

# CIENCIA & TECNOLOGÍA DE BUQUES

---

## SHIP SCIENCE & TECHNOLOGY

ISSN 1909-8642



**COTECMAR**  
COLOMBIA

Fabián A. Osorio, Antonio J. Bula, Néstor N. Durango

### **Diseño de una hélice supercavitante**

Martha J. Meza, Diana M. Calixto, Lina M. Velosa, Edwin M. Acosta, Mónica Puyana,  
Alfredo Morales, Jorge H. Panqueva

### **Valoración de la efectividad antiincrustante de recubrimientos aplicados a embarcaciones que operan en la Bahía de Cartagena**



Carlos M. Rodríguez, Ricardo Lugo, Juan G. Fajardo, Bienvenido Sarría

### **Diagnóstico energético del sistema de aire acondicionado y refrigeración de un buque tipo nodriza fluvial**

Olga C. Ramírez, Claudia L. Jiménez, Francisco J. Amórtegui, Víctor H. Jiménez

### **Valoración de la protección contra sobretensiones en embarcaciones que navegan por los ríos colombianos: estudio de caso**

Fredy Zárate

### **Camuflaje en las Fuerzas Fluviales Origen del verde Armada**

Año 1 - n.º 1 - vol. 1 - (1-76) julio de 2007

# CIENCIA & TECNOLOGÍA DE BUQUES

Julio de 2007

SHIP SCIENCE & TECHNOLOGY

ISSN 1909-8642

Número 01 Volúmen 01

## COMITÉ EDITORIAL

**Marcos Salas Inzunza, Ph. D.**  
Universidad Austral de Chile

**Juan Manuel Vélez, Ph. D.**  
Universidad Nacional de Colombia

**Jairo Useche, Ph. D.**  
Universidad Tecnológica de Bolívar, Colombia

**Antonio Bula, Ph. D.**  
Universidad del Norte, Colombia

**Juan Antonio Contreras, Ph. D. (c)**  
Escuela Naval Almirante Padilla, Colombia

Cap. de Cor. **Óscar Tascón Muñoz, Ph. D. (c)**  
Cotecmar, Colombia

## EDITOR

Cap. de Navío **Jorge E. Carreño Moreno, Ph. D. (c)**  
Cotecmar, Colombia

## COMITÉ CIENTÍFICO

**Richard Luco Salman, Ph. D.**  
Universidad Austral de Chile

**Carlos Paternina, Ph. D.**  
Universidad del Norte, Colombia

**Francisco Pérez, Ph. D.**  
Universidad Politécnica de Madrid, España

**Bienvenido Sarría, Ph. D.**  
Universidad Tecnológica de Bolívar, Colombia

**Rui Carlos Botter, Ph. D.**  
Universidad de Sao Paulo, Brasil

**Carlos Mario Cano, Msc.**  
Cotecmar, Colombia

Se distribuye nacional e internacionalmente por canje o suscripción.

*Ciencia & Tecnología de Buques* es una publicación especializada en temas relacionados con ingeniería naval, arquitectura naval, ingeniería marina e ingeniería oceánica. La revista publica semestralmente artículos científicos producto de proyectos de investigación de la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial, y de otras instituciones y/o investigadores que constituyan una contribución original al desarrollo en las áreas mencionadas.

Una publicación de

Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo  
de la Industria Naval, Marítima y Fluvial - Cotecmar



Coordinador editorial

Mario Ruiz Barreto

Asesoría editorial y corrección de textos

Lilia Carvajal Ahumada

Diagramación, diseño de portada y páginas

Germán Ortiz Rincón

Mauricio Sarmiento Barreto

Colaboración

Alfredo Morales Torres

Impresión

Publicidad & Marketing, Bogotá, D.C.

# CONTENIDO

## 7 **Diseño de una hélice supercavitante**

Fabián A. Osorio  
Antonio J. Bula  
Néstor N. Durango

## 17 **Valoración de la efectividad antiincrustante de recubrimientos aplicados a embarcaciones que operan en la Bahía de Cartagena**

Martha J. Meza  
Diana M. Calixto  
Lina M. Velosa  
Edwin M. Acosta  
Mónica Puyana  
Alfredo Morales  
Jorge H. Panqueva

## 27 **Diagnóstico energético del sistema de aire acondicionado y refrigeración de un buque tipo nodriza fluvial**

Carlos M. Rodríguez  
Ricardo Lugo  
Juan G. Fajardo  
Bienvenido Sarría

## 43 **Valoración de la protección contra sobretensiones en embarcaciones que navegan por los ríos colombianos: estudio de caso**

Olga C. Ramírez  
Claudia L. Jiménez  
Francisco J. Amórtegui  
Víctor H. Jiménez

## 51 **Camuflaje de las Fuerzas Fluviales** Origen del verde armada

Fredy Zárate

# CONTENT

## 7 **Super-Cavitational Propeller Design**

Fabían A. Osorio  
Antonio J. Bula  
Néstor N. Durango

## 17 **Assessment of the Antifouling Effectiveness of Coatings Applied to Vessels which Operate in the Bay of Cartagena**

Martha J. Meza  
Diana M. Calixto  
Lina M. Velosa  
Edwin M. Acosta  
Mónica Puyana  
Alfredo Morales  
Jorge H. Panqueva

## 27 **Energetic Diagnosis of the Air Conditioning and Refrigeration System of a Riverine Patrol and Supply Ship**

Carlos M. Rodríguez  
Ricardo Lugo  
Juan G. Fajardo  
Bienvenido Sarría

## 43 **Protection Appraisal Against Surges on Vessels that Navigate Through Colombian Rivers: Case Study**

Olga C. Ramírez  
Claudia L. Jiménez  
Francisco J. Amorátegui  
Víctor H. Jiménez

## 51 **Camouflage in the Riverine Forces: Origin of Navy's Green**

Fredy Zárate



# NOTA DEL EDITOR

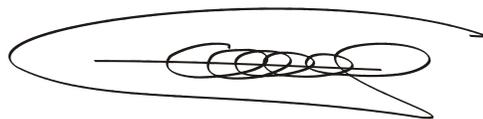
Cartagena de Indias, 21 de julio de 2007

El 21 de julio del año 2000, el Ministerio de Defensa a través de la Armada de la República de Colombia y en asocio con tres universidades del país, inició el sueño Cotecmar, cuyo fin no era otro que el desarrollo de la industria naval, marítima y fluvial de Colombia a través de la generación de conocimiento experto en el campo de la ingeniería naval, o como la denominan los países anglosajones, la arquitectura naval, y en áreas de conocimiento afines como soporte fundamental a la actividad de diseñar, construir, modernizar y reparar buques.

Hoy, siete años más tarde, tengo el honor de presentar a la comunidad científica y académica, así como a quienes forman parte de la industria naval, el volumen uno de la revista *Ciencia & Tecnología de Buques*, editada por Cotecmar para llenar el vacío existente en Colombia en cuanto a publicaciones científicas en esta área. Esperamos obtener en un mediano plazo un reconocimiento internacional, de tal forma que junto con el “Simposio de Diseño e Ingeniería Naval” que anualmente organiza Cotecmar, se constituyan en los medios de divulgación científica y tecnológica más importantes de la región.

Como editor de la revista *Ciencia & Tecnología de Buques*, presento un fraternal agradecimiento a los colegas que han hecho posible esta iniciativa: la Escuela Naval “Almirante Padilla”, alma máter de los ingenieros navales colombianos, la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad Tecnológica de Bolívar y la Universidad del Norte de Barranquilla, que a través de sus directivas e investigadores han participado en los comités científico y editorial e igualmente han presentado artículos originales para evaluación.

Finalmente debo presentar un saludo de reconocimiento a los colaboradores nacionales e internacionales que han participado en la conformación de los comités científico, editorial y los árbitros, como son los amigos de la Universidad Austral de Chile, la Universidad de Sao Paulo Brasil, la Universidad Politécnica de Madrid España, la Universidad de Michigan en Estados Unidos, a la Corporación de Investigación de la Corrosión, CIC, de Colombia y a los miembros de la Dirección de Investigación, Desarrollo e Innovación de Cotecmar por su apoyo, esfuerzo y dedicación a esta iniciativa.



Cap. de Navío Jorge Enrique Carreño Moreno  
Editor *Ciencia & Tecnología de Buques*



# Diseño de una hélice supercavitante

Fabián A. Osorio  
Antonio J. Bula  
Néstor N. Durango

## Resumen

Dada la importancia del aprovechamiento de la energía en equipos de propulsión, los autores diseñaron una hélice de supercavitación siguiendo la propuesta de Kudo et al. (2001) de estimular la cavitación practicando una ranura en el lado de más baja presión de la pala. Para establecer el lugar de la ranura o cavitador y lograr el objetivo previsto, se hicieron simulaciones computacionales de la distribución de la presión en los perfiles hidrodinámicos a lo largo de la pala. Una vez identificada la zona se construyeron dos hélices, una convencional y otra ranurada, para su posterior experimentación, con el objeto de conocer la diferencia en el funcionamiento hidrodinámico de ellas. Las pruebas demostraron que la hélice ranurada presentó un aumento en la eficiencia, y por ende en la velocidad de avance, con un notorio corrimiento de la máxima eficiencia hacia velocidades angulares mayores que la del diseño.

**Palabras clave:** Cavitación, modelación computacional, cavitador.

## Abstract

*For the design of the propeller of super-cavitations, we proceeded according to the proposal developed by Kudo et al. (2001), which was to stimulate the cavitations by making a groove on the side of the blade with the lowest pressure. To establish the location of the groove or cavitator and achieve the predetermined objective, computational simulations were carried out of the pressure distribution in the hydro-dynamic profiles along the blade. Once the zone was identified, two propellers were built, a conventional one and another with grooves for its later testing which would allow us to know the difference in behavior between them. The tests proved that the propeller with grooves presented an increase in efficiency, and therefore, in the thrust speed, with a noticeable shifting of the maximum efficiency towards higher angular velocities than those of the design.*

**Key words:** Cavitation, Computational Shaping, Cavitator.

Fecha de recepción: 26 de marzo de 2007

Fecha de aceptación: 8 de abril de 2007

Los autores pertenecen al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia  
Autor correspondiente: ndurango@uninorte.edu.co

## Introducción

Es necesario disminuir la relación arrastre/impulsión en las hélices con el fin de tener un mejor aprovechamiento de la energía en equipos de propulsión rotatorios de alta velocidad, de gran demanda en embarcaciones militares, comerciales y de transporte de pasajeros. La fuerza de arrastre, que se opone al movimiento de un cuerpo sumergido en un flujo, se debe tanto al gradiente de presión como a las fuerzas viscosas sobre el cuerpo. En cuerpos delgados (como las palas de la hélice), el efecto de las fuerzas viscosas es más grande que el de las fuerzas de presión, pero es posible reducirlo disminuyendo la viscosidad. Para lograrlo, se hace uso específicamente de una técnica de reducción del arrastre que adiciona un elemento generador de cavitación en forma controlada a una hélice construida por métodos convencionales. El vapor producido en la superficie de la pala es de menor viscosidad, con lo cual la hélice puede avanzar más rápido.

Una hélice supercavitante es, entonces, aquella que tiene una alta eficiencia en condiciones de cavitación, lo cual permite a las embarcaciones desplazarse a mayor velocidad o mejorar su desempeño energético (Kudo et al., 2001). La cavitación ocurre cuando la presión en alguna parte de un líquido cae por debajo de la presión de vapor, lo que lleva a la formación de cavidades de vapor (Batchelor, 1976), pero la dinámica de la interfase vapor-líquido es compleja y aún no se ha terminado de entender porque no está bien definida y el flujo cercano a ella es inestable.

En consecuencia podemos decir que una hélice supercavitante es capaz de mantener una cavitación laminar desde el borde de ataque hacia la estela para incrementar la eficiencia mediante la reducción de las fuerzas de arrastre provocadas por los esfuerzos viscosos. Esto es posible gracias al vapor que está en contacto con la pala de la hélice, el cual tiene menor viscosidad (Senocak, 2002). Se busca, con estos diseños, una hélice de impulsión supercavitante, la cual debe cumplir con:

- Obtener una burbuja estable en el lado de baja presión del asa de la hélice.
- Disminuir el arrastre friccional.
- Aumentar la velocidad de desplazamiento y la eficiencia de la hélice.
- Reducir el fenómeno de picadura de la misma.

Esta técnica, además de ser aplicada en una hélice, también ha sido empleada en torpedos (Goel, 2002), en desactivación de minas subacuáticas, cascos de buques (Amromin y Mizine, 2003) y botes utilizados en deportes náuticos, por lo tanto, esta investigación se constituye en un valioso aporte para el desarrollo de la industria marítima y fluvial.

## Crecimiento de una burbuja. Ecuación Rayleigh-Plesset

El crecimiento de una burbuja está gobernado por la siguiente ecuación (Carey, 1992).

$$\frac{p_v(t) - p_L(t)}{\rho_L} = R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4v_L}{R} \cdot \frac{dR}{dt} + \frac{2\sigma}{\rho_L R} \quad (1)$$

La ecuación de Rayleigh-Plesset permite calcular la transferencia de masa del líquido al gas para una ecuación de transporte que gobierna la fracción de líquido contenida en un fenómeno de cambio de fase (Berntsen, 2001), donde  $R$  es el radio de la burbuja de vapor,  $v_L$  y  $\sigma$  la viscosidad cinemática del líquido y tensión superficial respectivamente (Senocak, 2002).

## Modelos de cavitación

Para la solución de flujos en los que están involucrados cambios de fase como es la cavitación, se han usado las ecuaciones de Navier-Stokes con modelos basados en una ecuación de transporte que dan información de las fronteras de la cavidad. Entre los modelos de cavitación están los empíricos: Singhal, et al., Merkle, et al., Ahuja, et al.; Kunz, et al., y Singhal, et al. (Senocak, 2002). También hay derivaciones de modelos de ecuación dinámico interfacial basados en una ecuación de transporte como se presenta a continuación (Senocak, 2002).

$$\partial \alpha_L + \nabla \cdot (\alpha_L \cdot \vec{u}) = \frac{\rho_L \text{MIN}(P_L - P_V) \cdot \alpha_L}{\rho_V \cdot (V_V^n - V_I^n)^2 \cdot (\rho_L - \rho_V) \cdot t_\infty} + \frac{\text{MAX}(P_L - P_V, 0) \cdot (1 - \alpha_L)}{(V_V^n - V_I^n)^2 \cdot (\rho_L - \rho_V) \cdot t_\infty} \quad (2)$$

El lado derecho de esta ecuación informa de la relación de generación de la fracción de líquido ( $\alpha_L$ ) donde  $V_I^n$  es la velocidad normal de la interfase,

$V_v^n$  es la del vapor,  $P_v$  y  $\rho_v$ ,  $P_L$  y  $\rho_L$  son las presiones y densidades de la fase de vapor y de líquido respectivamente, y  $t_\infty$ , es un tiempo característico. El primer término del lado derecho de la ecuación es responsable de la evaporación y el segundo de la condensación (Senocak, 2002).

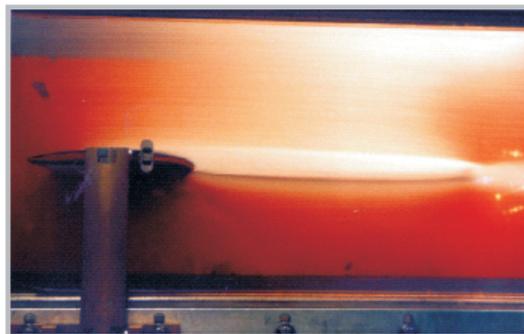
### Cavitación estable

La supercavitación es un tipo de cavitación laminar también conocida como una cavidad fija, adherida o cavitación de bolsillo, la cual es estable, casi constante. El fenómeno es mostrado en el Gráfico 1A.

Gráfico 1: Visualización de la cavitación



A. Parcial



B. Supercavitación

Fuente: Kinna (1996).

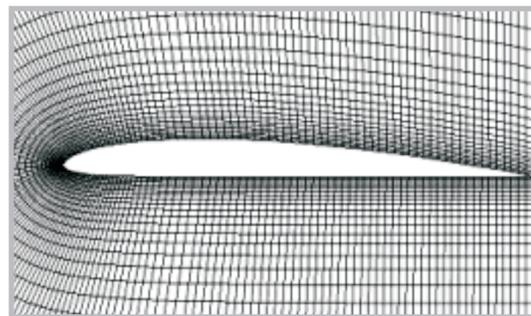
La interfase líquido-vapor puede ser suave y transparente y se hace ondulada y desaparece cerca a la región de cierre de la cavidad. Corriente abajo, hay *eddies* de escala grande dominados por grupos de burbujas. Sin embargo la supercavitación se presenta cuando la cavitación laminar crece de manera que envuelve el cuerpo sólido. Se puede usar ventilación para crear o fortalecer la supercavitación, la cual es deseable para llevar a cabo reducción del arrastre viscoso bajo el agua operando a alta velocidad (Senocak, 2002).

Para que la supercavitación sea estable en la hélice (Kudo et al., 2001), se usó un cavitador ranurado en forma de “V” colocado a lo largo de la pala de la hélice, donde comienza el desprendimiento de la capa límite. Para ubicar con precisión la ranura en la hélice, se simuló por separado el flujo en cada uno de los perfiles que conforman la pala, obteniéndose la distribución de presiones sobre este, en busca del punto de inflexión (MIN) cerca del borde de ataque donde se posicionará la ranura para todos los perfiles que forman la pala.

### Modelo computacional

Se observa en el Gráfico 2 un mallado ortogonal con 14245 nodos y 13950 celdas. Todos los bordes del dominio tienen condición de frontera de velocidad 50m/s, menos la posterior y la superficie del perfil que tienen como condición de borde presión de referencia (101.325 kPa) y no deslizamiento respectivamente. Se escogió un modelo isotérmico turbulento  $\kappa$ - $\epsilon$ , para las ecuaciones de gobierno, de una sola fase. Este modelo fue desarrollado mediante el paquete computacional Fluent 6.0 por Fluent Inc.

Gráfico 2: Malla tipo capa límite



Celdas 13950, nodos 14245.

Fuente: Resultado de la investigación.

El Gráfico 3 muestra la distribución del coeficiente de presión ( $C_p$ ) para diferentes ángulos de ataque del perfil Gottingen 622 con la cual se generó la pala de la hélice o propela. Los coeficientes de presión son iguales para cualquier longitud de cuerda manteniendo los mismos ángulos de ataque cuando el número de Reynolds es  $> 4.105$ , con lo cual los perfiles no dependen de este número (Fuchslocher, 1964).

Se llevaron a cabo las simulaciones con una velocidad relativa al perfil de 50 m/s, longitud de cuerda 1 m, con sus respectivos ángulos de ataque,

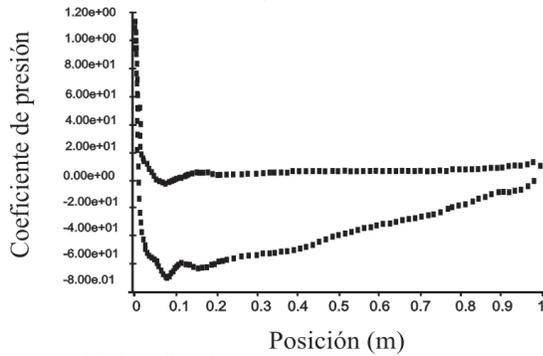
con lo cual se aseguró que en la simulación el perfil tuviera un número de Reynolds superior al crítico y la distribución del coeficiente de presión del perfil concordara con la de los perfiles seleccionados para el diseño de la hélice.

Los resultados arrojados por los modelos numéricos muestran que el coeficiente de presión más bajo está alrededor de  $-0.75$ , cerca de la posición 10% de la cuerda, debido a la poca diferencia entre los ángulos de ataque de los perfiles ubicados entre los radios 35 mm y 50 mm, lo cual no provoca mucha

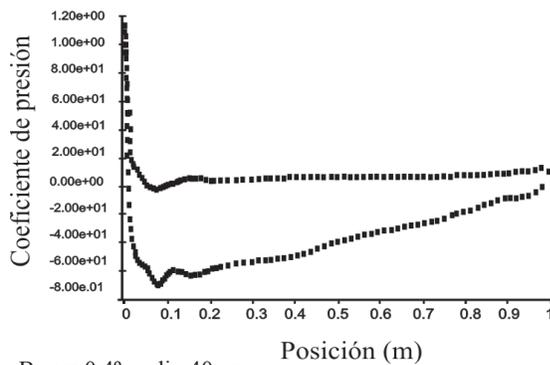
diferencia en la forma de los flujos de cada perfil y de la distribución de presiones.

Este modelo de distribución del coeficiente de presión sobre el perfil fue validado cualitativamente con otros modelos de perfiles en la literatura (Houghton. et al., 1960 ; Anderson, 1984). Con el fin de garantizar que la solución sea independiente del tamaño de la malla, se analizaron resultados del coeficiente de presión para diferentes mallados. El número de nodos mínimo usado fue 14245 para el análisis numérico.

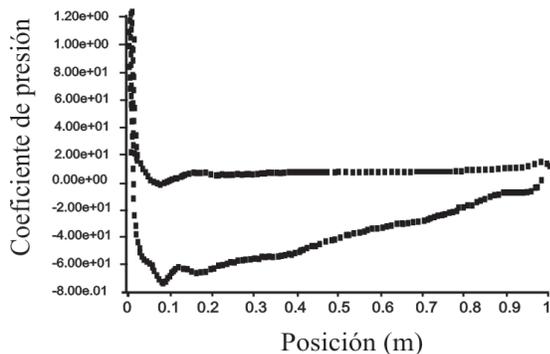
**Gráfico 3. Distribución del Cp para el Goe 622. Longitud de cuerda = 1m,  $V_{\infty} = 50$  m/s.  $Re = 58.2 \cdot 10^5$**



A.  $\alpha = 0.35^\circ$ , radio 50mm



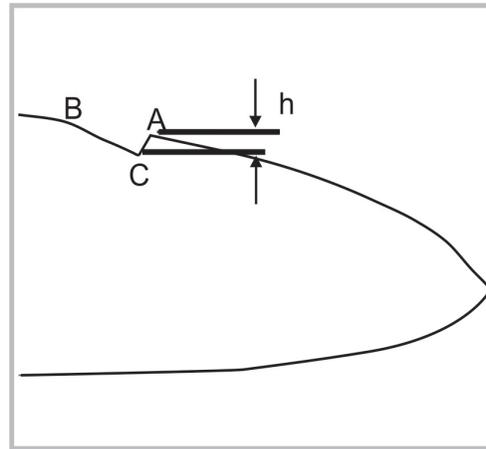
B.  $\alpha = 0.4^\circ$ , radio 40mm



C.  $\alpha = 0.5^\circ$ , radio 35mm

Fuente: Resultado de la investigación.

**Gráfico 4. Ranuras, detalles y hélices**



A. Ranura en V del perfil Gottingen 622.



B. Detalle de la ranura.



C. Hélices con y sin ranura. Construidas mediante prototipado rápido con tecnología FDM (*Fused Deposition Modeling*) y recubiertas con una masilla plástica de poliéster.

Fuente: *Archivo de los autores.*

### Construcción de la hélice ranurada

El diseño de la ranura contempló la propuesta hecha por Kudo et al. (2001), donde se usó 2 mm de profundidad para la ranura a lo largo de la pala. En el proyecto se le asignó esta profundidad a la sección más grande de la pala de la hélice y para el resto de las secciones, la profundidad se hizo proporcional al tamaño de la cuerda del perfil. Se mantuvo la especificación de que el borde de ataque de la ranura (punto A, Gráfico 4) formara aproximadamente ángulo recto con la superficie del perfil, mientras que el borde de fuga (punto B, Gráfico 4) se une suavemente con la superficie del mismo.

### Resultados experimentales y análisis

Las hélices con y sin ranura se probaron experimentalmente en un banco de pruebas como el que se muestra en el Gráfico 5. En este experimento se midieron la corriente y el voltaje suministrados al motor DC para conocer la potencia de entrada (consumida), la cabeza estática con sensores de presión y caudal con el tubo de Pitot para determinar la potencia de trabajo. Con estos datos recolectados se halló la eficiencia global para cada una de las hélices a distintas velocidades de giro y se desarrollaron ecuaciones de regresión.

La eficiencia fue calculada de la siguiente forma:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} \quad (3)$$

$$\text{Potencia de salida} = \text{voltaje} \times \text{corriente}$$

$$\text{Potencia de entrada} = \text{caudal} \times \Delta p_{\text{Hélice}}$$

$$\text{Caudal} = \cos(45^\circ) \cdot \sqrt{\frac{2g\Delta P_{\text{pitot}}}{\gamma}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{Hélice}}^2 - d_{\text{Hélice}}^2)$$

$\Delta p_{\text{Hélice}}$  es igual a incremento de presión producida por la hélice, medida a través de los agujeros 1 y 3 de los tubos de Pitot colocados arriba y abajo de la hélice (Gráfico 6). El caudal se determina a partir de la diferencia entre la presión total y la presión estática en los agujeros 1 y 2 del Pitot. En el cálculo del caudal se tiene en cuenta el ángulo de  $45^\circ$  formado por la dirección del vector velocidad absoluta del flujo con el vector área, correspondiente a la dirección axial de la hélice.

Gráfico 5: Fotografías del banco de pruebas



En la fotografía aparecen fuente trifásica (220V, 5.4) motor DC, trípode y tanque.

Fuente: *Archivo de los autores.*

Una vez desarrollados los experimentos y de haber llevado a cabo un proceso estadístico para garantizar que los datos resultantes fueran reales, se obtuvieron las regresiones de eficiencia para cada una de ellas:

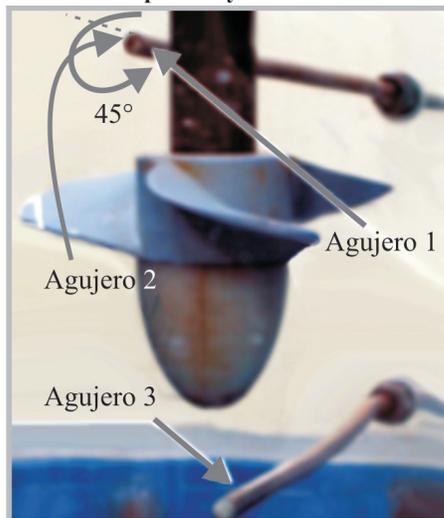
Para la hélice sin ranura:

$$\eta = (-1,4 + 5,1 \times 10^{-3} \omega - 7,5 \times 10^{-7} \omega^2)^2 \quad (4)$$

Para la hélice con ranura:

$$\eta = (-5,9 + 1,1 \times 10^{-2} \omega - 3,1 \times 10^{-6} \omega^2 + 3,0 \times 10^{-10} \omega^3)^2 \quad (5)$$

**Gráfico 6: Tubos de Pitot para medir el incremento de presión y caudal**



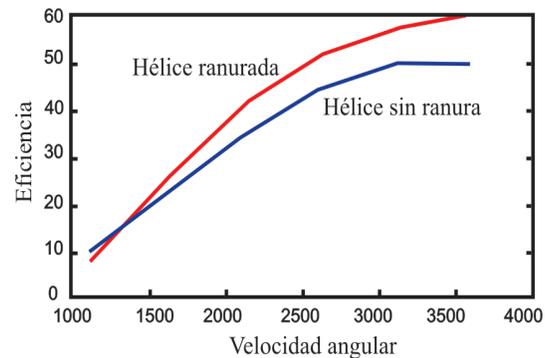
Fuente: Archivo de los autores.

El Gráfico 7 muestra que mientras la hélice sin ranura alcanza su máxima eficiencia cerca a la velocidad de diseño, 3600 rpm (pendiente igual a cero), la hélice con ranura presenta un funcionamiento creciente de la eficiencia y mayor a la de la hélice sin ranura a la misma velocidad.

El Gráfico 8 muestra la hélice sin ranura en funcionamiento. Se observa que no hay signos de cavitación, solo algunos burbujeos a velocidades superiores a 2600 rpm propios del ingreso de aire por el vórtice superior en el tanque de pruebas.

El Gráfico 9 muestra la hélice con ranura en operación, la cual presenta una estela helicoidal de vapor o cavitación provocada por la ranura hecha en la hélice, estimulando la cavitación. Este vapor se produce localmente cerca al extremo de la pala

**Gráfico 7. Ecuaciones de regresión eficiencia-velocidad angular para las hélices con y sin ranura**



Fuente: Resultado de la investigación.

**Gráfico 8. Imágenes de la hélice sin cavitador a velocidad angular de 3100 rpm**



Fuente: Archivo de los autores.

y alejándose de la hélice en forma helicoidal como muestra en el Gráfico 9C. El fenómeno provoca una reducción en el arrastre debido a que el fluido en contacto con la superficie (vapor) es de menor viscosidad; esto se traduce en una disminución de los esfuerzos cortantes. Sin embargo, las imágenes tomadas a la hélice ranurada no muestran una clara presencia de cavitación distribuida a lo largo de la ranura, ni extendida a través de las palas de la hélice. Por lo tanto, no se puede asegurar que la hélice ranurada sea supercavitante, por no tener una evidencia completa de alta eficiencia y supercavitación simultáneas. No obstante, el Gráfico 7 muestra que la hélice con ranura presenta una mayor eficiencia. Esto se puede explicar a partir de la disminución de los esfuerzos de corte.

**Gráfico 9. Imágenes de la hélice con cavitador a 3100 rpm.  
Estela helicoidal de vapor en las tres imágenes**

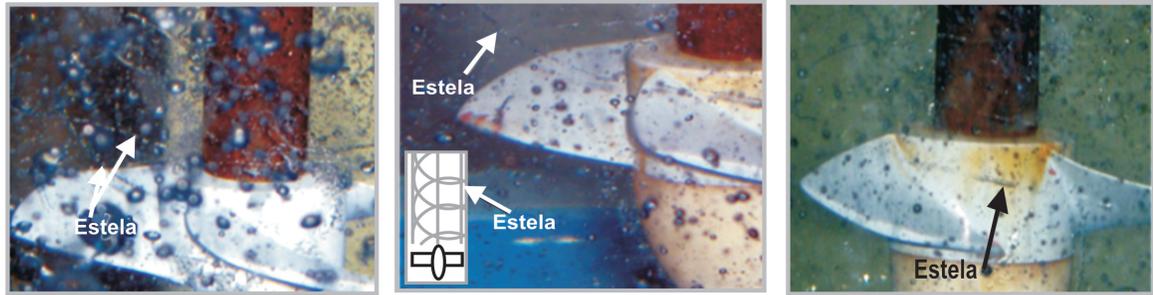


Gráfico 9A.

Gráfico 9B.

Gráfico 9C.

Fuente: Archivo de los autores.

Cuando un flujo cruza un cuerpo, aparece una distribución de presión y esfuerzos cortantes produciéndose fuerzas resultantes sobre este cuerpo. El arrastre debido a la presión es una fuerza en la dirección del flujo principal, la cual es la sumatoria de las fuerzas de presión frontal y posterior sobre el cuerpo en la dirección del flujo. Cuando hay separación de capa límite en el área posterior del cuerpo, la presión en esta zona es menor comparada con un flujo adherido, aumentándose así la fuerza de arrastre. En un flujo turbulento las capas de fluido se mezclan, reenergizando las que están pegadas a la superficie, lo cual hace que el flujo no se separe tan tempranamente (como si sucede en un flujo laminar) y que la presión en el área posterior aumente, con lo cual se reduce el arrastre. Con frecuencia se han usado técnicas para transformar el flujo laminar en turbulento para reducir el arrastre debido a las fuerzas de presión, como generar rugosidades cerca del borde de ataque o también hoyuelos en la superficie de una bola de golf. (Houghton y Carpenter, 2003, Anderson, 1984 y Somers, 2005). Es posible que la ranura haga las veces de hoyuelo como en la bola de golf e incremente el flujo turbulento, con lo cual se disminuye la fuerza de arrastre y aumente la eficiencia de la hélice.

**Inestabilidades del experimento**

Las pruebas de funcionamiento de las hélices se hicieron en un tanque con visores de acrílico como se muestra en el Gráfico 5. El flujo en el tanque es distinto al supuesto de un flujo de entrada a la hélice ordenado y diseccionado. Esto causa modificaciones en el ángulo de ataque entre el flujo y la pala llevando a una disminución en la eficiencia de la hélice distinta a la de diseño. La cavitación es sensible a estas inestabilidades extrínsecas, lo cual provoca que la hélice tenga fluctuaciones en la

**Gráfico 10. Flujo caótico en el tanque del banco de pruebas.**

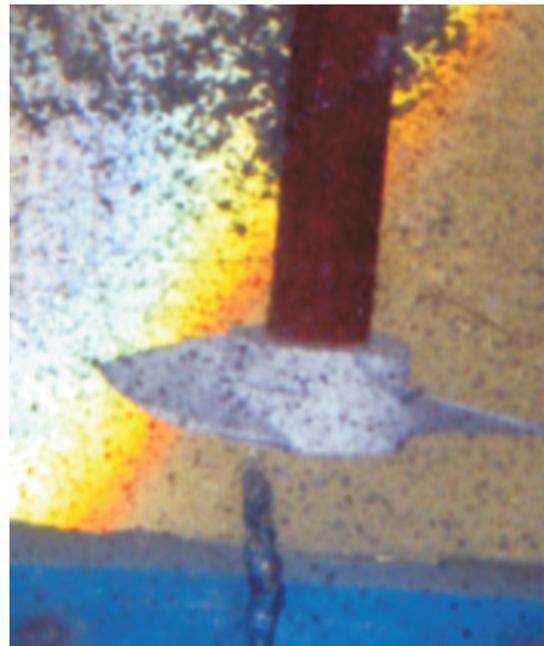


Gráfico 10A.

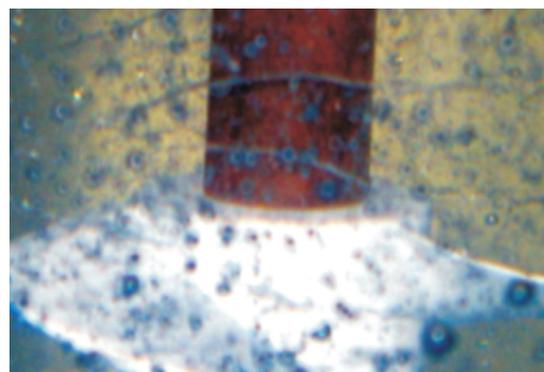


Gráfico 10B.

Fuente: Archivo de los autores.

potencia y en la eficiencia. El Gráfico 10A muestra grupos de burbujas de aire que entran por el vórtice superior en el tanque.

## Conclusiones

A pesar de que el diseño se hizo para obtener supercavitación de manera intencional, la cavitación observada no se pudo estabilizar. El proceso metodológico se basó en la fabricación de un modelo computacional de una sola fase, con el fin de determinar así la distribución de presiones sobre las secciones del álabe, identificándose de este modo los puntos de mínima presión donde entallar el cavitador.

El modelo experimental muestra que la ranura permite un importante aumento en la eficiencia (y por ende en la velocidad de avance de la hélice), con un notorio corrimiento hacia velocidades angulares mayores que la del diseño. El aumento de la eficiencia es signo de un mejor aprovechamiento de la energía por la reducción en el arrastre para cada una de las secciones de álabe, reflejándose en una disminución de la potencia suministrada comparada con la potencia de trabajo.

Basado en los resultados y análisis, hay una reducción en el arrastre por fuerzas de presión al retardar el desprendimiento de la capa límite por la turbulencia inducida.

El uso de un tanque para las pruebas afecta notoriamente la eficiencia de las hélices (siendo distinta la potencia de diseño a la tomada experimentalmente), esto se debe a la recirculación del flujo, los efectos de frontera de las paredes del

recipiente, del vórtice superior, y a las pérdidas en el motor y el rodamiento.

No se observó fenómeno de picadura en las hélices durante las más de 40 horas en las que se llevaron a cabo las pruebas.

## Recomendaciones

Para futuros trabajos se recomienda la construcción de un modelo computacional que incluya la interacción en la interfase líquido-vapor para verificar la efectividad de la cavitación como un fenómeno favorable en la eficiencia de las hélices.

Igualmente se recomienda estudiar computacional y experimentalmente la cavitación en 2D sobre láminas y perfiles, para obtención de modelos empíricos que expliquen el funcionamiento de la cavitación en distintas condiciones de flujo.

Por otra parte, sería interesante realizar la experiencia en túnel de cavitación para que los efectos de frontera no interaccionen fuertemente con la cavitación y la vuelvan inestable.

De la misma manera se recomienda construir una hélice de mayor tamaño para que la cavitación se inicie con altas velocidades periféricas a velocidades angulares bajas. Esto permite también tener una descripción completa de la curva eficiencia-velocidad angular de las hélices.

Finalmente será interesante implementar otras técnicas de observación de flujos para una mejor caracterización de la cavitación como el estroboscopio, la iluminación, y el contraste.

## Referencias

- Amromin, E. y Mizine, I. (2003, 1-4 de noviembre). "Partial Cavitation as Drag Reduction. Technique and Problem of Active Flow Control". CAV2003, [simposio] Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka.
- Anderson, J. (1984) *Fundamentals of Aerodynamics*, New York, McGraw-Hill, pp. 247 – 314.
- Batchelor, G. K. (2001) *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge, (s. e.), pp. 55, 481-506.
- Berntsen, G., (2001 20-23 de junio). "Numerical Modeling of Sheet and Tip Vortex Cavitation With Fluent 5". CAV 2001, [simposio] Fourth International Symposium on Cavitation, Pasadena.
- Carey, V. P., (1992). *Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena*, Bristol, Taylor & Francis, pp. 35, cap. 2.
- Fuchslocher, S. (1964) *Bombas*. Madrid, Labor S. A., pp. 89 – 112.

- Kinnas, S. (s. d.) "Photographs of Different Types of Cavitation", [en línea], disponible en: <http://cavity.ce.utexas.edu/kinnas/cavphotos.html>, recuperado el 4 de octubre de 2005.
- Kudo, T., Ukon, Y., y Sumino, Y. (2001, 20-23 de junio) "Proposal of a Groove Cavitator on a Supercavitation Propeller", [simposio] Fourth International Symposium on Cavitation, CAV 2001, Pasadena.
- Goel, A. (2002) *Control Strategies for Supercavitating Vehicles*, [tesis de maestría], Florida, University of Florida, Mechanical and Aerospace Engineering Department.
- Houghton, E., Carpenter, P., (2003) *Aerodynamics for Engineering Students*, Oxford, Butterworth-Heinemann, pp. 200-209.
- Senocak, I., (2002, s. d.). "Computational Methodology for the Simulation of Turbulent Cavitating Flows". [conferencia], University of Florida, Florida.
- Somers, D. M. (2005) "Effects of Airfoil Thickness and Maximum Lift Coefficient on Roughness Sensitivity". Contrato DE-AC36-99-GO 10337. National Renewable Energy Laboratory, Pennsylvania State University.



# Valoración de la efectividad antiincrustante de recubrimientos aplicados a embarcaciones que operan en la Bahía de Cartagena

Martha J. Meza<sup>a</sup>  
Diana M. Calixto<sup>a</sup>  
Lina M. Velosa<sup>a</sup>  
Edwin M. Acosta<sup>a</sup>  
Mónica Puyana<sup>a,c</sup>  
José Alfredo Morales<sup>b</sup>  
Jorge H. Panqueva<sup>a</sup>

## Resumen

En este estudio se desarrolló una metodología para evaluar el desempeño, según la eficiencia antiincrustante y anticorrosiva, de seis sistemas *antifouling* comerciales en las plantas industriales de Mamonal y Bocagrande en la Bahía de Cartagena. El desempeño general de los recubrimientos fue determinado mediante la calificación de la resistencia al *biofouling* y la integridad del *antifouling* y de la película anticorrosiva. Adicionalmente se realizó un seguimiento de los parámetros microbiológicos y fisicoquímicos del medio marino en el área de exposición, según los cuales las dos zonas de estudio presentaron condiciones favorables para el desarrollo de los organismos con elevados porcentajes de cobertura de *fouling* sobre cupones control. En la Planta de Mamonal, los sistemas mostraron una mejor eficiencia antiincrustante respecto a la de Bocagrande. De acuerdo con el tipo de recubrimiento, el autopulimentable presentó un mejor desempeño frente a recubrimientos tipo matriz soluble e insoluble.

**Palabras clave:** Bioincrustación, recubrimiento antiincrustante, biocida, desempeño general del recubrimiento.

## Abstract

*A method to evaluate the performance was developed in this study, according to the antifouling and anticorrosive efficiency, of 6 commercial antifouling systems in the plants of Mamonal and Bocagrande in the Bay of Cartagena. The general performance of the coatings was determined through the qualification of the resistance to the biofouling and the integrity of the antifouling and of the anticorrosive film. Additionally, a follow-up of the microbiologic and photochemical parameters were carried out of the marine media in the area of exposition, according to which both zones of study presented favorable conditions for the development of organisms with high percentages of fouling coating on control coupons. In the Plant of Mamonal, the systems showed a better antifouling efficiency regarding the Plant of Bocagrande. According to the type of coating, the auto-polishing presented a better performance compared to the soluble and insoluble type matrix coating.*

**Key words:** Bioincrustation, Antifouling Coating, Biocide, General Performance of Coating, Biofouling.

Fecha de recepción: 1 de septiembre de 2006

Fecha de aceptación: 17 de mayo de 2007

<sup>a</sup>Corporación para la Investigación de la Corrosión -CIC-. Piedecuesta (Santander), Colombia. corincor@telecom.com.co.

<sup>b</sup>Cotecmar.

<sup>c</sup>Universidad Jorge Tadeo Lozano. Facultad de Ciencias Naturales.

Autor correspondiente: monica.puyana@utadeo.edu.co

Los autores agradecen al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Armada Nacional de Colombia -Cioh-, y al personal de Cotecmar por su colaboración en el desarrollo de las actividades de monitoreo. Al ingeniero Alfredo Morales Torres y al doctor Gabriel Barrero por la gestión realizada para el establecimiento del convenio de cooperación científica y tecnológica con la CIC.

El Sena en el marco del programa de Fortalecimiento de Centros de Desarrollo Tecnológico aportó recursos económicos para la cofinanciación de este proyecto.

## Introducción

Una de las principales problemáticas que afectan la industria naval es la presencia de bioincrustaciones (*biofouling*), en la obra viva de las embarcaciones, fenómeno que produce efectos adversos bastante conocidos como un aumento en el consumo de combustible (hasta 40%) por la alta resistencia de fricción del *biofouling* adherido; un incremento en la frecuencia de entrada a dique seco, y a la vez, introducción de especies en ecosistemas donde no estaban presentes naturalmente (Yebra, Kiil y Dam-Johansen, 2004).

La formación de la bioincrustación está acompañada por una compleja interacción de fenómenos físicos, químicos y biológicos, que inicia cuando un sustrato duro es inmerso en el medio marino. El proceso comienza con la adhesión de un componente molecular (compuestos orgánicos e inorgánicos), seguido por el establecimiento de *microfouling* (algas unicelulares y bacterias), el cual coloniza la superficie y se consolida mediante la producción de un material polimérico extracelular (MPE) (Cassé, Swain, 2006). Esta colonización primaria, facilita la fijación y desarrollo de algas y larvas de invertebrados y la incorporación final del *macrofouling* (Clare, Rittschof, Gerhart, Maki, 1992; Davis, Targett, McConnell, Young, 1989; y Wahl, 1989).

Frente a este fenómeno se han desarrollado una gran variedad de esquemas de recubrimientos *antifouling* que incluyen dentro de sus matrices agentes *biocidas*. Sin embargo, regulaciones promovidas por la Organización Marítima Internacional -OMI-, han prohibido algunos como el TBT (Tributilestano), por los efectos adversos que producen al ambiente (IMO, 2003). En la actualidad, el principal tipo de recubrimiento empleado por la industria marítima son los antiincrustantes a base de cobre, efectivos contra algas y organismos incrustantes calcáreos como los barnáculos, que presentan un efecto menos tóxico que el TBT (Callow y Callow, 2002).

Con el fin de optimizar el proceso de selección de pinturas y asegurar el mejor desempeño de los esquemas de recubrimientos, se desarrolló una metodología de exposición en las condiciones que ofrece la Bahía de Cartagena en dos puntos; las plantas industriales de Mamonal y Bocagrande. El estudio incluyó la comparación de la eficiencia antiincrustante de seis productos comerciales *antifouling*, la evaluación de las bioincrustaciones

adheridas a cupones de evaluación y control, así como la caracterización fisicoquímica y microbiológica del medio marino natural donde fue realizada la exposición.

## Metodología

### Recubrimientos antiincrustantes evaluados

En este estudio se evaluaron seis recubrimientos antiincrustantes provenientes de compañías nacionales e internacionales, cuya principal característica fue la ausencia de Tributilestano (TBT) en su formulación. Todos los productos seleccionados presentaron compuestos de cobre como ingrediente activo principal (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Sistemas de recubrimiento *antifouling* evaluados <sup>1/</sup>**

Sistema	Tipo de recubrimiento
A1	Antiincrustante vinílico tipo autopulimentable
H1	Antiincrustante tipo autopulimentable con un refuerzo de fibra inorgánica
P1	Antiincrustante vinílico de matriz insoluble
P2	Antiincrustante de matriz en un vehículo especial
G1	Antiincrustante tipo autopulimentable con <i>cobiocidas</i> orgánicos adicionales
S1	Antiincrustante vinílico tipo autopulimentable

<sup>1/</sup> Ingrediente activo principal óxido de cobre.

### Exposición estacionaria de cupones

Se fabricaron cupones de evaluación de 300 x 250 x 4,76 mm en acero naval ASTM A131 Grado A, doblados a 90° y con preparación de superficie *Sand Blasting* o *Wet Sandblasting*. Estos cupones fueron tratados con los sistemas de recubrimientos *antifouling* seleccionados, que en general incluían un imprimante, una o dos barreras intermedias y una capa de acabado como

antiincrustante. Adicionalmente, se incluyeron cupones control con las mismas características de fabricación y preparación de los cupones de evaluación exceptuando la aplicación de una capa antiincrustante.

Para la exposición de los cupones en el medio marino, Cotecmar diseñó y fabricó cuatro boyas y un conjunto de *racks* en fibra de vidrio para la exposición y sujeción de los cupones (Gráfico 1). Cada boya permitía la exposición de tres sistemas de recubrimientos.

**Gráfico 1. Sistema de exposición de cupones de evaluación y control**



A. Disposición y sujeción de los cupones a los racks.



B. Inmersión final de los cupones en el medio marino natural.

Fuente: *Resultados de la investigación.*

Se realizó el seguimiento a doce cupones de evaluación (seis originales y seis réplicas) y seis cupones control por sistema de recubrimiento. Dos boyas fueron ubicadas en la Zona Cinco Sur de la Planta Industrial de Mamonal y dos en la zona aledaña al helipuerto en la Planta Industrial de Bocagrande. Los sistemas de recubrimiento fueron sumergidos en mayo de 2004 y sometidos al medio marino de forma continua durante 18 meses con controles trimestrales. En cada monitoreo se retiró un cupón de evaluación, una réplica, un cupón

control y se procedió a la evaluación de superficie de los mismos y las características fisicoquímicas y microbiológicas del medio marino.

### **Características fisicoquímicas y microbiológicas del medio marino**

Para la caracterización fisicoquímica y microbiológica del medio marino circundante a los cupones, se recolectaron muestras de agua en los dos puntos extremos de las boyas a profundidades de 0,2 y 2 metros para cada una de las plantas industriales. Se hicieron siete controles: el primero antes de la exposición de los cupones (enero de 2004), el segundo simultaneo a la inmersión (mayo de 2004) y los posteriores durante los monitoreos de los cupones.

Las muestras para análisis microbiológico fueron recolectadas en frascos de vidrio estériles vacíos con capacidad de 100 ml. El transporte de las muestras se realizó a 4 °C y su procesamiento antes de 48 horas luego de recolectadas en campo. La evaluación de la carga microbiana del medio marino consideró cuatro grupos bacterianos determinados por la técnica de Extinción por Dilución Seriada (EDS): bacterias aerobias totales (BAT), bacterias anaerobias totales (BAnT), bacterias productoras de ácido (BPA) y bacterias sulfato reductoras (BSR). La incubación de las muestras se realizó a 32°C de acuerdo con la temperatura promedio de la zona de exposición.

Los parámetros fisicoquímicos de pH, temperatura (°C) y oxígeno disuelto (OD) fueron medidos in situ. Adicionalmente se recolectaron muestras de agua en frascos de vidrio herméticos con capacidad de 500 y 1000 ml para la determinación en laboratorio de demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), alcalinidad total (AT), cloruros (Cl), sulfatos (SO<sub>2</sub>=), hierro total (HT), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT) y sólidos disueltos volátiles totales (SDVT).

### **Caracterización**

El seguimiento a la formación de *fouling* se realizó para los cupones control y fue establecido mediante la determinación del porcentaje de cobertura y la biomasa por peso seco. Posteriormente, se cuantificó la cobertura de cada una de las especies o taxa incrustante. Los organismos errantes y móviles (cangrejos, policládidos etc.), o bien organismos sésiles no clonales (anémonas), se cuantificaron

en total para el cupón. Para la identificación se guardaron muestras tipo (*vouchers*), fijadas en una solución formalina-agua de mar (dilución 1:4) y por último almacenadas en etanol (96%). Los organismos bioincrustantes fueron identificados con la ayuda de claves taxonómicas específicas para cada grupo.

### **Evaluación de los sistemas de recubrimiento antiincrustantes**

El desempeño de los recubrimientos se estableció mediante la calificación de la resistencia al *fouling*, la integridad del *antifouling* y de la película anticorrosiva de acuerdo con la norma ASTM D 3623-78a (2004). Esta calificación fue registrada en una tabla que contenía la codificación del cupón, fecha, seguido por tres columnas con la calificación de la resistencia al *fouling* (RF), película de *anfifouling* (PAF), película anticorrosiva (PAC) y una columna final con el resultado del desempeño general del recubrimiento (DGR).

*Resistencia al fouling* (RF). La valoración del *fouling* en los cupones de evaluación se determinó por el porcentaje de cobertura en cada una de las caras del cupón usando una cuadrícula guía, en un área de 279,85 cm<sup>2</sup> que excluía una franja de 2,5 cm. en cada lado del cupón para evitar efectos de borde. La calificación se realizó de la siguiente forma: para los cupones libres de *fouling* exceptuando la presencia de esporas de algas y otros *biofilms* biológicos, se otorgó una calificación de 100; se disminuyó la calificación a 95 si presentaba solo un *fouling* incipiente; finalmente, si especies de *fouling* maduras estaban presentes, el valor de la calificación se obtuvo por sustracción de la sumatoria del número de individuos adheridos y el porcentaje de superficie cubierto por formas coloniales.

*Condición física del recubrimiento*. En este punto se evaluó la integridad de la película de *antifouling* (PAF) y la anticorrosiva (PAC). Si la película no presentaba ningún defecto físico se calificaba con un valor de 100. Para obtener la calificación de los imperfectos de cada película, se sustrajo de 100 el porcentaje de superficie afectada por defectos tales como decoloración, cuarteamiento, oxidación y ampolamiento.

*Desempeño general del recubrimiento* (DGR). El establecimiento del desempeño general del recubrimiento se realizó seleccionando la calificación más baja de los tres valores precedentes (RF, PAF y PAC).

## **Resultados y discusión**

### **Evaluación de las características fisicoquímicas y microbiológicas del medio marino**

La determinación de bacterias aerobias totales y anaerobias totales permite abarcar un grupo heterogéneo de microorganismos con diversas características fisiológicas, estableciendo la carga microbiana total aislable del medio marino (Schut, et al. 1993). Estos grupos poblacionales presentaron variaciones en el tiempo en las dos plantas industriales, alcanzando picos máximos durante el segundo y quinto monitoreo correspondientes a los meses de mayo de 2004 y marzo de 2005 respectivamente. No se evidenciaron diferencias significativas entre los títulos poblacionales de los grupos cuando se compararon los valores a las dos profundidades establecidas.

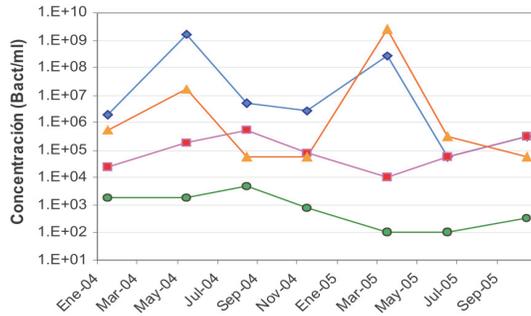
Los valores encontrados tanto de BAT como de BAnT fueron superiores a 106 Bact/mL (Gráfico 2), lo cual evidenció que las condiciones del medio marino de las plantas industriales de Mamonal y Bocagrande podrían favorecer un apropiado crecimiento de los microorganismos y, eventualmente, el desarrollo de un proceso de *fouling* sobre superficies sumergidas. Lo anterior está basado en los reportes de la literatura, donde se establece que cultivos microbianos con concentraciones de alrededor de 1g/l o de 10<sup>4</sup> a 10<sup>6</sup> bact/ml son indicativos de que las condiciones microambientales permiten la continua regeneración y activación metabólica de una población microbiana (Little, Ray y Pope, 2000).

Las BPA y BSR son consideradas como los agentes responsables de una gran parte de los procesos corrosivos de influencia microbiológica (Pope, 1992). Según estudios realizados en el área de la biocorrosión y en proyectos ejecutados por la Corporación para la Investigación de la Corrosión (2003), el hallazgo de este tipo de microorganismos en un nivel mayor de 1021 Bact/mL; se considera como corrosivo desde el punto de vista microbiológico.

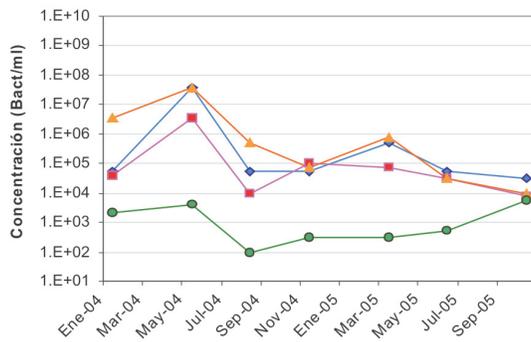
Adicionalmente, es importante considerar que los productos metabólicos de las BSR y BPA pueden ejercer un efecto nocivo sobre la estructura del recubrimiento cuando son expuestos durante periodos prolongados, produciendo en última instancia el deterioro de la estructura metálica. Sin embargo, durante la inspección realizada a los cupones de exposición evaluados no se hallaron evidencias de

picadura que estuvieran relacionadas con procesos de biocorrosión, debido a la protección que brinda el recubrimiento.

**Gráfico 2. Concentración bacteriana (enero 2004 - septiembre 2005)**



A. Planta Industrial de Mamonal



B. Planta Industrial de Bocagrande

◆ BAT    ■ BPA    ▲ BAnT    ● BSR

Fuente: Resultados de la investigación.

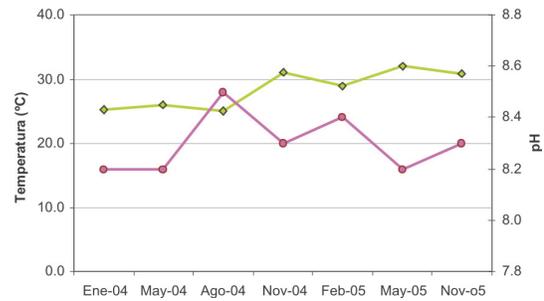
El medio marino circundante a los cupones expuestos en las plantas industriales se caracterizó por presentar una temperatura que varía entre los 25 y 32 °C. Los valores de pH fueron ligeramente alcalinos entre 8,1 y 8,7 (Gráfico 3). Los anteriores parámetros fisicoquímicos no evidenciaron variaciones significativas entre las dos profundidades fijadas. En las condiciones descritas, el desarrollo de las comunidades microbianas mesófilas está favorecido por considerarse óptimas para su crecimiento (Madigan, Martinko y Parker, 2000).

Los valores de oxígeno disuelto en las dos plantas industriales se ubicaron en un rango entre los 4 y 8 mg/l. En general, los datos recolectados superaron ligeramente los valores límites de este parámetro (4 mg/l) establecidos en la normativa para aguas costeras colombianas, indicando de esta manera, que existe una apropiada oxigenación del agua

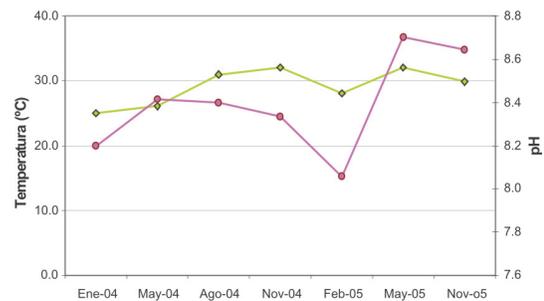
(Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 1984). Esta saturación de oxígeno, desde el punto de vista biológico, permite una adecuada proliferación de microorganismos oxigénicos lo cual se ve reflejado en el recuento de BAT.

Asimismo, se ha encontrado que las bacterias en el ambiente natural no permanecen siempre en estado planctónico sino que tienden a formar nichos que favorecen su supervivencia ante condiciones hostiles; por lo tanto, se considera que dentro de estos cúmulos bacterianos puedan desarrollarse microorganismos anoxigénicos principalmente cuando ocurre una disminución en la concentración de oxígeno, debido a los procesos metabólicos generados por las bacterias aerobias (Kae, et al., 2002). Lo anterior explica la presencia de valores proporcionales de BAnT respecto a BAT durante todos los monitoreos realizados (Gráfico 2).

**Gráfico 3. Temperatura y pH del medio marino circundante a los cupones expuestos**



A. Planta de Mamonal



B. Planta de Bocagrande.

◆ T°C    ● pH

Fuente: Resultados de la investigación.

En cuanto a los procesos químicos generados por la acción del recubrimiento con el medio marino, cabe resaltar que la presencia de altas concentraciones de oxígeno disuelto encontradas en las Plantas Industriales pueden producir el desencadenamiento

de reacciones químicas del biocida, que producen la oxidación del cobre (I) disuelto y la posterior formación y sedimentación de sales de este metal en los fondos marinos (Yeber, Kiil y Dam-Johansen, 2004).

Con relación a la conductividad, esta varió dependiendo de la profundidad en la Planta de Mamonal. Se observó un aumento del 10-50% en las muestras de agua recolectadas a mayor profundidad respecto a las superficiales. Para la Planta de Bocagrande, la conductividad no dependía de la profundidad de la muestra, sino que estaba afectada por procesos de mezcla de agua dulce y salada, por posibles aportes del Canal del Dique.

La concentración de cloruros, sulfatos, sólidos disueltos totales (SDT) y alcalinidad en Mamonal, se encontraron ligeramente incrementados a mayor profundidad. En el caso de Bocagrande, estos parámetros no fluctuaron entre las profundidades estudiadas. El rango de cloruros establecido para las muestras superficiales fue de 8034 a 13773 mg/l; para las muestras a 2 metros de profundidad las concentraciones de cloruros se hallaron entre 9554 y 21997 mg/l. El ión sulfato mantuvo concentraciones entre 1105 y 2142 mg/l en la superficie y de 2042 y 2843 mg/l para las muestras tomadas en profundidad.

Los valores de hierro total en las muestras de Mamonal y Bocagrande se ubicaron entre 0,1 y 0,9 mg/l; estos valores están acordes con los rangos reportados en la literatura (Rodier, 1998).

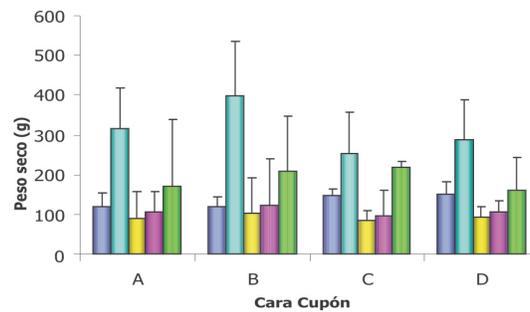
Los valores determinados para DBO5 fueron de 0,5 - 3,4 mg/l para Mamonal y de 1,4 - 4,6 mg/l para Bocagrande. Estos datos pueden indicar que el proceso de autopurificación del mar permite degradar la materia orgánica presente de forma constante y eficiente (Madigan, Martinko y Parker, 2000).

### Formación de las bioincrustaciones en cupones control

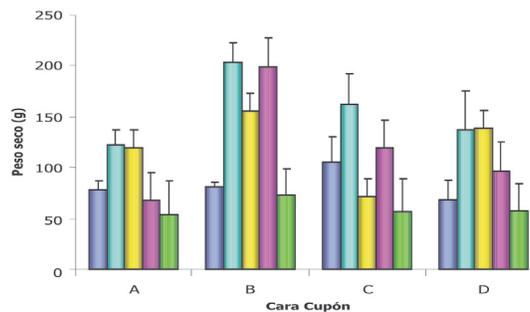
En el Gráfico 4 se muestra la biomasa total adherida a los cupones control durante los cinco controles realizados. Los cupones tienen forma de "L" con dos caras verticales (A y C) y dos caras horizontales (B y D). Para la Planta de Mamonal inicialmente la biomasa fue muy similar para todas las caras del cupón, sin embargo, los valores más altos se registraron en las caras A y B, las cuales estaban expuestas constantemente a la luz solar. Para la Planta de Bocagrande, se detectó una preferencia por la

cara horizontal B especialmente en los monitoreos 2, 3 y 4. La tendencia es similar para ambas plantas a pesar de que la oferta larval no es la misma debido a las variaciones en la velocidad del flujo del agua sobre las superficies expuestas, facilitando el asentamiento de las larvas transportadas. La cementación de las valvas calcáreas de la ostra sobre las superficies de los cupones en Mamonal, hizo que los cálculos de biomasa fueran mayores respecto a Bocagrande.

**Gráfico 4. Biomasa adherida a los cupones control en cada una de las cuatro caras de los cupones (promedio más error estándar)**



A. Planta de Mamonal



B. Planta de Bocagrande

■ M1 ■ M2 ■ M3 ■ M4 ■ M5

Los cupones tienen forma de "L" con dos caras verticales (A y C) y dos caras horizontales (B y D). (M=Monitoreo).

Fuente: *Resultados de la investigación.*

A partir del primer monitoreo, los cupones control presentaron una alta cobertura fijada entre 81 y 87% y la tendencia de incrustación normalmente presentó un incremento a medida que avanzaron los controles, ya que al pasar el tiempo se fueron asentando un mayor número de organismos.

En las dos plantas se observó un incremento abrupto en la biomasa sobre los cupones de control en el segundo monitoreo, probablemente como resultado de la existencia de una superficie previamente acondicionada en el primer monitoreo que permitió la fijación de muchos otros organismos. A partir del tercer monitoreo se presentó una fijación variable en las diferentes caras, por depredación o mortalidad parcial de la fauna o una menor oferta larval disponible que puede estar asociada a cambios en la salinidad.

Se determinó que los principales grupos de invertebrados responsables de la bioincrustación sobre los sustratos experimentales en la Planta de Mamonal fueron la ostra de mangle, *Crassostrea rhizophorae*, el mejilloncito *Brachidontes exustus*, los cirripedios *Balanus eburneus* y *Balanus amphitrite* y dos especies de poli quetos pertenecientes al género *Hydroides*, principalmente *Hydroides elegans*.

En la Planta de Bocagrande los principales invertebrados responsables de la bioincrustación fueron los cirripedios (*Balanus eburneus* y *Balanus amphitrite*), el mejilloncito *Brachidontes exustus* y algunos poliquetos de la familia *Serpulidae*, *Serpula* sp., *Hydroides* sp. e *Hydroides diramphus*. En la Planta de Bocagrande fue escasa la presencia de ostra de mangle, con predominio en este caso de los poliquetos tubícolas.

**Evaluación del recubrimiento antiincrustante**

Los cupones de evaluación retirados durante los cinco controles fueron calificados de acuerdo con la resistencia al *fouling* (RF), la integridad de la película de *antifouling* (PAF) y de la película anticorrosiva (PAC). El valor resultante para cada

sistema de recubrimiento fue el promedio del cupón de evaluación y el duplicado. Los resultados de esta calificación se describen en el Cuadro 3.

**Cuadro 2. Bioincrustaciones adheridas a cupones control después de 18 meses de exposición**



Fuente: Resultados de la investigación.

De acuerdo con el Cuadro 3, la resistencia al *fouling* en los cupones de evaluación fue mejor en la Planta de Mamonal respecto a la Planta de Bocagrande para todos los sistemas calificados. Para ambas

**Cuadro 3. Calificación de los cupones de evaluación de los seis sistemas de recubrimiento. Plantas de Mamonal y Bocagrande**

Sistemas	Planta de Mamonal														
	RF					PAF					PAC				
	M1	M2	M3	M4	M5	M1	M2	M3	M4	M5	M1	M2	M3	M4	M5
A1	100	100	100	100	100	100	90	90	90	90	100	100	100	100	100
H1	95	95	95	95	95	100	90	90	90	90	100	100	100	90	80
P1	95	95	95	92	95	100	90	90	90	90	100	100	100	100	90
P2	78	72	86	87	n. d.	100	90	60	40	n. d.	100	90	80	40	n. d.
G1	95	95	95	92	n. d.	100	100	100	100	n. d.	100	100	100	100	n. d.
S1	94	94	95	95	95	100	90	90	90	90	100	100	100	100	90
RF: Resistencia al <i>fouling</i>					PAF: Película de <i>antifouling</i>					PAC: Película de antiincrustante					
M: Monitoreo					n. d.: No determinado debido a la película del cupón										

Planta de Bocagrande															
Sistemas	RF					PAF					PAC				
	M1	M2	M3	M4	M5	M1	M2	M3	M4	M5	M1	M2	M3	M4	M5
A1	95	95	95	95	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
H1	67	65	44	50	34	60	40	20	20	20	100	100	100	90	90
P1	84	84	45	36	29	80	60	60	20	10	90	80	60	20	20
P2	65	58	46	45	40	90	70	60	60	60	100	100	100	100	100
G1	88	n. d.	70	53	45	100	n. d.	100	100	100	100	n. d.	100	100	100
S1	95	95	84	89	60	100	90	80	80	80	100	100	100	100	90

RF: Resistencia al *fouling*    PAF: Película de *antifouling*    PAC: Película de antiincrustante  
M: Monitoreo    n. d.: No determinado debido a la película del cupón  
Fuente: *Resultados de la investigación.*

plantas y todos los sistemas ensayados el porcentaje de cobertura de organismos incrustantes fue mucho mayor en los cupones control en comparación con los cupones de evaluación. En el Cuadro 4 se relaciona el resumen de los resultados y se calcula el desempeño general del recubrimiento (DGR).

En Mamonal se determinó que el sistema con mejor eficiencia antiincrustante fue el A1, seguido por los sistemas H1, S1, G1, P1 y P2. Cabe resaltar los resultados conseguidos por el sistema A1 que obtuvo la máxima calificación para los tres parámetros evaluados, a diferencia del sistema P2, cuya función *antifouling* y anticorrosiva fue deficiente.

En Bocagrande, se corroboran los buenos resultados del sistema A1 frente a los otros sistemas, aunque su eficiencia fue superior en Mamonal. Le sucedieron los sistemas S1, G1, P2, H1 y P1. Al comparar los resultados del sistema H1 entre las dos plantas, se puede observar que mientras en Mamonal el sistema presentó un buen desempeño que le dio el

segundo lugar, en la Planta de Bocagrande mostró baja resistencia al *fouling* y deficiente trabajo de la película *antifouling*.

### Conclusiones

A partir del estudio realizado en las plantas industriales de Mamonal y Bocagrande, se generaron las siguientes conclusiones:

- Para las dos plantas industriales, el medio marino circundante a los cupones tratados con los diferentes sistemas de recubrimientos *antifouling*, presenta altas concentraciones de microorganismos que pueden permitir el desarrollo de un proceso de *fouling*. De igual forma, este componente bacteriano se caracteriza por presentar considerables concentraciones de BPA y BSR, que en contacto con la superficie metálica desnuda pueden generar la formación de procesos de biocorrosión.

**Cuadro 4. Desempeño general de los sistemas de recubrimiento en las plantas de Mamonal y Bocagrande**

Planta Mamonal				
Sistemas	Calificación			DGR
	RF	PAF	PAC	
A1	100	100	100	100
H1	95	100	100	95
P1	94	95	95	94
P2	93	100	100	93
G1	92	95	100	92
S1	72	40	60	40

Planta Bocagrande				
Sistemas	Calificación			DGR
	RF	PAF	PAC	
A1	90	100	100	90
H1	60	80	90	60
P1	45	100	100	45
P2	40	60	100	40
G1	34	20	90	20
S1	29	10	20	10

RF: Resistencia al *fouling*  
PAC: Película de antiincrustante  
Fuente: *Resultados de la investigación.*

PAF: Película de *antifouling*  
DGR: desempeño general del recubrimiento

- El medio marino se caracteriza por ofrecer condiciones óptimas para el desarrollo de comunidades micro y microbiológicas.
- Adicionalmente, presenta altas concentraciones de oxígeno disuelto y valores de DBO5 que indican un adecuado proceso de autopurificación del agua de mar.
- La bioincrustación presentó un alto porcentaje de cobertura desde el primer control y un crecimiento abrupto en la biomasa en el segundo como resultado de la existencia de una superficie acondicionada para la fijación de organismos. En adelante, se presentó una fijación variable debido a depredación o mortalidad parcial de la fauna o menor oferta larval disponible.
- En la Planta de Mamonal, los principales grupos de invertebrados responsables de la bioincrustación fueron *Crassostrea rhizophorae*, *achidontes exustus*, *Balanus* sp. e *Hydroides* sp., mientras que en Bocagrande se encontraron asociados *Balanus* sp., *Brachidontes exustus*, *Serpula* sp. e *Hydroides diramphus*.
- En Mamonal se determinó que el sistema con mejor eficiencia antiincrustante fue el A1, seguido por los sistemas H1, S1, G1, P1 y P2. En Bocagrande, el sistema A1 presentó igualmente el mejor desempeño y le sucedieron los sistemas S1, G1, P2, H1 y P1.
- Se observó un mejor desempeño en los recubrimientos antiincrustantes tipo autopulimentables (A1, H1, S1 y G1), en comparación con los tipo matriz insoluble(P1) y soluble (P2).
- La metodología aplicada para la evaluación y calificación de recubrimientos *antifouling*, permitió desarrollar una adecuada y precisa comparación de los esquemas de recubrimientos y por lo tanto, se considera una herramienta confiable en la selección de pinturas que puede ser implementada por parte de Cotecmar.

## Referencias

- ASTM D362378a. (2004). "Antifouling Panels in Shallow Submergence". ASTM International.
- Cassé, F., Swain G. (2006) "The Development of Microfouling on Four Commercial Anti-fouling Coatings Under Static And Dynamic Immersion", International Biodeterioration & Biodegradation (57), pp. 179-185.
- Callow, M.E., Callow J.A., (2002) "Marine Biofouling: A Sticky Problem". *Biologist* 49 (1).
- Clare, A.S., Rittschof, D., Gerhart, D.J., Maki, J.S. (1992). "Molecular Approaches to Nontoxic Anti-fouling", *Invertebrate Reproduction and Development*. 22(1-3) pp. 67-76.
- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (1984, 26 de junio) "Decreto 1594 de 1984 por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos", en *Diario Oficial* n.º 36.700, 26 de Junio de 1984, Bogotá.
- Corporación para la Investigación de la Corrosión (2003), *Programa para el manejo de la corrosión interna del sistema de transporte de gas en un gasoducto colombiano. Informe final*. Bucaramanga. CIC.
- Davis, A. R., Targett, N. M., McConnell, O. J., Young, C. M. (1989) "Epibiosis Of Marine Algae And Benthic Invertebrates: Natural Products Chemistry And Other Mechanisms Inhibiting Settlement And Overgrowth". *Bioorganic Marine Chemistry*, (3), pp. 85-114.
- International Maritime Organization (IMO), (2003) "International Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships". AFS/CONF/26. 18.
- Kae, K et al. (2002). "Isolation and Identification of Biofilm-Forming Marine Bacteria on Glass Surfaces in Dae-Ho Dike, Korea", en *The Journal of Microbiology*, 40 (4) pp. 260-266.
- Little, B., Ray, R., Pope, R. (2000) "Relationship Between Corrosion and Biological Sulfur Cycle: a Review". *NACE International. Corrosion*, 56(4) pp. 433-442.

- Madigan, M., Martinko, J. and Parker, J. (2000). *Brock. Biología de los microorganismos*. Madrid. cap. 5, pp.162-176.
- Pope, D. (1992) "State-of-the-Art Report on Monitoring, Prevention, and Mitigation of Microbiologically Influenced Corrosion in the Natural Gas Industry", Report No.GRI-92/0382. Gas Researcher Institute. Texas.
- Rodier, J. (1998). *Análisis de las aguas naturales, residuales y del mar*, Barcelona, Ediciones Omega.
- Schut, F., De Vries, E., Gotitschal, J., Robertson B., Harder W., Prins, R., Button, D. (1993) "Isolation of Typical Marine Bacteria by Dilution Culture: Growth, Maintenance, and Characteristics of Isolates under Laboratory Conditions", *Applied And Environmental Microbiology*, 59, pp. 2150-2160.
- Wahl, M. (1989) "Marine Epibiosis. Fouling and Antifouling", *Marine Ecology Progress*, pp. 175-189.
- Yebrá, D., Kiil, S., Dam-Johansen, K. (2004). "Antifouling Technology: Past, Present and Future Steps Towards Efficient And Environmentally Friendly Antifouling Coatings", *Progress in Organic Coatings*, pp. 75-104.

# Diagnóstico energético del sistema de aire acondicionado y refrigeración de un buque tipo nodriza fluvial

Carlos M. Rodríguez<sup>a</sup>  
Ricardo Lugo Villalba<sup>b</sup>  
Juan G. Fajardo<sup>c</sup>  
Bienvenido Sarría<sup>d</sup>

## Resumen

Este artículo presenta la evaluación energética del sistema de aire acondicionado y de refrigeración de un buque patrullero de río tipo Nodriza Fluvial construido por Cotecmar (Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial) para la Armada colombiana. El cálculo fue desarrollado aplicando la metodología propuesta por la Sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos (*Sname*) complementada con la metodología de las “curvas del serpentín” de la *Trane Corporation*. Se propusieron equipos basados en los resultados obtenidos, dado que al compararse con los instalados en el buque, mostraron ahorros energéticos y económicos.

**Palabras clave:** Curvas del serpentín, ahorro energético, carga térmica, factor de calor sensible.

## Abstract

*This article presents the energy evaluation of the air conditioning and refrigeration system of a riverine patrol and supply ship built by Cotecmar (Science and Technology Corporation for the Development of Naval, Maritime and Riverine Industries) for the Colombian Navy. The calculation was developed with the Society of Naval Architects and Marine Engineers (Sname) methodology; this was complemented with the Trane Corporation methodology: “coil curves”. Equipment based in the obtained results were proposed, these were compared with the units installed in the ship, determining energy and economic savings when these are used.*

**Key Words:** *Energetic Diagnosis, Coil Curves, Energy Savings, Thermal Charges, Sensible Heat Factor.*

Fecha de recepción: 12 de marzo de 2007

Fecha de aceptación: 2 de mayo de 2007

<sup>a, c, d</sup> Universidad Tecnológica de Bolívar, Facultad de Ingeniería

<sup>b</sup> Corporación de Ciencia y Tecnología para el desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial

<sup>b</sup> Asesor y Jefe del Departamento de Maquinaria y Propulsión de la Corporación de Ciencia y Tecnología para el desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial.

<sup>c y d</sup> Asesor y director de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Bolívar respectivamente.

Autor correspondiente: cmrodriguezjaraba@yahoo.es

## Introducción

La preservación y buen uso de los recursos renovables y no renovables ha sido desde siempre uno de los principales aspectos que ha preocupado a la humanidad. El principio de “aprovechar lo máximo con el uso de lo mínimo” ha tomado una importancia incalculable a tal punto que en las últimas décadas palabras como optimización, eficiencia, uso racional y ahorro, son casi obligatorias dentro del universo de la ingeniería. De todos los contextos que nos circundan, el tema energético es quizás el que mayor importancia ha adquirido dentro de esa cultura de conservación y concienciación.

En consecuencia, se identificó la necesidad de evaluar el diseño de *los sistemas de aire acondicionado y refrigeración* instalados en un buque tipo Nodriza Fluvial mediante el cálculo comprobatorio de la carga térmica en dichos sistemas, y la selección de los equipos requeridos basada en los resultados obtenidos. El objetivo era determinar potenciales ahorros energéticos, que se tradujeran en una importante disminución del consumo de combustible y por ende en ahorros económicos; debido al significativo impacto que tiene este rubro en la operación del buque, los altos costos de este energético en la actualidad, el incremento periódico en su precio, la dificultad de abastecimiento de hidrocarburos en las zonas geográficas de operación del buque y las políticas internacionales para la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera.

## Sistemas de climatización en buques

Un sistema de aire acondicionado en un buque debe proporcionar un ambiente en el cual el personal pueda vivir y trabajar sin estrés térmico; aumentar la eficiencia de la tripulación, la confiabilidad de equipos electrónicos y similares, y prevenir el rápido deterioro de armamento especial a bordo de buques de guerra.

Los factores que deben ser considerados en el diseño de un sistema de aire acondicionado en buques son:

- Funcionar apropiadamente en las condiciones de balanceo y cabeceo del buque.
- Resistir los efectos corrosivos del aire de mar y el agua salada.

- Estar diseñado para operación ininterrumpida durante el viaje.
- Ser fácilmente transportables partes de repuesto de todos los elementos esenciales, y carga extra de refrigerante debido a las dificultades que implica prestar servicio a los buques en su ruta.
- Operar sin ruidos o vibración inaceptables, y cumplir con los criterios de niveles de ruido requeridos por las especificaciones de la construcción naval.
- Ocupar el mínimo de espacio acorde con los costos y la confiabilidad. Los pesos deben mantenerse al mínimo.
- Ser suficientemente flexible para compensar los cambios climáticos de tal suerte que el buque pueda pasar a través de uno o más ciclos completos de estaciones climáticas en un solo viaje.
- Permitir la asunción de una carga por infiltración para el calentamiento de los cuartos del tren de timoneo y el puente, exigencias que se hacen en ocasiones para buques mercantes, aunque la infiltración a través de puertas hacia el exterior generalmente no se tiene en cuenta.

Finalmente, al respecto hay que decir que la carga solar debe considerarse en todas las superficies expuestas sobre la línea de agua. Si un compartimiento tiene más de una superficie expuesta, se utiliza aquella con la mayor carga solar, y los otros extremos expuestos se calculan a la temperatura exterior del ambiente.

## Metodología de cálculo de carga térmica del sistema de aire acondicionado en buques

Existen agencias reguladoras para la industria marítima que se encargan de establecer los parámetros de diseño y construcción de sistemas de acondicionamiento de aire que debe cumplir un buque. Aunque para el caso particular de buques navales no es necesario cumplir con tales requerimientos, Cotecmar procura en sus diseños cumplir con dichas regulaciones. Una de las agencias encargadas para la regulación de diseño y construcción de sistemas de acondicionamiento de aire en buques es la *American Building of Shipping (ABS)*.

En el siguiente cuadro se dan valores recomendados por la *ABS* para confort en sistemas de aire

acondicionado de buques y que se tomaron como referencia para los cálculos realizados.

**Cuadro 1. Valores recomendados por la ABS para confort en sistemas de aire acondicionado de buques**

Ítem	Requerimientos
Temperatura del aire	Rango de Temperatura del aire entre $\geq 18^{\circ}\text{C}$ ( $64^{\circ}\text{F}$ ) y $\leq 26,5$ ( $80^{\circ}\text{F}$ )
Humedad relativa	Rango desde un mínimo de 30% hasta un máximo de 70%
Velocidad del aire	No debe exceder los 30 m/minuto o 100 ft/minuto ( $0,5$ m/s ó $1,7$ ft/s) en el centro del espacio

Fuente: ABS (2002).

Los valores, ecuaciones y procedimientos empleados en el cálculo de la carga térmica y de los componentes del sistema de aire acondicionado se basaron en la metodología propuesta por la Sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos (*Sname* por sus siglas en inglés) (1980), complementados con los valores recomendados por la Naval de los Estados Unidos (*Sname*, 1992) para el diseño de sistemas de aire acondicionado en buques navales.

### Cálculo de la carga térmica

La primera fase en el diseño de sistemas aire acondicionado es establecer los requerimientos de carga de enfriamiento y de ventilación para cada espacio individual del buque.

Los componentes de la carga térmica incluyen las cargas por transmisión, por radiación solar, por iluminación, por equipos y por infiltración.

La carga por transmisión  $q_t$  se determina mediante la ecuación:

$$q_t = U \times A \times \Delta T \quad (1)$$

Los valores de  $U$  se tomaron de *Sname* (1963) para las superficies aisladas con poliuretano y se utilizaron los datos suministrados por el fabricante para los mamparos divisorios con núcleo de lana de roca. El  $\Delta T$  se toma de los datos recomendados en *Sname* (1980).

La carga por transmisión con radiación solar se calcula usando una variación de la ecuación (1):

$$q_{rs} = U \times A \times T_e \quad (2)$$

La ganancia de calor por transmisión con radiación solar para vidrios se calcula mediante:

$$q_{rv} = G_{sf} \times A \quad (3)$$

La carga por iluminación se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$q_{il} = I.W. + F.W. \times B.F. \times 3,41 \quad (4)$$

$B.F.$  es el factor de resistencia (equivale a 1,25 para buques mercantes) y 3,41 es el factor de conversión de Vatios a Btu/h.

La carga por equipos puede ser calculada cuando se conocen o estiman los datos de disipación de calor mediante las ecuaciones (5) y (6):

$$q_s = q_{sd} \times U.F. \times H.F. \quad (5)$$

$$q_e = q_{ed} \times U.F. \quad (6)$$

donde  $U.F.$  es el factor de uso que aparece en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Factores de uso recomendados para equipos típicos en aplicaciones marinas**

Espacio	Factor de uso (U.F.)
Cuarto de equipo de propulsión	0,5
Cuarto de computador	1,0
Cuarto de control del motor	1,0
Cuartos de ventiladores	1,0
Cocina	0,5
Cuarto de equipo de giro	0,5
Dispensa	0,5
Cuarto de equipos de radar	0,5
Cuarto de radio	0,3
Espacios restantes	0,3

Fuente: *Sname* (1980).

Para los comedores, se añaden 30 Btu/h por calor sensible y latente por persona comiendo como un requerimiento para la disipación de calor de los alimentos.

La ganancia de calor por persona en los diferentes compartimientos de un buque de la marina se obtiene de *Sname* (1980) según el tipo de espacio y la temperatura interior.

La carga por infiltración impone una carga de calor sensible y una latente. En el cálculo no se tuvo en cuenta en vista de que todas las puertas permanecen cerradas durante la operación normal del buque.

### Componentes de la carga térmica que impone el sistema

Los componentes de carga térmica generados por los equipos y el funcionamiento propio del sistema de acondicionamiento de aire son: la carga del local, la carga por el ventilador, las debidas a los ductos y la carga por aire exterior.

La carga del local corresponde a los diferentes componentes de la carga térmica previamente explicados.

La carga por ventilador es el calor sensible añadido al aire cuando pasa a través de un ventilador y no es diferente de la carga de calor sensible de equipos descrita anteriormente, excepto que por conveniencia se expresa preferiblemente en términos del aumento de temperatura del aire a través del ventilador antes que como un flujo de calor. Para el caso del presente estudio se asumió como una carga por equipos, ya que los ventiladores de los *fan-coil* están ubicados dentro del espacio acondicionado.

Las cargas del sistema debidas a los ductos de suministro de aire y por trayectoria de retorno no se consideraron para el cálculo, debido a que el sistema no presenta conductos de aire; solo existen ductos para el suministro de aire exterior requerido para renovación.

Para la carga por aire exterior se requieren dos cálculos. Uno basado en la ocupación del espacio, y el otro en la tasa de cambio de aire. La mayor de estas dos cantidades será la mínima cantidad requerida de aire exterior.

El cálculo por nivel de ocupación se realiza usando la siguiente ecuación:

$$Q = O_f \times P \quad (7)$$

donde  $Q$  es la cantidad de aire exterior en *cfm*,  $O_f$  es la tasa de aire exterior mínima en *cfm* por persona y  $P$  es el número de ocupantes del espacio.

Los requerimientos de aire exterior basados en la tasa de cambio se calculan usando la ecuación:

$$Q = V / (R/C) \quad (8)$$

donde  $V$  es el volumen del cuarto en  $\text{ft}^3$  y  $R/C$  es la tasa de cambio de aire en minutos por cambio.

### Metodología de cálculo de carga térmica para los sistemas de refrigeración (cuartos fríos)

Los criterios que se siguieron para el cálculo de la carga térmica de los sistemas de refrigeración son los que recomienda la *Sname* (1992) los cuales fueron complementados con datos recomendados por la Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (*Ashrae* por sus siglas en inglés) para los análisis de sistemas de refrigeración (*Ashrae*, 1994).

La carga de calor de refrigeración para buques navales se basa en espacios de congelación desde  $0$  a  $-10^\circ\text{F}$  y espacios de enfriamiento a  $33^\circ\text{F}$ . Las temperaturas serán de  $140^\circ\text{F}$  para superficies expuestas al sol,  $120^\circ\text{F}$  para espacios adyacentes a maquinarias,  $100^\circ\text{F}$  para otros espacios no refrigerados,  $90^\circ\text{F}$  para superficies expuestas al agua de mar, y  $80^\circ\text{F}$  para espacios acondicionados, a menos que sean citadas otras temperaturas de diseño en las especificaciones particulares del buque.

Las cargas por refrigeración se determinan para dos condiciones, operación normal y *pull-down*. La condición normal es el periodo durante el cual las temperaturas de diseño se mantienen en el sistema. La condición de *pull-down* es el periodo durante el cual la temperatura del producto que se introduce en el espacio es reducida hasta la temperatura de diseño.

Las pérdidas de calor se desprecian en los cálculos si la temperatura de un espacio adyacente al que está siendo diseñado es más baja. Los componentes de la carga de calor para los espacios refrigerados incluyen las cargas: por transmisión, por infiltración, por ventilación, por productos y por equipos.

Los valores de  $U$  usados para los cálculos de la carga por transmisión en espacios refrigerados para buques navales se encuentran en *Sname*, (1992, cap. 21).

La carga por infiltración es la ganancia de calor a través de las rendijas y la entrada de aire cuando se abren las puertas. Para muchos diseños la temperatura del aire de entrada se toma en  $100^{\circ}F$  con 60% de humedad relativa cuando el aire es de espacios no refrigerados. Si el aire es de espacios refrigerados, la temperatura del aire que se tome será de  $50^{\circ}F$  y 80% de humedad relativa.

Se debe considerar una carga por ventilación para los espacios de almacenamiento de frutas y vegetales. Esto consiste de una ganancia de calor por la introducción de aire exterior, lo cual se requiere para el desplazamiento del aire viciado del compartimiento. Esta es importante solo donde excede la carga por infiltración, y entonces se usa en su lugar para las condiciones de operación calculadas.

Así mismo, debe tenerse en cuenta el calor interno de los productos y empaques, conocido como carga de calor por productos; adicionalmente, para cuartos de enfriamiento, esta también incluye el calor de respiración de frutas y vegetales.

La carga de calor por equipos incluye el calor introducido por los motores de los ventiladores para recirculación y ventilación, los cuales generalmente trabajan a plena velocidad solo durante las operaciones de *pull-down*. Se usa a baja velocidad, generalmente 50% de la máxima, durante la operación normal, lo que reduce la carga de calor.

Las cargas para las unidades de condensación se seleccionan de la siguiente forma:

- Para condiciones de *pull-down*, operación continua de todas las unidades de condensación en un sistema.
- Para la condición de operación normal, la operación de la unidad de condensación no excede las 18 horas por día con el compresor en *stand-by* asegurado.

### Componentes y cálculos de la carga de refrigeración

La capacidad de un sistema de refrigeración debe ser suficiente tanto para la condición de *pull-down*

como para operación normal. Los cálculos deben ser hechos para ambas condiciones con el fin de dimensionar adecuadamente los componentes de refrigeración. Dado que generalmente los espacios son pensados para almacenar una variedad de productos, por lo general no se requiere cálculos exactos y puede usarse un valor promedio (Cuadro 3).

La carga de refrigeración por transmisión  $L_i$  se calcula mediante:

$$L_i = 24 \cdot A \cdot U \cdot (t_1 - t_2) \quad (9)$$

La carga de calor por infiltración  $L_i$  para cada espacio refrigerado se calcula mediante:

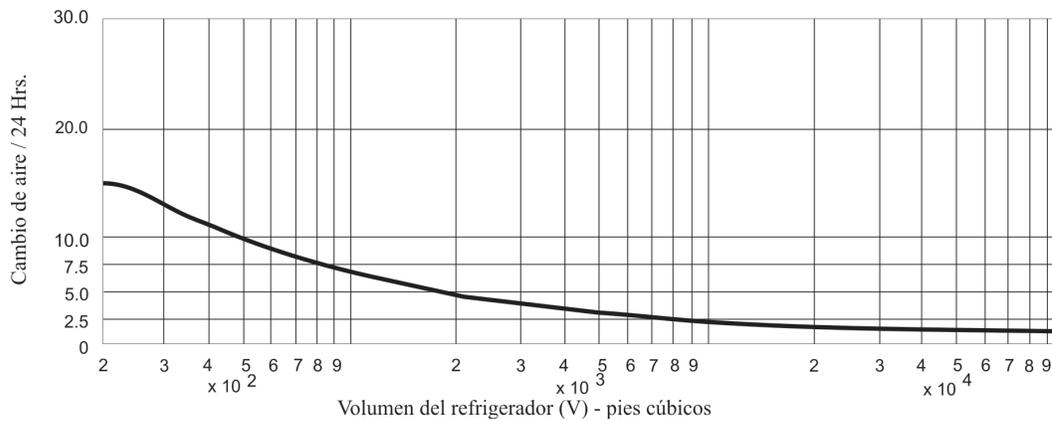
$$L_i = VCH_a \quad (10)$$

**Cuadro 3. Condiciones de la carga por productos en sistemas de refrigeración.**

	Espacio de almacenaje	
	Enfriamiento	Congelación
Temperatura final, °F	33	0
Temperatura máxima de entrada, °F	55	15
<b>Tiempo para reducción de temperatura, días</b>		
Espacios refrigerados de carga	2	2
Espacios refrigerados de carga	3	5
Densidad promedio del producto, lb/ft <sup>3</sup>	29,7	35,9
Calor específico promedio del producto, Btu/lb	0,85	0,40
Densidad promedio del empaque, Btu/lb	3,20	3,64
Calor específico promedio del empaque, Btu/lb	0,65	0,65
<b>Tasa de respiración, Btu / 24 hr:</b>		
Condición de entrada	3,20	
Condición final	1,08	

Fuente: *Sname*, (1992).

**Gráfico 1. Cambio de aire promedio para refrigeradores por 24 horas debido a la infiltración y a la apertura de puertas.**



Fuente: Sname, (1992).

Se supone que la cantidad de aire infiltrado al espacio es función del tamaño del espacio y es el promedio de los cambios de aire por 24 horas. Los valores de cambio de aire para espacios de diferentes tamaños se muestran en el Gráfico 1 y la ganancia de calor por pies cúbicos de aire que entra al espacio a diferentes temperaturas se muestra en el Gráfico 2.

La carga por ventilación  $L_v$  se calcula usando:

$$L_v = 8VH_a \quad (11)$$

La carga de calor por ventilación se usa cuando esta excede la carga por infiltración para la condición de operación calculada. No se incluye en la carga de *pull-down*. La cantidad de aire exterior se obtiene tomando un tercio del volumen total del espacio.

El peso total del producto  $PW$  se determina mediante:

$$PW = A_c hrW_p \quad (12)$$

donde  $A_c$  es el área de la cubierta,  $h$  es la altura del producto almacenado,  $r$  la relación del volumen utilizable al volumen total y  $W_p$  es la densidad del producto, lb/ft<sup>3</sup>, tomado del Cuadro 3.

El peso total del empaque o contenedor ( $CW$ ) se determina con la ecuación:

$$CW = A_c hrW_c \quad (13)$$

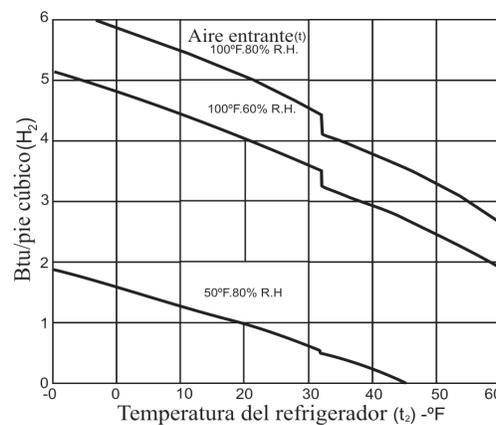
donde  $W_c$  es igual a la densidad del empaque o contenedor en lb/ft<sup>3</sup>.

La carga de calor interna del producto  $L_p$  se calcula usando la siguiente ecuación:

$$L_p = (PW \cdot C_p \cdot t_{p1} + CW \cdot C_c)(t_{p1} - t_{p2}) \quad (14)$$

donde  $C_p$  es el calor específico del producto,  $C_c$  el calor específico del empaque del producto,  $t_{p1}$  la temperatura del producto a la entrada del espacio y  $t_{p2}$  la temperatura final del producto o temperatura de diseño.

**Gráfico 2. Ganancia de calor producida por el aire que entra al refrigerador**

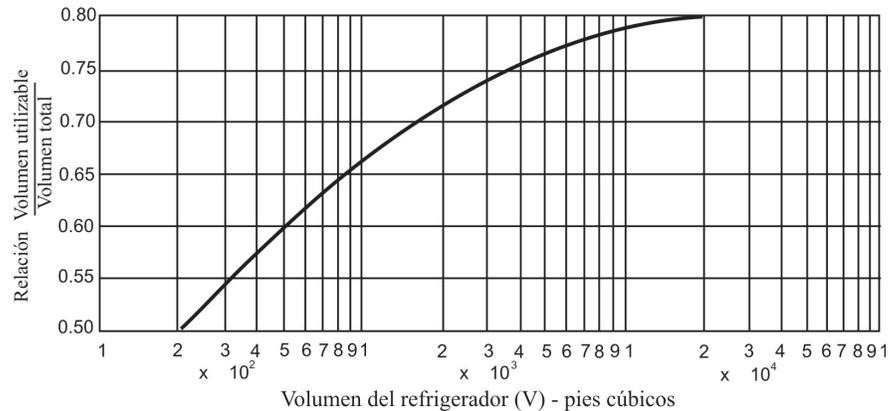


Fuente: Sname, (1992).

Las condiciones promedio que comúnmente se toman para la carga por producto y los tiempos permitidos para la reducción de temperatura se muestran en el Cuadro 3.

También se incluyen las cargas por calor de respiración de frutas y vegetales, tanto para la condición

**Gráfico 3. Porcentaje del espacio refrigerado disponible para almacenamiento de productos**



Fuente: Sname, (1992).

de *pull-down* como para la condición de operación normal para el cuarto de enfriamiento, y estas se calculan empleando las siguientes ecuaciones:

Respiración de preenfriamiento

$$R_p = PW \cdot (R_1 + R_2)/2 \quad (15)$$

Respiración de almacenamiento

$$R_a = PW \cdot R_2 \quad (16)$$

donde  $R_1$  y  $R_2$  son las tasas de respiración a la temperatura de entrada y la final respectivamente que se dan en el Cuadro 3 para aplicaciones navales.

El volumen disponible para el almacenado de los productos, basado en las instalaciones típicas empleadas en buques navales, se muestra en el Gráfico 3.

La carga por equipos normalmente es debida a los motores eléctricos de los ventiladores. En el Cuadro 4 se da la ganancia de calor basada en la potencia de un motor eléctrico.

**Cuadro 4. Ganancia de calor por motores eléctricos empleados en sistemas de refrigeración**

Potencia del motor, HP	Carga por equipo, Btu/hr-hp
1/20 a 1/8	5500
1/8 a 1/2	4250
1/2 a 3	3700
3 a 20	2900

Fuente: Sname, (1992).

### Cálculo comprobatorio y diagnóstico energético de los sistemas de aire acondicionado y refrigeración

El sistema de aire acondicionado instalado actualmente en la nodriza VI es del tipo todo agua, y está conformado por una unidad marina marca Carrier modelo 30 HWC 025, para refrigerante R-22, con una capacidad nominal de 19.9 toneladas de refrigeración, la cual consta de un compresor del tipo semihermético recíprocante multietapas (dos), un *chiller* para agua dulce, un condensador del tipo del casco y tubo enfriado para agua de mar sin costura con tubos de cupro níquel 90/10 y un sistema de control por microprocesador electrónico. Esta unidad, mediante un sistema de bombeo y una red de tuberías de cobre aisladas con poliuretano, provee de agua fría a las diferentes unidades terminales tipo *fan-coil* (unidad serpentín-ventilador) instaladas en los compartimientos, oficinas y demás espacios del buque que están acondicionados. Cada unidad terminal tiene un termostato para establecer el *set-point* de temperatura y posee una válvula reguladora de caudal de agua fría que permite el control de la temperatura en la habitación. Las referencias de los *fan-coil* instalados son marca Multiaqua CFFZA 04 y CFFZA 06 y entregan capacidades de enfriamiento de 11.400 Btuh (1t aprox.) y 17.300 Btuh (1,5t aprox.).

### Recálculo de la carga térmica del sistema de aire acondicionado

Los compartimientos o espacios que cubre el sistema de aire acondicionado y que son evaluados en el cálculo de carga térmica son:

- Camarotes ECF (elemento de combate fluvial) 1, 2 y 3 (camarotes empleados para el personal de combate, que realizan patrullaje en tierra).
- Camarotes de tripulación 1, 2 y 3 (camarotes empleados para el personal permanente encargado de la operación y navegación del buque).
- Camarote del comandante.
- Camarote del segundo comandante .
- Enfermería.
- Oficinas C3I y Maestría de Armas.
- Rancho o comedor.
- Puente de mando.
- Cuarto de radio.
- S.E.I.T (cuarto de inteligencia).
- Consola de ingeniería.

Para el recálculo de la carga térmica del sistema de aire acondicionado se tomó como condición crítica la hora de mediodía, y las características reales del buque. Los cálculos se realizan según las ecuaciones contenidas en el numeral 3 y se tuvieron en cuenta las siguientes recomendaciones:

- La temperatura de diseño de aire exterior se supone será 95 °F de bulbo seco con 77% HR según las condiciones de las zonas en donde opera el buque; estos valores son promedios teniendo en cuenta que entre una y otra zona hay variaciones de temperatura y humedad.
- La temperatura de diseño de aire interior se supone será de 80°F y 55% de HR según

propone *Sname* (1980) para buques navales, este valor está dentro del rango de temperaturas propuesto por la ABS para confort de las personas en un buque.

- Para los valores de temperatura de los pasillos, los cuales son acondicionados indirectamente, se empleó un aumento de 0,5°F, como se recomienda para buques navales (*Sname*, 1980).
- Las áreas de cada espacio fueron medidas en campo para corregir los valores que se habían empleado en el cálculo previo.
- La carga por iluminación se evaluó teniendo en cuenta los datos de placa tomados de las luces instaladas en cada espacio.
- Fueron estimados los valores de disipación de calor empleados en la carga por equipos.
- La carga por persona se tomó a partir de datos proporcionados para buques navales que aparecen en el Gráfico 1 de acuerdo con el tipo de espacio. Para el cálculo se consideró una ocupación completa en los espacios de oficinas, comedor y puente; para los camarotes se consideró el nivel de ocupación según el número de camas disponible pues estos generalmente son ocupados en su totalidad.

Fue necesario evaluar la carga térmica teniendo en cuenta una segunda condición (horas nocturnas) para los espacios en donde no se consideró la carga por personas en el primer cálculo; esto con la finalidad de establecer la capacidad máxima de enfriamiento requerida allí.

**Cuadro 5. Resumen de la carga térmica**

Datos del espacio		Condición crítica C1				Condiciones para camarotes ocupados de noche C2				Salidas de aire basadas en			CFM C1	CFM C2
Espacio	Estación	BTU/hr.			SHR	BTU/hr.			SHR	R/C	Pers.	Ext.	CFM C1	CFM C2
		Sens.	Lat.	Total		Sens.	Lat.	Total						
Camarote ECF 3	14-17 B	4373	2025	6398	0,68								162	
Camarote tripulación 3	14-17 E	3426	0	3426	1,00	4312	2700	7012	0,61	43			127	160
Camarote tripulación 2	17-20 B	3401	0	3401	1,00	3659	2025	5684	0,64	37			126	136
Camarote tripulación 1	17-20 E	2575	0	2575	1,00	2501	1350	3851	0,65	35			95	93
Camarote ECF 2	20-24 B	9269	3375	12644	0,73					49			343	
Camarote ECF 1	20-24 E	9269	3375	12655	0,73					49			343	
Consola ingeniería	7-9 B	2684	700	3384	0,79						35		99	
Rancho	11-17 E	10718	8395	19113	0,56						345		397	
Oficina 1-19-1-L	17-19 E	1403	700	2103	0,67						35		52	
C3I	19-21 E	1491	700	2191	0,68						35		55	
Camarote segundo comandante	21-24 B	3098	0	3098	1,00	2043	670	2713	0,75			53	115	76
Camarote comandante	21-24 B	2948	0	2948	1,00	1893	670	2563	0,74			53	109	70
Enfermería puente	17-21 B	2059	0	3098	0,66	2336	1340	3676	0,64			53	76	87
Puente	17-21 B	16097	700	16797	0,96					84			596	
S.E.I.T.	18-21 B	1817	700	2517	0,72						35		67	
Cuarto radio	18-21 E	2420	700	3150	0,78						35		91	
<b>Total</b>		<b>77080</b>	<b>21370</b>	<b>99500</b>	<b>0,77</b>	<b>Total</b>				<b>297</b>	<b>655</b>	<b>159</b>	<b>2855</b>	
		Valores empleados en el cálculo global del equipo				<b>Total aire exterior</b>				<b>1111</b>				
						<b>Aire total estimado</b>				<b>2855</b>				

Fuente: *Resultado de la investigación.*

Para la determinación estimada del caudal de aire  $Q$  requerido en  $cfm$ , en cada uno de los espacios que se van a acondicionar, se empleó la ecuación:

$$Qr = q_{se} / (1,08 \cdot \Delta t) \quad (17)$$

siendo  $q_{se}$  el calor sensible del espacio y  $\Delta t$  el aumento de temperatura permisible.

Para este estudio se empleó un diferencial de temperatura promedio de  $25^{\circ}F$  según recomienda la *Sname*. Este diferencial solo es empleado para determinar el porcentaje de aire exterior que se necesita para renovación, el cual es requerido con el fin de establecer la capacidad total del equipo. Para calcular la capacidad total del sistema se determina el diferencial de temperatura mediante la metodología de la *Trane* "las curvas del serpentín", tal y como se explica posteriormente.

Luego de haber realizado los cálculos de carga para cada uno de los recintos de interés, se resume toda la información en el formato general del Cuadro 5 y se emplean para determinar la capacidad en toneladas, requeridas para garantizar las condiciones de confort.

### Determinación de las capacidades de los equipos

Para la determinación de la capacidad total en toneladas de refrigeración del equipo de enfriamiento y la capacidad de enfriamiento y flujo de aire de suministro en  $cfm$  de las unidades terminales tipo *fan-coil* requeridas para cada espacio acondicionado, se empleó la metodología propuesta por la *Trane Corporation* basada en las curvas del serpentín de enfriamiento (*coil curves*) que se muestran en el Gráfico 5; estas representan los cambios en las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo cuando el aire pasa a través de un serpentín de enfriamiento típico y describen aproximadamente el desempeño del serpentín. El procedimiento recomendado por la *Trane* se describe a continuación:

Teniendo los valores en  $cfm$  de aire exterior y de aire recirculado requeridos por el sistema del Cuadro 5, se determina el porcentaje que representa cada uno del total de aire. A partir de este valor se determina la temperatura de bulbo seco de la mezcla, multiplicando la temperatura de bulbo seco de cada una de las condiciones de aire por su porcentaje correspondiente y sumando los

resultados. En la carta psicrométrica se unen los puntos de la condición del aire recirculado y del exterior mediante una línea recta y se interceptan con el valor de bulbo seco determinado en el paso anterior, para establecer las condiciones del aire a la entrada (mezcla de aire). Tal condición es aire a  $85,85^{\circ}F$  de bulbo seco y  $75,95^{\circ}F$  de bulbo húmedo.

Basado en el resumen de cálculo de carga térmica (Cuadro 5) se determina la relación de calor sensible  $SHR = 0,77$  (calor sensible entre calor total) y con este valor se traza la línea de referencia del SHR del sistema cruzando el punto de referencia ubicado a  $78^{\circ}F$  de bulbo seco y  $65^{\circ}F$  de bulbo húmedo. Se traza la línea del SHR para la condición de  $80^{\circ}F$  BS y  $55\%$  HR trazando una línea paralela a la de referencia del SHR.

Siguiendo la curva del serpentín más cercana a la condición del aire de entrada (mezcla de aire) como guía, se traza desde este punto la curva del serpentín hasta que se intercepte con la línea del SHR. Este punto es la condición del aire de suministro del sistema y el valor del mismo que se determinó es de  $60,16^{\circ}F$  BS y  $59,4^{\circ}F$  BH. En el Gráfico 4 se muestra en la carta psicrométrica el proceso que representa el sistema de aire acondicionado en la nodriza.

Conociendo la condición del aire del espacio y la del aire de suministro se calcula el flujo de aire de suministro en mediante la ecuación:

$$Cfm = Qs / 1,085 \cdot (Tbs_{esp} - Tbs_{sum}) \quad (18)$$

Se determina mediante la carta psicrométrica las entalpías del aire de entrada y del aire de suministro ( $40,4249$  Btu/lb y  $26,046$  Btu/lb respectivamente) y empleando la ecuación (19) se calcula la capacidad de enfriamiento en Btu/hr haciendo uso del flujo de aire de suministro determinado con la ecuación (18).

$$CT = 4,5 \times Cfm \times (h_1 - h_2) \quad (19)$$

La capacidad determinada fue de  $179,029$  Btu/hr que equivale a  $14,2$  TR, con un factor de seguridad de  $5\%$  para suplir cualquier carga adicional. La capacidad final requerida para el sistema de aire acondicionado fue de  $15,66$  toneladas de refrigeración y se seleccionó una unidad que suministra  $15,8$ .

### Diagnóstico y ahorro energético del sistema de aire acondicionado

A partir de los resultados obtenidos en la sección anterior se propone un equipo de menor capacidad y se realiza un análisis comparativo con el equipo instalado actualmente en el buque. En el Cuadro 6 se resumen los resultados obtenidos incluyendo los ahorros.

**Cuadro 6. Comparativo del chiller instalado y el propuesto**

Ítem	Carrier	
	Instalado	Propuesto
Marca del equipo	Carrier	
Referencia del equipo	30 HWC 025	30 HWC 018
Capacidad nominal (TR)	19,9	15,8
Reducción de capacidad (%)	20,6	
Potencia consumida (kW)	16,2	13,2
Reducción de consumo (kW)	3	
Reducción de potencia consumida (%)	18,5	
Ahorro consumo diario (kWh/día). Operando 24 h/día	72	
Ahorro anual (kWh/año). Disponibilidad 90% ≈ 7884 h/año	22652	
Ahorro por operación (\$/año)	8'421.531	
Ahorro por inversión inicial (\$)	4'400.000	
Todos los cálculos se sealizan con un factor de carga al 100%		

Fuente: *Resultados de la investigación.*

**Cuadro 7. Costo del combustible empleado en el buque nodriza**

Costo de combustible diesel		
Costo del combustible (\$/gal)	4.685	1
Consumo de generador gal/h/kW	0,076	2
Costo del kW (\$/kWh)	356	
1. Precio del diesel a septiembre de 2006 2. Dato del fabricante para generador <i>Caterpillar</i> C 4.4.		

Fuente: *Resultados de la investigación.*

Los costos del combustible se determinan considerando la condición más eficiente del generador *Caterpillar* C4.4., de acuerdo con los datos

que proporciona el fabricante, según el cual el generador consume 7,32 galones por hora a plena carga (100%); lo que significa el menor consumo de combustible posible. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 7.

**Cuadro 8. Determinación de la capacidad de los fan-coil**

Espacio	Capacidad			Factor de carga %
	Requerida		Instalada	
	Btu/h	TR		
Camarote ECF 1	12079	1,0	0,95	106
Rancho	29180	2,1	2,39	102
Puente	36104	3,0	4,78	63
Cuarto de radio	3134	0,3	0,95	27
S.E.I.T.	2510	0,2	1,44	15
Camarote tripulación 3	7035	0,6	0,95	62

Fuente: *Resultados de la investigación.*

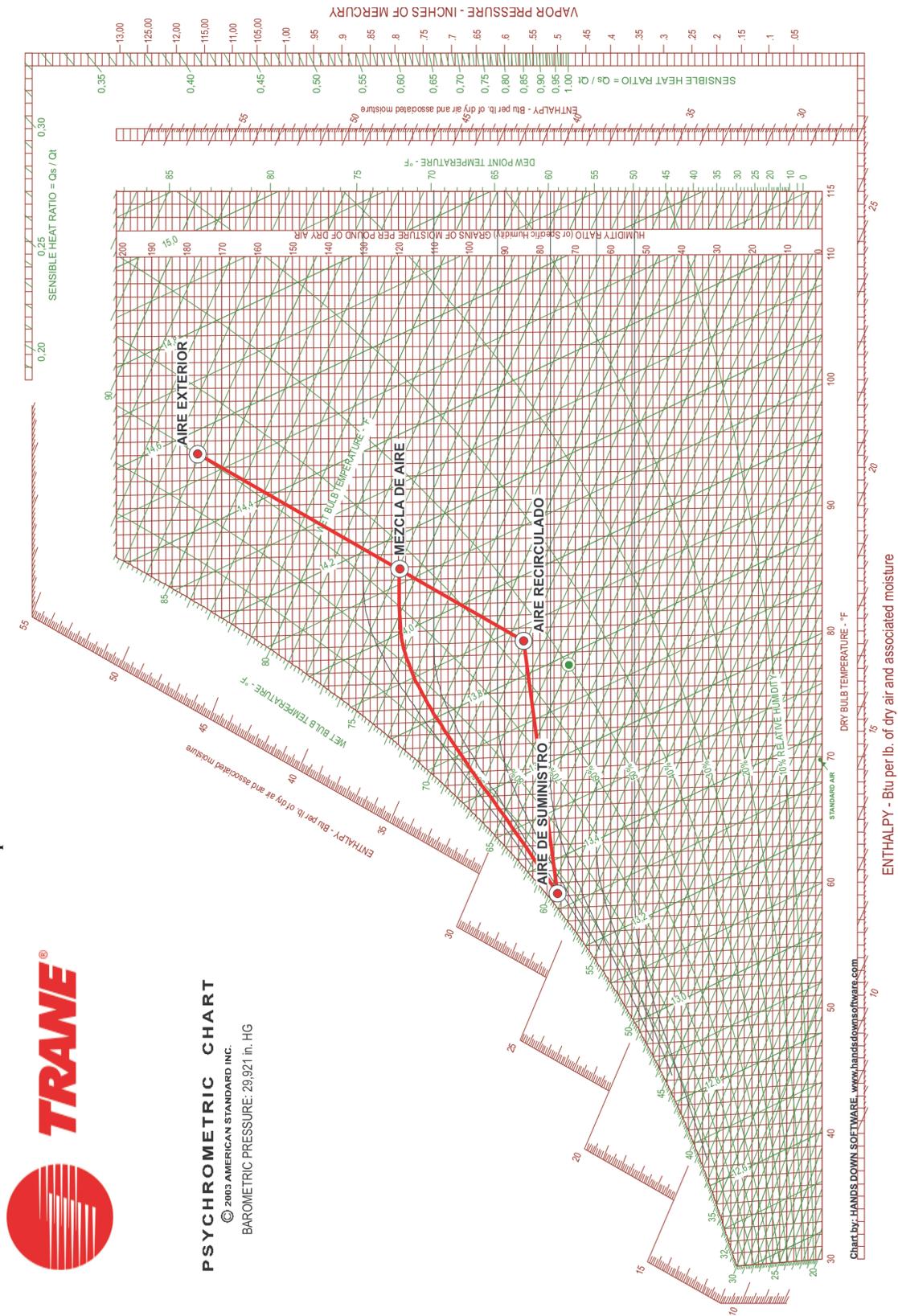
El Cuadro 8 resume la capacidad de cada una de las unidades *fan-coil* requeridas por cada espacio; esta capacidad fue determinada de forma similar a la capacidad total del equipo; los resultados son comparados con la capacidad real instalada, para evaluar a qué porcentaje de su capacidad nominal trabajan las unidades actuales.

### Cálculo comprobatorio y diagnóstico energético de los sistemas de refrigeración

El sistema frigorífico consta de dos unidades condensadoras marca Russell de la serie RW con referencia RWD500L22 para baja temperatura con capacidad de 31.000 Btu/h a una temperatura de succión de  $-10^{\circ}F$ , cada una compuesta por un condensador de tubo y coraza enfriado por agua de mar; un compresor Copeland Discus modelo 2DL3-040E-TFC200 para trabajo con refrigerante 22. El sistema de cuartos frigoríficos incluye un recinto a  $-4^{\circ}F$  ( $-20^{\circ}C$ ) para carnes y otro a  $33^{\circ}F$  ( $0,5^{\circ}C$ ) para verduras. Únicamente trabaja una unidad para ambos cuartos, la otra funciona en *stand-by*.

Las unidades están ubicadas en el cuarto de máquinas; desde allí el refrigerante líquido es transportado por tuberías aisladas con poliuretano hasta las unidades evaporadoras de aire forzado ubicadas en

Gráfico 4. Proceso psicrométrico del sistema de aire acondicionado de la Nodriza VI



el cuarto de verduras y el cuarto frío. Las unidades evaporadoras son marca Heatcraft modelo FBA080 para temperatura de evaporación  $-20^{\circ}\text{C}$  y  $-5^{\circ}\text{C}$ , la primera para el cuarto frío y la segunda para el cuarto de verduras cuyas capacidades basadas en la temperatura de evaporación son de 6905 Btuh (1740 Kcal/h) y 7580 Btuh (1910 Kcal/h) respectivamente; cada unidad posee dos ventiladores de 1580 rpm que suministran un flujo de aire de 1083 cfm.

### Recálculo de la carga térmica del sistema de refrigeración

De igual forma que para el aire acondicionado, el recálculo de la carga térmica para los cuartos fríos se efectuará de acuerdo con el procedimiento recomendado por la *Sname* (1992) para este tipo de aplicación. Los resultados se resumieron en los formatos recomendados por la *Sname* para el cálculo de la carga térmica de cuartos de congelación (cámara para carnes, y de enfriamiento (cámara para verduras).

Los valores de temperatura de diseño empleados para el cálculo fueron de  $0^{\circ}$  y  $33^{\circ}\text{F}$  para el cuarto de congelación y de enfriamiento respectivamente; el Cuadro 9 resume las condiciones empleadas para el diseño, estas son complementadas con los valores dados para buques navales que aparecen en el Cuadro 3 y las recomendaciones dadas por la *Ashrae* (1994) para el diseño de cuartos fríos (peso promedio del producto).

**Cuadro 9. Condiciones para diseño del sistema de refrigeración**

Concepto	$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura exterior	95	35
Humedad relativa	77%	
Superficies expuestas al sol	140	60
Superficies adyacentes a espacios acondicionados	100	37
Superficies adyacentes a espacios acondicionados	80	26
Temperatura cuarto de congelación	-4	-20
Temperatura cuarto de enfriamiento	33	0

Fuente: *Resultados de la investigación.*

### Determinación de la capacidad y diagnóstico energético del sistema de refrigeración

Después de realizado el cálculo comprobatorio del sistema de refrigeración de la Nodriza VI se

determinó que se necesitan 0.44 toneladas de refrigeración para llevar la carga máxima del cuarto de verduras de  $13^{\circ}\text{C}$  ( $55^{\circ}\text{F}$ ) (valor de temperatura máxima de entrada al cuarto [Cuadro 3]) hasta  $0,5^{\circ}\text{C}$  ( $33^{\circ}\text{F}$ ) y 0.19 toneladas de refrigeración para mantener la máxima carga de este cuarto en  $0^{\circ}\text{C}$  ( $33^{\circ}\text{F}$ ). Por otro lado se necesitan 0.40 toneladas de refrigeración para llevar la carga máxima del cuarto frío de  $-9^{\circ}\text{C}$  ( $15^{\circ}\text{F}$ ) hasta  $-20^{\circ}\text{C}$  ( $-4^{\circ}\text{F}$ ) y 0.26 toneladas de refrigeración para mantener la máxima carga de este cuarto en  $-20^{\circ}\text{C}$  ( $-4^{\circ}\text{F}$ ).

Se determinó la capacidad total del equipo incluyendo el calor que transmiten los ventiladores del evaporador. Se evaluaron las condiciones de máximo requerimiento para ambos cuartos y se determinó que la capacidad total requerida por la unidad condensadora es de 1,2 toneladas de refrigeración.

La capacidad de la unidad actualmente instalada para una temperatura de succión de  $-10^{\circ}\text{F}$  es de 31.000Btu/h (2,58 TR), lo que representa una unidad trabajando al 46,5% de su capacidad nominal. Se hace la selección de la unidad para trabajar en las mismas condiciones de temperatura, proponiendo una unidad de menor capacidad. En el Cuadro 10 aparece el comparativo de la unidad instalada y la propuesta basada en el cálculo comprobatorio realizado en la sección anterior y se dan los ahorros obtenidos por el cambio de la unidad condensadora.

Las unidades evaporadoras deberán suplir 0,58 toneladas de refrigeración para el cuarto frío y 0,62 toneladas para el cuarto de enfriamiento; estos valores corresponden a la condición máxima de operación de cada cuarto.

Para los mismos valores de temperatura de evaporación  $-20^{\circ}$  y  $-5^{\circ}\text{C}$ , se determina la capacidad de la unidad evaporadora requerida en cada cuarto y se compara con los actualmente instalados, para determinar si los equipos logran suplir la demanda que requiere el sistema.

Para el cuarto frío el equipo disponible comercialmente sería de 0,58 TR=6941.29 Btu/h=1749.19 Kcal/h, para una temperatura de evaporación de  $-20^{\circ}\text{C}$ . Al compararlo con el equipo actualmente instalado de 1740 Kcal/h se determina que para suplir lo demandado por el sistema, este requiere de un aumento en su capacidad de tan solo 0,52 % valor que no es significativo en vista de que en los

cálculos se empleó un 10% adicional como factor de seguridad; por lo tanto la unidad actualmente instalada cumple con los requerimientos del sistema.

**Cuadro 10. Comparativo de la unidad condensadora instalada y propuesto para el sistema de refrigeración. Ahorros obtenidos**

Ítem	Instalado	Propuesto
Referencia del equipo	RDW500 L22	RDW300 L22
Capacidad nominal (Btu/H)	31000	22100
Capacidad nominal (TR)	2,6	1,8
Reducción de capacidad (%)	28,7	
Potencia consumida (HP)	5	3
Potencia consumida (kW)	3,68	2,21
Reducción de consumo (kW)		1,47
Reducción potencia consumida (%)		40
Ahorro consumo diario (kWh/día). Operando 24h/día.		35,3
Ahorro anual (kWh/año). Disponibilidad 90% 7884 h/año.		11597
Ahorro por operación (\$/año)		4'129.352
<i>Todos los cálculos se realizan con factor de carga al 100%</i>		
<b>Costo de combustible diesel</b>		
Costos del combustible (\$/gal)	4.685	1
Consumo del generador gal/h/kW	0,076	2
Costo del kW (\$/kWh)	356	
1. Precio del combustible diesel a septiembre de 2006		
2. Dato del fabricante para generador <i>Caterpillar</i> C4.4		

Fuente: *Resultados de la investigación.*

Para el caso del cuarto de verduras se requiere una unidad evaporadora de 0,62 TR=7442.35 Btu/h=1875.44 Kcal/h siendo la unidad instalada para una capacidad de 0,63 TR=7579,5 Btu/h=1910 Kcal/h para una temperatura de evaporación de -5°C. Al igual que para el cuarto frío la unidad evaporadora es adecuada para suplir los requerimientos del sistema.

## Conclusiones

Es importante hacer un diagnóstico de los sistemas de aire acondicionado y de refrigeración en los buques, con el fin de recalculer las cargas térmicas sobre la base de lo realmente instalado con el objeto de identificar si el sistema cumple o no con los requerimientos de desempeño para los cuales fue diseñado.

La unidad de enfriamiento del sistema de aire acondicionado actualmente instalada en la Nodriza VI trabaja por debajo de su capacidad nominal. Al cambiar la unidad por una de menor tamaño que cumpla con los requerimientos reales del sistema se producirá una reducción en la capacidad de 20.6%, lo que trae consigo una disminución del consumo energético, reflejado en ahorros económicos por operación y por inversión inicial; este último proyectado a otras embarcaciones (Nodriza VII a la X) dado que el cambio solo aplica para futuros diseños debido a que por ser relativamente nuevos los sistemas instalados, no es viable su sustitución. Es necesario por ello establecer medidas orientadas a regular los consumos del equipo aprovechando que este trabaja con un sistema por etapas (al 50 y al 100%). Las unidades tipo *fan-coil* trabajan en su mayor parte muy por debajo de su capacidad nominal, determinándose que en algunos espacios llegan a ocuparse hasta en un factor de carga del 15%, por lo que se recomienda aprovechar que tienen tres velocidades para regular el suministro de aire según la demanda requerida por el espacio.

La unidad condensadora del sistema de refrigeración que debe suplir las condiciones máximas de operación del cuarto frío y el de verduras está sobrediseñada, y se encuentra trabajando al 46.5% de su capacidad; reemplazar la unidad existente por otra de menor capacidad representa un ahorro en el consumo de energía del 40%.

Las unidades evaporadoras instaladas tanto en el cuarto frío como en el de verduras, cumplen con los requerimientos de carga de ambos espacios.

En conjunto, para los dos sistemas evaluados (aire acondicionado y refrigeración), se pueden obtener ahorros económicos por operación a plena carga de los equipos por un valor aproximado de \$11.518.545 por año, trabajando 7880 horas/año las 24 horas al día el sistema de aire acondicionado y 18 horas el de refrigeración. Además se obtiene un ahorro por

inversión inicial del sistema de aire acondicionado de aproximadamente \$4.400.000, teniendo en cuenta únicamente el chiller de agua fría. Todos

estos ahorros solo considerando cambios de la unidades seleccionadas para futuras construcciones de las nodrizas.

### Listado de abreviaturas

$A$	= Área superficial de transferencia de calor, $ft^2$	$q_{rs}$	= Carga por transmisión con radiación solar, Btu/h
$A_c$	= Área de la cubierta del cuarto de refrigeración, $ft^2$	$q_s$	= Carga sensible por equipos, Btu/h
$B.F.$	= Factor de resistencia	$q_{se}$	= Calor sensible de un espacio o local
$C$	= Número de cambios de aire por 24 horas	$q_{sd}$	= Disipación de calor sensible del equipo
$Cfm$	= Cantidad de aire de suministro a la salida del serpentín de enfriamiento, cfm	$q_t$	= Carga térmica por transmisión, Btu/h
$CT$	= Capacidad de enfriamiento requerido	$r$	= Relación del volumen utilizable al volumen total de un cuarto de refrigeración
$C_p$	= Calor específico del producto que se va a refrigerar	$R$	= Respiración de preenfriamiento
$C_c$	= Calor específico del empaque del producto que se va a refrigerar	$R^p$	= Respiración de almacenamiento
$F.W.$	= Potencia en vatios de las luces fluorescentes	$R/C$	= Tasa de cambio de aire en minutos por cambio
$G_{sf}$	= Factor solar del vidrio, BTU/hr-ft <sup>2</sup>	$R_1$	= Tasa de respiración a la temperatura de entrada del producto
$h^f$	= Altura del producto almacenado	$R_2$	= Tasa de respiración a la temperatura final del producto
$h_1$	= Entalpía del aire de entrada, Btu/lb	$SHR$	= Relación de calor sensible
$h_2$	= Entalpía del aire de salida, Btu/lb	$tp_1$	= Temperatura del producto a refrigerar a la entrada del espacio
$H_a$	= Ganancia de calor por aire infiltrado, Btu/ft <sup>3</sup>	$tp_2$	= Temperatura final del producto o temperatura de diseño del cuarto de refrigeración
$H.F.$	= Factor de campana	$Tbs_{esp}$	= Temperatura de bulbo seco del espacio, °F
$I.W.$	= Potencia en vatios de las luces incandescentes	$Tbs_{sum}$	= Temperatura de bulbo seco de suministro, °F
$L_i$	= Carga de calor por infiltración	$t_1$	= Temperatura de la superficie exterior, °F
$L_p$	= Carga de calor interna del producto a refrigerar	$t_2$	= Temperatura de la superficie interior, °F
$L_r$	= Carga de refrigeración por transmisión	$Te$	= Diferencia de temperatura efectiva a través de la superficie
$L_v$	= Carga de refrigeración por ventilación	$U$	= Coeficiente global de transferencia de calor, Btu/ft <sup>2</sup> °F
$O_f$	= Tasa de aire exterior mínima en $cfm$ por persona	$U.F.$	= Factor de uso del equipo
$P$	= Número de ocupantes del espacio	$V$	= Volumen del espacio, $ft^3$
$PW$	= Peso total del producto a refrigerar	$W_c$	= Densidad del empaque o contenedor, lb/ft <sup>3</sup>
$Q$	= Cantidad de aire exterior, $cfm$	$W_p$	= Densidad del producto a refrigerar, lb/ft <sup>3</sup>
$Q_r$	= Caudal de aire requerido en el espacio, $cfm$	$\Delta t$	= Diferencia de temperatura a través de la superficie de transferencia y/o aumento de temperatura permisible, °F
$Q_s$	= Calor sensible total		
$q_{il}$	= Carga por iluminación, Btu/h		
$q_l$	= Carga latente por equipos, Btu/h		
$q_{ld}$	= Disipación de calor latente del equipo		

## Referencias

- American Bureau of Shipping (2002), Guide for Passenger Comfort on Ships. Houston, ABS.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (1977). Fundamentals Handbook. Atlanta, Ashrae, cap. 25.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (1994), Refrigeration, Systems and Applications Handbook. Atlanta, Ashrae.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (1995), Applications Handbook, Atlanta, Ashrae cap. 10.
- Lugo, R y Sierra, A. (2004). *Evaluación energética de los sistemas de conversión y consumo de energía de un buque tipo nodriza fluvial*, [tesis de grado], Barranquilla, Universidad del Atlántico, Especialización en Eficiencia Energética.
- Sarria, B. (2006) Diplomado Uso Racional de la Energía, módulo de Refrigeración y Aire Acondicionado. Universidad Tecnológica de Bolívar. Cartagena, documentos de clase.
- Quadri, N. (2000) *Sistemas de aire acondicionado, calidad del aire interior*, Buenos Aires, Editorial Alsina.
- Society of Naval Architects and Marine Engineer (1980), Recommended Practices for Merchant Ship Heating, Ventilation and Air Conditioning Design Calculations. Technical and Research Bulletin, New York, Sname, pp. 4-16.
- Society of Naval Architects and Marine Engineer (1992), Marine Engineering, New York, Sname, cap. 21. (1963), Thermal Insulation Report. Technical and Research Bulletin, New York, Sname, pp. 4-7.



# Valoración de la protección contra sobretensiones en embarcaciones que navegan por los ríos colombianos: estudio de caso

Olga C. Ramírez<sup>a</sup>  
Claudia L. Jiménez<sup>a</sup>  
Francisco J. Amórtegui<sup>a</sup>  
Víctor H. Jiménez<sup>b</sup>

## Resumen

Este artículo presenta los fundamentos de un trabajo de grado realizado en 2004 acerca del efecto de las sobretensiones en buques que navegan en ríos colombianos, tomando como estudio de caso un buque tipo nodriza fluvial de la Armada Nacional de Colombia. Durante su desarrollo fueron verificadas las principales características del sistema eléctrico-electrónico de la embarcación y sus equipos sensibles; asimismo, se analizaron los riesgos que pueden causar sobretensiones como las descargas eléctricas atmosféricas y las maniobras eléctricas de los equipos de potencia; se modelaron los escenarios considerados más críticos y se presentaron posibles alternativas de solución.

**Palabras clave:** Sistemas eléctricos en buques, sobretensiones, protección eléctrica, compatibilidad electromagnética.

## Abstract

*This article presents part of the thesis realized taking the IV Riverine Mothership and its electrical system as a case study. During its development, the ship's electric-electronic system and sensitive equipment's main characteristics were verified, the risks that can cause surges and electric maneuverings of the power equipment were analyzed, some scenarios were modeled, because they were considered to be the most critical, and some possible alternate solutions were presented.*

**Key words:** *Electric Systems on Ships, Surges, Electric Protection, Electromagnetic Compatibility.*

Fecha de recepción: 17 de abril de 2007  
Fecha de aceptación: 11 de mayo de 2007

Cotecmar - Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica

<sup>a</sup>Ingenieros electricistas de la Universidad Nacional de Colombia.

<sup>b</sup>Ingeniero electricista de la Universidad Autónoma de Occidente, Jefe del Departamento de Electricidad y Electrónica de Cotecmar.

Autor correspondiente: Catherine.Ramirez@co.schneider-electric.com

## Introducción

Los efectos de las interferencias electromagnéticas en los sistemas electrónicos se han incrementado debido al alto componente de equipos construidos con dispositivos electrónicos, denominados sensibles por su vulnerabilidad ante los disturbios electromagnéticos.

Los sistemas eléctricos de baja tensión (BT) instalados a bordo de buques están sometidos a múltiples eventos que pueden afectar su correcto funcionamiento. Con el fin mejorar la calidad del sistema, evitar fallas y hasta impedir la destrucción de componentes de los sistemas y equipos eléctricoelectrónicos sensibles, es preciso comprender el origen de las perturbaciones y valorar sus riesgos. Este es el objetivo principal del presente estudio.

El proyecto es novedoso pues aunque en Colombia se han hecho gran número de investigaciones respecto a las sobretensiones y sus efectos en diferentes instalaciones, no existen desarrollos enfocados a embarcaciones fluviales, lo cual implica un acercamiento a los principios generales del funcionamiento de un sistema eléctrico no convencional como el de un buque, denominado sistema flotante. Su principal característica es que el neutro no está referenciado a tierra (masa), que para este caso es el casco del buque. Las únicas partes puestas a masa son las metálicas no portadoras de corriente que sirven de soporte o protección mecánica a los equipos.

El trabajo se basa en las observaciones y mediciones desarrolladas en campo, y en un exhaustivo análisis e interpretación de los fenómenos de sobretensiones aplicados a este tipo de estructuras.

## La instalación

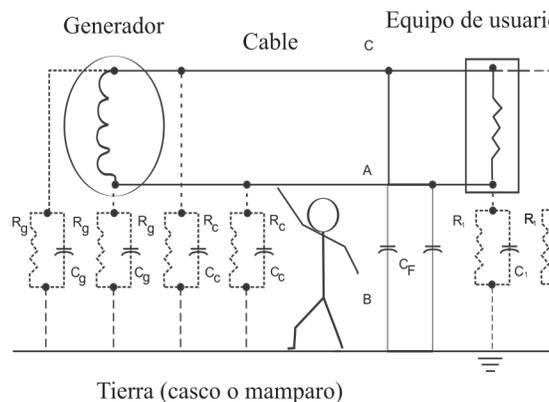
El estudio de caso fue realizado en el buque patrullero de apoyo fluvial Nodriza IV de 38 m de eslora, 9.5 m de manga y 12 metros medidos desde la superficie del agua hasta la parte más alta. El patrullero cuenta con estructura y láminas metálicas (acero) y acabados a prueba de corrosión.

Las instalaciones eléctricas a bordo son de baja tensión y en configuración radial; los sistemas de alimentación principal son de potencia, servicio, para iluminación, salidas de fuerza; equipamiento a

prueba de explosión, sistema de alimentación para equipos de comunicaciones y navegación, y sistemas de alimentación para el arma automatizada. Las fuentes de energía eléctrica son dos generadores de 62,5 kVA, 208 VAC y una “alimentación de tierra” (desde el muelle) con capacidad aproximada de 60 kVA.

La instalación eléctrica del buque es flotante, lo que implica resistencias y capacitancias (invisibles) entre los conductores de fase y tierra. Estos pequeños caminos de corriente a través de equipo eléctrico y los cables, son inherentes a la instalación y deben ser consideradas en el diseño de estos sistemas. Las resistencias a tierra se deben a la corriente de fuga del aislamiento, y el efecto de acoplamiento capacitivo es notorio entre los elementos energizados y el casco.

Gráfico 1. Sistema eléctrico no puesto a tierra



Fuente: NSTM (1997).

El sistema flotante presenta ventajas en cuanto al despeje de fallas y contribuye en la continuidad del servicio, básica para la operación e integridad de la embarcación y sus tripulantes. En caso de una falla en cualquiera de las fases, la corriente fluye a tierra a través de las resistencias y capacitancias descritas anteriormente, haciendo que el casco (masa tierra) iguale la tensión de la fase, evitando el aumento de corriente lo que provoca que las protecciones no se disparen disminuyendo así los cortes en el servicio.

## Metodología

Este estudio recorre un proceso de reconocimiento y búsqueda de información encaminado al análisis de las sobretensiones que pueden afectar la embarcación. En primera instancia se hace una revisión de la teoría de compatibilidad

electromagnética, la normativa aplicable y otros análisis relacionados con el tema, con el fin de conformar una base teórica. Posteriormente son identificadas las sobretensiones a las cuales está expuesta la embarcación, los riesgos de exposición por maniobras y descargas eléctricas atmosféricas, y se llega a los modelos de las condiciones más severas debidas a las sobretensiones de origen externo e interno. Finalmente se caracterizan y simulan los modelos desglosando los puntos vulnerables de la instalación y se presentan los resultados y las recomendaciones.

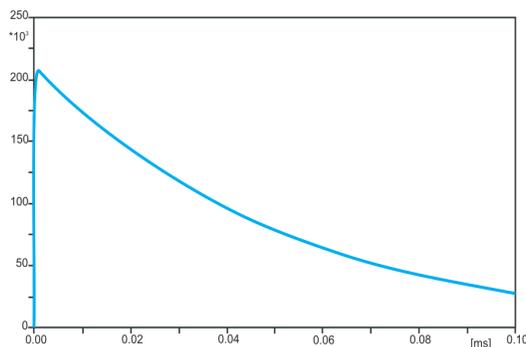
Por otra parte este estudio incluye la caracterización de los fenómenos que afectan el buque, simulación de los efectos más representativos, medición de los efectos de la maniobras eléctricas a bordo, ensayos de laboratorio de fenómenos típicos y una estimación del apantallamiento a través del método electrogeométrico.

## Resultados

Los fenómenos que afectan el sistema eléctrico del buque y pueden generar sobretensiones son de origen externo o interno; en el estudio se tuvieron en cuenta, para el primer caso, básicamente las descargas eléctricas atmosféricas, y en el segundo las fallas generadas por maniobras típicas del buque.

Las descargas eléctricas atmosféricas pueden impactar la estructura o las zonas cercanas de la embarcación generando sobretensiones en el sistema eléctrico. Se tomaron como puntos vulnerables al impacto directo la parte más alta, el casco y las personas que circulan en la cubierta.

**Gráfico 2. Forma de onda de corriente inyectada a pararrayos (simulada)**



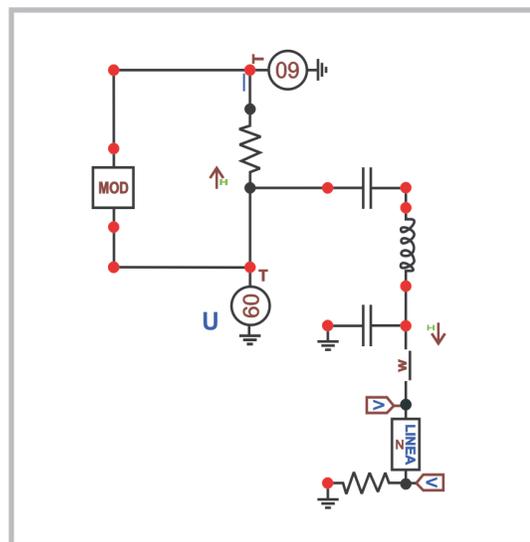
Fuente: Resultados de la investigación.

En cada caso fueron analizadas las posibles sobretensiones y sus efectos. El evento particular de impacto directo al mástil puede producir sobretensiones inducidas en las antenas que se encuentran a su alrededor. Los puntos críticos escogidos fueron la antena de HF y la de inteligencia ubicada justo al lado del mástil.

Se realizaron dos modelos en el programa ATP-EMTP, en los cuales se simula una corriente tipo rayo 1.2/350 $\mu$ s, de 200kA (Gráfico 2), que aunque no es la normalizada para pruebas, tiene un frente escarpado y una carga del orden de la de los rayos.

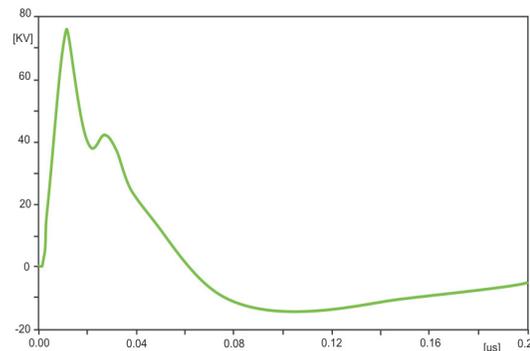
Para la antena de inteligencia se tomó el siguiente modelo:

**Gráfico 3. Modelo de simulación pararrayos - antena de inteligencia**



Fuente: Resultados de la investigación.

**Gráfico 4. Tensión inducida en el hilo guía de ondas debida a un impacto directo de rayo simulado en el mástil**

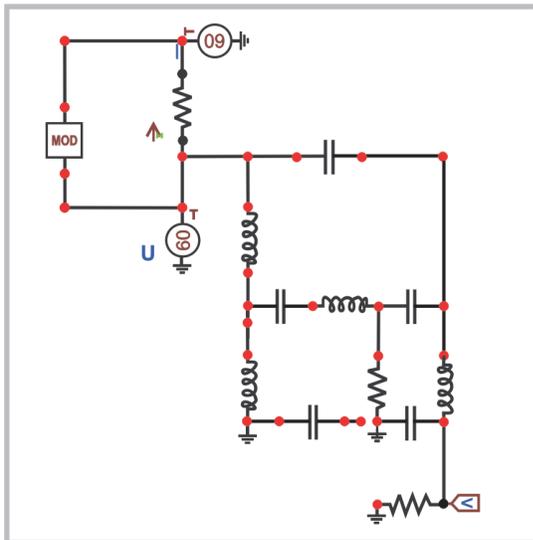


Fuente: Resultados de la investigación.

Las tensiones inducidas encontradas son las de la malla formada por el mástil, el blindaje del conductor y el hilo que lleva la señal al equipo. La tensión inducida en el hilo es de 76 kV, la cual excede los niveles de inmunidad de los equipos.

Para la antena de HF se utilizó el modelo mostrado en el Gráfico 5.

Gráfico 5. Modelo de simulación pararrayos-antena HF



Fuente: Resultados de la investigación.

La máxima tensión inducida es de 60,3 kV, valor que igualmente excede los niveles de inmunidad de los equipos electrónicos definidos por la norma IEC 61024 (actual 62305) como 0,8 V.

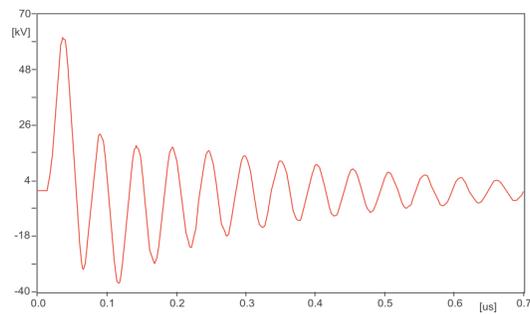
Para valoración del riesgo de descargas eléctricas atmosféricas, teniendo en cuenta la estructura del buque, se realizó un estudio sobre la base de diferentes normas para determinar si es necesario o no colocar pararrayos y de esta manera garantizar la protección de las personas a bordo. Según las normas NTC 4552 e IEC 61024 (actual 62305), la estimación del número de impactos de rayo por año  $N_d$  a la estructura se puede determinar a través de:

$$N_d = N_g \cdot A_E \cdot 10^6 \text{ (rayos/año)} \quad (1)$$

Donde  $N_g$  es la densidad de rayos a tierra. Para este cálculo fueron tomados 49 rayos / km<sup>2</sup> año (alta densidad de acuerdo con datos de la Red Colombiana de Medición y Localización Recma).

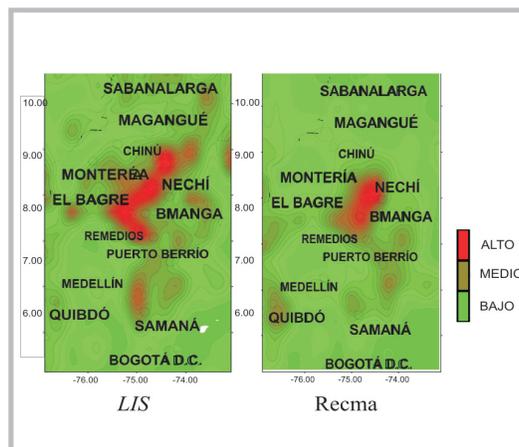
$A_E$ , es el área del círculo obtenido con una línea de inclinación 1:3 entre la superficie de la Tierra y la parte más alta de la estructura, que para el caso de la embarcación corresponde a la punta de la antena de inteligencia (12 m), y la línea de inclinación se toma con respecto al mar. El área encontrada fue de 4071,5 m<sup>2</sup>, por lo cual se tiene un  $N_d$  equivalente a 0,199 rayos por año, es decir la estructura del buque puede tener un impacto directo aproximadamente cada cinco años.

Gráfico 6. Tensión inducida en los equipos de HF debida a un impacto directo de rayo simulado en el mástil.



Fuente: Resultados de la investigación.

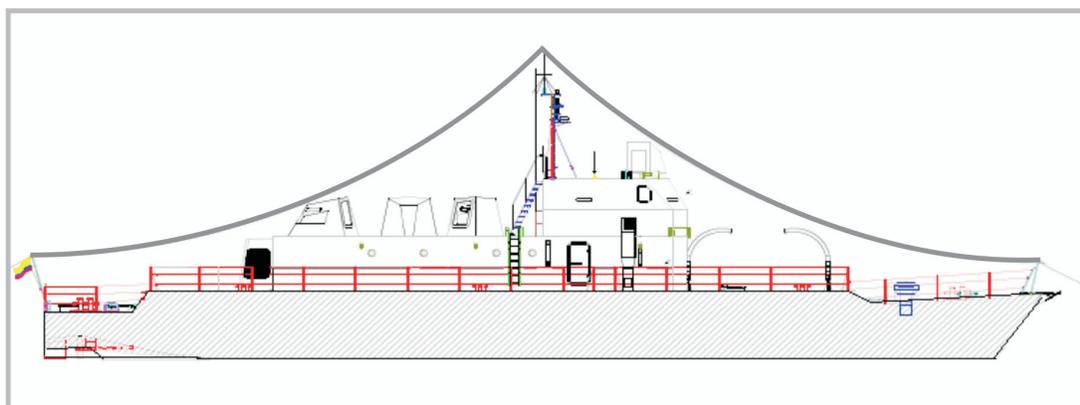
Gráfico 7. Mapas de actividad atmosférica LIS y Recma



Fuente: Younes, C., Torres H. (2002)

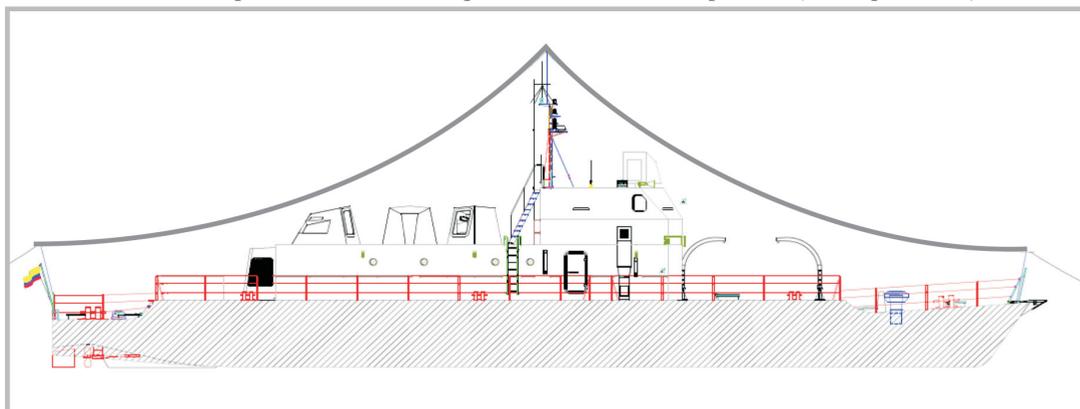
El buque no cuenta con ningún pararrayos construido específicamente para la protección contra descargas eléctricas atmosféricas. Tiene varios elementos que sobresalen de la estructura como el mástil y algunas antenas, las cuales se pueden tener en cuenta como puntas de captación o pararrayos naturales. Para evaluar y determinar el apantalla-

Gráfico 8. Apantallamiento del buque sin terminales de captación. (esfera para 30 kA).



Fuente: Resultados de la investigación.

Gráfico 9. Apantallamiento del buque con terminales de captación. (esfera para 5 kA).



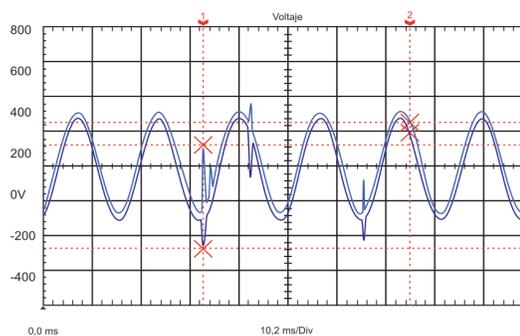
Fuente: Resultados de la investigación.

miento de la embarcación se utilizó el método electrogeométrico. Su aplicación permite concluir que el buque tiene un apantallamiento para descargas eléctricas atmosféricas mayores de 30 kA exceptuando la antena de HF (Gráfico 8).

Para aumentar el nivel de apantallamiento se recomendó instalar terminales de captación tipo Franklin en la parte superior del mástil, en proa y en popa tal como lo muestra el Gráfico 9. Con esta configuración se logra una reducción en el nivel de apantallamiento de 30 kA a solo 5, lo cual representa una disminución en la distribución de probabilidad de impacto directo de 58 a 5% (probabilidades de 30 y 5 kA respectivamente), de acuerdo con la curva de probabilidad de corriente de rayo1 incluida por el Grupo de Investigación Pass de la Universidad Nacional (Younes y Torres, 2002).

Las sobretensiones de origen interno son originadas por maniobras que introducen perturbaciones

Gráfico 10. Perturbaciones generadas por maniobras en el sistema de potencia



Valores del cursor		Datos	
X 1:	33,2ms	Nombre	= Voltaje
X 2:	76,4ms	Fecha	= 26/02/2004
dX:	43,2ms	Hora	= 08:05:44 p.m.
Y 1:	-472 128V	Escala Y	= 200 V/Div
Y 2:	200 256V	Y al 50%	= 0 V
dY:	672 128V	Escala X	= 10,2 ms/Div
		Tamaño X	= 256 (256)
		Maximo	= 368 V
		Minimo	= -472 V

Fuente: Resultados de la investigación.

**Cuadro 1 . Sobretensiones generadas por maniobras de cada uno de los equipos sobre la red eléctrica.**

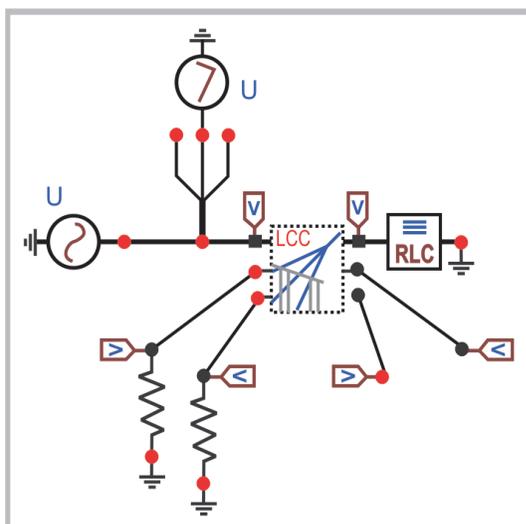
Carga	Magnitud (V)	Duración (ms)	Carga	Margnitud (V)	Duración (ms)
Aire acondicionado	128	0.54	Compresores	616	1.15
Cuartos fríos	40	0.96		316	0.8
Cocina (licuadora)	312	0.48		340	1.32
	254	0.48		340	1.9
	178	0.81	756	1.14	
	208	0.52	Ventiladores	412	1.12
440	0.46	192		0.53	
Unidad de potencia hidráulica	276	0.48		335	0.37
	192	1.56		220	0.65
	448	0.43	260	0.68	
	216	1.2	276	0.86	
Bomba contraincendio	340	0.65	208	0.4	
			252	0.35	

Fuente: *Resultados de la investigación.*

en el sistema eléctrico y pueden llegar a penetrar en los equipos sensibles del buque. En la práctica se realizaron varias mediciones de maniobras típicas de encendido y apagado de cargas, obteniendo señales como la mostrada en el Gráfico 10.

En el Cuadro 1 se muestran los valores de tensión máximos alcanzados en cada una de las maniobras medidas. Para determinar el efecto de estas sobretensiones en la red de datos se simuló en el programa ATP un transitorio característico de los encontrados en las mediciones. El modelo utilizado se muestra en el Gráfico 11.

**Gráfico 11. Modelo de simulación tensiones inducidas en red de datos**



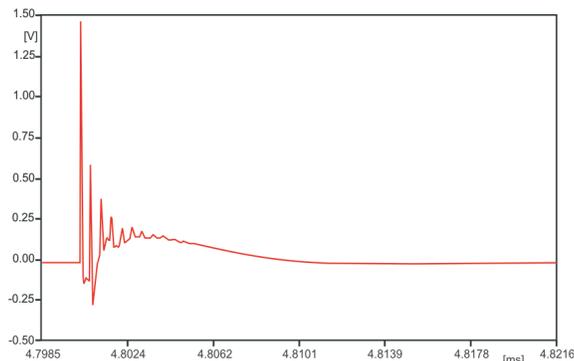
Fuente: *Resultados de la investigación.*

Donde las dos fuentes representan la onda de 60 Hz característica de la red de fuerza sumada a una onda doble rampa que refleja el funcionamiento de los transitorios encontrados. En el bloque de línea de transmisión están representados los conductores de la red de fuerza (tres) y la red de datos (dos) los cuales van por la misma bandeja.

El efecto inductivo de este fenómeno sobre la red de datos es de pocos voltios, los cuales varían dependiendo de las distancias entre los conductores de fuerza y los de datos, cuanto más cercanos estén mayor es la inducción encontrada (Gráfico 12).

Para los equipos sensibles se tomó como valor de inmunidad característica 800 V (Norma IEC 60664-1), lo que corresponde a la categoría III de equipos de tensión de línea-neutro hasta 50 V, por

**Gráfico 12. Tensión inducida en la red de datos por maniobras típicas de las cargas**



Fuente: *Resultados de la investigación.*

lo que teniendo en cuenta los resultados de este estudio y que a la entrada de la red que alimenta los equipos de navegación y comunicación está presente como unidad de respaldo una UPS, el funcionamiento de los equipos sensibles de la embarcación no debe verse afectado por fenómenos transitorios inducidos por maniobras en el sistema de potencia.

## Conclusiones

Al efectuar el análisis de las esferas del método electrogeométrico se encontró que actualmente el buque está apantallado para descargas mayores de 30 kA y puede ser reducida hasta llegar a 5 kA a través de la instalación de pararrayos en proa, en el mástil y en el espejo del buque.

En las perturbaciones generadas por transitorios en la red de fuerza se identifica que dentro del universo de las cargas consideradas, la más importante en cuanto a la generación de estos fenómenos por apertura y cierre son los compresores del sistema de aire acondicionado. En este grupo de mediciones la mayor magnitud de transitorio es 756 V con una duración de 1.14 ms.

Para los equipos sensibles se tomó como valor de inunidad característica 800 V (Norma IEC 60664-1), lo que corresponde a la categoría III de equipos de tensión de línea neutro hasta 50 V, por lo que

teniendo en cuenta los resultados de este estudio, y que a la entrada de la red que alimenta los equipos de navegación y comunicación está presente como unidad de respaldo una UPS, el funcionamiento de los equipos sensibles de la embarcación no se verá afectado por sobretensiones debidas a fenómenos transitorios por maniobras.

Los efectos de la tensión inducida en los conductores, por circulación de corriente de rayo por la estructura de la embarcación después de un impacto en ella, no se encontraron daños para los equipos sensibles, ya que el casco del buque es una unión sólida en acero y por el fenómeno de efecto pelicular posee una profundidad de penetración tal que no permite la entrada de campo electromagnético al interior del buque.

Mediante simulaciones de alternativas de protección interna fueron analizados los puntos más vulnerables de impacto a la embarcación que pudieran causar daños a los equipos sensibles, lo que permitió establecer que los únicos sitios de ingreso directo del impacto tipo rayo son las entradas de las antenas. Debido a esto y a las tensiones que aparecen en la entrada de los respectivos equipos, surge la necesidad de hacer una coordinación de aislamiento con los dispositivos existentes (*Spark Gap*) y evaluar la necesidad de la ubicación de dispositivos adicionales.

## Bibliografía

- Adarme, W. (2001) *Análisis y diagnóstico de la planta telefónica de la Universidad Nacional de Colombia* (CDUN), [proyecto de grado], Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, carrera de Ingeniería Eléctrica.
- García, J. y Mateus, J. (2000) *Diagnóstico de los sistemas de protección contra sobretensiones de origen atmosférico en el sector industrial*, [proyecto de grado], Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, carrera de Ingeniería Eléctrica.
- Asociación de Ingenieros Electricistas y Electrónicos de la Universidad Nacional de Colombia. (1999) *Curso de protecciones contra sobretensiones y sistemas de puesta a tierra*, Bogota, Aieun.
- IEEE 45, Recommended Practice for Electric Installation on Shipboard, IEEE, Std 45-1998.
- Awad, G. y Spinel, M. (2003) *Valoración del sistema de protección contra sobretensiones para la U.S.C.*, [proyecto de grado], Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, carrera de Ingeniería Eléctrica.
- IEC 1024-1, International Standard. Protection of Structures Against Lightning: Part 1: General Principles. IEC, 1990-03.
- IEC 1024-1, International Standard. Protection of Structures Against Lightning: Part 1: General Principles,

- seccion 1: Guide A, Selection of Protection Levels of Lightning Protection Systems. IEC, 1993-8.
- IEC 1312-1, International Standard, Protection Against Lightning Electromagnetic Impulse, Part1: General Principles. IEC, 1995-02.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Protección contra descargas eléctricas atmosféricas*, Bogotá, Icontec, 2004 (NTC 45 52/ICS 91.120.40).
- Jiménez, C. y Ramírez, O., (2004) *Valoración de protecciones contra sobretensiones en embarcaciones que navegan por los ríos colombianos: estudio de caso*, [proyecto de grado], Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, carrera de Ingeniería Eléctrica.
- Johnk, C. (1997) *Teoría electromagnética campos y ondas*, Bogotá, Editorial Limusa.
- Krauss, J. (1986) *Electromagnetismo*, Bogotá, Mc Graw Hill, primera edición en español.
- Loboda, M. (2001) *Compatibilidad electromagnética y protección contra sobretensiones para equipo electrónico conectado a instalaciones de bajo voltaje*, Varsovia, Warsaw University of Technology, Poland, III SIPAT y Universidad Nacional de Colombia.
- Nakwacki, M. y Agüero, M. (2002) *Apantallamiento magnético*, Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Narváez, E. y López, E., (2002) *Metodología para proteger circuitos de baja tensión contra sobretensiones utilizando ferritas*, [proyecto de grado], Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, carrera de Ingeniería Eléctrica.
- NSTM, Naval Ship Technical Manual, Group 300 and 400.
- Palacios, R., Pulido, G. (1989) *Estudio sobre la interferencia y compatibilidad electromagnética para el blindaje de equipos de medida*, [proyecto de grado], Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, carrera de Ingeniería Eléctrica.
- Paredes, J. y Pereira, M. (2001) *Coordinación de protecciones contra sobretensiones para una estación de comunicación*, [proyecto de grado], Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, carrera de Ingeniería Eléctrica.
- Parra, L. y Mantilla, X. (1999) *Análisis de sobretensiones en una instalación de baja tensión*, [proyecto de grado], Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, carrera de Ingeniería Eléctrica.
- Rojas, A. (2002) "Coordinación de aislamiento y protecciones contra sobretensiones, Curso Seguridad y eficiencia en instalaciones eléctricas y de datos", Bogotá.
- Silfverskiöld, S., (2000) *Efectos de los pulsos electromagnéticos de descargas atmosféricas y microondas de alta potencia sobre sistemas eléctricos militares*, Uppsala, Uppsala University.
- Soto, C., Aponte, G., Cadavid, H. y Escobar, A. (2003) *Pruebas de inmunidad electromagnética conducida*, Grupo de Investigación en Alta Tensión Galta, Cali, Universidad del Valle, Sichel.
- Younes, C. y Torres, H. (2002) *Evaluación de parámetros de rayo con mediciones terrestres y satelitales para Colombia*, [tesis de maestría], Bogotá, Grupo Pass, Universidad Nacional de Colombia, Ingeniería Eléctrica.
- Younes, C., Torres, H., Perez, E., Gallego, L., Vargas, M., Montaña, J., Rondón, D., (2003) *Colombian LLS Performance and its Correlation with the Lightning Imaging Sensor-LIS*, Bogotá, Grupo Paas, Universidad Nacional de Colombia, Sichel.

# VERDE ARMADA

## Camuflaje en las Fuerzas Fluviales Origen del verde Armada

Fredy Zárate<sup>a</sup>

### Resumen

La supervivencia de los buques que desarrollan operaciones en los ríos está sujeta a múltiples amenazas, por eso, el sigilo operacional es una forma efectiva y relativamente económica de incrementar este parámetro. Conocer más acerca de los mecanismos que permiten maximizar sus beneficios en cierta medida subvenciona la capacidad de los medios navales disponibles para la ejecución de las operaciones fluviales. Este trabajo explica cómo se definió el color empleado hoy día para los buques y botes de la Infantería de Marina colombiana conocido como 'verde Armada' y plantea, paralelamente, interrogantes y sugerencias para el desarrollo de investigaciones que conduzcan a la caracterización, normalización e identificación de aspectos que potencien esta cualidad y su aporte a la medida general de supervivencia de las fuerzas que patrullan las vías navegables del país.

**Palabras clave:** Supervivencia, sigilo, camuflaje, mimetismo, RAL, ECF, PAF, color, tono, contraste.

### Abstract

*The survival of the ships that carry out river operations is subject to multiple threats, operational stealth is an effective and relatively economic way to increase this parameter, to get a closer look at the mechanisms that allow us to maximize its benefits will allow us to implement actions which increase the survival capacity of the naval means available for the execution of the operations on the river. This article explains how the color known as "Navy Green" employed for the Colombian Navy's Infantry Ships and Boats was defined, raising simultaneously questions and some suggestions for the development of investigations that conduct to the normalization and identification of aspects that allow us to reinforce this quality and its general contribution to the survival of the riverine forces.*

**Key words:** *Survival, Stealth, Camouflage, Mimicry, RAL, ECF, PAF, Color, Tone.*

Fecha de recepción: 25 de abril de 2007

Fecha de aceptación: 30 de abril de 2007

<sup>a</sup> Capitán de Corbeta, ingeniero naval y jefe del Departamento de Arquitectura Naval de Cotecmar.  
arq-nav1@cotecmar.com

## Introducción

Un asombroso fenómeno natural que contribuye a la supervivencia de algunas especies animales y vegetales es denominado en biología mimetismo; gracias a él un organismo llega a parecerse a otro o a su entorno de tal manera que pasa inadvertido y en circunstancias de amenaza puede sobrevivir a esta. El concepto se confunde en ocasiones con el de 'camuflaje', término análogo que proviene de la palabra francesa 'camouflage' que significa "acción y efecto de camuflar" (Drae), es decir, "disimular la presencia de armas, tropas, material de guerra, barcos, etc., dándoles apariencia que pueda engañar al enemigo. Disimular dando a algo el aspecto de otra cosa" (Drae). Si bien en ambas circunstancias se pretende obtener una apariencia distinta a la real, los mecanismos para lograrlo y su resultado los diferencian.

Cuando el propósito es pasar inadvertido al poseer una coloración semejante a la del ambiente circundante engañando los sentidos de los adversarios, se refiere a 'críptico', del griego kryptos, 'oculto', "que se camufla en su entorno mediante su color, olor o su aspecto" (Drae). Es el caso del soldado en el monte, el de los botes o buques de la Armada en el mar o en el río; ni sus formas exteriores ni los patrones de colores empleados en su apariencia exterior pretenden hacerlos semejantes a un tercer objeto, se busca en cambio hacerlos menos visibles a los ojos enemigos, fundirlos en el entorno<sup>1</sup>.

El propósito de este artículo es resumir el trabajo efectuado por el autor durante el año 2002 en La Tagua, departamento del Caquetá, que dio como resultado la implementación del color denominado 'verdearmada' empleado hoy día en las embarcaciones fluviales de la Armada colombiana. Debido a circunstancias como la ubicación geográfica, así como limitaciones asociadas al intercambio y consulta de información, el trabajo mantuvo de principio a fin un carácter eminentemente empírico. Por el tiempo transcurrido desde entonces la mayoría de la información recogida ya no se encuentra disponible o simplemente se ha perdido, de tal manera que este artículo es descriptivo, sin dejar de relatar el proceso que antecedió al resultado. El documento, más que explicar un trabajo concluido, o sustentar la efectividad o

<sup>1</sup> Un ejemplo de mimetismo lo observamos en el caso de los *Phasmatodea* (insectos palo), que se confunden con ramas o palitos en las plantas, a los cuales la selección natural les ha permitido finalmente adquirir su forma exacta.

conveniencia del mismo, propone un punto de partida para desarrollar una o varias investigaciones, más profundas, científicamente estructuradas que conduzcan a una mejor implementación de lo aquí presentado. Aunque se abordará exclusivamente lo relacionado con la percepción visual, se advierte sin embargo, que para ejecutar operaciones sigilosas, es necesario atender otros factores importantes asociados a sentidos tales como el auditivo, olfativo y táctil.

## Antecedentes

### Historia del camuflaje

Siendo el camuflaje una adaptación originada en el reino animal, se advirtió en determinado momento su potencial beneficio en el campo bélico. Se cita que el primer camuflaje lo hizo el ejército francés alrededor del año 1915 (Newark, 2007). Desde ese momento se buscó no solamente ocultar a los combatientes sino engañar a sus adversarios, pues también emplearon muñecos que imitaban soldados. Años más tarde, en la Segunda Guerra Mundial, los patrones y técnicas originales fueron mucho más desarrollados y as mezclas del color mejor logradas así como también se produjo un uso más extendido de esta forma de ocultación; por ejemplo, los buques en el mar empezaron a emplear patrones de color para despistar los comandantes de los "U-Boats" alemanes acerca de la velocidad y curso del buque que perseguían.

En ese tiempo la evolución de las técnicas de camuflaje con propósitos militares continuó y se agilizó como respuesta al empleo de aeronaves para vigilancia e inteligencia de combate que hicieron ver la necesidad de ocultar armas, equipos e incluso edificios. Aparecieron diferentes esquemas, categorías de colores y los tonos grises empleados hasta hoy en los cascos, cubiertas y superestructuras de los buques implementados por casi todas las armadas en el mundo.

Cuando estalló la Segunda Guerra Mundial, la marina de los Estados Unidos se encontró con una total falta de dirección para aplicar los patrones de camuflaje en sus fuerzas anfibas. Así, con el amanecer de las operaciones de desembarco en Guadalcanal<sup>2</sup>, las fuerzas a flote empezaron a pintar

<sup>2</sup> Guadalcanal es la mayor de las Islas Salomón en el suroeste del océano Pacífico. La Batalla de Guadalcanal fue una de las más importantes de la Segunda Guerra Mundial. Tuvo lugar el 7 de agosto de 1942.

sus buques, lanchas de desembarco y botes PT<sup>3</sup> sujetos a operaciones en la costa que enfrentaban fondos de jungla fueron pintados con patrones de camuflaje improvisados en una serie de colores verde y café.

Al iniciar 1943 esos colores fueron oficialmente evaluados y posteriormente, antes de finalizar ese mismo año, nuevamente revisados sobre la base de estudios y la experiencia recogida en las operaciones de combate. Un año más tarde, la Armada desarrolló un esquema de tres verdes y un color café para ser oficialmente empleado por las fuerzas anfibias. Este segundo esquema de camuflaje de la US Navy de la Segunda Guerra Mundial ofreció el rango completo de colores desarrollados e implementados desde 1942 hasta el final de la guerra. En 1944 se efectuó una última revisión en la cual se definieron muchos de los esquemas empleados hoy día por la Armada estadounidense.

### La supervivencia en las fuerzas fluviales

El camuflaje facilita (junto con otras medidas tácticas) el sigilo de un bote en el área de operaciones con lo cual incrementa sus oportunidades de éxito ante una potencial amenaza, como el sorpresivo encuentro con el enemigo, y minimiza las posibilidades de ser visto primero por su oponente o al menos lo dificulta. Esto representa un factor que incide en el aumento de las probabilidades de supervivencia, es decir, de su capacidad de continuar desarrollando en un ambiente hostil la misión designada.

La supervivencia (Vilchez, Curry y Yerkes, 2002) es a su vez función de la susceptibilidad y de la vulnerabilidad. La susceptibilidad es una combinación de factores que determinan la probabilidad de ser alcanzado por una amenaza determinada y se asocia con el sigilo, materializado en el camuflaje por ejemplo, y con su capacidad autodefensiva. Por otra parte, la vulnerabilidad es el alcance de la degradación; es la discapacidad causada al sistema como producto de uno o varios ataques sucesivos, lo que a propósito pone a prueba sistemas redundantes, control de averías y en

general los medios para minimizar la magnitud de los daños causados en el fragor del combate.

**Gráfico 1. Factores que influyen en la supervivencia de una embarcación de combate**



Fuente: AFCON (Advanced Frigate Consortium)

Teniendo en cuenta esta categorización y descomposición jerárquica asociada a la supervivencia, se deduce que para aumentar las posibilidades de sobrevivir a una determinada amenaza es importante potenciar al máximo cada uno de los factores que en ella influyen. Lógicamente cada uno aportará beneficios dependiendo del tipo de misión que enfrentará el bote. La cuantificación del aporte de cada factor de supervivencia incluido el sigilo no se ha determinado todavía en los buques de río, esto podría ser tema de un trabajo de investigación.

Es así como el camuflaje se constituye en la primera barrera de defensa de una embarcación fluvial: mientras no sea identificada no será blanco de un ataque sorpresivo. En este orden de ideas y atendiendo la realidad, aunque no es posible hacer completamente invisible uno de nuestros buques o botes sí es posible maximizar su capacidad de confundirse con el entorno mediante el conocimiento de los factores y mecanismos que influyen en su funcionamiento y efectividad. Una vez detectados, la capacidad defensiva y vulnerabilidad de estos serán los factores que les permitirán sobrevivir a la amenaza enfrentada. A partir de ese momento se recurrirá al segundo renglón de defensa de una embarcación fluvial, su capacidad defensiva-ofensiva, maniobrabilidad y

<sup>3</sup> Los PT, Patrol Torpedo, patrulleros torpederos de 24.4 metros de eslora, fueron botes de alta velocidad utilizados por la marina estadounidense durante la Segunda Guerra Mundial para atacar buques de superficie. Como dato interesante, el presidente de los Estados Unidos John F. Kennedy, siendo teniente de fragata de la US Navy comandó uno de estos botes, el PT-109, el cual fue hundido en 1943.

lógicamente la protección balística del bote, ya que como es lógico, una vez descubierto e identificado un objetivo, su camuflaje pierde efectividad.

## Aspectos técnicos

### Investigación y desarrollo del camuflaje

Investigaciones realizadas en Estados Unidos<sup>4</sup> han mostrado que al conocimiento de los mecanismos físicos y ópticos que permiten hacer más o menos visible un objeto en ciertas condiciones de iluminación y propiedades del color del elemento observado, debe incorporársele el componente psicológico. De hecho, esa tal vez haya sido la razón por la cual los patrones de camuflaje “digital”, (Gráfico 2, derecha), usados ahora, desaparecieron en las décadas pasadas cuando fueron inicialmente desarrollados ya que era difícil tratar de convencer a un soldado que la percepción de los miles de cuadros en su conjunto asemejan mejor la naturaleza que manchas grandes irregulares con combinaciones de uno, dos, tres o más colores y tonos diferentes. Aunque este argumento contradice de lo que dicta la lógica, ahora se emplea en muchas naciones tras décadas de investigación.

Existen tres clases de patrones de camuflaje que permiten reducir las posibilidades de detección: digital: manchas pixeladas; tipo Otan, es decir con manchas de colores (Gráfico 3), y monocromático. Cuando son óptimamente empleados tienen la capacidad de reducir el alcance visual hasta en un rango del 50% en tierra y su efectividad es mayor según el orden en el que fueron nombrados. Aunque esta información es útil para clasificar y entender las capacidades de un sistema de camuflaje en tierra, lamentablemente en el río esta tarea es mucho más difícil y la efectividad menor debido a la reflexión de la luz en el agua y por las olas que genera el paso de los buques, siendo mayor la de los botes de planeo como los ECF<sup>5</sup> en contraste con los buques tipo PAF<sup>6</sup> de tercera generación cuyas formas del casco han sido optimizadas para reducir las olas generadas a su paso. Sería interesante además de útil elaborar una investigación sobre el tema del camuflaje en el río involucrando aspectos físicos como la teoría del color y la óptica, y psicológicos como la percepción visual.

<sup>4</sup> El Dr. Timothy R. O'Neill, teniente coronel retirado del Ejército de los Estados Unidos, profesor de Engineering Psychology en West Point, ha trabajado e investigado el tema de camuflaje.

<sup>5</sup> ECF: Elemento de combate fluvial.

<sup>6</sup> PAF: Patrullero de apoyo fluvial.

### Empleo del camuflaje en la Armada colombiana

Por el tipo de operaciones que ejecuta la Armada, para aumentar el sigilo operacional se persiguen básicamente los siguientes fenómenos dependiendo del caso. Por lo común no se emplean de manera simultánea pues son prácticamente excluyentes:

1. Ocultamiento o invisibilidad. Mezclar el buque completamente con el ambiente que lo rodea y el fondo (el agua del mar o río, y el cielo por ejemplo).
2. Confundir o engañar. No necesariamente esconde el buque pero el objetivo es hacer sentir al enemigo que está viendo algo diferente a lo que realmente es, otro buque por ejemplo, de tal forma que la identificación sea más difícil.

Gráfico 2. Camuflaje USMC WWII

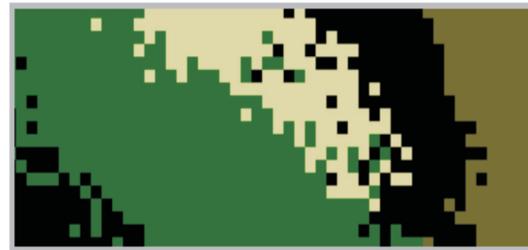


Fuente: <http://www.xs4all.nl/~gurth/afv/uniforms.html>.

El camuflaje de los medios fluviales de la Armada e Infantería de Marina colombiana, correspondió durante un tiempo prolongado a la adopción del gris tradicionalmente utilizado en los buques navales, sobre todo para los fluviales mayores y, por otra parte, a la recreación de los patrones de los uniformes de los soldados de la Infantería de Marina, que van desde el camuflado llamado por el personal tipo “tigrillo”, (Gráfico 2)<sup>7</sup>, pasando por los patrones de cuatro colores incluyendo negro en manchas woodland (Gráfico 3), y variaciones de este eliminando el tono café, así como la utilización de esquemas planos de una sola tonalidad con diferentes intensidades de verde. En las siguientes gráficas se aprecian ejemplos de patrones refe-

<sup>7</sup> El cual parece debe su origen a los infantes de Marina de los Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial, posteriormente adoptado y empleado por las Fuerzas Militares colombianas hasta inicios de los años noventa. En la página de internet [<http://www.xs4all.nl/~gurth/afv/uniforms.html>] se encuentra información sobre camuflaje de vehículos militares y uniformes empleados por diferentes Fuerzas Armadas.

**Gráfico 3. Camuflaje tipo Bosque, “Woodland Green” y un patrón similar pixelado**



Camuflado de clima frío empleado por las Fuerzas Armadas estadounidenses. Se emplean cuatro colores: una base arena con verde y café rojizo pintado en grandes manchas y otras negras de menor tamaño. Los colores varían dependiendo del material de la tela del uniforme.

Fuente: *Archivo del autor.*

renciados que han servido de “inspiración” para los camuflajes empleados en buques y botes fluviales de la Armada nacional. Si bien es cierto que algunos de los esquemas representan colores encontrados frecuentemente en selvas tropicales, las condiciones del clima, iluminación, vegetación predominante, color del agua y de la orilla no corresponden en estos casos al de los patrones adoptados, lo que disminuye su efectividad. Tradicionalmente se han observado casos como el del hangar flotante (Gráfico 4), cuyo color lo hace mucho más visible en lugar de confundirlo con el entorno. Este caso ejemplifica el concepto de que el color no es tan importante como la saturación, es decir la cantidad de iluminación que posea. El mismo color con un tono de saturación mayor (más oscuro), proporcionaría un menor contraste con el fondo independientemente de que su coloración no sea igual al promedio de su entorno.

**Gráfico 4. Hangar Flotante para ECF.**



Fuente: *Archivo del autor.*

Situaciones como esta, permitieron al autor plantearse interrogantes sobre la efectividad de los sistemas de camuflaje empleados en algunos buques fluviales de la Armada y la posterior definición de una alternativa mejor sustentada así como su aplicación en un caso práctico como se explicará más adelante.

**Gráfico 5. Buque de río con pintura de buque de mar.**



Fuente: *Archivo del autor.*

Las anteriores fotografías, tomadas hace más de cinco años, ilustran tres esquemas autorizados de camuflaje de embarcaciones fluviales, sin embargo el autor fue y continua siendo escéptico sobre la efectividad de los mismos desde el punto de

vista del correcto aprovechamiento del beneficio operacional que proporciona una buena selección de colores de camuflaje. Aunque en la actualidad la mayoría ha reemplazado los colores ilustrados en las fotos por el ‘verde Armada’, continúa habiendo excepciones sobre todo con los botes más pequeños y algunas estructuras mayores como por ejemplo en el hangar flotante del Gráfico 4.

Gráfico 6. LR128 ARC “Carlos Galindo”



Fuente: Archivo del autor.

Gráfico 7. Buque Nodriza, PAF de primera generación.



Fuente: Cotecmar.

### Observaciones

La situación planteada motivó el desarrollo del trabajo de la definición de un nuevo color para las fuerzas fluviales y se complementó con la observación directa a diferentes buques y botes sobre todo de la Fuerza Naval del Sur, como los cañoneros ARC “Arauca”, ARC “Leticia”, ARC “Rioacha”, buques pintados con el color gris naval, RAL<sup>8</sup> 7001, y las nodrizas livianas ARC “Higaraparaná”, ARC “Cothue”, ARC “Sejeri” y LPRs pintadas con diferentes variaciones del camuflado, normalmente empleando esquemas con patrones de cuatro colores: negro RAL 9005, rojo óxido RAL 8004, verde oscuro RAL 6005 y verde claro RAL 6002.

<sup>8</sup> El RAL es un código normalizado que clasifica los colores mediante una codificación numérica. RAL significa *Reichsausschuss fuer Lieferbedingungen*, fue desarrollado en Alemania por el Deutsches Institut für Guetesicherung und Kennzeichnung.

Gráfico 8. Contraste con la distancia



Fuente: Armada Nacional.

Gráfico 9. LPR con verde armada, medio día



Fuente: Archivo del autor.

Las observaciones efectuadas a los buques de la Fuerza Naval del Sur permitieron identificar aspectos aplicables tanto en ese momento como ahora:

- El gris no representa un color útil en embarcaciones fluviales; como se explicó antes, el empleo de ese color en buques marítimos se remonta a la Segunda Guerra Mundial. Las cubiertas gris oscuro constituyen una desventaja para los observadores aéreos hacia el mar por la coloración percibida desde esa posición del fondo oscuro del océano. En el río esto no es aplicable ni por el color ni por la saturación del mismo, porque el fondo del río es más claro en comparación con el del océano dada su cercanía con la superficie del agua.
- El patrón camuflado no asemejaba los colores ni del río ni de la vegetación circundante.
- Los colores oscuros como el negro tienen una particularidad interesante y es que aunque ausentes en el mundo real es la percepción del negro la que da la sensación de profundidad. Sin embargo el camuflaje con manchas negras no logra esa apariencia y por lo tanto es inefectivo,

de hecho se logra lo opuesto haciendo más notorio el buque a lo lejos, efecto que aumenta por el brillo del agua del cauce de los ríos el cual se incrementa con la distancia.

- La visibilidad de los botes se incrementa por la ola que generan, de esta forma, pintarlos con tonos oscuros es inútil.
- Los colores oscuros generalmente son más visibles.
- Con la luz del sol los objetos aparecen más oscuros sin importar el color que se haya aplicado.
- A distancias superiores al ancho del cauce del río, los tonos claros tienden a disminuir su contraste con el entorno mientras que el buque permanece visible por los tonos oscuros presentes.
- Los patrones oscuros incrementan la visibilidad del buque durante la noche.
- Contrario a lo que se cree, el blanco es el tono menos visible en una noche oscura.

## Implementación del verde armada

### El ARC 'Filigonio Hichamón'

En 2001 con el nacimiento de Cotecmar, la anterior planta de Puerto Leguízamo, participó junto con el Departamento Técnico de la Base Naval de allí, BN31, en el proyecto de construcción de un buque nodriza "liviano" que adoptó el nombre del que reemplazó, el antiguo ARC Hichamón, el cual era básicamente un bongo autopropulsado con una estructura sobre cubierta que le permitiría desempeñar algunas tareas de apoyo y transporte de tropa por el cauce del río Caquetá. La nueva 'PAF liviana', además del nombre de su antecesora heredó una buena cantidad de acero del casco desmantelado que se empleó para disminuir costos de la producción.

El ARC Hichamón, (NF141) permitió implementar una solución práctica al problema de camuflaje detectado mediante el estudio de un nuevo color exterior para incrementar el sigilo del buque, fue así como se analizó el color del río Caquetá durante distintas horas del día; con esta información se prepararon varias muestras de color<sup>10</sup> como se

<sup>9</sup> Los denominados PAF liviana representan buques de río diferentes al proyecto Nodrizas; la mayoría, como el ARC Hichamón, fueron construidos in situ.

<sup>10</sup> Por trabajadores del entonces astillero de Cotecmar sede Puerto Leguízamo. Aquí es justo reconocer la gran ayuda suministrada por el señor Pedro Nel Díaz, (carpintero ARC) quien preparó para

explica más adelante, aplicándose varios esquemas a bordo. El resultado fue el tono usado en el ARC Hichamón, que recibió el nombre comercial de "verde mate de la Armada" referencia 111307-T, asignada por el fabricante de la pintura. Aunque la pintura recibida nunca fue mate como se propuso inicialmente, terminó adoptándose y pasó a ser simplemente el color 'verde armada'.

### Metodología para la selección de colores

El proceso metodológico empleado para la preparación de las muestras se resume en la toma de un número de fotografías digitales al río, a diferentes horas durante varios días, que luego fueron llevadas a la oficina en Puerto Leguízamo y descargadas en el computador; este sirvió de herramienta para establecer la concentración de colores primarios en cada caso utilizando la información RGB<sup>11</sup> de las imágenes procesadas. Al obtener la concentración de los tres colores y un valor de saturación se procedió a recrear el color desarrollando mezclas de pintura para emular los colores de las fotografías. Aunque las primeras muestras fueron aplicadas en papel con resultados poco satisfactorios tal vez por la calidad de los preparados, al adquirirse un poco de experiencia y siendo mejores los resultados se llevaron algunas de estas mezclas a La Tagua para ser aplicadas al buque y verificar el contraste que generaban con el entorno. Se pintaron así algunas secciones de la cubierta hasta el techo, es decir áreas de aproximadamente dos metros de alto por entre uno y dos metros de ancho.

Las primeras pruebas fueron un poco desalentadoras por la percepción que se tenía de la necesidad de emplear un color claro; los colores claros una vez aplicados resultaron muy claros, y oscureciendo el mismo color se producían tonos diferentes al deseado. Después de varias semanas de intentos insatisfactorios se llegó a la conclusión que tampoco era buena idea emular exactamente el color de una hora determinada del día. Alguna información disponible en el momento proponía que se debía

el autor las muestras y efectuó su aplicación durante el desarrollo del trabajo y estudio de los colores.

<sup>11</sup> RGB, del inglés *red, green, blue* (rojo, verde, azul) se refiere a la composición del color en cuanto a la intensidad de los colores primarios con los cuales se obtiene. Se basa en el modelo de síntesis aditiva, con el que es posible representar un color mediante la mezcla por adición de tres haces de luz primarios. No es la mejor forma de hacer este trabajo porque plantea colores cuya mezcla resulta en blanco (este método es empleado por los televisores para la recreación del color). Sin embargo, sirvió como referencia para entender las proporciones de color requeridas.

considerar el concepto del color del ambiente es decir lo que intuitivamente se interpretó como una especie de promedio, un tono que se ajustara mejor a la mayoría de las condiciones, un color óptimo.

Fue así como poco a poco se fue migrando de un color verde claro a un pardo semioscuro que no lucía tan oscuro una vez aplicado pero que tampoco era tan claro para resultar artificial a la mirada desprevenida, y no llamaba la atención arruinando de paso el efecto deseado. Se pudo comprobar y optimizar el tono acudiendo a los tripulantes del buque como observadores en diferentes ubicaciones y distancias.

### Aspectos considerados para la selección del esquema del ARC Hichamón

El ocultamiento se produce cuando el color del buque iguala al fondo que lo rodea. Cuando un buque es oscuro resulta menos visible en condiciones con baja luz, lo opuesto sucede cuando el tono tiende a ser claro, en esta condición, sin importar el color del mismo, tenderá a verse más en condiciones de poca luz.

En ambientes donde predomina la luz difusa como sucede durante buena parte del año en la selva amazónica y en el lugar en donde se produjo la construcción del ARC Hichamón, la ocultación se persiguió mediante el empleo de un patrón de color verde pardo semioscuro similar al RAL 7013, el cual permite la detección mucho más tarde que el patrón al que reemplazó minimizando el rango en el cual se produce la visibilidad del buque. Aunque se tuvo el apoyo de los tripulantes y trabajadores para a evaluación de los tonos aplicados, lamentablemente no quedaron registrados datos que relacionen el tiempo de detección comparando diferentes esquemas; este será un aspecto que deberá abordarse en un proyecto de desarrollo de camuflaje para buques de la ARC que emplee metodologías racionales para la selección y valoración de los camuflajes óptimos para las misiones y tareas de la fuerzas fluviales.

Para la selección del color óptimo del ARC Hichamón, se tenía una amplia gama de alternativas determinadas por la distancia a la cual se quisiera reducir el contraste con el fondo, ya que en condiciones ideales, el camuflaje es diseñado de manera que el tono efectivo del buque se logre para la misma distancia que se visualice el tono real del ambiente. Es aquí en donde se encontró uno de los

principales problemas para su ocultación en el río ya que tanto el color del río como el de la orilla y la vegetación circundante, sumados a los continuos cambios de luz durante el día, dificultaron la selección precisa de un color que se adaptara mejor a todo lo anterior. La conclusión fue que tal cosa no existía.

Gráfico 10. ARC Hichamón (2002)

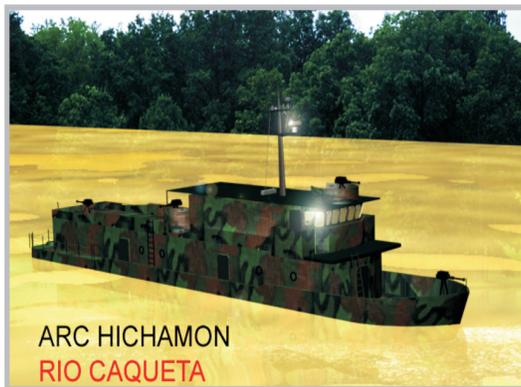


Fuente: Archivo del autor.

En determinado momento, cuando se había acumulado una amplia variedad de tonos posibles se empezó a entender la complejidad del asunto tornando confusa la selección de una sola alternativa 'ganadora'. En ese momento se tomó la decisión de optimizar la condición menos favorable de operación del buque, es decir, cuando es víctima de un ataque sorpresivo. Aunque en esta situación existen muchas variaciones se sabe que la ventaja de los atacantes está en una posición más elevada que el buque, por lo anterior, el posible ángulo desde donde es observado cobró mayor importancia. Si se ve desde el nivel del agua abordo de un bote pequeño por ejemplo, el fondo del buque será la selva circundante en un gran porcentaje, el río en otro porcentaje mayor y el cielo en un porcentaje menor. Si se está desde una posición elevada, el mayor contraste se hará con el río y en menor proporción con las orillas y vegetación circundante, todo dependerá de la altura del observador. Esta fue la motivación principal de reemplazar el esquema camuflado tradicional con un color plano que asemeja la coloración del río con luz difusa e incluye el color verdoso del follaje en el cauce así como un tono rojizo para incluir los efectos de la luz durante el amanecer<sup>12</sup>. Se tuvieron en cuenta esta y otras consideraciones como las siguientes:

<sup>12</sup> Como es conocido la reflexión de la luz solar en la atmósfera produce una difracción que da como resultado un tono rojizo al cielo en ciertas horas del día especialmente al anochecer y al amanecer.

Gráfico 11. Impresiones artísticas del ARC Hichamón con camuflado convencional y color verde pardo



Fuente: Archivo del autor.

- Contrario a lo que sucede en el mar, el color más oscuro permite la visibilidad para observadores aéreos en cualquier condición de tiempo por el bajo fondo de los ríos (que no es muy oscuro), además es relativamente menos visible para observadores ubicados en la superficie por los sedimentos que transporta el agua que le dan una coloración turbia a la superficie.
- El camuflado es inefectivo en contra de fuentes concentradas de luz como el sol o reflejos de este.
- El camuflado con manchas de colores beneficia más a las embarcaciones pequeñas que a las grandes.
- El oleaje y el humo neutralizan y disminuyen las ventajas obtenidas con el camuflaje.
- El camuflaje con patrones de las primeras nodrizas, que incluye color negro y tonos verde oscuro, hace más notorio el buque a grandes distancias permitiendo la detección temprana por el contraste con el cielo y el agua, que lo hacen ver más oscuro que el entorno.
- A diferencia de lo que sucede en buques, el tamaño de los botes como los ECF puede facilitar su ocultamiento utilizando tonos oscuros, sobre todo cuando navegan junto a las orillas (Gráfico 13), sin embargo el oleaje generado incluso en velocidades bajas es una fuente potencial de detección, y el ruido de sus motores fuera de borda su principal desventaja.

Una vez identificado el color semejante al río Caquetá se optimizó para disminuir su contraste durante diferentes horas del día. Esta última modificación culminó con su aplicación en el buque (Gráfico 10).

A partir de la inauguración del buque en marzo de 2002, se inició la implementación del color en las nodrizas y otras embarcaciones de la Armada que hasta ese momento habían sido pintadas empleando diferentes combinaciones de camuflado de tres colores mientras que otras usaban el gris naval estándar para los buques de mar, ejemplo los cañoneros de la FNS. Por recomendación del Comando de la Armada Nacional a través de la Jefatura de Material Naval, desde 2002 el verde armada se convirtió en el color predominante que viste la mayoría de las embarcaciones fluviales militares en Colombia.

#### La ARC hoy

La Armada colombiana posee diferentes tipos de embarcaciones fluviales: PAF, LPR<sup>13</sup>, ECF, PRF, MiniATC<sup>14</sup>, PAF livianas, cañoneros de río, entre otros y cada uno ha empleado diferentes tipos de esquemas de pintura exterior. A pesar de haber una referencia oficial para la aplicación de pintura en los buques de la Armada, el Manual de Material Naval ya se encuentra desactualizado y casi en desuso. Allí se especifican los colores oficiales que deben portar los buques de la institución, y define los colores que se han de emplear referenciando la carta de colores normalizada RAL.

En septiembre de 2001 se efectuó una revisión de esos esquemas lo que llevó a la publicación del Boletín 10 de la Jefatura de Material Naval en el cual se establecieron los esquemas revisados de pintura para los buques e instalaciones terrestres. En él no aparece asignación de color para buques o

<sup>13</sup> LPR: Lancha Patrullera de Río.

<sup>14</sup> Mini ATC: Mini-Armored Troop Carrier (ATC).

botes fluviales diferentes a las nodrizas a las cuales se les asignó camuflaje con tres colores.

**Gráfico 12. PAF de tercera Generación, NV**



Fuente: *Cotecmar*.

**Gráfico 13. El ECF genera oleaje a su paso a velocidad moderada.**



Fuente: *Armada Nacional*.

## Conclusiones

Desde el punto de vista holístico el camuflaje desempeña un papel fundamental en el análisis y el potencial de supervivencia en una embarcación de combate, siendo su valor incrementado por la correcta definición de las condiciones de operación.

Es muy difícil diseñar un esquema para todas las condiciones, se puede en cambio utilizar uno que proporcione la mejor efectividad en buena parte del espectro de condiciones en las cuales deberá operar determinado buque.

Una vez detectado el buque no sirve más el camuflaje, lo mismo ocurre si su implementación no acompaña otras medidas tácticas que contribuyan al sigilo como la luz, el ruido, el oleaje creado y las maniobras empleadas en los desplazamientos.

Existe improvisación en la aplicación del camuflaje en algunas embarcaciones fluviales, aunque ahora sucede en menor proporción que antes.

No existe mucha información sobre el tema, esto contribuye a que se terminen improvisando soluciones en el área de operaciones.

Tampoco existen medidas que permitan valorar al efectividad de una determinada selección de camuflaje; después de varios años de puesto en circulación el esquema de color verde armada, valdría la pena hacer un estudio profundo de la efectividad del mismo, sobre todo porque su definición se concibió en las condiciones de operación en el río Caquetá.

## Recomendaciones

Es paradójico el poco valor que tradicionalmente se le ha dado a esta barrera defensiva, subestimando su capacidad de protección, pudiendo aprovecharse todo su potencial si se llegan a conocer mejor los mecanismos que influyen en su desempeño como las consideraciones físicas y la percepción humana. Por esta razón, aunque la protección balística de los buques PAF ha demostrado una alta efectividad, probada ya en combate en varias oportunidades, la mejora en las capacidades de supervivencia de estos y otros buques deberá abordar avances en otros aspectos como el camuflaje.

El tema es amplio. Potenciar su efectividad incrementa las oportunidades de supervivencia en combate por lo que resulta provechoso explorar el tema más a fondo tras la búsqueda de mejores resultados operacionales. En ese orden de ideas, el autor propone efectuar trabajos que exploren los siguientes temas aunque no los limita exclusivamente a:

- Teoría del color y la percepción humana del mismo.
- Mecanismos físicos y psicológicos del ocultamiento.
- Incidencia de la distancia y el ángulo del observador en la percepción del color.
- Medición de la capacidad y rapidez para la identificación de un color determinado valorando también la magnitud de su contraste con el entorno.
- Definición de las ventajas de emplear un solo color o una mezcla de varios y cuántos.

- Percepción humana del color negro y por qué luce artificial.
- Condiciones de iluminación en nuestras selvas y áreas de operación y su influencia en la percepción del color.
- Porcentaje de aporte del camuflaje a la supervivencia en un medio fluvial.
- Definición de las medidas para poder cuantificar la capacidad de los patrones actualmente empleados de minimizar la detección y visibilidad de los buques y botes en el río.
- Estado del arte de este tipo de tecnologías y qué usan países con responsabilidades fluviales importantes como en el caso de la Armada colombiana.
- Efectividad de los colores actualmente empleados por las fuerzas fluviales y la efectividad del verde armada.
- Revisión y actualización de la normativa sobre el tema para definir nuevos patrones y revisión de los existentes. Sería interesante desarrollar un proyecto de investigación que entregara como resultado una carta de colores normalizada para ser aplicada en diferentes condiciones y que estableciera parámetros de medición para la evaluación de su efectividad.
- Generación de guías e instructivos para facilitar su implementación en el área de operación.

## Referencias

- Armada Nacional de Colombia, *Manual de material naval*, documento, (s. d.).
- Armada Nacional de Colombia (2001, septiembre) 'Boletín n.º 10', Jefatura de Material Naval, ARC, Bogotá.
- Real Academia Española (2001). *Diccionario de la lengua española*, 22a ed., 2 tomos, Madrid, Espasa.
- Ejército de los Estados Unidos (1975, diciembre) 'Boletín Técnico del ejército de los Estados Unidos, TB 43-0147: Color, Marking and Camouflage Patterns Used on Military Equipment', (s. e.), (s. l.).
- Newark, Tim (2007) *Camouflage*, Londres, Thames & Hudson.
- 'Mimetismo' (2007) [en línea] disponible en <http://es.wikipedia.org/wiki/Mimetism>, recuperado el 22 de mayo de 2007.
- 'Tabla de Colores RAL' (2007) [en línea] disponible en [http://docs.google.com/View?docid=dc6372q\\_7fdb7m5](http://docs.google.com/View?docid=dc6372q_7fdb7m5), recuperado el 22 de mayo de 2007.
- 'Urban's Color Reference Charts - Part I' (2007) [en línea] disponible en <http://www.ipmsstockholm.org/colorcharts/colorcharts.asp>, recuperado el 22 de mayo de 2007.
- 'Uniformes Camuflados' (s. f.) [en línea] disponible en <http://www.xs4all.nl/~gurth/afv/merdc.html>, recuperado el 22 de mayo de 2007.



# NORMA EDITORIAL

## Norma editorial a los autores para la presentación de trabajos

### Temática

La revista *Ciencia & Tecnología de Buques* acepta para su publicación contribuciones originales a la ingeniería sobre temas relacionados con diseño de buques, hidrodinámica, dinámica del buque, estructuras y materiales, vibraciones y ruido, tecnología de la construcción naval, ingeniería marina, normativa y reglamentación, ingeniería oceánica e infraestructura portuaria, que sean resultado de proyectos de investigación científica y tecnológica. Cada artículo será sometido a consideración del Consejo Editorial de la revista *Ciencia & Tecnología de Buques*, el cual decidirá acerca de la pertinencia de su publicación.

### Tipología

La revista *Ciencia & Tecnología de Buques* acepta publicar artículos clasificados dentro de la siguiente tipología (Colciencias 2006):

- *Artículo de investigación científica y tecnológica.* Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos terminados de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
- *Artículo de reflexión.* Documento que presenta resultados de investigación terminada desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
- *Artículo de revisión.* Documento resultado de una investigación terminada donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias.

### Formato

Todos los artículos deben ser remitidos al editor de la revista *Ciencia & Tecnología de Buques* acompañados de una comunicación del autor con la solicitud de publicación. Cada artículo debe ser redactado utilizando procesador de texto Microsoft

Word a espacio sencillo y enviarse en medio magnético. La redacción de artículos no debe exceder 9.000 palabras (7 cuartillas). El archivo debe contener todo el texto y cualquier tabulación y ecuaciones matemáticas; no deben incluirse gráficos en este archivo. Adicionalmente, deben crearse todas las ecuaciones matemáticas usando el Editor de Ecuaciones incorporado en Microsoft Word. No se deben incluir gráficas en el archivo de texto.

### Contenido

Cada artículo debe contener los siguientes elementos, los cuales deben aparecer en el mismo orden mostrado:

#### Título

Debe ser conciso, con las palabras apropiadas para brindar al lector una idea somera del contenido del mismo.

#### Autor y afiliaciones

El nombre del autor debe estar compuesto de la siguiente manera: nombre, inicial del segundo nombre y apellidos. Las afiliaciones del autor deben estar compuestas de la siguiente forma, y en el orden mostrado:

- Empresa o institución (incluyendo al departamento o división a la que pertenece).
- Dirección postal.
- Ciudad, (Provincia/Estado/Departamento).
- País
- Teléfono, fax, y dirección electrónica
- Debe especificarse el nombre y dirección electrónica de un autor corresponsal

#### Resumen

Es un escrito corto no mayor a ciento cincuenta (150) palabras que contiene el objetivo del trabajo, su alcance, y los resultados. Debe estar redactado de tal manera que en él aparezcan las ideas claves del documento.

#### Palabras clave

Se deben identificar palabras y/o frases que faciliten la recuperación de ideas relevantes en un índice.

## Introducción

El texto debe ser expositivo, y en él deben predominar la claridad, sencillez, precisión y originalidad a la hora de presentar las ideas. Asimismo, debe estar organizado en una secuencia lógica de partes o secciones, con subtítulos que den claridad y guíen al lector. La primera parte del documento es la introducción cuyo objetivo es presentar el tema, los objetivos y una justificación de porqué se eligió. Igualmente, debe contener las fuentes consultadas y la metodología empleada así como una breve alusión al estado de la investigación si es del caso, y la forma como está estructurado el resto del artículo.

## Cuerpo del artículo

Consta de marco teórico que sustenta el estudio, el plantemiento del tema, el estado de la cuestión con su análisis, los resultados obtenidos y las conclusiones.

## Ecuaciones, tablas, cuadros y gráficos

Todos estos elementos deben estar enumerados por orden de aparición de acuerdo con su tipo y tener a pie es decir exactamente debajo del cuadro, gráfico o fotografía, la fuente de donde se tomaron los datos y quien lo elaboró.

Las ecuaciones se deben enumerar hacia el extremo derecho de la columna que lo contiene, en la misma línea y entre paréntesis. En el cuerpo del texto se deben referenciar como "(Ecuación x)". Cuando la referencia a una ecuación comienza una oración debe hacerse así: "La ecuación x".

Las ecuaciones deben ser escritas de manera que se pueda distinguir claramente las mayúsculas de las minúsculas, y tener cuidado para evitar confusiones entre la "l" (le) minúscula y el numeral uno, o entre el cero y la "o" minúscula. Todos los subíndices, superíndices, letras griegas, y otros símbolos deben estar indicados claramente. En todas las expresiones y los análisis matemáticos, debe explicarse cualquier símbolo (y la unidad en que se mide) no definido previamente en la nomenclatura. Si el trabajo es sumamente matemático en su naturaleza, puede ser recomendable desarrollar las ecuaciones y fórmulas en apéndices en vez de incluirlos en el cuerpo del texto.

Los gráficos (dibujos lineales, cuadros, fotografías, etc.) se deben enumerar de acuerdo con su orden de aparición, y tener una nota que incluya el número del gráfico entre paréntesis y una breve descripción. Al igual que las ecuaciones, en el cuerpo del texto

se deben referenciar como "(Gráfico X)", y cuando la referencia a un gráfico comienza una oración debe hacerse así: "El Gráfico x".

Los cuadros, gráficos e ilustraciones, deben enviarse en formato de archivo vectorial modificable (Microsoft Excel, Microsoft Power Point y/o Microsoft Visio). Las fotografías, deben enviarse en archivos de formato Tif, separados del documento principal en una resolución mayor a 1000 dpi.

## Notas de pie de página

Se recomienda su uso cuando se requiera identificar información adicional. Se deben numerar en orden de aparición a lo largo del texto.

## Reconocimiento

Los reconocimientos se pueden hacer a personas o a instituciones de quienes se considera han hecho una contribución importante, y no han sido mencionados en otra parte del artículo.

## Referencias bibliográficas

### Citas

Pueden realizarse de dos formas: al final del texto citado, en cuyo caso se colocarán entre paréntesis el apellido del autor seguido de coma, el año de publicación seguido de coma y el número de la página, de la siguiente manera: "Con la modernidad se inició un afán de exactitud, de precisión y de demostración 'segura' de todos los ámbitos de la vida humana" (Cianciardo, 2004, p. 30).

La otra forma es: Cianciardo (2005, p.30) manifiesta que "Con la modernidad se inició un afán de exactitud, de precisión y de demostración 'segura' de todos los ámbitos de la vida humana".

### Lista de referencias

La presentación de referencias bibliográficas a las fuentes originales para el material citado se deben enumerar todas al final del artículo en orden alfabético y de acuerdo con los siguientes parámetros:

### Libros

Apellido del autor seguido de coma, inicial(es) de nombre(es) seguido de punto, entre paréntesis el año de publicación del libro seguido de coma, título de la publicación en bastardilla y sin comillas seguido de coma, ciudad donde se publicó seguido de coma, y nombre de la editorial sin abreviaturas como Ltda. S. A. ni la palabra "editorial".

*Forma básica:*

Apellido, I. N. (año), *Título de la publicación*,  
Ciudad, Editorial.

*Ejemplo:*

Echeverry, J. C. (2002), *Las claves del futuro. Economía y conflicto en Colombia*, Bogotá, Oveja Negra.

El autor debe recordar que los títulos de los libros en inglés, a diferencia del español van con todas sus letras iniciales en mayúscula, salvo los conectores. Por ejemplo:

Kirzner, I. M. (1996), *Perception, Opportunity and Profit*, Chicago, University of Chicago Press.

En caso de más de un autor se separan con comas y el último con “y” o “e” según el caso. Si son más de cuatro autores se pone el apellido e iniciales del primero y se escribe la abreviatura “et al.”.

*De un autor corporativo*

Se escribe completo el nombre de la entidad y se siguen las demás normas.

*Forma básica:*

Institución (año), Título de la publicación,  
Ciudad, editorial.

*Ejemplo:*

Fundación Compartir (2005), *Nuestros mejores maestros. Experiencias educativas ejemplares*, Bogotá, la Fundación.

Nótese que si la misma entidad es la que edita el libro, se repite, o se pone su sigla o acrónimo. En caso de que el trabajo lo haya hecho una empresa editorial diferente va como el primer ejemplo.

Cuando un libro o cualquier publicación tienen por autor una entidad estatal se pone primero el nombre del país.

*Forma básica:*

País, entidad estatal (año), *Título de la publicación*, Ciudad, Editorial.

*Ejemplo:*

Colombia, Departamento Nacional de Planeación (2003), *Construcción de un futuro para Colombia desde sus territorios*, Bogotá, DNP.

**Artículo de revista**

Apellido del autor seguido de coma, inicial(es) de nombre(es) seguidos de punto, entre paréntesis el año y meses separados por un guión. Si la publicación especifica días, también se ponen. Sigue coma, el título del artículo en redondas y entre comillas sencillas, la palabra “en” seguida del nombre de la publicación en bastardilla y sin comillas, sigue coma, luego el año, el volumen, (si los hay) el número y las páginas que abarca el artículo.

*Forma básica:*

Apellido, I. N. (año, mes-mes), ‘Título del artículo’, en *Nombre de la publicación*, año, v, n.º xx, pp. yy-zz.

*Ejemplo:*

Samper, D. (2006, septiembre-noviembre), ‘La lengua está quebrada... ¿con qué la curaremos?’, en *Número*, n.º 50, pp. 30-32.

*Sin autor forma básica*

*Nombre de la publicación*, (año, fecha-fecha), ‘Título del artículo’, n.º xx, pp. yy-zz.

*Ejemplo:*

*Semana* (2006, 31 de julio-7 de agosto) ‘Odisea en La Macarena’, n.º 1.265, pp. 40-43.

**Trabajo de grado**

Apellido del autor seguido de coma, inicial(es) de nombre(es) seguido de punto, entre paréntesis el año que presentó o sustentó la tesis seguido de coma, título del trabajo en bastardilla y sin comillas seguido de coma; entre corchetes y en minúscula se escribe el tipo de trabajo (monografía de grado, tesis de maestría, etc.), sigue coma, ciudad donde está la universidad seguida de coma, nombre completo de la universidad seguido de coma y nombre completo de la carrera.

*Forma básica:*

Apellido, I. N. (año de sustentación), *Título del trabajo*, [tipo de trabajo], Ciudad, Universidad, Programa académico.

*Ejemplo:*

Salazar, N. (2006), *Inseminación artificial en jaguares*, [trabajo de grado], Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Carrera de Veterinaria.

### Internet

Apellido del autor seguido de coma, inicial del nombre seguido de punto, entre paréntesis el año de publicación, es decir, cuando se “colgó” en la red (si lo hay) seguido de coma, título en redondas y comilla sencilla seguido de coma, entre corchetes la expresión “en línea” seguido de coma, la expresión “disponible en” con dos puntos, la dirección completa de la página, sigue coma, la palabra “recuperado” seguida de dos puntos y la fecha completa de cuando se consultó.

#### Forma básica:

Apellido, I. N. (año), ‘Título del artículo’, [en línea], disponible en: <http://www.direccioncompleta.com>, recuperado: dd de mes de año.

#### Ejemplo:

*Semana* (2006, 11 de noviembre), ‘Conocer la sociedad nacional en su reinado’, [en línea], disponible en: [http://www.semana.com/wf\\_InfoArticulo.aspx?IdArt=98125](http://www.semana.com/wf_InfoArticulo.aspx?IdArt=98125), recuperado: 5 de mayo de 2007.

### Aceptación

Los artículos deben ser remitidos al editor de la revista *Ciencia & Tecnología de Buques* por correo electrónico a [didesi@cotecmar.com](mailto:didesi@cotecmar.com) y/o [ana3-pdi@cotecmar.com](mailto:ana3-pdi@cotecmar.com), o en CD a la dirección postal de la revista, acompañado de la “Declaración de originalidad del trabajo escrito” que se incluye en esta revista. De su recibo se informará por correo electrónico al autor. Los comentarios y las evaluaciones hechas por parte de la revista se mantendrán confidenciales. La recepción de artículos por parte de la revista *Ciencia & Tecnología de Buques*, no constituye necesariamente su aceptación para publicarlo. Si un artículo no es aceptado, será devuelto a su respectivo autor.

Las opiniones y declaraciones expresadas por los autores en los artículos son responsabilidad exclusiva de estos y no de la revista. La aceptación de artículos otorga a la revista *Ciencia & Tecnología de Buques* los derechos de impresión y reproducción sobre estos, no obstante, será atendida cualquier petición razonable por parte del autor para obtener permiso de reproducción de sus contribuciones.

# EDITORIAL REGULATIONS

## Editorial Regulations for Authors

### Thematic

The Ship Science and Technology Magazine accepts for publication original engineering contributions on ship design, hydrodynamics, dynamics of ships, structures and materials, vibrations and noise, technology of ship construction, marine engineering, standards and regulations, oceanic engineering and port infrastructure, results of scientific and technological researches. Every article shall be subject to consideration of the Editorial Council of The Ship Science and Technology Magazine deciding on pertinence of its publication.

### Typology

The Ship Science and Technology Magazine accepts publishing articles classified within following typology (Colciencias 2006):

- *Scientific and technological research article.* Document presenting detailed original results of finished research projects. Generally, the structure used contains for important parts: introduction, methodology, results and conclusions.
- *Reflection Article.* Document presenting results of a finished research as of an analytical, interpretative or critical perspective of author, on a specific theme, resorting to original sources.
- *Revision Article.* Document resulting from a finished research in the field of science or technology in which published or unpublished results are analyzed, systemized and integrated in order to present advances and development trends. It is characterized for presenting an attentive bibliographic revision of at least 50 references.

### Format

All articles must be sent to editor of The Ship Science and Technology Magazine accompanied by a letter from author requesting its publication. Every article must be written in Microsoft word processor in single space and sent in magnetic form. Articles must not exceed 9,000 words (7 pages). File must contain all text and any tabulation and

mathematical equations; this file must not contain graphs. Additionally, all mathematical equations must be made in Microsoft Word Equations Editor. File must not include graphs.

### Content

All articles must contain following elements that must appear in the same order as follows:

#### Title

It must be concise with appropriate words so as to give reader a slight idea of content.

#### Author and Affiliations

Author's name must be written as follows: name, initial of second name and surnames. Affiliations of author must be specified in following way and order:

- Business or institution (including department or division to which he/she belongs)
- Mail address
- City (Province/State/Department)
- Country
- Telephone, fax and e-mail
- Specify name and e-mail of correspondent author

#### Summary

Short essay of no more than one hundred fifty (150) words specifying content of work, scope and results. It must be written in such a way so as to contain key ideas of document.

#### Key Words

Identify words and/or phrases that help recover relevant ideas in an index.

#### Introduction

Text must be explanatory, clear, simple, precise and original in presenting ideas. Likewise, it must be organized in a logic sequence of parts or sections, with clear subtitles that guide reader. The first part of document is the introduction. Its objective is to present the theme, objectives and justification of why it was elected. Likewise, it must contain sources consulted and methodology used as well as

a short explanation of status of research if it were the case and form in which the rest of article is structured.

### Body of Article

It is made up of the theoretical framework supporting the study, statement of theme, status of its analysis, results obtained and conclusions.

### Equations, Tables, Charts and Graphs

All of these elements must be numbered in order of appearance according to its type and have at the foot, that is, exactly underneath of chart, graph or picture, the source from where data was taken and who made it.

Equations must be numbered on the right hand side of column containing it, in the same line and in parenthesis. Body of text must make reference of it as "(Equation x)". When the reference starts a sentence it must be made as follows: "Equation x".

Equations must be written so that capital letters can be clearly differentiated from small letters. Avoid confusions between letter "l" and number one or between zero and small letter "o". All subindexes, superindexes, Greek letters and other symbols must be clearly indicated.

All expressions and mathematical analysis must explain all symbols (and unit in which it is measured) that have not been previously defined in the nomenclature. If work is extremely mathematical by nature, it would be advisable to develop equations and formulas in appendixes instead of including them in body of text.

Graphs (lineal drawings, tables, pictures, etc.) must be numbered according to order of appearance and should include the number of graph in parenthesis and a brief description. As with equations, in body of text, reference as "(Graph X)", and when reference to a graph is the beginning of a sentence it must be made as follows: "Graph x".

Charts, graphs and illustrations must be sent in modifiable vector file format (Microsoft, Excel, Microsoft Power Point and/or Microsoft Visio). Pictures must be sent in Tif format files, separate from main document in a resolution higher than 1000 dpi.

### Foot Notes

We recommend their use as required to identify additional information. They must be numbered in order of appearance along the text.

### Acknowledgment

Acknowledgments may be made to persons or institutions considered to have made an important contribution and not mentioned in any other part of the article.

### Bibliographic References

#### Quotations

They may be made in two ways: at the end of text, in which case last name of author followed by a comma, year of publication followed by a comma and number of page, in the following manner:

"With modernity there was eagerness for accuracy, preciseness and 'clear' demonstration of all human life scopes" (Cianciardo, 2004, p.30).

The other way is:

Cianciardo (2005, p.30) manifests that "With modernity there was eagerness for accuracy, preciseness and 'clear' demonstration of all human life scopes".

#### List of references

Bibliographic references of original sources for cited material must be numbered at the end of article in alphabetical order and according to following parameters:

#### Books

Last name of author followed by a comma, initial(s) of name followed by a period, the year of publication of book in parenthesis followed by a comma, title of publication in italics and without quotation marks followed by a comma, city where published followed by a comma and name of editorial without abbreviations such as Ltd., Inc. or the word "editorial".

*Basic Form:*

Last name, I.N. (Year), *Las claves del futuro. Economía y conflicto en Colombia*, Bogota, Oveja Negra.

Author must remember that differently from Spanish, titles of books in English have all initial letters in capital letters, except for connectors. For example:

Kirzner, I.M: (1996), *Perception, Opportunity and Profit*, Chicago, University of Chicago, Press.

In the event of more than one author, separate by commas and the last one by an “and”. If there are more than four authors write the last name and initials of first author and then the abbreviation “et al.”.

#### *If a corporate author*

Write complete name of entity and follow the other standards.

*Basic form:*  
Institution (year), *Title of publication*, city, editorial.

*Example:*  
Fundacion Compartir (2005), *Nuestros mejores maestros. Experiencias educativas ejemplares*, Bogota, la Fundación.

Please note that if it is the same entity who edits book, you repeat name or write its abbreviation by initials or acronym. In the event that work has been made by a different editorial, follow the first example.

When book or any publication have as author an entity pertaining to the state, write name of country first.

*Basic form:*  
Country, entity pertaining to the state (year), *Title of publication*, City, Editorial.

*Example:*  
Colombia, Departamento Nacional de Planeación (2003), *Construcción de un futuro para Colombia desde sus territorios*, Bogota, DNP.

#### **Magazine Article**

Last name of author followed by a comma, initial(s) of name(s) followed by a period, year and months separated by a hyphen in parenthesis. If publication specifies days write them too, followed by a comma, title of article in round letters and with simple quotation marks, the word “in” followed by name

of publication in italics and without quotation marks, followed by a comma and then the year, volume (if any) number and pages of article.

#### *Basic form:*

Last name, I.N. (year, month-month), ‘Title of article’, in *Name of publication*, year, v, n.º, xx, pp. yy-zz.

#### *Example:*

Samper, D. (2006, September-November), ‘La lengua esta quebrada... ¿con que la curaremos?’, in *Number*, n.º 50, pp.30-32.

#### *Without author. Basic form*

*Name of publication*, (year, date-date), ‘Title of article’, n.º xx, pp.yy-zz.

#### *Example:*

*Semana* (2006, July 31-August 7) ‘Odisea en La Macarena’, nº 1.265, pp.40-43.

#### **Graduation Work**

Last name of author followed by a comma, initial(s) of name(s) followed by a period, year when thesis was defended in parenthesis followed by a comma, title of work in italics and without quotation marks followed by a comma; between brackets and in small letters write the type of work (graduation monograph, master’s degree thesis, etc.), followed by a comma, city where university is located followed by a comma, complete name of university followed by a comma and complete name of career.

#### *Basic form:*

Last name, I.N. (year when defended), *Title of work*, [type of work], City, University, Academic Program.

#### *Example:*

Salazar, N. (2006), *Inseminación artificial en jaguares*, [type of work], Bogota, Universidad Nacional de Colombia, Veterinary Career.

#### **Internet**

Last name of author followed by a comma, initial(s) of name(s) followed by a period, year of publication in parenthesis followed by a comma, that is, when it was “put up” in the network (if there is one) followed by a comma, title of work in round letters and simple quotation marks followed by a comma, “in-line” in between brackets followed by a comma, the expression “available at” with colon, complete

address of page, followed by a comma, the word “recovered” followed by a colon and complete date when it was looked up.

*Basic form:*

Last name, I.N. (year), ‘Title of article’, [in-line], available at: <http://www.direccion-completa.com>, recovered: day of month of year.

*Example:*

*Semana* (2006, November 11), ‘Conocer la sociedad nacional en su reinado’, [in-line], available at: [http://www.semana.com/wf\\_InfoArticulo.aspx?IdArt=98125](http://www.semana.com/wf_InfoArticulo.aspx?IdArt=98125), recovered: 5 November of 2007.

**Acceptance**

Articles must be sent by e-mail to editor of The Ship Science and Technology Magazine to [didesi@cotecmar.com](mailto:didesi@cotecmar.com)

and/or [ana3-pdi@cotecmar.com](mailto:ana3-pdi@cotecmar.com) or in CD to mail address of magazine, accompanied of the “Declaration of Originality of Work Written” included in this magazine. Author shall receive acknowledgement of receipt by e-mail. Comments and evaluations made by the magazine shall be kept in confidentiality. Receipt of articles by The Ship Science and Technology Magazine does not necessarily constitute acceptance for publishing. If an article is not accepted it shall be returned to the respective author.

Opinions and declarations stated by authors in articles are of their exclusive responsibility and not of the magazine. Acceptance of articles grants The Ship Science and Technology Magazine the right to print and reproduce these; nevertheless, any reasonable petition by author to obtain permission to reproduce his/her contributions shall be attended.

### Declaración de originalidad del trabajo escrito

#### Título del trabajo que se presenta

---

---

---

Por medio de esta comunicación, certifico que el trabajo que presento para posible publicación en la revista *Ciencia & Tecnología de Buques*, de la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítma y Fluvial Cotecmar, es de mi entera autoría, ya que sus contenidos son producto de mi directa contribución intelectual. Todos los datos y referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal.

Por todo lo anterior declaro que todos los materiales presentados para posible publicación están totalmente libres de derechos de autor y, en consecuencia, me hago responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con Derechos de Propiedad Intelectual.

En caso de que el artículo sea elegido para ser publicado por la revista *Ciencia & Tecnología de Buques*, manifiesto que cedo plenamente a la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítma y Fluvial Cotecmar los derechos de reproducción del mismo. Como contraprestación de la presente cesión, declaro mi conformidad de recibir (5) ejemplares del número de la revista donde aparezca mi artículo.

Para constancia de lo anteriormente expuesto, se firma esta declaración a los \_\_\_\_ días, del mes de \_\_\_\_\_, del año \_\_\_\_\_, en la ciudad de \_\_\_\_\_.

Nombre y firma:

Documento de identificación:

---

---



**Statement of Originality of Written Work**

**Title of work submitted**

---

---

---

I hereby certify that work submitted for publication in *The Ship Science and Technology Magazine*, of Science and Technology for the Development of Naval, Maritime and Riverine Industry Corporation, Cotecmar, was written by me, given that its content is product of my direct intellectual contribution. All data and references to material already published are duly identified with its respective credit and included in the bibliographic notes and quotations highlighted as such.

I therefore declare that all materials submitted for publication are completely free of copyrights; consequently, I make myself responsible for any lawsuit or claim related with Intellectual Property Rights thereof.

In the event that article is chosen for publication by *The Ship Science and Technology Magazine*, I hereby state that I totally transfer reproduction rights of same to Science and Technology for the Development of Naval, Maritime and Riverine Industry Corporation, Cotecmar. In retribution for present transfer I agree to receive five (5) issues of the magazine where my article is published.

In witness thereof, I sign this statement on the \_\_\_\_\_ day of the month of \_\_\_\_\_ of year \_\_\_\_\_, in the city of \_\_\_\_\_.

Name and signature:

Identification document:

---

---



# CIENCIA & TECNOLOGÍA DE BUQUES

SHIP SCIENCE & TECHNOLOGY

ISSN 1909-8642

Señores  
Revista *Ciencia & Tecnología de Buques*  
Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de  
la Industria Naval, Marítima y Fluvial - Cotecmar  
Kilómetro 9, Zona industrial de Mamonal  
Cartagena de Indias - Bolívar - Colombia  
Teléfonos: (+57) (5) 668 5033 Extensión: 214  
(+57) (5) 668 5377

Mediante el presente volante deseo inscribirme a su revista. Favor enviarme el (los) ejemplar(es)  
Solicitado(s) conforme a la siguiente información:

## Datos Personales

Nombre y apellidos: \_\_\_\_\_  
Dirección residencial: \_\_\_\_\_ Tel.: \_\_\_\_\_  
Dirección profesional: \_\_\_\_\_ Tel.: \_\_\_\_\_  
Ciudad: \_\_\_\_\_ País: \_\_\_\_\_  
A.A.: \_\_\_\_\_ Dirección electrónica: \_\_\_\_\_  
Dirección para envío: \_\_\_\_\_

## Actividad Profesional

Profesión: \_\_\_\_\_  
Institución: \_\_\_\_\_  
Cargo: \_\_\_\_\_

*Adjunto comprobante de:*

Consignación  cuenta GNB Sudameris n.º 33300100052-5 Valor correspondiente  
Giro postal  a nombre de COTECMAR a un año: \$20.000  
Transferencia  adicional para envío:

Solicito n.º(s): \_\_\_\_\_

*Firma:* \_\_\_\_\_





Una publicación de Cotecmar

Km.9, vía Mamonal Cartagena, Colombia. Conmutador: (+57)-5-6685033 ext. 214 - 216  
Telefax: (+57) - 5 6685377  
didesi@cotecmar.com  
www.cytbuques.com