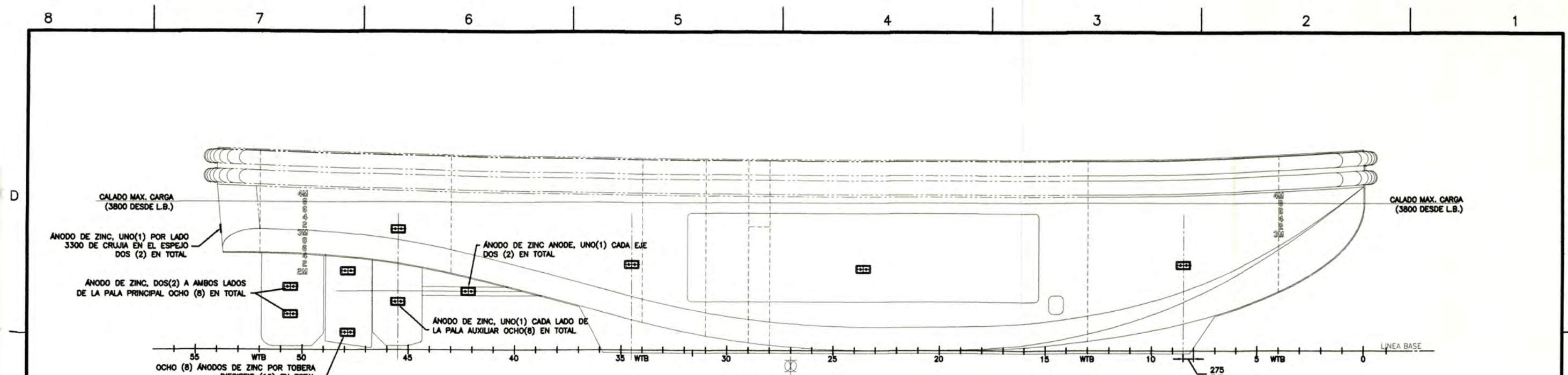
PROYECTO "REMOLCADOR DE 55TBP "

UNI-FIM

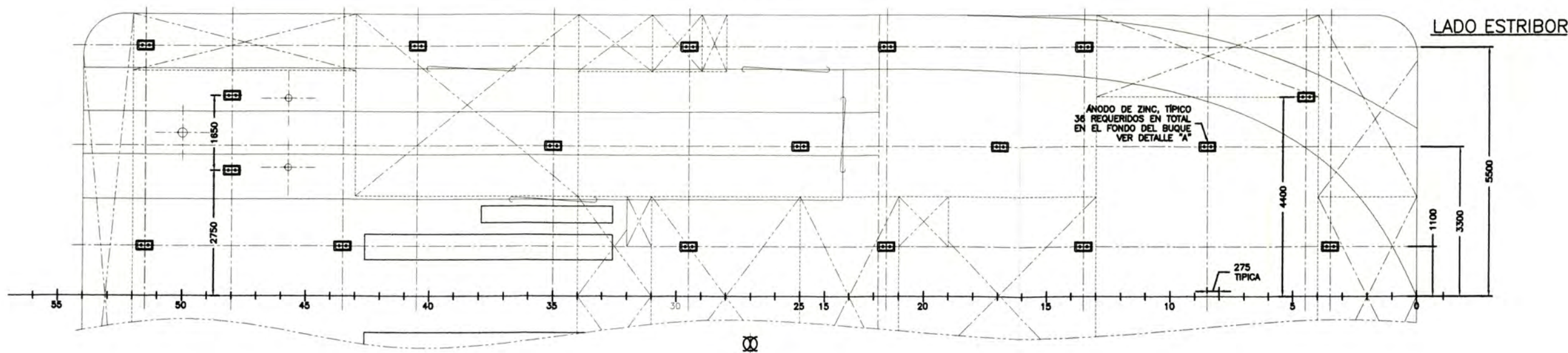
	EMBARCACIÓN DE 29.70m DE ESLORA			
	<b>DISPOSICIÓN DE EQUIPOS DE CORRIENTE IMPRESA</b>			
DISEÑADO POR :	REVISADO POR :	FECHA :	PLANO NUMERO :	HOJA : DE :
-	-	2013-04-11	J1-2013-0002	1 1
DIBUJADO POR :	APROBADO POR :	ESCALA :		REV. : "0"
-	J. IBAÑEZ E.	INDICADA		

INGENIERIA NAVAL





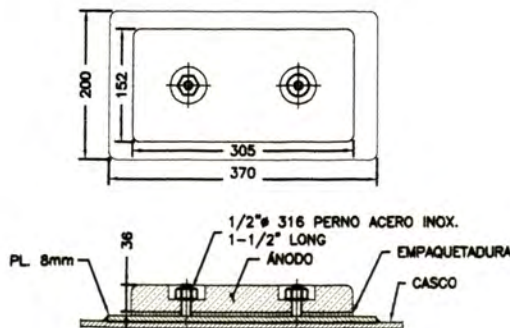
VISTA DE ELEVACIÓN  
(LADO DE ESTRIBOR)



VISTA DE PLANTA  
LADO DE ESTRIBOR  
ESCALA 1:30

NOTAS:

1. SE UTILIZARÁN 80 ÁNODOS DE ZINC CUYO MATERIAL ESTÁ DE ACUERDO A LA ESPECIFICACIÓN NORTEAMERICANA MIL-A 18001-H
2. EL REQUERIMIENTO DEL TIEMPO DE VIDA Y PESO DE CADA ÁNODO ESTÁ EN BASE A LO SOLICITADO POR EL CLIENTE.
3. LA DISTRIBUCIÓN DE CADA ÁNODO SE HIZO TENIENDO EN CUENTA QUE EL RADIO DE ACCIÓN MÁXIMO ES 4m, Y SIGUIENDO LA BUENA PRÁCTICA NAVAL.
4. ESTE PLANO NO MUESTRA LOS ÁNODOS QUE SE INSTALARÁN EN LAS CAJAS DE TOMA DE MAR, TANQUES DE LASTRE, ETC.



DETALLE A

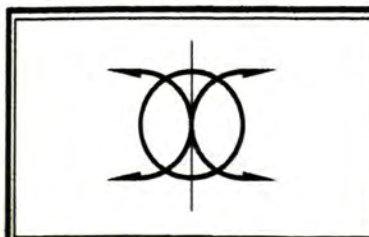
ESCALA 1:5  
11kg (24 LB.) ÁNODO DE ZINC

PROYECTO "REMOLCADOR DE 55TBP "

UNI-FIM

EMBARCACIÓN DE 29.70m DE ESLORA

DISPOSICIÓN DE ÁNODOS DE ZINC



INGENIERIA NAVAL

DISEÑADO POR : -	REVISADO POR : -	FECHA : 2013-04-11	PLANO NUMERO : JI-2013-0001	HOJA : DE : 1 1
DIBUJADO POR : -	APROBADO POR : J. IBÁÑEZ E.	ESCALA : INDICADA		REV. : "0"