

# CIENCIA & TECNOLOGÍA DE BUQUES

ISSN 1909-8642



**COTECMAR**  
COLOMBIA

SHIP SCIENCE & TECHNOLOGY

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

Darío H. Ruedas Pacheco, Reinaldo Villalba Rodríguez

Desarrollo de modelos basados en simulación y optimización heurística como soporte para la toma de decisiones en operaciones de transporte de carga fluvial

John Henry Ríos Griego, María Carolina Sarabia Viaña,  
María Carolina Herrera Hernández, Carlos Daniel Paternina Arboleda



Estabilidad dinámica de buques en olas

Marcelo Santos Neves, William M. Cipriano, Claudio A. Rodríguez, Jorge A. Merino

Sustitución de la arena en procesos de chorreado en seco para la limpieza de superficies metálicas

Giovanni A. Juzga León, Reinaldo Villalba Rodríguez, Ronald Rueda Sarmiento

# CIENCIA & TECNOLOGÍA DE BUQUES

## SHIP SCIENCE & TECHNOLOGY

Número 4, volumen 2

Enero de 2009

ISSN 1909-8642

Cotecmar

Presidente

Contralmte. **Daniel Iriarte Alvira**

Vicepresidente

Cap. de navío **Juan Carrillo Quintana**

Editor

Cap. de fragata **Óscar Tascón Muñoz, Ph. D. (c)**

Comité editorial

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

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

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

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

**Juan Contreras Montes, Ph. D.**  
Escuela Naval Almirante Padilla, Colombia

**Robert G. Latorre, Dr. Eng.**  
University of New Orleans, USA

**Carlos Cano Restrepo, M. Sc.**  
Cotecmar, Colombia

Comité científico

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

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

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

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

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

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

*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. Se distribuye nacional e internacionalmente por canje o suscripción.*

Una publicación de

Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la  
Industria Naval, Marítima y Fluvial - Cotecmar  
Versión electrónica: [www.cytbuques.com](http://www.cytbuques.com)



COTECMAR  
COLOMBIA



Coordinación editorial

Mario Ruíz Barreto

Asesoría editorial y corrección de textos  
Lilia Carvajal Ahumada

Traducción y revisión de textos en inglés  
Álvaro Bernat Gómez

Diagramación  
Mauricio Sarmiento Barreto

Diseño de portada  
Germán Ortiz Rincón

Impresión  
Publicidad & Marketing, Bogotá, D. C.



# CIENCIA & TECNOLOGÍA DE BUQUES SHIP SCIENCE & TECHNOLOGY

Número 4, volumen 2

Enero de 2009

ISSN 1909-8642

5

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

*Effects of the inter anodic distance and the cathode geometry, in the effectiveness of the cathodic protection systems by sacrifice anodes on ships*

Darío H. Ruedas Pacheco, Reinaldo Villalba Rodríguez

15

Desarrollo de modelos basados en simulación y optimización heurística como soporte para la toma de decisiones en operaciones de transporte de carga fluvial

*Model development based on heuristic simulation and optimization as support for decision-making in operations of riverine load transport*

John Henry Ríos Griego, María Carolina Sarabia Viaña, María Carolina Herrera Hernández, Carlos Daniel Paternina Arboleda

23

Estabilidad dinámica de buques en olas

*Dynamic Stability of Ships on Waves*

Marcelo Santos Neves, William M. Cipriano, Claudio A. Rodríguez, Jorge A. Merino

37

Sustitución de la arena en procesos de chorreado en seco para la limpieza de superficies metálicas

*Substitution of sand in processes of dry-blasting for the cleaning of metallic surfaces*

Giovanni A. Juzga León, Reinaldo Villalba Rodríguez, Ronald Rueda Sarmiento



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

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

## Resumen

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

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

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

## Abstract

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

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

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

Fecha de recepción: 8 de septiembre de 2008

Fecha de aceptación: 10 de octubre de 2008

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

\*\* Asesor CIC

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

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

## Introducción

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

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

## Control de la corrosión para embarcaciones

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

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

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

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

## Experimentación

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

Gráfico 1. Arreglo de un grupo de Cedas



Fuente: Resultados de la investigación.

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

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

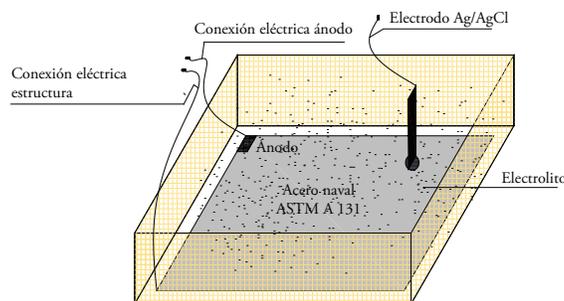
Los cátodos se construyeron con láminas de acero naval especificación ASTM 131 Grado A, preparadas previamente a un grado de limpieza metal blanco según especificación SSPC-SP5, mediante técnica de chorro de arena.

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

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

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

Gráfico 2. Esquema básico de montaje en Cedas



Fuente: Resultados de la investigación.

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

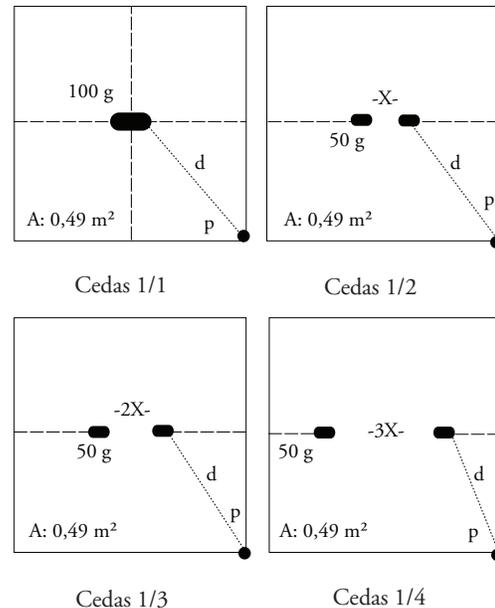
Código de prueba en Cedas	Área a proteger (m <sup>2</sup> )	Número de ánodos	Masa unitaria de ánodo (gr)	Masa anódica total (g)	Distancia interanódica (m)
1/1	0.49	1	100	100	n.a.
1/2	0.49	2	50	100	0.10
1/3	0.49	2	50	100	0.20
1/4	0.49	2	50	100	0.30

Fuente: Resultados de la investigación.

## Cátodo y plano desnudo

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

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



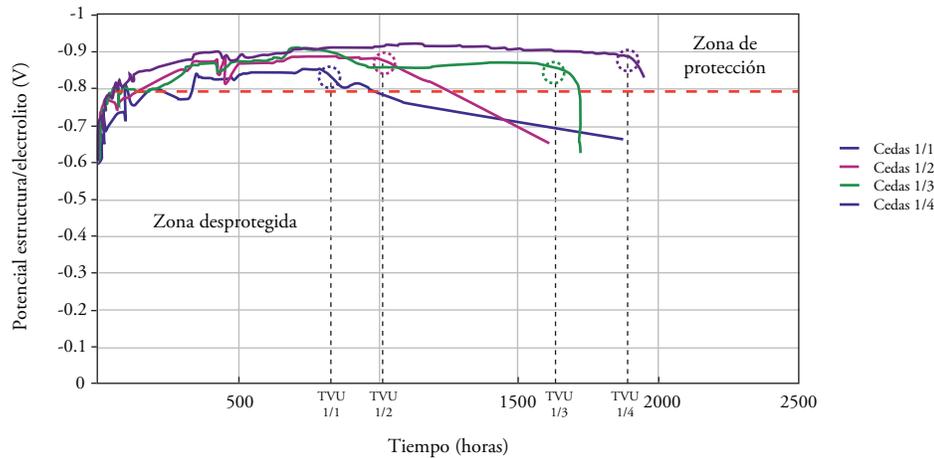
Fuente: Resultados de la investigación.

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

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

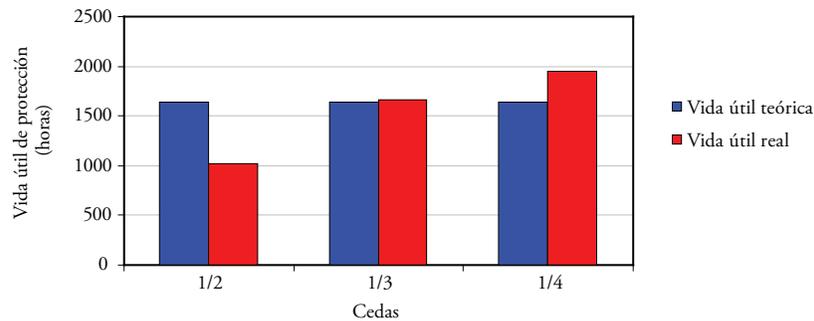
Considerando que es físicamente improbable que infinita, debe existir una distancia óptima para la para una distancia infinita la vida útil tiende a cual la vida útil real es máxima.

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



Fuente: Resultados de la investigación.

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



Fuente: Resultados de la investigación.

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

#### Cátodo desnudo con dobléz a 90°

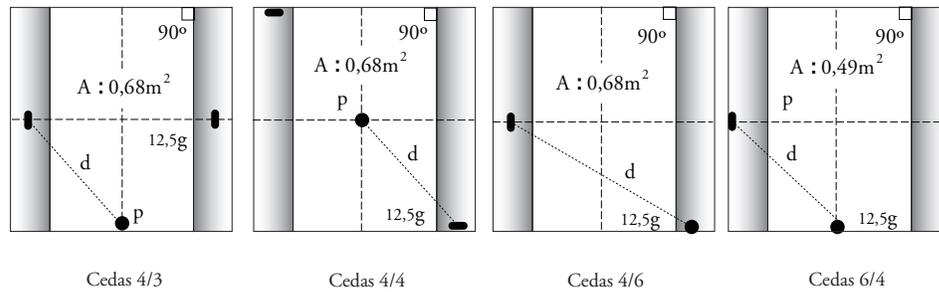
En el Cuadro 2 se presentan en forma tabulada, las condiciones de los ensayos realizados para cátodos desnudos y con un dobléz a 90° y la esquematización del montaje de las pruebas.

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

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

Fuente: Resultados de la investigación.

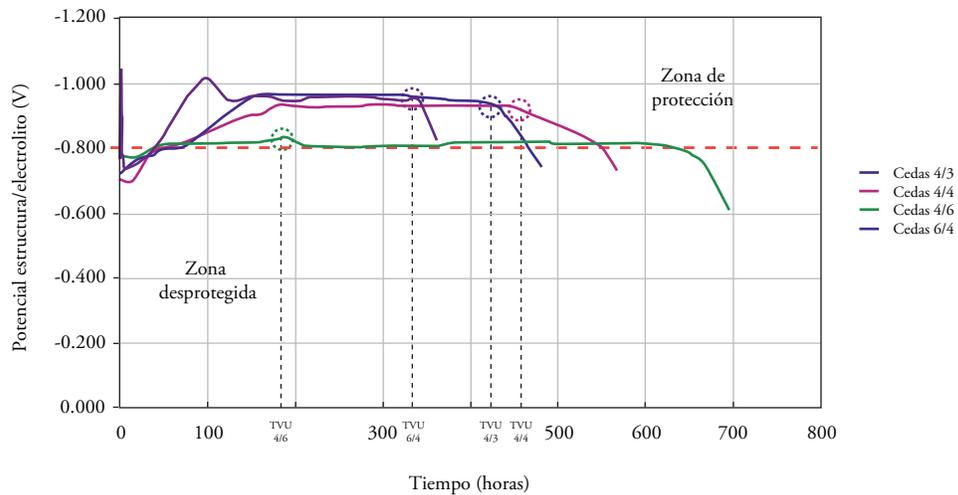
Gráfico 6. Esquema de distribuciones anódicas para cátodos desnudos y de superficie con doblé a 90°



Fuente: Resultados de la investigación.

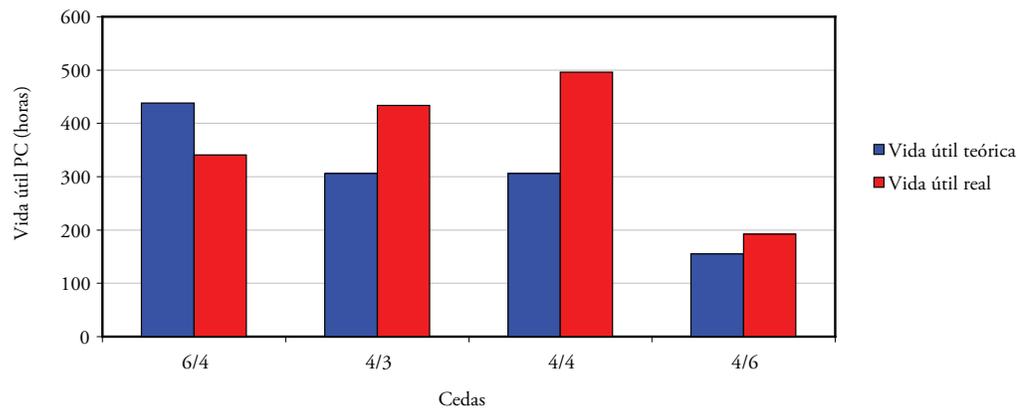
Los gráficos de los resultados de las vidas útiles reales de los diferentes arreglos anódicos, muestran claramente que la efectividad de un sistema de protección catódica en una superficie con doblé a 90°, depende de la distribución anódica, en términos de la distancia de separación entre los ánodos.

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



Fuente: Resultados de la investigación.

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



Fuente: Resultados de la investigación.

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

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

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

**Cátodo desnudo con doblez a 135°**

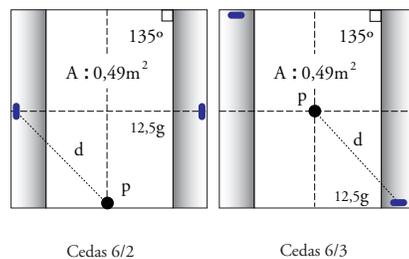
El Cuadro 3 muestra en forma tabulada, las condiciones de los ensayos realizados para cátodos desnudos y con un doblez a 135° y la esquematización del montaje de las pruebas.

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

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

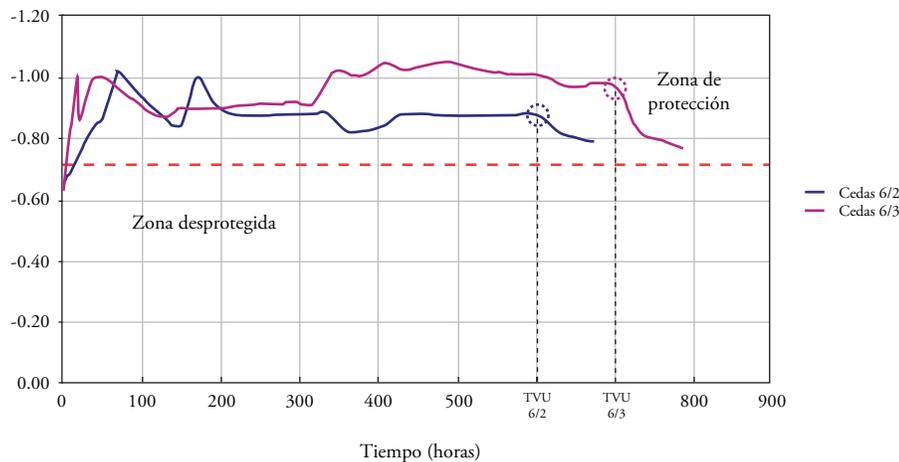
Fuente: Resultados de la investigación.

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



Fuente: Resultados de la investigación.

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

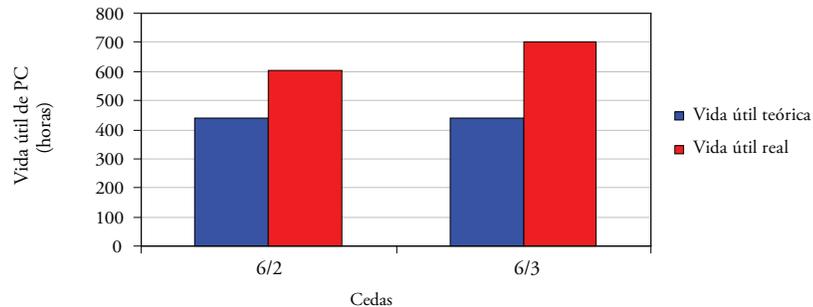


Fuente: Resultados de la investigación.

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

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

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



Fuente: Resultados de la investigación.

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

### Aplicabilidad de los resultados

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

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

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

La ecuación general propuesta se define de la siguiente manera:

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

donde:

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

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

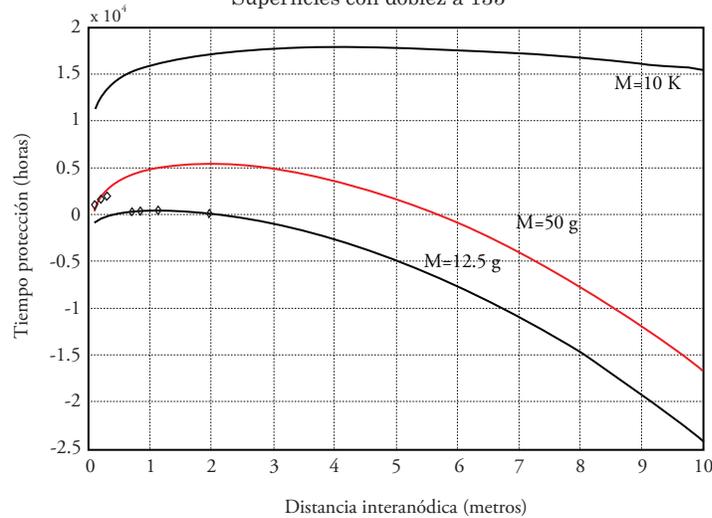
Cuadro 4. Determinación de los factores de masa

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

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

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

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



Fuente: Resultados de la investigación.

## Conclusiones

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

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

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

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

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

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

## Referencias

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

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

vanic Zinc Anodes”, ASTM, International Publication.

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

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

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

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

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

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



# Desarrollo de modelos basados en simulación y optimización heurística como soporte para la toma de decisiones en operaciones de transporte de carga fluvial

John Henry Ríos Griego\*  
María Carolina Sarabia Viaña\*  
María Carolina Herrera Hernández\*  
Carlos Daniel Paternina Arboleda\*<sup>a</sup>

## Resumen

Este artículo presenta el diseño e implementación de modelos basados en simulación y optimización heurística para apoyar el proceso de toma de decisiones en operaciones de transporte de carga fluvial. Su desarrollo implica formular y solucionar modelos de optimización mediante la simulación de operaciones de flujo de carga a lo largo del río Magdalena (Colombia). Las decisiones también son tomadas con relación a la gestión de centros de distribución ubicados a lo largo del río y a la demanda de servicios que una empresa transportadora pueda atender en los puntos de destino. Un análisis de sensibilidad se realiza sobre los parámetros de capacidad, planeación de transporte, expansión y localización, todo esto a escala táctica y operativa.

**Palabras clave:** Modelo, simulación, optimización, heurística, toma de decisiones, transporte.

## Abstract

This article presents the design and implementation of models based on heuristic simulation and optimization to support the decision-making process in operations of riverine load transport. Its development implies formulating and solving optimization models through the simulation of operations of load flow throughout the Magdalena river (Colombia). The decisions are also taken in relation with the management of distribution centers located along the river and with the demand of services that a transport company can attend in the destination points. An analysis of sensibility is carried out on the parameters of capacity, transport planning, expansion and location, all of this in a tactical and operative scale.

**Key Words:** Model, Simulation, Optimization, Heuristic, Decision-making, Transport.

Fecha de recepción: 4 de agosto de 2006  
Fecha de aceptación: 14 de octubre de 2008

\*Los autores pertenecen al Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad del Norte de Barranquilla.

<sup>a</sup>Autor correspondiente: cpaterni@uninorte.edu.co

## Introducción

El transporte es una de las actividades de mayor importancia para el desarrollo económico, social y tecnológico de una región (Bondorfer, Grotschel y Lobel). Si personas y carga se movilizaran libremente en un territorio determinado y en condiciones ideales, su desarrollo y la calidad de vida de sus habitantes mejorarían considerablemente.

En América del Sur, aún hoy día el transporte fluvial, tanto interno como externo, no ha tomado la importancia que amerita, solo Brasil, Argentina y Venezuela han logrado desarrollar hidrovías navegables que contribuyen a su crecimiento. En la actualidad, muchas de las empresas dedicadas al transporte fluvial de carga en Colombia utilizan métodos manuales para programar sus operaciones, en lugar de usar la simulación y optimización (Ríos, Ríos y Martín) que además de contribuir al progreso continuo de sus operaciones fluviales, también sirven como apoyo para futuras decisiones operativas, financieras y económicas.

En el ámbito del transporte los problemas de planeación se refieren a pronósticos de la demanda en este proceso, y también están relacionados con aspectos estratégicos como decisiones en el tamaño de la flota, inconvenientes operativos como la programación y ruteo y algunos otros que definitivamente están por fuera del control de la compañía, tal es el caso de la seguridad en ciertos trayectos y las condiciones ambientales del río.

Debido a estos problemas muy generalizados, resulta de gran importancia para las empresas de transporte fluvial la implementación de *software* que ofrezca apoyo confiable y eficiente para la toma de decisiones. Por esta razón, este artículo detalla en un modelo genérico que representa las operaciones de carga fluvial, las variables incluídas que pueden ser modificadas y adaptadas al caso de cualquier empresa con condiciones similares.

## Tiempo, nivel del río y tamaño de la flota

Existen numerosas variables que influyen en la construcción de un modelo para representar las

operaciones de las embarcaciones, sin embargo, se cuentan tres aspectos esenciales:

El tiempo. Esta variable resultó importante en el modelo genérico desarrollado en este caso de estudio, por lo que fue necesario validarlo y asegurar que representa la realidad, lo cual implica determinar los tiempos que cada embarcación tarda mientras es cargada, viaja y es descargada finalmente. Entre ellos se cuentan tiempos comunes como viaje, pernoctación, fraccionamiento, tiempo muerto por mal clima o inseguridad en el trayecto. Además se cuentan los correspondientes a carga y descarga. En cada caso los datos fueron estadísticamente tratados para determinar la distribución de probabilidad a la que cada uno se ajusta, de modo que la información pueda ser incluida en el modelo.

El nivel del río fue otro aspecto que requirió análisis específico. Corresponde a la distancia entre el fondo (base) del río y su superficie y es un concepto esencial para las compañías dedicadas al transporte fluvial, dado que es determinante en el tamaño de la carga que puede ser transportada en estaciones particulares del año. Este dato fue tratado con el método de series de tiempo, por ser el que mejor se ajustó a la información histórica entregada por la empresa en la que se validó el modelo. Como consecuencia del estudio, se determinaron pronósticos con los cuales es posible cubrir el modelo para periodos futuros.

Finalmente está el tamaño de la flota, también conocido como embarcaciones operativas para el transporte. En este caso es necesario registrar y verificar la capacidad de remolcadores y botes disponibles y luego analizar y contrastar esta información con el tipo de producto que va a ser transportado, considerando la dirección de los remolcadores, para asignar la carga que sube o que baja.

## El modelo

Se utilizó Arena® (Rockwell Software) para desarrollar modelos de apoyo en la toma de decisiones para el transporte fluvial. Los datos de entrada son suministrados por un archivo en Excel®, el cual incluye codificación en Visual Basic y es almacenado en contadores creados en Arena® para correr los

escenarios globales, compuestos por más de doscientas mil celdas. Tan pronto como la corrida se termina, la información se entrega de igual forma, a través de Visual Basic y finalmente en un archivo en Excel®.

El modelo representa dos escenarios: con y sin convoy libre. Este último simula las condiciones actuales de las operaciones para viajar transportando producto, en este caso petróleo, a lo largo del río, y su carga y descarga en los puertos principales: un origen y un destino.

El proceso inicia con el ingreso, en la hoja de datos de “entradas”, del período (fecha de inicio y fin) o, en otro caso, el número de horas por las cuales el modelo deberá correrse. Luego se determina el factor de ajuste que representa numéricamente las variaciones en las condiciones internas y externas del transporte de carga en Colombia, información histórica con tendencia a desajustarse al intentar aproximar el modelo de simulación a la realidad. Esto lleva a realizar inferencias estadísticas que ajustan la información a las condiciones actuales. El factor de ajuste varía entre 0 y 2, donde 1 son las condiciones reales de las operaciones; en la medida en que se acerca a 0 representa efectos negativos por condiciones climáticas fuertes y complicadas para la navegación, y cuando tiende a 2 muestra condiciones verdaderamente favorables para las operaciones.

Por otro lado, la opción de aumentar en el modelo la longitud del río a más de 630 km permite su implementación exitosa en el caso de cualquier otro río en el mundo. La hoja de entradas también sirve para activar el número de remolcadores y saber con cuáles es deseable correr el modelo.

Cada remolcador tiene su identificación (ID), la cual representa el nombre con el que su información asociada se almacenó en Arena®, luego sigue la tabla de máximas capacidades (en toneladas y barriles). Esta información es constante y depende de la capacidad de cada remolcador. Igualmente, al inicio de la simulación se determina el número de botes disponibles y lo que transportan (no intercambiable), bien sea producto negro (petróleo crudo) o blanco (petróleo refinado), así como las

toneladas (ton.) que varían entre 1 y 1.500. Con esta información es posible asignar el número de botes que serán parte del convoy.

Dicha asignación se hace empleando un algoritmo de búsqueda tabú con el propósito de minimizar la capacidad sobrante del remolcador y así poder transportar la mayor carga posible en cada viaje programado. Para esto, el algoritmo realiza una asignación inicial global, basado en la información de los botes organizada en matrices. Si luego de ser verificada esta asignación resultara ser viable, entonces el algoritmo la asocia con el remolcador en turno de espera de carga, en caso de no serlo, genera un nuevo valor explorando opciones cercanas a la inicial (local). Si encuentra una mejor solución toma el nuevo valor, de lo contrario el algoritmo conserva el valor de la asignación anterior e intenta nuevas comparaciones. Con el objeto de no quedarse con el mejor valor local (región que incluye el valor inicial y las exploraciones vecinas), el algoritmo realiza la búsqueda dando saltos globales a otras regiones distintas a la ya revisada. Si en esta nueva región encuentra una mejor solución, toma el nuevo valor. En caso contrario, mantiene el valor anterior y continúa la búsqueda hasta agotar el número de exploraciones locales y globales predefinidas al inicio de la simulación.

En el modelo, la carga se especifica de acuerdo con la fracción que será llevada, lo que se refiere al porcentaje de carga seca e hidrocarburos que será transportada. No necesariamente los botes deben contener el 100% de su capacidad, debido al hecho de que esta depende del nivel del río y de si el convoy sube (contra la corriente) o baja (a favor de la corriente). **En una hoja diferente del archivo en Excel® se establece cuál es el porcentaje de utilización de cada remolcador que viaja desde un puerto a otro a recibir mantenimiento, o que va de regreso al puerto de origen debido a causas internas o externas.** Por último, se utilizan hojas que especifican los tiempos de cada remolcador y la distribución que se ajusta en cada caso (tiempos constantes).

El primer escenario presenta la opción de trabajar con un convoy libre en el puerto de origen, lo cual permite incrementar el movimiento de botes para que el remolcador pueda liberarse y seguir con

otro viaje, mientras el convoy termina de cargar o descargar productos en el puerto, con el propósito de mejorar el proceso y facilitar la disponibilidad para un mayor número de viajes.

## Resultados

Para validar el modelo desarrollado fue necesario comparar los resultados históricos de la compañía en el año 2005, con los obtenidos luego de correr el modelo que representa la situación actual de la empresa en los dos escenarios. Para verificar si la información se ajusta a la realidad, una prueba *t*-pareada se aplicó al conjunto de datos.

Los resultados se muestran como sigue:

### Prueba *t*-pareada

$$\begin{aligned} H_0 &: \mu_1 = \mu_2 \\ H_a &: \mu_1 \neq \mu_2 \end{aligned}$$

Donde  $H_0$  sugiere que las medias de los resultados reales frente a los simulados son iguales y, por el contrario,  $H_a$  sugiere que las medias de los resultados reales son diferentes. Con un nivel de confianza del 95% la hipótesis nula resultó ser aceptada, lo cual indica que no existe evidencia estadística suficiente para rechazar la igualdad entre las medias de ambos tipos de resultados.

Con respecto al experimento estudiado, teniendo en cuenta que es de tipo no replicado, se hace necesario estudiar la interacción entre los dos factores fijos (remolcador y tipo de escenario), lo cual se analizó aplicando la prueba Tukey.

$$\begin{aligned} H_0 &: \text{Hay evidencia de interacción.} \\ H_a &: \text{No existe evidencia de interacción.} \end{aligned}$$

Con igual nivel de confianza que en la prueba *t*-pareada (95%), resultó rechazada la hipótesis nula, lo cual se traduce en que no existe evidencia estadística suficiente para aceptar la interacción entre los factores fijos.

### Prueba de Bartlett (varianzas)

Esta prueba de homocedasticidad pretende confirmar la igualdad de la varianza del modelo.

$$\begin{aligned} H_0 &: \text{Todas las varianzas son iguales.} \\ H_a &: \text{Al menos una varianza no es igual.} \end{aligned}$$

Con un nivel de confianza del 95%, no existe evidencia estadística suficiente para rechazar  $H_0$ , lo que indica que todas las varianzas son iguales. Con esto se concluye que el modelo ha sido validado, demostrando formalmente que los datos fueron obtenidos en las mismas condiciones de operación.

### Comparación de los escenarios principales:

#### Con y sin convoy libre

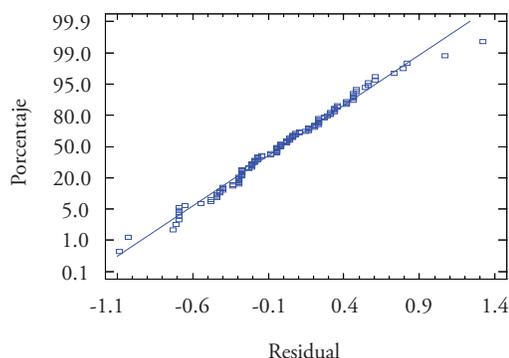
Para conocer cuál de los dos escenarios en estudio ofrece las mejores condiciones de operación para el transporte fluvial según el modelo desarrollado, se diseñó un experimento preliminar para luego calcular el tamaño de muestra  $n$  trabajando con un nivel de confianza ( $1-\alpha$ ) del 95%, potencia ( $1-\beta$ ) del 90% y permitiendo un corrimiento máximo de la media igual a un viaje. Dadas estas condiciones, resultó para este caso de estudio que la muestra debe ser de tamaño  $n$  igual a seis. Luego se corrió el modelo con cinco réplicas para cada uno de los escenarios de interés.

Con el objeto de verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad en los datos, se generó una gráfica de probabilidad normal de los residuos estandarizados para el factor remolcador y para el factor tipo de escenario (ver gráficos 1 y 2).

Analizando los residuales de ambos factores, para el caso de los estandarizados del factor remolcador, se observa una tendencia ascendente y regular, lo que indica que la población de los datos se ajusta a una distribución normal. En los residuales estandarizados del factor tipo de escenario, se observa una violación considerable del supuesto de normalidad, ante lo cual quedan dos opciones para el análisis: realizar una prueba no paramétrica, o excluir del factor tipo de escenario el tratamiento remolque 11, dado que es atípico y afecta finalmente la tendencia normal. En este caso particular se tomó la segunda opción, y una vez excluido se realizó un nuevo análisis de varianza (Anova).

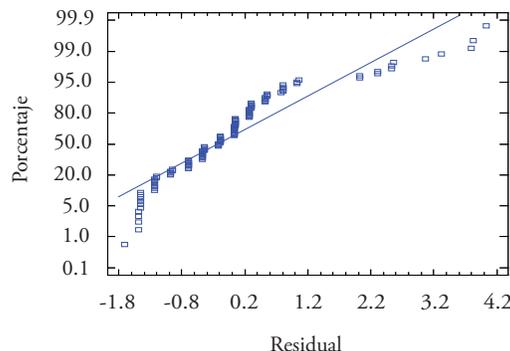
Con respecto al factor remolcador, se tiene de nuevo que existe una diferencia de medias dado que los remolcadores en estudio presentan características y condiciones de operación diferentes.

Gráfico 1. Probabilidad normal para los residuales estandarizados del factor remolcador



Fuente: Resultados de la investigación.

Gráfico 2. Probabilidad normal para los residuales estandarizados del factor tipo de escenario



Fuente: Resultados de la investigación.

### Prueba LSD de Fisher

El Cuadro 1 presenta la agrupación de remolcadores con el criterio de la prueba LSD de Fisher para comparar pares de media de los remolcadores, donde cada grupo representa entonces una población particular.

Comparando las medias poblacionales, las hipótesis planteadas son:

$$H_0 : \mu_i = \mu_j$$

$$H_a : \mu_i \neq \mu_j$$

Estadístico de prueba:

$$LSD = t_{\alpha/2, N-a} \sqrt{\frac{2MS_E}{n}}$$

Criterio de rechazo:

$$\text{Si, } \left| \bar{y}_i - \bar{y}_j \right| > LSD$$

Los grupos se forman de acuerdo con el número de viajes promedio (Cuadro 1).

Cuadro 1. Agrupación de remolcadores con el criterio de la prueba LSD

Grupo	Remolcadores
1	2 – 4
2	1 – 7
3	3 – 9 – 10
4	3 – 6 – 9
5	9 – 6 – 8
6	5 – 6 – 8

Con respecto al factor tipo de escenario, resultó que también existe una diferencia de medias. Se aplicó también la prueba LSD y, basados en sus resultados, se puede decir que con un nivel de confianza del 95% el modelo con convoy libre arroja una media poblacional mayor en cuanto a número de viajes que la media arrojada por el modelo cuando trabaja sin convoy libre.

Sobre la interacción de los dos factores fijos, a diferencia del resultado obtenido en la validación inicial del modelo en el que se indicaba que no era significativa, para este nuevo diseño sí resulta serlo. Esta interacción existe dado que:

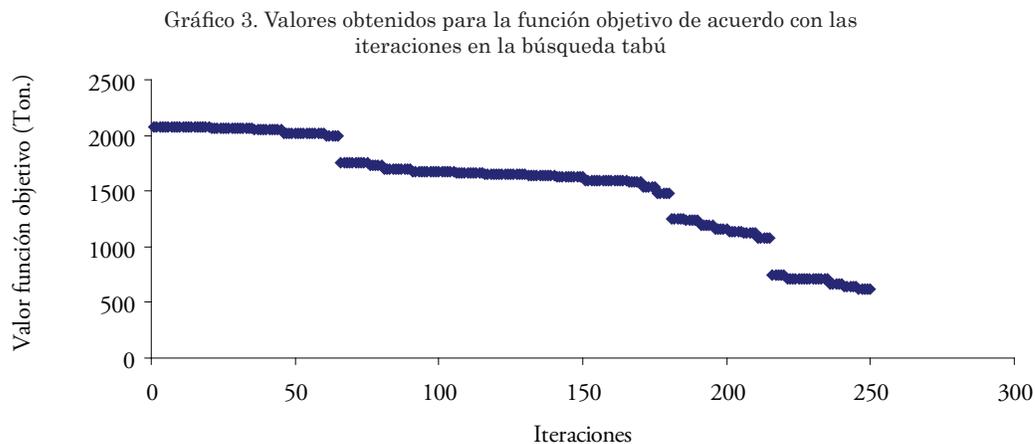
1. En caso de no encontrarse botes disponibles a la llegada de un remolcador al puerto, este deberá esperar hasta ser cargado para cumplir con su capacidad.
2. En caso de encontrarse botes disponibles, son tomados por el remolcador, pero si no cumple con la restricción de capacidad, deberá igual esperar hasta completar la carga para poder partir.
3. La cantidad de botes asignados a un remolcador varía dependiendo de la capacidad de cada remolcador y de la capacidad de cada bote.

Se verificó el cumplimiento del supuesto de homocedasticidad para entonces aceptar la hipótesis nula, lo que implica aceptar que las varianzas son iguales y con esto valida el experimento.

Para el análisis del tratamiento antes excluido (remolcador 11), se aplicó una prueba  $f$  para determinar la igualdad o diferencia de las varianzas poblacionales. Una vez resultó que las varianzas eran iguales, entonces se aplicó la ecuación correspondiente para el análisis de medias con la prueba  $t$ . Con esto resultó que para este remolcador en particular, los dos tipos de escenarios hacen igual número de viajes, por este motivo eran atípicos en el Gráfico 2.

### Búsqueda tabú

El análisis se hizo para el caso de solo un remolcador en solo una asignación. Comparando el valor de la carga máxima permitida en el remolcador en estudio con el valor de la carga transportada (el cual se obtuvo en varias secuencias aplicando el algoritmo de la búsqueda tabú), se obtienen en cada caso diferentes valores de la función objetivo para minimizar la capacidad no utilizada en el remolcador (Gráfico 3).



Fuente: Resultados de la investigación.

## Conclusiones

Los modelos para apoyar la toma de decisiones con base en simulación y optimización heurística son herramientas importantes para automatizar la planeación y programación de las operaciones de transporte. Los pronósticos sobre las condiciones de operación en el río incrementan significativamente el desempeño y la calidad de la planeación.

Este tipo de modelos permiten gestionar inversiones de capital y optimizar las actividades sobre presupuestos, esto debido a que los resultados impactan las decisiones en la capacidad de carga.

Como fue mencionado, el modelo fue validado de acuerdo con las especificaciones de una empresa colombiana dedicada al transporte fluvial, repre-

sentando con esto sus condiciones particulares de operación. Actualmente, todos los escenarios factibles han sido considerados por la empresa.

## Referencias

- Bondorfer, Ralf; Martin Grottschel y Andreas Lobel. "Optimization of transportation systems", ZIB-Report 98-09.
- Cornell, Gary. (s. f.) Manual de Visual Basic 5. McGraw-Hill.
- Fabregas A. Aldo; Wadnibar R. Rodrigo; Paternina A. Carlos; y Mancilla H. Alfonso. *Simulación de sistemas productivos con Arena®*. Barranquilla. Ediciones Uninorte.

- Paixão, Ana C. y Marlow, Peter B., (2002) Fourth generation ports - a question of agility? *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 33 n.º 4, 355-376.
- Rios Insua, David. Rios Insua, Sixto. Martin, Jacinto. (s. f.) *Simulación, método y aplicaciones*, Alfaomega.



# Estabilidad dinámica de buques en olas

Marcelo Santos Neves\*  
William M. Cipriano\*  
Claudio A. Rodríguez\*  
Jorge A. Merino\*

## Resumen

El presente trabajo discute la estabilidad de los buques con énfasis en el vínculo entre esta y el movimiento en las olas, con el fin de introducir una discusión sobre los modos dinámicos que llevan a la zozobra en mar severo: pérdida simple de estabilidad, guiñada brusca y resonancia paramétrica.

Presentamos un sumario sobre la ocurrencia y relevancia de la guiñada brusca en mar de popa y la resonancia paramétrica en mar de proa, para embarcaciones menores. Con la finalidad de estudiar la influencia de diferentes parámetros, se investigan dos embarcaciones menores para algunas velocidades y condiciones de carga, en las que se reportó guiñada brusca en mar de popa y resonancia paramétrica en mar de frente. Se comparan resultados experimentales con simulaciones numéricas, para, finalmente, discutir el empleo de tanques estabilizadores en el control de la resonancia paramétrica.

**Palabras clave:** Estabilidad, movimiento en olas, modos dinámicos, guiñada brusca, y resonancia paramétrica.

## Abstract

The present work is about ship stability with an emphasis on the relationship it has with the movement of the waves, in order to introduce a discussion about the dynamic modes which lead to anguish at severe sea: simple loss of stability, rough inclination and parametric resonance.

We present a summary on the occurrence and relevance of the rough inclination in stern sea and the parametric resonance in prow sea, for shallow-draft vessels. In order to study the influence of different parameters, two shallow-draft vessels are investigated for some speeds and conditions of load, in which rough inclination was reported in stern sea and parametric resonance in sea front. Experimental results are compared with numeric simulations, in order to, finally, discuss the use of stabilizing tanks in the control of parametric resonance.

**Key Words:** Stability, Movement on waves, Dynamic modes, Rough inclination, and Parametric resonance.

Fecha de recepción: 4 de agosto de 2006  
Fecha de aceptación: 14 de octubre de 2008

\* Los autores pertenecen al Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.  
Autor correspondiente: masn@peno.coppe.ufrj.br  
La investigación discutida en el presente artículo ha sido financiada por el Consejo Nacional de Investigación de Brasil (CNPq) y LabOceano. Los autores reconocen y agradecen este auspicio.

## Introducción

Gran parte de la vida operativa del buque se da en presencia de olas, donde ocasionalmente pueden encontrarse condiciones bastante severas. En la mar, las embarcaciones deben ser capaces de cumplir sus diversas misiones (cualesquiera que estas sean), de forma segura y económica, es decir, con buena maniobrabilidad y operatividad en todas las condiciones, garantizando siempre un buen desempeño. En circunstancias extremas, el buque debe soportar condiciones dinámicas ambientales adversas que pueden hacer que sufra aceleraciones, flexiones, y/o torsiones, sin que signifiquen una falla estructural, y en presencia de olas que lo sobrepasen, deberá ser capaz de proseguir sin zozobrar.

La zozobra del buque intacto es un fenómeno que por su propia naturaleza involucra movimientos excesivos, producidos por diversos factores y situaciones peligrosas que enfrenta en la mar. La zozobra es uno de los fenómenos menos entendidos en el campo de la teoría de movimientos del buque, y su estudio compete al ingeniero naval. Desde el punto de vista de la estabilidad en olas, los movimientos verticales de un buque, *heave* (arfada) y *pitch* (cabeceo), no son de importancia para el capitán, sin embargo, en ciertas circunstancias pueden afectar el movimiento de *roll* (rolido), tal y como lo describió Froude (1863). Él observó que los buques podrían poseer características de roll indeseables cuando la frecuencia de oscilación libre en *pitch* es aproximadamente el doble de la de una oscilación libre en *roll*.

A pesar de que ya en aquella época, Froude había reconocido que el problema de la estabilidad de *roll* en olas debía considerarse desde el punto de vista dinámico en vez del estático, la gran mayoría de los estudios se basaron en la estabilidad estática en aguas tranquilas. Históricamente, algunas ideas sobre el uso de la estabilidad “dinámica”, introdujeron el uso del área bajo la curva de brazos de adrizamiento, propuesta por Reed (1868) como un medio de evaluar la estabilidad del buque en aguas tranquilas. En esta época, la estabilidad del *roll* era vista en la práctica como un problema hidrostático. Dadas las dificultades asociadas a la eficiente modelación de la estabilidad de grandes movimientos,

el tratamiento hidrostático permaneció como idea principal para el estudio de la estabilidad.

Dentro de ese contexto, debe mencionarse a Rahola (1939), quien en su tesis doctoral hizo una gran contribución para la adopción de criterios de estabilidad de aplicación práctica. Su trabajo se basó en los resultados de los veredictos oficiales de 34 casos de zozobra, donde fueron analizadas las curvas de momentos de adrizamiento de los buques zozobrados, comparándolas con curvas de adrizamiento de buques existentes (en aquella época) que mostraban estabilidad satisfactoria. Esto permitió establecer valores mínimos para los momentos de adrizamiento que garantizarían la seguridad de los buques a la zozobra. La tesis de Rahola causó gran repercusión debido a que fue el primer estudio amplio de su tipo y porque el método propuesto era relativamente simple de ser aplicado en la práctica, al no requerir de cálculo una vez que se conociesen las curvas de estabilidad estática. Ciertamente, esta es la razón por la cual muchas de las reglas o recomendaciones de estabilidad, como por ejemplo, la Convención de Torremolinos (*IMO*, 1977), aún basan sus criterios de evaluación de estabilidad de buques en esta metodología. Esos criterios no son totalmente confiables, como queda evidenciado por los graves accidentes con buques cuya estabilidad satisfacía (muchas veces con amplio margen) los criterios de la Organización Marítima Internacional –*IMO*–, pero que zozobraron en condiciones ambientales adversas. Algunos ejemplos de estos accidentes se describen en Neves (1985).

Durante muchos años, las tentativas para entender y tratar el problema de zozobra del buque en olas han sido esporádicas y, en general, sin ninguna coordinación global. A pesar de esto, muchos investigadores e instituciones involucrados con el avance del conocimiento en esta área han dado importantes contribuciones: Du Cane y Goodrich (1962), Oakley et al. (1974), Hamamoto y Nomoto (1982), Umeda y Renilson (1994) entre otros. Muchos de estos trabajos han permitido identificar analítica, numérica y experimentalmente varios fenómenos propios del desempeño dinámico del buque, para los que, aún hoy en día, existen pocos o ningún criterio unánime de evaluación. Dentro de estos fenómenos, los que más han atraído la atención

de investigadores e instituciones como la *IMO*, la Conferencia Internacional de Tanques de Remolque –*ITTC*–, sociedades clasificadoras, entre otras, son los mecanismos que llevan a la zozobra del buque, principalmente en mar de popa, pues son estas las condiciones más vulnerables. Más recientemente, algunos accidentes en olas longitudinales de proa, (France et al., 2003), han generado estudios en la *IMO* para la consideración de la resonancia paramétrica en mar de proa.

La *IMO*, ya hace algunos años, viene discutiendo la posibilidad de adoptar criterios basados en el desempeño del buque en lugar de los convencionales prescriptivos, basados en reglas. Para facilitar esto, es necesario que tanto ensayos con modelos como simulaciones numéricas sean desarrollados y validados. Sin embargo, hasta ahora no existe ninguna técnica de predicción numérica estándar. Con este objetivo, la *ITTC*, desde 1997 realiza ensayos experimentales y convoca comités y estudios comparativos para evaluar los resultados de las simulaciones numéricas de los diferentes códigos computacionales desarrollados por las instituciones participantes.

Este artículo discute la estabilidad de buques como un problema dinámico. En primer lugar se hace la descripción de algunos de los mecanismos dinámicos de zozobra más frecuentes, luego el enfoque se centra en algunos estudios experimentales y analíticos recientes, relacionados con la guiñada brusca y la resonancia paramétrica. Estos estudios se basan en investigaciones desarrolladas en la COPPE/UFRJ por Rodríguez (2004) y Cipriano (2005). Las investigaciones consideran pesqueros menores, pero los resultados alcanzados son aplicables, en general, a buques de pequeño y mediano porte.

## Mecanismos de zozobra dinámica

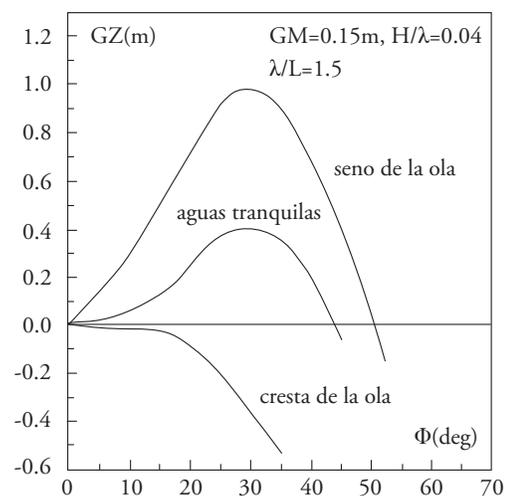
Durante la década de los setenta, la Guardia Costera de los Estados Unidos –*USCG*– auspició un sofisticado programa de investigación en la Universidad de California, que comenzó con una serie de ensayos de modelos en mar abierto en la Bahía de San Francisco, (Oakley et al., 1974). A partir de estos ensayos extensivos fue posible identificar tres

mecanismos de zozobra en mar oblicuo y mar de popa, que fueron denominados pérdida simple de estabilidad, guiñada brusca y resonancia paramétrica.

### Pérdida simple de estabilidad

La pérdida simple de estabilidad ocurre cuando el buque se encuentra ubicado en la cresta de una ola por un periodo suficientemente largo de tiempo. Esto usualmente ocurre en mar de popa en altas velocidades. Como muestra el Gráfico 1, para ciertas olas típicas y configuraciones de casco, los brazos de adrizamiento  $GZ$  para el buque en el seno de la ola son mayores que los de aguas tranquilas. Por otro lado, para el buque posicionado en la cresta de la ola hay una reducción en los brazos de adrizamiento que puede ser suficiente como para causar la zozobra. En algunos casos, los brazos de adrizamiento del buque pueden llegar a reducirse a la mitad de sus valores correspondientes en aguas tranquilas, como por ejemplo, cuando el seno de la ola se ubica en la sección media del buque. Encontrar una ola de longitud y pendiente críticas puede ser suficiente para causar la zozobra repentina del buque.

Gráfico 1. Brazos de adrizamiento para un buque en aguas tranquilas y en olas



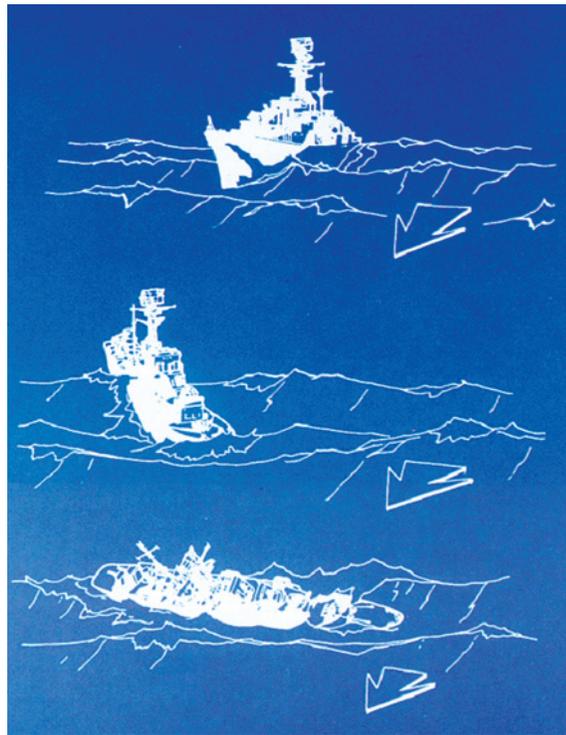
Fuente: Resultados de la investigación.

### Guiñada brusca

La guiñada brusca es un mecanismo bastante dinámico de zozobra, causado por la inestabilidad direccional del buque acelerado en fase con la ola.

Esta situación puede ser producida también por la acción, conjunta o aislada, de la pérdida de eficiencia del timón (a causa de la velocidad orbital de la ola) y la emersión. Al igual que en el primer mecanismo de zozobra, la guiñada brusca usualmente ocurre en mar de popa en altas velocidades, configurando situaciones en las que el buque puede ser “capturado” por la ola y acelerado a la velocidad de esta. En estos casos, la frecuencia de encuentro tiende a cero y el buque pasa a surfar sobre la ola, posiblemente alcanzando una velocidad mucho más alta que la de avance en aguas tranquilas. Esto, por supuesto, tiene un efecto significativo en la estabilidad direccional. Si ocurre inestabilidad direccional, con un gran y repentino cambio de rumbo (por pérdida de la eficiencia de la pala del timón causada ya sea por la emersión de la popa o por la baja velocidad relativa entre el buque y la ola), la velocidad angular asociada introducirá una escora dinámica que podría combinarse con la acción de la ola y causar la zozobra. El Gráfico 2 es la reproducción de un esquema clásico, presentado por primera vez por Du Cane y Goodrich (1962), que describe la guiñada brusca con zozobra de un buque militar. Según esta concepción, la guiñada brusca se caracteriza como un problema dinámico de pérdida de control, con el posible riesgo de zozobra.

Gráfico 2. Secuencia dinámica de la guiñada brusca



Umeda y Renilson (1992) definen la guiñada brusca como “un fenómeno en el cual el buque es incapaz de mantener su rumbo a pesar de la aplicación de su máxima capacidad de gobierno”.

Gráfico 3. Simulaciones numéricas y experimentales de guiñada brusca

Gráfico 3A. Trayectoria del buque durante la guiñada

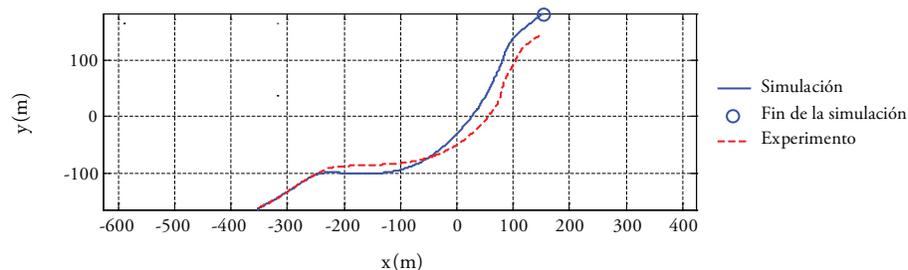
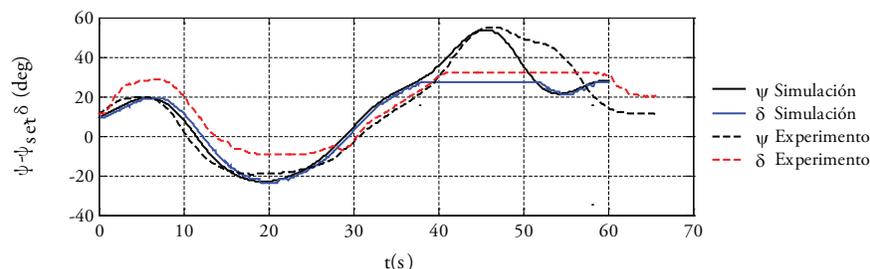


Gráfico 3B. Ángulos de rumbo y timón contra el tiempo



Fuente: Lundback, 2005.

Por lo tanto, la guiñada brusca se caracteriza por un cambio de rumbo debido a la acción de las olas, a pesar de estar aplicado el timón al máximo ángulo, sin necesariamente ocurrir la zozobra o el posible riesgo.

El Gráfico 3 (Lundback, 2005) ilustra la ocurrencia de guiñada brusca para mar oblicuo para un buque patrulla con piloto automático. Las condiciones son:  $U = 15$  nudos;  $\psi_0 = 20^\circ$ ,  $\lambda = 2.5L_{pp}$ ,  $A_w = 2.1m$ , donde  $U$  es la velocidad de referencia,  $\psi_0$ ,  $\lambda$ , y  $A_w$  son, respectivamente, la dirección de incidencia, la longitud, y la amplitud de la ola. En el Gráfico 3B, entre los 40 y 60 segundos, se observa que aun con el timón en su ángulo máximo, el rumbo del buque no es controlado.

### Resonancia paramétrica

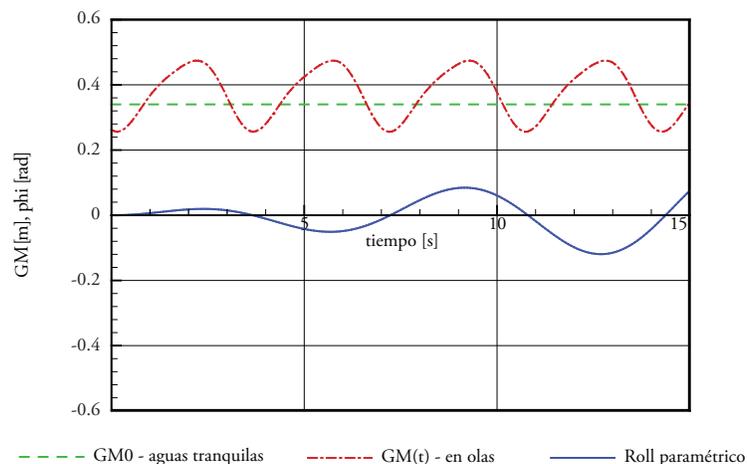
Este mecanismo se refiere al movimiento oscilatorio de *roll* que se desarrolla rápidamente y alcanza grandes amplitudes, pudiendo culminar en la zozobra del buque. Es llamado algunas veces de amplificación de roll parametricamente excitado, y en su forma más pura, parece ocurrir en la siguiente secuencia (como se muestra en el Gráfico 4):

- La estabilidad del buque con la cresta de la ola próxima a su sección media, se reduce enormemente y este adquiere un gran ángulo de *roll*.

- La ola continúa pasando por el buque y su seno llega a la posición media mientras que el buque es escorado, lo que resulta en un incremento acentuado de la estabilidad.
- Como resultado, el buque tiende a retornar bruscamente a su posición adrizada y cuando la alcanza, adquiere una velocidad angular de *roll* alta. Mientras tanto, otra cresta de la ola llega a la posición media del buque, reduciendo su estabilidad durante el balance de su posición adrizada para la otra banda. Así, el buque se inclina aún más hacia esta banda debido a la disminución del momento restaurador.
- Si ahora, otro seno de la ola se aproxima a la sección media con la correcta sintonía, el balanceo hacia esta banda se detendrá, y el buque tenderá a adrizarse nuevamente. Si este proceso continúa, el buque rápidamente alcanzará un punto de zozobra.

La situación, por supuesto, no es frecuentemente tan “pura” como la descrita arriba. Los movimientos de *heave* y *pitch* están presentes usualmente, y las fuerzas y momentos de excitación en *heave* y *pitch* contribuyen a la complejidad del fenómeno.

Gráfico 4. Restauración y amplificación del roll debido a resonancia paramétrica



## Descripción matemática de movimientos no lineales en olas

Como se puede ver, la complejidad de la dinámica involucrada en los tres mecanismos de zozobra resulta imposible de ser representada por modelos numéricos o analíticos lineales. Además, maniobrabilidad y *seakeeping* (desempeño del buque en olas) son problemas tratados en la literatura, típicamente, de forma separada. La maniobrabilidad clásica, abarca el estudio de los movimientos de *surge*, *sway*, y *yaw*, y supone aguas tranquilas. En estos casos, las frecuencias de movimiento son normalmente bastante bajas, y los efectos viscosos relevantes. Ya el *seakeeping* clásico, que involucra los movimientos de *heave* y *pitch*, es estudiado, usualmente, basado en las hipótesis de la teoría potencial.

Como típicamente, maniobrabilidad y *seakeeping* son estudiados de forma separada, los sistemas de referencia usados para describirlos son diferentes. En maniobras, los movimientos son descritos usando el sistema móvil fijo en el cuerpo, y en ondas, el sistema de referencia adoptado es el inercial que se desplaza con velocidad constante igual a la del buque en aguas tranquilas. Hasta la fecha, muy poca es la literatura que trata sobre la maniobrabilidad en olas.

Así pues, para usar un modelo matemático que incorpore las características tanto de maniobras como de desempeño en olas acopladas, es preciso describir los seis movimientos del buque en un sistema de referencia único, aun cuando las fuerzas y momentos actuantes estén inicialmente expresados en sistemas de referencias distintos.

El modelo matemático desarrollado por Neves et al. (2005), utilizado en el presente trabajo, se obtiene a partir de expansiones en series de Taylor de las acciones hidrodinámicas (e hidrostáticas) que gobiernan el buque. Las ecuaciones de maniobra de tercer orden de Abkowitz (1964) son adaptadas para el sistema de referencia inercial y acopladas a las ecuaciones no lineales de tercer orden en los modos de *heave*, *roll* y *pitch*, desarrolladas por Neves y Rodríguez (2004), resultando así un sistema de ecuaciones no lineales para los movimientos del

buque en seis grados de libertad, y una ecuación adicional para describir la dinámica del piloto automático:

Los seis grados de libertad son representados por el vector de desplazamientos:

$$\vec{s}(t) = [x(t) \ y(t) \ z(t) \ \vartheta(t) \ \theta(t) \ \psi(t)]^T$$

La ecuación no lineal que describe los movimientos se define en general como:

$$(\tilde{M} + \tilde{A})\ddot{\vec{s}} + \tilde{B}(\dot{\vec{s}}) + \tilde{C}_{res}(\vec{s}, \zeta) = \tilde{C}_{ext}(\delta, \zeta, \dot{\zeta}, \ddot{\zeta}) \quad (1)$$

Las características completas de esas ecuaciones aplicadas a la dinámica de guiñada brusca son presentadas en Neves et al. (2005). Aplicaciones a la resonancia paramétrica son detalladas en Neves y Rodríguez (2004, 2005). Como se mencionó, las no linealidades son introducidas por medio de series de Taylor de hasta tercer orden.

Para simular adecuadamente un ensayo libre, la ecuación del piloto automático:

$$K_2\dot{\psi} + K_1(x - \psi) = T_E \dot{\delta} + \delta \quad (2)$$

es acoplada al sistema de ecuaciones (1). En caso de que exista a bordo un tanque estabilizador, la ecuación del movimiento del agua dentro del tanque deberá también acoplarse al sistema de ecuaciones anteriores.

En estas ecuaciones:  $x$ ,  $y$ ,  $z$  representan los movimientos traslacionales en *surge*, *sway* y *heave*, respectivamente, mientras que las variables  $\vartheta$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ , y  $\delta$  describen los movimientos angulares del buque en *roll*, *pitch*, y *yaw*, y del timón, en ese orden. Los puntos sobre las variables anteriores denotan derivadas en relación con el tiempo; un punto para velocidad y dos puntos para aceleraciones.

Las variables con subíndices –empleando la misma lógica anterior– representan coeficientes de amortiguamiento y masa adicional, respectivamente. Las variables con subíndices sin puntos son coeficientes de restauración hidrostática.  $K_1$ ,  $K_2$ , y  $T_E$  son las ganancias proporcional, diferencial y atraso del piloto automático, respectivamente.

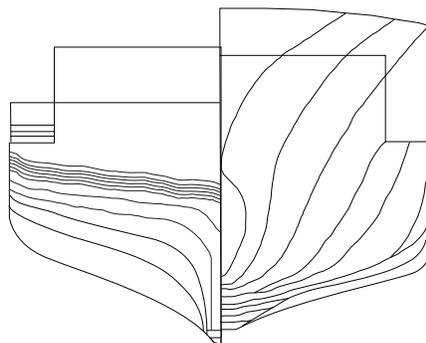
## Estudios de guiñada brusca en olas extremas. Ensayos libres en mar de popa

La COPPE/UFRJ, y su Laboratorio de Ingeniería Oceánica (LabOceano), fue invitada a participar del último estudio comparativo, denominado *24th International Benchmark Testing of Numerical Modelling on Intact Stability*, convocado en marzo de 2004. El buque ensayado por la *ITTC* corresponde a un pesquero rápido de cerco, de formas finas (típico japonés), denominado aquí, PS. Las características principales y plano de formas de este buque son presentados en el Cuadro 1 y en el Gráfico 5, respectivamente.

Cuadro 1. Características del buque PS

Denominación	Tamaño (m)
Eslora entre perpendiculares	34.50
Manga	7.60
Puntal	3.07
Calado medio	2.65
Radio de giro en <i>roll</i>	3.86
Radio de giro en <i>yaw</i>	3.28
Radio de giro en cabeceo	3.28
Altura metacéntrica transversal	0.75
Posición vertical del C. G.	3.36

Gráfico 5. Líneas de forma del buque PS



Este buque fue reproducido en escala 1/15 y fue efectuada una serie sistemática de ensayos radiocontrolados para diferentes condiciones de altura de onda, aproamiento y velocidad de avance.

Todos estos ensayos fueron realizados en el tanque del Instituto de Ingeniería de Pesca de Japón (*NRIFE*).

Sobre la base del modelo matemático mostrado en la sección anterior, fue implementado un código computacional denominado STAB6D, con el que fue posible realizar las simulaciones numéricas de las condiciones ensayadas experimentalmente con el buque PS y confrontarlas con las respectivas series temporales experimentales cedidas por la *ITTC* para el estudio comparativo.

Los coeficientes de masa adicional y amortiguamiento, así como las fuerzas y momentos de excitación externos fueron calculados inicialmente usando la Teoría de las Rebanadas (Salvesen et al., 1970). El amortiguamiento en *roll* fue corregido en relación con el valor potencial y recalculado usando el método de Himeno (1981) que incorpora los efectos viscosos. Las derivadas de maniobra para este buque fueron calculadas experimentalmente y publicadas en el trabajo de Umeda y Hashimoto (2002), y superpuestas linealmente a los amortiguamientos y masas adicionales potenciales.

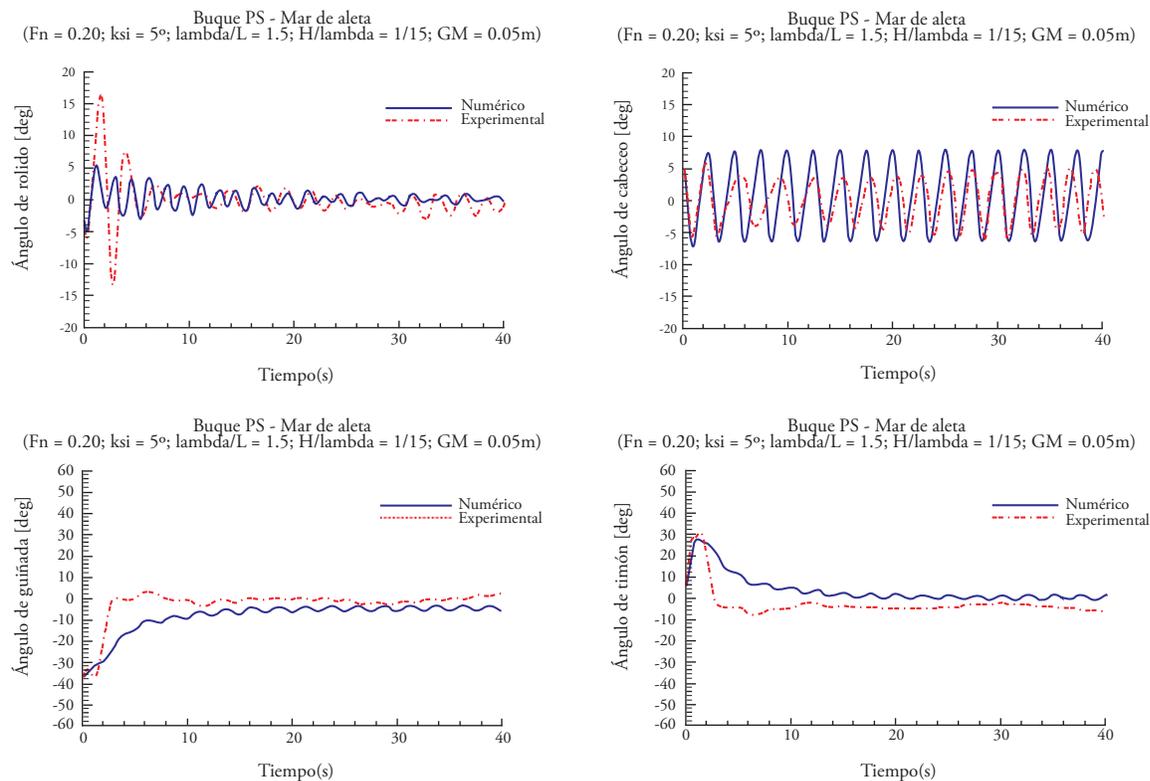
En total fueron ensayadas nueve condiciones que resultaron de la combinación de varias velocidades y aproamientos. En todas las pruebas fueron registradas las series temporales de los movimientos del modelo (en *roll*, *pitch* y *yaw*) y del timón. Todas las condiciones correspondieron a situaciones en las que las olas sobrepasaron el buque. En general, existen grandes dificultades para la conducción de este tipo de ensayos, siendo muy escasos los laboratorios existentes con real capacidad para realizarlos, de ahí que, en la práctica, pocos resultados de ensayos en estas condiciones sean cedidos para fines comparativos.

Desde el punto de vista numérico, los ensayos en mar de popa en olas extremas son de fundamental importancia para validar un código numérico, pues en estas condiciones las no linealidades son más fuertes (y los acoplamientos también), constituyendo un problema bastante complejo de dinámica en olas. Los gráficos 6 y 7 presentan las respuestas de *roll*, *pitch*, *yaw* y del timón (en la escala del modelo) para algunas de las condiciones ensayadas, consi-

deradas de mayor interés. Los resultados numéricos completos pueden ser encontrados en Cipriano (2005). En el Gráfico 6 puede observarse que los resultados numéricos en *roll* y *pitch*, para  $F_n = 0.20$  y  $\chi = 5^\circ$  (incidencia de ola o aproamiento del buque) son satisfactorios. Nótese, sin embargo, que la serie temporal de *roll* presenta algunas oscilaciones

fuertes en los primeros ciclos del ensayo (posiblemente por la aplicación de aceleraciones iniciales para llevar el modelo rápidamente a la velocidad de ensayo) y el movimiento de cabeceo es ligeramente sobreestimado en las simulaciones. Ya los ángulos de guiñada y del timón tienen diferencias mínimas en relación con los experimentos.

Gráfico 6. Respuesta en mar de popa<sup>1/</sup>

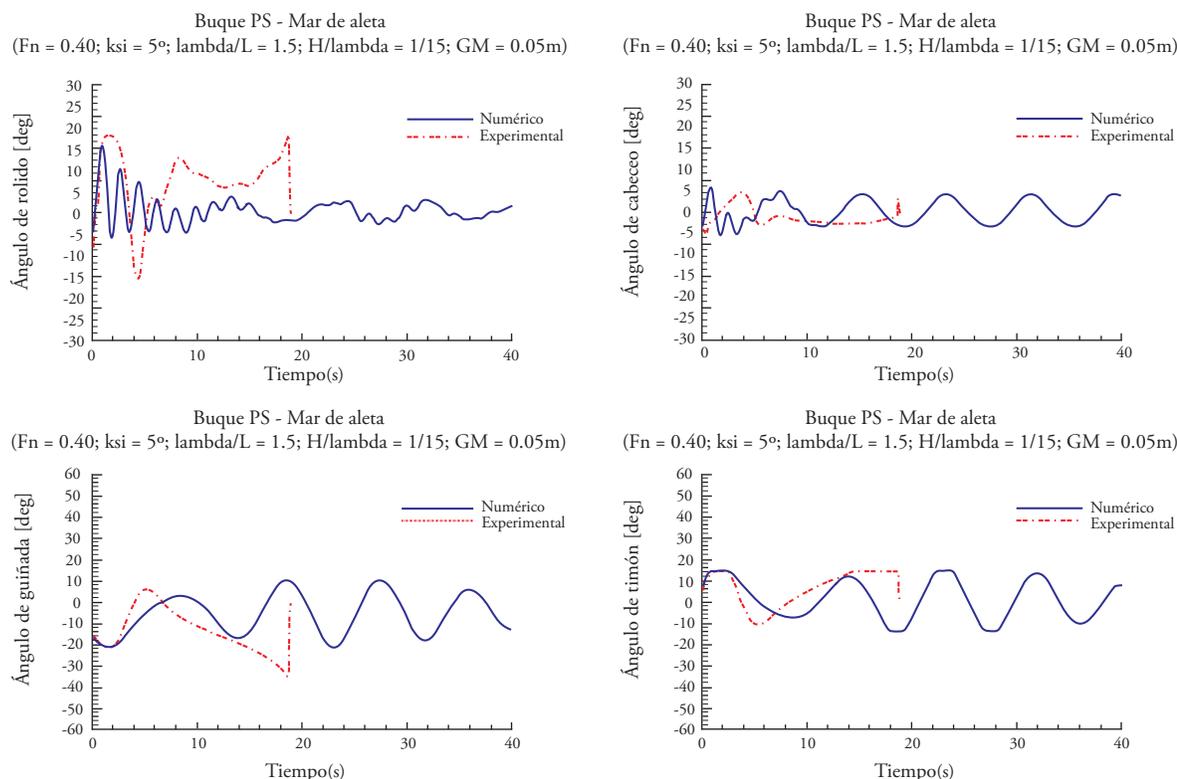


<sup>1/</sup>  $F_n = 0.20$  y  $\chi = 5^\circ$  (escala del modelo).  
Fuente: Resultados de la investigación.

En el Gráfico 7 se analiza la condición de ensayo de mayor velocidad,  $F_n = 0.40$ , y menor incidencia,  $\chi = 5^\circ$ . Puede observarse que las amplitudes de respuesta en *roll* tanto en el ensayo como en la simulación numérica, son relativamente bajas, existiendo cierta proximidad entre ambos resultados.

Sin embargo, como puede verse en la respuesta de *yaw* hay ocurrencia de guiñada brusca sin que resulte en riesgo de zozobra. La guiñada brusca ocurrió cerca de los 19 segundos, luego de lo cual, el experimento fue encerrado. Debe observarse también que el modelo numérico no reproduce

la guiñada brusca de la forma como aparece en la serie experimental. A pesar de esto, es importante notar que las amplitudes de guiñada crecen significativamente, e incluso, alrededor de los 19 segundos de la simulación, se registra un cambio brusco en el ángulo numérico de guiñada (pasando de  $14^\circ$  a  $-14^\circ$  en pocos segundos), lo que según Renilson y Tuite (1997), ya caracteriza una guiñada brusca. Por este criterio, la guiñada brusca ocurre para variaciones bruscas (superiores a  $20^\circ$ ) de ángulo de guiñada, ya con el timón en su máxima capacidad (timón saturado).

Gráfico 7. Respuesta en mar de popa<sup>1/</sup>

<sup>1/</sup>  $F_n = 0.40$  y  $\chi = 5^\circ$  (escala del modelo).

Fuente: Resultados de la investigación.

## Resonancia paramétrica en mar de frente

Es importante reconocer que la descripción de procesos resonantes significa una modelación cuidadosa de la energía potencial del sistema. Teniendo en consideración esto, Neves y Rodríguez (2004) han demostrado que la dinámica de la resonancia paramétrica debe ser descrita por un conjunto de ecuaciones de movimiento no lineales en *heave*, *roll* y *pitch*, con acoplamientos de hasta tercer orden. Las expresiones para los términos no lineales de segundo y tercer orden que describen los acoplamientos entre los modos involucrados pueden encontrarse en Neves y Rodríguez (2005).

Para fines de comparación, el presente estudio considera los resultados de un buque pesquero de popa tipo espejo, denominado buque TS. Las dimensiones principales y el plano de secciones

transversales del casco, son mostrados en el Cuadro 2 y el Gráfico 8, respectivamente.

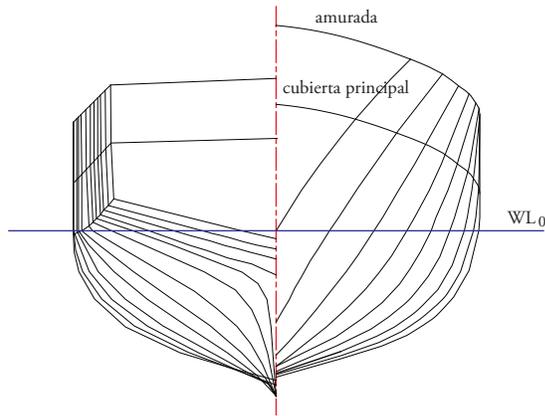
Cuadro 1. Características del buque PS

Denominación	Tamaño (m)
Eslora total	25.91
Eslora entre perpendiculares	22.09
Manga	6.86
Puntal	3.35
Calado	2.48
Desplazamiento	170.3 (ton)
Radio de giro en cabeceo	5.52

Los gráficos 9 y 10 presentan las series temporales para el movimiento de *roll*, tanto experimentales como numéricas (obtenidas con el simulador no lineal). En cada uno, los resultados de la modelación de tercer orden son comparados con resultados experimentales obtenidos en canal de remolque

(Neves et al. 2002), así como con resultados numéricos de una modelación de segundo orden.

Gráfico 8. Líneas de forma del buque TS



El Gráfico 9 (A y B) muestra el movimiento de *roll* para  $GM = 0.37m$ ,  $F_n = 0.15$ ,  $\omega_e = 2\omega_{n4} = 1.717 rad/s$ . En 9A, para una amplitud de ola pequeña,  $A_w = 0.45m$ , tiene excelente concordancia entre

la modelación de tercer orden y los resultados experimentales, en cuanto que la modelación de segundo orden produce resultados excesivos. Para las mismas condiciones, pero con amplitud de ola mayor (9B), la modelación de tercer orden simula respuestas un poco menores que las experimentales, sin embargo, puede afirmarse que la comparación es buena. La modelación de segundo orden es completamente incapaz de producir resultados comparables.

Interpretaciones similares son aplicables a los casos presentados en el Gráfico 10 (A y B), correspondientes a  $GM=0.37 m$ ,  $F_n=0.20$ ,  $F_n=0.30$ ,  $\omega_e=2\omega_{n4}=1.717 rad/s$ . Para ambas condiciones hay buena concordancia entre la modelación de tercer orden y los experimentos, mientras que la modelación de segundo orden no es capaz de reproducir los experimentos. Es importante notar que la condición presentada en 10B corresponde a *roll* paramétrico intenso, con ángulos de roll cercanos a  $38^\circ$ .

Gráfico 9. Respuesta en roll<sup>1/</sup>

Gráfico 9A.  $A_w = 0.45 m$

Buque TS:  $GM = 0.37 m$ ,  $F_n = 0.15$   
 $\omega_e = 2\omega_{n4}$ ,  $A_w = 0.45 m$ ,  $\text{ksi} = 180^\circ$

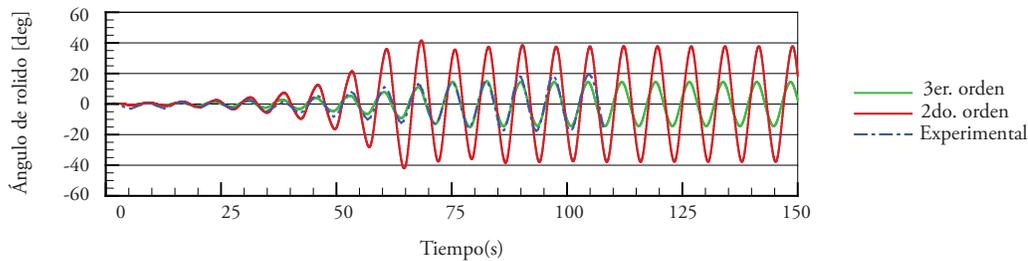
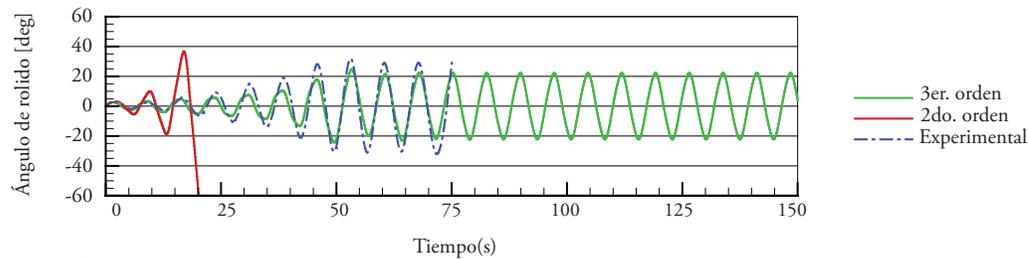


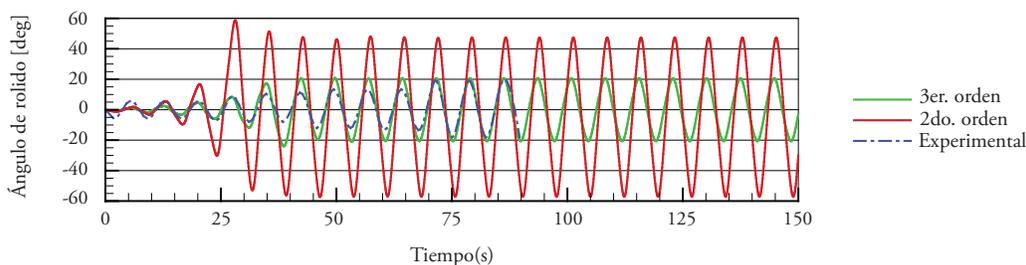
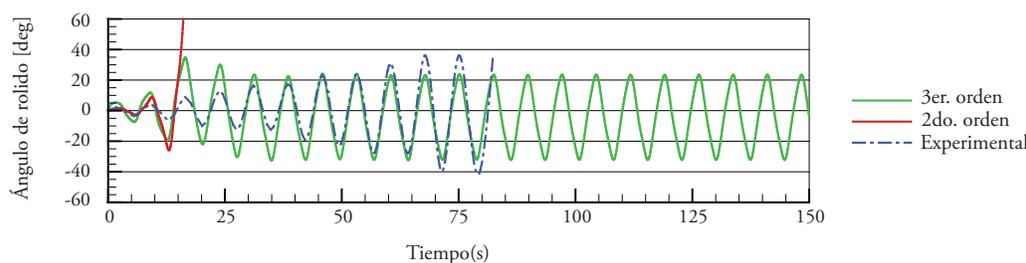
Gráfico 9B.  $A_w = 1.02 m$

Buque TS:  $GM = 0.37 m$ ,  $F_n = 0.15$   
 $\omega_e = 2\omega_{n4}$ ,  $A_w = 1.02 m$ ,  $\text{ksi} = 180^\circ$



<sup>1/</sup>  $GM = 0.37m$ ,  $F_n = 0.1$ .

Fuente: Resultados de la investigación

Gráfico 10. Respuesta en roll<sup>1/</sup>Gráfico 10A.  $A_w = 0.60 \text{ m}$ Buque TS:  $GM = 0.37 \text{ m}$ ,  $Fn = 0.20$   
 $We = 2Wn^4$ ,  $A_w = 0.60 \text{ m}$ ,  $ksi = 180^\circ$ Gráfico 10B.  $A_w = 0.78 \text{ m}$ Buque TS:  $GM = 0.37 \text{ m}$ ,  $Fn = 0.30$   
 $We = 2Wn^4$ ,  $A_w = 0.78 \text{ m}$ ,  $ksi = 180^\circ$ <sup>1/</sup>  $GM = 0.37 \text{ m}$ ,  $Fn = 0.2$ .

Fuente: Resultados de la investigación

Neves y Rodríguez (2004) han demostrado que cuando se considera el sistema de ecuaciones acopladas con términos de hasta tercer orden, la ecuación para las perturbaciones (ecuación variacional) en *roll* es dada por:

$$(J_{xx} + K_\phi)\ddot{\phi} + B_\phi\dot{\phi} + [K_\phi + R_0 + R_1\cos(\omega_e t + \tau_1) + R_2\cos(2\omega_e t + \tau_2)]\phi = 0 \quad (3)$$

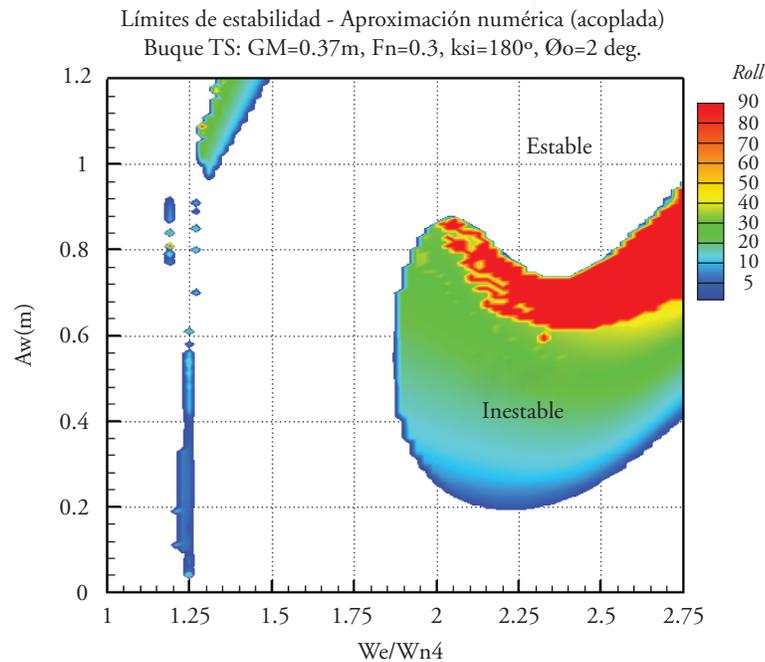
Donde  $R_0$ ,  $R_1$ , y  $R_2$  son coeficientes de restauración y,  $\tau_1$  y  $\tau_2$ , son desfases entre momentos restauradores periódicos y la ola. En contraste con la modelación de segundo orden, donde la ecuación variacional resultante es del tipo Mathieu, en la modelación de tercer orden se obtiene una ecuación de tipo Hill. Como se puede notar en la ecuación (3), adicionalmente a los términos característicos de Mathieu, aparecen dos contribuciones más:  $R_0$  y  $R_2\cos(2\omega_e t + \tau_2)$ . Estos nuevos términos, como es discutido en Neves y Rodríguez (2004), son relacionados con importantes características no lineales: una rigidez no lineal y una excitación paramétrica biarmónica, respectivamente.

Una característica de gran interés para el proyecto de buques es el cálculo de límites de estabilidad para la resonancia paramétrica. El Gráfico 11 presenta los límites de estabilidad (obtenidos numéricamente con la modelación de tercer orden) para el buque TS. Se observa la forma convexa del límite superior del área de inestabilidad, resultado de la incorporación de no linealidades de tercer orden en la restauración.

### Influencia del tanque estabilizador en la resonancia paramétrica

Teniendo en cuenta que la amplificación paramétrica puede ser un proceso de resonancia muy intensa, es relevante considerar la aplicación de tanques estabilizadores pasivos de tipo U como sistemas potencialmente capaces de controlar el fenómeno. Los tanques estabilizadores son bastante conocidos como eficientes sistemas de amortiguamiento del *roll* en mar de través, pero muy poco se ha estudiado su acción en el caso de olas longitudinales, donde la excitación del roll es un proceso interno.

Gráfico 11. Límites de estabilidad<sup>1/</sup>



<sup>1/</sup>Fn=0,30

Fuente: Resultados de la investigación.

Se utiliza una modelación no lineal para el tanque. El Gráfico 12 presenta resultados en los que se observa que el tanque puede ser sincronizado para producir gran amortiguamiento. En 12A se presenta la influencia del nivel de amortiguamiento considerado en el proyecto del tanque. En 12B se

verifican las respuestas para diferentes fracciones de masa de agua por masa del navío. La condición analizada es la que se ha encontrado más favorable, en la cual la frecuencia natural del tanque es cerca de 30% mayor que la del navío,  $W_{tt} = 1,302W_{n4}$ .

Gráfico 12. Respuesta en roll para buque con tanque estabilizador en mar de proa

Gráfico 12A

Buque TS: GM = 0.37m, Fn = 0.20, Mt = 4%Mn  
 Aw = 0.69m, ksi 180°, Wtt = 1.302Wn4

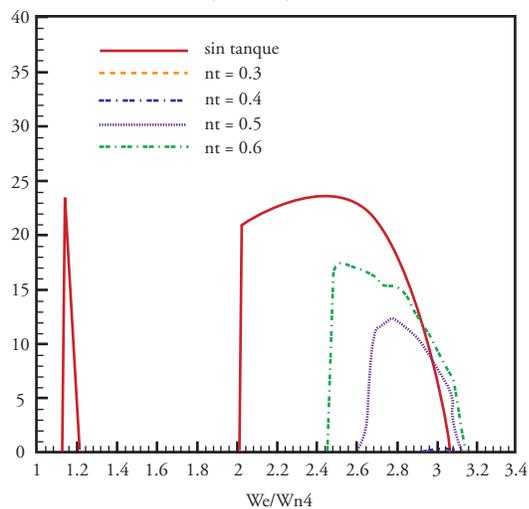
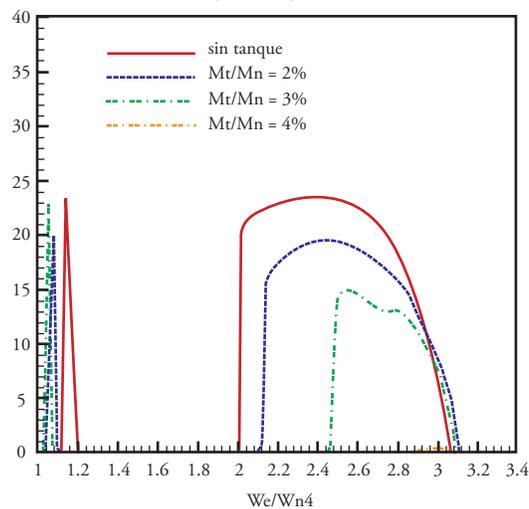


Gráfico 12B

Buque TS: GM = 0.37m, Fn = 0.20, nt = 0.4  
 Aw = 0.69m, ksi 180°, Wtt = 1.302Wn4



## Conclusiones

El presente trabajo sugiere la necesidad de que la estabilidad de buques pesqueros sea tratada como un proceso dinámico. Fue desarrollada una breve discusión en relación con los mecanismos dinámicos que pueden llevar a la zozobra de buques de pequeño porte y luego se profundizó en la guiñada brusca y la resonancia paramétrica.

Se presentó un modelo matemático no lineal en el cual se incluyen los efectos del perfil de la ola no solo en la forma convencional de fuerzas y momentos de Froude-Krilov y de difracción, sino también en cambios volumétricos en la forma sumergida del casco debido al paso de la ola a lo largo del buque en cualquier incidencia de mar. Los modos de *heave-roll-pitch* se acoplaron en su totalidad, resaltando la importancia de describir completamente los términos temporales paramétricos, considerando que estos realmente determinan los mecanismos de intercambio de energía entre un modo y otro, y de la excitación externa para la interna.

Las simulaciones temporales fueron comparadas con resultados experimentales. En general, se encontró muy buena concordancia. Esto indicaría que la modelación matemática de tercer orden, en general, es capaz de describir la dinámica de la guiñada brusca y de la resonancia paramétrica, incluso para el caso de olas bastante grandes. Los aspectos prácticos pueden ser entendidos a partir del análisis de los componentes de tal mecanismo complejo.

## Referencias

- Abkowitz, M. A. (1964) "Lectures on Ship Hydrodynamics Steering and Maneuverability". Hydrodynamics Department, Report n.º Hy-5, Lyngby, Denmark.
- Cipriano, W. M. (2005) "Estabilidade do Navio em Condições Extremas: Estudo de um Modelo Numérico Não-Linear de Terceira Ordem Acoplado em Seis Graus de Liberdade". Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Du Cane, P., Goodrich, G. J. (1962) "The Following Sea, Broaching and Surging". The Royal Institution of Naval Architects, Quarterly Transactions, vol. 104, n.º 2.
- France, W. N.; Levadou, M.; Treacle, T. W.; Paulling, J. R., Michel, and R. K., Moore, C. (2003) "An Investigation of Head-Sea Parametric Rolling and its Influence on Container Lashing Systems", Marine Technology, vol. 40, n.º 1 (Jan), pp. 1-19.
- Froude, W., (1863) "Remarks on Mr. Scott Russell's Paper on Rolling", Trans. INA, vol. 4, pp 232-275, London.
- Hamamoto, M., Nomoto, K. (1982) "Transverse Stability of Ships in Following Seas". Proceedings of 2nd Internat. Conf. on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB'82), Tokyo, Japan.
- Himeno, Y. (1981) "Prediction of Ship Roll Damping – State of the Art". Dept. Naval Architecture and Marine Engineering, The University of Michigan, Report n.º 239.
- IMO (1977) "Torremolinos International Convention for the Safety of Fishing Vessels". In International Conference on Safety of Fishing Vessels, London.
- Lundback, O. (2005) "An Investigation of Hydrodynamic Forcing on a Semi-planing Monohull in Following and Stern Quartering Seas", 8th. International Ship Stability Workshop, Istanbul, Turkey.
- Neves, M. A. S. (1985) "Revisión de algunos accidentes con buques pesqueros". II Congreso Nacional de Prevención de Riesgos en la Industria Pesquera, Talcahuano, Chile.
- Neves, M. A. S., Pérez, N., Lorca, O. (2002) "Experimental Analysis on Parametric Resonance for Two Fishing Vessels in Head Seas". Proceedings of 6th International Ship Stability Workshop, Webb Institute, New York.

- Neves, M. A. S., Rodríguez, C. A. (2004) "Limits of Stability of Ships Subjected to Strong Parametric Excitation in Longitudinal Waves". In: Proceedings of 2nd International Maritime Conference on Design for Safety, Sakay, Japan, pp. 139-145.
- Neves, M. A. S., Rodríguez, C. A. (2005) "A Non-Linear Mathematical Model of Higher Order for Strong Parametric Resonance of the Roll Motion of Ships in Waves", *Marine Systems & Ocean Technology*, vol. 1, n.º 2.
- Neves, M. A. S., Rodríguez, C. A., Cipriano, W. M. (2005) "ITTC Benchmark. Evaluación de códigos numéricos para estabilidad intacta: Estudio de la zozobra de un pesquero rápido de cerco en mar de popa", Copinaval 2005, Guayaquil, Ecuador.
- Oakley, O. H., Paulling, J. R., Wood, P. D. (1974) "Ship Motions and Capsizing in Astern Seas", Proc., 10th Symposium on Naval Hydrodynamics, Cambridge, Massachusetts.
- Rahola, J. (1939) "The Judging of the Stability of Ships and the Determination of the Minimum Amount of Stability". Doctoral Thesis, Helsinki Technical University.
- Reed, E. J. (1868) "On the Stability of Monitors under Canvass". Trans. INA, London.
- Renilson, M. R., Tuite, A. (1997) "The Effect of GM on Broaching and Capsizing of Small Fishing Vessels in Following Seas". Proceedings of 6th Internat. Conf. on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB'97), Varna, Bulgaria, pp. 149-161.
- Rodríguez, C. A. (2004) "Estabilidade Dinâmica do Navio: Um Modelo Não-Linear de Terceira Ordem". Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Salvesen, N., Tuck, O. E., Faltinsen, O. (1970) "Ship Motions and Sea Loads", *Transactions of SNAME*, vol. 78, pp. 250-287.
- Umeda N., Hashimoto, H. (2002) "Qualitative Aspects of Nonlinear Ship Motions in Following and Quartering Seas with High Forward Velocity", *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 6, pp. 111-121.
- Umeda, N., Renilson, M. R. (1992) "Wave Forces on a Ship Running in Quartering Seas – A Simplified Calculation Method". In: Proceedings of 11th Australasian Fluid Mechanics Conference, Hobarth, Australia.
- Umeda, N., Renilson, M. R. (1994) "Broaching of Fishing Vessel in Following and Quartering Seas - Nonlinear Dynamical System Approach". Proceedings of 8th Internat. Conf. on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB'94), Florida, The United States of America.

# Sustitución de la arena en procesos de chorreado en seco para la limpieza de superficies metálicas

Giovanni A. Juzga León\*  
Reinaldo Villalba Rodríguez\*\*  
Ronald Rueda Sarmiento\*

## Resumen

El presente artículo centra su objetivo en valorar la viabilidad técnica, económica y ambiental de materiales abrasivos que sustituyan la arena, convencionalmente utilizada en los procesos de preparación de superficies de las embarcaciones que ingresan a mantenimiento en los astilleros de la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial –Cotecmar– en Cartagena de Indias, dado el impacto negativo que genera su uso en el medio ambiente y en la salud del personal que interviene en el proceso. Aplicando el método jerárquico AHP, la metodología de selección de materiales de la Corporación para la Investigación de la Corrosión –CIC– y el modelo de costos desarrollado, se seleccionó un grupo de abrasivos para evaluar su competitividad técnico-económica tanto en el laboratorio como en los astilleros de Cotecmar. El resultado final fue un proceso de chorreado en seco con escoria de cobre, y un proceso contingente que utiliza escoria de ferróníquel. El primer material se comercializa como abrasivo, el segundo no y ambos son técnica y económicamente competitivos y con un marginal impacto ambiental y en la salud del personal.

**Palabras clave:** Abrasivos, escorias, emisión de finos, preparación de superficie.

## Abstract

The present article centers its objective on valuing the technical, economic and environmental feasibility of abrasive materials which substitute sand, conventionally used in the processes of surface preparation of the ships that undergo maintenance in the shipyards of the Corporation of Science and Technology for the Development of the Naval, Maritime and Riverine Industry –Cotecmar– in Cartagena de Indias, given the negative impact that its use generates in the environment and in the health of the personnel involved in the process. Applying the hierarchic method AHP, the methodology of material selection of the Corporation for the Investigation of Corrosion –CIC– and the cost method developed, a group of abrasive was selected to test its technical-economic competitiveness in the lab as well as in Cotecmar's shipyards. The final result was a dry-blasting process with copper dreg, and a contingent process that uses dreg of ferronickel. The first material is commercialized as an abrasive, the second isn't, and both are technically and economically competitive with only a marginal impact on the environment and on the health of the personnel.

**Key Words:** Abrasive, dreg, fine emissions, surface preparation

Fecha de recepción: 4 de septiembre de 2008

Fecha de aceptación: 23 de octubre de 2008

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

\*\* Asesor CIC

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

La Corporación para la Investigación de la Corrosión y los autores agradecen el apoyo de Cotecmar, tanto para la elaboración del presente artículo como a lo largo del proyecto: "Evaluación y Selección de Abrasivo como Sustitutos de la Arena en la Preparación de Superficies Metálicas en los Astilleros de Cotecmar: Impacto Técnico, Económico y Ambiental". Además, hacen extensivo este agradecimiento a la Universidad Tecnológica de Bolívar por sus invaluables aportes en la construcción de los análisis de productividad asociados al proceso de preparación de superficie. Por último, agradecen la gestión en la información de salud ocupacional proporcionada por la ARP Colmena.

## Introducción

El mantenimiento de embarcaciones es una actividad que representa un gran reto para los astilleros, puesto que es necesario ofrecer un servicio con un perfecto balance entre calidad, costos y productividad, en razón al impacto económico del lucro cesante que representa para una embarcación permanecer en dique seco, sumado a las altas exigencias de confiabilidad en la integridad estructural, solicitadas por los organismos de control propios de este tipo de transporte.

Exceptuando los casos especiales de mantenimiento, en los cuales la embarcación ingresa al astillero para diagnosticar o realizar una corrección a una falla plenamente identificada durante su operación, el programa de mantenimiento en dique seco contiene una importante agenda en el tema de la preparación de superficie y aplicación de recubrimientos sobre los diferentes elementos estructurales. La condición balanceada de calidad, costos y productividad, ha limitado, por diversas razones, el uso de diferentes tipos de procesos alternativos de preparación de superficies: demanda de agua, escasa competitividad y altas inversiones. De hecho, diversos autores, entre ellos Schmidt con Peart y Lou, consideran que los sistemas de limpieza libres de abrasivos que operan a altas presiones implican una gran demanda de agua. Asimismo, varias investigaciones como las realizadas por Frenzel, Woodson y Lever reportan que los sistemas que aplican abrasivos en húmedo presentan un nivel poco competitivo en cuanto a productividad dado el bajo rendimiento de los procesos. En tercer lugar, según lo expresan algunos estudios como los realizados por Lever, Munger, Clemco Industries y Environment Canada las tecnologías no convencionales de relativo desarrollo reciente requieren considerables inversiones, reingeniería en la planta existente y planes especiales de entrenamiento para su operación y mantenimiento. Estas limitaciones han facilitado que el proceso de limpieza de grandes superficies mediante chorreado en seco de abrasivos haya mantenido su liderazgo por varias décadas y que la arena, en función de su alta disponibilidad, bajo costo nominal y alta efectividad, haya representado el abrasivo de mayor aceptación para mantener un nivel competitivo.

Este alto grado de competitividad del proceso de chorreado en seco utilizando arena como abrasivo, lamentablemente contrasta con el alto impacto negativo sobre el ambiente y la salud de los trabajadores. Esa condición representa una amenaza latente para la continuidad operacional y la viabilidad empresarial de un astillero en el corto, mediano y largo plazo, por cuanto las reglamentaciones en materia de protección al ecosistema a escala local, nacional e incluso mundial, han aumentado progresivamente su nivel de exigencia.

En este contexto, el enfoque para la selección de un abrasivo aplicable a un proceso de limpieza de superficies mediante chorreado en seco, implica la necesidad de medir sus impactos técnico, económico y ambiental. Igualmente, la sustitución de un abrasivo utilizado regularmente, exige criterios de comprobación semejantes, sumados a la adopción del material de uso común como patrón de referencia. El segundo enfoque, resulta ser el más conveniente para el caso de astilleros que operan con altos grados de compromiso contractual de la capacidad instalada a corto y mediano plazo y cuyo requerimiento primordial es mantener activas sus políticas de gestión comercial. Desde esta perspectiva, la identificación de un potencial abrasivo sustituto, delimitada por la capacidad operacional disponible, sin requerimientos importantes de cambios o adecuaciones en los equipos, en los servicios industriales y en el personal, permite una implementación de tipo gradual y progresiva que admite una efectiva apropiación del sustituto.

Esta estrategia fue adoptada por la Dirección de Investigación, Desarrollo e Innovación –Didesi– de Cotecmar, que adelantó las gestiones en calidad de beneficiario, para la realización del proyecto “Evaluación y Selección de Abrasivos como Sustitutos de la Arena en la Preparación de Superficies Metálicas en los Astilleros de Cotecmar: Impacto Técnico, Económico y Ambiental”, cofinanciado por el Estado a través del Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología, Francisco José de Caldas, Colciencias, la participación de la Universidad Tecnológica de Bolívar y la ejecución a cargo del Centro de Desarrollo Tecnológico de la CIC.

El contenido de este artículo presenta de manera general, la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto y los criterios implementados para la selección gradual de abrasivos potencialmente competitivos. Además, describe de manera detallada, los resultados que permiten establecer claramente, la disponibilidad de procesos de chorreado en seco con un impacto marginal en el ambiente y en la salud de los operarios. Complementariamente, se resalta que a pesar del precio relativamente elevado del abrasivo, el grado de competitividad técnico-económica se fundamenta en establecer altos niveles de productividad. Para valorar de manera confiable las variables de mayor incidencia, es imprescindible disponer de un modelo ambiental, desarrollar un modelo de costos específico y contar con la actitud comprometida entre el astillero, el ente gestor y el ejecutor.

### Metodología

Mediante la evaluación del estado del arte de materiales abrasivos, se obtuvo un espectro conformado por escorias minerales, de cobre, de hierro, de ferromniquel, de carbones, cascarilla de arroz, granates, silicatos de aluminio, feldepasto, vidrio reciclado y vidrio triturado. Una vez contactados los proveedores respectivos y obtenida la información técnica y comercial disponible, se procedió a obtener muestras de los diferentes materiales para los ensayos que se presentan a continuación.

Este proceso definió que los abrasivos potencialmente competitivos eran escoria de cobre, vidrio

Gráfico 1. Abrasivos seleccionados para evaluar en campo y laboratorio en la segunda fase del proyecto

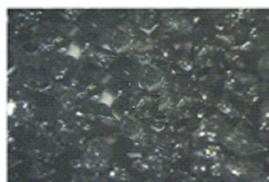


Gráfico 1A.  
Escoria mineral



Gráfico 1B.  
Escoria de cobre

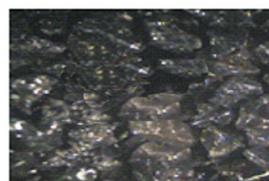


Gráfico 1C.  
Silicato de aluminio



Gráfico 1D.  
Granate



Gráfico 1E.  
Arena

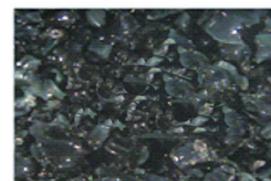


Gráfico 1F.  
Escoria ferromniquel



Gráfico 1G.  
Vidrio



Gráfico 1H.  
Escoria de hierro

Cuadro 1. Ensayos realizados y criterios de elección de la primera fase del proyecto

Ensayo	Criterio
<i>Microblasting</i> en laboratorio a probetas corroídas previamente, y en probetas previamente pintadas con sistemas de recubrimientos de cuatro capas	Eficacia de la calidad de limpieza predefinida según lineamientos de la clasificación SSPC.
Aplicación del método jerárquico AHP por el astillero y la CIC	Técnico (subcriterios: Conductividad, perfil de anclaje, humedad); mercado y logística (subcriterios: Existencias, tiempos de entrega y estabilidad en almacenamiento); económico, salud ocupacional (subcriterios: Emisión de PM10, SiO <sub>2</sub> , elementos tóxicos), y rendimiento y ambiental (subcriterios: Emisión de finos, manejo de residuos, ruido).

Fuente: Resultados de la investigación.

triturado, escoria de ferroníquel, silicato de aluminio, granate, escoria de hierro y escoria mineral, los cuales fueron evaluados mediante los ensayos de campo y laboratorio, a continuación relacionados.

ferroníquel y el silicato de aluminio, para evaluar su productividad, mediante la implementación industrial a escala piloto en la planta Bocagrande de Cotecmar.

Una vez realizados los ensayos y evaluados los resultados, se seleccionaron las escorias de cobre y

La evaluación del impacto económico, técnico y ambiental de las muestras de abrasivos seleccionados.

Cuadro 2. Ensayos y criterios de elección de la segunda fase del proyecto

Ensayo	Criterio
Fluorescencia de rayos X, absorción atómica.	Análisis químico. Identificación de presencia de elementos nocivos restringidos (arsénico, plomo, sílice cristalina, berilio, cadmio, cromo, manganeso, níquel, plata, titanio y vanadio).
Contenido de humedad, cambio de peso por ignición, contenido de grasas, dureza, distribución granulométrica, morfología, absorción de agua, gravedad específica, pH, cloruros y sulfatos solubles en agua.	Análisis fisicoquímico. Identificación de requerimientos de acuerdo con la norma SSPC AB1 y con las normas de The Society for Protective Coatings, del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América, The Department of Health Services State of California y The National Institute for Occupational Safety and Health.
Evaluación de fragmentación.	Definición de habilidad del abrasivo para reutilización o reciclaje.
Preparación de probetas en el astillero.	Eficacia, productividad e impacto ambiental del abrasivo.
Evaluación de compatibilidad de imprimantes en cámaras salina y a 100% de humedad relativa.	Desempeño en ambientes simulados de probetas preparadas con los abrasivos y posteriormente imprimadas con inorgánico de zinc y con epoxi-poliamida.
Aplicación de métodos de selección: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Método jerárquico AHP por el astillero y la CIC.</li> <li>• Método de selección de materiales.</li> <li>• MSM de la CIC.</li> </ul>	Técnico, mercado y logística, económico, salud ocupacional, rendimiento y ambiental.

Gráfico 2. Pruebas de campo para la evaluación de productividad y calidad de la preparación de superficie



Fuente: Resultado de la investigación.

nadas para la implementación industrial, consideró como variables fijas: el operario, el equipo, la presión de *blasting*, la apertura de dosificación del abrasivo, el grado de corrosión inicial de la superficie, la distancia y ángulo de operación y la granulometría original. Como factores variables, se consideraron:

- Los tres grados de limpieza más representativos en los astilleros: comercial, *brush-offy* metal casi blanco, según las especificaciones de The Society for Protective Coatings, SP6, SP7 y SP10, respectivamente.
- Los materiales: escorias de cobre y de ferróníquel, silicato de aluminio y arena como material de referencia.
- Los diámetros de boquilla en números 4, 5, 6, y 7.

Todos los ensayos fueron realizados por triplicado. Se adoptó como área de medición de referencia por muestreo dimensiones equivalentes a 2 m<sup>2</sup>. En paralelo, se realizó la evaluación de la fragmentación a partir del cambio del tamaño de partícula en relación con el tamaño original y la implementación de pruebas con material reciclado, con el fin de valorar las posibilidades de reciclabilidad por abrasivo.

Como parte de la evaluación del impacto ambiental y en salud ocupacional, se instalaron dispositivos para la medición de la calidad del aire (determinación de PM<sub>10</sub> y PMR)<sup>1</sup> y el nivel de presión sonora [dB(A)]<sup>2</sup>, buscando determinar los efectos que estos contaminantes ejercen en los astilleros y en áreas circundantes.

### Resultados y discusión<sup>3</sup>

A continuación, se ilustran para los diferentes abrasivos, los resultados derivados del diseño de experimentos en relación con los niveles de productividad obtenidos al variar las condiciones de tamaño de la

<sup>1</sup> PM10: Material particulado menor a diez micras. PMR: Polvo molesto respirable.

<sup>2</sup> dB(A): Decibeles.

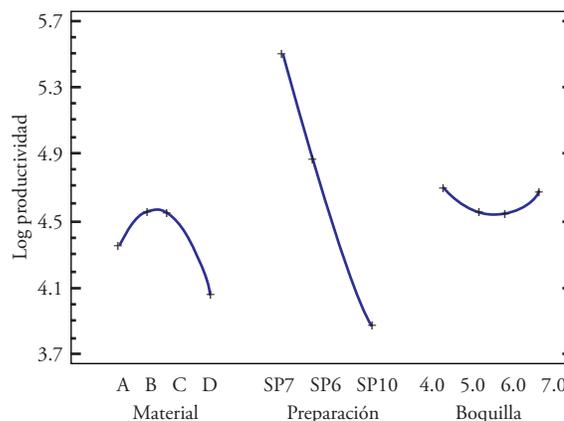
<sup>3</sup> En esta sección, se describen y analizan los resultados obtenidos durante la fase del proyecto denominada de “Implementación industrial a escala piloto”, en virtud de que el tema de interés de este artículo es cubierto en su totalidad con los mismos.

Gráfico 3. Monitoreo de PMR y emisión de ruido durante la implementación industrial a escala piloto



Fuente: Resultado de la investigación.

Gráfico 4. Niveles de productividad: Implementación industrial a escala piloto



A: Escoria de cobre B: Silicato de aluminio  
C: Escoria ferróníquel D: Arena

Fuente: Resultados de la Investigación.

boquilla y de especificación del grado de limpieza. Estos resultados, se derivan de la aplicación del proceso de *blasting* en embarcaciones en mantenimiento en los astilleros de Cotecmar.

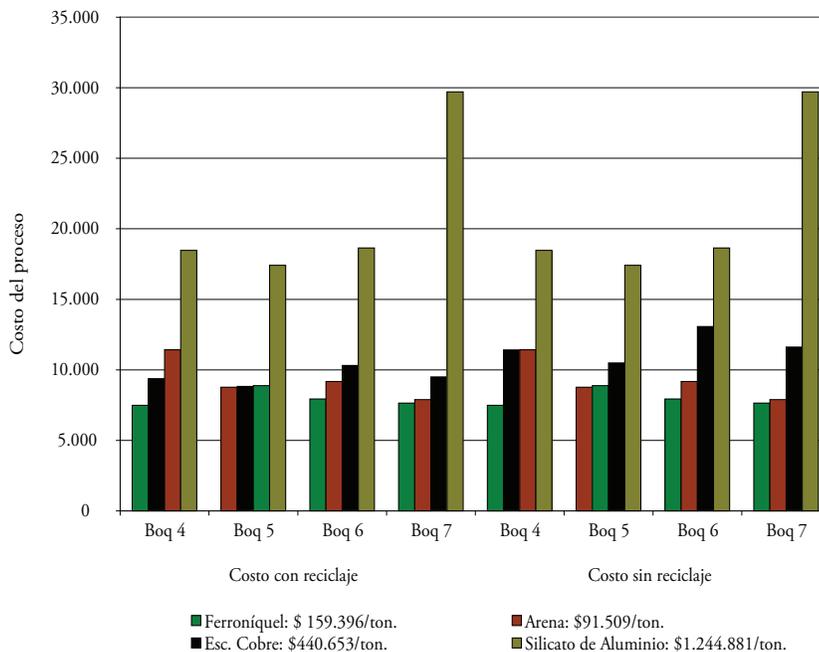
Los resultados descritos en el Cuadro 3 permiten afirmar que la productividad varía en forma inversa al grado de limpieza superficial. Con respecto al tamaño de la boquilla, no se evidencia una tendencia definida, mostrando un desempeño particular tanto para cada abrasivo como para cada grado de limpieza requerido. En el caso de la escoria de cobre y del silicato de aluminio, se obtienen resultados óptimos haciendo uso de las boquillas n.ºs 5 y 6, mientras que con la escoria de ferróníquel y con la arena los resultados óptimos se logran con la boquilla 7.

En cuanto al material, los resultados de productividad son óptimos con la escoria de ferróníquel y el silicato de aluminio. Por su parte, la escoria de cobre disminuye levemente su productividad, sin ser inferior con relación a la arena. En este orden de ideas, se evidencia que las tres alternativas presentan mayor productividad que la arena, por lo

cual se consideran como sustitutos potenciales de esta. Por otro lado, a continuación se muestran los resultados presentados en cuanto a precios nominales del abrasivo y de los costos del proceso de *blasting*, para los tres grados de preparación de las superficies adoptados en el proyecto, referenciados en el modelo de costos desarrollado como parte integral del proyecto para los astilleros de Cotecmar, la conversión del valor del dólar estadounidense a pesos colombianos para la vigencia del primer semestre del año 2008 y los resultados de los ensayos de fragmentación que indican una reciclabilidad de dos procesos adicionales de la escoria de cobre.

Los resultados en el Gráfico 5 confirman la relevante influencia que tienen la productividad y la reciclabilidad del abrasivo en el costo real del proceso de *blasting*. El impacto de la productividad en el costo del proceso puede evidenciarse al comparar los grados de limpieza de menor exigencia: *brush off* y comercial, puesto que aun cuando la escoria de ferróníquel posee un precio estimado por tonelada 1.75 veces superior respecto al determinado para la arena, el costo del proceso de *blasting* resulta ligeramente inferior. Asimismo, el efecto simultáneo

Gráfico 5. Costos de proceso según abrasivo y tipo de boquilla para grado de preparación comercial<sup>1/</sup>



<sup>1/</sup> Pesos de 2007.

Fuente: Resultado de la investigación.

de productividad y reciclabilidad sobre el costo se observa en la escoria de cobre, pues el valor final del proceso es similar para los grados de limpieza mencionados pese a tener un precio por tonelada 4.8 veces mayor que la arena. Esta situación puede considerarse genérica para los casos estudiados en cuanto al grado de limpieza y el tipo de abrasivo analizado, puesto que referenciados en una condición crítica de relación entre precios nominales de 13.6:1, el sobre costo resultante del proceso de *blasting* solo alcanza una relación máxima de 2.2:1.

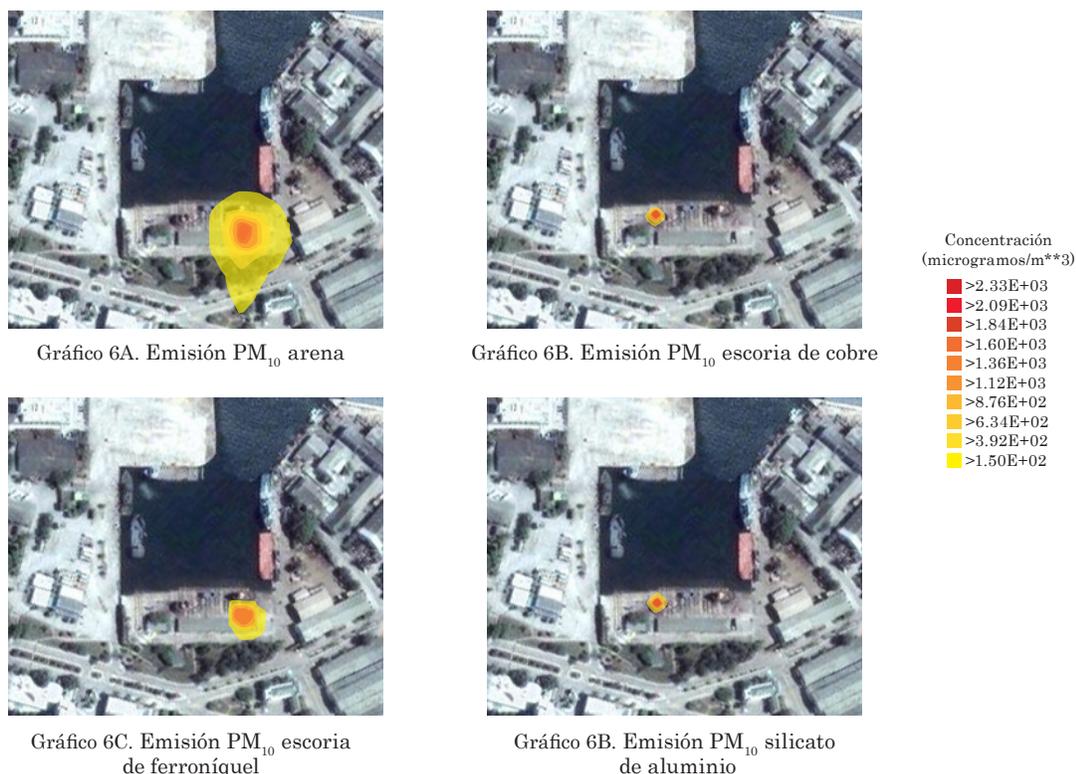
En forma paralela durante la realización de los procesos de *blasting* para los diferentes abrasivos, se llevaron a cabo monitoreos a las emisiones de material particulado y ruido. Los datos obtenidos fueron tratados estadísticamente por métodos econométricos, con el soporte de *software* como Breeze-ISC, pronosticándose las concentraciones de  $PM_{10}$  mediante el modelo ISCST3. Los resultados consolidados se muestran a continuación.

Los resultados del Gráfico 6 dejan en claro que los tres abrasivos, potenciales sustitutos de la arena,

generarían una reducción importante en los aspectos que impactan negativamente el ambiente y la salud de los operarios, dado que el riesgo por silicosis, enfermedad en la que mayor énfasis realizan las entidades gubernamentales, es nulo cuando se usan escorias de cobre y ferroníquel y silicato de aluminio, sumado a que el radio de afectación por emisión de material particulado igualmente disminuye, si se compara con la afectación generada por la arena. En otras palabras, los radios de afectación del material particulado  $PM_{10}$  para la escoria de cobre y el silicato de aluminio prácticamente serían nulos desde la perspectiva de probables reclamaciones provenientes de comunidades vecinas, e incluso desde las mismas instancias administrativas y operativas de los astilleros. Por último, la reducción del grado de riesgo por polvo molesto respirable (PMR) sería mayor al setenta por ciento y su control, mediante elementos de protección personal, tendría una mayor efectividad que la actual.

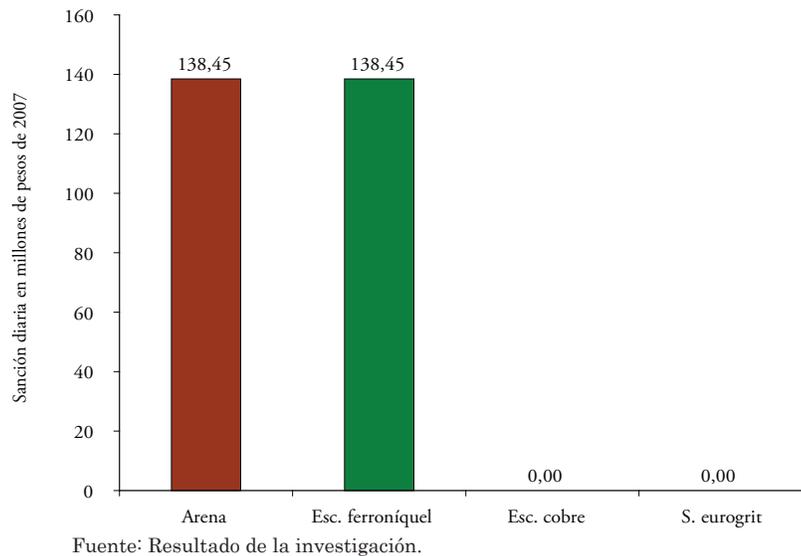
Desde esta visión y teniendo en cuenta los resultados obtenidos para los tres abrasivos, la escoria de cobre presenta el mayor acercamiento al objetivo

Gráfico 6. Impacto ambiental: Emisión de material particulado  $PM_{10}$



Fuente: Resultado de la investigación.

Gráfico 7. Estimativo de costos por sanciones ambientales



planteado de sustituir la arena, en virtud de que los niveles de impacto en el ambiente y en la salud de los operarios son reducidos a cero o a niveles dentro de los máximos permisibles, lo que la hace eficaz y comercialmente competitiva para los diferentes grados de limpieza. Este nivel de competitividad se refuerza y complementa cuantificando los beneficios económicos de costos ocultos ocasionados por la reducción de riesgos asociados a indemnizaciones en el tema de enfermedades profesionales, multas por violaciones a la reglamentación ambiental y beneficios conexos con la capacidad instalada del astillero.

De acuerdo con el Gráfico 7, el uso de la arena en el proceso de *blasting* seco mantiene latente el riesgo de una multa de cerca de 140 millones de pesos diarios por violación a la reglamentación ambiental, lo cual representaría la utilidad económica neta que por esta actividad generaría una cuadrilla durante un periodo de 300 días laborables con jornadas de diez horas en el astillero de Mamonal y seis horas en Bocagrande. El monto económico asociado a este riesgo y la probabilidad de que se presente con una frecuencia mayor que a la de un día por año, reduce drásticamente la viabilidad empresarial de los astilleros<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Los valores correspondientes al monto máximo de sanción diaria por emisión de material particulado mayor a 150 µg/m<sup>3</sup>, poseen como base de cálculo la Ley 99 de 1993, art. 85, num. 1.

Del riesgo latente por enfermedad profesional sujeto al impacto en la salud que genera el uso de la arena, se conoce de indemnizaciones por valor de 866 millones de pesos para el año 2004<sup>5</sup>. Buscando no recurrir a cuantificar el costo de compensación de una indemnización sobre la base de probabilidades de ocurrencia de enfermedades profesionales, se adopta el criterio de disponer de una póliza para enfermedades graves que asegure los costos de consultas, exámenes, medicamentos, hospitalizaciones y cirugías, para compensar lo que podría ser el monto de una eventual indemnización.

Los resultados de este cálculo dejan en claro que disponer de una póliza de seguros que ampare los costos de atención integral frente a una enfermedad grave, sin incluir el costo de la incapacidad del trabajador, para compensar una eventual demanda e indemnización por enfermedad profesional, afecta el costo del proceso de *blasting* con arena y reduce su competitividad económica frente a un proceso que utilice como abrasivo escoria de cobre.

El aumento de la producción a partir de la misma capacidad instalada es un beneficio conexo atribuible a sustituir la arena por escoria de cobre, explicado en la reducción del consumo y el aumento del uso horario en los astilleros de Cotecmar. Desde esta perspectiva, se espera que al implementarse

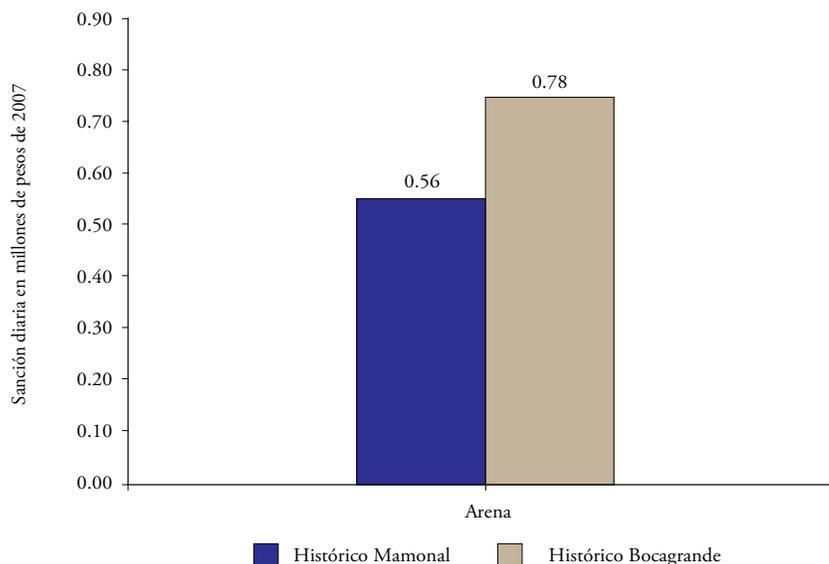
<sup>5</sup> Información suministrada por la ARP Colmena.

Cuadro 3. Costo proyectado por impacto en la salud (en pesos)

Parámetro	Bocagrande	Mamonal
Costo actual de proceso de <i>blasting</i> con arena a grado comercial (\$/m <sup>2</sup> )	7.892	15.206
Costo mensual de aseguramiento de cuadrilla mediante póliza para enfermedades graves con respaldo de un mil millones de pesos.	2.100.000	2.100.000
Producción anual por cuadrilla (m <sup>2</sup> ).	25.200	36.00
Costo de proceso de <i>blasting</i> con arena, incluida la póliza (\$/m <sup>2</sup> ).	8.892	15.906
Costo de proceso de <i>blasting</i> con escoria de cobre (\$/m <sup>2</sup> )	7.892	16.141

Fuente: Resultado de la investigación.

Gráfica 8. Incremento en capacidad instalada por utilización de escoria de cobre



Fuente: Datos históricos de rendimientos para el material arena: Cotecmar.

Los datos de rendimientos para el material escoria de cobre: Resultados de la investigación.

la escoria de cobre como abrasivo sustitutivo de la arena, la capacidad instalada de Cotecmar se ve incrementada entre 56% y 78% para las plantas de Mamonal y Bocagrande, respectivamente. Lo anterior, indica que Cotecmar tendría la opción de duplicar la cantidad de metros cuadrados que se preparan actualmente en cada una de sus plantas de producción, de acuerdo con los análisis comparativos realizados y que toman como referencia registros de rendimientos históricos de la arena suministrados por la Corporación, y datos obtenidos para la escoria de cobre a lo largo del proyecto de investigación antes mencionado.

## Conclusiones

El proyecto logró el objetivo de identificar abrasivos competitivos para sustituir la arena utilizada en el proceso de *blasting* seco para los astilleros de Mamonal y Bocagrande de Cotecmar, anulando el riesgo de demandas económicas por violaciones a la reglamentación ambiental y por indemnizaciones con ocasión de enfermedades profesionales. En este sentido, se identificó como material sustitutivo de línea a la escoria de cobre, abrasivo que se ofrece en el mercado mundial para aplicaciones de *blasting* seco y como material de contingencia a la

escoria de ferroníquel, abrasivo no comercializado para estos propósitos, pero que mediante procesos previos a su utilización podría lograr un alto nivel de competitividad.

A su vez, es importante señalar que puede disponerse de procesos de chorreado en seco para grandes superficies con un nulo o marginal impacto en el ambiente y en la salud ocupacional, con un grado de competitividad económica factible, aun cuando el abrasivo de sustitución sea relativamente alto en su precio nominal. Para establecer la competitividad de un abrasivo respecto de un patrón de referencia, adicionalmente a los aspectos técnicos propios de la evaluación de abrasivos, deben considerarse y cuantificarse: (i) las restricciones ambientales y en salud ocupacional específicas; (ii) la capacidad o tamaño del astillero, y (iii) la identificación del procedimiento óptimo para una productividad máxima.

El proceso de valoración de la competitividad integral de un abrasivo para un proceso de *blasting* en un astillero, debe disponer de un sistema de monitoreo y un modelo ambiental, un sistema de costos aplicable a las condiciones operacionales, administrativas y de logística del astillero y un grupo de laboratorios especializados en caracterizaciones químicas, fisicoquímicas y de evaluación de recubrimientos.

La productividad y el reciclaje de un abrasivo en un proceso de *blasting* seco, generan un alto impacto en el costo final del proceso, y por ello, debe identificarse la condición operacional de mayor nivel de productividad en función del grado de limpieza y de mayor probabilidad de reciclabilidad, puesto que el desempeño de los abrasivos no presenta tendencias genéricas en función de la velocidad del abrasivo.

## Referencias

- Clemco Industries Corp., P. Blackmur & H. Azocar, "Blastology", *The Science & Secrets of Successful Abrasive Air Blasting*.
- Conn, A. F. & Chahine, G. L. (1976), "Ship Hull Cleaning With Self-Resonating Pulsed Water Jets", Maryland, Tracor Hydronautics, Inc.
- Corporación para la Investigación de la Corrosión y Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Naval, Marítimo y Fluvial (2005). Proyecto de cofinanciación Colciencias: "Evaluación y Selección de Abrasivos como Sustitutos de la Arena en la Preparación de Superficies Metálicas en los Astilleros de Cotecmar: Impacto Técnico, Económico y Ambiental". Piedecuesta, CIC.
- Environment Canada (1995), "Best Management Practice (BMPs) for Ship and Boat Building and Repair Industry in British Columbia", Environment Canada, International Publication.
- National Physical Laboratory & The National Corrosion Service (1982), "Guides to Good Practice in Corrosion Control Surface Preparation for Coating", NPL, Ucrania.
- Frenzel, L. M. (1996), "The Whole Truth of Standards and Specifications for Water in Surface Preparation", NACE Corrosion: Article n.º 596, International Publication.
- Lever G. (1996), "Hydro Blasting Permits Safe, Cost-Effective Dam Rehabilitation", Materials Performance (MP), International Publication.
- Lou L. D. (2001), "Surface Preparation Standards", NACE Corrosion: Article n.º 01659, International Publication.
- Military Specification, MIL-A-22262B (SH) (1993). "Abrasive Blasting Media Ship Hull Blast Cleaning", Arlinton, Naval Sea Systems Command.
- Munger, C. G. (1986), "Surface Preparation: Corrosion Prevention by Protective Coatings", National Association of Corrosion Engineers, 2nd Edition. International Publication.
- Peart, J. W. (1987), "Prototype Mineral Abrasive Reclaimed: Shipyard Operation", U.S. Department of Transportation, NSRP 0272.

- Schmidt, R. F. (1997), "Ultrahigh-Pressure Water-jetting Comes of Age for Surface Preparation - It's Time to Get the Salts Off the Work". NACE Corrosion: Article n.º 594, International Publication.
- The National Institute for Occupational Safety and Health (1998), "Particulates not Otherwise Regulated, Respirable". NIOSH, International Publication.
- The Society for Protective Coatings (1982), "SSPC Painting Manual, vol. 2: Surface Preparation Specifications", SSPC, International Publication.
- The Society for Protective Coatings (2000), "SSPC-SP6 Commercial Blast Cleaning" SSPC, Pittsburgh.
- The Society for Protective Coatings (2000), "SSPC-SP7: Brush-Off Blast Cleaning" SSPC, Pittsburgh.
- The Society for Protective Coatings (2000), "SSPC-SP10: Near-White Metal Blast Cleaning" SSPC, Pittsburgh.
- The Society for Protective Coatings (2000) "Abrasive Specification n.º1: Mineral and Slag Abrasives. SSPCAB1", SSPC, International Publication.
- The Society for Protective Coatings & KTA-Tator, Inc. (1998), "The National Shipbuilding Research Program: User Guide to Selection of Blasting Abrasives", SSPC, International Publication.
- United States of America, State of California Department of Health Services (s. f.), Average Amounts of California's 17 Regulated Heavy Metals & the 8 Federal RCRA Heavy Metals.
- United States of America, Department of Health and Human Services Centers for Disease Control and Prevention National Institute for Occupational Safety and Health & KTA-Tator, Inc (1999), "Evaluation of Substitute Materials for Silica Sand in Abrasive Blasting", Pittsburgh, HHS.
- Woodson, J. P. (1992), "Blast Cleaning: Wet Abrasive". The Society for Protective Coatings: Journal of Protective Coatings and Linings, TIP-36B, 2nd Edition.
- Woodson, J. P. (1992), "Wet Abrasive Blasting: Problems and Solutions", The Society for Protective Coatings: Journal of Protective Coatings and Linings, TIP- 36B, 2nd Edition.



# 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 claves**

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 planteamiento 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" (ele) 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 PowerPoint 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 (2004, 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 com-

pleta 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 [revista@cytbuques.com](mailto:revista@cytbuques.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 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 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', n.º 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, "on-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', [on-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', [on-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 [revista@cytbuques.com](mailto:revista@cytbuques.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 cinco 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:

---

---



# CIENCIA & TECNOLOGÍA DE BUQUES SHIP SCIENCE & TECHNOLOGY

## 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 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:

---

---



