TÍTULO: **LAS CORRIENTES IMPRESAS Y LOS SISTEMAS DE ANTI-INCRUSTACIÓN EN LOS BUQUES**

TNI RAÚL VILLA CARO

Ingeniero Naval y Oceánica / Capitán de la Marina Mercante

Doctor por la Universidad de A Coruña

INTRODUCCIÓN HISTÓRICA:

Los buques hoy en día se diseñan para operar en escenarios comerciales muy demandantes, a la vez que se les exigen unas condiciones de operación muy agresivas para poder alcanzar el máximo nivel de competitividad. La explotación en condiciones marinas muy agresivas origina grandes costes de mantenimiento, que sólo podrán minimizarse en el caso de que en la etapa de diseño se hayan previsto equipos de control de la corrosión de última generación.

La corrosión es uno de los problemas más importantes que existen en los buques. Este fenómeno indeseable se produce cuando se pone en funcionamiento una pila galvánica, que provoca la existencia de un ánodo, donde se produce la disolución del metal (corrosión), un cátodo, y un electrolito, que une ánodo y cátodo, actuando como cable conductor. En el momento en que uno de estos tres elementos del fenómeno de la corrosión falla, la pila deja de funcionar, y la corrosión se detiene. Por lo tanto, la lógica nos sugiere que si buscamos un sistema de protección, este ha de estar basado en suprimir alguno de los elementos mencionados.

La corrosión se debe a la actuación de pilas electro-químicas, en las que el metal sufre disolución en las regiones anódicas. En ella el proceso no afecta por igual a toda la superficie metálica, pues en las regiones catódicas no hay ataque. Este sólo es posible cuando los metales se hallan en contacto con medios de conductividad electrolítica (agua, soluciones salinas, etc.).

Entre las causas más importantes que provocan la corrosión electroquímica, se podrían destacar las siguientes: heterogeneidades en la fase metálica, partículas contaminantes de la superficie, discontinuidades en capas que recubren el metal, diferencias de potencial debidas a la presencia de campo eléctrico actuando sobre el metal, etc.

Las pérdidas ocasionadas por la corrosión podrían dividirse en directas o indirectas. Las primeras están basadas en los costes de sustitución y las segundas se relacionan con los

gastos derivados del fallo. Entre las relacionadas con el coste de sustitución se podrían destacar las siguientes: sustitución de la pieza afectada por otra de mayor resistencia química, sustitución de equipos por ser inviable su reparación, aplicación de revestimientos, etc.

Figura 1: Desmontaje del domo de una F100 para comprobación de corrosión

MÉTODOS PARA EVITAR LA CORROSIÓN:

Los métodos para detener la corrosión más conocidos se fundamentan en suprimir el flujo de las corrientes galvánicas de corrosión. Estos son los diferentes procedimientos existentes:

a) Homogeneidad absoluta de material: Sería el estado ideal, ya que de esta forma desaparecerían los pares causantes del fenómeno. Destacar que es prácticamente imposible lograr una homogeneidad perfecta.

b) Aislamiento eléctrico: Es decir, apertura del circuito exterior de los pares. Esto es realizable solamente para el caso de metales diferentes acoplados entre sí.

c) Aislamiento entre el metal y el electrolito: Es lo que se pretende con la aplicación de las pinturas. Es difícil conseguir una protección total y cuando por algún motivo se descubre una zona pintada, se puede incrementar notablemente la corrosión, pues las partes pintadas presentan carácter catódico frente al acero desnudo.

d) Polarización de las pilas elementales: Esta es precisamente la protección catódica. Existen dos procedimientos generales, el de “ánodos de sacrificio” (método pasivo) y el de “corrientes impresas” (método activo) por medio de ánodos consumibles o permanentes.

Por lo tanto, una superficie metálica se puede llegar a hacer catódica, y quedar protegida, mediante dos métodos:

1) Conectando el metal que se trata de proteger a otro menos noble que él, es decir, que esté situado por encima, en la serie electroquímica de los metales. Este sistema se conoce con el nombre de “Protección Catódica mediante ánodos de sacrificio”. Los metales más utilizados para este fin son el Cinc, Aluminio, Magnesio, y sus respectivas aleaciones.

2) Conectando el metal a proteger al polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua, pura o rectificada y el positivo (ánodo dispersor) a un electrodo auxiliar que puede estar constituido por chatarra de hierro (consumible), ferro-silicio,

grafito, titanio-platinado, plomo-plata, etc. Este sistema se conoce con el nombre de “Protección Catódica por corriente impresa”. En la actualidad, y tras los avances de la construcción naval, se ha llegado a sistemas que pueden ser controlados durante su operación y así evitar las molestias que pudiera ocasionar la renovación de los ánodos de sacrificio. Estos sistemas incorporan diseños avanzados en el campo de la ingeniería de corrosión.

METODOS DE PROTECCIÓN

Existen métodos diversos para combatir la corrosión. A veces se utiliza un solo método y otras veces una combinación de los mismos. No siempre la solución de los citados problemas es compleja, sino que a veces pueden resolverse adelantándose a la aparición de los mismos, por medio del análisis, de todos los problemas que pudieran existir, durante la fase de ingeniería y diseño. Entre los estudios a tener en cuenta se pueden destacar:

1.- Estudio del medio ambiente en el que convivirá la estructura, mediante análisis previo del electrolito, composición del mismo, temperaturas, presiones, conductividad, presencia de elementos incrustantes, bacterias, etc.

2.- Conocimiento de los materiales que componen la estructura, así como dimensiones, composición metales o aleaciones de forma que sea posible el cálculo de la superficie a proteger.

3.- Recubrimientos protectores y características de los mismos, materiales, espesores, capas, etc.

4.- Conexiones al mismo de otras estructuras, presencia de juntas aislantes, tomas de tierra, efectos de líneas eléctricas, etc.

Con todos estos datos se debe valorar qué herramienta debe emplearse para paliar el proceso corrosivo, y una vez decidido, aplicarla. De entre todos los métodos posibles a emplear, se debe tener muy en cuenta el campo de la economía, para optar por soluciones viables.

PROBLEMAS FUNDAMENTALES DE CORROSION EN EL CASCO DE UN BUQUE:

La superficie metálica del casco de un buque comprendida por debajo de la línea de flotación, se ve afectada por el fenómeno de la corrosión electroquímica. Esto es, como

ya se ha comentado, el resultado del flujo de corriente producido entre un metal y otro a través de un electrolito. Este fenómeno puede ser representado por una célula simple de corrosión que comprende dos metales diferentes conectados eléctricamente, y sumergidos en un electrolito, tal como el agua de mar.

Las características electroquímicas de los metales, y su situación en la serie galvánica, fijan la dirección del flujo de corriente. Este flujo viajará desde el ánodo hacia el cátodo, provocando el proceso ya mencionado de la corrosión. El metal catódico que recibe el flujo de corriente, permanecerá intacto y libre de corrosión.

Estas áreas anódicas y catódicas existen en la estructura del casco de los buques debido a la unión de metales de diferentes potenciales, y a las diferencias físicas en los grados de composición del metal constituyente del casco, así como al deterioro o discontinuidad del revestimiento de la pintura. No obstante, la corriente de corrosión puede también producirse por heterogeneidades en la composición del agua de mar que rodea a dichas superficies.

Todo esto nos induce de nuevo a pensar que la eliminación de áreas anódicas en los componentes metálicos, es un parámetro de importancia en el mantenimiento del buque, de nuevo pensando en la reducción del efecto de la corrosión.

PROTECCION CATODICA MEDIANTE CORRIENTES IMPRESAS:

Por medio de una corriente eléctrica aplicada exteriormente (corrientes impresas), la corrosión se reduce virtualmente a cero. La teoría consiste en llevar la polarización del cátodo más allá del potencial de corrosión, hasta alcanzar el potencial del ánodo en circuito abierto. Ambos electrodos adquieren de esta manera el mismo potencial y no puede haber corrosión del cinc.

La protección catódica se consigue suministrando una corriente externa al metal que se corroe, en cuya superficie funcionan pilas de acción local como se ilustra en la figura 2. La corriente abandona el ánodo auxiliar (compuesto por algún cuerpo conductor, metálico o no metálico) y entra en las áreas catódicas y anódicas de las pilas de corrosión, retornando a la fuente de corriente continua B. Cuando las áreas catódicas están polarizadas por una corriente externa hasta alcanzar el valor del potencial en un circuito abierto de los ánodos, toda la superficie del metal estará al mismo potencial y no fluye corriente de acción local. Por lo tanto, el metal no puede corroerse en tanto se mantenga la corriente externa.

Figura 2: Circuito de protección catódica por corriente impresa

La intensidad de corriente total necesaria para conseguir la Protección Catódica dependerá, principalmente, de la superficie mojada y del esquema de pintura aplicado al casco, así como del calendario de navegaciones.

La corriente en exceso no es conveniente y puede dañar los metales anfóteros o los recubrimientos. En la práctica la corriente se mantiene próxima al mínimo teórico.

La ilustración de la figura 3 que se muestra a continuación, denominada "Diagrama de Pourbaix", representa las regiones que caracterizan el comportamiento del hierro (H) a 25º C en función de su potencial y del pH del electrolito, delimitándose las zonas de corrosión, pasivación e inmunidad.

Figura 3: Diagrama de Pourbaix

Por lo tanto la protección catódica se basa en colocar el metal a proteger en la zona de inmunidad, rebajando el potencial desde su valor normal hasta el de protección, tal como se indicó anteriormente. En el caso del acero habría que rebajar el potencial hasta un valor aproximado de -0,8 V, respecto al electrodo de Ag/AgCl (plata/cloruro de plata).

El problema del potencial que hay que lograr, el de las densidades de corriente y la adecuada distribución de esta, se ha resuelto experimentalmente. Se puede considerar como tope de seguridad un potencial de -1000 mV.

Respecto a las densidades de corriente, se puede considerar suficiente, para cascos en reposo y recién pintados, la cifra de 1 mA/m^2, llegando hasta un máximo de 54 mA/m^2 para el casco desnudo. Estas cifras varían sustancialmente para el caso en que el buque se encuentre en movimiento o que el medio presente condiciones especiales.

Otra causa que influye decisivamente en los requerimientos de corriente es la presencia en el agua de oxígeno disuelto. En este caso, la corriente se lleva a través del agua hasta el cátodo, por iones de hidrogeno cargados positivamente, los cuales deben descargarse en el cátodo para convertirse en átomos de hidrógeno. En ese momento, pueden combinarse entre sí, y formar moléculas que se desprenderán en forma de hidrógeno gaseoso. Ahora bien, si en el cátodo hay algún agente oxidante, los iones tienen más facilidad para desprenderse, puesto que pueden combinarse con él. Cuanto mayor es la cantidad de oxígeno disponible, más fácilmente pueden liberarse los iones hidrógeno, y por lo tanto, más alto será el potencial de la reacción catódica. De esto se deduce que hay que aplicar una corriente más elevada, para alcanzar el mismo potencial.

Otro factor importante es la velocidad con que el agua fluye sobre las superficies objeto de la protección, pues tiene influencia en la facilidad de aportación de oxígeno a las zonas catódicas.

También hay que considerar como elemento determinante del problema, los cambios de temperatura, los cuales influyen sobre el coeficiente de difusión del oxígeno.

Otra causa de incremento de las necesidades de corriente está constituida por la presencia de bacterias reductoras, que estimulan la corrosión del acero en condiciones anaerobias. Donde aparecen más frecuentemente es en estructuras enterradas, aunque también pueden aparecer en el agua de mar. El efecto de las bacterias consiste en reducir los sulfatos, pasándolos a sulfuros y liberando oxígeno que actúa como despolarizador de un modo análogo al oxígeno disuelto.

Este método tiene la ventaja de que los ánodos son de un menor peso, y por ello pueden construirse de formas más hidrodinámicas, necesitándose menor número de electrodos.

Resulta interesante la combinación de ánodos de sacrificio con los inertes para tener una garantía de protección, en caso de que falle este último sistema. Los electrodos más utilizados son los de platino, grafito o hierro.

Un problema específico a superar de este tipo de electrodos consiste en lograr que su desgaste, a lo largo del servicio, sea uniforme. Respecto a este problema, a continuación se citan las causas que lo crean:

a) Composición química homogénea. Los de grafito y hierro fundido de alto contenido en silicio se descomponen de una forma desigual.

b) Forma geométrica. Los cilindros y esferas se consumen más uniformemente que las formas con bordes agudos, pues la corriente tiende a concentrarse en las esquinas.

c) Persistencia de los productos de la reacción anódica. Los oxicloruros destruyen el material anódico si se les permite concentrarse y permanecer mucho tiempo en contacto con aquél.

d) Tratamiento superficial. La impregnación del grafito con materias adecuadas, tales como la parafina, da origen a un desgaste más uniforme, al reducir el ataque electroquímico en la superficie.

El sector naval, ya desde hace unos años se está preocupando, de forma progresiva, de adoptar sistemas de protección catódica por corriente impresa, controlados de forma automática. Estos sistemas se están imponiendo por motivos funcionales y económicos.

La eficacia de los sistemas empleados en buques de grandes dimensiones, ha originado como consecuencia su aplicación a buques menores, tales como buques de pasaje, porta-contenedores, fragatas, destructores, patrulleros, etc.

La apuesta final de adoptar estos sistemas está siendo muy clara y definitoria si se tiene en cuenta que las Sociedades de Clasificación admiten tiempos de varadas superiores a dos años y medio, si se combinan estos sistemas con recubrimientos de pintura de alta calidad.

Otra de las ventajas inherentes al sistema es la facilidad de regulación automática del nivel de protección, inhibiendo de esta manera la formación de rugosidad causada por la corrosión, lo cual ocasionaría un aumento elevado en la componente de fricción del casco del buque y, como consecuencia, una disminución de la velocidad o un considerable aumento en el consumo de combustible.

Este sistema se ha extendido principalmente por la estructura exterior de los buques, hélice, timón y sistema de circulación de agua salada.

FUNCIONAMIENTO DE LAS CORRIENTES IMPRESAS:

Mediante la corriente alterna del buque se alimenta un equipo transformador-rectificador del que, mediante unos ánodos que actúan como dispersores de corriente, ésta sale rectificada y, a través del agua de mar, penetra en el casco para cerrar el circuito en el equipo (transformador-rectificador), mediante una puesta a masa.

A este equipo se le acopla un sistema automático regulable, que mediante una célula de referencia actúa sobre la salida de corriente, según las necesidades de protección, con lo cual siempre se consigue la intensidad media necesaria en cada momento para mantener el casco protegido de forma permanente.

Un equipo tipo puede estar compuesto por los siguientes elementos:

a) Unidad de control de potencia.

b) Ánodos de titanio-mezcla de óxidos.

c) Electrodos de referencia de Cinc de alta pureza.

d) Dispositivos de puesta a masa del eje de la hélice.

e) Puestas a masa de las aletas estabilizadoras (de poseerlas).

f) Puesta a masa del timón.

La elección del cinc de alta pureza como electrodo de referencia se debe, entre otras ventajas de tipo económico, a su comportamiento en caso de producirse un cortocircuito

que llevará a masa el electrodo. En estas circunstancias, una vez producido el cortocircuito que pone en contacto el electrodo con el casco (masa), el potencial registrado en el aparato de medida sería de 0V (cero voltios), correspondiendo éste a un potencial alto de protección, por lo que el equipo cortaría automáticamente la salida de corriente.

Si, por el contrario, se utilizara como electrodo de referencia el de plata/cloruro de plata, con respecto al cual el potencial de protección del acero se consigue a partir de -0,8V hacia valores más negativos, al producirse el cortocircuito y marcar el voltímetro un potencial de 0V, que significaría para el casco un elevado potencial de corrosión, el equipo actuaría dando la máxima salida de corriente, lo que podría ser perjudicial para la pintura del casco.

Por otra parte, el cinc de alta pureza presenta mayor resistencia que cualquier otro tipo de electrodo de referencia, a la influencia de acciones mecánicas o químicas siendo, por tanto, mayor su duración.

PROTECCION MEDIANTE PINTURAS:

Para admitir una pintura que haya de sufrir los efectos de la protección catódica, las condiciones que han de ser tenidas en cuenta, son las siguientes:

1. Resistencia ante el ataque alcalino, producto de la reacción de los óxidos metálicos con el agua.
2. Baja permeabilidad.
3. Carácter dieléctrico.
4. Buena adherencia al acero y otros metales.
5. Facilidad de aplicación.
6. Resistencia mecánica, abrasión, impacto, vibración y flexión.
7. Espesor mínimo de 0’15 mm.
8. Compatibilidad con pinturas anti-incrustantes.
9. Precio.

Hay que advertir que existen zonas más expuestas al deterioro, por su mayor potencial. Esto ha de tenerse en cuenta de un modo especial en las proximidades de los ánodos.

En la práctica en las regiones próximas a hélices, tomas y descargas de agua, se aplican también unas pinturas con pigmentos de carácter anódico, que alteran la distribución de las zonas anódicas y catódicas, pero que no son muy recomendables porque su acción

decrece rápidamente con el tiempo. Igualmente se puede considerar preciso pintar, por lo menos, con un compuesto a base de anti-incrustantes.

PROTECCION POR MEDIO DE ANODOS DE SACRIFICIO:

Como resultado de experimentos de laboratorio en agua salada, Sir Humphrey Davy informó en 1824 que se podía proteger eficazmente el cobre contra la corrosión uniéndolo a hierro o cinc, y recomendaba la protección catódica mediante la utilización de bloques de sacrificio de hierro, adosados al casco, en la relación de superficies hierro-cobre del orden de 1 a 100. En la práctica consiguió que la velocidad de corrosión del forro de cobre se redujera considerablemente. También mediante el empleo adecuado de pinturas anti-organismos en combinación con pinturas anticorrosivas demostró que era factible la protección catódica de embarcaciones obteniéndose ahorros considerables en los costes de mantenimiento.

Los elementos anódicos activos más utilizados son el cinc, el magnesio y el aluminio. Su consumo se determina a base del rendimiento, el equivalente electroquímico y el agotamiento eléctrico. La forma ideal de disponerlos sería en nichos practicados en las planchas del forro, pero por lo costoso que resultaría, se procura diseñarlos de forma que produzcan las mínimas perturbaciones con la velocidad del buque. Se debe tener sumo cuidado al realizar el montaje de modo que este sea muy robusto y que suministre una conexión eléctrica eficiente con el casco.

Este sistema tiene el inconveniente del precio, ya que la corriente así generada sale muy cara, sobre todo si se pretende una protección total. Otro inconveniente es la frecuente renovación de ánodos.

En principio, desde el punto de vista de la corrosión, no habría ningún inconveniente en utilizar este sistema como único medio de protección, sin embargo, por consideraciones técnicas y económicas, para la protección de grandes superficies será interesante la combinación de este sistema de protección con el de corrientes impresas, actuando ambos en forma complementaria.

ANODOS DE CINC

Por su facilidad de manejo, es el material anódico más popular y más empleado por la Armada Española. Es muy adecuado para ser utilizado en forma de ánodos distribuidos por la superficie mojada de cascos pintados.

No es adecuado su empleo para la protección de cascos desnudos en agua dulce, ni ofrece las debidas garantías cuando la pintura se encuentra en mal estado. Se regulan automáticamente y la potencia de la corriente está en gran parte controlada por la demanda del cátodo.

El potencial de cinc medido con electrodo de referencia de plata/cloruro de plata, es de -1050 mV, valor compatible con la presencia de la pintura. Su producción de corriente puede estimarse en 743 Amp-h/Kg, cuando se trabaja a un rendimiento del 90%. Cuando la demanda de corriente de los ánodos es menor del 100% de la máxima, la auto-corrosión consume el 10%.

ANODOS DE ALUMINIO

El aluminio es muy similar en su utilización al cinc. Puede instalarse también en los cascos de los buques, aunque la protección que proporciona es de menor cuantía. Ensayando un electrodo de aluminio con el 5,5% de cinc en agua de mar, frente a un electrodo de Ag/AgCl como referencia, se comprobó que su potencial era de -1000 mV. Pero su comportamiento es muy inestable, y han existido experiencias que han desaconsejado su uso.

ANODOS DE MAGNESIO

De los tres materiales anódicos mencionados, este es el de más valor de potencial. Con un electrodo patrón de Ag/AgCl, se obtuvo en agua de mar, un potencial de -1500 mV. Con este elevado potencial, surgen dificultades en su empleo en cuanto a compatibilidades con la pintura. Habrá que disponer sobre el casco en toda la zona próxima a él, un recubrimiento dieléctrico especialmente resistente.

Figura 4: Ánodo de Magnesio

El consumo de estos electrodos trabajando a rendimiento elevado, es de 7,7 Kg/Amp Año; suministran una corriente de 1100 Amp-h/Kg, trabajando al 50%.

Son más adecuados que los de cinc y aluminio para instalaciones en aguas de gran resistividad (superior a los 1000 ohm.cm). Se puede mejorar su rendimiento con la adición del 3% de cinc y el 6% de aluminio.

Otro inconveniente es la mala distribución de corriente que produce, situación que puede ser corregida mediante el uso de pantallas y la regulación del circuito exterior.

FUNCIONAMIENTO DE LA PROTECCIÓN ANTICORROSIVA Y ANTIINCRUSTANTE:

Otro de los problemas existentes, de gran importancia, es la incrustación marina, dadas las innumerables paradas que precisan en el funcionamiento del circuito para limpieza. Todos los sistemas aplicados para combatir la incrustación marina llevan emparejados unos costes de mantenimiento y dedicación, que los hacen poco rentables. Por ello se hace necesaria la incorporación del más avanzado diseño existente en el campo de la ingeniería de anti-incrustación.

Este fenómeno viene originado por la existencia de microorganismos vivos en suspensión en el agua de mar, que buscan un medioambiente adecuado para su desarrollo. Estas zonas son el interior de los circuitos de circulación de agua de mar, adhiriéndose inicialmente en forma de larvas, pero creciendo y desarrollándose hasta el animal adulto. Entre los innumerables inconvenientes creados por la existencia de estos animales se puede citar el taponamiento del "ojo" de las tuberías, variación del coeficiente de transmisión de calor, etc.

El método clásico de eliminar estas adherencias ha consistido en la adición de biocidas al agua de mar en el circuito, con el consiguiente trastorno en el programa de mantenimiento del buque, consumo elevado de energía, amén de los problemas propios de estos métodos.

Actualmente con los nuevos sistemas se reducen los costes de mantenimiento, así como el consumo de energía a valores mínimos. Estos sistemas aseguran una continua protección con escaso mantenimiento y supervisión, y un fácil montaje tanto en nuevas instalaciones como en las existentes.

La corriente de protección necesaria para convertir toda la estructura en cátodo se obtiene mediante la rectificación de la corriente alterna de a bordo. Esta corriente pasa al transformador-rectificador que suministra la corriente continua a los ánodos especialmente aleados. El sistema deposita una fina película de gel en toda la superficie interior del sistema de refrigeración, que crea un revestimiento protector (no aislante térmico) a todo lo largo del sistema. En la práctica, las tuberías aparecen como si su superficie interna hubiera sido pintada. Este revestimiento juntamente con la corriente suministrada, inhibe de forma eficaz la corrosión de los sistemas de circulación de agua salada.

Por otro lado los iones generados mediante la electrolisis, combinados con los iones contenidos en el agua de mar, forman un ambiente adverso para la existencia y

crecimiento de larvas u otros organismos que puedan ser aspirados al interior del circuito, imposibilitando de esta forma la adherencia a estas zonas donde anteriormente crecían y se alimentaban. El sistema transporta estos organismos desde la aspiración a la descarga asegurando que no habrá agua sin tratar en ningún punto del circuito.

Figura 5: Ánodos de Cobre y Hierro en Toma de Mar

Un sistema tipo posee los siguientes elementos:

1. Unidades de control de potencia
2. Ánodos anti-incrustantes
3. Ánodos anti-corrosivos

CONCLUSIONES

Generalmente la formación de las incrustaciones tiene lugar en los momentos en que el buque se encuentra en reposo, ya que durante su marcha, la corriente de agua hará que se desprendan.

Se han llevado a cabo estudios para reducir los posibles efectos de los campos eléctricos y corrientes producidas por la protección catódica, sobre las adherencias en la obra viva de los buques, y se ha podido comprobar que hay una ligera disminución de aquéllas, aunque, desgraciadamente, por su magnitud, no sean de consideración práctica. Sin embargo, no cabe duda de que la formación de la capa alcalina continua, producida por la protección catódica, será siempre beneficiosa en este sentido.

Por todo esto, no puede desecharse, de momento, la protección anti-incrustante por el método clásico de aplicación de materias tóxicas que vayan disolviéndose lentamente en el agua del mar.

Como novedad, cabe destacar que entre los sistemas anti-incrustantes actuales destinados a la protección de la superficie metálica de los circuitos de agua de mar, se utilizan ánodos en combinación. Estos consisten en la colocación en cada toma de mar de un par de electrodos, uno de cobre y otro de aluminio o hierro según sea el caso (ver figura 5). Estos electrodos tienen una masa anódica en peso, calculada de tal forma que puedan estar en servicio hasta la próxima varada del buque (hasta cinco años de duración).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. *Aguilar, E., Corrosión y control de corrosión. URMO SA, 1979*
2. *Cesáreo, F., Manual básico de corrosión para ingenieros. EDITUM, 2004*
3. *Villa Caro, Raúl; Carral L.; Fraguela J.; Novoa P., Estudio de las ventajas de los nuevos sistemas de protección catódica y anticorrosivos instalados en buques de guerra, PONENCIAS: II Congreso Panamericano de Ingeniería Marítima, Portuaria y Naval (CIMYN) y I Congreso de Corrosión. COPINAVAL (Panamá), 2014*
4. *Wilson Walton International. Manual Aquamatic, 2009*
5. *Wilson Walton International. Manual Praicomatic, 2009*