

# Efectos de la distancia interanódica y la geometría del cátodo, en la efectividad de los sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio en embarcaciones

Darío H. Ruedas Pacheco\*  
Reinaldo Villalba\*\*

## Resumen

El presente artículo relaciona determinados resultados derivados del estudio efectuado en el laboratorio, cuyo objetivo principal radica en determinar la incidencia de la distancia entre los ánodos y la geometría del cátodo en la vida útil de los sistemas de protección catódica. Estas investigaciones están encaminadas a generar el conocimiento básico del desempeño de los sistemas de protección catódica galvánica para embarcaciones, con el objetivo de soportar un *software* que tenga en cuenta la influencia de todas las variables y las actuales consideraciones de diseño.

Los resultados permiten evidenciar que la vida útil del sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio, depende en gran medida, de la distancia interanódica adoptada en la rutina de diseño y que existe una distancia óptima que orienta de manera objetiva la toma de decisiones al momento del montaje de los ánodos en el casco de la embarcación. Así mismo, la geometría del sustrato incide en la vida útil del sistema y es interpretable como un factor amplificador del área expuesta que se va a proteger.

**Palabras clave:** Protección catódica, distribución anódica, polarización, cátodo, ánodo.

## Abstract

The present article relates determined results derived from the lab study, whose principal objective lies on determining the incidence of the distance between the anodes and the cathode geometry in the life cycle of cathodic protection systems. These investigations are headed towards generating the basic knowledge of the performance of the galvanic cathodic protection systems for ships, with the objective of supporting a software that takes into consideration the influence of all the variables and the current considerations of design.

The results prove that the life cycle of the cathodic protection system by sacrifice anodes largely depends on the inter anodic distance adopted in the routine of design and that there is an optimum distance which objectively orients the decision making at the moment of anode assembly on the hull of the ship. Likewise, the geometry of the substrate affects on the life cycle of the system and is interpretable as an amplifying factor of the exposed area which will be protected.

**Key Words:** Cathodic Protection, Anodic Distribution, Polarization, Cathode, Anode.

Fecha de recepción: 8 de septiembre de 2008

Fecha de aceptación: 10 de octubre de 2008

\* Corporación para la Investigación de la Corrosión —CIC— (UEN Corrosión Externa).

\*\* Asesor CIC

Autor correspondiente: druedas@corrosion.uis.edu.co

Los autores agradecen a Cotecmar el apoyo tanto para la elaboración del presente artículo como la que ha recibido la CIC para llevar a cabo los proyectos "Optimización del Sistema de Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio para Embarcaciones de hasta 3.600 Toneladas que Operan en la Bahía de Cartagena" y "Desarrollo de una Herramienta Computacional que Permita Predecir y Simular el Nivel de Protección contra la Corrosión en Embarcaciones Marítimas de hasta 3.600 Toneladas, las cuales Usan Sistemas de Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio".

## Introducción

Tradicionalmente, en Colombia los diseños de protección catódica para embarcaciones, han sido realizados utilizando métodos empíricos y basados en la experiencia de los astilleros. A escala mundial, existen herramientas sofisticadas para el diseño, cálculo y posicionamiento de los ánodos en las estructuras y embarcaciones marinas, incluyendo modelos de simulación avanzados. Sin embargo, la transferencia tecnológica de tales desarrollos demanda una alta inversión y un proceso integral de capacitación.

Como alternativa para ampliar el conocimiento y proyectar una mejor tecnología en este sentido, la Dirección de Investigación, Desarrollo e Innovación –Didesi– de Cotecmar, ha liderado la realización de una serie de proyectos de investigación aplicada, con los cuales, en forma secuencial, se ha planeado disponer del conocimiento y de las herramientas tecnológicas con el fin de ampliar el portafolio de servicios de los astilleros de Cotecmar, y de la gestión del conocimiento para ofrecer una mayor calidad, confiabilidad y competitividad. El primer proyecto del programa concebido, y que ha sido desarrollado en alianza con la Corporación para la Investigación de la Corrosión –CIC–, ha permitido establecer entre otros aspectos, los efectos de la distancia interanódica y la geometría del cátodo, en la efectividad del sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio, que corresponde en su aplicabilidad al lado exterior del casco de embarcaciones, en la superficie denominada en el lenguaje naval como obra viva.

## Control de la corrosión para embarcaciones

El control de la corrosión para la obra viva del casco de las embarcaciones, está basado en un sistema dual, recubrimiento-protección catódica, y para el alcance del proyecto referenciado, el sistema de protección catódica es de tipo galvánico, conformado por ánodos comerciales fabricados en aleaciones de zinc.

Con este diseño conceptual de la protección ante defectos en el recubrimiento por cualquier causa, el sis-

tema de protección catódica debe estar en capacidad de proteger el metal en el área donde el recubrimiento no satisfaga a plenitud el efecto de barrera de vapor.

En este orden de ideas, el desempeño de un ánodo de sacrificio está relacionado con su capacidad para drenar la corriente que demanda la superficie del área de la estructura expuesta al electrolito, debido a la permeabilidad al vapor y a macrodefectos en el recubrimiento. El drenaje de suficiente corriente permitirá que se alcance el nivel de potencial requerido para proteger la obra viva de la embarcación y, referenciados en un electrodo de plata-cloruro de plata ( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ), esta potencial estructura-electrolito deberá ser de  $-0,85$  voltios DC o más electronegativo.

## Experimentación

Para la realización de los ensayos experimentales en laboratorio, fueron diseñadas, construidas y puestas en marcha, celdas electroquímicas para la evaluación del desempeño de ánodos de sacrificio –Cedas– tal y como se presenta en el Gráfico 1.

Gráfico 1. Arreglo de un grupo de Cedas



Fuente: Resultados de la investigación.

Las Cedas funcionan como contenedor del medio electrolítico y como soporte de las muestras de sustrato que se van a exponer, proteger y evaluar, además disponen de las facilidades eléctricas y electrónicas para realizar en forma confiable las mediciones de las variables de interés. Para simular el agua de mar, se adoptó como medio

electrolítico una solución sintética acorde con la norma ASTM D-1141-98.

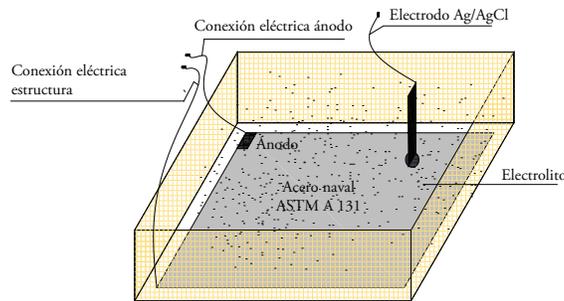
Los cátodos se construyeron con láminas de acero naval especificación ASTM 131 Grado A, preparadas previamente a un grado de limpieza metal blanco según especificación SSPC-SP5, mediante técnica de chorro de arena.

Para el paquete de ensayos referidos al tema tratado, los cátodos utilizados en todos los casos están desprovistos de recubrimiento en el lado de exposición al electrolito, y se adoptaron en formas geométricas, plana, con doblé a 90° y con doblé a 135°, a fin de considerar la condición geométrica de los componentes del lado exterior del casco de una embarcación.

Los ánodos del sistema de protección catódica fueron fabricados con ánodos comerciales de 10 kilogramos, de zinc tipo trapezoidal, referencia ZHS, escalados en masas de 12.5 y 50 gramos.

Con las variables fijas descritas, los ensayos se encaminaron a establecer la desviación entre la vida útil real y la vida útil teórica del sistema de protección catódica, a partir del cambio en la distribución anódica en términos de la distancia interanódica.

Gráfico 2. Esquema básico de montaje en Cedas



Fuente: Resultados de la investigación.

Cuadro 1. Condiciones de ensayo para cátodos desnudos y de superficie plana

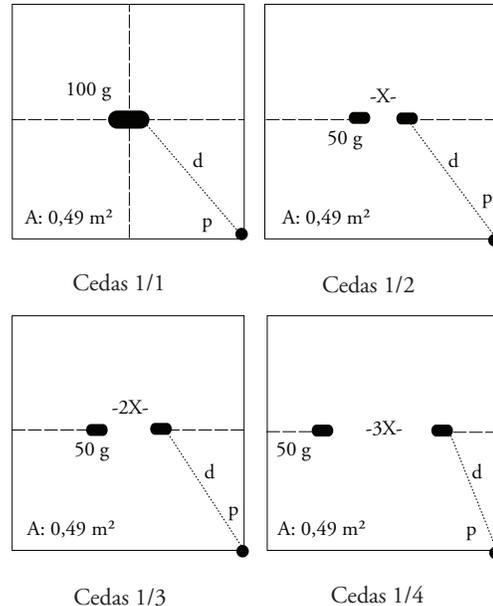
Código de prueba en Cedas	Área a proteger (m <sup>2</sup> )	Número de ánodos	Masa unitaria de ánodo (gr)	Masa anódica total (g)	Distancia interanódica (m)
1/1	0.49	1	100	100	n.a.
1/2	0.49	2	50	100	0.10
1/3	0.49	2	50	100	0.20
1/4	0.49	2	50	100	0.30

Fuente: Resultados de la investigación.

### Cátodo y plano desnudo

A continuación, se presentan en forma tabulada las condiciones de los ensayos realizados para cátodos desnudos y de superficie plana y la esquematización del montaje de las pruebas (Cuadro 1).

Gráfico 3. Esquema de distribuciones anódicas para cátodos desnudos y de superficie plana



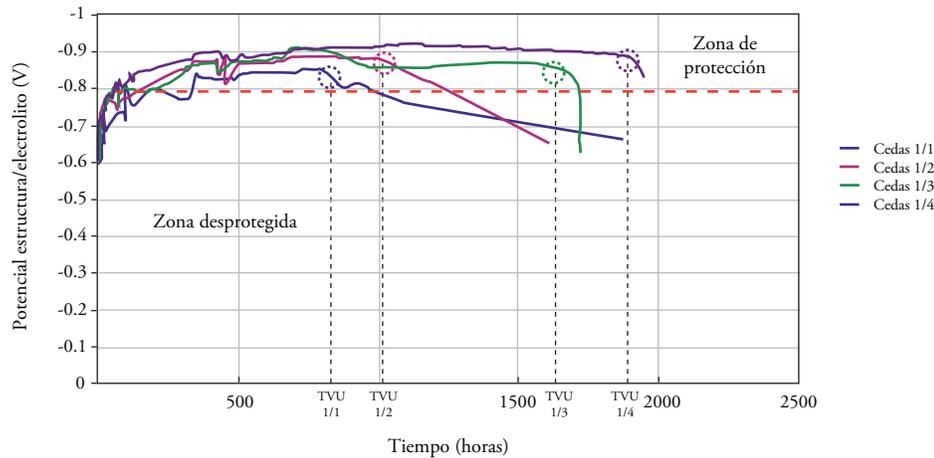
Fuente: Resultados de la investigación.

Los gráficos de los resultados de las vidas útiles reales de los diferentes arreglos anódicos, muestran claramente que la efectividad de un sistema de protección catódica en una superficie plana, depende de la distribución anódica, en términos de la distancia de separación entre los ánodos.

Al evaluar los resultados obtenidos se verifica que para el caso de superficies planas, la vida útil real varía en forma directa con la distancia interanódica.

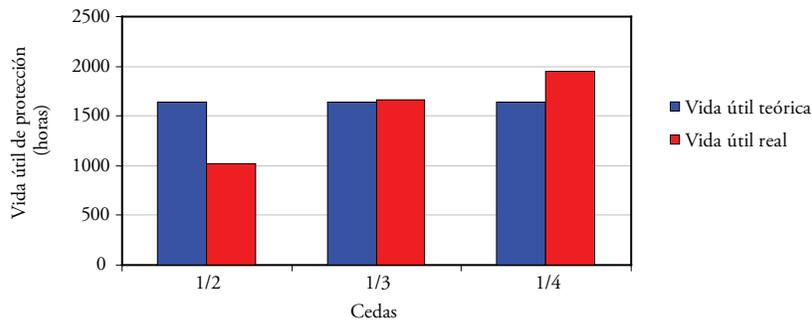
Considerando que es físicamente improbable que infinita, debe existir una distancia óptima para la para una distancia infinita la vida útil tiende a cual la vida útil real es máxima.

Gráfico 4. Impacto en sustratos planos de la distribución anódica en la efectividad del sistema de protección catódica galvánica



Fuente: Resultados de la investigación.

Gráfico 5. Desempeño de la distribución anódica, vida útil real y vidas útiles teórica y real Superficies planas



Fuente: Resultados de la investigación.

Por otra parte, en el Gráfico 5 puede evidenciarse que una distancia interanódica muy pequeña, puede generar una vida útil real incluso menor a la teórica o proyectada.

### Cátodo desnudo con dobléz a 90°

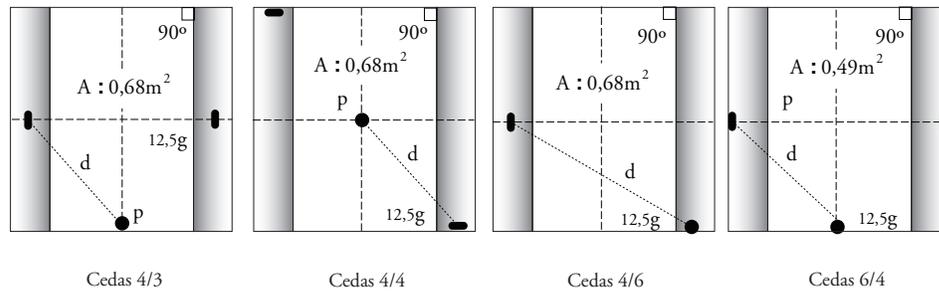
En el Cuadro 2 se presentan en forma tabulada, las condiciones de los ensayos realizados para cátodos desnudos y con un dobléz a 90° y la esquematización del montaje de las pruebas.

Cuadro 2. Condiciones de ensayo para cátodos desnudos y de superficie con dobléz a 90°

Código de prueba en Cedas	Área a proteger (m <sup>2</sup> )	Número de ánodos	Masa unitaria de ánodo (gr)	Masa anódica total (g)	Distancia interanódica (m)
4/3	0.68	2	12.5	25	0.84
4/4	0.68	2	12.5	25	1.13
4/6	0.68	1	12.5	12.5	n.a.
6/4	0.49	2	12.5	25	0.70

Fuente: Resultados de la investigación.

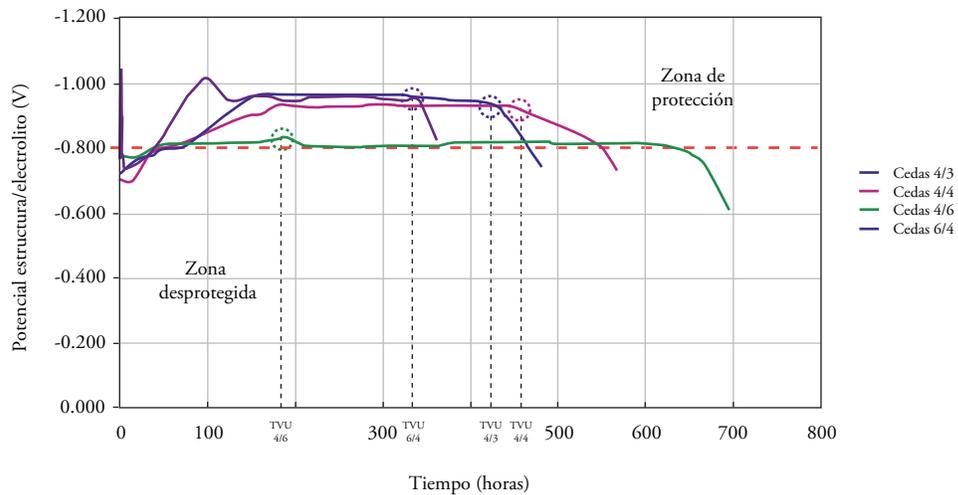
Gráfico 6. Esquema de distribuciones anódicas para cátodos desnudos y de superficie con doblé a 90°



Fuente: Resultados de la investigación.

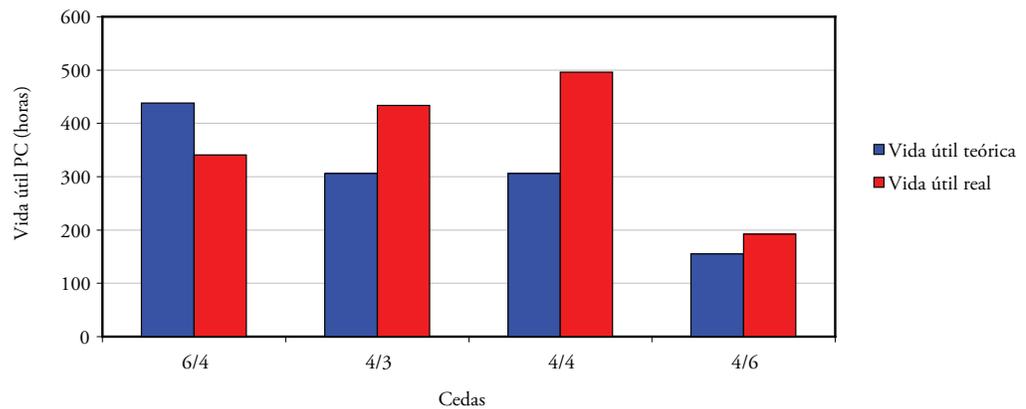
Los gráficos de los resultados de las vidas útiles reales de los diferentes arreglos anódicos, muestran claramente que la efectividad de un sistema de protección catódica en una superficie con doblé a 90°, depende de la distribución anódica, en términos de la distancia de separación entre los ánodos.

Gráfico 7. Impacto en sustratos con doblé a 90° de la distribución anódica en la efectividad del sistema de protección catódica galvánica



Fuente: Resultados de la investigación.

Gráfico 8. Desempeño de la distribución anódica y la vida útil real y de las vidas útiles teórica y real Superficies con doblé a 90°



Fuente: Resultados de la investigación.

Los resultados obtenidos permiten evidenciar que para el caso de superficies con doblez a 90°, la vida útil real varía en forma directa con la distancia interanódica, ratificando la tendencia encontrada en el caso de las superficies planas.

En el Gráfico 8 puede corroborarse lo obtenido en las superficies planas, en la cual una distancia interanódica muy pequeña puede generar una vida útil real incluso menor a la teórica o proyectada. Los resultados para este caso, ratifican que la tendencia de la vida útil real es creciente con la

distancia interanódica y que se presenta un punto de inflexión o de máxima vida útil, a partir del cual comienza su reducción, lo que comprueba el planteamiento enunciado para el caso de las superficies planas.

**Cátodo desnudo con doblez a 135°**

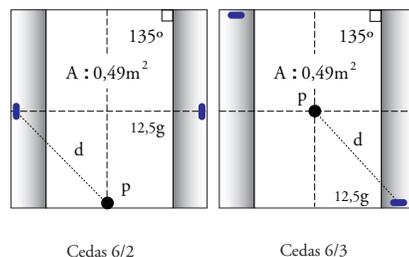
El Cuadro 3 muestra en forma tabulada, las condiciones de los ensayos realizados para cátodos desnudos y con un doblez a 135° y la esquematización del montaje de las pruebas.

Cuadro 3. Condiciones de ensayo para cátodos desnudos y de superficie con doblez a 135°

Código de prueba en Cedas	Área a proteger (m <sup>2</sup> )	Número de ánodos	Masa unitaria de ánodo (gr)	Masa anódica total (g)	Distancia interanódica (m)
6/2	0.49	2	12.5	25	0.70
6/3	0.49	2	12.5	25	0.99

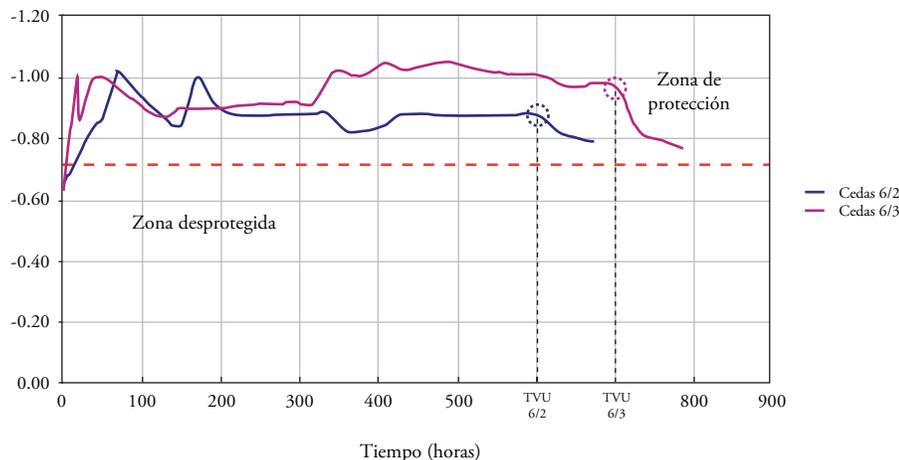
Fuente: Resultados de la investigación.

Gráfico 9. Esquema de distribuciones anódicas para cátodos desnudos y de superficie con doblez a 135°



Fuente: Resultados de la investigación.

Gráfico 10. Impacto en sustratos con doblez a 135° de la distribución anódica en la efectividad del sistema de protección catódica galvánica

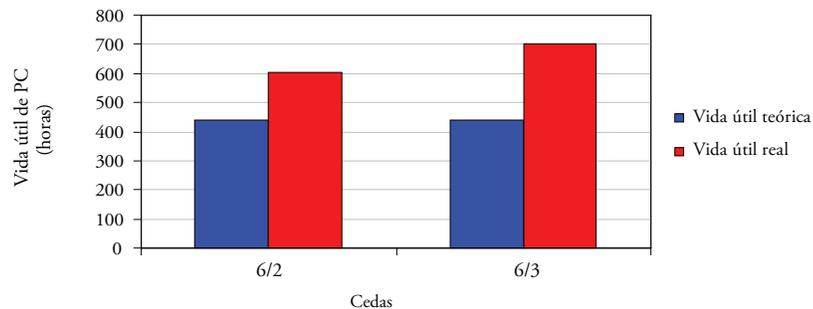


Fuente: Resultados de la investigación.

Los gráficos de los resultados de las vidas útiles reales de los diferentes arreglos anódicos, muestran claramente que la efectividad de un sistema de protección catódica en una superficie con doblez a 135°, depende de la distribución anódica, en términos de la distancia de separación entre los

ánodos. Los resultados obtenidos en este tipo de arreglo, permiten asegurar la consistencia de aquellos encontrados en los casos de superficie plana y con doblez a 90°, en el sentido de que la vida útil real varía en forma directa con la distancia interanódica.

Gráfico 11. Desempeño de la distribución anódica y la vida útil real y de las vidas útiles teórica y real Superficies con doblez a 135°



Fuente: Resultados de la investigación.

El Gráfico 11 muestra esquemáticamente las desviaciones que se pueden presentar entre la vida útil teórica, calculada mediante las correlaciones para protección catódica por ánodos de sacrificio, y la vida útil real obtenida mediante los ensayos experimentales en las celdas electroquímicas. Para este caso, es claro que en la medida en que se aplica una distancia interanódica más cercana a la óptima, mayor es el diferencial entre la vida útil real y la vida útil calculada.

## Aplicabilidad de los resultados

A pesar de disponer de un número reducido de puntos representativos del desempeño de la vida útil real y la distancia interanódica y tan solo dos masas anódicas, se considera suficiente proponer un primer acercamiento de la familia de curvas, que permitan establecer la distancia interanódica óptima aplicable a ánodos de zinc de masas comerciales.

Basados en los resultados para ánodos de 12.5 gramos, se generó la ecuación de vida útil en función de la masa y la distancia interanódica, con ayuda del Matlab por búsqueda heurística con programación no lineal. Una vez obtenida la ecuación, fueron definidos los factores ajustados a

los resultados conocidos para ánodos de 50 gramos, y generalizada la correlación para obtener la curva de vida útil en función de la distancia interanódica para cualquier masa anódica.

La ecuación general propuesta se define de la siguiente manera:

$$T = A \ln[B(X/F)] - C(XD)^2 \quad (1)$$

donde:

$T$ = vida útil real expresada en horas  
 $X$ = distancia interanódica expresada en metros  
 $A, B, C$ = factores de masa

La determinación de los factores  $A, B$  y  $C$  se definen a continuación (Cuadro 4).

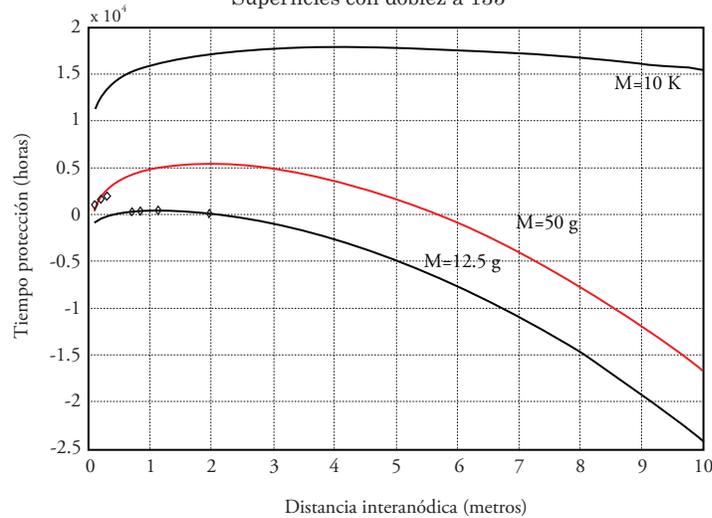
Cuadro 4. Determinación de los factores de masa

Factor	$M \leq 12.5 \text{ g}$	$M > 12.5 \text{ g}$
A	683	204.9(M)
B	3	19200(M) <sup>2</sup>
C	265	212

donde,  
 $M$ = masa anódica expresada en kg.

La familia de curvas que se pueden obtener al aplicar la ecuación descrita anteriormente, se presenta en el Gráfico 12 para masas correspondientes a 12.5 gramos, 50 gramos y 10 kilogramos.

Gráfico 11. Desempeño de la distribución anódica y la vida útil real y de las vidas útiles teórica y real Superficies con doblé a 135°



Fuente: Resultados de la investigación.

## Conclusiones

A cada masa anódica individual le corresponde una distancia interanódica óptima, para la cual la vida útil del sistema de protección catódica es máxima.

Distancias interanódicas inferiores a la óptima, generan una vida útil real que puede ser incluso inferior a la vida teórica o calculada mediante las correlaciones de diseño, lo que se traduce en un aumento del riesgo de falla del sistema dual, máxime cuando la protección catódica debe asumir la sobredemanda de corriente ocasionada por deficiencias en la aplicación, el desempeño y/o defectos ocurridos durante el servicio del sistema de recubrimientos.

En la medida en que se adopta una distancia interanódica más cercana a la óptima, mayor es el diferencial entre la vida útil real y la vida útil calculada, es decir, se aumenta el factor de seguridad adoptado en el diseño del sistema de protección catódica.

Para efectos de toma de decisiones en los eventos que generan limitaciones en el montaje de los ánodos,

se recomienda adoptar distancias interanódicas desviadas respecto de la óptima por exceso y no por defecto.

Es evidente que la geometría del sustrato o la superficie que se va a proteger catódicamente, genera un factor de ampliación de la demanda de corriente del sistema de protección catódica. Este factor se minimiza cuando se adopta la distancia interanódica óptima. Para el caso estudiado, un doblé o cambio en la geometría de 90° puede representar un factor de ampliación de área expuesta entre 2.36 y 1.72, y para un doblé o cambio de la geometría de 135° un factor entre 1.42 y 1.22.

## Referencias

American Society for Test and Materials (1998), "ASTM D-1141 Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water". ASTM, International Publication.

American Society for Test and Materials (2006), "ASTM B 418 Type II Alloy Standard: Standard Specification for Cast and Wrought Gal-

vanic Zinc Anodes”, ASTM, International Publication.

Corporación para la Investigación de la Corrosión y Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Naval, Marítimo y Fluvial (2006). Proyecto de investigación “Optimización del sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio para embarcaciones de hasta 3.600 toneladas que operan en la bahía de Cartagena”, Piedecuesta, CIC.

Corporación para la Investigación de la Corrosión y Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Naval, Marítimo y Fluvial (2006). Proyecto de cofinanciación Colciencias: “Desarrollo de una herramienta computacional

que permita predecir y simular el nivel de protección contra la corrosión en embarcaciones marítimas de hasta 3.600 toneladas, las cuales usan sistemas de protección catódica por ánodos de sacrificio”, Piedecuesta, CIC.

Det Norske Veritas (1993), “DNV RP B401 Cathodic Protection Design”, DNV, Oslo.

Military Specification (Revision K) MIL-A-18001 “Anodes, Sacrificial Zinc Alloy”, MIL, International Publication.

Military Specification (1992), MIL-A-24779 (SH) “Detail Specification Anodes, Sacrificial Aluminum Alloy”. MIL, International Publication.

