

## Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”

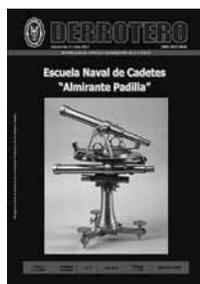
La revista *DERROTERO* de la Ciencia y la Investigación, es una publicación anual de la Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla” que pone al alcance de la comunidad académica algunos resultados de las investigaciones llevadas a cabo en las Facultades de Ingeniería Naval (orientación Mecánica y Electrónica), Oceanografía Física y Ciencias Navales. Todos los artículos se someten a revisión por pares o árbitros con amplia experiencia sobre el tema.

Se autoriza la reproducción total o parcial de su contenido citando la fuente. Los conceptos expresados son de responsabilidad exclusiva de sus autores.



1935-2011

Derrot. C.I. ENAP	Cartagena Colombia	Vol. 5	2011	Páginas 1-155	ISSN 2027-0658
----------------------	-----------------------	--------	------	------------------	----------------



Círculo Azimutal



“Este aparato fue adquirido por el Instituto Geográfico Nacional de España en 1860 a un observatorio privado de Seftemberg, según la información con la que cuenta el Observatorio Astronómico Nacional. El instrumento, aunque no dotado de gran tamaño ni de una gran precisión para trabajos geodésicos de cierta importancia, tiene la particularidad de que podía transformarse de círculo azimutal a círculo vertical, ofreciendo las posibilidades de medir estos dos tipos de ángulos”.

Información y fotografía tomada del Website del Centro Nacional de Información Geográfica. Instituto Geográfico Nacional de España. Disponible en <http://www.01.ign.es/ign/layoutIn/museoInstrumento.do?codigoInstrumento=64>. Consultado el 01 de septiembre de 2011.

# DERROTERO

REVISTA DE CIENCIA E INVESTIGACIÓN DE LA ENAP

- DIRECTOR:** CALM. Pablo Emilio Romero Rojas
- SUBDIRECTOR:** CN. Oliverio Bohórquez Lara
- DECANO ACADÉMICO:** CF. Jorge Prieto Diago
- EDITOR:** CF. Ricardo Molares Babra, MSc  
Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”, Colombia
- COMITÉ EDITORIAL:** CF. Juan Carlos Acosta Chady, MSc  
Dirección General Marítima, Colombia  
CF. Germán García Castellanos, Esp  
Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”, Colombia  
Alejandro Orfila Förster, PhD.  
Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, España  
Eduardo Santamaría del Ángel, PhD.  
Universidad Autónoma de Baja California, México  
Jorge Pierini, PhD.  
Centro Científico y Tecnológico Bahía Blanca, Argentina  
Gisela Mayo Mancebo, MSc(c).  
Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”, Colombia  
CC. Elkin Mejía, MSc  
Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”, Colombia  
Juan Antonio Contreras Montes, PhD.  
Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”, Colombia  
Adriana Puello Alcázar, MSc  
Universidad de Cartagena, Colombia

Escuela Naval “ALMIRANTE PADILLA” Isla de Manzanillo  
Teléfono: (5) 669 4416 - Cartagena, D.T. y C. – Bolívar  
[derrotero@enap.edu.co](mailto:derrotero@enap.edu.co)

Impresores: Calidad Gráfica  
[www.calidadgrafica.com.co](http://www.calidadgrafica.com.co)  
Barranquilla, Colombia

## CONTENIDO

<b>EDITORIAL</b> .....	7
<b>EFFECTO DEL RELIEVE DEL FONDO EN LOS MODELOS DE OLEAJE EN GRAN ESCALA</b> <i>Juan José Sierra Aranguren, Serguei Lonin</i> .....	9
<b>DISEÑO PRELIMINAR DE UN BUQUE OCEANOGRÁFICO PARA LA DIRECCIÓN GENERAL MARÍTIMA</b> <i>Fabio Zapata Casas, Elkin Nino Francesconi, Juan Posada Alcalde</i> ...	21
<b>DESCRIPCIÓN DEL OLEAJE LOCAL DE CAYO SERRANA</b> <i>José Andrés Díaz Ruiz, Carlos Alberto Andrade Amaya</i> .....	35
<b>HERRAMIENTA TECNOLÓGICA PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN GENERADORES SÍNCRONOS</b> <i>Javier de la Cruz Prieto, Julio César Yi Diazgranados, Juan Antonio Contreras Montes, Vladimir Díaz Charris</i> .....	45
<b>ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL ESPECTRO DE OLAS BAJO CONDICIONES ATMOSFÉRICAS SEVERAS</b> <i>Gustavo Adolfo Gutiérrez Leones, Serguei Lonin</i> .....	55
<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMO PARA DISPOSITIVOS USV</b> <i>Juan A. Contreras Montes, Fernando J. Durán Martínez, Wilbherth A. Castro Celis</i> .....	71
<b>CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE Y LAS PLAYAS DE CAYO SERRANILLA</b> <i>Jesús Andrés Zambrano Pinzón, Carlos Alberto Andrade Amaya</i> .....	85
<b>ANÁLISIS DEL EMPLEO DEL TIMÓN PARA LA ESTABILIZACIÓN DE UN MODELO DE BUQUE PESQUERO</b> <i>José Nicolás Toledo Ortiz, Guillermo Alexander Lozano Castrillón</i> ....	95

<b>VARIACIÓN DEL FLUJO DE AGUAS ENTRANTES AL MAR CARIBE EN SU INFLUENCIA A LA DINÁMICA SIMULADA POR UN MODELO</b>	
<i>Jorge Fernando Ochoa Fandiño, Serguei Lonin .....</i>	105
<b>DISEÑO DE CONTROL INTELIGENTE PARA OPTIMIZACIÓN DE UNA PLANTA DE ENERGÍA SOLAR</b>	
<i>Jaime González, Diego Colón, Juan Contreras.....</i>	119
<b>ANÁLISIS MULTITEMPORAL (1937-2010) DE LA LÍNEA DE COSTA DE LA ISLA DE MANZANILLO, BAHÍA DE CARTAGENA - COLOMBIA</b>	
<i>William Gómez Pretelt, Juan Carlos Olarte Guzmán, Andrés Felipe Carvajal Díaz .....</i>	139
<b>GUÍA PARA PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS .....</b>	153

## CONTENTS

<b>EDITORIAL.....</b>	7
<b>THE EFFECT OF THE OCEAN BOTTOM IN LARGE SCALE WAVE MODEL</b>	
<i>Juan José Sierra Aranguren, Serguei Lonin .....</i>	9
<b>PRELIMINARY DESIGN OF AN OCEANOGRAPHIC VESSEL FOR THE COLOMBIAN MARITIME AUTHORITY</b>	
<i>Fabio Zapata Casas, Elkin Nino Francesconi, Juan Posada Alcalde...</i>	21
<b>LOCAL WAVE DESCRIPTION OF SERRANA CAY</b>	
<i>José Andrés Díaz Ruiz, Carlos Alberto Andrade Amaya.....</i>	35
<b>TECHNOLOGICAL TOOL FOR FAULT DETECTION IN SYNCHRONOUS GENERATORS</b>	
<i>Javier de la Cruz Prieto, Julio César Yi Diazgranados, Juan Antonio Contreras Montes, Vladimir Díaz Charris .....</i>	45
<b>STUDY OF THE TEMPORAL EVOLUTION OF THE WAVE SPECTRUM UNDER SEVERE ATMOSPHERIC CONDITIONS</b>	
<i>Gustavo Adolfo Gutiérrez Leones, Serguei Lonin.....</i>	55
<b>DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN AUTONOMOUS NAVIGATION SYSTEM FOR USV DEVICES</b>	
<i>Fernando J. Durán Martínez, Wilbherth A. Castro Celis, Juan A. Contreras Montes.....</i>	71
<b>SERRANILLA CAY WAVES AND BEACHES CHARACTERIZATION</b>	
<i>Jesús Andrés Zambrano Pinzón, Carlos Alberto Andrade Amaya. ....</i>	85
<b>ANALYSIS OF THE RUDDER FOR THE STABILIZATION OF A FISHING VESSEL MODEL</b>	
<i>José Nicolás Toledo Ortiz, Guillermo Alexander Lozano Castrillón ....</i>	95

<b>THE INFLUENCE OF THE VARIATION OF THE WATER INFLOW TO THE CARIBBEAN SEA IN THEIR DYNAMICS USING MODEL</b> <i>Jorge Fernando Ochoa Fandiño, Serguei Lonin</i> .....	105
<b>DESIGN OF AN INTELLIGENT CONTROL FOR THE OPTIMIZATION OF A SOLAR ENERGY PLANT</b> <i>Jaime González, Diego Colón, Juan Contreras</i> .....	119
<b>MULTITEMPORAL ANALYSIS (1937-2010) OF THE MANZANILLO ISLAND COASTLINE, CARTAGENA BAY - COLOMBIA</b> <i>William Gómez Pretelt, Juan Carlos Olarte Guzmán, Andrés Felipe Carvajal Díaz</i> .....	139
<b>GUIDELINES FOR ARTICLE PUBLICATION</b> .....	153

## EDITORIAL

Durante los últimos años el país ha experimentado la realización de importantes proyectos de infraestructura costera y portuaria sin precedentes en el Caribe. La plataforma continental colombiana, tanto en el Pacífico como en el Caribe ha sido objeto de ingente exploración sísmica. La industria naval colombiana ha logrado con el esfuerzo de la Armada Nacional importantes avances técnicos y tecnológicos que han llevado a la construcción de buques fluviales y de patrulleras costeras.

Estos temas aparentemente desvinculados tienen en común el medio que los afecta y que determina la eficacia de las estructuras costeras, así como la eficiencia de los cascos de buques y artefactos navales. En contradicción, estas estructuras impactan directamente sobre el océano y la morfología costera siendo necesario estudios detallados para minimizar los impactos que terminan afectando las comunidades costeras.

La presente edición de *Derrotero* presenta una colección de artículos científicos producto de la investigación desarrollada por los grupos de investigación y por los estudiantes de los programas de pregrado y posgrado de la Escuela Naval “Almirante Padilla” en las áreas de Ingeniería Naval y Oceanografía Física, los cuales buscan dar respuesta a necesidades de la Armada Nacional, haciendo de paso un aporte al conocimiento de los mares y a la innovación tecnológica del sector marítimo en general.

Contralmirante PABLO EMILIO ROMERO ROJAS  
Director Escuela Naval “Almirante Padilla”

## EFFECTO DEL RELIEVE DEL FONDO EN LOS MODELOS DE OLEAJE EN GRAN ESCALA

Juan José Sierra Aranguren\*  
juanjose.sierra@gmail.com

Serguei Lonin\*\*  
slonin@costa.net.co

Fecha de recepción: mayo de 2010, Fecha de aceptación: agosto de 2011

**Resumen:** La mejora de la resolución espacial del modelo de oleaje CaribWAM-III del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), incluyendo los efectos de fricción, *shoaling* y refracción, contribuyeron a la obtención de mejores resultados relacionados con el cálculo del oleaje. Se obtuvieron datos de batimetría de ETOPO-2 a una resolución de 2 minutos. Se escogió un perfil de playa sobre el dominio, para realizar las pruebas bajo condiciones normales y severas por medio del modelo SBEACH y obtener los cambios de los parámetros del oleaje por efectos de propagación sobre el fondo finito y el cambio de resolución espacial. Asimismo se incluyeron los efectos en aguas someras dentro de la ecuación de balance de energía espectral para posterior aplicación en el modelo CaribWAM-III, comprobando un cambio satisfactorio en los resultados de cálculo de oleaje en el dominio del mar Caribe especialmente cerca a la línea de costa.

**Palabras clave:** Modelos de oleaje, CaribWAM-III, Efecto de fricción, *Shoaling*, Refracción.

**Abstract:** The improved spatial resolution of the CaribWAM-III wave model developed by the Center for Oceanographic and Hydrographic Research (CIOH), including the effects of friction, shoaling and refraction, contributed to the improvement of the wave calculation results. Bathymetry data were obtained from ETOPO-2 at a resolution of 2 minutes. A beach profile over the domain was chose in order to use SBEACH model under normal and severe conditions, obtaining the changes of the wave parameters by wave propagation effects on the bottom and by the changes of the spatial resolution. The shallow water effects were included in the spectral energy balance equation to be applied in CaribWAM-III. As a result, a reliable result of the wave calculation was obtained specially close to the coast line.

**Key words:** Wave model, CaribWAM-III, Friction, Shoaling, Refraction.

\* Teniente de Navío de la Armada Nacional. Profesional en Ciencias Navales, Escuela Naval "Almirante Padilla". Oceanógrafo Físico, Escuela Naval "Almirante Padilla".

\*\* Ingeniero Oceanólogo, Universidad de Ucrania; Ph.D en Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad Estatal de Hidrometeorología de Rusia en San Petersburgo. Docente y Director Grupo de Investigaciones en Oceanología. Facultad de Oceanografía Física de la Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla".

## INTRODUCCIÓN

La Armada Nacional por intermedio del CIOH, hace más de 10 años adelanta importantes esfuerzos en cuanto a la implementación de un modelo de oleaje, permitiendo pronosticar diariamente su comportamiento en las aguas jurisdiccionales del Caribe colombiano.

Las técnicas de cálculo de oleaje de los últimos años se han orientado a desarrollar nuevos modelos espectrales de olas a escala global con la implementación del uso computacional, adaptables a las características de la región (WAM, WAVEWATCH-III, SWAN). Los modelos de tercera generación, resuelven la ecuación de transporte de densidad espectral de energía con los efectos de profundidad y corrientes, usan una variedad de métodos numéricos y resuelven de manera explícita la interacción no lineal entre las olas en el paquete espectral [1].

El modelo WAM es utilizado en diferentes centros de predicciones climáticas del mundo, como es el caso del (CIOH), que lo adaptó al modelo que se conoce hoy en día como el CaribWAM-III, el cual permite obtener las características espectrales más significativas desde el punto de vista práctico, tales como altura media y significativa, periodo, longitud de onda y dirección general de las olas [2]. Por tal razón la proyección de este trabajo es realizar mejoras al modelo como lo es, obtener una mejor resolución espacial al pronóstico de oleaje incluyendo los efectos en aguas someras.

### 1. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE OLAJE CARIBWAM-III

El modelo CaribWAM-III es un modelo de tercera generación de pronóstico de oleaje desarrollado por Lonin *et al.* (2007), basado en el modelo NedWAM (Netherlands Wave Model) diseñado por Hasselmann *et al.* (1985), donde se obtienen datos de oleaje a escala regional a partir de datos de viento, sin tener en cuenta los procesos costeros como *shoaling*, disminución de la energía del oleaje debido al rozamiento con el fondo, rompimiento de las olas, así como la variación de los parámetros del oleaje con las corrientes. De igual forma, el modelo opera en una baja resolución en el orden de 18 a 20 km aproximadamente (la malla es esférica y no tiene una única discretización lineal fija, su resolución es de 0.18° de latitud), y además debido a las restricciones por la resolución de la información entrante (los vientos de UKMO, *United Kingdom Meteorological Office*) con 0.56° de latitud x 0.83° de longitud y una subestimación del oleaje en cercanía de las costas (Lonin *et al.*, 2007). Sin embargo, la implementación operacional del modelo atmosférico WRF (*Weather Research and Forecasting model*) con una resolución de 6 km sobre el mar Caribe, deja a un lado esta limitación a partir del año 2009.

La ecuación de balance espectral de energía del modelo está dada por:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + C_x \frac{\partial S}{\partial x} + C_y \frac{\partial S}{\partial y} = G_m - D \pm NL \quad (1)$$

Donde  $S(x,y,t,\omega,\theta)$  corresponde al espectro de densidad de energía de ola, donde  $(C_x)$  y  $(C_y)$  son las velocidades de grupo en proyección a los ejes de coordenadas;  $(G_m)$  corresponde a la entrada de energía por acción del viento;  $(D)$  es la disipación de energía y  $(NL)$  es el término de interacciones no lineales en el espectro.

En la aplicación de este modelo para las condiciones del mar Caribe colombiano, se encontraron particularidades, como pérdidas de energía debido a la redistribución en el espacio, y aparición de oscilaciones incorrectas, entre otros aspectos. Por estas razones se iniciaron investigaciones que permitieran mejorar la aproximación aún más a la dinámica del océano. Después de esta investigación, nace el modelo CaribWAM-III, el cual proporciona mejores resultados que los obtenidos con el modelo original, debido a dos adelantos realizados (Lonin, *et al.*, 2007) que permitieron aumentar la precisión del modelo: el perfeccionamiento del esquema numérico de transporte del espectro de olas y la asimilación adecuada de los datos provenientes de las plataformas satelitales [3], y es este, el empleado actualmente por el CIOH para el pronóstico de oleaje.

### 2. MEJORAS EN EL MODELO CARIBWAM-III

En el océano, cuando se genera una ola, las partículas hacen un movimiento orbital en agua profunda, un movimiento elipsoidal en aguas transitorias a someras y un movimiento lineal en aguas poco profundas. Cuando las ondas se propagan en aguas poco profundas, los orbitales sienten el fondo marino y la fricción entre el fondo y el movimiento orbital disipa la energía de la onda. Para obtener una buena caracterización dinámica del Caribe, se hizo necesario modificar la resolución espacial del modelo incluyendo los efectos del relieve del fondo, *shoaling* y refracción, y de esta manera poder calcular mejor la evolución del oleaje en aguas profundas, transitorias y someras.

**Fricción del fondo.** Las olas, además son procesos bien complejos que sufren transformaciones en su movimiento hacia las zonas costeras, tanto en la altura, longitud de la onda y velocidad de propagación. La longitud y velocidad de las olas van disminuyendo a medida que se van acercando a la costa y aumenta la fricción del fondo. Por lo tanto, se produce un cambio de energía que torna inestable las partículas de agua y se origina una concentración de energía cinética y potencial en la cresta de las olas, que se empujan tanto hasta que se rompen y disipan su energía.

**Shoaling.** Es el fenómeno que se presenta con las ondas superficiales en la capa de agua, como consecuencia de la disminución de la profundidad. Cuando la profundidad sea menor que  $L/2$ , la cinemática del oleaje debe adaptarse al fondo, lo cual implica a su vez modificaciones en los parámetros de la ola, disminuyendo su velocidad de propagación, longitud de onda, aumentando su altura y en general adquiriendo mayor peralte.

**Refracción.** Se presenta cuando las olas se inclinan y tratan de acomodarse al fondo del mar y tomar la forma de las isobatas debido al encuentro con aguas menos profundas. Las olas se desplazan más lentamente a medida que es menor la profundidad del agua, mientras que las que se hallan en aguas más profundas aumentan su velocidad, posteriormente se curvan y cambian de dirección tratando de ser más paralelas a la línea de costa en aguas menos profundas.

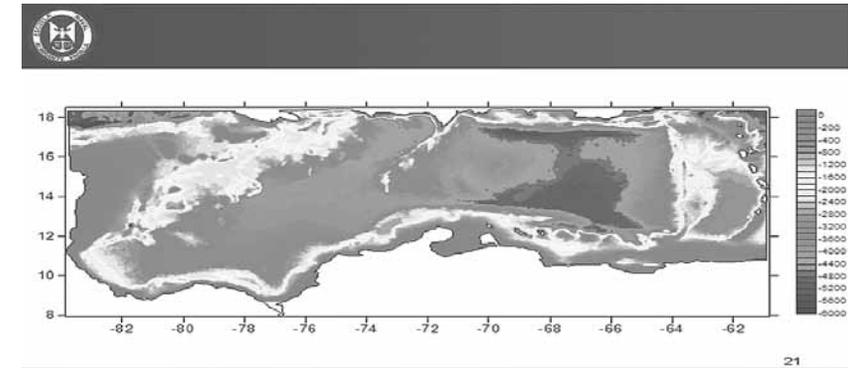
### 3. MALLA EN EL DOMINIO DEL MAR CARIBE

Para generar la malla correspondiente al dominio del mar Caribe, área que es de nuestro interés, se hizo necesario conocer el dominio en el cual el modelo de oleaje CaribWAM-III se encuentra limitado. Actualmente el modelo trabaja sobre los siguientes límites: longitudes  $83.77^\circ\text{W}$  (límite occidental),  $60.92^\circ\text{W}$  (límite oriental), latitudes  $18.34^\circ\text{N}$  (límite norte),  $08.67^\circ\text{N}$  (límite sur).

Establecidos y conocidos los límites del modelo, por medio del COASTLINE-EXTRACTOR, datos disponibles en <http://rimmer.ngdc.noaa.gov/> [4], se obtuvieron los segmentos de litoral delimitados por una latitud y longitud especificada.

### 4. INFORMACIÓN DE BATIMETRÍA - ETOPO-2

Generada la línea de costa dentro de los límites del dominio del modelo, fue preciso continuar con la información acerca de la batimetría del dominio para integrarla al modelo. Actualmente existe una base de datos que sirve como fuente de batimetría en la National Geophysical Data Center llamada ETOPO-2 (2006) <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2> [5], la cual tiene una resolución espacial de  $2' \times 2'$  en latitud y longitud. Este producto fue creado a partir de bases de datos digitales del fondo marino y elevaciones de la tierra. Se seleccionaron entonces los límites del dominio para descargar y obtener los datos de batimetría requeridos en formato ASCII, y teniendo la línea de costa y los datos correspondientes a la batimetría del área, se hizo necesario construir la malla del modelo CaribWAM-III a una resolución espacial  $2' \times 2'$  (figura 1).



**Figura 1.** Batimetría en la malla de cálculo para el pronóstico en el mar Caribe (Etopo-2)

### 5. DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DE AGUAS SOMERAS Y AGUAS PROFUNDAS

Es importante determinar dentro del dominio y la malla de cálculo para el pronóstico de oleaje cuáles son los respectivos límites de las aguas someras y aguas profundas, toda vez, que conociendo previamente estos límites se puede entender cuáles son las zonas de interacción del oleaje con el fondo marino. Para cumplir con este propósito se empleó la relación de dispersión ya que esta función relaciona la dependencia entre el periodo de la onda, la longitud de la onda y la gravedad [6], esto es:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (2)$$

Realizando un análisis matemático con la relación de dispersión y eligiendo arbitrariamente una onda típica en el mar Caribe con un periodo  $T = 8''$ , se determinaron los límites de aguas someras (3) y profundas (4) considerando los correspondientes criterios:

$$kh < 0.1\pi \quad (3)$$

$$kh > \pi \quad (4)$$

obteniendo:

$$h = \frac{0.1\pi}{k} \quad (\text{aguas someras}) = 5.0 \text{ m}$$

$$h = \frac{\pi}{k} \quad (\text{aguas profundas}) = 50 \text{ m}$$

Luego, se procedió a representar los límites dentro del dominio del mar Caribe, con el fin de seleccionar una zona de estudio donde mostrara la evolución del oleaje desde aguas profundas, pasando por la zona de transición y posterior llegada a aguas someras.

Para visualizar los diferentes procesos de evolución del oleaje a su llegada a las zonas costeras, se empleó el modelo numérico SBEACH [7] "Simulating Storm Induced BEACH CHange", el cual es un modelo unidimensional que predice los cambios en el perfil de playa producido por la acción de las olas. Este modelo permite simular la evolución de las principales características del perfil del fondo, pero solamente se estimó la transformación de la altura de las olas en aguas transitorias y someras. Para el análisis y empleo del modelo, se seleccionó un perfil de playa con el propósito de estudiar con detalle los efectos y fenómenos que ocurren al llegar un grupo de olas a la costa. Se escogió el perfil de playa sobre los 14° de latitud norte y en dirección hacia la costa este de Centroamérica, como se puede apreciar en la figura 2.

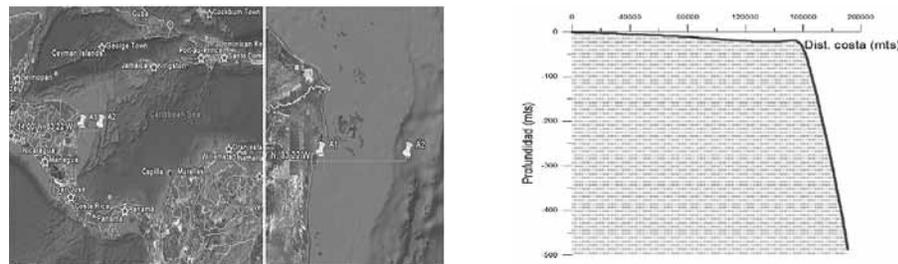


Figura 2. Perfil de playa seleccionado sobre la plataforma continental de la costa occidental del mar Caribe

Para el procesamiento de los datos se utilizó el editor de configuración y el editor del perfil inicial del modelo a diferentes resoluciones de 2', 4', 6', 8', y 10'. Se hicieron las pruebas bajo condiciones de ola moderada con un periodo  $T = 8''$ , una altura de la ola  $H = 1,5 m$ , ola de huracán con un periodo  $T = 14''$ , una altura  $H = 3,2 m$ , y se pudo determinar que independiente de la resolución seleccionada para las pruebas, tanto el efecto de fricción como el inicio y evolución del fenómeno de *shoaling* se manifiestan en los mismos lugares. Se puede observar que el tren de olas empieza a sentir el efecto del fondo que se inicia a 165 km aproximadamente de distancia de la costa a una profundidad de 92,85 metros, mientras que para el caso del *shoaling* se inicia el incremento de la altura de la ola a 90 km de la costa a una profundidad de 13,63 metros, y que a mejor resolución se obtienen datos más aproximados de oleaje cerca a la plataforma litoral (figura 3).

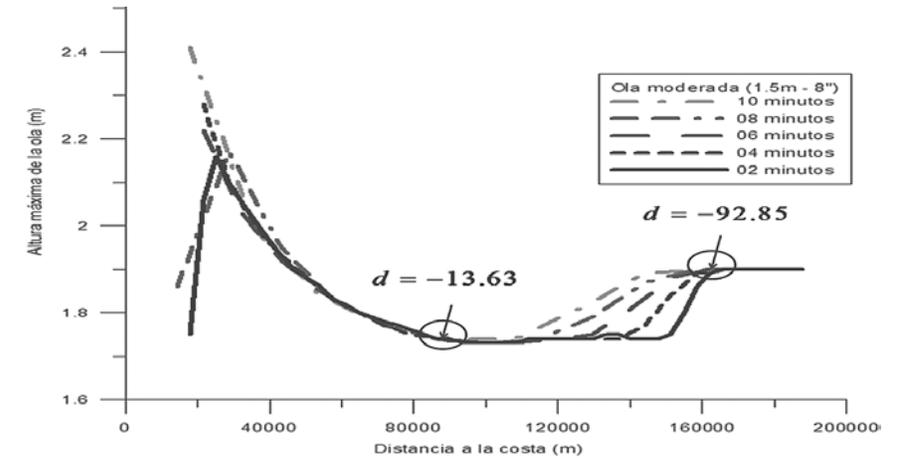


Figura 3. Comparación de la Altura máxima de la ola - Ola moderada

Sin embargo, el resultado más importante de estas pruebas de "SBEACH", consiste en que se puede apreciar el cambio de la altura de la ola dependiendo de la resolución espacial, variándola hasta 2 minutos de latitud, mostrando los efectos de fricción del fondo y *shoaling*, lo cual permitió justificar la reducción de la malla del modelo CaribWAM III y generar una grilla numérica a resolución de 2 minutos y que fuera compatible al modelo debido al lenguaje de programación.

### 6. MEJORAS A LA ECUACIÓN DE BALANCE DE ENERGÍA

El efecto de fricción del fondo viene dado por la ecuación (5) presentada por Komen [8] *et al.*:

$$G_{bot} = -C_{bot} \left( \frac{k}{\sinh(2kh)} \right) S \quad (5)$$

y por la ecuación (6) presentada por Tolman *et al.* [9] viene dada por:

$$G_{bot} = 2\Gamma \left( \frac{n-0.5}{gh} \right) S \quad (6)$$

Con el fin de obtener coeficiente de fricción a usar en el modelo CaribWAM-III igualamos las ecuaciones (5) y (6) obteniendo:

$$G_{bot} = -0.002 \left( \frac{k}{\sinh(2kh)} \right) S \quad (7)$$

Así mismo la ecuación de balance de energía del modelo CaribWAM-III fue ajustada con la adición de los efectos de *shoaling* y refracción, los cuales modificaron el segundo y tercer término de la ecuación (1) dada la relación y dependencia de las velocidades de grupo con la profundidad. La ecuación entonces, ya no se presenta de manera simplificada, sino que regresa a su estado original, calculando el espectro de oleaje sin restricciones, teniendo en cuenta los efectos de profundidad, refracción y fricción:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(C_x S)}{\partial x} + \frac{\partial(C_y S)}{\partial y} = G_{in} - D \pm NL - G_{bot} \quad (8)$$

## 7. SALIDAS CARIBWAM-III

Inicialmente se consideró realizar pruebas para observar la evolución del oleaje teniendo en cuenta el efecto de fricción. Posteriormente se corrió el modelo sin considerar la fricción en el fondo para observar las diferencias de altura del oleaje en su llegada a la costa. Se bajaron datos de campos de vientos de NCEP/NCAR de reanálisis [10] para el día 14 de julio de 2005 logrando correr el modelo para un pronóstico de 24 horas, obteniendo los siguientes resultados de altura de la ola, mostrados en la figura 4:

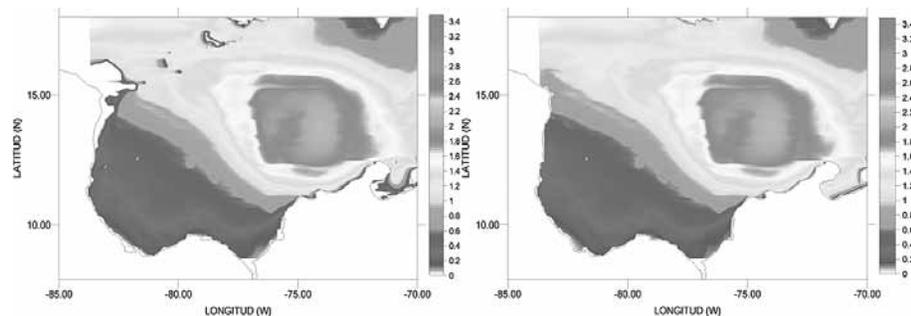


Figura 4. Salida CaribWAM-III con y sin efectos de fricción

Se encontraron cambios en los resultados del cálculo del oleaje, logrando obtener mayor detalle y de la misma forma concluir que con las pruebas teniendo en cuenta el efecto de fricción del fondo se obtienen datos más aproximados de altura del oleaje especialmente en aguas someras. Esta diferencia precisamente se ve más marcada en las zonas costeras y de bajas profundidades como son la elevación centroamericana en la zona oeste del mar Caribe, al suroeste de Jamaica, más específicamente en Banco Pedro y en el Golfo de Venezuela donde el resultado muestra que la altura de la ola bajo la prueba incluyendo el efecto del fondo es menor, mostrando entonces una disipación de energía importante.

Se realizaron nuevas corridas del modelo teniendo en cuenta los efectos de *shoaling* y refracción. Por otro lado, y con el objetivo de comparar los resultados se graficó la evolución de la altura del oleaje en aguas someras considerando los efectos de fricción, *shoaling* y refracción, de una salida con un campo de vientos interpolados del día 06 de agosto de 2005 tomando como base los datos de vientos de NCEP/NCAR de reanálisis (figura 5).

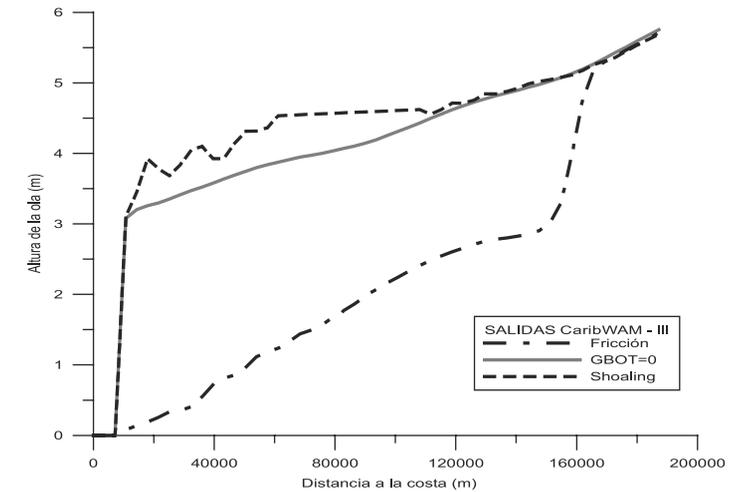


Figura 5. Comparación de la altura de la ola sobre un perfil de playa con y sin efectos de fricción, *shoaling* y refracción

Se puede ver claramente la diferencia de altura de la ola (en metros), donde la curva (raya-punto) muestra los resultados del modelo CaribWAM incluyendo el efecto de fricción, la curva punteada representa el *shoaling* y refracción, y la curva sólida indica los resultados del modelo sin contemplar ningún efecto en aguas someras. En esta prueba analizando la altura de la ola a 80 km de la costa y considerando el efecto de *shoaling* se incrementó la altura de la ola en 12,5% en comparación con los resultados del modelo sin efectos del fondo, mientras que la fricción disipó la energía de la ola hasta en un 56,25% aparentemente.

Los resultados de evolución de la altura de la ola, se complementaron y justificaron a través de una solución analítica de disipación de la energía por causa de la fricción sobre el perfil, con el fin de encontrar una aproximación de disipación válida para el modelo. Esta disipación por fricción presentada en Van Rijn (1994), viene dada por:

$$D = \frac{1}{T} \int_0^T \tau_b U_g dt \quad (9)$$

La curva hallada, no fue idéntica a la del modelo, toda vez que existen diferencias debido a que en CaribWAM-III no solo se contemplan efectos de disipación (figura 6).

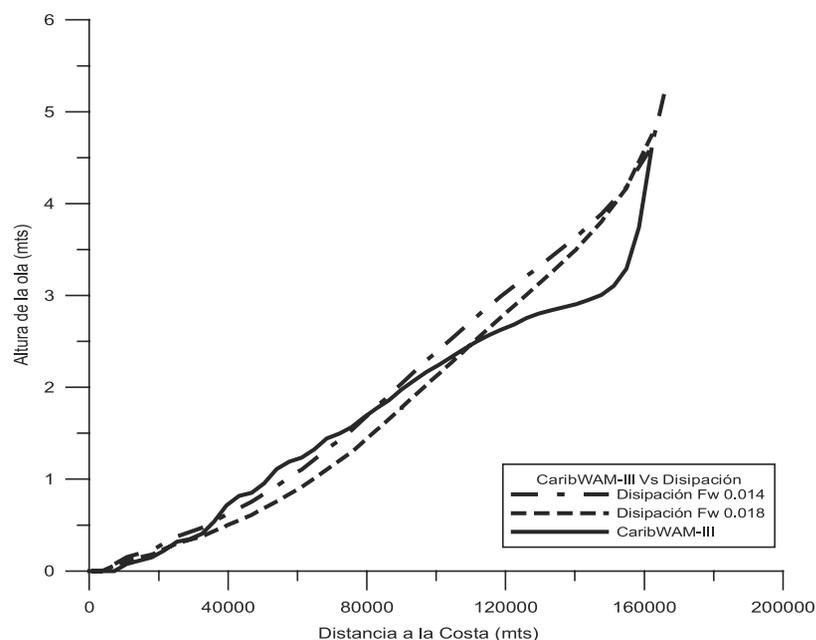


Figura 6. Comparación de resultados CaribWAM Vs. solución analítica de disipación para el día 06 de agosto de 2005

A su vez se tuvo en cuenta una solución analítica de *shoaling* presentada en Van Rijn (1994):

$$H = K_s H_0 \quad (10)$$

La curva de solución analítica de *shoaling* encontrada, no fue exacta a la del modelo, ya que CaribWAM-III contempla otros mecanismos adicionales, pero sí dio una idea de la evolución de la altura de la ola (figura 7).

Hechas todas las pruebas correspondientes y determinando la resolución espacial adecuada de 2 minutos se comprobó que los resultados de pronóstico de oleaje cambiaron satisfactoriamente en el dominio del mar Caribe, especialmente en la plataforma continental del Caribe incluyendo los efectos de aguas someras (fricción, *shoaling* y refracción).

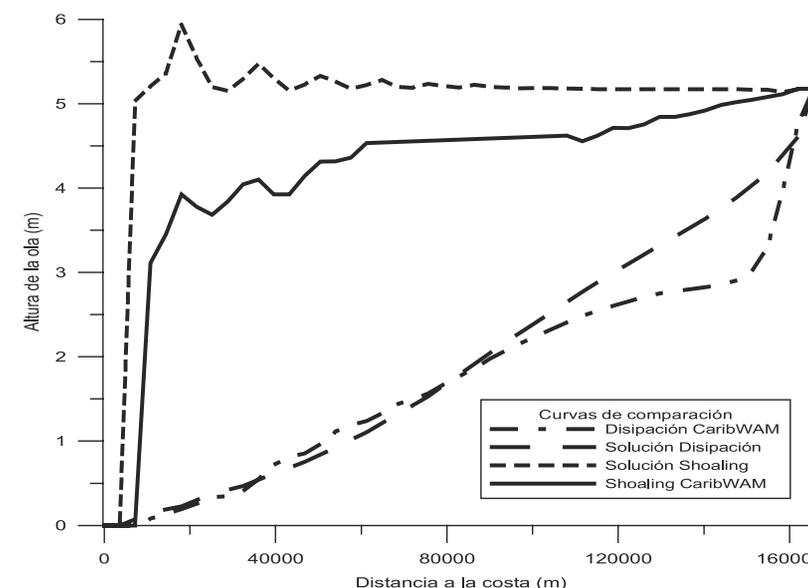


Figura 7. Comparación de resultados CaribWAM-III Vs. solución analítica de *shoaling* para el día 06 de agosto de 2005

## 8. CONCLUSIONES

Hoy en día los nuevos modelos espectrales de olas a escala global, con la implementación del uso computacional, brindan una información más precisa de cálculo de oleaje, siempre y cuando se puedan adquirir datos de vientos y batimetría a una buena resolución espacial.

Las nuevas mejoras realizadas al modelo CaribWAM-III, complementan las características espectrales del oleaje específicamente en las zonas de transición y de aguas someras, describiendo aún más la dinámica del oleaje por causa del efecto que produce el contacto de las olas con el fondo.

El cambio de resolución espacial en la malla de cálculo del dominio del mar Caribe justificó incluir los efectos de aguas someras, como *shoaling*, refracción, disminución de la energía del oleaje debido al rozamiento con el relieve del fondo.

Es importante considerar y estimar en los modelos de tercera generación, los mecanismos de fricción del fondo del mar, *shoaling* y refracción, siempre y cuando la resolución del modelo para el caso del Caribe sea del orden de unas millas náuticas o superior.

La aplicación de los modelos de oleaje permiten obtener información que será útil para las actividades marítimas que se desarrollan alrededor de una zona costera, tales como transporte marítimo, actividades de pesca, protección de embarcaciones y por supuesto, la protección de la vida humana en el mar.

#### REFERENCIAS

- [1] Lizano O, Ocampo F, Alvarado L, Vega R, Puig J. Evaluación de modelos numéricos de Tercera Generación para el pronóstico del oleaje en Centroamérica y México. *Top. Meteor. Oceanog*; 2001 8(1): p. 40-49.
- [2] Lonin S, *et al.* Boletín científico CIOH v.17. Utilización del modelo NedWAM para el cálculo y pronóstico de oleaje en el mar Caribe: CIOH, 1996. p. 37.
- [3] Lonin S, *et al.* Boletín científico CIOH v. 25. Propagación del oleaje y asimilación de datos satelitales en un modelo espectral de tercera generación: CIOH, 2007. p. 42.
- [4] National Oceanic and Atmospheric Administration. National Geophysical Data Center Marine Geology and Geophysics Shoreline/Coastline Data. Disponible en <http://rimmer.ngdc.noaa.gov/>
- [5] National Oceanic and Atmospheric Administration. National Geophysical Data Center Disponible en <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2>
- [6] Van L. Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans. Second edition, 1994, p. 25-291.
- [7] Rosati J, Kraus N. Sbeach: numerical model for simulating storm-induced beach change; report 3, user's manual. 1993.
- [8] Komen G, Cavaleri L, Donelan M, Hasselmann K, Hasselmann S, Janssenn P. Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Cambridge University Press. 1994. p. 525.
- [9] Tolman H, *et al.* User manual and system documentation of wavewatch-III version 1.18: 1999. p. 19.
- [10] National Oceanic and Atmospheric Administration. Earth System Research Laboratory. Physical Sciences Division. Climate Datasets: By Category. Disponible en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

#### ARTÍCULO

## DISEÑO PRELIMINAR DE UN BUQUE OCEANOGRÁFICO PARA LA DIRECCIÓN GENERAL MARÍTIMA

**Fabio Zapata Casas\***  
fzapata73@yahoo.com

**Elkin Nino Francesconi\*\***  
mauro368@hotmail.com

**Juan Posada Alcalde**  
juanposada\_25@hotmail.com

Fecha de recepción: junio de 2011, Fecha de aceptación: septiembre de 2011

**Resumen:** Este trabajo comprende el diseño preliminar de un buque oceanográfico, para la Dirección General Marítima (DIMAR), utilizando la metodología de la espiral de diseño, y de proceso analítico jerárquico para la toma de decisiones AHP para la calificación y clasificación de los requerimientos entregados por la DIMAR con el fin de garantizar con esto la calidad que debe tener el armador en relación con las necesidades expuestas. El proyecto resume el diseño preliminar de un buque oceanográfico; se tuvieron en cuenta todos los procesos en esta etapa, así mismo se realizaron los cálculos correspondientes a través de programas especializados que permitieron un análisis detallado.

**Palabras clave:** Investigación marítima, Buque oceanográfico, Escantillonado, Eslora, Manga, Desplazamiento, Diseño preliminar de buques.

**Abstract:** This work covers the preliminary design of an oceanographic vessel, for the colombian Maritime authority (DIMAR), spiral design methodology and the analytic hierarchy process methodology for decision making AHP used for qualification and classification of the requirements given by DIMAR to ensure the quality that owner must have in relation to the expressed needs. The project describes the preliminary design of a research vessel; all the processes were taken into account in this stage, also calculations were performed by using specialized programs that enabled a detailed analysis.

**Key words:** Maritime investigation, Research vessel, Scantling, Length, Beam, Displacement, Preliminary ship design.

\* Capitán de Corbeta de la Armada Nacional. Arquitecto Naval e Ingeniero Marino de la Academia de Guardacostas de Estados Unidos.

\*\* Teniente de Fragata de la Armada Nacional. Profesional en Ciencias Navales. Estudiante Curso de Extensión Profesional en Ingeniería Naval Mecánica, Escuela Naval "Almirante Padilla".

## INTRODUCCIÓN

La DIMAR cuenta con unidades regionales dispuestas a continuar fortaleciendo el poder marítimo de la Nación, velando por la seguridad de la navegación y de la vida humana en el mar, contribuyendo a la preservación del medio ambiente marino, a la administración de la zona costera y al desarrollo científico y tecnológico del país. Además cuenta con dos buques oceanográficos que por 22 años han desarrollado la capacidad investigativa en el Caribe y Pacífico colombiano, dentro de la búsqueda de una plataforma oceanográfica para Colombia, así como la demanda comercial de este tipo de buques por parte de diferentes empresas dedicadas a la búsqueda de fuentes de energía en el fondo del mar.

Con este trabajo se crea una alternativa para la Armada Nacional y la Dirección General Marítima para solventar las necesidades actuales y continuar con el proceso de investigación de nuestros mares, al determinar el diseño preliminar de un buque tipo oceanográfico para la DIMAR, con el fin de mejorar la capacidad investigativa de la Institución y del país en general, permitiendo cumplir con el desarrollo de proyectos en el océano como plataforma tecnológica y científica, basado en las tecnologías existentes y aplicando las diferentes materias de Ingeniería Naval.

### 1. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

Se recibió un requerimiento claro por parte de la DIMAR el cual consistía en el diseño de un buque de oceanografía que contara con las características necesarias para complementar a las unidades actuales que se encuentran en operación, aunque previamente se realizó una exploración de la situación actual en la que se encuentran los buques oceanográficos, pudiendo definir el marco conceptual en que funcionan normalmente determinando el tipo de operaciones para las cuales son empleados.

A través de los datos recopilados en los informes de viaje, tipos de operación y consumos, permitió tener una visión del marco real en el ámbito operacional y su importancia tanto para la Armada Nacional como para la DIMAR. Con esta información se pudo elaborar un análisis estadístico de las operaciones realizadas en los últimos años para poder determinar el tipo de misión que desarrollan estas unidades, así como su constante apoyo en operaciones de la Armada Nacional.

**Descripción de la misión:** El buque diseñado, deberá tener la capacidad de operar

independientemente, con una gran autonomía, con el fin de desarrollar operaciones de investigación oceanográfica requeridas por la Armada Nacional, la DIMAR y/o cualquier organización nacional o internacional que necesite sus servicios. Así mismo debe contar con la capacidad de desarrollar operaciones de apoyo a la Fuerza Naval en caso de ser requeridos.

**Capacidades operacionales requeridas:** Se realizó un análisis de las capacidades operacionales requeridas por el buque a diseñar, teniendo en cuenta los tipos de misiones que desarrolla, el estudio de los buques similares y las entrevistas realizadas al personal de la DIMAR, CIOH y de los buques ARC “Malpelo” y ARC “Providencia”, determinando las siguientes:

- Autonomía que permita sostener operaciones por más de 30 días.
- Proveer equipos que permitan las labores de investigación, tales como winches, cabrestantes, grúas y botes.
- Proveer una cubierta de maniobra lo suficientemente amplia, la cual permita la instalación de equipos especiales para investigación y toma de muestras.
- Proveer laboratorios especializados para el procesamiento de la información.
- Proveer espacios suficientes para el almacenamiento de las muestras tomadas, así como un cuarto de congelación rápida para el mismo efecto.
- Capacidad de alojamiento para científicos y personal especializado en el manejo de equipos.
- Proveer espacios para el mantenimiento administrativo del buque.
- Mantener el bienestar, la seguridad y la salud tanto de la tripulación, como del personal embarcado.
- Garantizar la seguridad de la vida humana en el mar.
- Proveer equipos de navegación y comunicaciones modernos, que garanticen la seguridad de la navegación.

**Misión principal:** Se requiere un buque de investigación oceanográfica para la DIMAR, el cual sirva como plataforma de investigación oceanográfica e hidrográfica, exploración sísmica, que permita la instalación de equipos para investigaciones especiales a bordo, con una capacidad de alojamiento para aproximadamente 40 tripulantes, incluyendo oficiales, suboficiales, científicos y personal civil que apoyará las maniobras de investigación. El buque se proyecta para vender sus servicios a otros países y empresas que lo requieran.

**Dimensionamiento de la embarcación:** En las primeras etapas del diseño conceptual y preliminar es necesario desarrollar una definición coherente del diseño candidato, en término de sus dimensiones y de otros parámetros descriptivos como son L, B, T, C<sub>B</sub>, LCB, etc. [1], por lo que es requisito definir las dimensiones principales que permitan

cumplir con las normas mínimas de clasificación internacionales para garantizar la seguridad y la comodidad de los pasajeros sin sobredimensionar la embarcación logrando así optimizar su costo final.

TABLA 1  
RESULTADOS ANÁLISIS BUQUES SIMILARES

Eslora (m)	Manga (m)	Calado (m)	Potencia (hp)
60	13	4.5	3000

## 2. DISEÑO DE LA EMBARCACIÓN

**Líneas de forma:** Estas líneas representan el casco de una embarcación en tres planos espaciales, uno paralelo a la quilla donde se construirá el casco (línea base), otro perpendicular a la quilla en forma longitudinal por la línea de crujía y el último en forma transversal. Con el diseño de las líneas de forma del proyecto, se obtiene el casco, en este punto se da inicio al diseño de los demás componentes de la embarcación, comenzando con la elaboración del plano de disposición general.

Las formas anteriormente elaboradas se derivan a partir de cascos de embarcaciones conocidas y consideradas apropiadas para los criterios iniciales, mediante la idea conceptual que asimile el diseñador del estudio de los buques similares.

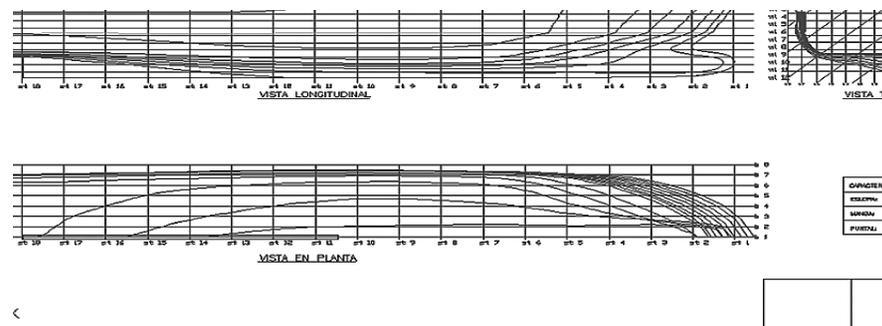


Figura 1. Líneas de forma del buque oceanográfico

**Consideraciones de diseño para la habitabilidad:** Para el diseño del Buque de Investigación Oceanográfica se siguieron las normas ABS (American Bureau of Shipping) para construcción y clasificación de buques de acero con eslora inferior a 90 metros [2], así como las recomendaciones del libro *Ship Design and Construction*

edición 2004 publicado por la Sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos de los Estados Unidos (SNAME) y la guía *Guide for crew habitability on ships* ABS diciembre de 2001. Por el tipo de operaciones que realizaría este buque, se requieren amplias y seguras zonas de trabajo, comodidad del personal embarcado así como una gran autonomía de combustible, agua y víveres, que permitan desarrollar operaciones de investigación por largo tiempo. En el diseño interior del buque se tuvo en cuenta la adecuada distribución de los equipos propios como son la maquinaria principal, maquinaria auxiliar y equipos de navegación y comunicaciones, así como un amplio espacio de maniobra en popa para la toma de muestras, transporte e instalación de equipos especiales requeridos para desarrollar las labores de investigación.



Figura 2. Vista isométrica del buque oceanográfico

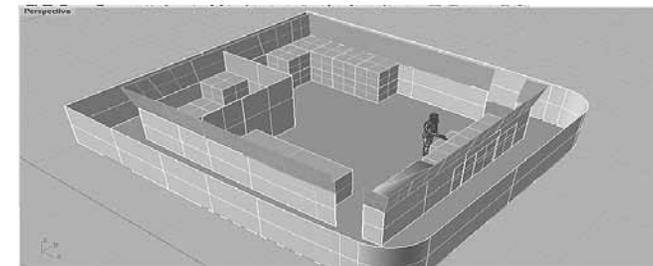


Figura 3. Disposición del puente

## 3. ESCANTILLONADO

Después de realizar el diseño de formas del casco utilizando el software de diseño de buques "Maxsurf", se procede a realizar el dimensionamiento del "Escantillonado" de la embarcación.

El escantillonado es el proceso para definir el dimensionamiento de todos los componentes estructurales, cubierta y forro del casco y es función de la misión a cumplir y/o el servicio que desempeñará en el mar. Para la determinación del escantillonado,

se requiere el análisis de las fuerzas que afectan la estructura del casco, empleando el concepto de considerar el casco como una viga (viga-buque), determinando las condiciones mínimas que debe cumplir la estructura de la embarcación para soportar las cargas a las que será sometido durante su dura vida útil en el mar [3].

**Cálculo del escantillado:** Para el diseño estructural de la cuaderna maestra del presente proyecto se ha decidido tomar como referencia las reglas de clasificación establecidas por la Sociedad de Clasificación ABS para buques de acero - 2011 acuerdo reglas de construcción y clasificación, Capítulo 3. Para un cálculo estructural adecuado del buque oceanográfico se deben tener claros los elementos para poder desarrollar el análisis y diseño de la cuaderna maestra.

**Resistencia longitudinal requerida:** De acuerdo a las normas de la ABS se obtiene el modulo de sección requerido. Posteriormente se procede a calcular el momento de inercia real de la cuaderna maestra considerando el diseño estructural establecido y finalmente se comprueba la resistencia longitudinal de la viga-buque.

Un paso importante en el diseño de un buque es el cálculo del módulo de la sección media, pues indica las propiedades de resistencia a la flexión de la estructura del casco principal [4].

TABLA 2  
MÓDULO DE SECCIÓN Y MOMENTO DE INERCIA

<b>Módulo de sección requerido</b>	206 cm <sup>2</sup> .m Valor de Referencia
<b>Momento de inercia requerido</b>	309 cm <sup>2</sup> . m <sup>2</sup> Valor de Referencia

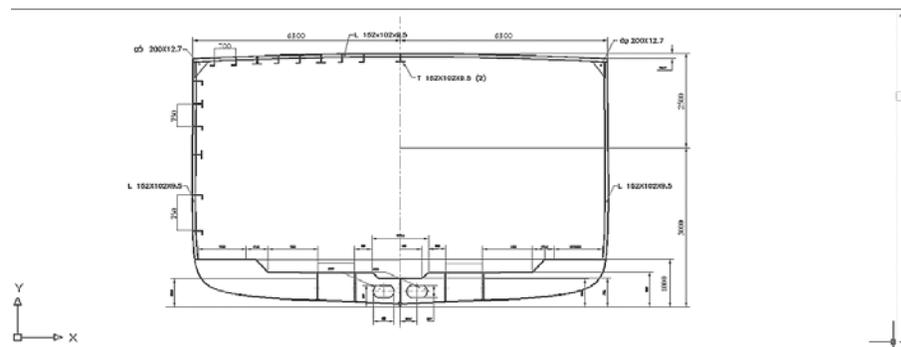


Figura 4. Plano de la cuaderna maestra

**Momentos flectores:** Para este análisis de la viga-buque se tomaron en cuenta los esfuerzos ocasionados por las cargas propias de este, el desplazamiento, el peso de la carga sobre cubierta y la carga embarcada ya sea líquidos o pertrechos. Adicionalmente se estudiaron las reacciones debidas a la fuerza de boyancia y asumiendo un trimado cero utilizando el programa Hydromax.

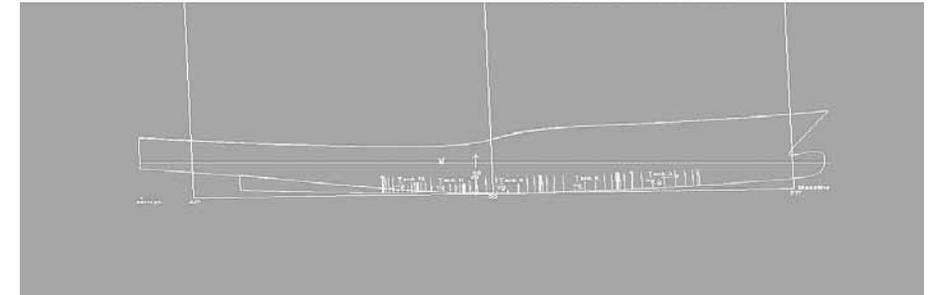


Figura 5. Arrufo buque oceanográfico

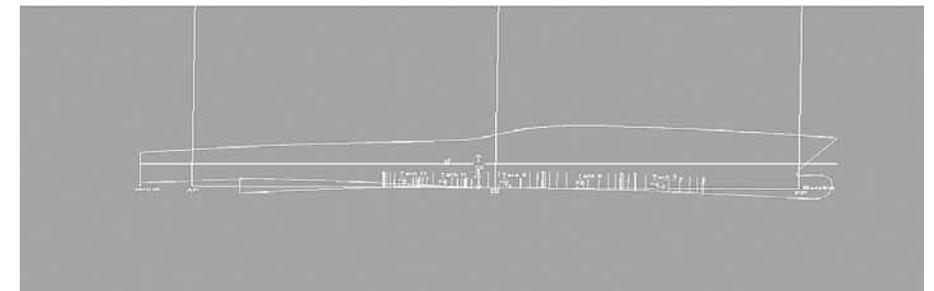


Figura 6. Quebranto buque oceanográfico

#### 4. SISTEMA DE PROPULSIÓN

**Resistencia al avance:** La potencia requerida para mover un buque a través del agua depende de la resistencia que ofrezca el agua y el aire; por otra parte, la eficiencia del dispositivo de propulsión adoptada y la interacción entre ellos [5].

En el caso del buque es necesario encontrar un tipo de mecanismo que ejerza una fuerza propulsiva capaz de vencer la resistencia total descrita anteriormente, con el propósito de mantenerlo en movimiento. Esta fuerza es denominada empuje, y el mecanismo capaz de producirla, empujador, el cual es accionado mediante un motor principal capaz de entregar la potencia requerida [6].

Para estimar la resistencia al avance se utilizan dos pasos para el cálculo de potencia como lo son el proceso experimental basado en la construcción de un modelo del casco y posteriormente ser corrido en un tanque de remolque y el otro método a evaluar es analítico teniendo en cuenta las características del buque por medio de software especializado como lo es Hullspeed [7].

**Método experimental:** El método más preciso para obtener la resistencia al avance de una embarcación en su fase de diseño, en la de correr un modelo a escala de la embarcación en un tanque de remolque, se busca el factor de escala adecuado para la elaboración del modelo, de acuerdo con las guías de la ITTC (*International Towing Tank Conference*).

El modelo debe ser tan grande como lo permita el tanque de ensayos hidrodinámicos, considerando los efectos de bloqueo, aguas poco profundas y la velocidad de arrastre del modelo [8]. Teniendo en cuenta la longitud del tanque de pruebas de la Escuela Naval "Almirante Padilla", se determina que la eslora máxima del modelo es de 1 metro, por lo tanto, el factor de escala  $\lambda$  es igual a:

$$\lambda = L_s / L_m = 60 / 1 = 60$$

Se determinan las dimensiones del modelo para su construcción.

TABLA 3  
DIMENSIONES BUQUE Y MODELO

DATOS	BUQUE	MODELO
Eslora	60 m	1 m
Manga	13 m	0,216 m
Puntal	5,5 m	0,091 m
Calado	4,5 m	0,075 m

**Método analítico:** El método a utilizar para este tipo de embarcaciones para la estimación de la resistencia del casco fue el método Holtrop & Menen, teniendo en cuenta las características de manga y eslora clasificando este tipo de buque como de desplazamiento usando el software Hullspeed, el cual proporcionará la potencia requerida por la embarcación.

**Cálculo Hullspeed:** Una vez diseñado el casco mediante el programa Maxsurf, se realiza la corrida del casco, para lo cual es necesario tener la eficiencia propulsiva.

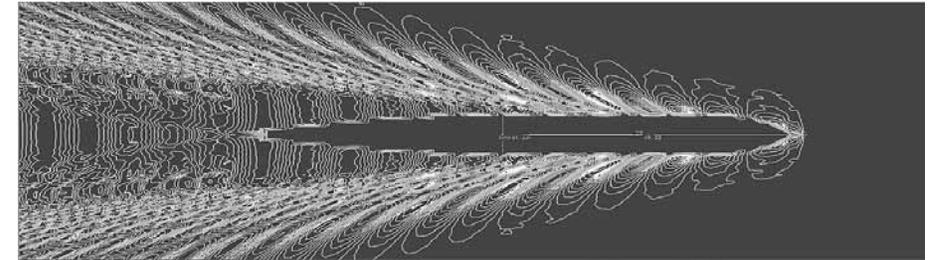


Figura 7. Resultados corrida casco en Hullspeed

**Eficiencia propulsiva:** Para poder determinar la potencia efectiva que se necesita, se requiere definir la Eficiencia Propulsiva,  $e_p$ . Esta es la eficiencia completa del sistema de propulsión del buque. Los valores a emplear de las eficiencias, son los recomendados por Dave Gerr en su obra [9] considerada el mejor compendio teórico-práctico para el diseño del sistema de propulsión para embarcaciones. Se estima la eficiencia propulsiva teniendo en cuenta valores tradicionalmente empleados para este tipo de buques. Luego la eficiencia completa del sistema de propulsión del buque oceanográfico, para alimentar el programa, es del 55%. El cálculo para la resistencia al avance, mediante el software Hullspeed, arroja como resultado:

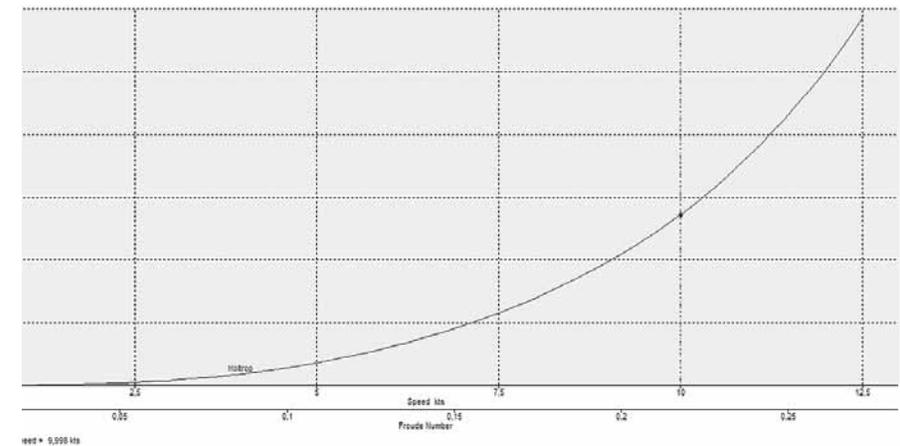


Figura 8. Potencia Vs Velocidad

Como se observa en la figura, para una velocidad de 12,5 Kts, la potencia requerida es de 2929 Hp, teniendo en cuenta su eficiencia propulsiva o  $\eta_p$ , esta es la potencia efectiva a la salida de la caja reductora. Considerando la recomendación de los

fabricantes de motores de operar al 90% del máximo, la potencia sería de 3254 Hp.

Para obtener la potencia del motor con una eficiencia en la caja reductora, recomendada por Dave Gerr, del 96%, la potencia sería de 3390 Hp.

Considerando un margen de potencia para instalar un accesorio mediante una toma-fuerza, conocida como PTO (*Power Take Off*), del 10%, entonces la potencia al freno requerida debe ser:

Potencia BHP	3730 Hp
--------------	---------

Obtenida la potencia al freno y de acuerdo a lo dispuesto en el diseño de la embarcación, la cual cuenta con dos motores propulsores se tiene como resultado que cada motor debe tener una potencia mínima de 1865 Hp.

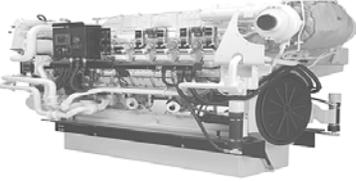
**Diseño sistema propulsor:** Para realizar una correcta selección de los motores propulsores, en el desarrollo de este trabajo se realizó la comparación de las principales características de los equipos comerciales y disponibles en el mercado nacional.

Por el cálculo de BHP aproximado requerido, peso del motor, consumo de combustible promedio, eficiencia mecánica y soporte técnico y comercial, se seleccionó el motor Caterpillar 3516 de 1920 bhp.



**3516** 1948 mhp (1920 hp al freno) 1432 hp al freno en kW  
**PROPULSIÓN MARINA**

---



Es posible que la imagen que se muestra no sea idéntica al motor real

**ESPECIFICACIONES**

**Motor diesel V-16 de 4 tiempos**

Cilindrada..... 69,0 L (4 210,64 pulg<sup>3</sup>)  
 Velocidad nominal del motor..... 1800  
 Calibre..... 170,0 mm (6,69 pulg)  
 Carrera..... 190,0 mm (7,48 pulg)  
 Aspiración..... Turbocomprimido-Posenfriado  
 Regulador..... Mecánico  
 Sistema de enfriamiento..... Intercambiador de calor  
 Peso neto seco (aprox.)..... 8 029 kg (17 701 lb)  
 Capacidad de llenado  
 Sistema de enfriamiento..... 233,0 L (61,6 gal)  
 Sistema de aceite lubricante..... 798,7 L (211,0 gal)  
 Intervalo de cambios de aceite..... 1.000 horas  
 Aceite de motor diesel Caterpillar 10W30 o 15W40  
 Colector de aceite de sumidero trasero  
 Rotación (desde el extremo del volante)..... A la izquierda  
 Volante y caja del volante..... SAE NC, 00  
 Dientes del volante..... 183  
 Testing Width..... 1 703,00 mm (67,00 pulg)

Figura 9. Motor propulsor seleccionado

Fuente: www.cat.com

**Capacidad de combustible:** Para el almacenamiento de combustible, la embarcación contará con 08 tanques ubicados en la zona de la sección media del buque, de acuerdo a medidas de los tanques, arroja un volumen aproximado de 520 m<sup>3</sup>, al cual se le resta el 5% por pérdidas de capacidad adjudicadas a las vigas y perfiles que se encuentren dentro del tanque de acuerdo al diseño estructural, dándonos así un cubicaje de los tanques de 494 m<sup>3</sup>; pasando este valor a galones la embarcación tendría una capacidad de almacenaje de combustible de 130.500 galones.

TABLA 4  
CÁLCULO CAPACIDAD DE COMBUSTIBLE

	Gn/Hora	Gn/25 Días	m <sup>3</sup> /25 Días
Motor Propulsor No. 1	100	60000	227
Motor Propulsor No. 2	100	60000	227
Motor Generador	15	9000	34
Total	215	129000	488

**5. ESTABILIDAD**

Dentro del desarrollo del proceso de la espiral de diseño el diseñador debe proveer no solo una adecuada boyancia para soportar el buque y su contenido sino que también, debe asegurarse que el buque flotará en una adecuada aptitud o trimado y que además permanecerá adrizado cuando sea cargado con pasajeros y carga general [10].

Se definen los parámetros sobre los cuales se va a realiza el análisis de la estabilidad de casco, y para ello se usan los criterios establecidos de acuerdo a la norma IMO A749.

**Estabilidad a plena carga:** La estabilidad total, en la curva presentada, correspondiente a esta condición, se resume de la siguiente manera:

ESTABILIDAD PLENA CARGA

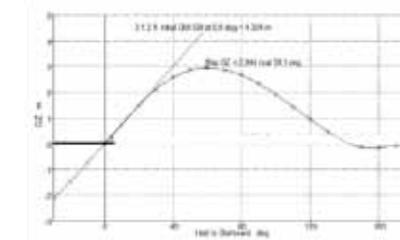


Figura 10. Estabilidad total

Máximo brazo de adrizamiento 2,94 m.  
 Ángulo de máximo brazo de adrizamiento 59.1°  
 Amplitud de estabilidad 0° a 140°

**Curvas hidrostáticas:** Las curvas hidrostáticas muestran la variación del desplazamiento y las características asociadas a las formas, a varios calados de acuerdo a la norma IMO A749.

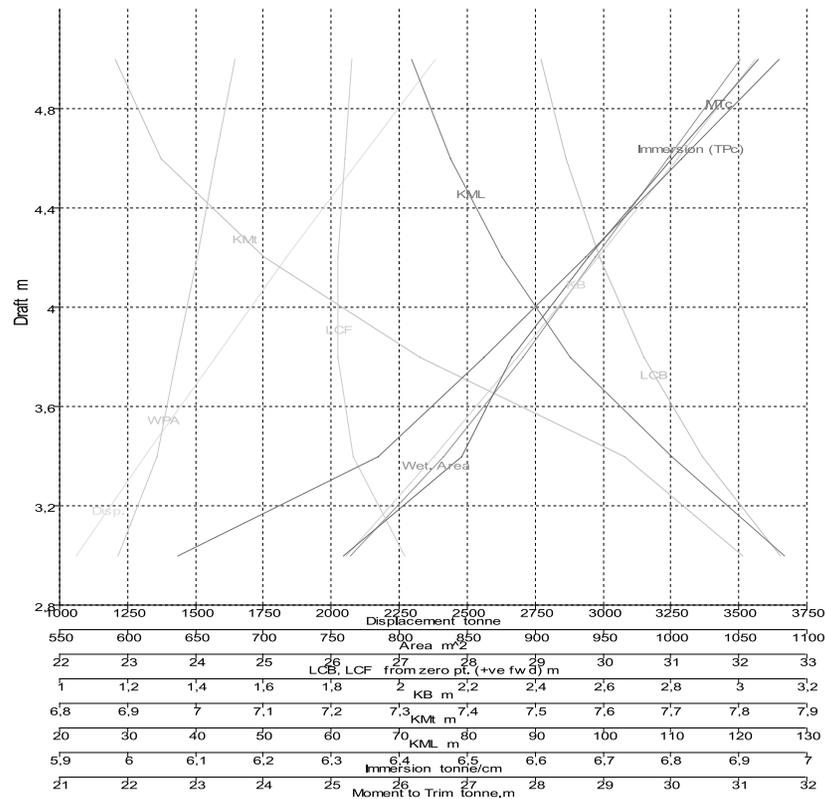


Figura 11. Curvas hidrostáticas

**CONCLUSIONES**

El diseño y elaboración de este buque, es una respuesta a la marcada necesidad de contar en el país con embarcaciones que aumenten las capacidades oceanográficas e hidrográficas y se conviertan en plataformas estratégicas de investigación, así como su empleo en el sector comercial en la búsqueda de elementos de producción de energía.

Es posible con el avance, desarrollo e innovación actual de la Ingeniería Naval nacional, apoyado en programas computacionales de punta y la información disponible, diseñar y construir buques de este tamaño y capacidades, teniendo en cuenta las últimas construcciones desarrolladas en el país y de esta forma contribuir al desarrollo tecnológico colombiano.

El desarrollo de este proyecto, cumple los objetivos específicos del proyecto y muestra la metodología a seguir en el diseño de este tipo particular de embarcaciones ya sea de carácter académico o comercial.

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Lamb Thomas. Ship Design and Construction. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, NJ, USA, 2003. Chapter 5.
- [2] American Bureau of Shipping. Rules for building and classing - Steel vessels for service on rivers and Intracoastal waterways. 2007.
- [3] Zubaly Robert. "Applied Naval Architecture", Cornell Maritime Press Centreville, Maryland, 2000. Second Edition.
- [4] Lewis Edward. Principles of Naval Architecture, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988. Second Edition.
- [5] Rawson KJ. Topper Erick. Basic Ship Theory, Cap. 10, p. 381.
- [6] Zubaly Robert. Applied Naval Architecture, 2000. Cap. 9. Ship propulsion Maryland, Second Edition.
- [7] Formation design systems Pty Ltda, Maxsurf, 3D Surface Modeling System Program for Marine Design 2010.
- [8] ITTC - International Towing Tank Conference, Recommended Procedures and Guidelines, Testing and Extrapolation Methods Resistance Test 7.5-02-02-01, p. 1.
- [9] Gerr Dave. Propeller Handbook. International Marine, Camden, Maine, USA 2001.
- [10] Lewis, Edward. Principles of Naval Architecture, Volume I, Stability and Strength, chapter II. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988. Second Edition.
- [11] Tupper, Erick. "Introduction to Naval Architecture", The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2000. Third Edition.
- [12] Rodríguez Cotilla Zoe. Economía y Desarrollo, Capítulo Teoría de la Decisión Multicriterio: Un enfoque para la toma de decisiones. Departamento de Ciencias Empresariales de la facultad de Economía y Jefe del Equipo de Centros de Gestión. Ene.-Jun. 2000. Habana-Ciudad de La Habana No. 1 / Vol. 126.

- [13] American Bureau of Shipping. Rules for steel vessels under 90 meters (295 feet) in length. 2011.
- [22] Schneekluth H, Bertram Y V. "Ship Design for Efficiency end Economy". Butterworth-Heinemann, Oxford, MA, USA 1998.

ARTÍCULO

## DESCRIPCIÓN DEL OLEAJE LOCAL DE CAYO SERRANA

José Andrés Díaz Ruiz\*  
andresdi@hotmail.com

Carlos Alberto Andrade Amaya\*\*  
candrade@costa.net.co

Fecha de recepción: diciembre de 2010, Fecha de aceptación: septiembre de 2011

**Resumen:** Con el propósito de describir el oleaje local de Cayo Serrana, en este trabajo se analiza su dinámica, basado en la fotointerpretación de los trenes de oleaje reconocidos de algunos productos de sensores remotos, representados en las imágenes satelitales y fotografías aéreas verticales disponibles del Cayo y sus alrededores más cercanos, sumados a un análisis espectral efectuado en función de los datos entregados por dos sensores de presión, ubicados en distintas zonas del mismo, durante un trabajo de campo *in situ*.

**Palabras clave:** Oleaje, Sensores remotos, Análisis espectral.

**Abstract:** In order to describe the local wave of Serrana Cay, this paper analyzes its dynamics, based on photo-interpretation of wave trains using satellite images and orthogonal aerial photographs available for the Key and its closest surroundings, combined with spectral analysis using two pressure sensors.

**Key words:** Waves, Remote Sensing, Spectral analysis.

---

\* Teniente de Navío de la Armada de Colombia, Profesional en Ciencias Navales de la Escuela Naval "Almirante Padilla". Oficial alumno del pregrado en Oceanografía Física de la Escuela Naval "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia.

\*\* Capitán de Navío (RA) de la Armada de Colombia, Oceanógrafo Físico de la Escuela Naval "Almirante Padilla", Ph.D. en Oceanografía del School of Ocean Sciences University of Wales. Investigador del Grupo de Investigación en Oceanología de la Facultad de Oceanografía de la Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia.

## INTRODUCCIÓN

“Las fotografías aéreas constituyen una de las herramientas más utilizadas en los estudios de dinámica y evolución costera, debido a la alta resolución de las imágenes y la posibilidad de compararlas en distintas fechas” [1], donde por supuesto, el oleaje es, sin lugar a dudas, la oscilación del mar más comúnmente conocida y también, la más relevante en términos de dinámica litoral. En el estudio de este aspecto, la aplicación del uso de las imágenes satelitales IKONOS-2 y las fotografías aéreas verticales disponibles del Cayo durante la investigación, facilitó el análisis de algunos procesos físicos del asunto en cuestión; se pudo observar y reconocer a menudo los frentes de oleaje, su deformación por procesos de difracción y refracción, entre otros, que junto con el análisis espectral efectuado, este proceso permitió comprender de manera más clara, la dinámica del oleaje local y su comportamiento general respecto a la forma en la que llega e incide en la línea de costa del Cayo, sumado también a la clasificación de la línea de costa de acuerdo a su comportamiento actual como por ejemplo una de poca variabilidad las cuales “no pueden ser consideradas como inmutables a la dinámica marina y a los bruscos cambios climáticos que generan movimientos de masa, inundaciones u otros” [2] y su pendiente es un factor importante para el oleaje, así como también buena parte del oleaje local también lo determinan los factores meteorológicos como por ejemplo la acción sobre el Cayo de “los frentes fríos que viajan hacia el este originados en Norteamérica y que invaden el Caribe en general con periodos de 10-14 días. Estos son especialmente fuertes durante el invierno boreal” [3].

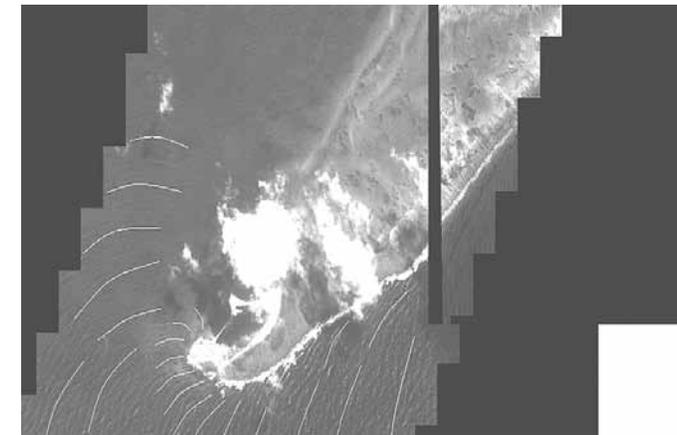
## 1. METODOLOGÍA

Para la determinación del oleaje se utilizaron los datos entregados por dos sensores de presión, ubicados específicamente en cada costado de la isla, tanto en la zona sureste, como en la zona noroeste, donde en ningún caso se encuentran protegidas por la barrera de arrecife, conformando así las dos series pequeñas respectivas de tiempo de 5800 y 17800 lecturas de cada segundo respectivamente. Estas series fueron procesadas en MATLAB 7.5 y se les eliminó la media y la tendencia polinomial; posteriormente se les aplicó la transformada rápida de Fourier para así obtener la densidad del espectro de potencias o la energía de densidad espectral. Así mismo, se utilizó también la fotointerpretación de los trenes de oleaje reconocidos por las imágenes aéreas y satelitales disponibles de la isla, que a su vez fueron de gran ayuda para la comparación y coherencia con los resultados del análisis espectral.

## 2. RESULTADOS

### 2.1 Fotointerpretación del oleaje

En las figuras 1 y 2, se evidencian los trenes de oleaje característicos que vienen del este. Estos trenes a medida que se acercan al Cayo, se refractan por la disminución del fondo marino y, a su vez, se encuentran con una barrera coralina que se extiende por toda la parte este del Banco que corresponde al borde del arrecife periférico; es en esta área donde depositan de manera fuerte casi toda su energía, con lo cual se explica el comportamiento de las aguas calmas que se observan al interior de la laguna de este complejo arrecifal.



**Figura 1.** Imagen satelital Ikonos-2 pancromática de Cayo Serrana, con los frentes de oleaje característicos resaltados. IGAC 2007



**Figura 2.** Imagen satelital Ikonos-2 pancromática de Cayo Serrana más cercana al Cayo, con la línea de costa de 2009. IGAC 2007 [4]

Según las apreciaciones hechas, la acción del oleaje en la playa este del Cayo es muy leve, esto precisamente por encontrarse en la zona protegida por la barrera arrecifal. También, se observa difracción de los trenes de olas que ya vienen refractados del este como consecuencia del contacto de estos al final de la rompiente coralina y posteriormente en la punta sureste del Cayo, de los otros trenes de olas que no alcanzan dicha rompiente y quedan circundando toda la franja oeste del mismo. Estos trenes posteriormente continúan refractándose por la disminución del fondo marino en esta zona, generando la deformación completa de las ondas hasta romperse por acción del *shoaling* o asomeramiento sobre el fondo; este último se da debido a que en este sector su longitud de onda supera más de la mitad de la profundidad. Finalmente, estos trenes terminan por golpear toda la playa oeste todavía con una considerable energía que no alcanza a ser depositada completamente en la barrera coralina.

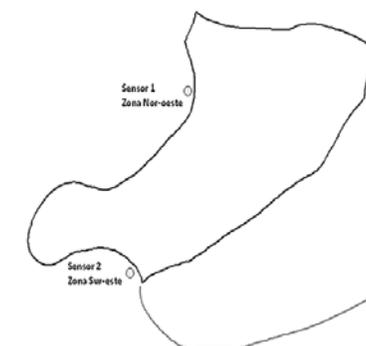
La rotura del oleaje sobre la playa oeste se hace de forma diferencial, donde se puede observar que rompe con mayor energía, justo después de finalizar la punta del Cayo en la parte suroeste, debido a que físicamente se pudo evidenciar que las aguas allí son más someras y, por ende, se presenta un cambio más drástico en la profundidad. En la parte centro y norte de la playa oeste, se observa una rotura de oleaje menos intensa, pero que alcanza la playa todavía con una buena energía, aunque menor que en la parte sur: esto obedece a que por efectos de refracción y difracción de los trenes de oleaje, la energía de estos oleajes ya se ha redistribuido de forma más amplia.

En la playa norte se visualiza un oleaje leve, gracias a que allí también se encuentra protegida por la barrera coralina, especialmente en la parte noreste, sin embargo, los trenes de ondas difractados que vienen circundando la franja oeste y que no alcanzan a romper en dicha playa, se encuentran con el oleaje leve del este, que se ve incrementado por la acción del viento (como se verá más adelante en el análisis espectral). Este evento del oleaje en esta zona permite modular las puntas de las playas noreste y noroeste del Cayo.

## 2.2 Análisis espectral

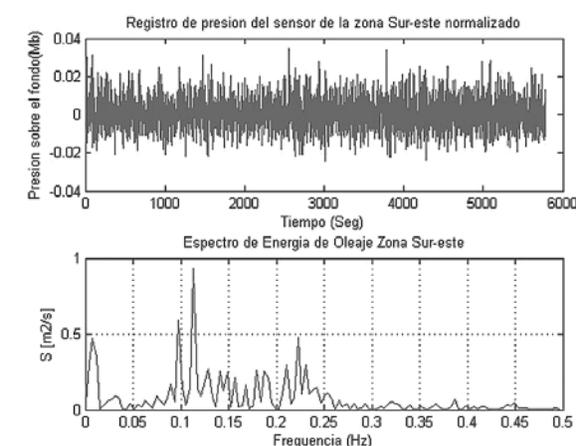
El análisis espectral es usado para dividir la varianza de una serie de tiempo en función de la frecuencia. Para este caso específico de oleaje "la descripción espectral es muy útil para comprender y sintetizar determinadas características del mismo" [5], es decir, permite establecer o asociar el comportamiento del oleaje con otro tipo de fenómenos físicos que se presenten en el área de estudio.

El análisis se divide en dos espectros obtenidos de igual número de sensores, ubicados en dos zonas opuestas en el Cayo.



**Figura 3.** Ubicación de los sensores de presión

**2.2.1 Zona sureste.** La ubicación del primer sensor de presión corresponde a los datos de la zona sureste del Cayo (ver figura 3); una vez procesados, estos datos entregan un espectro de oleaje para algunas horas del día de la toma de datos (figura 4), en ellos se pueden apreciar cuatro picos característicos de mayores frecuencias de energía, distribuidos en diferentes bandas de frecuencia del espectro. El primero de estos constituye un pico con un rango de frecuencias más altas que los otros tres; este pico se ubica en la banda de ondas de gravedad, en el cual se evidencia un tipo de ondas generadas por el viento predominante del este-noreste, con un periodo de pico de 4,49 segundos que alcanza una energía de densidad espectral de  $0,4746 \text{ m}^2/\text{s}$ . "Este tipo de oleaje generado por la acción del viento sobre la superficie del mar es una oscilación del nivel del mar con periodos entre 3 y 30 segundos" [6].



**Figura 4.** Registro de presiones sobre el fondo y espectro de energía de oleaje en la zona sureste del Cayo

El segundo pico y el más energético, se asocia también a la banda de las ondas de gravedad y corresponde específicamente al tipo de onda corta que representa el oleaje característico de la zona en condiciones normales, alcanzado una energía de densidad espectral de  $0,9325 \text{ m}^2/\text{s}$  con un periodo de 8,82 segundos.

El tercer pico corresponde en orden, al segundo más energético, con una energía de densidad espectral de  $0,592 \text{ m}^2/\text{s}$ , y al igual que los otros dos, se ubica también en la banda de frecuencias asociadas a las ondas de gravedad con un periodo de 10,23 segundos. Con este pico no hay suficientes elementos de juicio para poder aseverar o afirmar específicamente a qué corresponde, sin embargo, una posible explicación, debido a la banda de frecuencia en que se encuentra, podría obedecer al comportamiento de onda corta de oleaje característico, que presenta un desfase asociado a la difracción del tren de olas. Este desfase corresponde a una diferencia de 1,41 segundos con respecto al pico más energético.

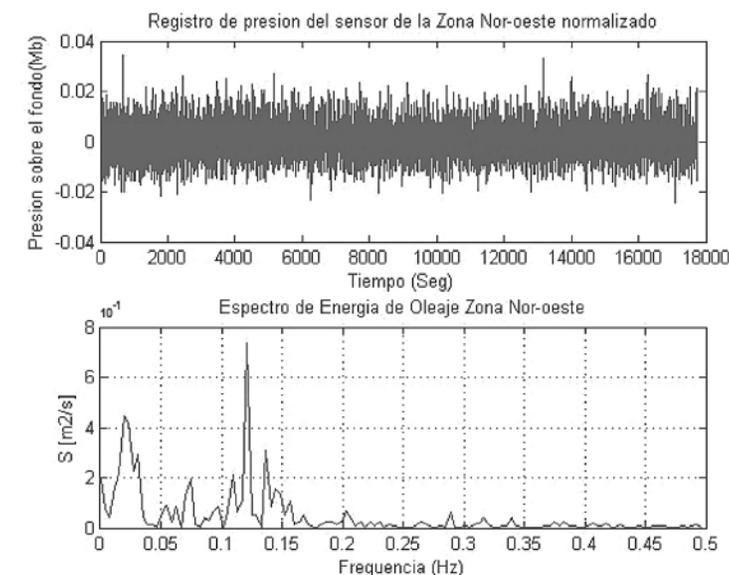
El cuarto pico significativo, corresponde al rango de frecuencia más bajo de este espectro y representa la banda de frecuencia asociado a ondas infragravitatorias. Este tipo de ondas son oscilaciones del nivel del mar con periodos entre 50 y 500 segundos. El origen de esta oscilación es la modulación del oleaje de viento en paquetes de olas grandes y pequeñas producidas por la propagación del mismo en la plataforma continental. Esta modulación del tren de oleaje incidente, origina perturbaciones en el equilibrio de fuerzas dinámicas de la masa de agua, generándose variaciones en el nivel del mar que tienden a equilibrar el sistema [7].

“Este tipo de ondas también son conocidas como ondas largas, y tienen una magnitud de centímetros en mar abierto y cobran importancia en zonas costeras donde su amplitud aumenta debido a la influencia del fondo y de los contornos. La rotura del oleaje libera ondas largas atrapadas en los grupos y la suave pendiente de las playas amplifica la magnitud de las mismas, llegando a superar el metro en condiciones de temporal” [8].

Antes de cerrar este aparte y exponer lo referente al segundo sensor, es preciso anotar que este pico más energético de onda gravitatoria tiene una energía de densidad espectral de  $0,4712 \text{ m}^2/\text{s}$  y un periodo de 127,9 segundos.

**2.2.2 Zona noroeste.** El espectro de oleaje correspondiente a los datos procesados por el segundo sensor de presión ubicado en la zona noroeste del Cayo (ver figura 5), muestra únicamente dos picos más significativos con respecto al primer espectro. El primer y más energético pico de energía de oleaje de este espectro corresponde, al igual que el espectro anterior, a la onda corta de oleaje en la banda de las ondas de gravedad, con un pico de energía de  $0,7384 \text{ m}^2/\text{s}$  y un periodo de 8,25 segundos.

Se observa una gran similitud entre los picos más altos de la onda de gravedad en ambas zonas, conservando, prácticamente, el mismo periodo; esto se podría explicar en términos de que la onda corta permanece estable, ya sea porque las condiciones de este tipo son estacionarias o, por el contrario, porque las series de tiempo son muy cortas y no permiten observar cambios en la estacionalidad de las mismas.



**Figura 5.** Registro de presiones sobre el fondo y espectro de energía de oleaje en la zona noroeste del Cayo

El segundo y último pico significativo de este espectro corresponde a la banda de las ondas infragravitatorias, con un máximo de energía espectral de  $0,4486 \text{ m}^2/\text{s}$ , que prácticamente se mantiene igual que en el espectro de la zona sureste, con un periodo de 51,2 segundos y un desfase de 76,6 segundos, respecto al pico de la misma banda en el espectro. Aquí también se aprecia una redistribución de energía por efecto de la difracción y refracción de la ola: al encontrar una banda de frecuencias bajas más amplia por este tipo de ondas que pueden quedar atrapadas y otras que viajan alrededor del Cayo, distribuidas en ambas direcciones este-oeste. A esto se suma el encuentro de diferentes obstáculos de la topografía submarina que pueden generar más ondas de este mismo tipo; este evento también podría explicar esta redistribución más amplia —que se ha mencionado arriba— y ese desfase de 76,6 segundos entre los picos energéticos de este tipo de ondas observadas en la comparación de los dos espectros. Es preciso anotar que tal comparación es favorecida por la ubicación del sensor en este costado de la isla, el cual es capaz de captar este tipo de señales allí.

El pico con más alta frecuencia que se apreciaba en el espectro anterior, y que correspondía a las ondas producidas por el viento, desaparece, porque esa energía ha sido redistribuida en la misma banda de las ondas de gravedad. Esto, precisamente, porque la disminución de este tipo de viento predominante, producto de la zona de ubicación del sensor y la configuración topográfica del terreno, hace que el efecto producido por el viento en este costado, no se refleje con la misma intensidad que con la que viene del otro costado. También desaparece el tercer pico significativo del primer espectro, esto en vista de que la energía de esta banda ha sido redistribuida, como también sucedió con las ondas generadas por el viento.

### 3. CONCLUSIONES

En condiciones normales, existen tres picos más característicos de oleaje para el Cayo.

1. El primero de ellos corresponde a un oleaje generado por ondas de viento predominante del noreste con un periodo de 4,49 segundos en la zona sureste.
2. El segundo pico y el más energético corresponde al tipo de onda corta que representa el oleaje característico de la zona, con un periodo de 8 segundos.
3. El tercer pico, corresponde al tipo de onda infragravitatoria con un periodo de 127,9 segundos para la zona sureste y para la zona noroeste un periodo de 51,2 segundos.
4. En general, la dinámica de oleaje local del Cayo de acuerdo a los resultados del espectro y a la evidencia física *in situ*, así como también la observación de los trenes de oleaje reconocidos, permite aseverar lo siguiente:
  - La acción del oleaje en la playa este del Cayo es muy leve, precisamente por encontrarse en la zona protegida por la barrera arrecifal.
  - El evento del oleaje en las playas noroeste y noreste permite modular las puntas de dichas playas, debido a que los trenes de ondas difractados que vienen circundando la franja oeste y que no alcanzan a romper en dicha playa, se encuentran con el oleaje leve del este, que se ve incrementado por la acción del viento.
  - La rotura del oleaje sobre la playa oeste se hace de forma diferencial, donde se puede observar que rompe con mayor energía, justo después de finalizar la punta del Cayo en la parte suroeste. En la parte centro y norte de dicha playa se observa una rotura de oleaje menos intensa, pero que alcanza la playa todavía con una buena energía, debido a los efectos de refracción y difracción de los trenes de oleaje, donde la energía ya se ha redistribuido de forma más amplia, pero coincide justamente en la zona donde se evidencia mayor vulnerabilidad a la erosión y a su vez donde la constitución de la costa es completamente de arena a diferencia de la parte suroeste que tiene un tipo de costa con terrazas pre-arrecifales, mucho más resistente a la acción del oleaje.

### REFERENCIAS

- [1] Rodríguez L, Gracia J. Fotointerpretación aplicada al análisis dinámico de la línea de costa. Actas de Jornadas Técnicas "Las nuevas técnicas de información geográfica al servicio de la gestión de zonas costeras". Cádiz, 2008. p. 12.
- [2] INVEMAR. Programa holandés de asistencia para estudios en cambio climático: Colombia. Definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la zona costera colombiana. Informe técnico No. 4, Santa Marta, 2003. p. 30.
- [3] Andrade Carlos. The Circulation and Variability of the Colombian Basin in the Caribbean Sea, School of Ocean Sciences, University of Wales, Wales city, 2000. p. 10.
- [4] Instituto Agustín Codazzi, Manual de Fotogrametría, Colombia. 2007.
- [5] Medina José. Apuntes de ingeniería marítima y costera. Universidad Europea de Madrid. Madrid, 2009. p. 39.
- [6] Medina Raúl y Méndez Fernando. Inundación costera originada por la dinámica marina. G.I.O.C. Universidad de Cantabria. Cádiz, 2006. En: IT No. 74. p. 68.
- [7] Medina Raúl y Méndez, Fernando. Inundación costera originada por la dinámica marina. G.I.O.C. Universidad de Cantabria. Cádiz, 2006. En: IT No. 74. p. 70.
- [8] Díaz Gabriel. Análisis de Resonancia Portuaria: Generación, Transitoriedad, no Linealidad y Acoplamiento Geométrico. 2006. Cádiz: Universidad de Cantabria. p. 98.

## HERRAMIENTA TECNOLÓGICA PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN GENERADORES SÍNCRONOS

**Javier de la Cruz Prieto\***  
chachocol@gmail.com

**Julio César Yi Diazgranados\***  
julc1900@gmail.com

**Juan Antonio Contreras Montes\*\***  
epcontrerasj@yahoo.com

**Vladimir Díaz Charris\*\*\***  
ohcalv@hotmail.com

Fecha de recepción: marzo de 2011, Fecha de aceptación: septiembre de 2011

**Resumen:** La detección temprana de una falla en la maquinaria antes de que esta alcance un nivel crítico, es uno de los problemas de mayor frecuencia en las industrias. Se realizó la implementación de un sistema para detección de fallos en generadores sincrónicos basado en modelos difusos utilizando un sistema de adquisición de datos con DSPIC, el cual permite hacer la conversión de analógica a digital de 1 a 16 canales, programado por software en forma automática o manual y utilizando un buffer para almacenar la información por canal, permitiendo usar tasas de muestreo precisas. Para la validación del sistema de detección de fallos por modelos difusos se tomaron los datos que ya se tenían de algún estado de la operación, se pasaron por todos los modelos y el que arrojó el menor error, es el que indica la falla existente.

**Palabras clave:** Detección de fallos, Generadores sincrónicos, Identificación difusa.

**Abstract:** Early detection of a fault in the machinery before it reaches a critical level is one of the most common problems in industry. A fault detection system for synchronous generators based on fuzzy models was implemented using a data acquisition system with DSPIC; it allows the conversion from analog to digital from 1 to 16 channels, software programming for automatically or manually and a buffer for storing information per channel, allowing. The use of accurate sampling rates. To validate the fault detection system for fuzzy models data in some state of the operation was used and applied through the models. The model that yields the smallest error shows the existing fault.

**Key words:** Fault detection, Synchronous generators, Fuzzy identification.

\* Estudiante de Ingeniería Naval Especialidad Electrónica, Escuela Naval "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia.

\*\* Docente investigador y Director del Grupo de Investigación en Control, Comunicaciones y Diseño Naval. Escuela Naval "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia.

\*\*\* Docente investigador del Grupo de Investigación en Control, Comunicaciones y Diseño Naval. Escuela Naval "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia.

## INTRODUCCIÓN

Los generadores sincrónicos son considerados la parte más importante y costosa de un sistema de potencia eléctrica. Por eso, la detección temprana de anomalías ayudaría a minimizar los costos de mantenimiento más aun sabiendo que las condiciones de operación de los generadores a bordo de las unidades navales requieren de un mayor cuidado y atención que aquellos que operan en las instalaciones industriales.

Así, por ejemplo, cuando un generador sincrónico tiene un considerable tiempo de operación el aislamiento del devanado comienza a envejecerse. Si esta condición no es detectada a tiempo las consecuencias sobre el generador serán catastróficas. La falta de sistemas automáticos de detección de fallos obliga a planificar parada de los equipos para revisión de rutina, lo cual va en contravía de la optimización de operaciones o recursos.

Entre las distintas técnicas de detección de fallos, están en auge aquellas basadas en Inteligencia artificial y Soft computing [1]. Estas técnicas utilizan diferentes señales: voltajes y corrientes del estator, campos magnéticos, vibraciones, etc., prefiriéndose aquellas que permiten la realización de métodos no invasivos.

Además, se pueden encontrar importantes trabajos relacionados con la detección de fallos [2] con investigaciones enfocadas principalmente hacia aplicaciones en máquinas rotativas industriales, líneas de transmisión eléctricas y tanques acoplados, entre otros.

Un importante trabajo sobre el estado del arte de los procesos de detección de fallos [3] en el cual se revisan y discuten cerca de 200 referentes bibliográficos que abarcan las tres estrategias básicas de detección de fallos: métodos basados en modelos cuantitativos, métodos basados en modelos cualitativos y métodos basados en datos históricos.

En búsqueda realizada sobre las patentes publicadas en Colombia se obtuvo una sola que lleva por nombre “Método y Dispositivo de Diagnóstico de Fallos de Funcionamiento de un Sensor”, la cual fue solicitada el 21 de mayo de 2004 por Humberto Rubio Camacho. Es claro que la patente se registró de un proceso de detección de fallos diferente al que se presenta en este proyecto. En Cartagena (Colombia) existen pocos proyectos de desarrollo tecnológico propuestos por las universidades para apoyar a la industria naval en el campo específico del diagnóstico y detección de fallos. En la búsqueda de información bibliográfica solo se encontró, a nivel local, el proyecto denominado “Sistema de Detección de Fallos de un Motor de Inducción Basado en Identificación Borrosa”, el cual fue dirigido por Juan Contreras.

En esta investigación se utilizó una técnica basada en Lógica Difusa, que emplea modelos cuantitativos para la identificación de fallos. El sistema es implementado en un hardware que facilite su transporte y que además sea adaptable para que pueda ser entrenado y aplicado en cualquiera de los sistemas de generación eléctrica de las diferentes unidades de la Armada Nacional. Se pretende que el producto final sea robusto, flexible, confiable y de bajo costo que pueda ser posteriormente comercializado y/o reproducido con facilidad.

La flexibilidad del producto final permitirá su posterior aplicación a la detección de fallos de otros equipos vitales como los sistemas de propulsión, etc.

## 1. DESARROLLO

### 1.1 Descripción del prototipo

Para el proceso de adquisición de datos desde los sensores, se define en primera instancia la alimentación de cada sensor, la distribución y ubicación determinada de los mismos dentro del sistema y el tipo de señal dada por cada sensor [mV, V, mA, A,  $\Omega$ , mV/G]. Dependiendo de cada tipo de entrada de señal se manejarán acopladores para poder adquirir estas señales desde el DSPIC de forma correcta. Se manejará un DSPIC que permita registrar los datos obtenidos de todos los sensores y se guardarán en una memoria para su posterior análisis.

### 1.2 Toma de datos

Se realizó en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela Naval, con un motor de inducción trifásico Leroy-Somer tipo TA 13250, No. 72898 con velocidad nominal de 1800 rpm, frecuencia de alimentación 60 Hz, 3 HP, voltaje de alimentación de 220 v, acoplado directamente a un generador trifásico sincrónico Leroy-Somer tipo LSC 132, No. 142718, a 1800 rpm genera 3 KW, 3 fases, frecuencia de alimentación 60 Hz, 220 v produce 14 A, y a través del generador se encuentra acoplado el tacómetro Radio-Energie tipo Reo 444, con N max 10000 rpm, I max 0,18 A, V max 0,06 v/rpm. El generador simulará la carga del sistema. Se usaron sensores para monitorear la corriente y voltaje en cada fase y la velocidad del motor. Con estos datos se calcula la potencia instantánea y el par motor.

### 1.3 Sistema de adquisición de datos con DSPIC

El DSPIC utilizado es el 30f6014A, el cual permite muestrear y realizar conversión análoga digital de 1 a 16 canales a una velocidad de 200.000 muestras por segundo (200 Ksps) en total. La resolución de cada canal del ADC es de 12 Bits, por lo que se pueden leer señales análogas de muy baja sensibilidad del orden de 1,22 mv utilizando como referencia 5 voltios, referencia variable.

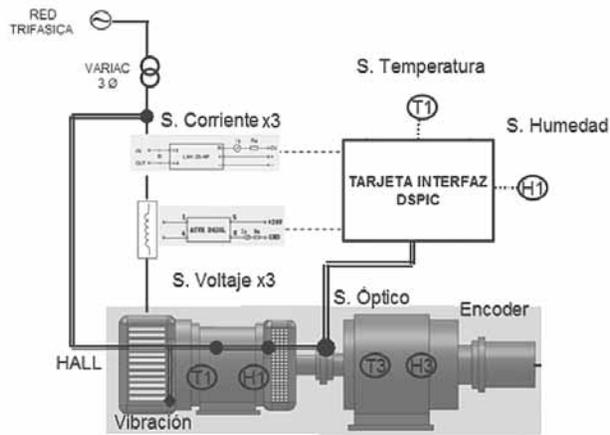


Figura 1. Diagrama general de conexión sensoria electrónica

El muestreo se programó por software en forma automática o manual, y emplea un buffer para almacenar la información por canal, lo que permite utilizar ratas de muestreos precisas. Es posible programar interrupciones que permitan al DSPIC ejecutar un algoritmo de control tipo fuzzy al tiempo que muestrea los canales análogos. Este DSPIC puede ejecutar las instrucciones de control a una velocidad de 30MHZ.

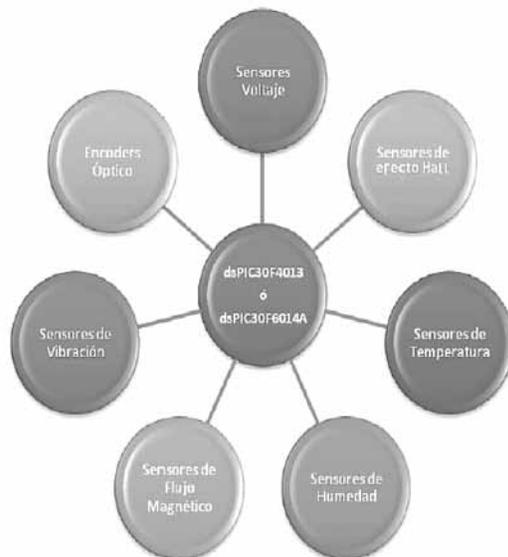


Figura 2. Distribución de sensores en DSPIC 30f6014A

Además este dsPIC cuenta con unos filtros internos diseñados para eliminar ruido o señales a diferentes frecuencias que no necesitamos muestrear.

Todos los sensores se conectaron de forma independiente a cada pin de algún puerto del dsPIC. Esto con el fin de unificar la forma de medición de variables de todo el sistema y llevar un registro exacto de tiempo de muestreo y datos.

## 2. IDENTIFICACIÓN DE LOS MODELOS DIFUSOS

El método de identificación difusa empleado ha sido ampliamente difundido [2], [3] y utiliza funciones de pertenencia triangulares con solapamiento en 0,5 para el antecedente y consecuentes tipo singleton, operadores tipo promedio ponderado en vez de operadores t-norma para la evaluación del antecedente. Los consecuentes, tipo singleton, son ajustados usando mínimos cuadrados recursivos.

Se entrenó el sistema con siete condiciones de operación para generar siete modelos:

- Operación normal ON
- Cortocircuito leve en fase R: CCFR
- Cortocircuito leve en fase S: CCFS
- Cortocircuito leve en fase T: CCFT
- Fase R abierta FRA
- Fase S abierta FSA
- Fase T abierta FTA

Para ello, se hizo previamente un muestreo de las siguientes señales: corrientes de fase, voltajes de fase y velocidad. Con estos datos se calcula el vector de potencia instantánea, sumando las potencias instantáneas en cada fase  $i$ , mediante la ecuación:

$$Pt(k) = \sum_{i=1}^3 V(k)_{(i)} I(k)_{(i)} \tag{1}$$

Con el dato de potencia instantánea se calcula el par instantáneo que se produce en el generador mediante la ecuación

$$T(k) = \frac{P(k)}{w(k)} \tag{2}$$

Donde  $w(k)$  es la velocidad angular en el instante  $k$ .

Cada modelo difuso debe predecir el par instantáneo producido en el instante  $T(k)$  a partir de la información de los valores del par en los instantes  $T(k-1)$  y  $T(k-2)$ . Es decir, cada modelo difuso tendrá dos variables de entrada:  $T(k-1)$  y  $T(k-2)$ , y una

variable de salida  $T(k)$  que corresponde al valor actual del par predicho por el modelo difuso.

Los modelos difusos obtenidos tienen cada uno dos funciones de pertenencia triangulares por cada variable de entrada, lo que indica que habrá en total cuatro consecuentes.

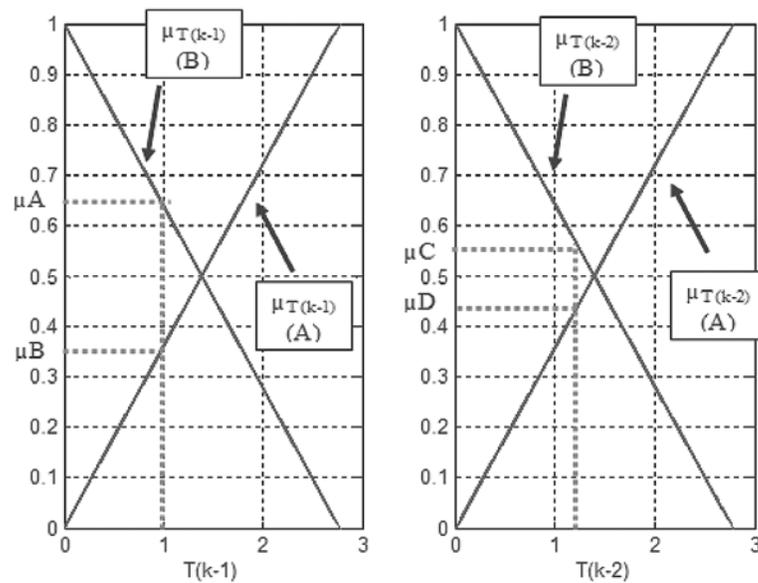


Figura 3. Conjuntos borrosos

Las siguientes tablas muestran los valores de los consecuentes obtenidos para cada modelo difuso:

TABLA 1  
VALORES DE CONSECUENTES EN OPERACIÓN NORMAL Y CORTOCIRCUITO

	ON Operación Normal	CCFR Cortocircuito fase R	CCFS Cortocircuito fase S	CCFT Cortocircuito fase T
C1	3.7627547466043	0.0891583506580	0.0878929224733	0.0911095208848
C2	1.9894606994402	1.3826282774417	1.4336082006522	1.3667404573609
C3	-3.641934364427	0.0891583506580	0.0878929224733	0.0911095208848
C4	9.3941498104720	1.3826282774417	1.4336082006522	1.3667404573609

TABLA 2  
VALORES DE CONSECUENTES EN FASE ABIERTA

	FRA Fase R abierta	FSA Fase S abierta	FTA Fase T abierta
C1	0.0863018156361	0.0586316027262	0.0718327737045
C2	1.3839531348167	1.4080895262233	1.2723999988604
C3	0.0863018156361	0.0586316027262	0.0718327737045
C4	1.3839531348167	1.4080895262233	1.2723999988604

### 3. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DIFUSOS

Para la validación del sistema de detección de fallos por modelos difusos se toman los datos de algún estado de la operación, por ejemplo cortocircuito en la fase T y se pasa por todos los modelos: el modelo que arroje el menor error, será el que indique la falla existente. Cada uno de los modelos poseen la misma partición de las variables de entrada (dos conjuntos triangulares por cada entrada), pero diferenciándose entre sí, en que tienen diferentes parámetros de consecuentes: C2, C3, C4, C5, C6, C7 y C8.

#### 3.1 Prueba 1

Se ingresan los valores de las entradas, la salida y el par del cortocircuito leve en la fase T, a un software de validación desarrollado en Matlab.

Se puede observar que el error mínimo corresponde al cortocircuito en la fase T, comprobando que el sistema se encuentra funcionando correctamente.

#### 3.2 Prueba 2

Se realiza una toma de datos en operación normal del generador sincrónico y se ingresan a cada uno de los modelos, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 4.

TABLA 3  
RESULTADOS CORTOCIRCUITO EN FASE T

Condición de operación	Error
Operación normal	16.96043091
Cortocircuito fase R	0.2717224002
Cortocircuito fase S	0.2752825596
<b>Cortocircuito fase T</b>	<b>0.2715368751</b>
Fase abierta R	0.2717440472
Fase abierta S	0.273723813
Fase abierta T	0.2823534107

TABLA 4  
RESULTADOS CONDICIÓN NORMAL

Condición de operación	Error
<b>Operación normal</b>	<b>0.128610984</b>
Cortocircuito fase R	1.133665024
Cortocircuito fase S	1.114037704
Cortocircuito fase T	1.136106176
Fase abierta R	1.139917477
Fase abierta S	1.197858598
Fase abierta T	1.227013928

Se puede observar que el error mínimo corresponde al modo de operación normal, comprobando que el sistema se encuentra funcionando correctamente.

#### 4. CONCLUSIONES

Se describió la implementación de un sistema para detección de fallos en generadores sincrónicos basado en modelos difusos. A partir de datos experimentales, en condiciones de operación normal y en condiciones de falla, se generaron los modelos difusos, obteniendo una alta precisión. Para la obtención de los modelos difusos se emplearon como variables de entrada dos valores pasados del par electromagnético y como salida el par electromagnético futuro (predicción). La estructura de los modelos difusos, para cada condición de operación, contempla dos funciones de pertenencia triangulares por cada variable de entrada; es decir, cada modelo difuso tendrá entonces cuatro funciones de pertenencia triangulares y cuatro consecuentes tipo singleton.

El sistema de detección de fallos fue sometido a pruebas con todas las condiciones acertando en cada uno de los casos. Es necesario aclarar que para un acertado diagnóstico se requiere que el sistema haya tomado previamente no menos de 4000 muestras de velocidad y corrientes y voltajes de fase.

#### REFERENCIAS

- [1] Calderón J, Zapata G, Ovalle D. "Algoritmo Neuro-Difuso para la Detección y Clasificación de Fallas en Líneas de Transmisión Eléctrica Usando ANFIS". Revista Avances en Sistema e Informática. 2007. Vol. 4, No. 1, p. 101-107
- [2] Contreras J. "Sistema de Detección de Fallos de un Motor de Inducción Basado en Identificación Borrosa". Encuentro de docentes investigadores RIESCAR. Cartagena, 2008.
- [3] Contreras J, Misa R, Paz J, Murillo L, Sarabia J. Efficient Fuzzy Identification Based on Inference Error. Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas. 2007. Vol. 1, No. 9, p. 62-67.
- [4] Contreras J, Misa R, Murrillo L. Interpretable Fuzzy Models from Data and Adaptive Fuzzy Control: A New Approach. IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Londres. 2007.
- [5] Fuente MJ, Moya E, Sainz GI. Esquema de Detección de Fallos Difuso Basado en Modelado Lingüístico-Preciso de un Motor de Inducción. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 2007. Vol. 4, No. 2, p. 72-80.
- [6] Iserman R. and Balle P. Trends in Application of Model-Based Fault Detection and Diagnosis of Technical Processes, Control Engineering Practice, 1997. Vol. 5, No. 5, p. 705-719.
- [7] Izadi-Zamanabadi R. and Blanke M. A Ship Propulsion System Model for Fault-Tolerant Control, In Control Engineering Practice, 1999. Vol. 7, No. 2, p. 227-239.
- [8] Pardo JH, Gauthier A. "Clasificación y Detección de Fallas en Sistemas Dinámicos". Revista de Ingeniería, 2006. Vol. 23, p. 4-12.
- [9] Reyes F, Tarantino R, Aranguren S. "Sistema de Detección de Fallas en Máquinas Rotativas Industriales Basado en el Método de Análisis Espectral". Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada. 2007. Vol. 2, No. 10, p. 64-72.
- [10] Puig V, Quevedo J, Escobet T, Morcego B, Ocampo C. Control Tolerante a Fallos (Parte I): Fundamentos y Diagnóstico de Fallos. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, RIAI, 2004. Vol. 1, No. 1, p. 15-31.
- [11] Puig V, Quevedo J, Escobet T, Morcego B, Ocampo C. Control Tolerante a Fallos (Parte II): Mecanismos de Tolerancia y Sistema Supervisor. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, RIAI, 2004. Vol. 1, No. 2, p. 5-21.
- [12] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K, Kavuri S N. A Review of Process Fault Detection and Diagnosis Part I: Quantitative Model-Based

- Method, Computers and Chemical Engineering, No. 27, 2003. p. 293-311.
- [1] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K, Kavuri S. N. A Review of Process Fault Detection and Diagnosis Part II: Qualitative Model and Search Strategies, Computers and Chemical Engineering, No. 27, 2003. p. 313-326.
- [2] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K, Kavuri S. N. A Review of Process Fault Detection and Diagnosis Part III: Process History Based Method, Computers and Chemical Engineering, No. 27, 2003. p. 327-346.

## ARTÍCULO

## ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL ESPECTRO DE OLAS BAJO CONDICIONES ATMOSFÉRICAS SEVERAS

Gustavo Adolfo Gutiérrez Leones\*  
gustavoagl86@gmail.com

Serguei Lonin\*\*  
slonin@yahoo.com

Fecha de recepción: diciembre de 2010, Fecha de aceptación: septiembre de 2011

**Resumen:** Se estudió la evolución temporal del espectro de olas en el mar Caribe, tomando como punto de referencia la posición de la boya NOAA 42058, de donde se obtuvieron los datos correspondientes a los espectros escalares y direccionales del 14 al 17 de julio de 2005, durante el paso del huracán Emily. Se observó la variación de las condiciones de oleaje bajo la influencia de vientos fuertes, con cambios bruscos y de corta duración. Se emplearon NCEP/NCAR para forzar el modelo de predicción de oleaje CaribWAM-III [1], y se compararon los datos *in situ* con las salidas del modelo, demostrándose que el modelo responde coherentemente en situaciones atmosféricas severas. Se evidenció la importancia del empleo de un campo de vientos que restituya aceptablemente las condiciones reales, para forzar el modelo.

**Palabras clave:** Evolución temporal espectro, Caribe, Huracán Emily, CaribWAM-III.

**Abstract:** The temporal evolution of the spectrum of waves in the Caribbean is studied, taking as reference the position of the NOAA buoy 42058, from which data were obtained for scalar and directional spectra from 14 to July 17, 2005, during hurricane Emily. Variation was observed under conditions of strong winds, with abrupt changes and short duration. Wind fields were used NCEP / NCAR to force the wave prediction model CaribWAM-III, and compared the *in situ* data with model output, showing that the model consistently respond in severe weather situations. This study revealed the importance of using a wind field that returns acceptable the real conditions to force the model.

**Key words:** Temporal evolution spectrum, Caribbean, Hurricane Emily, CaribWAM-III.

\* Teniente de Navío de la Armada Nacional. Profesional en Ciencias Navales. Estudiante Curso de Extensión Profesional en Oceanografía Física, Escuela Naval "Almirante Padilla".

\*\* Ph.D. en Oceanografía. Director de Tesis. Miembro del Grupo de Investigación. Facultad de Oceanografía Física. Escuela Naval "Almirante Padilla".

## INTRODUCCIÓN

La Armada Nacional, mediante el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), ha venido desarrollando proyectos científicos durante sus 34 años de existencia, en pro de contribuir, tanto a garantizar la vida humana en el mar, como a los intereses nacionales. Dentro de este proceso de mejoramiento continuo, se logró desarrollar por parte del CIOH un modelo numérico bautizado como CaribWAM-III [2], el cual, es una mejora del modelo de tercera generación conocido como NedWAM (Netherlands Wave Model). Este modelo “permite obtener las características espectrales del oleaje, así como las características más importantes desde el punto de vista práctico, tales como altura significativa, periodo, longitud de onda y dirección general de las olas” [3].

En este trabajo se estudió la evolución temporal del espectro de olas [4] bajo condiciones atmosféricas severas (huracán Emily en julio de 2005) y se determinó que el modelo actual CaribWAM-III, responde ante las condiciones extremas de viento (fuertes, con variaciones bruscas y de corta duración) integradas dentro de un campo de vientos determinado que force el modelo [5].

## 1. DESARROLLO

### 1.1 Obtención de datos

Se empleó la boya NOAA 42058, ubicada en el centro del mar Caribe en posición Latitud 15.093 N (15°5'33" N), Longitud 75.064 W (75°3'52" W), a 249,4 millas náuticas y en dirección 321° desde Puerto Bolívar en la Península de La Guajira.

### 1.2 Validación de los datos

Se compararon los datos de viento del día 160500Z julio 2005 (punto de mayor aproximación entre el huracán Emily [6] y el sensor) adquiridos con la boya, con la información suministrada por QuickScat (figura 1) y por HRD (Hurricane Research Division) (figura 2), respectivamente.

La figura 1, muestra la medición más alta de viento obtenida durante el paso del huracán Emily (izquierda) y su posición con respecto al sensor (derecha), a 25,65 millas náuticas (47,5 km) de distancia, circunstancia por la cual la boya no puede medir los vientos máximos del huracán presentes en el cuadrante delantero derecho del ciclón, con intensidades cercanas a los 110 nudos.

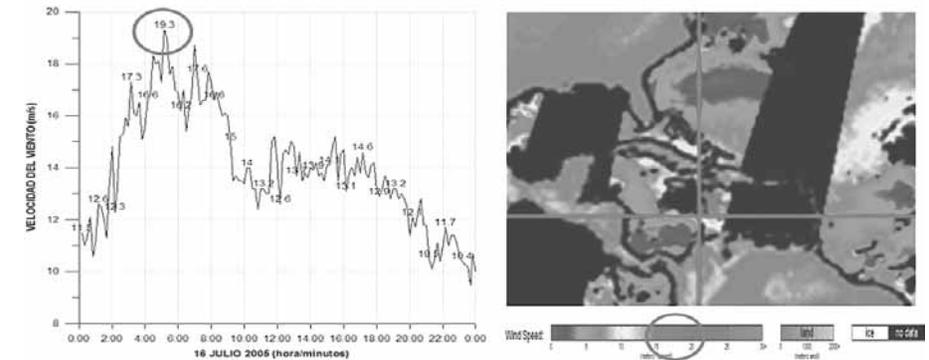


Figura 1. Datos obtenidos por la boya NOAA 42058 (izquierda), comparados con la imagen de QuickScat (derecha), para el día 160500Z julio 2005

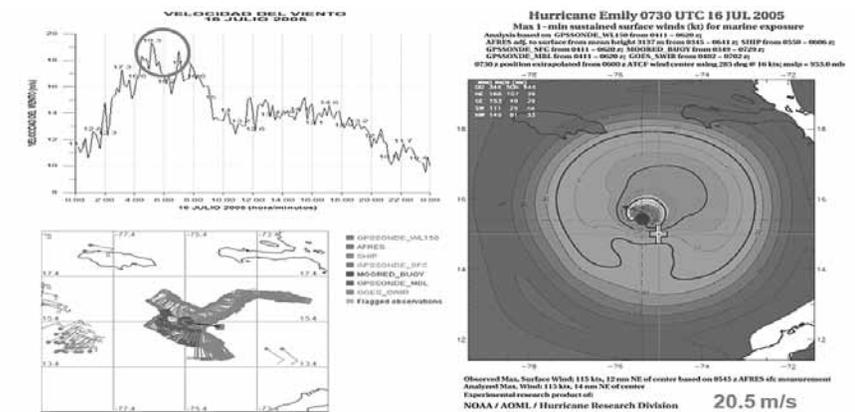


Figura 2. Datos obtenidos por la boya NOAA 42058 (izquierda), comparados con la imagen de HRD (derecha), para la mañana del día 16 julio de 2005

HRD guarda coherencia con QuickScat en cuanto a la posición e intensidades de los vientos del huracán para este instante del tiempo, e igualmente, mantiene buena relación con los datos medidos por la boya con respecto al máximo absoluto (19,3 m/s).

### 1.3 Evolución del espectro de energía de oleaje en el Caribe

El espectro de energía [7] fue obtenido mediante el procesamiento de los datos que son adquiridos *in situ* por parte de la boya, y que contienen la información correspondiente tanto al espectro escalar en función de las frecuencias, como al espectro direccional

de energía, el cual se encuentra en función de la densidad espectral para el dominio de las frecuencias, multiplicada por una función de dispersión, que depende de las frecuencias y del azimut (ángulo medido en sentido horario, desde el norte hasta la dirección de donde proviene la ola) [8].

$$S_{dir} = C11(f) * D(f, A)$$

C11(f): Es la densidad espectral en el dominio de las frecuencias.

$$D(f, A) = (1 / \pi) * (0.5 + R1 * Cos(A - ALPHA1) + R2 * Cos(2 * (A - ALPHA2)))$$

(R1) y (R2), son las primera y segunda coordenadas polares normalizadas de los coeficientes de Fourier y son adimensionales. Estos parámetros describen la distribución direccional, con respecto a la dirección principal. (ALPHA1) y (ALPHA2), son la dirección promedio y la dirección principal de la onda respectivamente. En función de los coeficientes de Fourier de Longuet - Higgins se expresarían así:

$$R1 = \frac{(\sqrt{a_1 * a_1 + b_1 * b_1})}{a_0}, \quad R2 = \frac{(\sqrt{a_2 * a_2 + b_2 * b_2})}{a_0}$$

$$ALPHA1 = 270.0 - ARCTAN(b_1, a_1)$$

$$ALPHA2 = 270.0 - (0.5 * ARCTAN(b_2, a_2) + \{0. \text{ ó } 180\})$$

El día 15 de julio a las 1800Z horas, estando el huracán en posición Lat. 14,5°N, Lon -071,8° W, con presión atmosférica en el ojo de 969 mb y vientos máximos sostenidos de 95 nudos (175,94 km/h), se registró en el espectro escalar el primer pico de mar de swell (figuras 3 y 4), el cual se identifica fácilmente por moverse en un espectro angosto de frecuencias con respecto al mar de viento, y con periodos mayores. La energía alcanzó los 3 (m<sup>2</sup> / Hz), proporcional a ~0,86 metros de altura de la ola, con un periodo de 16 segundos y proveniente del NE, por marcación 030°. La evolución del swell continuó, logrando el pico más energético del día a las 2100Z, con una energía cercana a los 30 (m<sup>2</sup> / Hz), que representó una altura de la ola de ~2,73 metros, conservó su periodo de 16 segundos y varió ligeramente su dirección hacia el W (015°). Durante las siguientes dos horas del día el swell manifestó una disminución en su energía, mientras que el mar de viento (sea) mostró un aumento de su capacidad energética especialmente a las 2200Z horas, alcanzando 8 (m<sup>2</sup> / Hz), similares a 1,41 metros de altura de la ola, con periodo de 6 segundos.

El día 160000Z de julio 2005, el huracán Emily estaba en posición Lat. 14,9°N,

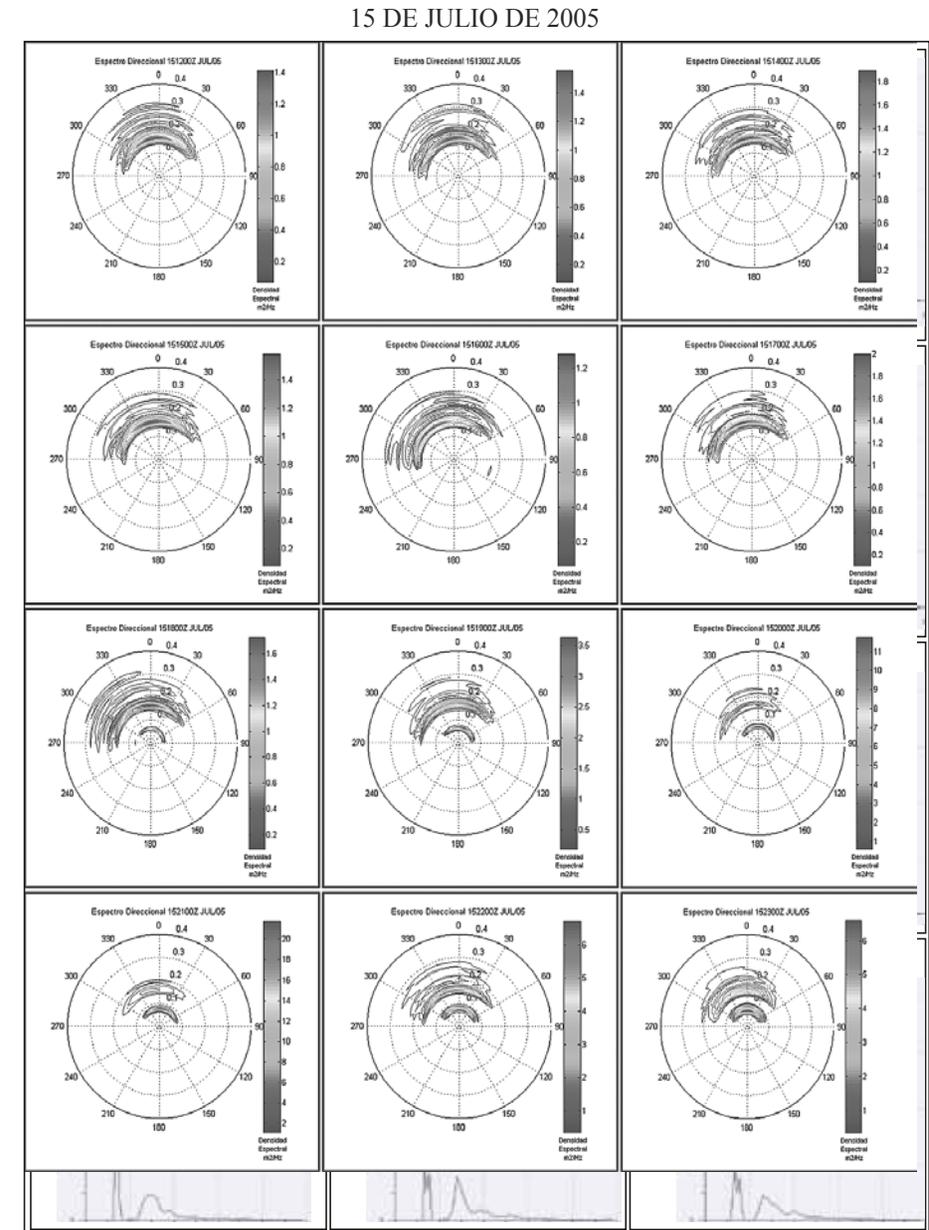


Figura 3. Boya 42058. Espectros escalares 1512Z - 1523Z julio 2005. Datos NOAA-National Data Buoy Center

15 DE JULIO DE 2005

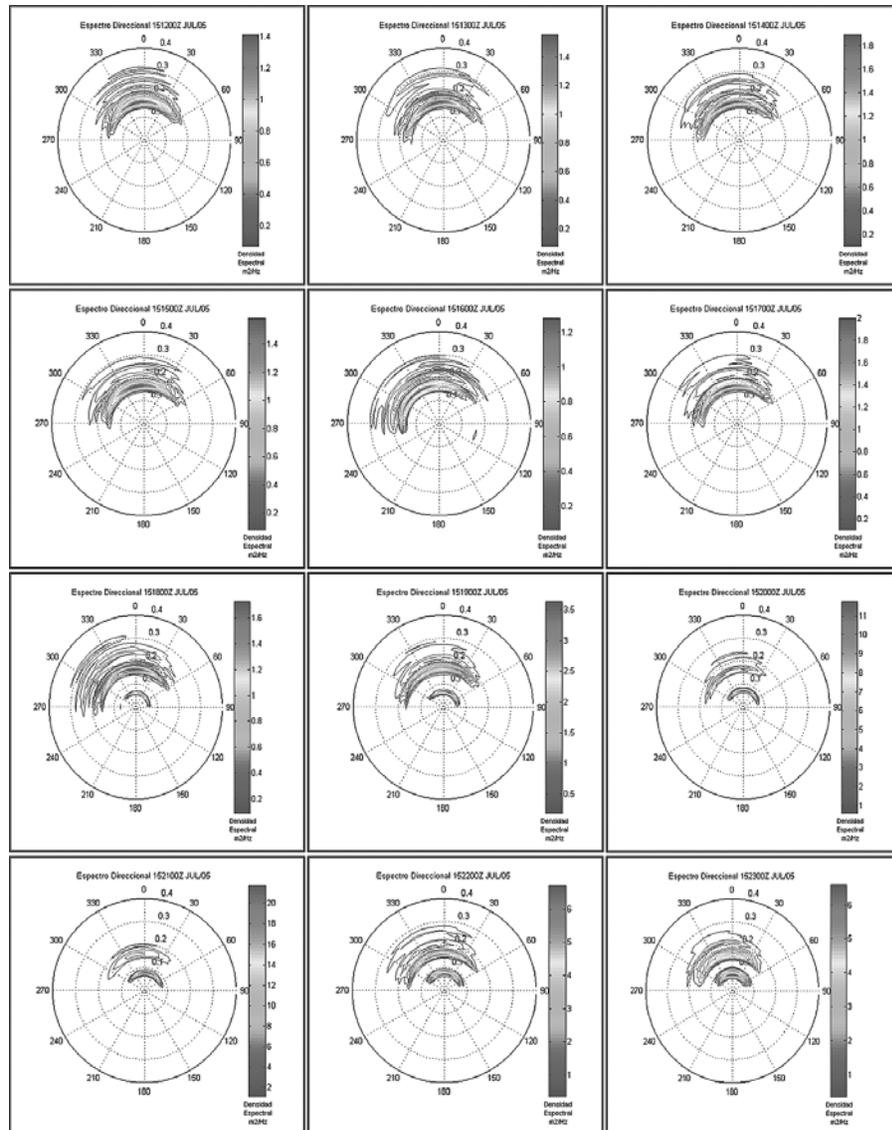


Figura 4. Boya 42058. Espectros direccionales 1512Z – 1523Z julio 2005. Datos NOAA - National Data Buoy Center

16 DE JULIO DE 2005

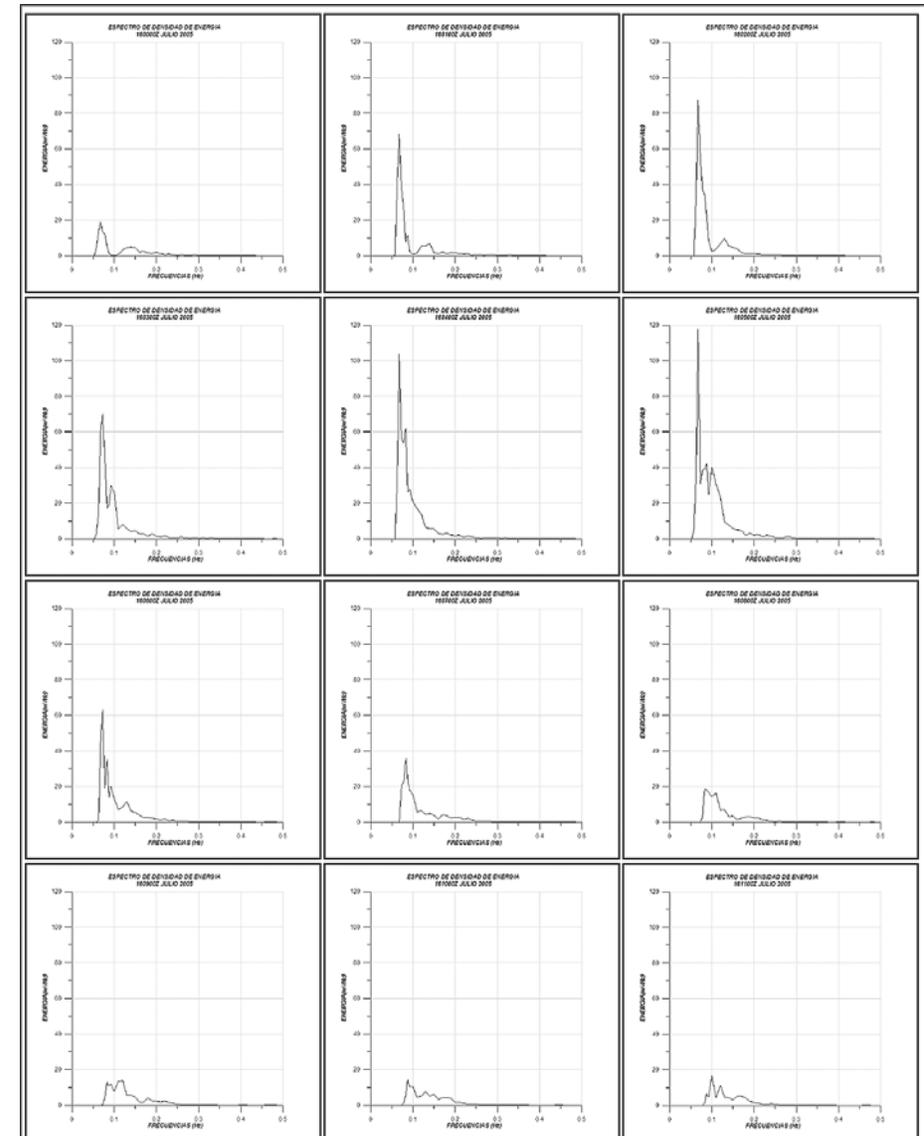


Figura 5. Boya 42058. Espectros escalares 1600Z – 1611Z julio 2005. Datos NOAA - National Data Buoy Center

16 DE JULIO DE 2005

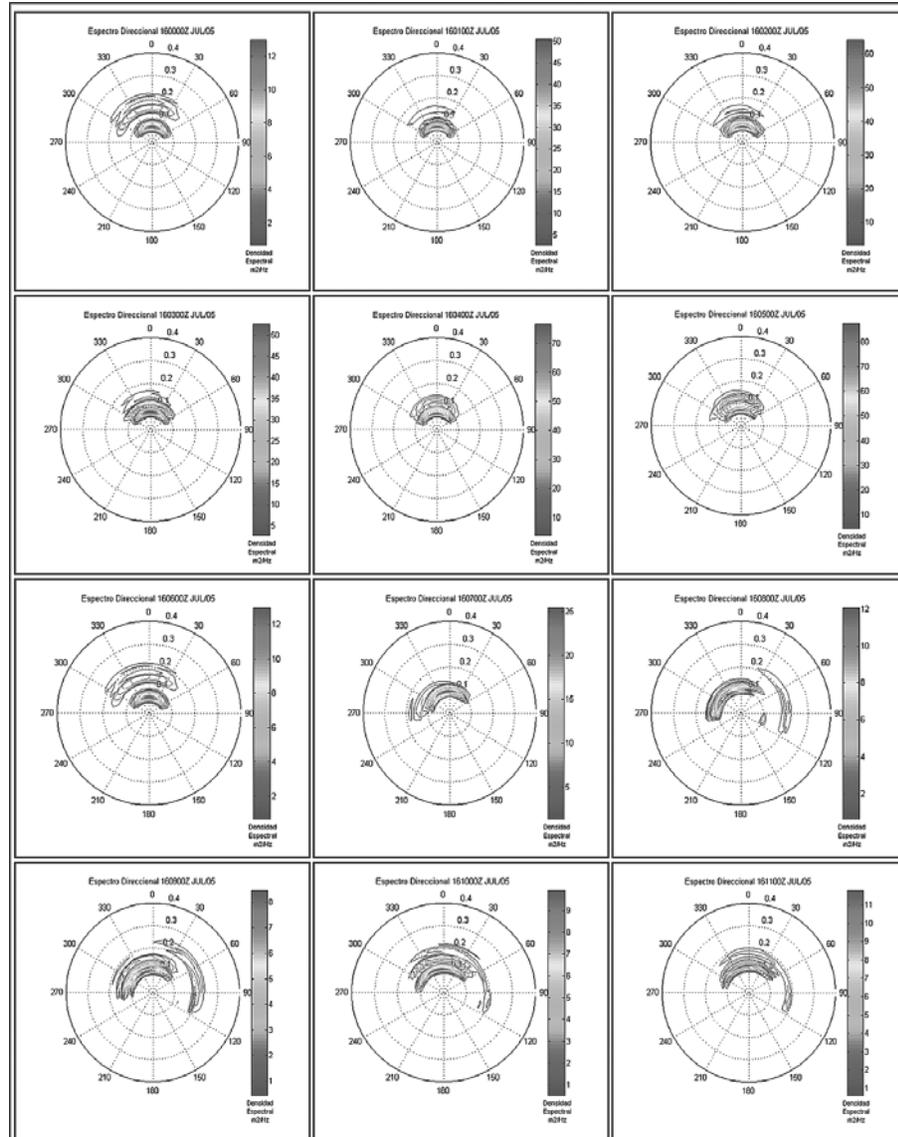


Figura 6. Boya 42058. Espectros direccionales 1600Z – 1611Z julio 2005. Datos NOAA - National Data Buoy Center

Lon -073,4 W, a una distancia en línea recta desde la boya NOAA 42058 de 96,86 millas náuticas (179,38 kilómetros), por marcación 096°, viajando en sentido SE – NW, con rumbo 288°, a una velocidad promedio de 19 nudos (35 km/h). La presión atmosférica en el centro del huracán fue de 958 mb y los vientos máximos sostenidos registraron intensidades de 110 nudos (203,72 km/h), y aumentando en el dominio del tiempo. La mañana se caracterizó por mostrar un incremento constante en la cantidad de energía contenida por las olas, alcanzando el máximo a las 0500Z horas con  $117,7 (m^2 / Hz)$ , equivalente a más de 6 metros de altura (figura 5), con periodo de 16 segundos, provenientes desde el norte (000°). En este momento el huracán se ubicaba en Lat. 15,3°N, Lon -074,7° W, a una distancia de 25,65 millas náuticas (47,5 km), en dirección NE, por marcación 065°. La evolución de la energía fue rápida tanto en el crecimiento como en la disipación, debido a la alta velocidad de traslación del huracán.

Hasta las 1100Z horas, la energía de la ola disminuyó progresivamente hasta menos de  $17 (m^2 / Hz)$ , nivel alrededor del cual oscilaron las olas más altas durante el resto del día (~2 metros), con periodos de 10 segundos, y dirección entre el norte y el noroeste (000 - 330 respectivamente). Las olas más bajas registraron alturas promedio de 35 centímetros, con periodos de 4 segundos. Para este instante el huracán se encontraba a 78,5 millas náuticas (145 km) de la boya NOAA 42058, en posición Lat. 15,8°N, Lon -076,2° W, en dirección NW, por marcación 304°, con presión atmosférica en el centro de 953 mb y vientos máximos sostenidos de 120 nudos (222,2 km/h), dirigiéndose hacia el oeste con rumbo constante 288°.

Debido al avance del huracán, se restablecen las condiciones normales en el área de estudio durante la noche del día 17 de julio, cuando las condiciones del tiempo, coinciden nuevamente con el patrón climatológico del área.



Figura 7. Altura de la ola en metros (\*) Vs. intensidad del viento en metros por segundo (---), durante los días 14, 15, 16 y 17 de julio de 2005. Datos NOAA - National Data Buoy Center

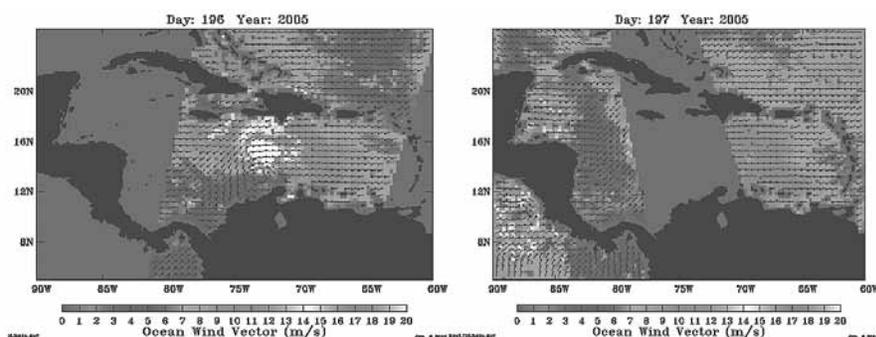
## 2. RESULTADOS DEL MODELO DE PREDICCIÓN CaribWAM-III

Se analizaron los resultados del pronóstico generado por el modelo CaribWAM-III, en condiciones atmosféricas extremas, específicamente, las registradas como consecuencia del paso del huracán Emily, durante los días 14, 15, 16 y 17 de julio de 2005. Se compararon los resultados generados por el modelo con los datos *in situ* obtenidos por la boya NOAA 42058, con el fin de determinar si el modelo está haciendo una buena aproximación del comportamiento dinámico del océano.

### 2.1 Forzamiento del modelo

En el presente trabajo, no fue posible emplear campos de vientos de escaterómetros (QuickScat) debido a que para el día 16 de julio de 2005, el área de estudio estuvo cubierta por la zona de sombra del satélite (figura 8), imposibilitando la adquisición de datos en este punto e impidiendo el seguimiento de las condiciones de oleaje. Sin embargo, el campo de vientos de QuickScat para el día 15 de julio de 2005, fue útil para compararlo con las otras opciones de información.

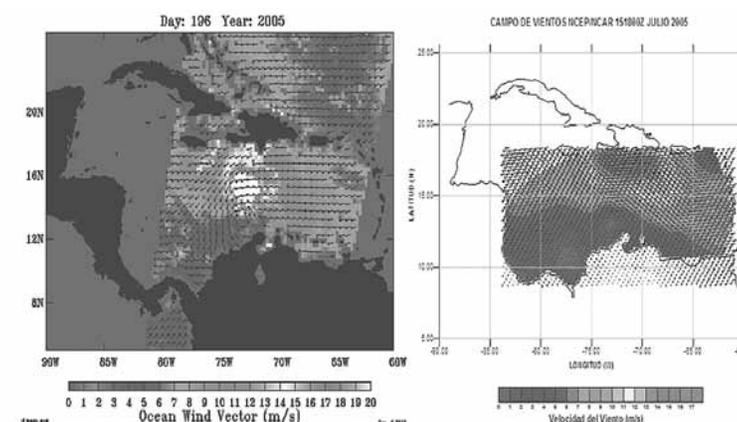
Los campos de vientos de reanálisis de NOAA NCEP (National Center for Environmental Prediction) / NCAR (National Center for Atmospheric Research), se encontraron disponibles en línea para el periodo de estudio, con resolución espacial de 2.5 grados tanto en latitud como en longitud, y con resolución temporal de seis horas, es decir, cuatro adquisiciones diarias (00Z, 06Z, 12Z, y 18Z).



**Figura 8.** Campos de vientos de QuickScat del 15 y 16 de julio/05. Datos NASA / POET (PO.DAACOceanESIPTool) / QuickScat

### 2.2 Validación datos NCEP/NCAR

La validación de los datos correspondientes a los campos de vientos de NCEP/NCAR, se hizo con base en los datos de QuickScat, específicamente con base en el día 15 de julio de 2005.



**Figura 9.** Campo de viento de QuickScat Vs. NCEP/NCAR del 15 de julio/05. Datos NASA / POET (PO.DAACOceanESIPTool) / QuickScat

La figura 9 permite identificar las principales diferencias y semejanzas entre los dos campos de vientos, las cuales tuvieron una repercusión directa en los resultados del modelo, teniendo en cuenta que el viento es el principal forzante del modelo. Los valores máximos de intensidad del viento, así como los valores adyacentes al punto de vientos máximos, son concordantes en ambos campos, el ojo del huracán, ubicado al norte de la península de La Guajira, mantiene una posición coherente en los dos campos de vientos, los patrones de circulación guardan buena similitud entre sí, la ubicación de los vientos máximos está bien relacionada en longitud, pero se observa un desfase espacial en latitud que pudo obedecer a la posición de las estaciones receptoras de NCEP/NCAR, las cuales por estar en tierra, registraron el máximo muy cerca de República Dominicana, mientras que QuickScat lo registró exactamente sobre el Caribe central, representando mucho mejor el comportamiento del huracán Emily en su paso por el mar Caribe. Adicionalmente, se midió la intensidad de los vientos en el punto de la boya y se compararon las mediciones de la estación NOAA 42058, con respecto a los campos interpolados NCEP/NCAR (figura 10).

En la figura 10, se observa cómo los datos de NCEP/NCAR, presentan una asimilación incorrecta con respecto a los datos medidos por la boya, esto es debido a que el sistema en su integridad, no es capaz de representar la posición exacta del huracán, porque las mediciones de las estaciones en tierra son las que están retroalimentando el modelo y solo reciben información del sector donde se encuentran ubicadas, mas no, de lo que está sucediendo en el centro de la cuenca. Esta es la razón por la cual, para este caso

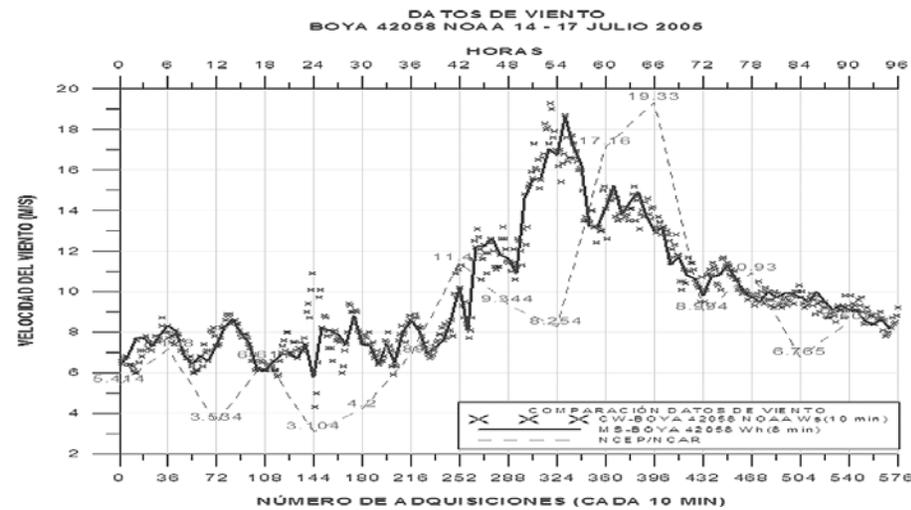


Figura 10. Intensidad de vientos estación NOAA 42058 Vs. NCEP/NCAR. Datos boya NOAA 42058, NCEP/NCAR

específico, los vientos máximos de NCEP/NCAR están ubicados prácticamente sobre República Dominicana, mientras que el huracán se encontraba en el centro del Caribe (figura 9). Sin embargo, ambos picos guardan buena relación en cuanto a la intensidad de los vientos máximos (~19 m/s). La mala asimilación de NCEP/NCAR [9], generó que los máximos que la boya registró en la madrugada del 16 de julio, no fueran detectados por CaribWAM-III, porque pasan precisamente por encima de la boya. Solo hasta las 1800Z horas aproximadamente del día 16 de julio, el modelo registró un máximo, pero este pico, corresponde a un área de los vientos máximos que se acerca bastante a la boya, y que podría describirse como el cuadrante derecho posterior del huracán (figura 11 derecha).

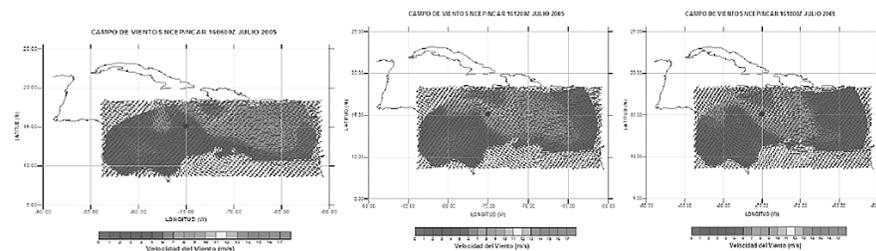


Figura 11. Campos de vientos NCEP/NCAR 160600Z - 161800Z julio de 2005. Datos NOAA NCEP/NCAR

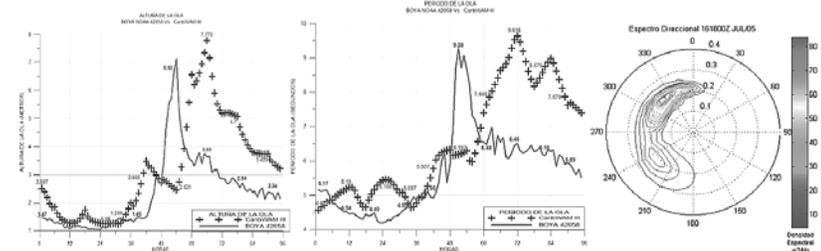


Figura 12. Altura, periodo y espectro direccional, generados por CaribWAM-III. Datos boya NOAA 42058 – CaribWAM-III

### 2.3 Salidas del modelo CaribWAM-III

Las salidas del modelo están integradas por los valores correspondientes a altura de la ola (figura 12), periodo (figura 12), y el espectro direccional (figura 12).

En la figura 12, tanto en la altura (izquierda), como en el periodo (derecha) se aprecia la diferencia que se registró en la comparación de vientos sobre el punto de la boya (figura 10). Este aspecto permite inferir que la diferencia se debe igualmente, a la mala asimilación de NCEP/NCAR, que no representa muy bien la posición real del huracán. Por otra parte, se puede observar de forma generalizada una ligera sobreestimación de la altura de la ola, así como una reducción de la altura de manera retardada después del máximo absoluto, a diferencia de las mediciones obtenidas por la boya. La diferencia de aproximadamente 12 horas entre el pico detectado por la boya y el pico registrado por el modelo, permite deducir que se produjo por la misma divergencia en la posición de los vientos máximos de NCEP/NCAR. Sin embargo, la diferencia entre los dos periodos pico es de solo 0,3 segundos. Es importante aclarar que los picos, corresponden a instantes del tiempo diferentes con condiciones de viento similares, lo que impide efectuar un análisis completamente objetivo con respecto a la precisión del modelo en este sentido.

El espectro direccional graficado corresponde al pico máximo registrado por el modelo el día 161800Z julio 2005, que no es el mismo pico detectado por la boya el día 160500Z julio 2005, pero sí guardan similitud en cuanto a las condiciones de viento (diferencia de 1 nudo entre la boya y CaribWAM-III) para ambos instantes del tiempo, lo que se constituye en un factor de comparación. No obstante, solamente se puede comparar la densidad espectral, teniendo en cuenta que la dirección de propagación del oleaje no es la misma, considerando que para este momento, la posición del huracán es más al oeste, comparado con la posición del sistema ciclónico a las 0600Z

horas del mismo día arrojado por NCEP/NCAR. Con base en lo anterior y teniendo en cuenta que los vientos máximos se encontraron más o menos por marcación 330° como se ilustra en la figura 11, se puede inferir que la dirección de propagación del oleaje es coherente con el comportamiento de los vientos.

Con respecto a la densidad espectral, la variación entre la registrada por la boya y la generada por el modelo CaribWAM-III es de 112 ( $m^2 / Hz$ ) (figura 5) a 85 ( $m^2 / Hz$ ) (figura 12) *in situ* respectivamente, lo que significa una diferencia de 27 ( $m^2 / Hz$ ), que representa aproximadamente 2,5 metros en la altura de la ola. Sin embargo, la disminución puede estar justificada por la dirección de una corriente de vientos que cruza por encima de la boya en dirección NW, atraída por la baja presión del huracán. Estos vientos al encontrarse con el oleaje que viene de la zona de vientos máximos, pueden disipar parte de la energía de las olas.

Con base en estos resultados, pudo determinarse que el modelo CaribWAM-III responde a las condiciones atmosféricas severas generadas por un huracán, produciendo resultados acordes con la realidad, basados en mediciones *in situ* que caracterizaron el área y el periodo de estudio. Sin embargo, se evidencia que la precisión de los resultados está intrínsecamente relacionada con la calidad del campo de vientos con el cual se force el modelo.

### 3. CONCLUSIONES

Mediante el análisis del espectro de energía de oleaje generado por el huracán Emily, se puede determinar la aparición de la influencia del swell generado por un huracán de categoría 4, aproximadamente 11 horas antes de que este pase por un punto dado, que se encuentre dentro de la extrapolación de su trayectoria. El mar de fondo puede presentar olas hasta de 2,7 metros de altura con periodos de 16 segundos.

Bajo la influencia de condiciones atmosféricas severas en el Caribe (huracán Emily 2005), se pueden presentar olas mayores a los siete metros de altura, con periodos de 16 segundos, longitudes de onda de 400 metros, velocidad de fase 25,18 metros por segundo (48,94 nudos) y velocidades de grupo cercanas a los 13 metros por segundo (25,26 nudos), encontrándose los vientos máximos del huracán aproximadamente a 100 millas náuticas de distancia de la estación boya NOAA 42058. La dirección predominante de propagación del oleaje en esta parte del Caribe es norte, oscilando entre NW y NE (330° - 030° respectivamente), dependiendo del movimiento del huracán.

Para los días que comprendieron el periodo de estudio (14, 15, 16 y 17 de julio de 2005), el 50% del oleaje tuvo alturas de un metro aproximadamente, 45% del oleaje presentó alturas entre dos y cuatro metros, y solo un 5% sobrepasó los cuatro metros, alcanzando un pico hasta de 7,3 metros de altura de la ola.

El modelo CaribWAM-III, responde a las condiciones atmosféricas severas, arrojando resultados coherentes al campo de vientos que se empleó para forzar el modelo y evidenciando la importancia de utilizar un campo de vientos que refleje dentro de lo mejor posible, las condiciones atmosféricas reales. Los datos de NCEP/NCAR, muestran similitud en muchas de las características con la dinámica real del huracán, sin embargo, existen diferencias importantes como consecuencia de los errores en la asimilación basada en datos solo de estaciones terrestres, demostrándose que la coherencia tanto espacial como temporalmente, entre el campo de vientos que forza el modelo y las condiciones atmosféricas corrientes, afectan directamente la disposición de los resultados finales [10].

### REFERENCIAS

- [1] Lizcano Omar. Evaluación de los modelos numéricos de tercera generación para el pronóstico del oleaje en Centroamérica y México. 2001. Escuela de Física, Universidad de Costa Rica.
- [2] IFS Documentation Cycle CY28r1. Operational Implementation ECMWF WAVE MODEL, 9 march 2004.
- [3] NDBC (National Oceanic and Atmospheric Administration's-National Data Buoy Center)[online]. Disponible en Internet: <http://www.ndbc.noaa.gov/measdes.shtml>, <<http://www.ndbc.noaa.gov/wndav.shtml>>
- [4] Holthuijsen Leo. Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge. p. 824.
- [5] Losada Miguel y otros. Métodos espectrales de previsión de oleaje. Estudio comparativo. Revista de obras públicas.
- [6] Franklin James. Tropical Cyclone Report Hurricane Emily 11-21 July 2005. National Hurricane Center. 10 march 2006.
- [7] Lonin Serguei. Utilización del modelo NedWAM para el cálculo y pronóstico del oleaje en el mar Caribe. Boletín Científico No. 07, diciembre 1996. ISSN. 01200542. p. 37-45.
- [8] Ortiz Juan y otros. Estudio del oleaje generado por el huracán Joan en la costa Caribe colombiana en 1988, incluyendo la Isla de San Andrés. Revista Colombiana de Física. Julio 2008. Vol. 40, No. 2.

- [9] OMM CE. Informe preliminar del grupo de expertos *Ad Hoc* sobre la base de datos de verificación de modelos de transporte y dispersión de largo alcance. Proyecto Reanálisis NCEP-NCAR (1958-1997). p. 14.
- [10] NOAA. La calidad de las olas: los espectros direccionales y las condiciones locales del viento. 24 abril de 2009.

## ARTÍCULO

## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMO PARA DISPOSITIVOS USV

Fernando Durán Martínez\* Wilbhart Castro Celis\* Juan Contreras Montes\*\*  
lmnando@gmail.com cblackman3@gmail.com epcontrerasj@ieee.org

Fecha de recepción: marzo de 2011, Fecha de aceptación: septiembre de 2011

**Resumen:** Se describe el diseño de un piloto automático, basado en lógica difusa, para el seguimiento de una trayectoria previamente establecida para un Vehículo Autónomo de Superficie, USV, en condiciones de mar cero. El algoritmo de identificación difusa, empleado para generar el piloto automático a partir de datos experimentales de entrada y salida, es entrenado con los datos de operación de un prototipo a escala de un USV clase "X", que es operado por un experto de forma remota, desde una estación en tierra (PC portátil), a través de comunicación en RF. El controlador difuso obtenido tiene funciones de pertenencia triangulares para el antecedente y consecuentes tipo singleton.

**Palabras clave:** Vehículo Autónomo de Superficie (USV), Lógica difusa, Controlador, Navegación autónoma, Identificación de rumbo.

**Abstract:** We describe the design of an autopilot based on fuzzy logic for monitoring pre-determined path for a Unmanned Surface Vehicle, USV on zero sea conditions. The fuzzy identification algorithm, used to generate the autopilot from experimental data input and output, is trained with the operation data of a scale prototype of a class USV "X", which is operated by an expert remotely, from a ground station (laptop) through RF communication. The fuzzy controller obtained has triangular membership functions for the antecedent and consequent singleton type.

**Key words:** Unmanned Surface Vehicle (USV), Fuzzy logic, Controller, Autonomous navigation, Identification course.

\* Estudiante de Ingeniería Naval Especialidad Electrónica, Profesional en Ciencias Navales, Escuela Naval "Almirante Padilla", Colombia.

\*\* Doctor Ciencias Técnicas (mención en control inteligente de procesos) del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría CUJAE en Cuba, Docente y Director Grupo de Investigación en Comunicaciones, Control y Diseño Naval, Escuela Naval "Almirante Padilla", Colombia.

## INTRODUCCIÓN

Los vehículos autónomos han despertado un gran interés a nivel mundial en las últimas dos décadas, a tal punto que actualmente se habla de dispositivos autónomos terrestres, aéreos, submarinos y de superficie. Los vehículos autónomos de superficie, conocidos por las siglas en inglés Unmanned Surface Vehicle (USV), han experimentado un desarrollo importante a nivel mundial gracias a las ventajas que ofrecen en la ejecución de misiones o tareas sensibles, así como la relación costo/beneficio. Los USV's son dispositivos capaces de realizar patrones de navegación, tareas de control de rumbos u operaciones que requieran o involucren la maniobrabilidad de una unidad de superficie.

El desarrollo de sistemas autónomos ha sido motivo de investigación durante décadas, llevando al desarrollo de pilotos automáticos que contribuyan a mejorar la eficiencia en el consumo de combustible y minimizar el desgaste de componentes. Los sistemas de navegación autónomos se ven afectados por variables tales como viento, corrientes y olas, además por características no lineales propias de la dinámica del sistema, lo cual obliga a permanentes ajustes en los parámetros del controlador PID [1].

La metodología empleada para la obtención del controlador difuso se realiza a partir de la adquisición de datos en un prototipo a escala controlado de forma remota, el modelo tiene la capacidad de realizar diferentes tipos de maniobras que combinan patrones de navegación y control de rumbo a velocidad constante en condición de mar cero, los datos obtenidos permitirán la identificación del modelo matemático que se empleará para el diseño del controlador, este procedimiento está dividido en tres fases: en la primera, se presentan los modelos matemáticos no lineales que describen la dinámica en el rumbo del USV; en la segunda, se describe el método de identificación difusa utilizado para la generación del controlador difuso a partir de datos experimentales; y en la tercera, se presenta una aplicación para la obtención del controlador difuso del rumbo de un dispositivo USV.

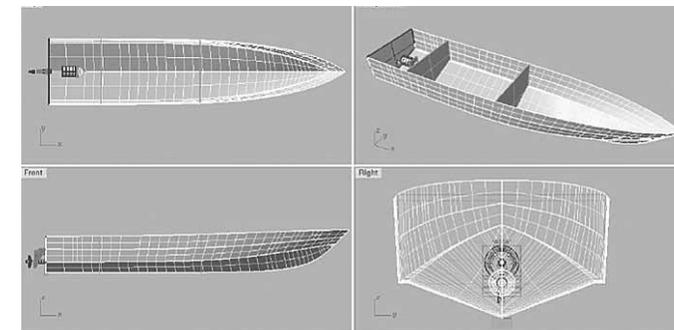
### 1. HARDWARE/SOFTWARE

La plataforma escogida para el diseño del controlador difuso es un prototipo a escala

USV. Esta plataforma es un buque construido en fibra de vidrio, eslora 100 cm, manga 22 cm (figura 1), la composición del prototipo está dividida en dos grupos principales, un grupo a bordo de la plataforma y un grupo de control remoto.

Grupo abordo. Integrado por los componentes de propulsión y gobierno, sensores y comunicación del prototipo como por ejemplo motor, servo, GPS, brújula digital, módulo de comunicación XBee, antenas, etc.

Grupo de control. Integrado por los elementos de vigilancia, seguimiento y control del prototipo como lo son el PC portátil, joystick.



**Figura 1.** Prototipo a escala USV

Los software empleados en el proceso de obtención del controlador para la navegación autónoma son dos, el software Matlab y Labview.

Con el software de Labview se efectúa el monitoreo, adquisición y recolección de datos para la construcción del modelo matemático y con el software de Matlab se identifica el modelo matemático para el diseño del controlador difuso.

La tarjeta de control adquiere y guarda la información necesaria para definir los dos procesos que se evaluarán para definir el modelo matemático. Los sensores primarios que garantizan la navegación de una embarcación, el GPS, la brújula digital y el sistema inercial, suministran datos de posición, rumbo y ángulos en ronza y elevación, así como el *pitch* y *roll*, y velocidad. En el control de ángulo de timón se tiene en cuenta la variación de voltajes en el rango de movimiento del timón.

## 2. SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN

El sistema de identificación de un sistema dinámico generalmente consiste en cuatro pasos:

**Adquisición de datos:** Este primer paso consiste en la adquisición de datos de entrada y salida del sistema. La adquisición de datos no es una tarea trivial y puede ser complicada.

**Caracterización:** El segundo paso define la estructura del sistema, por ejemplo, el tipo y orden de la ecuación diferencial que relaciona la entrada a la salida.

**Identificación/estimación:** En el tercer paso se determinan los valores numéricos de los parámetros estructurales, que minimizan el error entre el sistema identificado y su modelo.

**Verificación:** El último paso consiste en relacionar el sistema de las respuestas del modelo identificado en el tiempo o dominio de la frecuencia. Correlación del análisis y pruebas de validación cruzada que se han empleado para la validación del modelo.

### 2.1 Adquisición de datos

La navegación de un buque es un procedimiento multivariable que involucra variables que describen el movimiento del modelo físico en el plano horizontal como el rumbo, la transversal y longitudinal de la velocidad, la velocidad y el ángulo de timón [2].

Para la construcción del controlador difuso que cumpla con la tarea de navegación autónoma de dispositivos USV en condición de mar cero (0), se tendrán dos procedimientos, en el primero se identificará el modelo dinámico del dispositivo y maneja las siguientes variables (figuras 2 y 3).

#### Variables de entrada

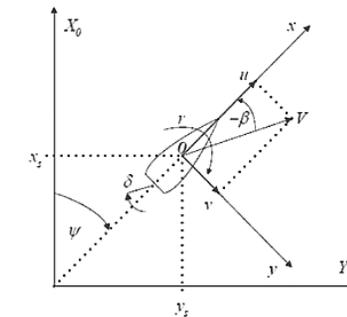
$\Psi$  = Rumbo.

$v$  = Componente transversal de velocidad.

$u$  = Componente longitudinal de velocidad.

$U$  = Velocidad.

$\delta$  = Ángulo de timón.

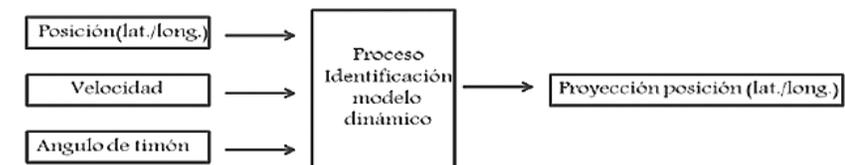


**Figura 2.** Variables modelo dinámico.

Fuente: Witkowska, et al., 2008

#### Variables de salida

$\Psi'$  = Proyección posición (Posición futura en latitud y longitud proyectada).



**Figura 3.** Variables entrada/salida modelo dinámico

El segundo procedimiento con el que se identificará el controlador difuso o borroso manejará las siguientes variables (figura. 4).

#### Variables de entrada

$\Psi'$  = Proyección posición (Posición futura en latitud y longitud proyectada).

$\Psi$  = Posición (Posición anterior en latitud y longitud).

$v$  = Componente transversal de velocidad.

$u$  = Componente longitudinal de velocidad.

$U$  = Velocidad.

$\delta$  = Ángulo de timón.

#### Variables de salida

$\delta'$  = Posición ángulo de timón.

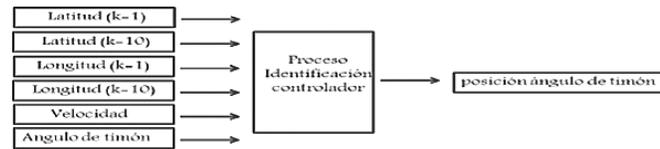


Figura 4. Variables entrada/salida controlador difuso

La variable de salida indica la posición actual del timón y el ángulo de timón necesario para lograr un rumbo o posición deseada.

Definidas las variables de entrada y salida se inicia la recolección de datos a través del entrenamiento a control remoto con operador humano y almacenamiento de los datos con el hardware empleado.

### 3. ALGORITMO IDENTIFICACIÓN BORROSA

El algoritmo para generación de sistemas borrosos emplea operadores tipo promedio ponderado [3]. El usuario solo debe introducir los datos de las variables de entrada y salida. El algoritmo determina los rangos de cada variable, distribuye las funciones de pertenencia en los universos de cada variable de entrada, ubica los consecuentes tipo singleton [4] en el espacio de salida, determina las reglas y ajusta la ubicación de los consecuentes, empleando mínimos cuadrados, para minimizar el error de aproximación. El algoritmo se detiene cuando se ha alcanzado una métrica de error menor a la requerida por el usuario o cuando el número de conjuntos borrosos por variable de entrada es mayor a nueve. La distribución de las funciones de pertenencia en cada universo de entrada se hace de manera uniforme para garantizar que la partición resultante sea suma 1; es decir, la suma de los grados de pertenencia de un dato en una variable de entrada será siempre igual a 1 [5].

Dada una colección de datos experimentales de entrada y salida  $\{x_k^{(i)}, y^{(i)}\}$ , con  $i = 1 \dots N$ ;  $k = 1, \dots, p$ , donde  $x_k^{(i)}$  es el vector de entrada  $p$ -dimensional  $x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_p^{(i)}$  e  $y^{(i)}$  es el vector unidimensional de salida, los siguientes son los pasos para la obtención del algoritmo de identificación difusa:

1. Organización del conjunto de  $p$  variables de entrada y 1 variable de salida, cada una con  $N$  de datos, donde son vectores de entrada, y son escalares de salida.

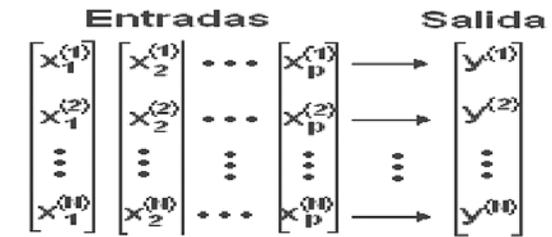


Figura 5. Organización conjunto de variables.

Fuente: "Generación de Pilotos Automáticos Difusos para Maniobra de Buques". II Congreso Internacional de Ingeniería y Diseño Naval. Ene. 2011

2. Determinación de los rangos de los universos de cada variable de acuerdo a los valores máximos y mínimos de los datos asociados  $[x_i^-, x_i^+]$ ,  $[y^-, y^+]$ .

3. Distribución de las funciones de pertenencia triangulares [6]. Inicialmente se hacen coincidir los vértices con valor de pertenencia uno de las funciones de pertenencia que cubren el inicio y final del universo de cada variable de entrada con sus valores mínimo y máximo respectivamente, como se aprecia en la figura 6.

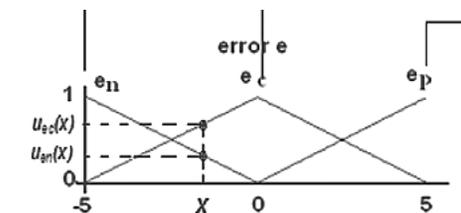
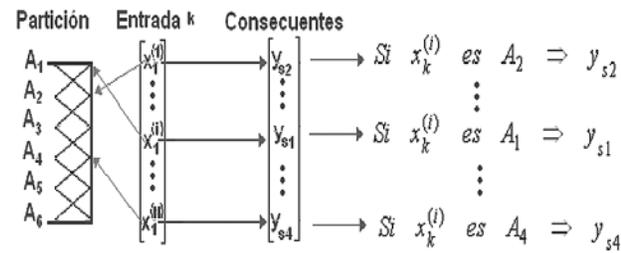


Figura 6. Distribución de funciones de pertenencia

Fuente: "Generación de Pilotos Automáticos Difusos para Maniobra de Buques". II Congreso Internacional de Ingeniería y Diseño Naval. Ene. 2011

4. Determinación de reglas, cada conjunto de cada variable de entrada tiene 1 consecuente tipo solitario asociado, habrá un número de reglas igual al número de variables de entrada ( $k$ ) multiplicado por el número de conjuntos de la partición ( $n$ ); es decir, será igual a  $k \times n$ , lo cual es inferior al número de reglas de un sistema borroso tradicional ( $n^k$ ).



**Figura 7. Determinación de reglas**  
 Fuente: "Generación de Pilotos Automáticos Difusos para Maniobra de Buques". II Congreso Internacional de Ingeniería y Diseño Naval. Ene. 2011

5. Validación del modelo, o cálculo de la aproximación, empleando el método de inferencia descrito por

$$f(x^{(i)}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^L \bar{y}^j m_j(x^{(i)}) \quad (1)$$

donde  $\bar{y}^j$  es el valor del solitario correspondiente a la regla  $j$ .  
 Puede ser expresada de la forma

$$f(x^{(i)}) = \sum_{j=1}^L \bar{y}^j w_j(x^{(i)}) \quad (2)$$

donde

$$w_j(x^{(i)}) = \frac{m_j(x^{(i)})}{\sum_{j=1}^L m_j(x^{(i)})} = w_j^i \quad (3)$$

6. La salida del modelo borroso se puede, entonces, calcular en forma matricial mediante

$$Y = W\theta + E$$

$$\begin{bmatrix} y^1 \\ y^2 \\ \vdots \\ y^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1^1 & w_2^1 & \dots & w_L^1 \\ w_1^2 & w_2^2 & \dots & w_L^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1^n & w_2^n & \dots & w_L^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta^1 \\ \theta^2 \\ \vdots \\ \theta^L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix}$$

Donde  $E$  es el error de aproximación,  $\theta$  es el vector de consecuentes y  $Y$  es el vector de salida del modelo.

7. Ajuste del vector de consecuentes, empleando mínimos cuadrados

$$E^2 = (Y - W\theta)^2 = (Y^2 - 2W^T Y \theta + (W\theta)^2); \quad \frac{\partial E^2}{\partial \theta} = 0 = -2W^T Y + 2W^T W \theta;$$

$$\theta = \frac{W^T Y}{W^T W} = (W^T W)^{-1} W^T Y$$

Esta solución es válida si  $(W^T W)$  es no singular, lo que quiere decir que todas las reglas deben recibir suficiente excitación (excitación persistente) durante el entrenamiento. En la práctica esto no es siempre posible, por lo que es recomendable recurrir a la aplicación de mínimos cuadrados recursivos, buscando garantizar que la adaptación solo afectará las reglas excitadas [7].

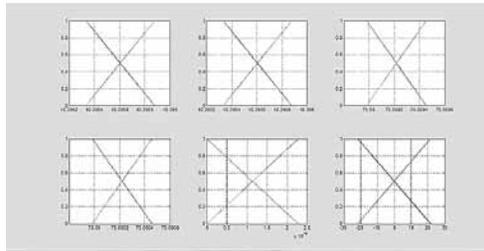
8. Determinar si la medida del error cuadrático medio MSE es menor a una medida previamente establecida. De otra manera, incrementar en 1 el número  $n$  de conjuntos de la variable de entrada y volver al paso 3.

Es posible lograr una mayor aproximación ("ajuste fino") si al finalizar el proceso mencionado se aplica el método del gradiente descendente para ajustar solamente la ubicación de los valores modales de los conjuntos triangulares del antecedente, conservando la partición suma 1 y, por lo tanto, la interpretabilidad del sistema.

#### 4. GENERACIÓN CONTROLADOR BORROSO

Para la generación del controlador difuso o borroso se realizan pruebas a control remoto a través de RF con el fin de obtener datos que permitan establecer el modelo dinámico del dispositivo y aplicar el algoritmo de identificación difusa que permita realizar el entrenamiento del sistema difuso.

Se siguen los pasos explicados anteriormente estableciendo las variables de entrada y salida como se observó en las figuras 3 y 4, se establecen los máximos y mínimos para cada variable, con los datos obtenidos, se procede a montar los universos y se establecen dos funciones de pertenencia triangulares por cada variable de entrada; con apoyo del software Matlab se grafican los universos con sus correspondientes funciones de transferencia y máximos y mínimos.



**Figura 8.** Gráfica funciones de transferencia.  
Fuente: propia

Para completar la estructura del controlador difuso por el método de mínimos cuadrados se calculan los consecuentes Singleton, se define un consecuente Singleton por cada función de pertenencia obteniendo 12 consecuentes Singleton, y de igual manera se establecen el mismo número de reglas 12.

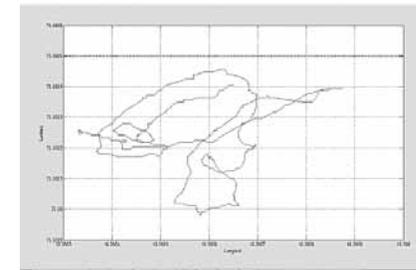
0.3260
-0.1687
0.1933
-0.0360
0.1573
0.1573
0.1573
0.1573
0.0159
0.1414
-21.0497
21.2070

**Tabla 1.** Consecuentes Singleton obtenidos

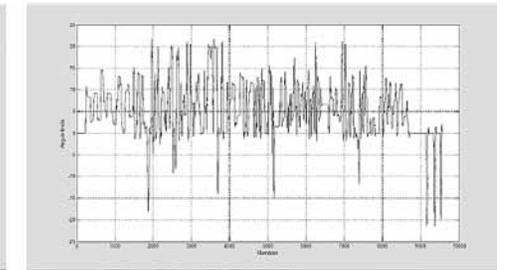
Definida la estructura del controlador borroso se procede a realizar las operaciones matriciales con el fin de obtener el algoritmo de identificación difusa con el cual se entrenará el controlador difuso que permitirá la operación de navegación autónoma del prototipo USV a escala, que para el caso del controlador de navegación autónoma del USV corresponde al valor presente o actual del timón y el ángulo de timón necesario para alcanzar una posición en latitud y longitud deseada.

### 5. RESULTADOS

En la figura 9, se observa un patrón de navegación realizado con el dispositivo USV, este patrón se efectuó de manera remota con un operador humano, para conocer el modelo dinámico del dispositivo, que permita correlacionar la señal del comportamiento dinámico del timón en el entrenamiento y el sugerido con el controlador.



**Figura 9.** Gráfica trayectoria USV



**Figura 10.** Ángulo timón Controlador Vs. Entrenamiento

En la figura 10, se hace una comparación entre la señal del comportamiento dinámico del timón obtenido en el entrenamiento a control remoto con un operador humano (línea gris continua) y la acción del timón sugerida por el control difuso, este comportamiento dinámico se deriva del cumplimiento de la trayectoria o patrón de navegación realizada por el dispositivo USV que se observaba en la figura 9.

Como se observa en la figura 10, la señal de la línea continua tiene un comportamiento similar a la señal punteada, esto se debe a que el error cuadrático medio obtenido con el controlador difuso es de 0,0478.

### 6. CONCLUSIONES

Se presenta un nuevo método para la generación de pilotos automáticos de buques. El sistema de navegación autónomo generado es un controlador difuso con funciones de pertenencia triangulares, normales y con solapamiento en 0,5, para las variables de entrada. Las funciones de pertenencia de los consecuentes son tipo Singleton y se obtienen empleando el método de mínimos cuadrados recursivos. El método no requiere del empleo de otras técnicas de inteligencia artificial.

Los resultados revelan una alta precisión reflejada en un error medio cuadrático de 0,0478 entre la señal de timón obtenida en el entrenamiento con un operador humano y la señal de timón propuesta por el controlador borroso.

Este método de generación de pilotos automáticos posee la capacidad de capturar la dinámica de maniobra del buque y lo implanta en el piloto automático difuso generado de manera muy similar a la obtenida en entrenamientos con operador humano. Además, el sistema es fácilmente adaptable a nuevos estados del buque mediante el ajuste de los consecuentes Singleton.

El controlador difuso propuesto permite, el empleo mediante un solo modelo, abarcar todo el comportamiento no lineal de un buque, en todas las gamas de operación, y no el empleo de varios modelos lineales que trabajan en rangos preestablecidos de operación que es lo que normalmente se utiliza en los pilotos automáticos o sistemas de navegación autónomos.

Este método de generación de controlador difuso permite evitar la dependencia tecnológica y el incremento de costos por pagos de licencias, gracias a la fácil implementación solo con un entrenamiento adecuado en todos los rangos o parámetros de operación de la modelación dinámica de un buque.

## REFERENCIAS

- [1] Witkowska A, Smierzchalski R. "Nonlinear Bacsteeping Ship Course Controller", R&RATA, Jun. 2008. vol. 1, No. 2, p. 147-155.
- [2] Contreras J, Durán F, Castro A. "Generación de Pilotos Automáticos Difusos para Maniobra de Buques". II Congreso Internacional de Ingeniería y Diseño Naval. Ene. 2011.
- [3] Velasco F, Revestido E, López E, Moyano E, Nanclares J. "Identificación de Modelos de Maniobra de un modelo a escala de un Fast-Ferry Autónomo". 2007.
- [4] Babuska R. 2001. Fuzzy and Neural Control. Disc Course Lecture Notes. Delft University of Technology. Delft, the Netherlands.
- [5] Chae Y, Oh K, Lee W. and Kang G. "Transformation of TSK fuzzy system into fuzzy system with singleton consequents and its application". IEEE International Conference on Fuzzy Systems. IEEE Computational Intelligence Society, 1999. Vol. 2. p. 969-973.
- [6] Contreras J, Misa R, Murillo L, Paz J, Sarabia J. Obtención de Modelos Borrosos Interpretables de Procesos Dinámicos. RIAI: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 2007. Vol. 5, No. 3, p. 70-77.
- [7] Contreras J, Misa R, Murillo L, Paz J, Sarabia J. Identificación Borrosa, Eficiente Basada en Error de Inferencia. Revista Tecnologías Avanzadas. 2007. Vol. 1, No. 9, p. 6.
- [8] Contreras Juan. Identificación y Control de Procesos Industriales Utilizando Modelos Difusos Interpretables. Tesis Doctoral. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría - CUJAE. 2008.
- [9] Pedriycz W. Why Triangular Membership Functions?, IEEE Trans. Fuzzy Sets and System, 1994. Vol. 64, p. 21-30.
- [10] Contreras, J, Misa R, Paz J. Building Interpretable Fuzzy Systems: A New Approach to Fuzzy Modeling. En Proceedings of Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference CERMA 2006. IEEE Computer Society. p. 172-178.
- [11] Espinosa J, Vandewalle J. "Constructing fuzzy models with linguistic integrity form numerical data-afreli algorithm", IEEE Trans. Fuzzy Systems, 2000. Vol. 8, p. 591-600.
- [12] Espinosa J, Vandewalle J, Wertz V. Fuzzy Logic, Identification and Predictive Control. Springer. Estados Unidos. 2005.

## CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE Y LAS PLAYAS DE CAYO SERRANILLA

Jesús Andrés Zambrano Pinzón\*  
jzambranop@enap.edu.co

Carlos Alberto Andrade Amaya\*\*  
candrade@costa.net.co

Fecha de recepción: diciembre de 2010, Fecha de aceptación: septiembre de 2011

**Resumen:** Para efectos de analizar el oleaje y entendiendo que este es un factor determinante en la modelación costera y dinámica del litoral se dividió el estudio del mismo en dos fases. La primera consistió en la aplicación del módulo OLAS sobre el Cayo de Serranilla, y la segunda en el análisis espectral del oleaje *in situ* obtenido a partir de los datos arrojados por sensores de presión ubicados en sectores cercanos a la playa. Se pudo conocer del Cayo de Serranilla qué sector recibe la mayor energía por acción del oleaje, así como también el transporte potencial y se obtuvo una caracterización de las playas concluyendo que son predominantemente intermedias.

**Palabras clave:** Oleaje, OLAS, Análisis espectral.

**Abstract:** For purposes of analyzing and understanding the waves that this is a decisive factor in shaping coastal and dynamic of coastline the study was divided into two phases. The first was the implementation of the module OLAS on the Serranilla cay, and the second the spectral wave analysis from the data obtained from pressure sensors located in areas close to the beach. The coastal areas in which the waves are more energetic was identified and the potential sediment transport was calculated. The beaches were classified as predominantly intermediate.

**Key words:** Waves, OLAS, Spectral analysis.

\* Teniente de Navío de la Armada República de Colombia, Oficial alumno del pregrado en Oceanografía Física de la Escuela Naval "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia.

\*\* Capitán de Navío (RA) de la Armada República de Colombia, Oceanógrafo Físico de la Escuela Naval "Almirante Padilla", Ph.D. en Oceanografía del School of Ocean Sciences University of Wales. Investigador del Grupo de Investigación en Oceanología de la Facultad de Oceanografía de la Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia.

## INTRODUCCIÓN

El oleaje es una consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar; supuesta una constante solar del orden de  $375 \text{ W/m}^2$ , aproximadamente  $1 \text{ W/m}^2$  se transmite al oleaje, que actúa como un acumulador de energía, por cuanto al tiempo que la recibe, la transporta de un lugar a otro, y la almacena; la intensidad del oleaje depende de la intensidad del viento, de su duración y de la longitud (*fetch*) sobre la cual este transmite energía a la ola [1].

El módulo para determinar el régimen de oleaje en las aguas jurisdiccionales de Colombia, OLAS, desarrollado por el Centro Control Contaminación del Pacífico, CCCP, con apoyo y asesoría del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, GIOC, de la Universidad de Cantabria de España, es uno de los programas denominados de pre-proceso dentro del Sistema de Modelado Integral para Zonas Costeras, que permite obtener los regímenes medios de oleaje en cualquier punto de la costa colombiana, tanto sobre el mar Caribe como en el océano Pacífico, OLAS aporta información sobre la dirección del flujo medio de energía, la altura de ola Hs. 12, el transporte potencial de sedimentos y los estados morfodinámicos del tramo de costa. Para el caso del análisis espectral del oleaje se tomaron los datos de sensores de presión ubicados en sectores *offshore*, seleccionados del Cayo considerando la energía del oleaje. Estos sensores fueron fondeados a una profundidad entre 1,5 y 2 metros por un periodo de seis horas con el propósito de conocer el estado del oleaje vigente para el tiempo de recolección de los datos cada segundo.

## 1. METODOLOGÍA

Se seleccionaron las coordenadas más aproximadas a las obtenidas del Cayo de Serranilla. Para ese efecto se tomó N  $15^{\circ} 47' 44''$  W  $079^{\circ} 50' 49''$  siendo correspondientes a un punto materializado cuyas coordenadas fueron obtenidas por métodos geodésicos (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, 1999), se selecciona la orientación media del tramo de costa a analizar, sin limitar el ángulo de oleaje incidente con la intención de aprovechar los resultados que en razón de estado morfodinámico de cada playa arroja [2], se fijó una profundidad objetivo de 10 metros, tamaño medio de grano (D50) obtenido a partir de las granulometrías realizadas a muestras de arena recogidas en cada una de las playas, y por último, la introducción de una pendiente

media del perfil de playa valor obtenido de los perfiles levantados para cada playa.

Se efectuó una estimación del transporte potencial, el cual es obtenido mediante la formulación más habitual (CERC) [3] empleando los parámetros de ajuste propuestos por Schoones y Theron (1996, 1999). Se calcula el transporte potencial bruto (transporte total sin atender a su sentido a lo largo de la línea de costa) y el neto (realizando el balance del transporte por sentidos).

Se pudo obtener el estado morfodinámico de las playas para un instante determinado como una función de las características de su sedimento, de las condiciones del oleaje, y del estado previo de la playa [4]. Para definir la influencia del oleaje y del tipo del sedimento en el estado de playa, el módulo OLAS emplea el parámetro adimensional de velocidad de caída del grano [5].

Para el análisis espectral del oleaje se tomaron los datos equipos Keller DCX-16, los cuales funcionan como un sensor de presión absoluta, estos sensores fueron fondeados a una profundidad entre 1,5 y 2 metros por un periodo de seis horas con el propósito de conocer el estado del oleaje vigente para el tiempo de recolección. Una vez recolectados los datos estos son descargados a través del software con que cuenta el equipo, el cual permite visualizarlos y exportarlos en formato \*.dat y/o \*.txt una vez los datos fueron filtrados se cargaron en el programa MATLAB® en donde se elaboró una rutina usada para retirar la media y la tendencia polinómica y se usó la Transformada rápida de Fourier para hacer el análisis en frecuencia de los valores normalizados y por último graficar el Periodograma.

## 2. RESULTADOS

Inicialmente se hizo una clasificación de las playas por sectores (figura 1) teniendo en cuenta la forma de afectación del oleaje sobre cada una de estas.

### 2.1 Caracterización del oleaje

2.1.1 Playa Norte. El oleaje característico para esta playa predomina del NE-E (N68E) con una probabilidad de ocurrencia de 37,8%, seguido del oleaje NE (N45E) con un 25,8%, con un 17,6% de oleajes fuera del rango o calmas (figura 2). Así mismo observamos cuáles son las condiciones de Hs. 50, Hs. 01, T. 50 y T. 01 de los estados de mar del año respectivamente.

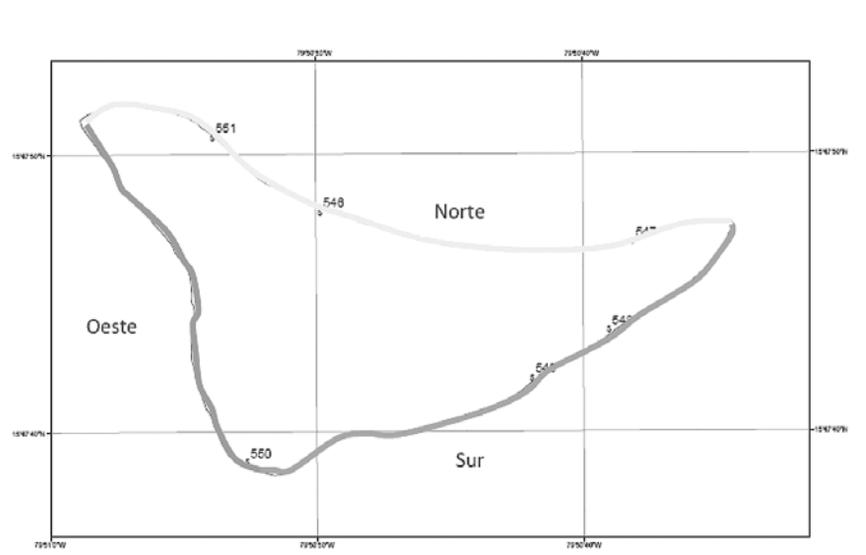


Figura 1. Clasificación de la playa por sectores. Clasificación por sectores, los números ubicados sobre cada playa indican los puntos donde se tomaron muestras de arena para elaboración de granulometría

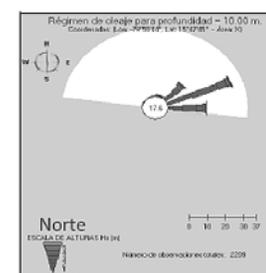
2.1.2 Playa Sur. La dirección del oleaje característico para esta playa es del E-SE (S68E) con una probabilidad de ocurrencia de 32,8%, seguido del oleaje E (90) con un 25,8%, con un 23,4% de oleajes fuera del rango o calmas. En la tabla 1 observamos las condiciones de Hs. 50, Hs. 01, T. 50 y T. 01.

2.1.3 Playa Oeste. En los resultados de esta playa vale la pena resaltar que el número de observaciones a partir de las cuales se llegaron a los resultados comparados con las dos anteriores playas es mucho menor, esto es un indicador de que estos pueden tener un margen de error mayor. Los valores arrojados para este caso son direcciones de oleaje donde predominan en un 96% los valores que se encuentran fuera de los rangos o calmas para la profundidad objetivo, sin embargo para el caso del análisis tomamos los rangos en donde predominan las direcciones NW (N45W) con una probabilidad de ocurrencia del 1,1% y W-NW (N68W) con una probabilidad del 0,6%.

2.1.4 Condiciones energéticas. Aprovechando las condiciones de  $Hs_{50}$ ,  $Hs_{01}$ ,  $T_{50}$  y  $T_{01}$  arrojadas por el módulo OLAS, para la profundidad de 10 metros se calcularon los valores energéticos del oleaje incidente (tabla 1) en las direcciones que presentan probabilidad de ocurrencia superior al 15% para las playas norte y sur, mientras que

para la playa oeste se usaron los datos de las direcciones que indicaron los dos más altos valores de probabilidad.

Del cálculo realizado se obtuvo que la playa en la que mayor energía de la ola es recibida es la playa sur al ser incidida por oleajes S68E, estos valores con alturas de oleaje superados solamente el 10% de las veces, mientras que en la playa oeste los valores de energía del oleaje son mucho menores. Para condiciones normales se obtuvo que la que recibe más energía por efecto del oleaje es la playa norte, esto debido principalmente a la forma del cayo y a la dirección del oleaje incidente.



Dirección	Hs. 50 (m)	T.50 (s)	Hs. 01 (m)	T.01 (s)
NE (N45E)	1.5	9	3.0	13
NE-E (N68E)	1.3	7	2.4	9



Dirección	Hs. 50 (m)	T.50 (s)	Hs. 01 (m)	T.01 (s)
E (90)	1.3	6	2.7	9
E-SE (S68E)	1.5	9	3.2	13



Dirección	Hs. 50 (m)	T.50 (s)	Hs. 01 (m)	T.01 (s)
NW (N45W)	1.1	7	1.9	9
NW-N (N23W)	1.0	5	1.7	7

Figura 2. Régimen de oleaje por playas profundidad objetivo. Direcciones predominantes del oleaje en las playas arrojado por el módulo OLAS. Dirección de la playa dada por la semicircunferencia blanca, alturas significantes de acuerdo a los tonos de gris; el valor en el círculo blanco nos indica la probabilidad de oleajes fuera del rango o calmas

TABLA I  
CONDICIONES DE OLEAJE

PLAYA	DIR.	PROB	H	T (m)	f (seg)	d (Hz)	d/Lo (m)	Cg (m/seg)	Co (m/seg)	Lo (m)	L (m)	Ê (Julios)
NORTE	N45E	50%	1,5	9	0,11	10	0,08	12,04	14,04	126,34	85,69	2830,67
		1%	3	13	0,08	10	0,04	9,90	20,28	263,59	128,69	11322,68
	N68E	50%	1,3	7	0,14	10	0,13	8,47	10,92	76,43	62,85	2126,15
		1%	2,4	9	0,11	10	0,08	12,04	14,04	126,34	85,69	7246,51
SUR	90	50%	1,3	6	0,17	10	0,18	6,62	9,36	56,15	50,45	2126,15
		1%	2,7	9	0,11	10	0,08	12,04	14,04	126,34	85,69	9171,37
	S68E	50%	1,5	9	0,11	10	0,08	12,04	14,04	126,34	85,69	2830,67
		1%	3,2	13	0,08	10	0,04	9,90	20,28	263,59	128,69	12882,69
OESTE	N68W	50%	1,1	8	0,13	10	0,10	10,28	12,48	99,82	74,54	1522,27
		1%	1,6	9	0,11	10	0,08	12,04	14,04	126,34	85,69	3220,67
	N45W	50%	0,8	5	0,20	10	0,26	4,81	7,80	38,99	37,47	805,17
		1%	1,8	8	0,13	10	0,10	10,28	12,48	99,82	74,54	4076,16

## 2.2 Análisis espectral

Este análisis se obtiene a partir del procesamiento de los datos de presión (figura 3) que se midieron por un lapso de seis horas; esta relativamente corta duración de la toma de datos se debió a la disponibilidad de tiempo en el Cayo de Serranilla. Teniendo en cuenta lo anterior se estableció que dentro de este margen de tiempo nos interesaría conocer cómo era el oleaje que se pudiera reproducir para ese periodo de tiempo de observación.

Se pudo observar del análisis de los periodogramas (figura 4) que predominan las ondas de gravedad principalmente dada la concentración de los periodos en el rango hasta los 20 segundos, en la playa norte con periodos de pico de 6,7 seg y la playa sur de 7,7 seg, este espectro de ondas es particularmente generado por el viento y se caracterizan por ser las más energéticas, por lo tanto, su efecto sobre los procesos costeros es fundamental.

De esa misma forma se encontró que se manifiestan ondas infragravatorias, las cuales se caracterizan por tener un periodo entre 60 segundos y 3 minutos, aproximadamente, con una altura del orden de  $10^{-1}$  m, rara vez del orden del metro. Si bien en mar abierto las ondas largas carecen de relevancia, estas ondas cobran importancia en

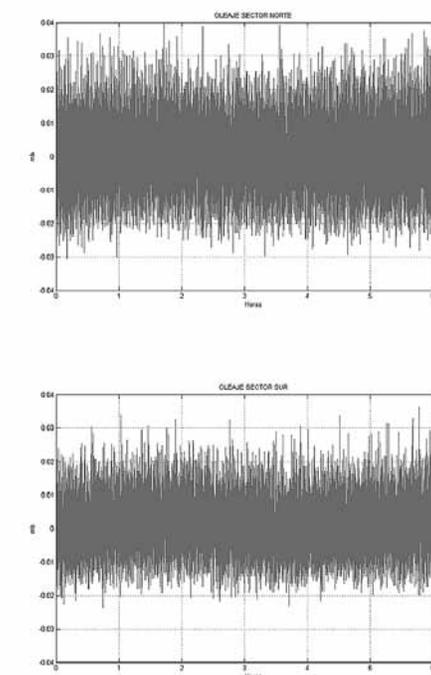
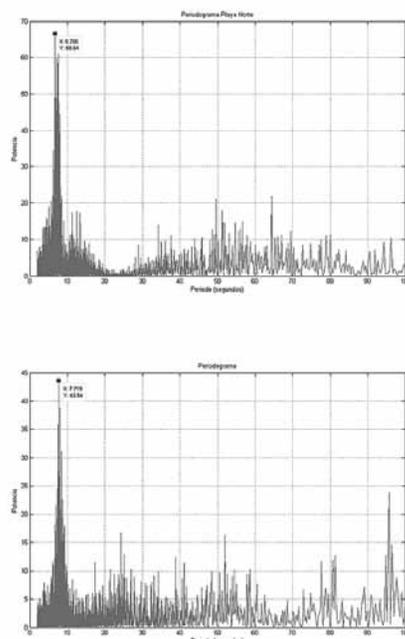


Figura 3. Series de oleaje. Registro de presión reflejados en la playa norte y playa sur, una vez sustraída la marea y el nivel medio

zonas costeras donde su amplitud aumenta debido a la influencia del fondo y de los contornos [6]. Para las ondas largas encontramos periodos de pico para los sectores norte y sur de 65 seg y 95 seg respectivamente.

El origen de estas oscilaciones se da en la modulación del oleaje de viento en paquetes de olas grandes y olas pequeñas producidas por la propagación del mismo en la plataforma continental. Toma importancia en este estudio dado que en las playas la rotura del oleaje libera ondas largas atrapadas en grupos y la suave pendiente del talud amplifica la magnitud de estas, llegando a superar el metro en condiciones de temporal [7].

Durante el periodo de medición con sensor de presión de fondo las principales ondas afectantes son las de tipo gravitatoria e infragravatorias presentando periodos de pico más altos en el sector sur, principalmente ocasionado por la dirección del oleaje predominante.



**Figura 4.** Periodograma de series de oleaje de zona norte (superior) y zona sur (inferior) obtenidos a través del análisis de Fourier; observamos que se manifiestan con más energía las olas de gravedad (principal fuerza generadora viento)

### 3. CONCLUSIONES

Se encontró que durante el periodo de medición con sensor de presión de fondo las principales ondas afectantes son las de tipo gravitatoria e infragravitatorias.

La playa que recibe mayor energía es la playa sur, seguida de la norte. El oleaje característico para la playa norte predomina del NE-E (N68E) para la playa sur es del E-SE (S68E) y en la oeste el número de observaciones a partir de las cuales se llegaron a los resultados comparados con las dos anteriores playas es mucho menor; con relación al parámetro adimensional de caída del grano ambas son playas intermedias, valiendo la pena resaltar que la playa norte tiende a ser disipativa por el gradiente de su perfil indicándonos que el oleaje pierde energía a mayor distancia de la costa, mientras que la playa oeste se caracteriza por ser de tipo reflejante recibiendo el efecto del oleaje más cerca de la línea de costa.

Vale la pena aclarar que existe un algoritmo desarrollado para corregir los valores de la altura significativa y periodo del oleaje, se conoce de su aplicación pero para el caso de esta investigación no fue utilizado a razón de la rigidez del programa Olas.

El mayor transporte potencial de sedimentos se presenta en la playa sur, seguido de la playa norte, y la oeste. Únicamente en el caso de la playa oeste se presenta un cambio en la dirección del transporte de sedimentos entre los meses de abril a junio y de julio a septiembre debido posiblemente a la baja intensidad de los vientos que para esta época predominan, mientras que para las playas norte y sur la dirección del transporte de sedimentos es siempre la misma.

### REFERENCIAS

- [1] Medina Villaverde, J. M. (2009). Apuntes de Oleaje e Ingeniería de Costas. Madrid: Universidad Europea de Madrid.
- [2] Dirección General Marítima (s.f.). Manual de Operación OLAS. Régimen de Oleaje para las Aguas Jurisdiccionales Colombianas. Bogotá D.C. DIMAR.
- [3] Coastal Engineering Research Center. Engineering and Design - Coastal Engineering Manual, Parte III 1998. (Capítulo 2: Longshore Sediment Transport, 3: Cross-shore Sediment Transport Processes); Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers (Nº EC 1110-2-292).
- [4] Vidal César. Modelos de morfodinámica de playas. Ingeniería del agua, 1995. Vol. 2, 2, p. 55-74.
- [5] Dean R. Euristic models of sand transport in the surf zone. Engineering dynamics in the surf zone, 1973. p. 208-214.
- [6] Díaz Hernández G. Análisis de resonancia portuaria: generación, transitoriedad, no linealidad y acoplamiento geométrico. 2006. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria. Cadiz.
- [7] Medina Raúl y Méndez Fernando. Inundación costera originada por la dinámica marina. G.I.O.C. Universidad de Cantabria. 2006. Cádiz, En: IT No. 74. p. 70.

## ANÁLISIS DEL EMPLEO DEL TIMÓN PARA LA ESTABILIZACIÓN DE UN MODELO DE BUQUE PESQUERO

José Nicolás Toledo Ortiz\*      Guillermo Alexander Lozano Castrillón\*\*  
jonitor2@gmail.com                      guill045@hotmail.com

Fecha de recepción: marzo de 2011, Fecha de aceptación: septiembre de 2011

**Resumen:** En este documento se describe el diseño y construcción del prototipo para el control de la estabilización de un modelo de buque pesquero por acción del timón. Este sistema conformado por un conjunto de elementos mecánicos, instrumentación electrónica y hardware de monitoreo y control, que junto con la programación de software especializado permite verificar la incidencia presentada por el gobierno del buque frente al casco del mismo, es decir, a toda la unidad. Se analiza la posibilidad de controlar la estabilidad de un modelo de buque pesquero mediante la acción del timón.

**Palabras clave:** Casco, Modelo de buque a escala, Incidencia del timón, Estabilidad, Ángulo de escora y Sensores.

**Abstract:** This paper describes the design and construction of the prototype for the stabilization control of a fishing vessel model for rudder stock. This system consists of a mechanical set, electronic instrumentation, monitoring and control hardware, in which together with the programming using specialized software to verify the impact made by the steering against the hull of the self-ship, it mean to the whole unit. We analyze the possibility of controlling the stability of a vessel model with rudder stock.

**Keywords:** Hull Model, Scale model ship, Rudder effect, Stability, Angle of heel, Sensors.

---

\* Teniente de Fragata de la Armada Nacional, Profesional en Ciencias Navales, Especialista en Derecho Marítimo Internacional de la Universidad de Comillas de España, Alumno del programa Curso de Complementación Profesional en la Especialidad Electrónica, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla".

\*\* Teniente de Fragata de la Armada Nacional, Profesional en Ciencias Navales, Alumno del programa Curso de Complementación Profesional en la Especialidad Electrónica., Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla".

## INTRODUCCIÓN

La *estabilización de buques por timón*, consiste en la corrección en tiempo real del ángulo de escora que permanentemente recibe una unidad a flote durante su navegación y desestabiliza su eje X, respecto al horizonte. Con esta corrección el buque podrá navegar de manera estable sin perder el rumbo establecido por el operador. Es decir garantizará en un porcentaje aceptable la estabilidad del mismo en su desplazamiento.

En el estudio de estabilización de buques existen varios artículos, los cuales plantean diferentes alternativas para lograrlo [2] [4] [5].

El tratar de generar fuerzas equivalentes por acción del timón para anular las fuerzas que afectan la estabilidad de la unidad a flote, requiere de un sistema automático, el cual sea capaz de producir correcciones en tiempo real, tiempo necesario para que no se materialice la escora en el buque a escala.

## 1. SELECCIÓN E INTEGRACIÓN DE SENSORES

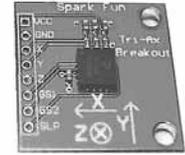
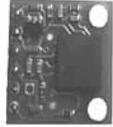
Primero es importante mostrar el casco a escala utilizado en la presente investigación, este casco es un modelo ya existente en los laboratorios de control automático de la Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”. Este es un modelo a escala tipo patrullera de 62 x 23 x 18 (cm), realizado en fibra de vidrio.

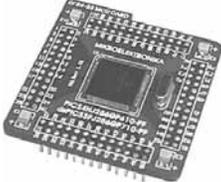


**Figura 1.** Imagen casco vista lateral

Posterior a esta mención se llevará la atención hacia los componentes electrónicos, es decir, el sistema en sí de control de estabilidad, el cual está integrado por sensores y elementos pasivos que permiten el funcionamiento adecuado y permanente. A continuación se hace una breve descripción de los sensores y equipos principales utilizados en esta investigación experimental, así:

TABLA 1  
SENSORES Y EQUIPOS PRINCIPALES EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

Nombre Elemento		Descripción del funcionamiento
Acelerómetro MMA7260Q		Este elemento mide los ángulos de escora en los ejes X, Y y la ubicación en Z; pero para esta investigación específica, solo se trabajará con el eje X.
Brújula CMPS03		Este sensor detecta la dirección en donde se encuentra el norte magnético de la tierra.
Control Maxfire Blaze 2		Es un modelo comercial, cuya principal función es la de transmitir las órdenes de dirección del rumbo al buque a escala.
Giroscopio Pololu gyr01a ©2008		Este elemento realiza la medida del ángulo de giro del buque modelo, es decir, su rotación respecto al eje Z.
Giroscopio Pololu©2009 gyr02b 0j1789		Cumple con funciones similares a las del acelerómetro, es decir, sirve para calcular el ángulo de giro sobre los ejes X y Z; donde el eje X es el ángulo de escora y el eje Z es la rotación respecto al mismo eje en el buque a escala.
GPS pg 32		Este elemento de posición global satelital se utiliza principalmente para obtener el valor de la velocidad del buque a escala durante todo su desplazamiento.

<p>Regulador de Tensión pt78h205s</p>		<p>Dado que existen sensores y elementos con alimentación específica de cinco voltios, se implementó este dispositivo con el fin de garantizar el suministro continuo de este voltaje con una corriente de 2 amperios, además de mantener una temperatura de operación normal (no se recalienta).</p>
<p>Tarjeta Inalámbrica XBeeProS1</p>		<p>Sirve para la transmisión de datos del buque modelo al sistema de control de manera inalámbrica. Ideal para el tránsito de información en doble sentido, sin la necesidad de medios cableados.</p>
<p>Microcontrolador dsPIC30f6014a</p>		<p>Este es un procesador de alto rendimiento, se programó a trabajar a 80 Mhz, velocidad suficiente para la toma de datos por parte de los sensores antes mencionados, posterior procesamiento y transmisión de las correcciones al servomotor del buque a escala.</p>
<p>Motor DC para propulsión 8,4V Power 600/24 robbe No. 4471</p>		<p>Es un elemento eléctrico de corriente directa, el cual proporcionará la propulsión constante durante la evaluación del desempeño del buque a escala en mención.</p>
<p>Servomotor CS-61</p>		<p>Este elemento es el responsable de efectuar los movimientos de manera exacta y equitativa a ambos timones, siendo gobernado por el microcontrolador.</p>

Los anteriores sensores fueron agregados y conjugados en una tarjeta para establecer la parte sensorica del sistema, gobernados por el microcontrolador al cual estando dentro del casco le llegarán las variables de entrada (mediciones de los sensores) y este entregará las soluciones al servomotor para mantener la estabilización.

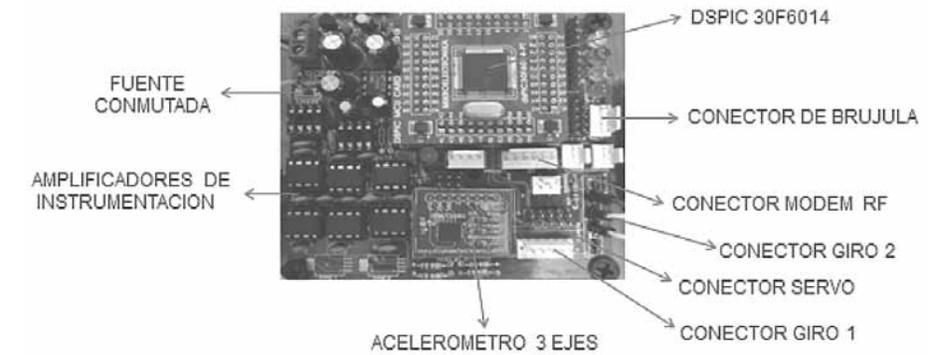


Figura 2. Tarjeta implementada en el modelo a escala

Esta tarjeta fue instalada dentro del casco del buque y alimentada por medio de una batería de 12 voltios de corriente directa, quedando una unidad autónoma y lista para las pruebas de navegación.

Es importante resaltar que esta investigación experimental está basada en un modelo de casco ya existente, condición que hace en un porcentaje considerable la afectación del ángulo de escora por los movimientos del ángulo del servomotor.

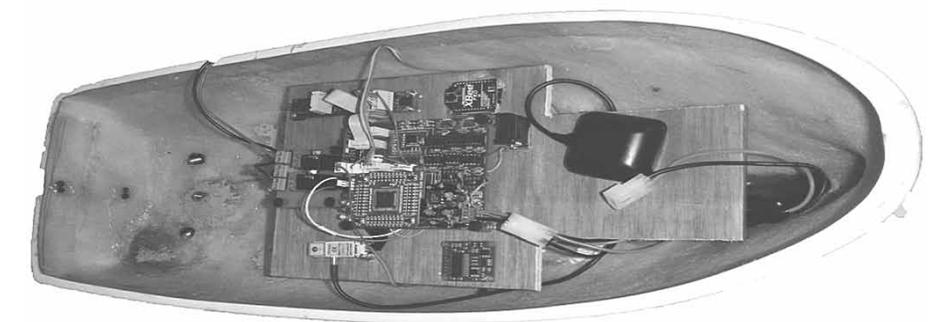


Figura 3. Modelo a escala implementado en la presente investigación experimental

## 2. SOFTWARE EMPLEADOS

En la programación del microcontrolador se utilizó el software de Mikropascal para DSPIC, para el cálculo del algoritmo se utilizó el software para ingeniería de Matlab. El software empleado para la recepción/transmisión de los datos de manera amigable al usuario es Labview, el cual de manera gráfica permite la visualización de todos estos datos en tiempo real.

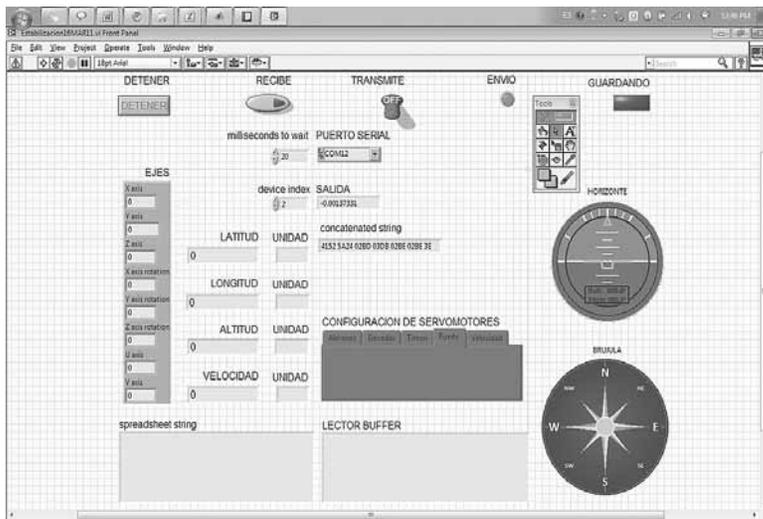


Figura 4. Programa Labview utilizado en la investigación

## 3. PRUEBAS EXPERIMENTALES PARA TOMA DE DATOS

Para la prueba experimental se procedió a la puesta del modelo a escala en el tanque de pruebas de la Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla". Se tiene que colocar el modelo a escala en un tanque de pruebas, con velocidad constante, esta velocidad debe ser en lo posible baja. Por medio del control Maxfire Blaze 2 en un punto distante del modelo en prueba y de manera inalámbrica se le transmite una información que activa el servomotor que controla los timones por igual; el procedimiento consistirá en llevar el giro del servo de manera moderada hasta su máximo grado de inclinación, en ese punto y manteniendo la cadencia se llevará el ángulo del servo al lado opuesto, este movimiento hará que el buque a escala caiga hacia un costado y después hacia el otro costado.

La información recogida por los sensores antes mencionados es transmitida al sistema de monitoreo, el cual los almacenará en una tabla previamente establecida, para ser analizados y evaluados. Esta tabla es un archivo .txt en el cual los datos se almacenan como una matriz, en donde cada columna es un dato generado por uno de los sensores.

Se realizaron varias pruebas de tomas de datos, manipulando el timón para que el modelo ejecutara movimientos similares a las pruebas de zig zag, monitoreando, entre otras, las siguientes variables: ángulo del timón, ángulo de escora, velocidad, orientación.

## 4. ANÁLISIS DE LOS DATOS

Una vez recibidos los datos y efectuado el modelamiento en el tanque de pruebas se procede a ejecutar el algoritmo de control generado en Matlab, para efectos de emular el patrón de estabilidad en el ángulo de escora en el buque modelo. Para esto se muestran gráficamente los datos obtenidos y procesados, como se ve a continuación:

En este punto la imagen aquí mostrada es determinante en el presente estudio, ya que es posible identificar en cada punto la incidencia que tiene el timón sobre el casco, el cual se ve reflejado en la inclinación en el eje "X" del mismo mostrado por el ángulo de escora medido por el acelerómetro.

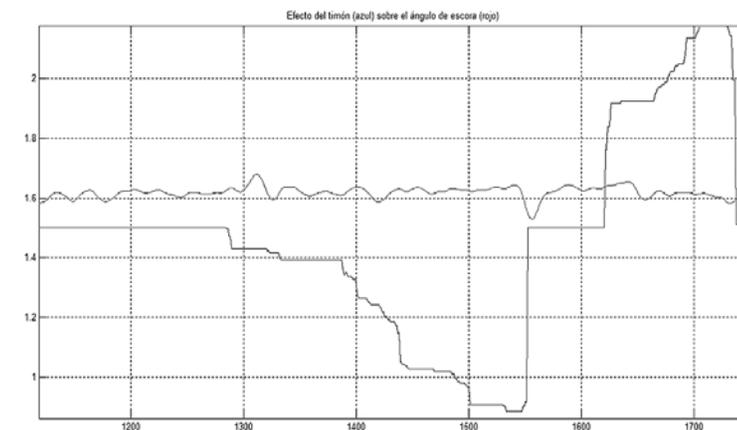


Figura 5. Efecto del timón (línea con amplio rango de oscilación) sobre el ángulo de escora (línea oscilante en 1,6)

En el punto de muestra 1200 se observa una relativa linealidad tanto del ángulo del timón como de la inclinación del buque. En el punto de muestra 1300 empieza a ver una incidencia en el ángulo del timón hacia un costado, lo que idealmente debería empezar a provocar un ángulo de inclinación en el casco, pero lo que se ve es que no ocurre ninguna inclinación por este, es decir, parece tener el mismo movimiento que solía llevar con el timón en posición inicial. En el punto de muestra 1400 la incidencia en el ángulo del timón hacia el mismo costado es mayor que la anterior, pero nuevamente la inclinación del casco mantiene el comportamiento que ha llevado en toda la prueba, es decir, inclinación casi nula o imperceptible. En el punto de muestra 1500 la incidencia en el ángulo del timón es máxima y de manera simultánea la inclinación del casco no varía, no sufre ninguna modificación en sus movimientos descritos desde el principio de la prueba.

Para el punto de muestra 1600 la incidencia en el ángulo del timón cambia de sentido hacia el lado contrario del que se hicieron en pruebas iniciales, por lo que de igual forma se empieza a incrementar la incidencia en el ángulo del timón de manera progresiva; en esta prueba la inclinación del casco mantiene el comportamiento que ha tenido desde el principio de las pruebas, es decir, no tiene variación significativa. Para el punto de muestra 1700 el ángulo del timón hacia ese costado es máximo, y los resultados de la inclinación del casco son los mismos que en la prueba hacia el otro costado, es decir, no sufren mayor modificación, su comportamiento es el mismo en todos los puntos de medición. Además se recalca que como variable de entrada también estaba la velocidad, que en todo momento fue constante, por lo que ratifica la idoneidad de los resultados aquí mencionados.

Por toda la descripción hecha se pueden identificar las variaciones de los movimientos del ángulo de inclinación de ambos timones, de manera progresiva hasta llegar a su máximo ángulo, también se pudo evidenciar el comportamiento constante en todas las muestras del ángulo de inclinación del casco, demostrando de manera clara la no incidencia de los movimientos del timón en la estabilidad de este modelo en particular.

## CONCLUSIONES

Se presentó el desarrollo del sistema hardware y software para monitorear el efecto del timón en la estabilidad de un modelo de buque, exponiendo los sensores utilizados y la electrónica implementada para tomar lectura en tiempo real de cada una de las variables de interés del proceso.

Se describió el modelo de buque utilizado para las pruebas, el cual era un modelo existente en el Laboratorio de Control Automático de la ENAP, así como el sistema de propulsión y la electrónica de potencia necesaria para su control de manera remota.

Con énfasis en los referentes bibliográficos consultados y relacionados en el cuerpo del trabajo de grado, la incidencia del timón sobre la estabilidad del modelo de buque utilizado no reaccionó ante la acción del timón (en cuanto a ángulo de escora), debido a la estructura de esta embarcación y el área que ocupa en su obra muerta; evidenciado en las diferentes pruebas realizadas y sustentado teóricamente.

## REFERENCIAS

- [1] Kuo Benjamin C. Libro Sistemas de Control Automático (séptima edición).
- [2] Dr. Treakle Thomas W. Tesis presentada a la Facultad del Instituto Politécnico de Virginia llamada Estudio numérico de Pasivo y Activo Anti-Tanques Roll para reducir los movimientos del buque.
- [3] Dr. Mendoza Lira Felipe H. Memorias del trabajo Estrategias de Control para Estabilización de Navíos 2003.
- [4] Youssef Khaled S, Mook Dean T, Nayfeh Ali H, Ragab Saad A. Documento llamado Roll de Estabilización de los tanques, Anti-Roll. Uso de un modelo mejorado de la Moción del tanque-Líquido, 2003.
- [5] B+V Industrietechnik GmbH, Imtech Marine&Offshore and Becker Marine Systems, R-R-S, Rudder Roll Stabilization.
- [6] Moaleji Reza and Greig Alistair R. Artículo científico llamado On the development of ship anti-roll tanks, 2005.
- [7] Dr. Carral Couce Luis, Dr. Echenique Gordillo Iñigo, Dr. García Ascaso Alfonso, Dr. Fraguera Formoso Jose Ángel, Dr. González Filgueira Gerardo, Ing. Reboredo Losada Óscar, Ing. Carral Couce Juan Carlos, proyecto S.I.S. llamado Un sistema de estabilización para la flota pesquera.

## VARIACIÓN DEL FLUJO DE AGUAS ENTRANTES AL MAR CARIBE EN SU INFLUENCIA A LA DINÁMICA SIMULADA POR UN MODELO

Jorge Fernando Ochoa Fandiño\*  
jorgefernando77@gmail.com

Serguei Lonin\*\*  
slonin@costa.net.co

Fecha de recepción: marzo de 2011, Fecha de aceptación: septiembre de 2011

**Resumen:** Con el propósito de demostrar la influencia que ejercen las variaciones de los flujos de entrada del agua en el sector de las Antillas durante diferentes épocas del año con respecto a la dinámica del mar Caribe se empleó el modelo oceánico POM (*Princeton Ocean Model*) [1], basado en promedios mensuales de corrientes geostroficadas absolutas entre los meses de junio de 2009 y mayo de 2010. Los resultados obtenidos brindaron herramientas para determinar cuáles son los flujos entrantes por el arco antillano que permitan hacer los modelos más ajustados a la realidad.

**Palabras clave:** Modelo POM, Corrientes geostroficadas, Altimetría satelital.

**Abstract:** In order to demonstrate the influence of the variation of the incoming flow through the Lesser Antilles during different periods of the year with respect to the dynamics of the Caribbean Sea, POM (*Princeton Ocean Model*) [1] was used, based on monthly averaged absolute geostrophic currents between the months of June 2009 and May 2010. The obtained results provided tools to identify incoming flows through the Antillean arc, with a model that better fits the reality.

**Key words:** Princeton Ocean Model, Geostrophic currents, Satellite altimetry.

---

\* Teniente de Fragata de la Armada Nacional, Profesional en Ciencias Navales, Especialista en Derecho Marítimo Internacional de la Universidad de Comillas de España, Alumno del programa Curso de Complementación Profesional en la Especialidad Electrónica, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla".

\*\* Teniente de Fragata de la Armada Nacional, Profesional en Ciencias Navales, Alumno del programa Curso de Complementación Profesional en la Especialidad Electrónica, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla".

## INTRODUCCIÓN

El estudio de la circulación oceánica a partir de mediciones de altimetría ha sido ampliamente empleado por la comunidad científica a nivel mundial. De esta manera, los sensores remotos se han convertido en una fuente permanente de información, a partir de la cual se han ajustado variados modelos y visualizadores numéricos que realizan una aproximación hacia la “predicción” de los fenómenos oceanográficos que podrían ocurrir según una situación determinada, la cual está especificada por unas condiciones de contorno variables. Los datos de la altura de la superficie del mar obtenidos desde satélites son ahora considerados como la fuente de información futura más confiable para determinar las corrientes oceánicas, y, por consiguiente, la necesidad más crítica es encontrar un método para proyectar estos datos desde la superficie a lo largo de toda la columna del agua [2].

El empleo combinado de la información satelital y la modelación numérica en la interpretación y pronóstico de las condiciones dinámicas de los océanos cobra cada día mayor interés y su mejoramiento es permanente. Sin embargo, aunque se hayan alcanzado avances significativos, siempre existirá incertidumbre en cuanto a la exactitud de los resultados de los pronósticos, causada por el planteamiento físico del problema, el empleo de métodos numéricos con diferentes órdenes de aproximación, la calidad de los datos de entrada, restricciones computacionales, entre otros. Para lograr superar esta incertidumbre es necesario tratar de disminuir al máximo la brecha entre la realidad (siempre desconocida) y las salidas de los modelos, para lo cual se utilizan técnicas que permiten la asimilación de datos, combinando los diferentes métodos de medición disponibles con las herramientas de modelación numérica [3].

El presente trabajo está enfocado hacia la identificación de las limitaciones que se presentan en los resultados de los parámetros hidrofísicos del mar Caribe modelados en el modelo oceánico POM (*Princeton Ocean Model*) [1] con el fin de realizar los ajustes necesarios para el perfeccionamiento del modelo. La circulación oceánica del mar Caribe se obtuvo de datos de altimetría satelital de los cuales se crearon mapas mensuales de topografía dinámica absoluta. En los resultados obtenidos en el presente trabajo se empleó el modelo POM utilizando un caudal resultante de 20 Sv basado en promedios mensuales de velocidades geostroficas absolutas a lo largo de todo el arco antillano para analizar la anomalía del nivel del mar en el Caribe, donde las condiciones de contorno se aplicaron en el modelo para el modo barotrópico. Los

resultados obtenidos fueron comparados con los datos satelitales, lo cual brindó información para determinar los flujos entrantes que permitan hacer modelos más ajustados a la realidad.

## 1. COMPARACIÓN DEL MODELO CON DATOS DE ALTIMETRÍA SATELITAL

Los gráficos de la topografía dinámica absoluta del Caribe creados a partir de la base de datos satelitales de MADT (*Map of Absolute Dynamic Topography*) tomados del sistema DUACS (*Data Unification and Altimeter Combination System*) entre los años de 1999 y 2007, [4] fueron comparados con los resultados obtenidos del modelo oceánico POM [1] dentro del sistema SPOD (*Sistema de Predicción Oceánica de DIMAR*) [5]. En el trabajo se usó el modelo con un caudal entrante de 20 Sv, distribuido con una velocidad uniforme de 2,3 cm/s a lo largo de todo el arco antillano y un caudal entrante de 5 Sv, desde el norte en el sector comprendido entre Puerto Rico y el paso de Anegada, distribuido con una velocidad uniforme de 0,8 cm/s de acuerdo con el flujo integral definido por [6].

El cálculo del error consistió en la estimación de la diferencia cuadrática entre los resultados gráficos de los valores de altimetría con los gráficos obtenidos de la modelación dentro de una grilla de 102 x 227 nodos que se ajustó a la malla curvilínea del modelo [5] y permitió encontrar los errores del modelo. Partiendo de esta información se aplicó la siguiente estimación del error cuadrático:

$$\epsilon^2 = \frac{\sum_{ij} (\eta_{ij}^{\text{mod}} - \eta_{ij}^{\text{sat}})^2}{N} \quad (1)$$

donde,  $\epsilon$  = Error de la raíz cuadrática del modelo, asumiendo que el error de los datos satelitales es despreciable;

$\eta_{ij}^{\text{mod}}$  = Nivel del mar en el modelo;

$\eta_{ij}^{\text{sat}}$  = Nivel del mar obtenido del satélite; N = (Cantidad de nodos, N=23154).

La tabla 1 presenta los valores obtenidos de la aplicación de la fórmula del error cuadrático medio a cada nodo de la grilla empleada en el ajuste de los valores de altimetría satelital y del modelo.

TABLA I  
RAÍZ CUADRÁTICA MEDIA  
(R.M.S.) MENSUAL ENTRE  
EL MODELO POM  
Y ALTIMETRÍA SATELITAL

Mes	r.m.s. (cm)
Enero	9,73
Febrero	8,91
Marzo	9,96
Abril	9,52
Mayo	8,92
Junio	9,37
Julio	9,45
Agosto	9,97
Septiembre	9,14
Octubre	7,47
Noviembre	7,28
Diciembre	8,55

Se observa en el cuadro comparativo que los meses de mayores errores son marzo con 9,96 cm y agosto con 9,97 cm (figura 1) y los meses que presentan menores errores son octubre con 7,47 cm y noviembre con 7,28 cm (figura 2).

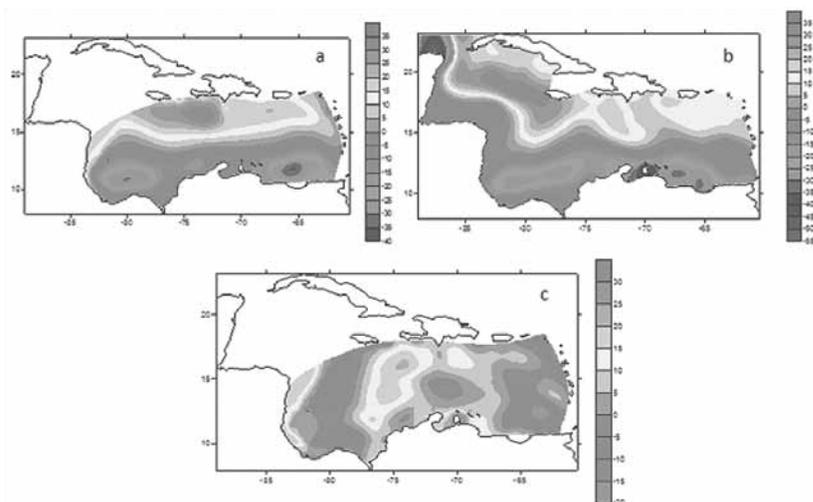


Figura 1. Anomalia del nivel del mar. a) Salida del modelo POM; b) Altimetría satelital; c) Comparación modelo vs satélite. Agosto - (Altura en centímetros)

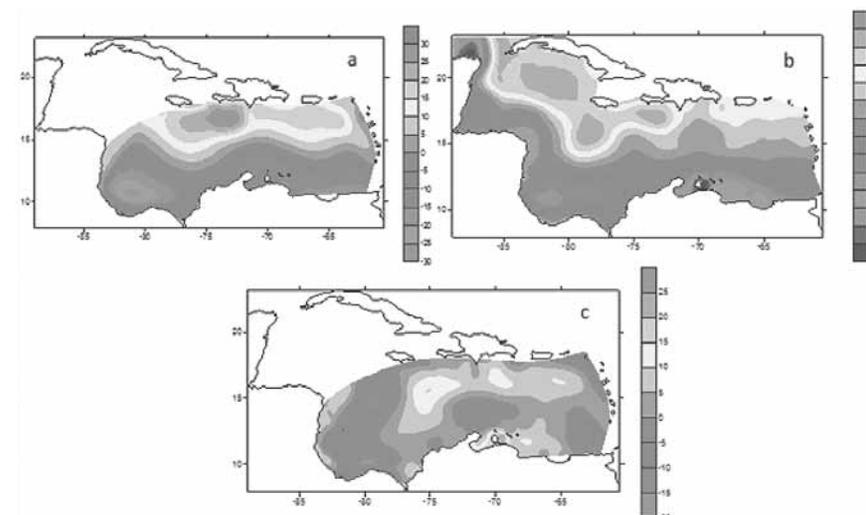


Figura 2. Anomalia del nivel del mar. a) Salida del modelo POM; b) Altimetría satelital; c) Comparación modelo vs satélite. Noviembre - (Altura en centímetros)

## 2. OBTENCIÓN DE CORRIENTES GEOSTRÓFICAS Y ANÁLISIS DE LOS FLUJOS DE ENTRADA EN EL ARCO ANTILLANO

Para demostrar la influencia que ejercen las variaciones de los flujos de entrada en el sector del arco de las Antillas se consideró un caudal de ingreso resultante de 20 Sv en el modo barotrópico, tomando como referencia la componente normal a la frontera (U) de la velocidad geostrófica absoluta proveniente del modelo OCCAM, entre los meses de junio de 2009 y mayo de 2010. Para tal fin se definió un área de 35 x 10 (350 Nodos) entre las latitudes 10.9° N y 17.7° N y longitudes 60.7° W y 62.5° W (figura 3).

Contando con los promedios mensuales de la componente (U) de la velocidad geostrófica absoluta se efectuó la conversión en términos de caudal (Q) teniendo como referencia un ingreso total por el arco antillano de 20 Sv. Para este propósito se aplicó la siguiente fórmula:

$$Q_i = \left( \frac{\bar{U}_i}{\sum \bar{U}} \right) * 20 \quad (\text{en Sv}) \quad (2)$$

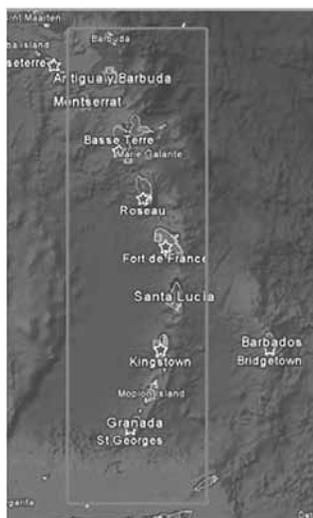


Figura 3. Área seleccionada en el arco de las Antillas, para el cálculo de la corriente geostrófica

Donde  $\bar{U}_i$  corresponde al promedio diario o mensual de la componente (U) de las velocidades geostróficas ubicadas en una misma latitud entre las longitudes 60.7° W y 62.5° W, dando como resultado 35 valores distribuidos entre las latitudes 10.9° N y 17.7° N, mientras que  $\sum \bar{U}_i$  corresponde a la sumatoria de los 35 valores  $\bar{U}_i$  entre las latitudes 10.9° N y 17.7° N.

De la misma forma se calculó el flujo integral (en  $m^2/s$ ), el cual corresponde a la relación de caudal (en Sv) por metro lineal de frontera abierta, debido a que cada uno de los valores de caudal se encuentra separado a 0.2° en métrica lineal (entre las latitudes 10.9° N y 17.7° N para un total de 35 nodos).

Se observó que todos los meses presentan un fuerte flujo de ingreso al mar Caribe en el paso comprendido entre isla San Vicente e isla Granada, donde la corriente del mes de agosto de 2009 es la más fuerte con una velocidad máxima de 0,62 m/s y la del mes de abril de 2009 es la más débil con una velocidad máxima de 0,38 m/s, de acuerdo a la tabla 2.

Este flujo mensualmente sigue un patrón similar demostrando un giro anticiclónico

TABLA 2  
RELACIÓN VELOCIDADES MÁXIMAS DE INGRESO EN EL PASO  
ENTRE ISLA DE GRANADA E ISLA SAN VICENTE

Mes y Año	Latitud	Máxima Velocidad (m/s)
Junio 2009	12.1 N	0,55
Julio 2009	12.7 N	0,58
Agosto 2009	12.1 N	0,62
Septiembre 2009	12.3 N	0,48
Octubre 2009	12.1 N	0,42
Noviembre 2009	12.7 N	0,58
Diciembre 2009	12.3 N	0,53
Enero 2010	12.3 N	0,49
Febrero 2010	12.7 N	0,49
Marzo 2010	12.3 N	0,58
Abril 2010	12.3 N	0,38
Mayo 2010	12.5 N	0,47

que desemboca de salida en el canal de Santa Lucía (entre las islas de Martinica y Santa Lucía), como lo podemos observar en la figura 4 que corresponde al 01 de agosto de 2009.

Para encontrar las épocas del año más caudalosas se tomó como referencia el área

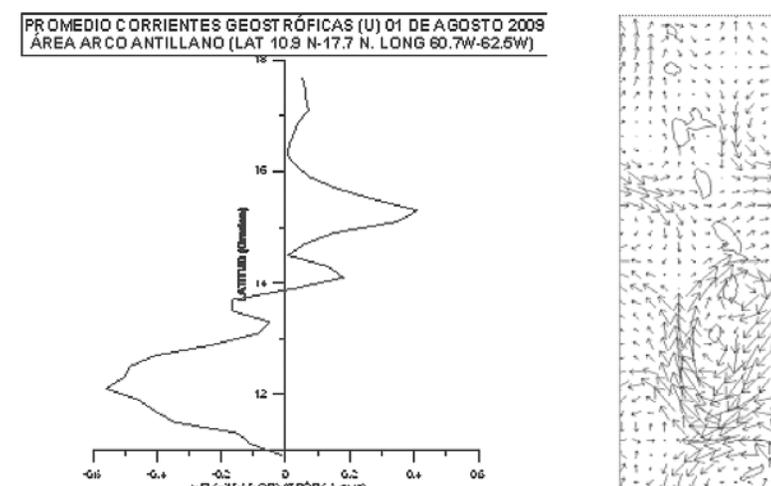


Figura 4. (Izquierda) Promedio de componente U de velocidad geostrófica. (Derecha) Gráfico vectores corriente geostrófica. 01 de agosto de 2009 - Área Arco Antillano (Lat. 10.9° N - 17.7° N; Long 60.7° W - 62.5° W)

comprendida entre latitud 12.1° N y latitud 13.1° N que corresponde al paso ubicado entre las islas de San Vicente y Granada, lugar en el que se detectan las mayores velocidades de ingreso al mar Caribe. Se concluyó que el mes que cuenta con mayor flujo integral de ingreso en este sector es noviembre de 2009, por el contrario el mes que presenta el menor flujo integral de ingreso es abril de 2010, de acuerdo a la tabla 3.

TABLA 3  
RELACIÓN MENSUAL SUMATORIA DE FLUJO INTEGRAL INGRESO  
EN EL PASO ENTRE ISLA GRANADA E ISLA SAN VICENTE

Mes y Año	Latitud	Flujo Integral ( $m^2/s$ )
Junio 2009	12.1 N – 13.1 N	-1615,32
Julio 2009	12.1 N – 13.1 N	-2047,3
Agosto 2009	12.1 N – 13.1 N	-1063,07
Septiembre 2009	12.1 N – 13.1 N	-1299,55
Octubre 2009	12.1 N – 13.1 N	-1355,86
Noviembre 2009	12.1 N – 13.1 N	-4068,92
Diciembre 2009	12.1 N – 13.1 N	-774,33
Enero 2010	12.1 N – 13.1 N	-1029,73
Febrero 2010	12.1 N – 13.1 N	-799,09
Marzo 2010	12.1 N – 13.1 N	-1019,82
Abril 2010	12.1 N – 13.1 N	-623,44
Mayo 2010	12.1 N – 13.1 N	-1241,44

### 3. FORZAMIENTO DEL MODELO POM CON DATOS DE CAUDAL VARIABLE EN EL ARCO ANTILLANO

Ya contando con los datos de caudal promedio obtenidos entre los meses de junio de 2009 y mayo de 2010 se procedió a interpolar los puntos que se encuentran distribuidos entre latitud 10.9° N y 17.7° N para convertirlos en 87 datos que coinciden con los nodos existentes en la malla curvilínea del modelo POM. Contando con los datos de caudal interpolados se procedió a especificar en el modelo las condiciones barotrópicas del flujo entrante con datos mensuales de caudal. Para las corridas del modelo se utilizaron los campos climatológicos de temperatura y salinidad para el arranque "en frío", flujos de calor e impulso en la superficie del mar. Se logró interpretar los resultados del modelo POM con flujo variable para ser comparados con el modelo POM con flujo constante [5] y los resultados de altimetría satelital [4].

Se procedió a hallar el error existente entre los resultados del modelo con flujo variable

y los datos satelitales, nuevamente para un total de 23154 nodos correspondientes a una grilla de 102 X 227. Para tal fin se tomó como referencia los errores encontrados en el modelo con flujo constante para demostrar la variación del error en el modelo con flujo variable. Los resultados se encuentran en la tabla 4.

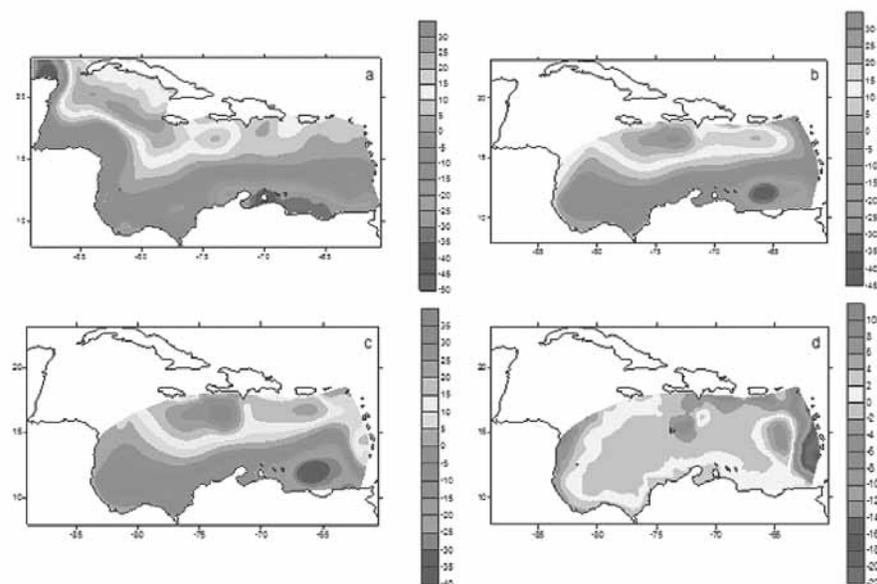
TABLA 4  
RAÍZ CUADRÁTICA MEDIA (R.M.S.) MENSUAL ENTRE MODELOS  
CON RESPECTO A DATOS ALTIMETRÍA SATELITAL

Mes	r.m.s. Modelo Flujo Constante (cm) r.m.s.	Modelo Flujo Variable (cm)
Enero	9,73	9,88
Febrero	8,91	9,20
Marzo	9,96	9,61
Abril	9,52	9,18
Mayo	8,92	8,98
Junio	9,37	9,99
Julio	9,45	10,52
Agosto	9,97	11,18
Septiembre	9,14	10,35
Octubre	7,47	8,69
Noviembre	7,28	11,42
Diciembre	8,55	8,51

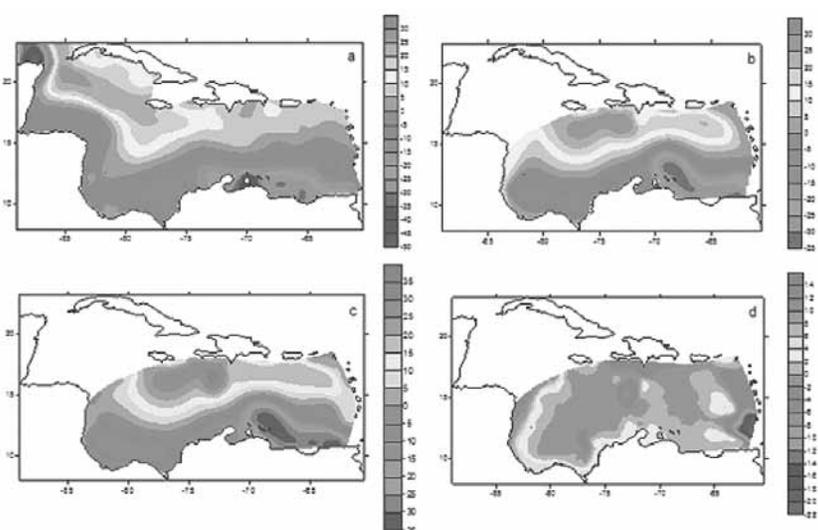
Obteniendo la raíz cuadrática media (r.m.s.) se pudo observar que en los meses de marzo (figura 5) y abril (figura 6) el margen de error con respecto al satélite disminuyó significativamente con el modelo de flujo variable.

### 4. CONCLUSIONES

Al analizar los promedios mensuales de la componente zonal (U) de las corrientes geostóficas a lo largo del arco antillano entre junio de 2009 y mayo de 2010 se pudo observar que todos los meses presentan la corriente de ingreso más fuerte en el paso comprendido entre isla San Vicente e isla Granada, donde la corriente del mes de agosto de 2009 es la más fuerte con una velocidad máxima de 0,62 m/s y la del mes de abril de 2010 es la más débil con una velocidad máxima de 0,38 m/s. Estas corrientes siguen un patrón similar en cada uno de los meses, realizando un giro anticiclónico que desemboca con mayor intensidad en el canal de Santa Lucía (entre las islas de Martinica y Santa Lucía) para salir nuevamente al océano Atlántico.

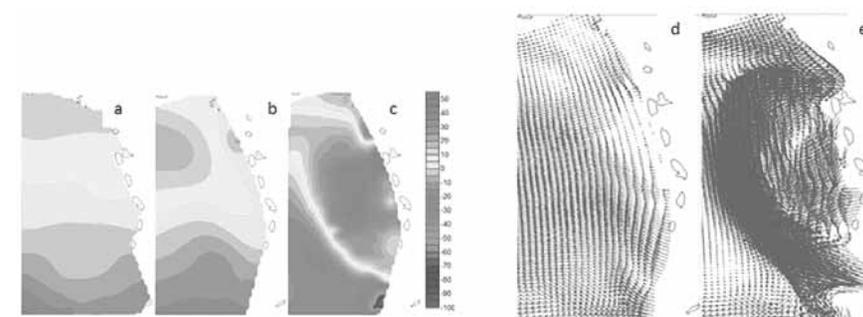


**Figura 5.** Anomalia del nivel del mar. a) Altimetría Satelital; b) Modelo con datos de entrada de caudal constante; c) Modelo con datos de entrada de caudal variable; d) Diferencia entre los modelos en b) y c). Marzo - (Altura en centímetros)



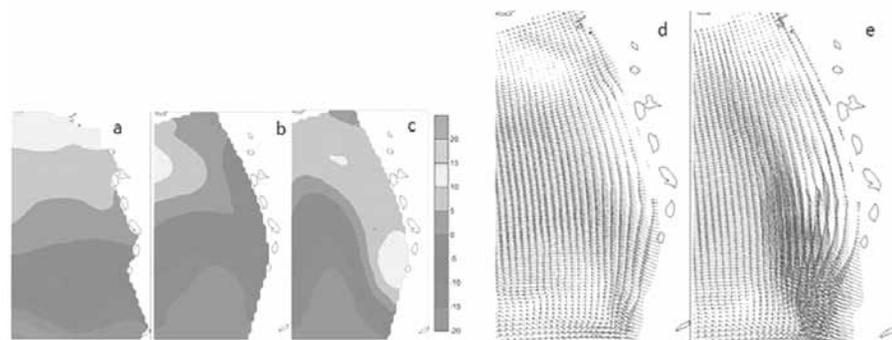
**Figura 6.** Anomalia del nivel del mar. a) Altimetría Satelital; b) Modelo con datos de entrada de caudal constante; c) Modelo con datos de entrada de caudal variable; d) Diferencia entre los modelos en b) y c). Abril - (Altura en centímetros)

Los meses del año que presentaron las mayores diferencias del modelo con respecto a los datos satelitales fueron de menor a mayor: julio (10,52 cm), agosto (11,18 cm) y noviembre (11,42 cm). Agosto se caracterizó por tener la mayor velocidad de ingreso entre las islas de San Vicente y Granada, noviembre y julio en este mismo sector (Entre las islas de San Vicente y Granada) presentan los mayores caudales de todos los meses. En la figura 7 correspondiente al mes de noviembre en la cuenca de Granada, se pueden observar marcadas diferencias de nivel entre los resultados de altimetría satelital (7a) y el modelo con datos de entrada de flujo variable (7c), producto de las fuertes corrientes que ingresan al sur del arco antillano (7e). Lo cual demuestra que el modelo posee mayores errores cuando al sur del arco antillano se presentan corrientes con alto caudal.



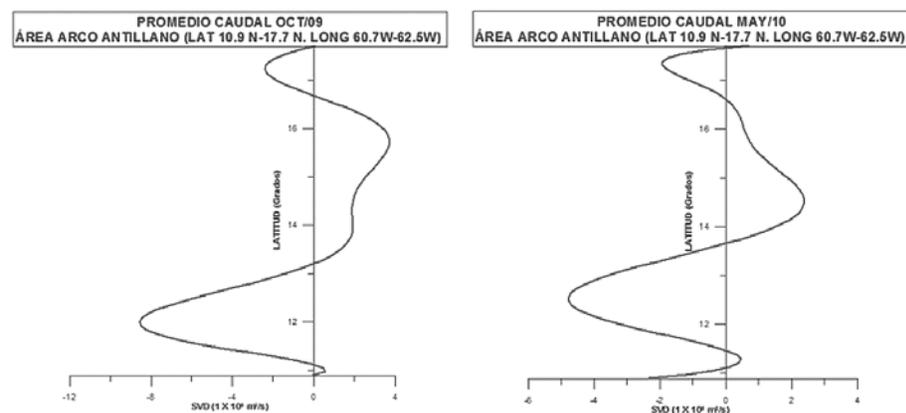
**Figura 7.** a) Altimetría Satelital; b) Niveles del modelo con datos de entrada de flujo constante; c) Niveles del modelo con datos de entrada de flujo variable; d) Vectores de corrientes del modelo con datos de entrada de flujo constante; e) Vectores de corrientes del modelo con datos de entrada de flujo variable. Cuenca de Granada - Noviembre - (Altura en centímetros)

Se determinó que los meses que presentaron mejoras en el modelo con flujo variable fueron abril, diciembre y marzo, cuando se demostraron bajos caudales de ingreso entre las islas de San Vicente y Granada. En la figura 8 que ilustra el mes de diciembre y se observa que al norte de la cuenca de Granada las isohipsas entre los resultados de altimetría satelital (8a) y el modelo con datos de entrada de flujo variable (8c), muestran mayores coincidencias que las isohipsas del modelo con datos de entrada de flujo constante (8b). Lo último hace concluir que mejores resultados en el modelo se relacionan con los meses que presentan menor caudal de ingreso al sur del arco antillano. Esta afirmación no se aplica para el mes de febrero, el cual aunque presenta uno de los menores caudales de ingreso, los resultados del modelo original [5] se ajustan mejor a los datos satelitales reflejados en dicho mes.



**Figura 8.** a) Altimetría Satelital; b) Niveles del modelo con datos de entrada de flujo constante; c) Niveles del modelo con datos de entrada de flujo variable; d) Vectores de corrientes del modelo con datos de entrada de flujo constante; e) Vectores de corrientes del modelo con datos de entrada de flujo variable. Cuenca de Granada - Diciembre - (Altura en centímetros)

A pesar que el mes de octubre de 2009 (figura 9a) refleja un patrón de ingreso similar al mes de mayo de 2010 (figura 9b), este primer mes presenta mayores diferencias debido a que el modelo con flujo variable genera un giro anticiclónico que se produce por un gran caudal de ingreso con una velocidad máxima de 0,42 m/s entre las islas de San Vicente y Tobago que desemboca entre las islas de Guadalupe y San Vicente. De la misma forma se observa un caudal de ingreso con una velocidad máxima de 0,11 m/s entre las islas de Barbuda y Guadalupe (caudal superior al mes de mayo). Esta corriente a pesar de ser la más caudalosa en el sector norte, tomando de referencia los meses de estudio, no afecta significativamente en la dinámica del giro del sur.



**Figura 9.** a) Promedio de caudal, octubre de 2009; b) Promedio de caudal, mayo de 2010; - Área arco antillano (Lat. 10.9° N-17.7° N. Long. 60.7° W-62.5° W)

En resumen se puede concluir que a mayor caudal de ingreso en el sur de la cuenca, aumentan las probabilidades de que se genere un mayor error en los resultados del modelo. Aunque se pudo demostrar en algunos casos, como en mayo de 2010 en el cual se disminuyeron los efectos dinámicos del giro ciclónico del sur producto de una segunda corriente de ingreso, no es determinante para mejorar el modelo cuando la corriente de ingreso al sur de la cuenca es muy fuerte.

## REFERENCIAS

- [1] Mellor GL. User's Guide for a Three-Dimensional Primitive Equation Numerical Ocean Model. Princeton, NJ, 1993.
- [2] Cooper M, Haines K. Altimetric assimilation with water property conservation. Journal of Geophysical Research, enero, 1996. Vol. 101, p. 1059-1077.
- [3] Torres R, Lonin S. Construcción de espectros de oleaje en el mar Caribe a partir de mediciones satelitales. Boletín Científico CIOH, No. 23, 2007, p. 19-31.
- [4] Sanabria D, Parada E. Descripción del comportamiento de la dinámica del mar Caribe con base en mediciones satelitales. Tesis de Grado en Oceanografía Física, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", junio 2008.
- [5] Lonin S. Empleo de los datos de la NOAA-NODC-WOA en el modelo hidrodinámico del Caribe. Boletín Científico CIOH, No. 22, 2004.
- [6] Roemmich D. Circulation of the Caribbean Sea: A Well-Resolved Inverse Problem. Journal of Geophysical Research, 1981. Vol. 86, p. 7993-8005.

## DISEÑO DE CONTROL INTELIGENTE PARA OPTIMIZACIÓN DE UNA PLANTA DE ENERGÍA SOLAR

**Jaime González\***

jaimeegonzalezz@gmail.com

**Diego Colón\***

dialcoto@hotmail.com

**Juan Contreras\*\***

epcontrerasj@ieee.org

Fecha de recepción: marzo de 2011, Fecha de aceptación: septiembre de 2011

**Resumen:** Existe el seguimiento solar en uno o dos ejes, así mismo el control de posición se puede realizar mediante la diferencia de potencial por incidencia lumínica entre dos fotorresistencias o el desarrollo de algoritmos de predicción. El presente proyecto se enfocó a la investigación, planeamiento y desarrollo de un seguidor solar con dos grados de libertad y control inteligente mediante el cálculo predictivo de la posición del Sol por estudios astronómicos y la creación de un sistema electrónico integrado, cuyo principal componente es el microcontrolador, todo ello en interacción con el diseño de un adecuado modelo mecánico, creándose un modelo robótico y autómata capaz de seguir al Sol en cualquier lugar geográfico y en cualquier instante de tiempo a lo largo del año.

**Palabras clave:** Algoritmo, Celda fotovoltaica, DSPIC, Encoder incremental, Microcontrolador, Pascal.

**Abstract:** There exist solar tracking in one or two shafts, and also the control of the position can be done by the voltage difference between two photoresistor sensitive to light, or the development of prediction algorithms. This project focused on research, planning and development of a solar tracker with two degrees of freedom and intelligent control using the predictive calculation of the sun's position by astronomical studies, creating a integrated electronic system, whose main component is the microcontroller; this electronic system interacting with a proper mechanical design is able for positioning the solar panel at any geographic location or time during the year.

**Key words:** Algorithms, Photovoltaic cell, DSPIC, Incremental encoder, Microcontroller, Pascal.

\* Estudiante Curso de Extensión Profesional en Ingeniería Naval Electrónica, Escuela Naval "Almirante Padilla".

\*\* Doctor Ciencias Técnicas (mención en Control Inteligente de Procesos) del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, CUJAE en Cuba, Docente y Director Grupo de Investigación en Comunicaciones, Control y Diseño Naval, Escuela Naval "Almirante Padilla", Colombia.

## INTRODUCCIÓN

La disminución de costos de producción de celdas fotovoltaicas ha hecho que su uso sea cada vez más popular en todo el mundo, tomando auge el desarrollo de nuevas tecnologías que buscan aumentar la eficiencia de las plantas solares. La Armada Nacional de Colombia no ha sido ajena al uso de la energía solar y tiene instalados sistemas fotovoltaicos fijos en puestos de vigilancia, puestos fluviales avanzados y bases fijas, como un respaldo en unos casos, y en otros como una solución energética ante la inexistencia de red eléctrica nacional.

Colombia por estar localizada en el trópico posee una posición geográfica que le permite tener unos índices de captación anual de energía solar que favorecen su uso. La energía solar captada por la superficie terrestre se mide en  $w/mts^2$  y se denomina irradiancia solar. Para la latitud de Cartagena es de unos  $300 w/mts^2$  de acuerdo al modelo predictivo diseñado por Bishop y Rossow [1] aplicado a las imágenes de los satélites climatológicos durante los años 1991, 1992 y 1993.

El objeto de este proyecto es incrementar la cantidad de potencia captada por una planta de energía solar mediante la variación en el ángulo de inclinación y dirección de una celda fotovoltaica. Para tal fin fue necesaria una investigación sobre los movimientos en la bóveda celeste del Sol respecto a la Tierra; realización de programas de simulación en Matlab para calcular la elevación y dirección del Sol, diseño de un software de control mediante mikropascal para DSPIC el cual incluye los algoritmos necesarios para la toma de decisiones, diseño y montaje de una tarjeta electrónica con los dispositivos eléctricos y electrónicos necesarios, la ejecución de las órdenes de control y el diseño y fabricación de un montaje mecánico con engranajes reductores para la ejecución de los respectivos movimientos de elevación y azimut, y una evaluación de la cantidad de energía entregada cuando la celda sigue al Sol versus la cantidad de energía entregada por un sistema fijo.

### 1. CÁLCULO DE LA POSICIÓN DEL SOL

La Tierra durante su traslación alrededor del Sol describe una elipse; dicha elipse se puede dividir en  $360^\circ$  para obtener una posición angular  $\alpha$  de la Tierra respecto al Sol cada día del año sidéreo que es de 365,256363. Obteniéndose su valor en radianes:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\text{año}} (n - 1)$$

Dada la inclinación de la Tierra respecto a su propio eje y al cumplimiento de las leyes de Kepler durante la traslación en la elíptica alrededor del Sol, se origina una variación en la duración de los días terrestres que puede oscilar entre -14 minutos y +16 minutos). J. W. Spencer [2] predijo mediante series de Fourier el comportamiento de esta variación solar con un error máximo de 0,034377 radianes a la cual se le llama ecuación del tiempo (Et):

$$Et = 0,000075 + 0,001868*\cos\alpha - 0,032077*\text{sen}\alpha - 0,014615*\cos\alpha - 0,040089*\text{sen}2\alpha$$

Observando su variación anual modelada en Matlab:

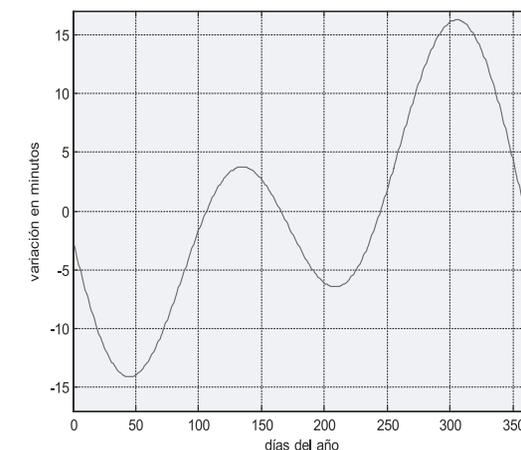


Figura 1. Ecuación del tiempo

#### 1.1 Coordenadas celestes horarias

Es un sistema de posicionamiento de astros basado en los movimientos de rotación de la tierra. Las coordenadas celestes horarias son la declinación  $\delta$  y el ángulo horario  $\omega$  [3].

El movimiento de traslación se realiza con una inclinación de aprox.  $23.45^\circ$ . Cuando la Tierra está en el afelio (más alejada del Sol y verano en el hemisferio norte) el ángulo de inclinación del Sol con respecto a un observador en el Ecuador es de unos

+23.45° y cuando la Tierra se encuentra en el perihelio (más cerca del Sol y verano en el hemisferio sur) el observador tendrá el Sol a unos -23.45°. J.W. Spencer también desarrolló una ecuación para determinar la variación de la declinación ( $\delta$ ) del Sol respecto al Ecuador terrestre con un error aproximado de 0,0006 radianes.

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cdot \cos \alpha + 0,070257 \cdot \sin \alpha - 0,006758 \cdot \cos 2\alpha + 0,000907 \cdot \sin 2\alpha - 0,002697 \cdot \cos 3\alpha + 0,00148 \cdot \sin 3\alpha$$

Observando su variación anual modelada en Matlab:

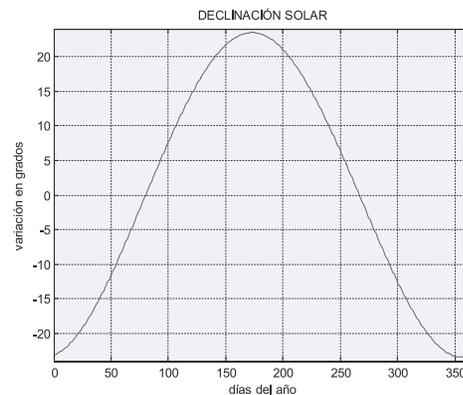


Figura 2. Declinación anual del Sol

El ángulo horario ( $\omega$ ) está definido como el arco de la circunferencia de Ecuador celeste formado entre el círculo horario del Sol (de 24 horas, cada una de 15° de arco) y el meridiano del observador, de 0° a +180° hacia el oeste y de 0° a -180° hacia el este. Siendo su valor:

$$\omega = \frac{2\pi}{24} \text{ (TSV-12) (expresado en radianes)}$$

Donde TSV es el tiempo solar verdadero para un observador en determinada longitud.

### 1.2 Coordenadas celestes horizontales

Es el sistema de posicionamiento de un astro basado en la apreciación de la elevación ( $h$ ) con respecto al horizonte de un observador y de dirección (azimut) respecto al norte verdadero.

Aplicando trigonometría esférica [4] y las relaciones de seno y coseno desarrolladas

por el matemático Friedrich Wilhelm Bessel (Westfalia-Alemania 1784, Kaliningrado-Rusia, 1846), se tiene que elevación  $h$  es:

$$h = \sin^{-1}[\sin(\varphi) * \sin(\delta) + \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos \omega]$$

Una vez obtenida la altura del astro, se puede despejar el azimut ( $\psi$ ):

$$\Psi = \sin^{-1}\left(\frac{-\cos(\delta) * \sin \omega}{\cos h}\right)$$

## 2. CÁLCULO DE LA POTENCIA DE TRABAJO PARA LA CELDA SOLAR DE 15W

Para el desarrollo del proyecto se usó una celda solar con capacidad máxima de 15w a 25°C. Dada la temperatura promedio de 32°C y demás condiciones ambientales de Cartagena (Colombia) esta capacidad máxima de entrega de potencia disminuye teniendo en cuenta la temperatura a la cual es expuesto el panel y a las condiciones de viento. Héctor L. Gasquet [5] expresa una temperatura de trabajo para la celda solar que obedece a la expresión:

$$T_t = T_a + kR$$

Donde  $T_t$  es la temperatura de trabajo del panel,  $T_a$  es la temperatura ambiente máxima,  $k$  es un coeficiente que varía entre 0,2 y 0,4°Cxcm<sup>2</sup>/mW, el cual depende de la velocidad promedio del viento, cuando la velocidad promedio del viento es muy baja o incluso inexistente el enfriamiento del panel será pobre o nulo, entonces  $k$  tomará valores cercanos o iguales a 0,4; si por el contrario, la velocidad promedio del viento genera un enfriamiento del panel,  $k$  tomará un valor mínimo de 0,2, por último se tiene que  $R$  es el valor de radiación solar en mW/cm<sup>2</sup>, el cual varía entre 80 mW/cm<sup>2</sup> y 100 mW/cm<sup>2</sup>, donde se considerará que para ubicaciones con un alto valor de insolación diaria se usa el valor máximo de 100 mW/cm<sup>2</sup>, pero si existen nubes pasajeras que reducen el valor de radiación, se tomará el valor mínimo de 80 mW/cm<sup>2</sup>, en este caso para las mediciones del presente proyecto se asumirá el valor mínimo; finalmente se tendrá que el producto  $kR$  muestra el incremento de temperatura que sufre el panel sobre la temperatura ambiente máxima.

$$T_t = T_a + kR$$

$$T_t = 32^\circ C + \left(0,4^\circ C \frac{cm^2}{mW} * 80 \frac{mW}{cm^2}\right)$$

$$T_t = 32^\circ C + 32^\circ C$$

$$T_t = 64^\circ C$$

Se procede a calcular la potencia de salida del panel ( $P_t$ ) trabajando a la temperatura de trabajo ( $T_t$ ) y por lo tanto, la expresión descrita por Gasquet [5]:

$$P_t = P_p - (P_p * \delta * \Delta T)$$

Donde  $P_t$  es la potencia de salida a la temperatura de trabajo ( $T_t$ ),  $P_p$  es la potencia pico del panel que para este caso es de 15 W,  $\delta$  es el coeficiente de degradación con un valor de 0,6%/°C para este caso, por desconocerse cuál se estipuló por parte del fabricante, finalmente  $\Delta T$  es el incremento de temperatura sobre la temperatura ambiente máxima, que para este caso es de 32°C como se observó anteriormente; ahora con estos datos se puede calcular la potencia de trabajo ( $P_t$ ), lo cual arroja que:

$$P_t = 15W - (15W * 0.006 * 32^\circ C)$$

$$P_t = 12,12W \quad P_t = 12,12W$$

Este resultado indica que bajo las condiciones ambientales predominantes, la celda solo será capaz de entregar en promedio 12.12 w. Este resultado es especialmente importante para interpretar los resultados del cálculo de potencia entregada en posición fija y variable.

### 3. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE LA CELDA SOLAR

Cada año la eficiencia de las celdas fotovoltaicas se incrementa, siendo Spectrolab una filial de Boeing, uno de los líderes en el campo de investigación para mejoras en las celdas solares con el desarrollo de celdas con eficiencia de 39,2%. Estas tecnologías están lejos del alcance común dado su alto costo, por tal razón las celdas solares a base de silicio amorfo con una eficiencia promedio de 18% son las más usadas. Sin embargo, día a día la energía solar se hace más rentable y los expertos en el tema estiman que desplazará a futuro a otras fuentes como la fósil.

Dentro del desarrollo del presente proyecto no se puede dejar a un lado la determinación de la eficiencia de la celda solar a usar, dado que es vital para los cálculos energéticos y así establecer la potencia máxima de consumo. Por tal razón y habiendo calculado la potencia de trabajo de la celda y tomando el valor de irradiación solar para una latitud de 10° Norte de unos 300 w/m<sup>2</sup> se puede obtener el valor aproximado de la eficiencia de la celda:

$$n = \frac{\text{Potencia max del dispositivo}}{\text{area en mts}^2 * 300W / \text{mts}^3} * 100\%$$

$$n = \frac{12,12W}{0,264282 \text{ mts}^2 * 300W / \text{mts}^3} * 100\%$$

$$n = 15,28\%$$

Donde el área irradiada de la celda solar es de 0.264286 m<sup>2</sup> y la potencia máxima del dispositivo es 12.12 w.

### 4. CÁLCULO DE POTENCIA ENTREGADA POR LA CELDA SOLAR

Se tomaron mediciones de voltaje y corriente entregadas por la celda solar a una carga (resistencia tipo tiza de 20 w y 39 ohmios) con un intervalo de tiempo de una hora (1h); la celda solar se encontraba en posición horizontal a la superficie, y en condiciones de cielo despejado. Los resultados obtenidos de este experimento se pueden apreciar en la tabla 1.

La gráfica de los valores de la tabla 1 evidencia el incremento de la potencia con el ascenso del Sol y su disminución durante su descenso hacia el ocaso.

TABLA 1  
POTENCIA PARA LA CELDA EN POSICIÓN FIJA

Hora de la toma	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (W) obtenida
07:00	2,99	0,078	0,23322
08:00	11,03	0,283	3,12149
09:00	17,39	0,490	8,52110
10:00	19,05	0,490	9,33450
11:00	19,82	0,510	10,10820
12:00	19,64	0,505	9,91820
13:00	19,88	0,512	10,17856
14:00	19,27	0,502	9,67354
15:00	18,70	0,481	8,99470
16:00	14,69	0,378	5,55282
17:00	6,99	0,176	1,23024

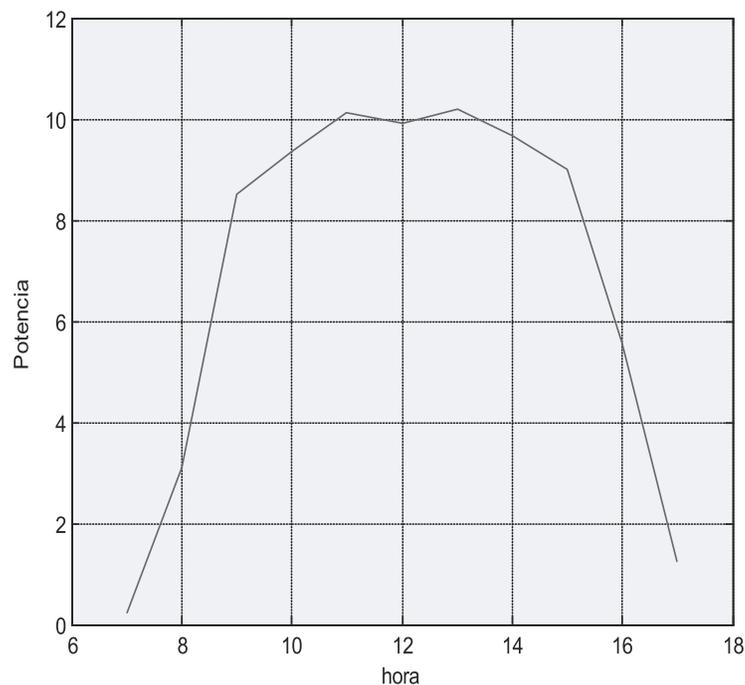


Figura 3. Variación de potencia Vs hora para una celda fija

Posteriormente se procedió a variar la posición de la celda en intervalos de 10° hasta obtener los mayores valores de potencia entregada, ver la tabla 2.

TABLA 2  
POTENCIA PARA LA CELDA EN POSICIÓN VARIABLE

Hora de la toma	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (W) obtenida
07:00	6,64	0,171	1,13544
08:00	17,20	0,445	7,65400
09:00	19,03	0,490	9,32470
10:00	19,86	0,511	10,14846
11:00	19,90	0,515	10,24850
12:00	19,66	0,505	9,92830
13:00	20,00	0,514	10,28000
14:00	19,80	0,509	10,07820
15:00	20,10	0,515	10,35150
16:00	18,92	0,486	9,19512
17:00	15,82	0,406	6,42292

Graficando estos valores obtenidos en la figura 4.

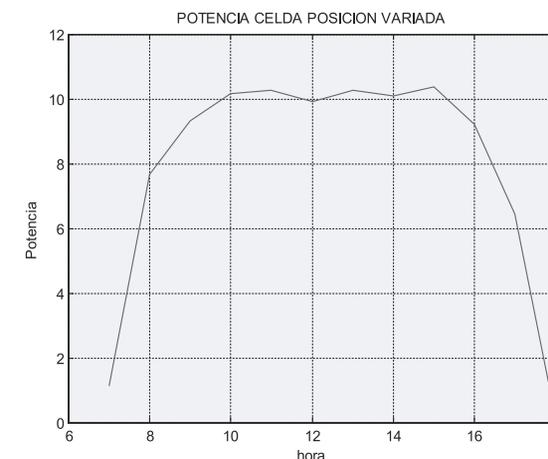


Figura 4. Variación de potencia vs hora para celda con seguimiento solar

### 5. CÁLCULO DEL INCREMENTO EN VATIOS HORA (WH) PARA SEGUIMIENTO SOLAR

Para determinar el trabajo en vatios hora (wh) entregado por el panel solar cuando se efectúa el seguimiento solar y su % de incremento respecto a un sistema fijo, se debe obtener la cantidad de vatios hora (wh) entregados por la celda en condición fija y móvil durante un día, luego obtener la diferencia entre ellos. Para tal fin se utilizó la técnica de integración numérica de la regla de los trapecios [6], con el fin de encontrar el área bajo la curva de potencia vs. hora, cuya suma de segmentos indicará la producción de trabajo para el total de horas en el que se realizaron la toma de muestras.

$$Area = \left( \frac{b - a}{n} \right) \left[ \frac{f(x_0) + f(x_1)}{2} + \dots + \frac{f(x_{n-1}) + f(x_n)}{2} \right]$$

Donde a y b son los valores inicial (06:00R) y final (18:00R) respectivamente sobre el eje x (tiempo), y n es el número de intervalos que para este caso es 11. Obteniéndose un total de 76,0573 wh para el área bajo la curva de la figura 3 y 94,2050 Wh el área bajo la curva de la figura 4, con una diferencia en la producción de Wh total para el periodo de muestreo igual a 18,147 wh, con un incremento del porcentaje de Wh de:

$$incremento = \frac{18,147 Wh \times 100\%}{76.0573 Wh}$$

$$incremento = 23.8605\% \quad incremento = 23.8605\%$$

Se debe considerar que esta experimentación se realizó con el Sol a una declinación de  $-11^\circ$  sur. Si se tiene en cuenta que la declinación aumenta hacia el sur y hacia el norte hasta unos  $\pm 23.4^\circ$ , la ventaja de mayor captación de energía la tiene un seguidor solar respecto a un panel fijo, lo cual implica potencialmente un mayor incremento de la energía. Por lo tanto, el seguimiento del Sol es un método viable para mejorar la eficiencia de un sistema fotovoltaico.

## 6. DESARROLLO DEL SEGUIDOR SOLAR

Dado que el propósito del circuito es usar la misma energía de la batería de almacenamiento, se utilizó un regulador de voltaje KA7805 para transformar los 10VDC de la batería al nivel lógico de 5VDC de alimentación a los circuitos digitales. Se efectuó un estudio previo de las características de cada uno de los dispositivos a utilizar y el consumo de corriente durante su funcionamiento de tal manera que no sobrepasara el máximo de corriente de 1 amp entregada por el KA7805.

El principal dispositivo electrónico dentro del proyecto es el DSPIC30F4013, el cual es un dispositivo programable de alto rendimiento y velocidad, que combina un microprocesador de 16 bits con un procesador de señales digitales (DSP), consta de puertos digitales y análogos, los cuales pueden ser seleccionados como entradas o salidas del dispositivo. Sus principales características son:

Además de poseer circuitos detectores de polaridad, resistencias *pull up*, módulo de comunicación UART, I2C y la cantidad de puertos suficientes para la conexión con los demás dispositivos del diseño.

TABLA 3  
CARACTERÍSTICAS DSPIC4013

Características	Datos
Tamaño de memoria FLASH	48 KB
Tamaño memoria EEPROM	1.024 bytes
Tamaño memoria RAM	2.048 bytes
Líneas de E/S	30
Entradas ADC	13
Temporizadores	5
Canales PWM	4
Frecuencia del reloj	40 MHz

Se escogieron dos motores DC, el primero con un torque de 14 Kg/cm y 150 r.p.m. y el segundo con un torque de 18 Kg/cm y 80 r.p.m. para el posicionamiento en dos ejes de libertad, siendo los motores de menor revolución, alto torque y menor consumo de potencia obtenidos en el mercado nacional con la ventaja de incluir encoder incremental de efecto *hall*, para el control de posición.

Para la habilitación, control de sentido de giro y parada de los motores se seleccionó el circuito L298 mediante el cual se pueden controlar ambos motores. Este circuito maneja un máximo de 4 amperios (2 amp por cada circuito motor) cubriendo las estimaciones de consumo durante la operación del sistema.

Para efectuar la predicción de la posición del Sol es necesario el suministro de tiempo real al microcontrolador. Para ello se usó el reloj digital DS1307, el cual entrega las variables de mes, día, hora, minuto y segundo; esto lo hace mediante el sistema de comunicaciones serial I2C ampliamente usado en las comunicaciones digitales.

Para mantener el seguimiento dentro de unos parámetros de rotación se implementaron unos interruptores finales de carrera que garantizan que durante la rotación en los dos grados de libertad del seguidor, no se sobrepasen los límites de posición angular del engranaje de azimut y engranaje de elevación. Asimismo, son una guía para el reposicionamiento en condición inicial para seguimiento solar al inicio de cada día. Los finales de carrera están colocados en paralelo para cada engrane y mediante topes metálicos debidamente fijados en los puntos límite de rotación.

Cuando el pulsador está abierto, en el puerto de entrada la señal es de 5 Voltios que corresponde al voltaje lógico del DSPIC, y cuando el pulsador se cierra, la señal se va a tierra gracias al uso de las resistencias *pull ups* internas del microcontrolador, como lo muestra la figura 5 donde las líneas punteadas corresponden a la parte del circuito de final de carrera en el DSPIC y las otras a los interruptores en paralelo.

Estos cambios de estado son detectados en puertos con denominación CN (Change Notification) en el DSPIC, los cuales se configuran para generar una alerta de interrupción y basados en un algoritmo de control, tomar una decisión.

Se incluyó el uso del GPS PG31 para la toma de datos en latitud y longitud en el sitio de instalación permitiendo almacenar estas variables en la memoria EEPROM del DS1307 o del DSPIC4013 como datos para la inicialización del seguidor.

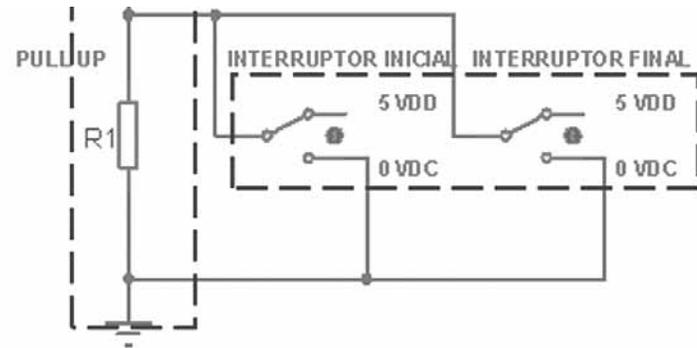


Figura 5. Circuito eléctrico de los finales de carrera

### 6.1 Diseño de la tarjeta de control

La tarjeta de control se diseñó mediante el software Proteus 7 professional y Ares PCB, con unas dimensiones de 10,1 cm x 9,6 cm, optimizando espacio y siendo impresa a doble capa. También se consideraron los niveles máximos de voltaje y corriente para cada uno de los diferentes dispositivos.

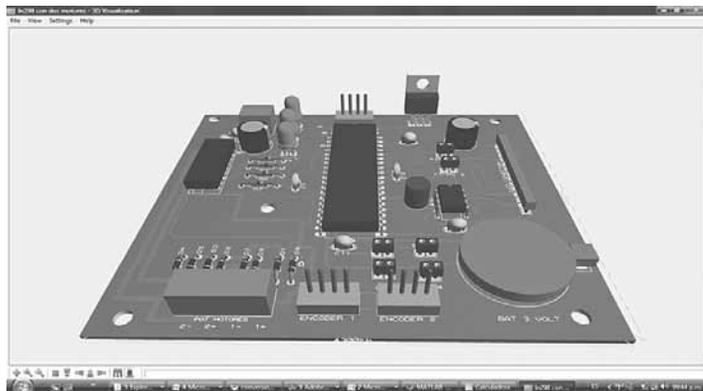


Figura 6. Diseño tarjeta de control

### 6.2 Diseño sistema mecánico

El sistema que permite el movimiento en azimut, se basa en una porción de engrane de 200° de apertura angular, permitiendo 10° adicionales de libertad de movimiento en ambos sentidos de rotación ya que el mecanismo rota usualmente 180° sobre el plano horizontal.



Figura 7. Rotación en ángulo de azimut

La relación entre eje del motor 1 encargado del movimiento en azimut y el engranaje reductor es de 67:1, cada señal (A o B) del encoder entrega 16 pulsos por vuelta, por lo tanto se tiene que el total de pulsos por vuelta del piñón que está en el eje reductor es  $67 * 16 = 1072$  pulsos. Ahora bien, si una vuelta del piñón es igual a 1072 pulsos, se tendrá que las cinco vueltas requeridas para mover el engrane 180° son equivalentes a 5360 pulsos. Siendo la conversión de ángulo azimut a pulsos de encoder:

$$Pulso1 = \frac{\text{grados azimuth} * 536}{18}$$

El movimiento de elevación del panel solar se efectúa mediante una porción de engrane de 110° grados de apertura angular y un piñón conductor del motor 2 (elevación). La relación entre eje del motor 2 y el engranaje reductor para este caso es de 131:1, donde cada señal (A o B) del encoder entrega 16 pulsos por vuelta, por lo tanto en este caso se tiene que el total de pulsos por vuelta del piñón que está en el eje reductor es  $131 * 16 = 2096$  pulsos. Ahora bien, si una vuelta del piñón es igual a 2096 pulsos, considerando una relación 10:1 entre engrane y piñón se tendrá que con 2,5 vueltas del piñón el engrane se mueve un  $\frac{1}{4}$  de vuelta (90°) equivalentes a 5240 pulsos de encoder 2. Siendo la conversión de ángulo en elevación a pulsos de encoder 2:

$$Pulso2 = \frac{\text{grados elevación} * 524}{9}$$

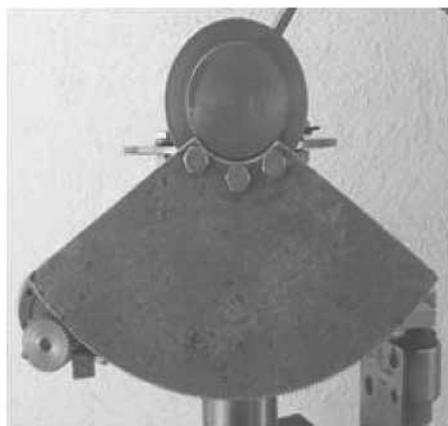


Figura 8. Rotación en ángulo de elevación

### 6.3 Control de posición motores

Para determinar en qué posición se encuentra el panel durante el seguimiento del Sol, es indispensable el uso de un sensor que indique posición angular de los motores. Para ello se usa el encoder incremental el cual envía un tren de pulsos al DSPIC.

El DSPIC usado en el proyecto tiene un módulo de control de interrupciones externas por detección del flanco de subida o flanco de bajada de la señal de voltaje enviada por el encoder, con una capacidad de recibir hasta 3 interrupciones externas denominadas INT0, INT1 e INT2.

Cada puerto habilitado para interrupción externa tiene un circuito detector de flanco y un multiplexor. La detección de polaridad de flanco puede ser configurada mediante el registro de programación de 16 bits INTCON2 cuyos tres primeros bits son para la configuración de las interrupciones del DSPIC4013. La señal de pulsos del encoder 1 (azimut) y encoder 2 (elevación) llega a los puertos RA11 (INT0) y RD8 (INT1) del DSPIC respectivamente. Los cuales al igual que todos los puertos de entrada y salida del DSPIC tienen por diseño entradas Schmitt Trigger para mejor inmunidad al ruido.

La señal de pulsos del encoder 1 (azimut) y encoder 2 (elevación) llega a los puertos RA11 (INT0) y RD8 (INT1) del DSPIC respectivamente. Cuando se detecta un flanco en el puerto configurado, se genera una bandera que implica que el procesador central debe suspender todo lo que esté haciendo y proceder a atender la interrupción.

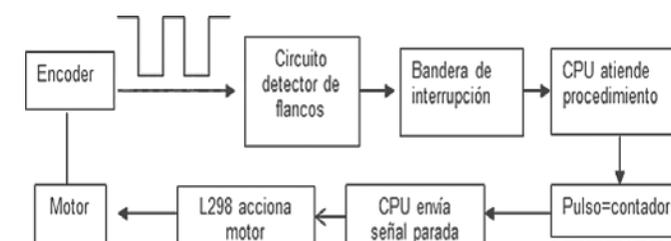


Figura 9. Control de posición motor por lazo cerrado

Dentro del procedimiento de interrupción, mostrado en la figura 9 se inicia un contador que se incrementa desde cero por cada evento de interrupción que ocurre, y se realiza un algoritmo de tal manera que una vez el contador iguale el valor de pulsos calculado para el correspondiente ángulo de movimiento, una variable cambie su estado, y este cambio de estado implique parar el motor, girar en un sentido u otro, etc.

El siguiente es un segmento del programa de control desarrollado en mikropascal en el cual al ocurrir la interrupción de flanco de subida en el puerto INT0 se incrementa un contador, y una vez este contador iguala el valor de la variable que determina la cantidad de grados que debe moverse un motor, se toman una serie de acciones basadas en algoritmos de control.

```

procedure iniext0; iv IVT_ADDR_INT0INTERRUPT;
begin
inc(contador1);
led3:=1;
  if final1=0 then
  begin
stop1;
bandera1:=0;
delay_ms(100);
INT0IF_bit:=0;
exit;
end;
  if contador1=pulso1 then
  begin
bandera1:=0;
INT0IF_bit:=0;//limpia la bandera
end;

```

**6.4 Diagrama de bloques del sistema**

En la figura 10 se observa el diagrama de bloques del controlador del panel solar, allí se puede apreciar cómo la batería de 10 V alimenta el regulador de voltaje KA7805, el cual a su vez entrega el voltaje de precisión de 5VDC al reloj (DS1307), al microcontrolador (DSPIC30F4013), puente H L298 y LCD; así mismo, el microcontrolador recibe los datos de fecha y hora del reloj, y los datos de posición geográfica del GPS.

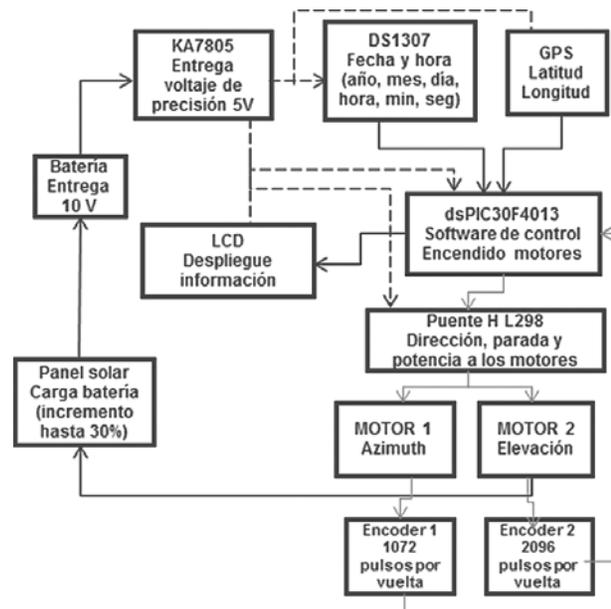


Figura 10. Diagrama de bloques del sistema

El software de control de predicción solar se ejecuta en el microcontrolador, el cual ordena el despliegue de la información en la pantalla LCD, y también da la orden de encendido de los motores al puente H (L298), el cual toma esta información y transmite órdenes de dirección, paradas y suministro de potencia a los dos motores, estos a su vez con el movimiento de sus respectivos encoder realizan el lazo de retroalimentación hacia el microcontrolador con el valor de los pulsos por vuelta (1072 pulsos para el motor 1 y 2096 pulsos para el motor 2); también en este punto ambos motores (motor 1 para azimut y motor 2 para elevación) transmiten las órdenes provenientes del puente H (L298), los cuales se convierten en movimientos mecánicos que finalmente moverán el panel solar realizando el seguimiento solar, para que este a su vez efectúe el cargue de la batería de 10 V.

**7. VALIDACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS**

Los datos de azimut y elevación entregados por el diseño para el día 06 de marzo de 2011 entre las 06:00R y 18:00R en Lat 10° 23' 26.9" N con Long 75°31'57.2" W se correlacionaron con el programa GOLDEN HOURS disponible en Internet para comparar y validar los datos obtenidos. La tabla 4 corresponde tanto al software desarrollado como a los datos obtenidos del programa GOLDEN HOURS:

TABLA 4  
COMPARACIÓN DE DATOS OBTENIDOS

Hora	Elevación software	Elevación Golden Hours	Azimuth software	Azimuth Golden Hours
06:00	-3.7°	-3.6°	104.2°	104.7°
07:00	10.8°	10.7°	105.6°	106.16°
08:00	25.1°	25.02°	108.2°	108.0°
09:00	39.1°	38.99°	112.7°	113.4°
10:00	52.5°	52.2°	120.8°	121.7°
11:00	64.2°	63.83°	137.4°	138.6°
12:00	70.9°	70.3°	171.8°	172.6°
13:00	67.5°	66.9°	212.7°	212.0°
14:00	57.0°	56.5°	234.7°	233.8°
15:00	44.0°	43.64°	245.1°	244.2°
16:00	30.1°	29.85°	250.6°	249.8°
17:00	15.9°	15.66°	253.8°	253.07°
18:00	1.4°	1.2°	255.6°	254.9°

Con los valores obtenidos se efectúa una gráfica comparativa de curvas en la figura 11 para los valores en elevación.

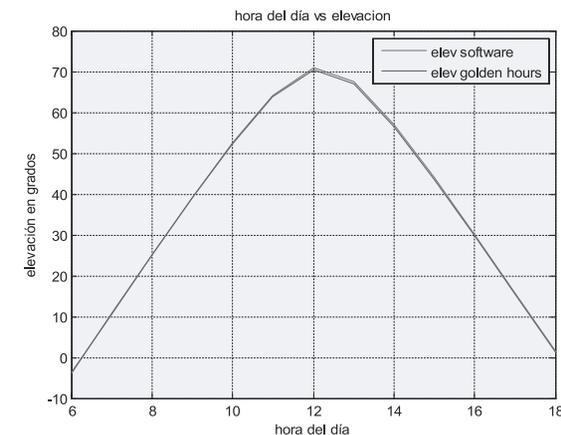


Figura 11. Correlación de datos en elevación

Para determinar el error entre ambas curvas se efectúa el método de error cuadrático medio, que viene dado por:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_g - y_i]^2}$$

Donde  $n$  es el número de términos,  $y_g$  es el estimador, que para este caso son los valores de elevación del programa Golden Hour y  $y_i$  el parámetro a estimar que son los valores del programa de predicción elaborado. Mediante Matlab se obtiene un error cuadrático medio de elevación entre las curvas de  $\varepsilon = 0,3425$ . Así mismo se efectúa una gráfica comparativa de curvas en la figura 12 para los valores en azimut. Usando los mismos procedimientos empleados en elevación se obtiene un error cuadrático medio de azimut de  $\varepsilon = 0,7901$  con respecto al programa GOLDEN HOUR.

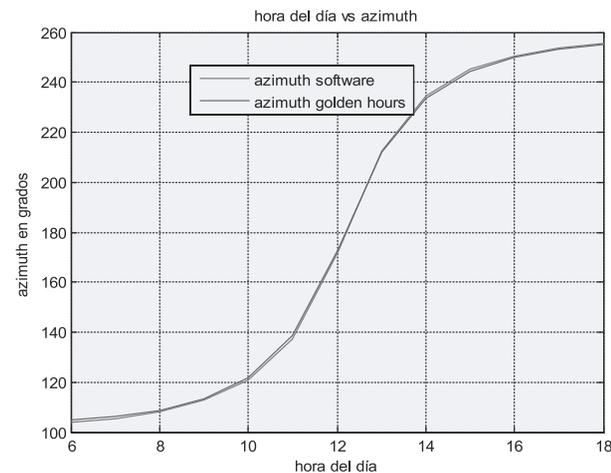


Figura 12. Correlación de datos en azimut ( $\psi$ )

## 8. CONCLUSIONES

El proceso investigativo y un estudio astronómico sobre el movimiento solar y las variables que lo afectan fueron claves para comprender cómo la posición angular alfa  $\alpha$  de la Tierra respecto al Sol, declinación  $\delta$ , ecuación del tiempo  $E_t$ , posición geográfica del observador y el ángulo horario  $\omega$  afectan los cambios en azimut y

elevación con el paso del año, permitiendo plantear adecuadamente los algoritmos de control necesarios y su correcta interacción con las ecuaciones matemáticas desarrolladas para la predicción de la posición.

Con el conocimiento de las variables requeridas y basados en un principio de economía y funcionalidad se seleccionó el GPS PG31, reloj digital DS1307, encoder de cuadratura de efecto *hall* e interruptores de final de carrera, los cuales le permitieron al prototipo tener menor dependencia del usuario para el ingreso de parámetros, obteniendo la información necesaria para el proceso lógico de predicción en tiempo real.

Se desarrolló un programa en Matlab para resolver las ecuaciones planteadas, el cual fue integrado a un programa de control diseñado en mikropascal para DSPIC, en el cual se implementaron una serie de algoritmos para modelar el comportamiento del seguidor solar y ajustarlo al movimiento cíclico y cambiante del Sol durante todo el año. El desempeño de la interacción entre las ecuaciones de predicción y los algoritmos de control desarrollados se comparó y validó con GOLDEN HOUR, un software en Internet ampliamente usado para determinar la posición del Sol en aplicaciones de fotografía. Evaluándose el error de mínimos cuadrados en elevación  $\varepsilon = 0,3425$  y en azimut  $\varepsilon = 0,7901$ .

El seguimiento solar mediante la variación del ángulo de elevación y azimut de las celdas fotovoltaicas es un método viable para el incremento de la potencia a entregar. Durante la experimentación se obtuvo un aumento en la eficiencia de potencia de 18,15% para una declinación solar de  $-11^\circ$  sur. Si se tiene en cuenta que la declinación aumenta hacia el sur y hacia el norte hasta unos  $\pm 23.4^\circ$ , la ventaja de mayor captación de energía la tiene un seguidor solar respecto a un panel fijo, lo cual implica potencialmente un mayor incremento de la energía.

El control inteligente desarrollado para un seguidor solar, efectúa una adecuada predicción de la posición del Sol y permite posicionar la celda mediante la tarjeta de control diseñada que integra acertadamente los componentes electrónicos necesarios siendo una solución viable para el incremento de potencia entregada de los sistemas fijos instalados en Unidades de la Armada Nacional.

## REFERENCIAS

- [1] Bishop James Rossow William. Spatial and temporal variability of global

- surface solar irradiance. En: Journal of Geophysical Research. New York. Septiembre 1991. Vol. 96. No. C9. p. 16.841.
- [2] Spencer J. W. Fourier Series Representation of the Position of the Sun. 1971. p. 172.
- [3] Unidad de Planeación Minero Energética. Atlas de Radiación Solar de Colombia. Medellín. 2005.
- [4] Portilla José. Elementos de la astronomía de posición. 2001 Bogotá: Universidad Nacional. No. 1.
- [5] Gasquet Héctor. El panel fotovoltaico. En: Manual teórico y práctico sobre los sistemas fotovoltaicos. Octubre 2004. El Paso, Texas. p. 31.
- [6] Larson Ron, Hostetler Robert, Edwards, Bruce. Integración. En: Cálculo. 2006. 8va. edición. p. 309.

## ARTÍCULO

## ANÁLISIS MULTITEMPORAL (1937-2010) DE LA LÍNEA DE COSTA DE LA ISLA DE MANZANILLO, BAHÍA DE CARTAGENA - COLOMBIA

William Gómez Pretelt\*  
marcoverne@gmail.com

Juan Carlos Olarte Guzmán\*  
juankko@gmail.com

Andrés Felipe Carvajal Díaz\*\*  
andresfcarva@hotmail.com

Fecha de recepción: junio de 2011, Fecha de aceptación: septiembre de 2011

**Resumen:** El propósito de este estudio consistió en determinar y describir la tasa de avance\retroceso actual de la línea de costa de la Isla de Manzanillo, partiendo de datos obtenidos por sensores remotos, durante el periodo comprendido entre los años 1937 y 2010, donde se evidenció un retroceso moderado de la línea de costa, con un lento proceso erosivo y de acción constante. Para este análisis se debió establecer, comparar y evaluar las variaciones a través de imágenes aéreas. Se utilizaron programas digitales, que facilitaron el procesamiento de estas imágenes, las cuales admiten la comparación de la línea de costa con un mínimo grado de error. Se desarrolló con un eje temático sobre procesos costeros y en concordancia con el estudio "Análisis multitemporal (1937-2010) de la línea de costa de la Isla de Manzanillo, por efecto de oleaje y procesos antrópicos" (Bahía de Cartagena - Colombia).

**Palabras clave:** Acreción, Erosión, Aerofotografía, Línea de costa, Georreferenciación.

**Abstract:** The purpose of this study consisted on determining and describing the coast line advance and retreat rates of Manzanillo Island, using remote sensors data within 1937 and 2010, where a moderate setback of the coast line was evidenced, with a slow erosive process of constant action. To get this analysis were compared and evaluated the variations using aerial images. Digital programs were used to facilitate the procedure of these images; they admit the comparison of the coast line with a minimum degree of error. It was developed with a thematic axis on coastal process and in agreement with the "Multitemporal Analysis (1937-2010) of Manzanillo Island coast line, due to wave and anthropic effects".

**Key words:** Accretion, Erosion, Airphotography, Coastline, Geographic references.

\* Teniente de Navío de la Armada Nacional, Profesional en Ciencias Navales. Alumno del programa de Oceanografía Física, Escuela Naval "Almirante Padilla".

\*\* Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Dirección General Marítima.

## INTRODUCCIÓN

La fotografía aérea es hoy una de las herramientas más útiles en los estudios de dinámica y evolución costera, debido a la alta resolución de las imágenes; la posibilidad de comparar imágenes de la misma zona en distintas fechas para observar la evolución de una línea de costa, la facilidad de su uso a través de diferentes programas y el precio relativamente bajo.

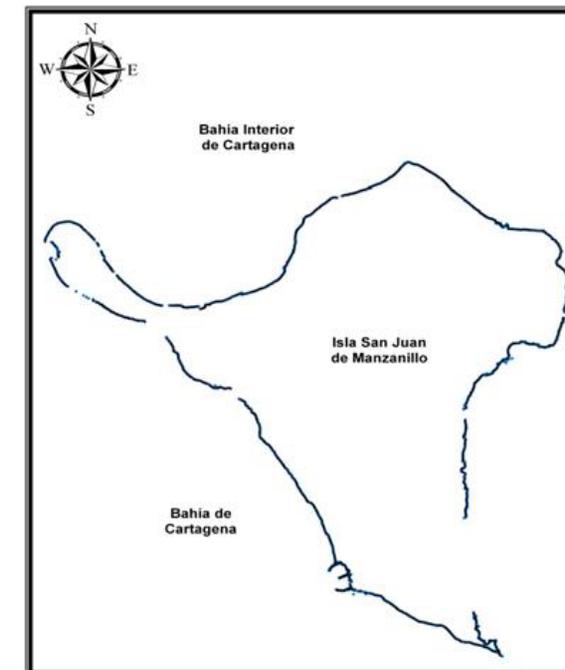
De acuerdo con el estudio “Fotointerpretación aplicada al análisis dinámico de la línea de costa” [1], el contacto mar-tierra determinado por el nivel del mar instantáneo en el momento que se toma la fotografía es probablemente la mejor conceptualización de lo que es la línea de costa en fotografía aérea, debido a que esta es constante y dinámica y está sujeta a oscilaciones diversas. El indicador más empleado para efectuar esta aproximación es la línea de pleamar o alcance medio de la pleamar sobre la playa, identificable por el cambio de tono que corresponde a la huella dejada en el sedimento por la pleamar anterior a la toma de la fotografía, llamada marca de agua.

Sin embargo, si se parte de fotografías georreferenciadas y obtenidas las líneas de costa de distintas fechas, la comparación entre ellas y la cuantificación de las tasas de cambio se lleva a cabo mediante herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) [2], siguiendo los procedimientos que se indican en este artículo con el uso del DSAS (Digital Shoreline Analysis System) [3]. La representación de los datos obtenidos permite obtener una idea cuantitativa bastante aproximada de las variaciones de la línea de costa.

## 1. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

Se efectuó una estimación de las tendencias evolutivas históricas y recientes de la línea de costa de la Isla de Manzanillo desde el año 1937 hasta el año 2010, tomando como base la información proporcionada por las fotografías aéreas del IGAC, las ortofotografías digitales del año 2005 entregadas por DIMAR-CIOH, y se determinó la línea de costa actual (2010), a través de un levantamiento con sistemas de posicionamiento global diferencial DGPS portátil, de alta precisión, Marca “Topcon”, referencia FC-120 con señal de rectificación en tiempo real de señal “Ovni Star”, con el cual se obtuvo la forma de la isla, entre el límite de tierra-agua, bordeando el

contorno de la línea de costa. Los datos obtenidos en este levantamiento contienen la información de posición cada 5 segundos, con una alta precisión de trabajo (25 cm aprox.) en zona abierta. Se obtuvieron un total de 3679 posiciones que finalmente fueron incorporadas en un sistema de información geográfica (ArcGis 9.3) (figura 1).



**Figura 1.** Espacialización del levantamiento topográfico realizado a la Isla de Manzanillo mediante el software ArcGis 9.3

Fuente: Adaptación de datos en ArcGis 9.3

Posterior a esto se efectuaron las comparaciones necesarias para proceder al cálculo de la tasa de avance/retroceso de la línea de costa, mediante fotogrametría y tratamiento de imágenes digitales y con esto se obtuvieron los resultados estadísticos con lo cual se trazó el “límite técnico” tierra/agua.

## 2. SELECCIÓN Y FILTRO DE FOTOGRAFÍAS

Las primeras dos fotografías entregadas en formato “Tiff” por el IGAC y que datan de un vuelo realizado el 27 de noviembre de 1937 y conservan las condiciones óptimas

para el análisis, conforman un total de 70 fotografías seleccionadas inicialmente para posterior filtro. A partir de esta selección y con base en la fotointerpretación, verticalidad y facilidad para el trazado del límite de la playa y determinación técnica de las unidades geomorfológicas de la Isla de Manzanillo en la Bahía de Cartagena, se realizó un primer filtro en donde se obtuvieron 33 fotografías espaciadas en tiempo y con las condiciones mencionadas. Posteriormente se determinó la selección final mediante un segundo filtro, con la identificación de edificaciones, sistemas costeros de Cartagena y estructuras fijas, de donde pudieran establecerse puntos de control terrestre (Ground Control Points – GCP’s) [4] para la georreferenciación [5] (tabla 1).

TABLA 1  
SELECCIÓN FINAL DE FOTOGRAFÍAS PARA GEORREFERENCIAR

VUELO	SOBRE	ESCALA. APROX.	CÁMARA	FECHA TOMA	FOTOS	CANT.	FUENTE
90116	1:33000	P-21	377	1937	1		IGAC
R-202	114	1:15.000	P-21	1948	74	1	CIOH
M-18	47	1:10.000	FAIRCHILD K17	1954	1556	1	IGAC
R-611	29	1:18000	TOPAR	1968	178	1	CIOH
M-1444	109	1:30000	T11	1974	47280	1	CIOH
C-2305	18	1:30000	ZEISS RMK 15/22	1987	24	1	CIOH
C-2525	36816	1:9900	ZEISS RMK 15/23	1993	233	1	IGAC
C-2761	40259	1:10330	ZEISS RMK 15/23	2005	61 a 65	5	CIOH
13001000151912							
-2008	SN	---	ULTRACAM-D	2008	1834/6/7/8	4	IGAC
<b>TOTAL</b>						<b>16</b>	

### 3. GEORREFERENCIACIÓN DE FOTOGRAFÍAS

La georreferenciación de las fotografías se realizó con el uso del software ArcGis versión 9.3, en donde se tomó como base de referencia la ortofotografía digital de alta resolución de la Isla de Manzanillo del año 2005, suministrada por DIMAR-CIOH y georreferenciada a través del sistema de coordenadas Magna-Sirgas, con origen en Magna Central. A partir de esta, se tomaron los puntos de control terrestre de cada una de las fotografías previamente seleccionadas, de las cuales se efectuó la comparación para amarrar dichos puntos al sistema de coordenadas en el cual se encuentran las ortofotografías digitales. Este procedimiento se desarrolló con la herramienta “Georeferencing” (figura 2).



Figura 2. Fotografía aérea del IGAC del año 1937, georreferenciada con base en la ortofotografía digital del año 2005

Fuente: IGAC

Se obtuvieron en cada año seleccionado los puntos de control con sus respectivos errores (residuales) de georreferenciación, que muestran a la medida en metros del ajuste entre ubicaciones reales (para este caso las contenidas en la ortofotografía DIMAR-CIOH, 2005) y las ubicaciones transformadas de los puntos (correspondientes al resto de fotografías aéreas) y el error cuadrático medio (Root Mean Square) [6], o sea, a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los errores individuales de las lecturas, entendido por tales sus diferencias respecto al valor medido que se adopta como valor verdadero. Dependiendo de la cantidad de puntos tomados para cada año se hizo un ajuste de primer orden y segundo orden polinomial lo que permitió realizar una redistribución del error con base en la cantidad de puntos tomados. El error promedio calculado fue de 0,92004 metros.

### 4. VECTORIZACIÓN Y OBTENCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA HISTÓRICA

Finalizado el proceso de georreferenciación se procedió a la espacialización de las líneas de costa. Para el manejo de los datos espaciales se creó un *Shapefile* (shp, modelo de datos con estructura simple que solo puede contener una clase de entidad),

en este caso por tratarse de una polilínea, se obtuvo geoméricamente cada una de las líneas de costa histórica y mediante el software ArcGis y a través de la barra de herramientas "Editor", se cargaron y se visualizaron los objetos. Una vez cargada la capa, en la barra editor se inició la espacialización de las líneas de costa caracterizadas geoméricamente en las fotos georreferenciadas (figura 3).



**Figura 3.** Espacialización de la línea de costa del año 1937, con base en la fotografía aérea georreferenciada del IGAC del año 1937

Fuente: Elaboración propia

## 5. CREACIÓN DE LA GEODATABASE

Se creó una geodatabase sobre una plataforma ArcCatalog. Todos los datos de entrada al módulo DSAS (Digital Shoreline Analysis System) se gestionaron dentro de la sección "Personal Geodatabase", archivos en formato "MDB" de Microsoft Access, que soportan el almacenamiento físico de información, dentro de esta los datos espaciales (Magna Central) son tratados como otro tipo de dato, por lo general como un tipo de dato geométrico que guarda la ubicación del objeto con relación al mundo físico y los tipos de datos nativos para el almacenamiento de los atributos o datos no espaciales, que también sirve como lugar de archivo de los resultados y la estadística. La base de datos geográficos proporciona también una estructura que permite la aplicación de la topología.

## 6. INTRODUCCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

Después de creada la "Personal Geodatabase" se incorporaron los *Features Class*, los cuales son conjuntos homogéneos de común característica en los que cada uno tiene la misma representación espacial tales como puntos, líneas o polígonos y un conjunto de columnas de atributos. Todos los datos de las líneas de costa espacializadas deben residir en una clase de elemento único dentro de una geodatabase personal. Para efecto de unificar las posiciones de las líneas de costa del levantamiento efectuado con DGPS se tomó como referencia el nivel más alto de la marea visible. Se crearon unos atributos para que el sistema pudiera realizar los cálculos respectivos, como fecha, e incertidumbre de posición (figura 4).

OBJECTID *	Shape *	Id	FECHA	EXACTITUD	Shape Length
10	Polyline	1	01/01/1937	0	1661,25471168586
12	Polyline	2	01/01/1948	0	1709,61161909333
14	Polyline	3	01/01/1954	0	1674,52196507947
15	Polyline	4	01/01/1968	0	1706,73140045094
17	Polyline	5	01/01/1974	0	1766,99485153885
23	Polyline	6	01/01/1987	0	1736,64480319229
24	Polyline	7	01/01/1993	0	1747,31633850326
26	Polyline	8	01/01/2005	0	2096,06398027488
27	Polyline	9	01/01/2008	0	1906,16908092888
28	Polyline	10	01/01/2010	0	2100,27912302769

**Figura 4.** Feature Class de las líneas de costa a analizar a través del módulo DSAS Fuente: ArcGis Versión 9.3

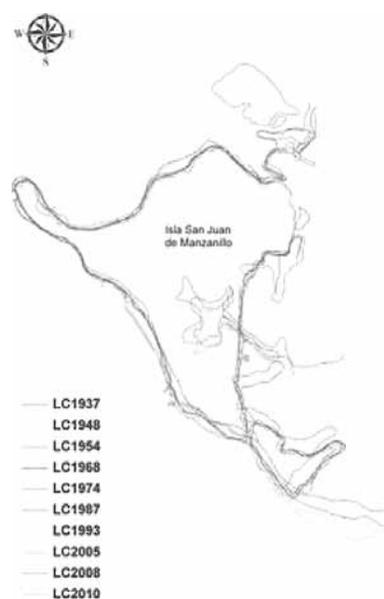
## 7. INTRODUCCIÓN DE LA LÍNEA BASE

La línea base es la referencia que utiliza el módulo a partir de la cual se hacen las mediciones y comparaciones de las líneas de costa introducidas y se realizan los respectivos transectos que interceptarán las líneas de costa. Esta se creó como un *shapefile* a partir de un *buffer* de 70 metros sobre la línea de costa digitalizada del año 1937, con el criterio de que esta se ajustaba mejor a la forma de las diferentes líneas de costa y sus formas no generaban ángulos muy agudos que dificultaran que los transectos posteriormente dejaran de interceptar alguna línea de costa. Fue creada *onshore* de las líneas de costa. Se hizo necesario asignar atributos específicos que se incorporaron en los cálculos, de manera que las estadísticas de la velocidad de cambio se dieran como erosión negativa y la acumulación como positiva.

## 8. COMPARACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

Una vez obtenidas todas las líneas de costa se midieron las variaciones empleando

la extensión DSAS de ArcGis, que permitió calcular parámetros que ayudan a determinar el estado evolutivo en el intervalo de tiempo estudiado; las variaciones pueden ser lineales o variables asociadas a intervenciones antrópicas puntuales o eventos energéticos aislados (figura 5).



**Figura 5.** Líneas de costa espacializadas para ser analizadas a través del módulo DSAS

Para tener un mejor tratamiento de los datos obtenidos a través del módulo DSAS, se dividió la Isla de Manzanillo en tres zonas (norte, oeste y sur). Con ayuda de los *Features Class* creados para las líneas de costa y la línea base, se construyeron a través del módulo DSAS los transectos con parámetros de longitud de 120 m. y espaciamiento de 65 m, los cuales se constituyeron en líneas perpendiculares a la línea base creada, con el fin de obtener las estadísticas correspondientes a cada una y poder determinar las respectivas tasas de retroceso y avance de las líneas de costa a analizar (figura 6). Posteriormente se introdujo la información necesaria para los metadatos.

Para calcular las tasas de variación de la línea de costa a partir de los datos obtenidos se aplicó el método estadístico "Tasa de Punto Final" [7], (*End point rate*, *EPR*) [8] que consiste en considerar únicamente la línea de costa más antigua y la más reciente,



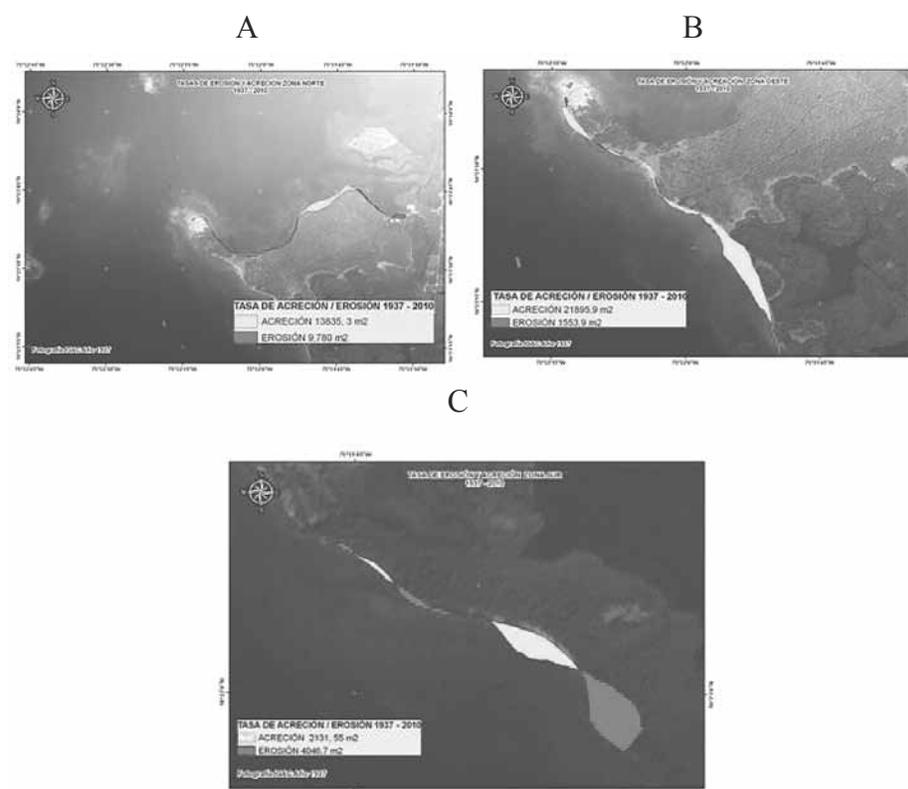
**Figura 6.** Transectos elaborados para la zona oeste de la Isla de Manzanillo en DSAS

y dividir la distancia entre ellas por el número de años transcurridos. Se trata de un método ampliamente utilizado en los estudios costeros tradicionales, aunque tiene la desventaja de no incluir las líneas de costa intermedias.

**Zonas de erosión y acreción.** Teniendo en cuenta que ha habido cambios, el estudio se centró en verificar cómo han sido los comportamientos de erosión y acreción [9] (para el presente estudio acumulación de sedimentos sea por causas antrópicas y/o hidrodinámicas), por medio de la superposición de las áreas obtenidas para ser comparadas con el área actual (2010), y de esta forma conocer en cuáles se presenta cada uno de los indicadores anteriormente mencionados y dimensionarlos.

**Tasas de cambio final.** El método utilizado para calcular las tasas de cambio de la costa se basa en la medición de las diferencias entre las posiciones de la costa a través del tiempo, sobre los transectos [10]. Se obtuvo una estimación total de las áreas que presentan erosión y acumulación de sedimento en los rangos de tiempo de comparación seleccionados. A continuación el resultado de estas tasas en el rango de estudio entre los años 1937 y 2010 (figura 7).

En la zona norte se observan sectores de acumulación de sedimento a causa probablemente de procesos antrópicos, como el relleno efectuado durante la construcción de la Casa de Huéspedes Ilustres, en el sector del Fuerte San Juan de



**Figura 7.** Análisis histórico del comportamiento de la línea de costa, para el periodo de tiempo comprendido entre 1937 y 2010. Las zonas en color blanco corresponden a acreción mientras que las de color gris a zonas con erosión, estos valores corresponden a la tasa de cambio en todo el periodo analizado. A. Zona Norte, B. Zona Oeste, C. Zona Sur en DSAS

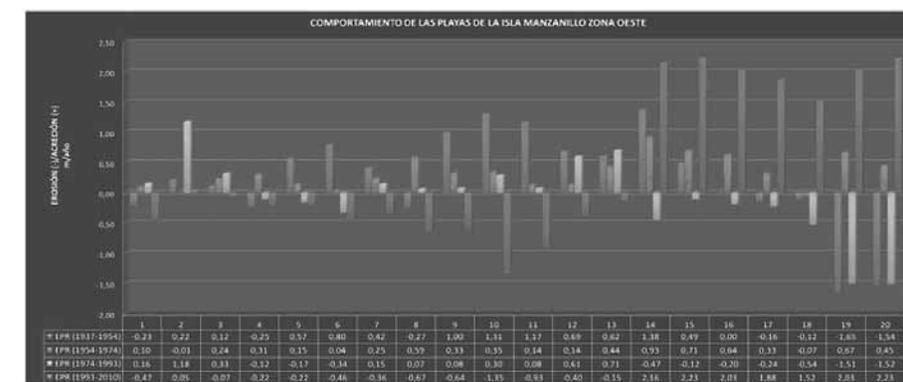
Manzanillo y/o como el relleno de las playas en el sector noreste de la isla del año 2005, con una acumulación positiva de sedimento de 13835,3 m<sup>2</sup>, por otro lado se han presentado signos de erosión significativa en el resto de las playas del norte de la isla con un balance negativo de 9,780 m<sup>2</sup>. Para la zona oeste predominó un fenómeno de acreción sedimentaria producto de procesos antrópicos, tales como los rellenos efectuados en las instalaciones de Guardacostas, el “Oasis” y el Fuerte San Juan de Manzanillo, obteniendo una tasa de cambio total de 21895,9 m<sup>2</sup>, y una tasa de erosión de 1553,9 m<sup>2</sup>. Para la zona sur predominó un efecto erosivo. En este sector de la isla se encuentra una zona de manglar, la cual ha presentado deforestación, dando como resultado una tasa de retroceso de línea de costa de 4046,7 m<sup>2</sup>, y una tasa de acreción de 2131,55 m<sup>2</sup>.

**Estadísticas.** Con el módulo DSAS implementado en el software ArcGis 9.3 y a través del análisis de los transectos antes mencionados, se observó el comportamiento de las líneas de costa en cada una de las zonas y con ellas se obtuvieron las tasas de avance y retroceso en m/año por los diferentes métodos que implementa DSAS, y de los cuales se puede analizar también el comportamiento puntual en un transecto determinado, con sus respectivos valores de acreción (valores positivos) y erosión (valores negativos) en m/año.

En la zona norte la máxima tasa de erosión se presentó entre los años 1954 y 1974 con un valor de -1,82 m/año; mientras que la mínima se presentó en el periodo entre los años 1993 y 2010 con un valor de -0,03 m/año. Para el fenómeno de acreción sedimentaria se obtuvo como resultado la máxima tasa en el periodo de 1993 al 2010 de 3,77 m/año y la mínima de 1954 al 1974 de 0,01 m/año.

En la zona oeste (figura 8) la máxima tasa de erosión se presentó entre los años 1937 y 1954, con un valor de -1,65 m/año (transecto 19); mientras que la mínima tasa se presentó entre 1954 y 1974 con un valor de -0,01 m/año (transecto 2). Para el fenómeno de acreción sedimentaria se obtuvo como resultado la máxima entre los años de 1993 al 2010 de 2,23 m/año (transecto 20) y la mínima entre 1937 y 1954 de 0,00 m/año (transecto 16).

En la zona sur la máxima tasa de erosión se encontró en el periodo entre los años 1974 y 1993, con un valor de -3,39 m/año; mientras que la mínima tasa se presentó en el



**Figura 8.** Tasas de erosión/acreción (m/año) para cada transecto en los cuatro intervalos de tiempo analizados para la línea de costa, sector oeste de la Isla de Manzanillo. Los valores negativos (-) corresponden a fenómenos de erosión y los positivos (+) a acreción en DSAS

periodo entre el año 1993 y 2010, con un valor de -0,06 m/año. Para el fenómeno de acreción sedimentaria se obtuvo como resultado la máxima tasa en el periodo entre los años de 1937 y 1954 de 3,43 m/año y la mínima entre los años 1954 y 1974 de 0,06 m/año.

**Resultados.** En el estudio "Análisis multitemporal (1937-2010) de la línea de costa de la Isla de Manzanillo, por efecto de oleaje y procesos antrópicos" (Bahía de Cartagena - Colombia), se presentan los resultados de la modelación, en el cual se encuentran discriminadas las máximas y mínimas tasas de avance y retroceso sedimentario, en los lapsos planteados para cada una de las zonas de la isla.

## 9. CONCLUSIONES

Los resultados del análisis multitemporal de la línea de costa de la isla, permiten afirmar de forma general que hasta la década de los años 70 las tasas promedio de erosión fueron mayores que las tasas de acreción, mientras que posterior a la década de los años 90 hasta el año 2010, se invirtió este comportamiento a causa de los múltiples procesos antrópicos. Sin embargo, el impacto de retroceso de la línea de costa por factores hidrodinámicos ha sido moderado, con un lento proceso erosivo y de acción constante.

La zona costera de la isla que recibe la mayor energía del oleaje es la zona oeste, debido a que incide casi de forma directa, excepto en donde la influencia de la barrera artificial con llantas de desechos y el bajo Manzanillo dan protección disminuyendo también la energía del oleaje, motivo por el cual se observa una tendencia erosiva, sin embargo los procesos antrópicos acaecidos han regenerado y mantenido las playas retornando en algunos sectores las porciones de playa afectadas.

La zona norte mantiene una tendencia erosiva debido a factores hidrodinámicos muy influyentes en costa como son los vientos, que al tener un *Fetch* limitado genera olas cortas, pero con aportes de energía constantes sobre el material no consolidado de este sector.

El sector sur de la isla ha sido el de mayor afectación por fenómenos erosivos, esto debido a factores como la desatención en cuanto a procesos de defensa costera y ausencia progresiva de manglar por deforestación, el cual cumple funciones de

disipación de energía. Por lo anterior, el crecimiento reciente (de las últimas dos décadas) del nivel de la bahía produjo erosión en esta parte desprotegida.

La constitución del frente litoral está sometida a un desgaste continuo con tendencia a la inestabilidad, donde el proceso sedimentario más permanente es el erosivo, con tendencia a continuar y marcado fuertemente por la estacionalidad.

La acción humana ha cambiado la morfología de la línea de costa de la isla, alterando en forma directa la hidrodinámica. Se puede afirmar que los procesos antrópicos generados en los últimos 350 años superan en gran medida a los relacionados con los procesos naturales.

## REFERENCIAS

- [1] Del Río L y Gracia J Artículo de Investigación "Fotointerpretación aplicada al análisis dinámico de la línea de costa". 2008. Universidad de Cádiz, España.
- [2] Molina A. Informe Técnico: "Evolución Geomorfológica de la flecha litoral de El Laguito, Cartagena, periodo comprendido entre 1945 y 2000". 2002. Cartagena de Indias, Colombia.
- [3] Thieler ER. Himmelstoss E. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0. An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File, extension for ArcView. Report 2008-1278.
- [4] Instituto Agustín Codazzi, Manual de Fotogrametría, Colombia. 2006.
- [5] Pérez JA. Apuntes de Fotogrametría. 2006. Universidad de Extremadura, España.
- [6] Gómez A. Flujo de trabajo en fotogrametría digital. Mapping, 1999. p. 53-62, N° 53.
- [7] Dolan R *et al.* Temporal analysis of shoreline recession and accretion. Journal of Coastal Research, 7(3). Año 1991. p. 723-744.
- [8] Morton R.A *et al.* National assessment of shoreline change: Part 1-Historical shoreline changes and associated coastal land loss along the US Gulf of Mexico. USGS Open-File Report. Año 2004. N° 2004-1043. p. 45.
- [9] U.S. ARMY. Coastal Engineering Research Center, Shore Protection Manual, Segunda edición, Hawaii, 1975.
- [10] Zambrano J. Trabajo de grado: "Estudio Línea de Costa Cayo Serranilla". Escuela Naval "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia, 2010.

## REGLAMENTO DE PUBLICACIONES ENAP

1. Los artículos se deben remitir al editor de la Revista *DERROTERO de la Ciencia y la Investigación de la ENAP*, en original impreso. Deben tener un tamaño de entre 7 y 15 páginas, escritas en computador, interlineado 1.5, letra Times New Roman, tamaño de la fuente 12 (referencias en 10). Además, se debe hacer llegar el artículo de un tamaño máximo de 1,1 MB en un disco compacto.
2. Los artículos serán sometidos a evaluación por dos jurados designados por el Comité Editorial, los cuales emitirán sus conceptos en forma separada. El Comité Editorial podrá aceptar el artículo con algunas modificaciones o podrá sugerir la forma más adecuada para una nueva presentación.
3. La primera página debe contener:
  - Título del artículo en español e inglés. Debe ser corto, específico e informativo.
  - Nombre del autor o autores especificando *e-mail* (nota al pie de la página, los títulos académicos, afiliación institucional, dirección, y origen de subvenciones y apoyos recibidos, así como teléfono fijo y móvil del autor principal).
  - Un resumen en español y en inglés, no mayor de ciento cincuenta (150) palabras, el cual debe concentrarse en los objetivos, métodos de estudio, resultados y conclusiones.
  - Igualmente deben identificarse entre tres y seis palabras clave en español y en inglés.
4. A partir de la segunda página inicia el cuerpo del artículo. Todas las referencias se deben numerar consecutivamente de acuerdo con el orden en que aparezcan en el texto. Para las cifras de las revistas debe incluirse en su orden, apellido e iniciales del nombre del autor(es); si son seis o menos, deben citarse todos; si son más de seis, solo deben mencionarse los tres primeros y escribir a continuación la abreviatura *et al.*; título del artículo, nombre de la revista (destacado), año de publicación, volumen (destacado) y número de la primera y última página del trabajo consultado.
5. Los cuadros se deben numerar consecutivamente y presentar uno por página, al final del texto. Lo mismo debe hacerse con las figuras, que deben llevar una numeración independiente a la de los cuadros. Las figuras se deben presentar en papel blanco y en tinta negra, las fotografías en papel brillante. Los datos estadísticos de curvas y gráficas en tramas en escala de grises. Cada cuadro o figura debe acompañarse de una leyenda que describa claramente el material. Los cuadros, las figuras y las fotografías deben ser originales del autor(es). Si son modificaciones o reproducciones de otro artículo, es necesario acompañarlos del permiso del editor correspondiente.
6. Los artículos deben ser enviados al editor con seis meses de anticipación.
7. Las opiniones expresadas en los artículos de esta revista son responsabilidad exclusiva de los autores.

# DERROTERO

REVISTA DE CIENCIA E INVESTIGACIÓN DE LA ENAP

## FORMATO DE CANJES

Nombres: \_\_\_\_\_ Apellidos: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_ Ciudad: \_\_\_\_\_ País: \_\_\_\_\_

Teléfono casa: \_\_\_\_\_ Teléfono oficina: \_\_\_\_\_ Teléfono móvil: \_\_\_\_\_

Correo Electrónico: \_\_\_\_\_ Ocupación: \_\_\_\_\_

Afiliación Institucional: \_\_\_\_\_

Nombre de la Revista de la Institución con la que se hacía el canje: \_\_\_\_\_

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

Favor enviar este formato debidamente diligenciado a la Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia, en la siguiente dirección: Bosque Manzanillo, Decanatura Académica - Centro de Investigaciones ENAP, o a la siguiente dirección de correo electrónico: gmayom@enap.edu.co

La Revista *DERROTERO* de la ENAP se publica anualmente.

## CLÁUSULA DE CESIÓN DE LOS DERECHOS PATRIMONIALES DE AUTOR

CEDENTE: \_\_\_\_\_

CESIONARIO: Revista Seriada *Derrotero*, *Revista de Ciencia e Investigación de la Escuela Naval "Almirante Padilla"*. ISSN 2027-0658

Yo \_\_\_\_\_ en calidad de

autor del artículo titulado: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ que se publicará en

la edición No. \_\_\_\_\_ de la Revista de Ciencia e Investigación de la ENAP, manifiesto que cedo a título gratuito la totalidad de los derechos patrimoniales de autor derivados del artículo en mención a favor de la citada publicación.

El cedente declara que el artículo es original y que es de su creación exclusiva, y no existe impedimento de ninguna naturaleza para la cesión de derechos que está haciendo, y responderá además por cualquier acción de reivindicación, plagio u otra clase de reclamación que al respecto pudiera presentarse.

En virtud de la presente cesión, el CESIONARIO queda autorizado para copiar, reproducir, distribuir y publicar el artículo objeto de la cesión, por cualquier medio digital, electrónico o reprográfico, y está obligado a respetar en todo caso los derechos morales del autor contenidos en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982.

Se firma en señal de aceptación a los \_\_\_\_\_ días del mes de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Firma

\_\_\_\_\_  
Cedente

