



Edición No. 6 • Diciembre de 2012

ISSN: 2027-0658

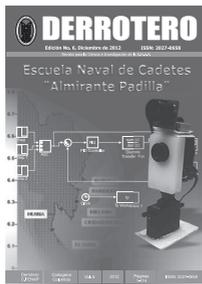
Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla"

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.



Derrot. C.I. ENAP	Cartagena Colombia	vol. 6	2012	Páginas 1-114	ISSN: 2027-0658
----------------------	-----------------------	--------	------	------------------	-----------------



DERROTERO

REVISTA DE CIENCIA E INVESTIGACIÓN DE LA ENAP

DIRECTOR:	CALM Pablo Emilio Romero Rojas
SUBDIRECTOR:	CN Fernando Parra Silguero
DECANO ACADÉMICO:	CN PhD Ricardo Ariza Urango
EDITOR:	CN PhD Ricardo Ariza Urango
COMITÉ EDITORIAL:	CN Msc Ricardo Molares Babra CN Msc Juan Carlos Acosta Chady CF German Adolfo García Castellanos PF Gisella Mayo Mancebo CC Msc Edwin Feria Murillo PhD Juan Contreras Montes

Escuela Naval "ALMIRANTE PADILLA" Isla de Manzanillo

Teléfono: (5) 669 4416 - Cartagena, D.T. y C. – Bolívar

derrotero@enap.edu.co

Diseño, Diagramación e Impresión

Milenio editores e Impresores E.U.

milenioediciones@hotmail.com

Bogotá D.C., Colombia

CONTENIDO

EDITORIAL

- “ANÁLISIS MATEMÁTICO DE MANIOBRAS PARA CASOS DE PERSECUCIÓN Y EVASIÓN EN PLATAFORMAS DE SUPERFICIE EN EL MAR”**
Mauricio Serrano Sedano, Javier Eduardo Márquez Orjuela, Boris Javier Bello Teherán 9
- ANÁLISIS DE RIESGO DE INUNDACIÓN POR TSUNAMIS EN BAHIA SOLANO, CHOCÓ (COLOMBIA)**
Gary Javier González Núñez 19
- ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CAPA DE EKMAN EN LA VARIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR EN EL CARIBE**
Serguei A. Lonin, Javier E. Gómez Torres 29
- EVALUACIÓN FUNCIONAL DE ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN LITORAL EN EL SECTOR DE LA BOCANA ESTABILIZADA HASTA LA PUNTA DE SANTO DOMINGO**
Edwin Andrés Alonso, Juan Pablo Huertas Cuevas 41
- IDENTIFICACION DE UNA SEÑAL DE SONAR MEDIANTE EL USO DE LA TECNICA DE LA CORRELACION**
Carlos Andrés Martínez 51
- DESARROLLO DE UN SISTEMA DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS FIJOS PARA VEHÍCULOS DE SUPERFICIE NO TRIPULADOS**
David Guillermo Gómez Rey, Miguel Ángel Rodríguez Robles 61
- ESTUDIO GENERAL SOBRE EL ESTADO DEL ARTE DE SENSORES ÓPTICOS E INFRARROJOS Y SU APLICACIÓN EN VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS**
Tomás Ramiro Pérez Romero 69

METODOLOGÍA PARA EXPLORACIÓN CONCEPTUAL DE BUQUES DE SUPERFICIE CON BASE EN CRITERIOS DE COSTOS Y EFECTIVIDAD <i>Héctor Camilo Agudelo Medina, Juan Guillermo Guzmán Urbina, Jose Manuel Gomez</i>	81
ESTIMACIÓN DE LA FIRMA ACÚSTICA EN LA ETAPAS DE DISEÑO Y PRUEBAS DE MAR <i>Nicolás Bermúdez Arciniegas, Hugo Leonardo Murcia Gallo</i>	95
OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE NAVEGACIÓN DEL R.O.V. PARA LA INSPECCIÓN DE CASCOS <i>Javier Gonzalo Loaiza Escarraga, José Luis C. Parra Vargas</i>	105
GUÍA PARA PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS	

EDITORIAL

"MATHEMATICAL ANALYSIS OF MANEUVERS TO CASES OF PERSECUTION AND EVASION IN PLATFORMS SURFACE AT SEA "

*Mauricio Serrano Sedano, Javier Eduardo Márquez Orjuela,
Boris Javier Bello Teherán*

9

FLOOD RISK ANALYSIS BY TSUNAMI IN BAHIA SOLANO, CHOCO (COLOMBIA)

Gary Javier González Núñez

19

STUDY OF THE INFLUENCE OF EKMAN LAYER AT SEA LEVEL CHANGE IN THE CARIBBEAN

Serguei A. Lonin, Javier E. Gómez Torres

29

FUNCTIONAL EVALUATION OF STRUCTURES COASTAL PROTECTION IN THE FIELD OF MOUTH STABILIZED TIP TO SANTO DOMINGO

Edwin Andrés Alonso, Juan Pablo Huertas Cuevas

41

IDENTIFICATION OF A SONAR SIGNAL BY USE OF THE CORRELATION TECHNIQUE

Carlos Andrés Martínez

51

DEVELOPMENT OF A SYSTEM OF ESCAPE FIXED OBSTACLES SURFACE VEHICLE UNMANNED

David Guillermo Gómez Rey, Miguel Ángel Rodríguez Robles

61

GENERAL STUDY ON THE STATE OF THE ART AND INFRARED OPTICAL SENSOR AND ITS APPLICATION IN UAVs

Tomás Ramiro Pérez Romero

69

**CONCEPTUAL EXPLORATION METHODOLOGY
SURFACE SHIP BASED ON CRITERIA COST
EFFECTIVENESS**

*Héctor Camilo Agudelo Medina, Juan Guillermo Guzmán Urbina,
Jose Manuel Gomez*

81

**ESTIMATE OF SIGNATURE SOUND IN STAGES
DESIGN AND TESTING OF SEA**

Nicolás Bermúdez Arciniegas, Hugo Leonardo Murcia Gallo

95

**OPTIMIZATION OF NAVIGATION SYSTEM
R.O.V. HELMETS FOR INSPECTION**

Javier Gonzalo Loaiza Escarraga, José Luis C. Parra Vargas

105

GUIDE FOR PUBLICATION OF ARTICLES

EDITORIAL

Innumerables variables demarcan el desarrollo del conocimiento y determinan su constante dinamismo; la necesidad de responder a las motivaciones individuales, necesidades sociales, tendencias regionales o imperativos institucionales, por ejemplo, amalgama las más diversas áreas del saber, proceso que discurre en medio de una indiscutible globalización de todo tipo de actividad, con los contundentes efectos implicados, dentro de los cuales podríamos referenciar como preponderantes los revolucionarios y muy dinámicos avances tecnológicos que nos llevan, entre otras cosas, a múltiples alternativas para el acceso a la información, aspecto clave para que en la actualidad se pueda lograr un adecuado proceso académico.

Estas y otras variables más, son necesariamente abordadas por quienes buscan las mejores formas de desarrollar el conocimiento. La Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”, alma mater de la Armada Nacional, que tiene como principal obligación la de formar a sus futuros líderes con las competencias pertinentes y suficientes, enfrenta, por supuesto, el mismo dilema.

No es posible otorgar valiosas herramientas a nuestros alumnos, si no se cuenta con un efectivo proceso de desarrollo de la investigación científica, que aborde perspectivas diferentes cada día y entregue a la Institución, a la región Caribe y a la nación, propuestas serias de solución a problemas palpables, que deben ser construidas desde la academia.

Este “Derrotero 2012” agrupa artículos científicos elaborados por nuestros alumnos, con acompañamiento y seguimiento detallados por parte de expertos de gran reconocimiento en las distintas áreas de la Oceanografía Física y de la Ingeniería Naval. Los mismos fueron construidos (o intentan serlo), en consecuencia con lo expuesto en los párrafos anteriores.

Invito al lector a que contemple estas propuestas investigativas, dentro de las cuales podrá encontrar una rigurosa aplicación metodológica y valiosas iniciativas concretadas en interesantes propuestas de solución a algunos de nuestros más apremiantes problemas.

Contralmirante Pablo Emilio Romero Rojas
Director Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”

“ANÁLISIS MATEMÁTICO DE MANIOBRAS PARA CASOS DE PERSECUCIÓN Y EVASIÓN EN PLATAFORMAS DE SUPERFICIE EN EL MAR”

Mauricio Serrano Sedano*
serranomau@gmail.com

Javier Eduardo Márquez Orjuela*
javiermarquez1976@gmail.com

Boris Javier Bello Teherán**
bello0810@gmail.com

Fecha de recepción: diciembre de 2011, Fecha de aceptación: septiembre de 2012

Resumen: El propósito de este trabajo es presentar un análisis desde el punto de vista matemático del problema de persecución y evasión en un plano bidimensional el cual es plenamente compatible con el escenario para las mismas maniobras en plataformas navales, de manera que se optimicen las maniobras que permitan evadir de manera efectiva un torpedo o efectuar una intercepción exitosa de una lancha tipo Go-Fast, también se hace un análisis de la solución de este problema una vez planteada la ecuación de solución y la resolución de esta a través de métodos numéricos a través del software MATLAB.

Palabras clave: Persecución, Evasión, Ecuaciones diferenciales, Rungge-Kutta, MATLAB.

Abstract: The purpose of this paper is to present an analysis from a mathematical point of view the problem of pursuit and evasion in a two-dimensional plane which is fully compatible with the scenario for the same maneuvers in naval platforms, although it is applied consistently and almost intuitive these cases can be analyzed mathematically in a way which maximizes the maneuver to effectively evade a torpedo or make a successful interception of a Go-Fast boat type, also provides an analysis of the solution of this problem once raised equation solution resolving this through numerical methods by software MATLAB.

Keywords: Chase, Evasion, Differential Equations, Rungge-Kutta method, MATLAB.

* Teniente de Navío de la Armada Nacional. Alumno del programa de Oceanografía Física, Escuela Naval “Almirante Padilla”

**Licenciado en Matemáticas, Profesor Escuela Naval “Almirante Padilla”

INTRODUCCIÓN

Las maniobras de persecución y evasión definen la dinámica de relaciones cazador-presa desde la naturaleza hasta en las relaciones humanas en aspectos tales como la guerra (naval, aérea) y la aplicación de la ley, aunque es un concepto sencillo desde la perspectiva en que dos cuerpos deben coincidir en el mismo lugar en el espacio al mismo tiempo este se hace más complejo en la medida en que el perseguidor aplique un mayor número de variables a su movimiento este solo factor modifica el modo en que debe abordarse el problema de persecución[1], por tal motivo se toman tres teorías y se ahonda en la última con el fin de evaluarla en el entorno de las unidades de superficie, la primera es la teoría del círculo de Apolonio, generada por Apolonio de Perge (262 A.C.-160 A.C.) el cual en su trabajo perdido llamado *PlaneLoci*, halla una manera diferente de definir un círculo, en comparación a la usual geometría Euclidiana, la aplicación táctica de esta teoría se enmarca en la intercepción de un buque en trayectoria circular en una posición futura a través de una trayectoria recta del perseguidor. La segunda teoría es del matemático e hidrógrafo Pierre Bouguer (1698-1758), la cual se toma como base del análisis del problema de persecución en los textos modernos, en 1735 publico en la publicación *Memoires de l'Academie Royal* des Sciences el caso de persecución de un buque pirata a un buque mercante, la aplicación táctica es más obvia y está basada en problemas de persecución pura a objetivos que mantienen su rumbo y velocidad. La tercera teoría es del científico Arthur StaffordHathaway (1855- 1934) quien escribió en 1920 en el *American MathematicalMonthly* el análisis matemático del problema de persecución de un perro que se encuentra en el centro de un estanque e inicia la persecución de un pato que se encuentra nadando alrededor del borde circular, la aplicación táctica está referida a casos de persecución con trayectorias circulares utilizando persecución pura[2], [3].

TEORÍAS PRELIMINARES

Teoría del Círculo de Apolonio

La teoría del círculo de Apolonio trata de un famoso problema de lugares geométricos, colocando un ejemplo práctico se puede observar el cálculo de la intercepción de un torpedo hacia un buque.[4]

Se supone que el torpedo **T** es interceptado en la superficie del barco enemigo **E**, (como se muestra en la figura 1, moviéndose en una trayectoria recta y **T** moviéndose en una trayectoria recta para interceptar a **E** en el punto **I**. Asumiendo que **E** y **T** se mueven con velocidad constante V_E y V_T , respectivamente, luego al interceptar el punto **I** la razón de las dos distancias que viajaron desde el instante del disparo del torpedo debe ser igual a la relación de las dos velocidades.

$$\frac{IT}{IE} = \frac{V_T}{V_E} = k$$

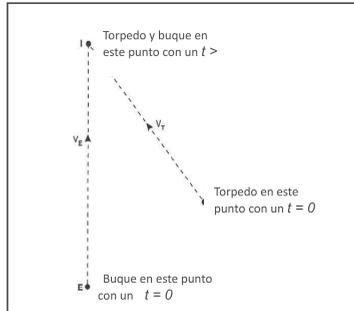


Figura 1. Persecución por intercepción

El torpedo y el buque deben alcanzar el punto **I** simultáneamente, Esto no es suficiente para que **E** y **T** pasen a través de **I** individualmente, ellos deben estar en **I** al mismo tiempo. Para encontrar donde esta **I**, dadas las localizaciones de **E** y **T** en un tiempo $t=0$, la dos velocidades V_E y V_T , y la dirección de **E** en movimiento, lo que nosotros debemos hacer primero es encontrar el conjunto **S** de todos los puntos en el plano tal que la ecuación (1) se cumpla. El punto **I** puede ser cualquiera de los puntos (estos pueden ser más de uno) en **S** que también se encuentran en el camino de **E**.

Para saber que es **S** se puede trazar un sistema de coordenada rectangular tal que **E** y **T** estén ambos, en $t=0$, en el eje positivo horizontal con **T** a la derecha de **E** (ver figura 2). Si denotamos las coordenadas de **E** y **T** por $(m, 0)$ y $(p, 0)$, respectivamente con $p > m$, y si (x, y) está en cualquier punto en **S**, entonces la ecuación (1) se convierte en:

$$\left[x - \frac{k^2 m - p}{k^2 - 1} \right]^2 + y^2 = \left[\frac{k(p - m)}{1 - k^2} \right]^2 \quad (1)$$

Pero esta es la ecuación de un círculo, con su eje horizontal en el centro $\left(\frac{k^2 m - p}{k^2 - 1}, 0 \right)$ y un radio de $\frac{k(p-m)}{1-k^2}$. El conjunto **S** es un círculo, llamado el círculo Apolonio de dos puntos **E** y **T** (en $t=0$ localizados en el eje horizontal).

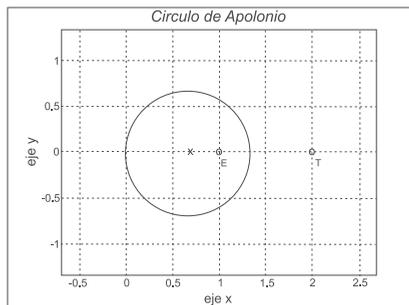


Figura 2. Círculo de Apolonio

Teoría de la Curva de la línea de persecución de Pierre Bouguer

En la figura se puede observar un caso de persecución cualquiera, tanto el persecutor como el perseguido inician en $(0, 0)$ y $(x_0, 0)$ en un tiempo $t = 0$, respectivamente, en el instante que la persecución empieza, el perseguido tiene una velocidad constante V_m a través de la línea vertical $x = x_0$.

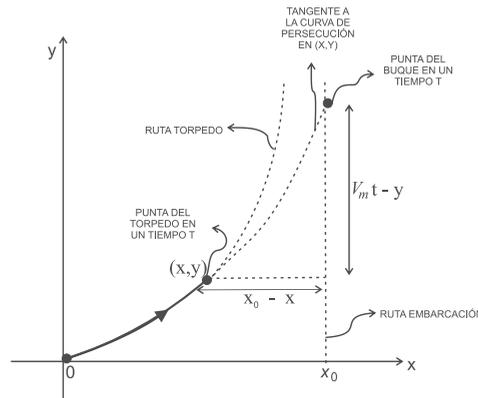


Figura 3. Geometría de un problema de persecución.

El persecutor viaja a una velocidad constante V_p a través de la curva de tal manera que siempre se está moviendo directamente hacia el perseguido, esto es, el vector velocidad del persecutor va directamente al perseguido en cada instante de tiempo. El problema de Bouguer determino la ecuación $y=y(x)$ de la curva, la cual llamo "curva de la línea de persecución".

Para encontrar la curva de persecución se empezó por llamar a la ubicación del persecutor el punto (x, y) con un tiempo arbitrario $t \geq 0$. En un tiempo t el perseguido se a movido hasta el punto $(x_0, V_m t)$ y así, como se muestra en la figura 3. la pendiente de la recta tangente de la curva de búsqueda está dada por:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{V_m t - y}{x_0 - x} = \frac{y - V_m t}{x - x_0}$$

Sabiendo esto, cualquiera que sea la forma de la curva de persecución, el persecutor se mueve a lo largo de un tiempo t en una distancia de $V_p t$.

Calculando, se sabe que esta longitud de arco se puede expresar así:

$$V_p t = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dz$$

Donde z , es una variable de integración.

TEORÍA DE PERSECUCIÓN CIRCULAR DE ARTHUR STAFFORD HATHAWAY

Para definir el problema matemáticamente, se utilizó la notación de la figura anterior. Allí se tiene la ruta del perseguido como un círculo con radio α , donde se asumió que el perseguido se inicia en ese instante $t = 0$ en el eje x en el punto $(\alpha, 0)$.[5]

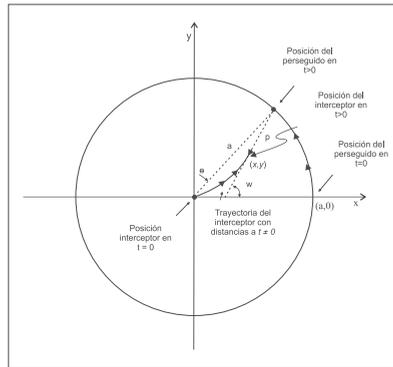


Figura 4. Geometría del Problema de Persecución Circular

Ahora, en algún momento $t > 0$ el perseguido se habrá movido a través de un arco de ángulo θ (a través de un distancia de $\alpha\theta$) y para que el persecutor (que se mueve n veces más rápido) se ha trasladado a través de $s = \alpha n \theta$ para alcanzar el punto (x, y) .

La tangente en (x, y) a la curva de la búsqueda del persecutor pasa al mismo tiempo a través de la posición del perseguido.

Como se muestra en la figura 5, esta línea tangente w hace ángulo con el eje x , y la distancia entre el persecutor y el perseguido es p .

Ahora bien, la recta tangente a (x, y) tiene una inclinación tangente (w), y así, desde la geometría analítica se puede escribir (con b como constante) la ecuación de la recta tangente como:

$$y = x \tan (w) + b = x \frac{\sin (w)}{\cos (w)} + b$$

Desde que la línea tangente pasa a través del punto donde se encuentra el perseguido $(\alpha \cos (\theta), \alpha \sin (\theta))$ entonces:

$$\alpha \sin (\theta) = \alpha \cos (\theta) \frac{\sin (w)}{\cos (w)} + b$$

O se podría escribir:

$$b \cos (w) = \alpha \sin (\theta) \cos (w) - \alpha \cos (\theta) \sin (w) = \alpha \sin (\theta - w) = - \alpha \sin (\theta) \sin (w)$$

Entonces insertando este resultado, se llega a la ecuación de la línea tangente de la curva de persecución.

$$x\sin(w) - y\cos(w) = a\sin(w-\theta)$$

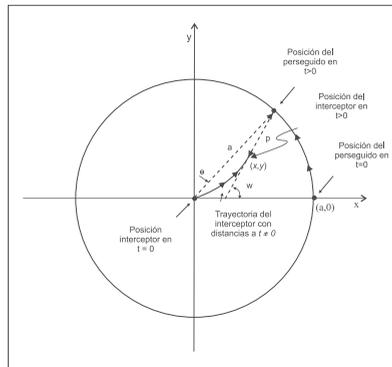


Figura 5. Normal de la línea tangente.

PLANTEAMIENTO DE SOLUCIÓN

Como se había mencionado se utilizó el planteamiento de la teoría de Hathaway, planteada en el concepto del triángulo diferencial así:

$$\frac{dy}{dx} = \tan(w)$$

Teniendo en cuenta que en el algoritmo hay un evento de parada este es configurado cuando a través del cálculo de posiciones ambos objetos se encuentran en la misma posición, para casos prácticos como en la vida real se puede generar que este condicional se asimile a una distancia cercana al mismo punto en el espacio teniendo en cuenta que cada objeto tiene unas dimensiones en las cuales una aproximación bastante cercana se puede interpretar como una intercepción exitosa[6].

Esta se hace a través de la implementación en el software MATLAB del siguiente algoritmo (ver pagina siguiente).

Un condicional sirve de salvaguarda para que el programa pueda desarrollarse en cualquier dirección del plano que se elija.

El método de resolución implementado es el de Runge-Kutta[7] del cual se hace una breve descripción:

Los métodos de Runge-Kutta logran la exactitud del procedimiento de la serie de Taylor sin la necesitar el cálculo de derivadas de orden superior. Existen muchas variantes, pero todas tienen la forma generalizada de la ecuación:

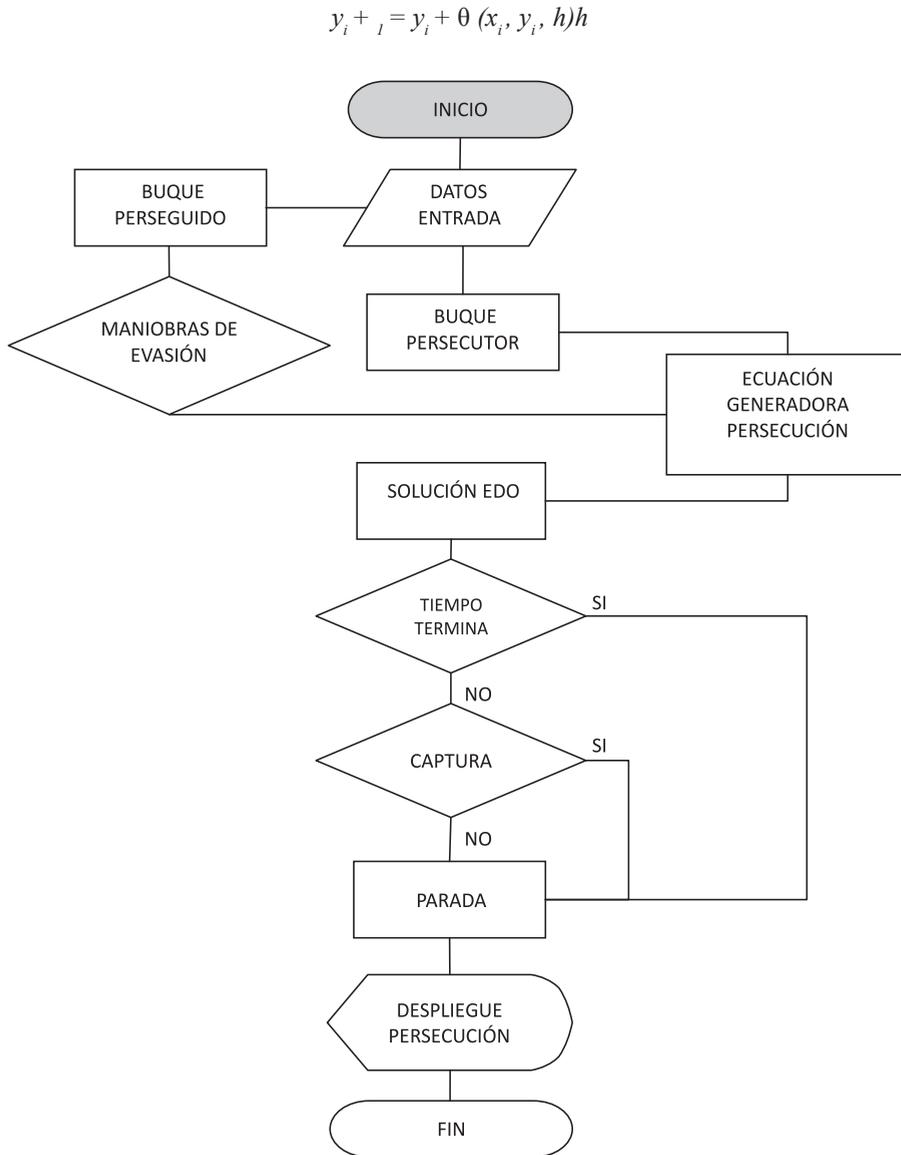


Figura 6. Algoritmo programa de persecución

Donde $\theta(x_i, y_i, h)$, se conoce como función de incremento, la cual puede interpretarse como una pendiente representativa en el intervalo. La función de incremento se escribe en la forma general como:

$$\theta = a_1 k_1 + a_2 k_2 + \dots + a_n k_n$$

donde las a son constantes y las k son:

$$k_1 = f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = f(x_i + p_1 h, y_i + q_1, k_1 h)$$

$$k_3 = f(x_i + p_2 h, y_2 + q_2, k_1 h) + q_2, k_2 h)$$

de manera general:

$$k_n = f(x_i + p_n - 1 h, y_i + q_n - 1, k_1 h + q_n - 1, k_2 h + \dots + q_n - 1, n - 1, k_n - 1 h)$$

Estas se implementaron con las funciones ode 45 (cuarto y quinto orden), ode 23 (segundo y tercer orden), y ode 23tb (cuarto y quinto orden con regla trapezoidal), de MATLAB verificando.

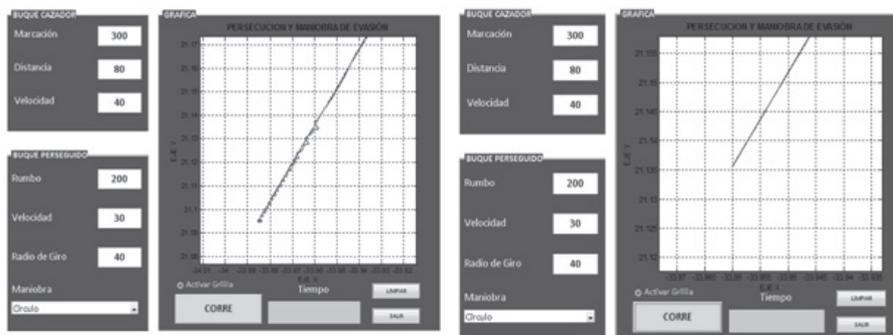


Figura 7. Solución con ode 45 y ode 23

Las maniobras evaluadas se dividieron en básicas y en especiales.

En las maniobras básicas (línea recta, línea devuelta y círculo) que se presentan con bastante regularidad se observó que fueron menos exigentes respecto al método de resolución, lo cual reafirma la idea común que al efectuar menos maniobras es más sencillo para el persecutor dar solución al problema y por ende interceptar exitosamente al perseguidor.

Las maniobras (zig-zag, loop circular y espiral) se incluyeron para generar mayor dificultad en la resolución del problema de persecución.

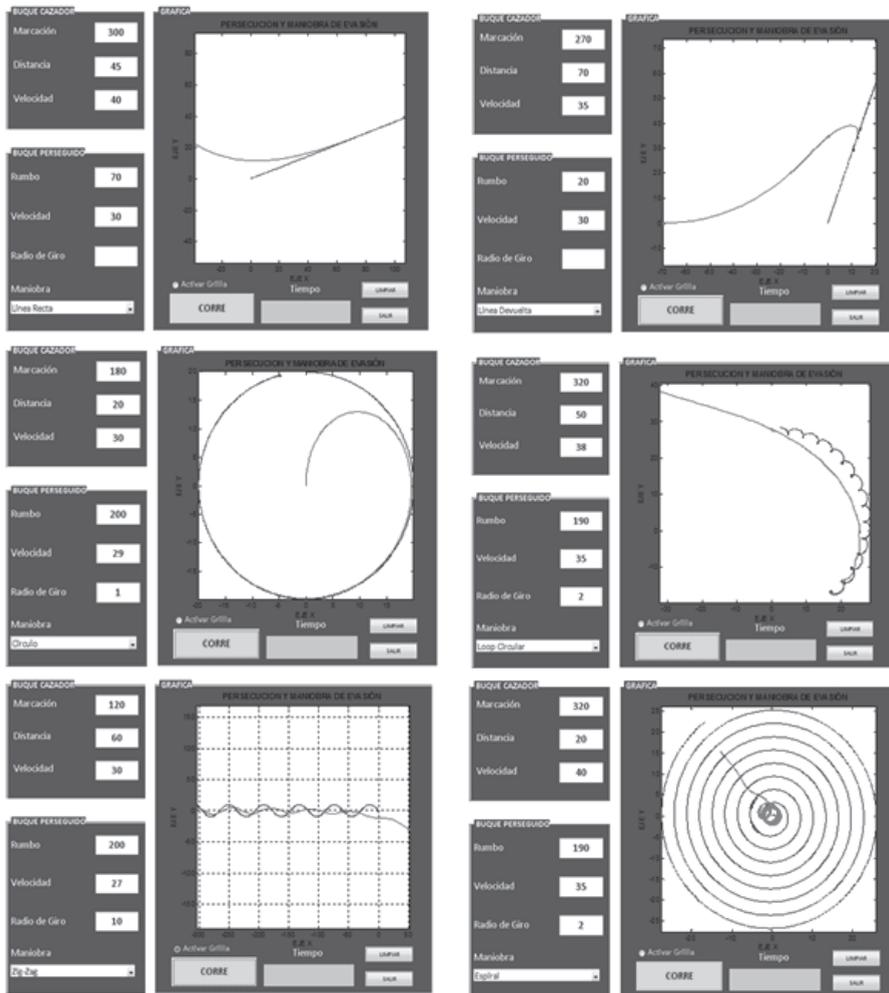


Figura 8. maniobras evaluador de izquierda a derecha y arriba abajo línea recta, línea devuelta, circular, loop circular, zig-zag y espiral.

CONCLUSIONES

El conocimiento adquirido a través del proceso de investigación y la aplicación de la teoría de persecución de Hathaway permite concluir: Aunque las persecuciones son procesos que en la naturaleza acontecen diariamente y su desarrollo puede calificarse como intuitivo, matemáticamente es un proceso que exige una mediana capacidad de cómputo para la solución del problema.

La aplicación de métodos de resolución numérica de Runge-Kutta de segundo y tercer orden son los más adecuados para una resolución rápida del problema de persecución y permite que los tiempos y distancias de persecución sean menores a los que se aplican con otros métodos.

Las maniobras básicas, es decir aquellas en las cuales el perseguido tiene un patrón de maniobra que se mantiene, permiten al persecutor efectuar una intercepción de manera más exitosa.

Las maniobras más complejas generan una exigencia mayor de cálculo y permiten en buena manera para el perseguido lograr evadir de manera exitosa al persecutor, aunque para el estudio la más desventajosa demostró ser la maniobra de loop circular.

La teoría de Hathaway a pesar de ser bastante efectiva para los casos de persecución presenta una serie de limitantes para las maniobras en espiral.

Entre más variables se introduzcan a la maniobra será mayor la posibilidad de evasión por parte del persecutor.

BIBLIOGRAFIA

1. Diccionario de la real academia de la lengua española versión on-line. Disponible en http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=cultura
2. Enciclopedia Británica versión on-line Disponible en <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/30058/Apollonius-of-Perga>
3. PADRON, J. 1998. La estructura de los procesos de investigación. Documento de Postgrado. Caracas: Universidad Simón Rodríguez (CD, Epistemología I).
4. PAUL NAHIN. 2007. Cases and Escapes. The Mathematics of Pursuit and Evasion, Princeton University Press, Pág. 33
5. MEDINA H. 2007. Juegos Dinámicos de Persecución y Evasión. Universidad de Puerto Rico. Recinto Mayaguez
6. HERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ, C. & BAPTISTA L., P. 2004. Metodología de la Investigación, México: Mc Graw Hill.(Unidad 3 y 4).
7. CHAPRA, STEVEN J. CANALE RAYMOND P. 2006. Métodos Numéricos para ingenieros. México: Mc Graw Hill. Capítulo 25.

ANÁLISIS DE RIESGO DE INUNDACIÓN POR TSUNAMIS EN BAHIA SOLANO, CHOCÓ (COLOMBIA)

Gary Javier González Núñez
garygonzaleznunez@yahoo.es

Fecha de recepción: diciembre de 2011, Fecha de aceptación: septiembre de 2012

Resumen: El análisis de riesgo de inundación por tsunamis en Bahía Solano, una bahía al norte de la Costa Pacífica Colombiana, revela la vulnerabilidad ante un posible evento tsunamigénico generado en la zona de subducción colombo-ecuatoriana. El evento tsunamigénico fue generado y propagado utilizando el modelo numérico C3 (Cantabria, COMCOT y TsunamiCLAW), tomando las características del sismo del 31 de Enero de 1906. Los resultados muestran que el primer tren de ondas llega a la zona 40 minutos después de generado el evento, la altura de la máxima alcanzada es cercana a los 2.5 metros con un nivel de marea de 3.5 m, generando un gran impacto en la zona de estudio.

Palabras claves: tsunami, modelo C3, Bahía Solano

Abstrac: The risk analysis of tsunami in Bahia Solano, a bay in the north of Colombia Pacific Coast, shows the vulnerability in case of tsunami event. The tsunami event was generated using the mathematical numerical model C3 (Cantabria, COMCOT and TsunamiCLAW), with the characteristic of the earthquake of January 1906. The results show that the first tsunami wave arrives 40 minutes after the earthquakes, the maximum wave 2.5 meters in the sea level of 3.5 meters and this can generate a great impact in the study area.

Key words: tsunami, model C3, Bahía Solano

* Capitán de Corbeta de la Armada Nacional. Profesional en Ciencias Navales, Escuela Naval "Almirante Padilla". Oceanógrafo Físico, Escuela Naval "Almirante Padilla"

INTRODUCCIÓN

El 26 de diciembre de 2004 se produjo un terremoto a cuatro mil metros de profundidad en el Océano Índico, a unos 260 kilómetros al oeste de la costa de Aceh (Indonesia), que llegaría a los nueve grados de la escala Richter, el cual generó una cadena de tsunamis que afectaron considerablemente a países en la costa asiática y africana, ocasionando alrededor de 300.000 muertes [1]. Entre los países afectados se encuentran: Indonesia, Tailandia, Sri Lanka, India, Bangladesh, Burma, Malasia, Islas Maldivas, Somalia, Kenia, Tanzania y las Islas Seychelles y otros.

La devastadora acción del mar en estos países, hizo recordar las tragedias sucedidas en Colombia años anteriores. Al sur de la costa pacífica colombiana se presentaron durante el siglo XX cuatro grandes terremotos con $M_w > 7.7$. El más grande de ellos ocurrió el 31 de enero de 1906 ($M_w = 8.8$), uno el 14 de mayo de 1942 ($M_w = 7.6$), uno el 19 de enero de 1958 ($M_w = 7.7$) y el último el 12 de diciembre de 1979 (figura 2) con un $M_w = 8.2$, [2,3]

El presente trabajo tiene como objeto presentar un estudio del grado de amenaza al que se encuentra expuesto el Golfo de Cúpica (Chocó), en caso de presentarse un evento tsunamigénico.

MARCO TECTÓNICO REGIONAL

La costa pacífica colombiana se encuentra con un grado significativo de exposición frente a un fenómeno de tsunami y esto se debe a que se encuentra cerca de la Zona de Subducción de Pacífico, donde colisionan las placas tectónicas de Nazca y Suramericana.

La fortaleza estructural de la morfología costera de la Serranía del Baudó es exhibida muy bien en la zona Bahía Solano-Bahía Utría (figura 1), donde los 8 km de la depresión de la Bahía de Utría coinciden muy de cerca con la falla de Bahía Solano. La falla de Bahía Solano es una falla inversa con una velocidad de echado (*slip*) de 0.2 a 1 mm/año [4]. Ciudad Mutis fue parcialmente destruida y afectada por hundimientos de 20 a 30 cm como resultado del terremoto de Septiembre 26 de 1970, de una magnitud de 6.5, asociado con la falla de Bahía Solano [5]. Se han reportado por lo menos tres eventos de hundimientos costeros durante los últimos 800 años, probablemente asociados con terremotos de magnitud similar [6].

El Golfo de Cúpica se encuentra entre la Punta de Solano y Cabo Marzo, al norte de la Costa Pacífica. Geográficamente está conformado por los municipios de Bahía Solano y Cúpica. El municipio de Bahía Solano está localizado en el departamento

del Chocó, al noroccidente del país, sobre la costa del océano pacífico, y tiene como cabecera a Ciudad Mutis, con coordenadas geográficas de 6°13'50" de latitud norte y 77°24'10" de longitud oeste, con una altura sobre el nivel del mar de 5 metros. En este municipio se han presentado a través del tiempo varias situaciones de riesgo como movimientos sismológicos en los años de 1970 y 2003 e inundaciones que han afectado a los municipios de Cúpica, Huaca y Nabugá. En la figura 1 se presentan la Bahía de Cúpica y los asentamientos poblacionales más importantes de la zona.

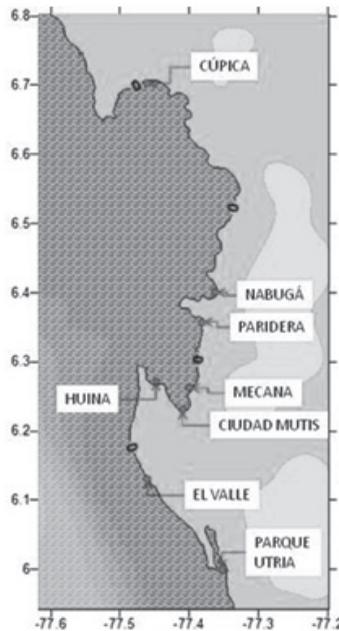


Figura 1. Mapa de la Bahía de Cúpica con los asentamientos poblacionales más importantes.

PROPAGACIÓN DE TSUNAMIS POTENCIALES

Para analizar la vulnerabilidad de Bahía Solano ante un tsunami local potencialmente destructivo se ha supuesto la ocurrencia de un sismo con las características del sismo histórico más representativo para la zona: el evento ocurrido el 31 de enero de 1906. Kelleher estimó una magnitud de momento $M_w=8.8$ [2].

Tabla 1. Propuesta de características para el evento de 1906

Evento	Ubicación sismo Lat - Lon	Magnitud Mw	Prof (km)	Área Ruptura (L x W) km2	Slip (°)	Strike (°)	Dip (°)	D (m)
1906	2.05°N – 79.16°W	8.8	25	514.14 x 214.3	63	31	13	13.8

Para la generación y propagación inicial del evento tsunamigénico se utilizó el modelo numérico C3. El modelo C3 (Cantabria, COMCOT y TsunamiCLAW), acopla diferencias finitas y volúmenes finitos para simular la propagación y runup de tsunamis e incorpora las ventajas de ambos esquemas numéricos. Es decir, la simulación de tsunamis en aguas profundas (>100 m) se realiza utilizando la forma no conservativa de las LSWE (ecuaciones lineales de aguas someras) discretizadas en diferencias finitas y para los procesos en las regiones someras se utilizan los métodos en volúmenes finitos para resolver las NLSWE (ecuaciones no lineales de aguas someras). Para la generación de ondas de tsunami, el modelo adapta el modelo de deformación de fallas inclinadas propuesto por Mansinha y Smyle [7]. EL área de ruptura fue calculada utilizando las relaciones de Wells y Coppersmith [8], Scholz [9] y los planos de falla fueron obtenidos del análisis de los datos del catálogo Harvard CMT para la zona, buscando generar el peor escenario posible creíble.

Para establecer los escenarios posibles de nivel del mar se analizó la serie histórica del mareógrafo localizado en Bahía Solano. La serie disponible cubre desde el 02 de marzo de 1964 hasta el 30 de septiembre de 1965, y en total se cuenta con 13.872 registros del nivel del mar.

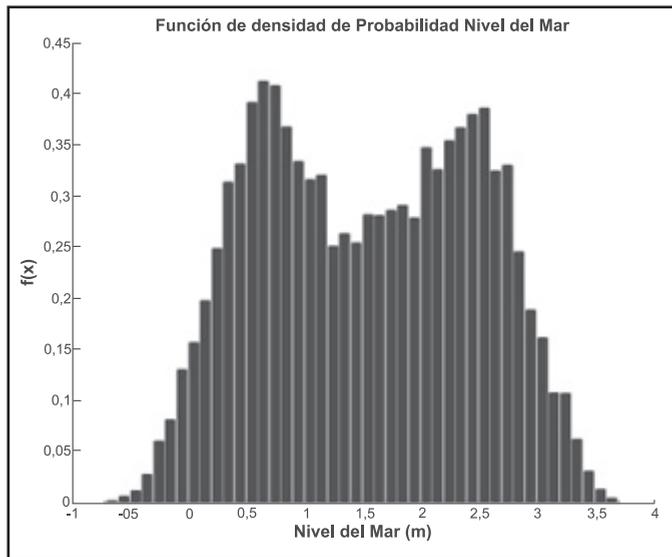


Figura 2. *Función de densidad de probabilidad del nivel del mar, mareógrafo de Bahía Solano*

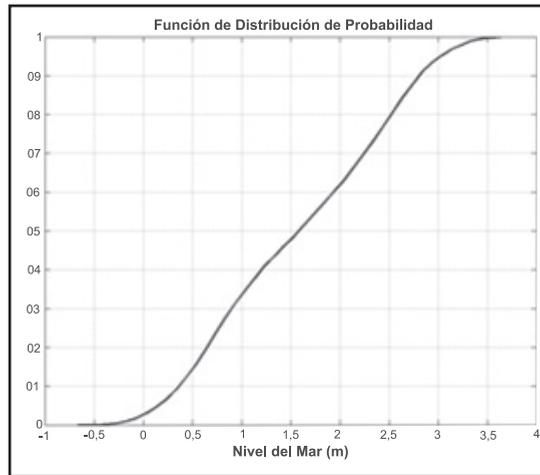


Figura 3. Función de distribución de probabilidad del nivel del mar, mareógrafo de Bahía Solano.

En las figuras 2 y 3 se presentan la función de densidad de probabilidad y la función de distribución de probabilidad del nivel del mar. Con el fin de obtener una evaluación del impacto de tsunami en la Bahía de Solano, se han seleccionado cuatro escenarios de nivel del mar: nivel de marea 0 m, la bajamar más probable (0.65 m), la pleamar más probable (2.6 m) y la máxima pleamar registrada (3.5 m).

RESULTADOS Y DISCUSION

En las figuras 4 a 7 se registra la evolución temporal de la superficie libre para la malla en detalle con los diferentes niveles de marea. De forma general se pueden apreciar tres trenes de ola principales: el primero, entre los primeros 40 a 60 minutos; el segundo, entre los 90 y 110 minutos, y el tercero, entre 140 y 160 minutos, después de generado el evento. Este resultado es particularmente importante a la hora de diseñar los planes de contingencia o emergencia, pues indica que las personas deberán permanecer varias horas en las zonas de evacuación.

En la figura 4, para un nivel de marea cero, se observa que el primer tren de olas presenta las mayores alturas de olas para los puntos en estudio. Sin embargo estos valores aumentan paulatinamente para los demás niveles de marea y la preponderancia de altura de las olas se invierte, es decir, en la figura 7, con nivel de marea 3.5 m, el tren de olas que presenta mayor altura de ola es el tercero.

Ciudad Mutis, Huina, Mecana y Paridera presentan trenes de onda similares, sin embargo, Ciudad Mutis presenta los valores superiores debido a su posición dentro de la Bahía de Solano y continúa siendo la zona más afectada en caso de un evento tsunamigénico con estas características. Nabugá presenta un tren de ondas diferente debido a que se encuentra fuera de la Bahía de Solano.

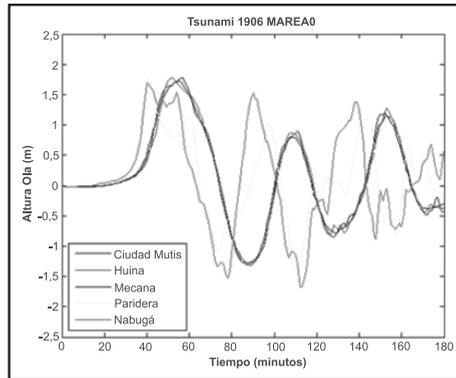


Figura 4. Evolución temporal de la superficie libre en los puntos de la malla en detalle para un nivel de marea NM= 0.0 m

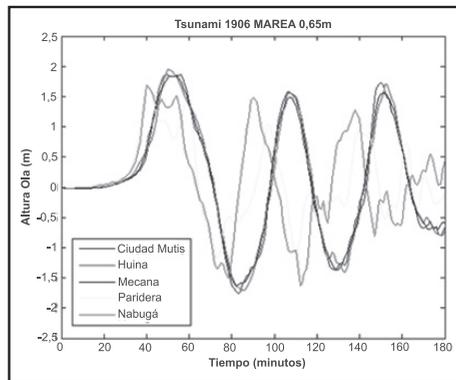


Figura 5. Evolución temporal de la superficie libre en los puntos de la malla en detalle para un nivel de marea NM= 0.65 m

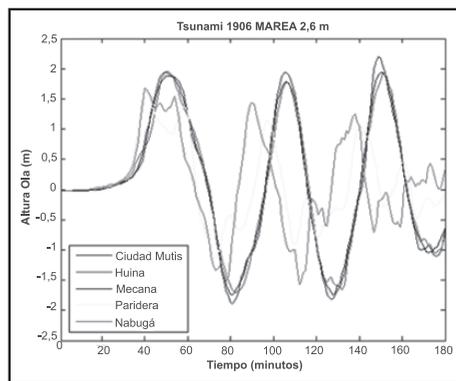


Figura 6. Evolución temporal de la superficie libre en los puntos de la malla en detalle para un nivel de marea NM= 2.6 m.

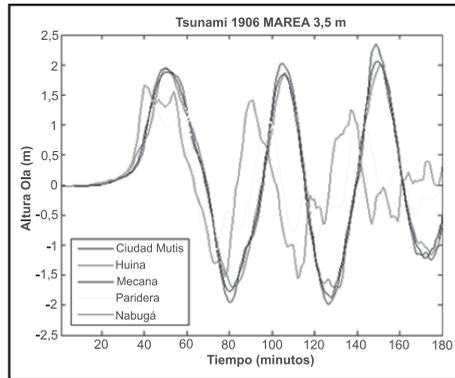


Figura 7. Evolución temporal de la superficie libre en los puntos de la malla en detalle para un nivel de marea NM= 3.5 m.

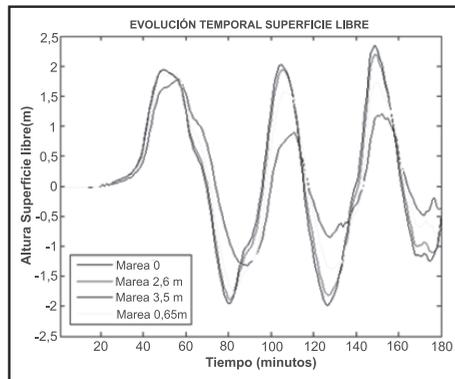


Figura 8. Evolución temporal de la superficie libre en Ciudad Mutis para los diferentes niveles de marea.

En la figura 8 se presentó la evolución temporal de la superficie libre en Ciudad Mutis, con los diferentes niveles de marea: 0 m, 0.65 m, 2.6 m y 3.5 m. Se puede observar que para Ciudad Mutis con mayor nivel de marea se presentan los mayores valores de altura de la superficie libre. Para el nivel de marea de 3.5 m se presenta una altura de la superficie libre aproximadamente de 2.4 m. Los trenes de ola se mantienen similares para los diferentes niveles de marea: el primero, en los primeros 40 minutos una vez sucedido el movimiento sísmico; el segundo, 60 minutos después del primero, y el tercero, 50 minutos después del segundo.

Se puede apreciar en la figura 8 que para el nivel de marea igual a cero, la altura de la superficie libre, de los tres trenes de ola máximos relativamente decrecen con el tiempo. Para el nivel de bajamar más probable (0.65 m), los trenes de ola máximos se mantienen alrededor de los 1.5 m; sin embargo, en los niveles de marea de la pleamar más probable (0.26 m) y para máxima pleamar registrada (0,35 m), el tren de

olas que alcanza los mayores valores es el tercero, por lo que se deduce que el nivel de la marea, la batimetría y la morfología de la costa de la bahía afecta la ola que se presenta en Ciudad Mutis y por lo tanto, puede afectar más a la costa que el primer tren de olas.

El Valle, la Ensenada de Utría y Cúpica son otras zonas de interés poblacional y turístico que se tuvieron en cuenta para el análisis del impacto de olas de tsunami en el presente estudio.

En la figura 9 se representan la evolución temporal de la superficie libre para los corregimientos de Cúpica, el Valle y para la entrada sur de la Ensenada de Utría, utilizando para la modelación la malla intermedia. Se observa que para Cúpica se presentan valores hasta de 3m. Para la Ensenada de Utría alturas de ola menores a 2 m y para el Valle menores a 1.3 m.

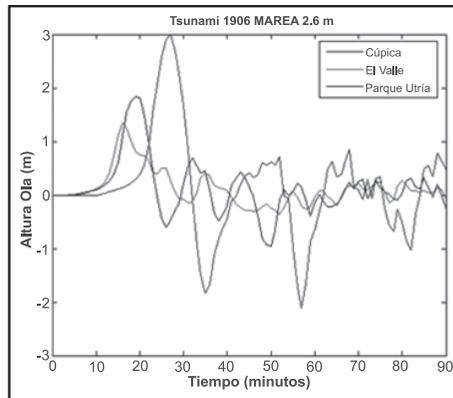


Figura 9. Evolución temporal de la superficie libre con la pleamar más probable (2.6 m) en otros puntos de interés, para el evento de 1906 con la malla intermedia.

CONCLUSIONES

Los resultados numéricos en la aproximación de 1906 muestran que un evento como éste genera un gran impacto en la Bahía de Solano. Los corregimientos de Paridera y Playa Huina se afectan desde la bajamar más probable, mientras que Ciudad Mutis, Mecana y Nabugá sólo se afectan a partir de la pleamar más probable. El primer tren de ondas llega a las costas 40 minutos después de haberse generado el evento, lo que ayudaría a las autoridades para evacuar las zonas costeras más afectadas. Ciudad Mutis debe considerarse como el corregimiento con más alto riesgo en caso de un evento tsunamigénico, ya que presenta los mayores valores de máximo desplazamiento de la superficie libre.

El máximo desplazamiento de la superficie libre alcanza valores de hasta 6 metros para Ciudad Mutis, por lo que el aeropuerto se considera como el mejor punto de

evacuación, ya que por el impacto de la ola se podrían generar deslizamientos de tierra en la Loma de la Virgen o en otros puntos altos cercanos a la costa.

Corregimientos como Cúpica, El Valle y la Ensenada de Utría también serían afectados por la onda de tsunami. Aunque Cúpica fue reubicado a 1 km de la zona costera, por los resultados aquí presentados se presume que sería afectada por la inundación y el posible desbordamiento del río Cacique. El corregimiento del Valle también sería afectado considerablemente por la onda de tsunami, debido a la gran cantidad de hoteles en la playa Almejal y a los asentamientos urbanos que se encuentran ubicados cerca a la desembocadura del río Valle.

BIBLIOGRAFÍA

1. BBC NEWS. At-a-Glance: Countries hit. Thursday, 22 december 2005. Available from internet: <<http://news.bbc.co.uk/2/hi/asia-pacific/4126019.stm>>
2. [2] KANAMORI, H., and MCNALLY, K., 1982. Variable rupture mode of the subduction zone along the Ecuador – Colombia coast. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, pp 1241 – 1253.
3. KELLEHER, J., 1972. Rupture zones of large South America earthquakes and some predictions. *J. Geophys. Res.*, 77, 2987-2103.
4. PARIS, G., MACHETTE, M. N., DART, R.L. and HALLER, K.M., 2000. Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-0284.
5. RAMÍREZ, J.E., 1970. El terremoto de Bahía Solano. *Revista Universidad Javeriana*, 70:573-585.
6. PAGE, W. and JAMES, M., 1981. Tectonic subsidence and evidence for the recurrence of large magnitude earthquakes near Bahía Solano, Colombia. *Memorias III Congreso Colombiano de Geología*: 14-20.
7. MANSINHA, L. and SMYLE, E., 1971. The displacement field of onclined faults, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 61, pp. 1433-1440.
8. WELLS, D. y K. COPPERSMITH. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacements. *Bull Seism. Soc. Am.*, (84): 974-1002
9. SCHOLZ, C.H., 2002. *The mechanics of earthquakes and faulting*, 2nd ed. xxiv, 471 pp. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CAPA DE EKMAN EN LA VARIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR EN EL CARIBE

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

Javier E. Gómez Torres**
jaengoto@gmail.com

Fecha de recepción: diciembre de 2011, Fecha de aceptación: septiembre de 2012

Resumen: Empleando un modelo que calcula el nivel en el fondo de la capa de Ekman a partir de datos satelitales de viento, con la transformación de las ecuaciones de transporte y bombeo de Ekman, se efectuó una comparación con respecto a las mediciones satelitales de anomalías del nivel del mar con las cuales se busca determinar la influencia del viento sobre la dinámica del nivel del mar. El estudio se efectuó mediante comparación de casos independientes entre los niveles sobre cada órbita del satélite y se analizaron otros factores de influencia hidrodinámica.

Palabras Claves: transporte de Ekman, bombeo de Ekman, efectos termohalinos, anomalías del nivel del mar.

Abstract: Using a model that calculates the level at the bottom of the Ekman layer from satellite wind data, through a transformation of Ekman transport and pumping equations, a comparison was made using satellite measurements of the sea level anomalies that determine the wind influence on the sea level. The case study was carried out by comparing independent cases between levels on each satellite orbit and furthermore, other hydrodynamic influencers were analyzed.

Key Words: Ekman transport, Ekman pumping, termohaline effects, sea level anomalies.

* Ph.D en Ciencias Físicas y Matemáticas, docente y director Grupo de Investigación en Oceanología, Escuela Naval "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia

** Oceanógrafo Físico. Escuela Naval "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia.

INTRODUCCIÓN

El esfuerzo que se genera por la acción del viento sobre la superficie del océano, produce una respuesta directa sobre una delgada capa que generalmente varía en el rango de los 10a los 100 metros de profundidad [1], conocido como transporte de Ekman. Un esfuerzo del viento espacialmente uniforme produciría una afectación relativamente débil por debajo de la capa de mezcla y poco variable en el tiempo. Sin embargo, las condiciones del viento heterogéneo causan flujos horizontales de masa, presentando convergencias y divergencias que determinan la circulación forzada. Si consideramos este proceso desde el punto de vista del campo de flujo vertical, aparece como la divergencia del transporte superficial de Ekman; por esto se afirma que el rotor del esfuerzo del viento controla el bombeo de Ekman así como el transporte vertical asociado a los límites costeros [2]; sin embargo, éste último no se encuentra considerado dentro del presente trabajo.

Desde el punto de vista atmosférico, la tensión que se transmite a las capas subyacentes de la superficie del océano, corresponde a un arrastre friccional cuya magnitud depende de la intensidad del esfuerzo generado por el viento sobre la superficie del mar. A éste esfuerzo está asociado un transporte de Ekman en la atmósfera, cuyo flujo de masa horizontal se presenta en dirección opuesta al generado en el océano; consecuentemente la divergencia o convergencia de masa produce un flujo vertical en la misma dirección, tanto en la atmósfera como en el océano (Figura 1).

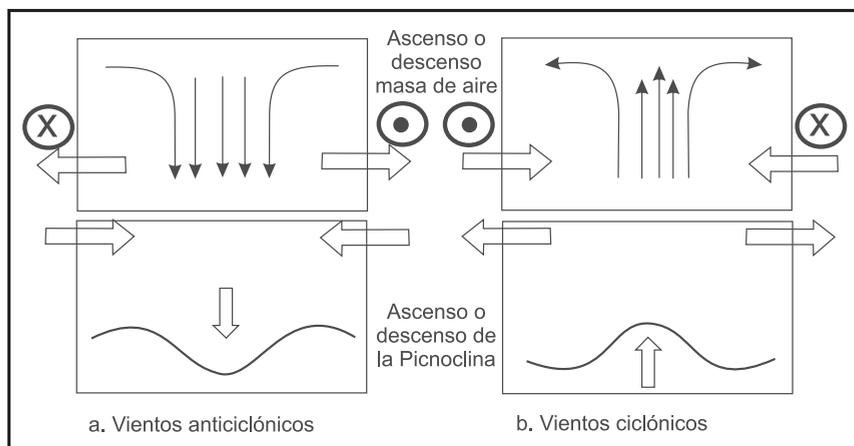


Figura 1. Flujos verticales de masa en la atmósfera y en el océano para el hemisferio norte, a) Condición de vientos anticiclónicos b) en condición de vientos ciclónicos. Adaptado de [1].

A partir de los datos del dispersómetro de viento *SeaWinds* a bordo del satélite QuikSCAT, y debido a su buena cobertura espacial, se ha podido calcular el bombeo de Ekman sobre gran parte de los océanos de la tierra, generando mapas de diferentes escalas temporales que permiten evaluar el efecto en la componente vertical que produce el estrés del viento [3].

Por lo anterior es de discusión el tema: ¿Qué tanta influencia tiene el viento sobre la superficie del mar, cuya heterogeneidad produce movimientos verticales de ascenso y descenso (bombeo de Ekman) con relación a la variación total del nivel? El presente artículo desarrolla este tema.

DATOS Y MÉTODOS

Datos. Se obtuvieron datos satelitales de viento y altimetría para un período de estudio de un año, a partir de los cuales se realizaron análisis comparativos en una cantidad suficiente de casos que permiten definir con claridad la relación existente entre la variación del nivel del mar y el transporte vertical de masa producto del esfuerzo del viento sobre la superficie del mar. Se emplearon datos correspondientes al año 2007, sin embargo los procesos asociados al estudio se consideran indistintos al período escogido. Los datos de viento utilizados son campos de velocidad y dirección en sus componentes zonal y meridional, interpolados en una grilla de $0,5^\circ$ de latitud y longitud, ofrecidos por IFREMER [4], provenientes del escaterómetro *SeaWinds* instalado a bordo del satélite *QuikSCAT*. Los datos se encuentran disponibles en <ftp://ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/mwf-quikscat>. Se utilizaron datos “Along-Track” (datos ordenados cronológicamente siguiendo la huella del satélite en tierra) de Anomalías del Nivel del Mar (SLA, por sus siglas en inglés), distribuidos por AVISO [5], en archivos que contienen ocho días de pasos del satélite sobre la tierra, obteniendo los datos correspondientes al año 2007 (disponibles en <ftp://ftp.aviso.oceanobs.com/global/dt/upd/sla/j1/>).

Metodología. A partir de los campos de dirección e intensidad del viento provenientes de QuikSCAT, se efectuó el cálculo del esfuerzo y rotacional del viento utilizando los coeficientes de arrastre de Large&Pond [6]; el rotacional vertical del esfuerzo del viento se obtuvo para cada punto de la grilla utilizando el algoritmo de diferencias finitas centradas para el cálculo de gradientes horizontales [7,8]; con estos datos de esfuerzo y rotacional del viento se calculó el transporte horizontal y el bombeo de Ekman, partiendo de la ecuación de conservación de masa y el transporte integral de la capa de Ekman [9]:

$$\operatorname{div} \vec{V} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$U_E = \frac{1}{\rho} \frac{\tau_y}{f}; \quad V_E = -\frac{1}{\rho} \frac{\tau_x}{f}; \quad (2)$$

donde \vec{V} corresponde al vector de corrientes de viento (u, v) ; w es la velocidad vertical (bombeo de Ekman), siempre y cuando el vector del esfuerzo del viento se encuentre en función de xy ; z es el eje vertical dirigido hacia arriba; (U_E, V_E) corresponde al transporte de Ekman en el plano horizontal $\int_{-h_E}^0 (u, v) dz$, h_E es la profundidad de la capa de Ekman con $z = 0$ en la superficie del mar; f corresponde al parámetro de Coriolis ($f = 2\omega \cdot \text{sen}\phi$); (τ_x, τ_y) corresponde al esfuerzo del viento en sus componentes zonal y meridional; y ρ a la densidad del agua de mar (se asume un valor constante de 1025 kg/m^3).

En general, el nivel del mar η se define por la ecuación (1) integrada en la vertical y presentada en dos dimensiones, así:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

donde $U \neq u_E$ y $V \neq v_E$, sino son integrales de las corrientes de distinta naturaleza $u(x, y, z)$ y $v(x, y, z)$, normalizados por la profundidad total H . El nivel del mar que registra el satélite, es el que se determina por la ecuación (3).

En el caso no estacionario la ecuación 2 no se aplica y, en términos de velocidades u_E, v_E , la teoría de Ekman define de forma simplificada como [1]:

$$\frac{\partial u_E}{\partial t} - f v_E = \rho^{-1} \frac{\partial \tau_x}{\partial z}, \quad \frac{\partial v_E}{\partial t} + f u_E = \rho^{-1} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \quad (4)$$

La magnitud de la velocidad vertical en la capa de Ekman resulta de la convergencia y divergencia del transporte de Ekman que puede ser formado por la integración de la ecuación de continuidad, la cual, si se integra con respecto al espesor de la capa de Ekman, teniendo en cuenta que los valores positivos se encuentran en dirección hacia arriba en el eje vertical, con la superficie del mar $enz=0$, y usando la condición $dew=0$ en la superficie, se obtiene [1]:

$$\frac{\partial U_E}{\partial x} + \frac{\partial V_E}{\partial y} - w_E = 0 \quad (5)$$

Combinando la ecuación anterior con la ecuación 2, se obtiene [1]:

$$\rho f w_E = \left(\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right) \quad (6)$$

Por esto la velocidad del bombeo de Ekman es aproximadamente $(\rho f)^{-1}$ veces el rotacional del esfuerzo del viento (si el viento es constante o varía relativamente lento con respecto a la escala de tiempo inercial f^{-1}).

Así, la velocidad de succión de Ekman función al tiempo puede expresarse:

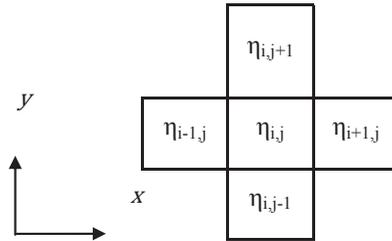
$$\frac{\partial \eta_E}{\partial t} + U_E \frac{\partial \eta_E}{\partial x} + V_E \frac{\partial \eta_E}{\partial y} = W_E(x, y, t) \quad (7)$$

Partiendo de las condiciones iniciales (eq. 2) de transporte de Ekman, calculadas para un nivel $\eta_E(x, y) = 0$, para el momento $t = 0$, la ecuación (5) se aproxima numéricamente obteniendo el nivel para cada momento posterior, de la siguiente forma algebraica:

$$\eta^{t+\Delta t} = \eta^t + w_E \Delta t - \left[\left(U_E \frac{\eta_{j+1} - \eta_{j-1}}{2\Delta x} + V_E \frac{\eta_{i+1} - \eta_{i-1}}{2\Delta y} \right) \Delta t \right] \quad (8)$$

donde $w = \nabla \times \left(\frac{\tau}{\rho_w f} \right)$; t , corresponde a un momento específico en el tiempo; $t+\Delta t$, al momento posterior con respecto al paso de tiempo Δt ; Δx , Δy , a la diferencia espacial (zonal y meridional, respectivamente) entre cada punto de la grilla.

La variación del nivel del mar con respecto a los ejes x e y se calcula mediante el esquema de cinco nodos cuyo molde se representa de la siguiente forma:



De acuerdo con el esquema central de segundo orden en el espacio $O(\Delta x^2, \Delta y^2)$ y el primer orden en el tiempo $O(\Delta t)$.

Esta elevación del nivel (eq. 8), corresponde al impacto del bombeo en el fondo de la capa de Ekman, integrado para un tiempo de 24 horas y asumiendo condiciones de viento constante entre cada paso de tiempo.

Procesamiento mediciones de altimetría. Se extrae una de las órbitas de satélite del paquete de 8 días de datos (Figura 2), se verifica el día de la medición y se recortan los datos cercanos a la costa. Sobre los mismos puntos geográficos se obtienen los datos de nivel del mar en el fondo de la capa de Ekman calculados por el modelo; una vez los datos de nivel modelado y SLA tienen la misma resolución espacial, se analizan a lo largo del período de estudio, graficando para cada órbita de SLA su correspondiente serie de datos de nivel modelado y observando su comportamiento, calculando el coeficiente de correlación lineal entre las dos curvas y, determinando así la relación existente entre los datos de nivel modelados en el fondo de la capa de Ekman y los medidos en la superficie por el satélite.

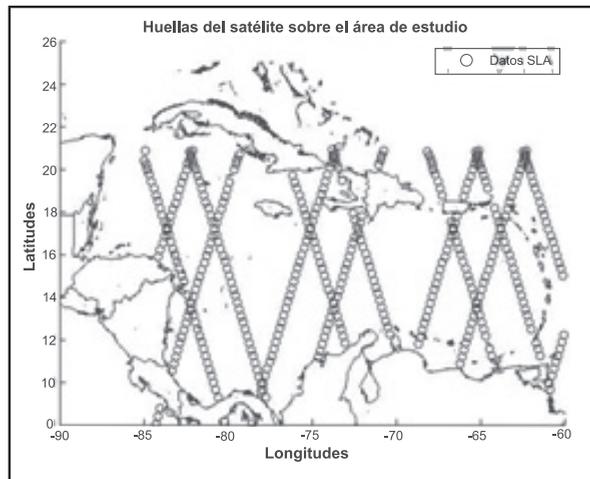


Figura 2. Huellas del satélite sobre el área de estudio para observaciones de SLA del archivo correspondiente al período entre el 28 de febrero y el 07 de marzo de 2007

RESULTADOS

La comparación efectuada entre los datos (SLA) medidos por satélite y los resultados del modelo que calcula el nivel del mar en el fondo de la capa de Ekman, para todos los casos analizados durante el período de estudio (año 2007) permite observar una marcada relación inversa entre el comportamiento de los niveles a lo largo de los puntos de la órbita del satélite, con un coeficiente de correlación observado en gran parte de los casos estudiados, que oscila entre 0,65 y 0,85. Éste coeficiente indica que, el incremento del nivel en la superficie está asociado a una disminución del nivel en el fondo de la capa de Ekman (Figura 3). Sin embargo, ésta marcada relación no fue del todo clara en todos los casos estudiados; en algunos casos se encontró una buena relación inversa en sólo una parte a lo largo de la órbita; en otros casos no se observa ninguna relación deducible (Figura 4).

En la figura 3 se presenta un caso típico; en ésta se observa cómo, cuándo hay velocidad vertical negativa el nivel en el fondo de la capa de Ekman desciende, mientras que en la superficie la medición de satélite muestra como resultado un incremento del nivel del mar. De la misma forma, al presentarse velocidad vertical positiva, hay un incremento del nivel en el fondo de la capa de Ekman, cuyo punto máximo coincide con el menor nivel del mar en la superficie. Se calculó el coeficiente de correlación entre los datos que generan la curva modelada del nivel en el fondo de la capa de Ekman y los datos del nivel del mar medidos por el satélite, entre los cuales se encontró un valor importante de -0,75, que nos permite establecer un marcado comportamiento de relación inversa entre ellos; en este caso particular este comportamiento estaría determinado por un rotacional de viento en sentido anticiclónico hacia el norte de la órbita (hacia las Antillas) y un rotacional de viento en sentido ciclónico hacia el sur (cerca a la Guajira).

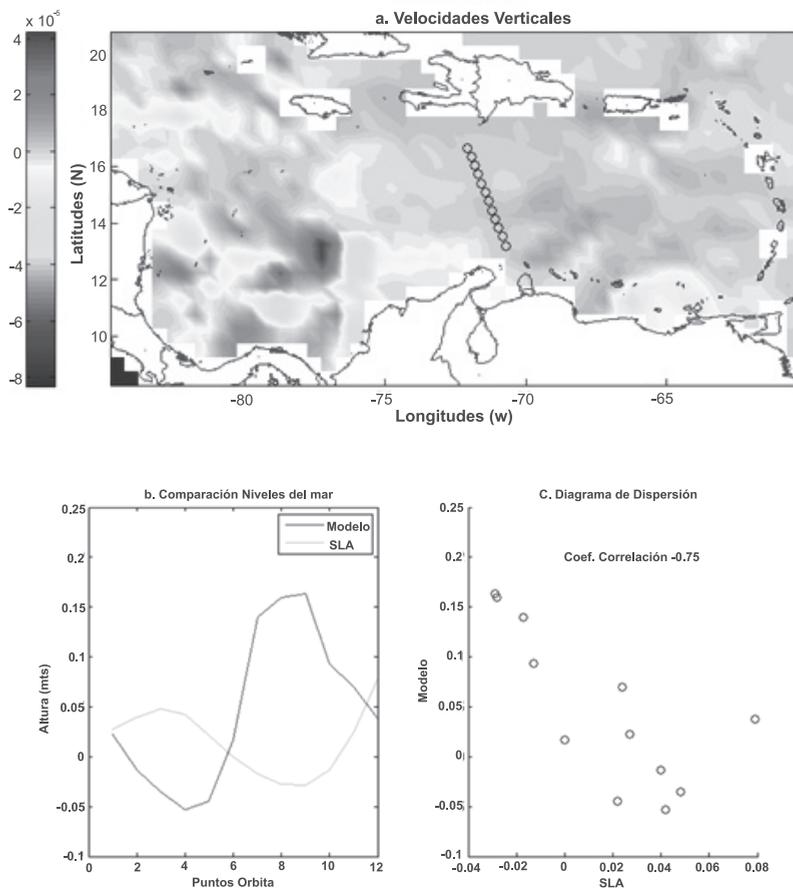


Figura 3. Comparación de datos modelados y medidos del nivel del mar para el día 8 de octubre de 2007. Arriba, puntos de la órbita sobre el área de estudio; la barra de colores expresa la velocidad vertical en m/s. Abajo, comparación entre las curvas y diagrama de dispersión con un coeficiente de correlación de -0,75.

En la figura 4, que se presenta por ser un caso donde no se encuentra una relación entre las curvas, se observa cómo sobre la órbita, que va de sur a norte, el nivel del mar en la superficie descende cuando hay incremento de la velocidad vertical, y empieza a elevarse al haber un brusco descenso de la misma. Sin embargo, cuando la velocidad vertical vuelve a ser positiva, en vez de descender el nivel del mar en la superficie, éste continúa incrementándose. Dicha elevación continuada del nivel en la superficie del mar a pesar de encontrarse diferentes condiciones de viento, llevó a analizar sobre los factores que causarían importantes variaciones en el nivel del mar, contrarrestando la acción que debería causar el forzamiento del viento. En éste caso no se encontró una relación importante entre los datos obtenidos con el modelo y los datos de SLA medidos por el satélite.

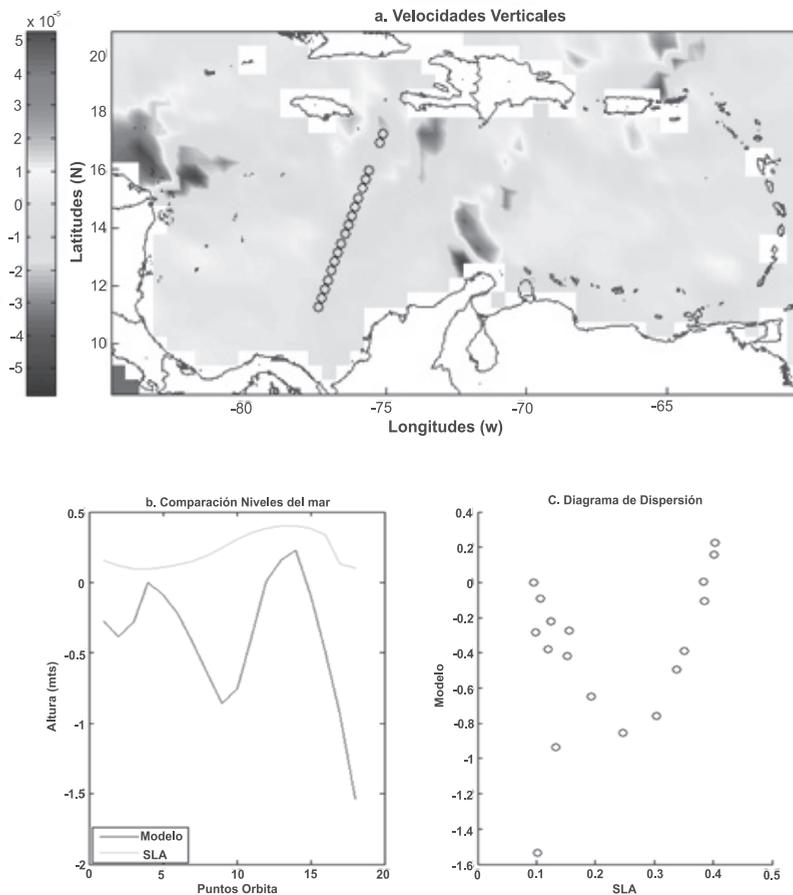


Figura 4. Comparación de datos modelados y medidos del nivel del mar para el día 7 de octubre de 2007. Arriba, órbita sobre el área de estudio, la barra de colores expresa velocidad vertical en m/s. Abajo, comparación entre las curvas y diagrama de dispersión.

En la búsqueda de otros factores que influyeran en éste comportamiento, se revisó la actividad de remolinos de mesoescala causados por efectos termohalinos; información ofrecida por el programa CoastWatchCaribbean/Gulf of Mexico Regional Node de la NOAA, en el cual se calculan las corrientes geostróficas en el área del Caribe y el Golfo de México a partir de datos satelitales de altimetría, <http://www.aoml.noaa.gov/phod/dataphod/work/trinanes/INTERFACE/index.html>; datos que fueron tenidos en cuenta para todos los casos estudiados, pretendiendo determinar algún nivel de influencia dado por la circulación oceánica. Como resultado de esto se encontró que en los casos donde no había una aceptable relación entre el nivel del mar y el nivel en el fondo de la capa de Ekman, se encontraban presentes giros o remolinos de mesoescala que podrían estar influyendo en la variación en el nivel del mar. En la figura 5 se puede

apreciar el efecto causado por un giro anticiclónico; la órbita del satélite de la cual se obtuvieron los datos de anomalías del nivel del mar atraviesa por el centro de un giro, el cual generará un transporte neto de masa de agua hacia su centro, elevando el nivel del mar. Este comportamiento explica el incremento del nivel del mar observado en la figura 4 (derecha), aún cuando las condiciones de viento deberían provocar descenso de dicha capa.

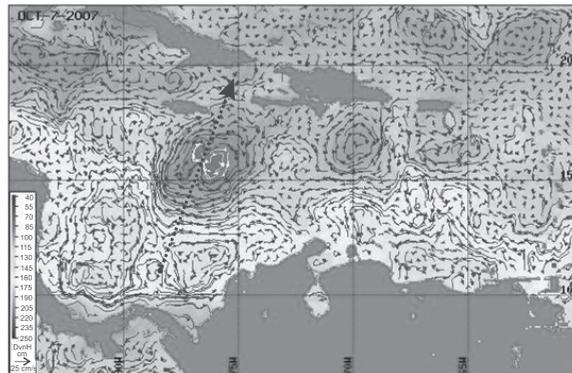


Figura 5. Corrientes Geostroficas en el mar Caribe para el día 7 de octubre de 2007. Se grafican los puntos de la órbita sobre los cuales se comparan los datos [10].

Sobre los casos donde la relación era inversamente marcada, la circulación oceánica no evidencia algún comportamiento que sugiera una importante variación del nivel del mar por efectos termohalinos. En el caso observado en la figura 3, por tomar un ejemplo que tiene un buen nivel de correlación, la circulación oceánica producida por los efectos termohalinos que se observan en la figura 6, no generan mayor influencia en el comportamiento de los niveles; en consecuencia se establece que la variación del nivel del mar estaría determinada principalmente por efecto del viento.

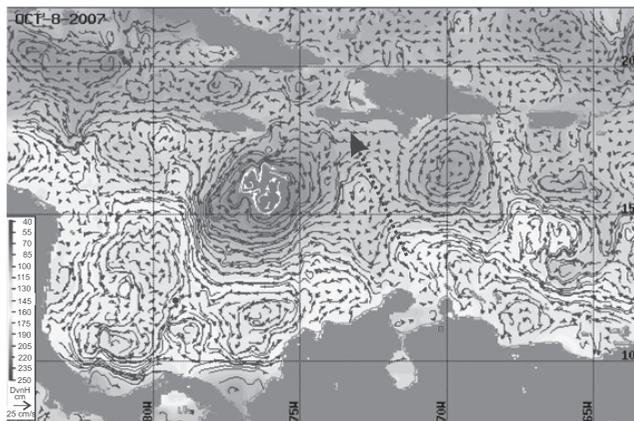


Figura 6. Corrientes Geostroficas en el mar Caribe para el día 8 de octubre de 2007. Se grafican los puntos de la órbita sobre los cuales se comparan los datos [10].

A lo largo del estudio, los casos donde no se encontró influencia significativa de la circulación oceánica a lo largo de la órbita objeto de estudio, los comportamientos encontrados fueron similares a las curvas de comparación presentadas en la figura 3, con un coeficiente de correlación importante (mayor de 0,6 en la mayoría de los casos) y se deben mayormente al efecto del viento; en los demás, cuando se encontró que las órbitas atravesaban remolinos o la circulación en sí era evidentemente influyente en el nivel del mar, las curvas no presentaban ninguna relación determinante, como se muestra en el caso típico de la figura 4.

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados de la comparación efectuada entre el nivel del mar calculado y el medido por el satélite, donde se evidencia la influencia del viento en el nivel del mar, se puede concluir que existe una relación inversa entre las variaciones del nivel del mar y el nivel de la termoclina para el mar Caribe. Estas variaciones son causadas por el esfuerzo del viento sobre el océano, con el efecto de los vientos ciclónicos, se generan valores de velocidad vertical en la capa de Ekman en el sentido del eje z (hacia arriba), que reducen el espesor de esta capa; recíprocamente, un viento en sentido anticiclónico produce que se ensanche la capa de Ekman, presentando velocidades verticales en el sentido negativo del eje z . Las variaciones espaciales del nivel del mar oscilan en un rango entre 0,05 y 0,5 metros, siendo en todos los casos mayor en el fondo de la capa de Ekman que en la superficie del mar.

Para los casos analizados en áreas donde los efectos termohalinos que originan giros de mesoescala producen aportes significativos en la variación del nivel del mar, se concluye que dichos efectos presentan una mayor importancia para la generación del transporte vertical de masa, que la variación misma producto de la convergencia/divergencia de masa causada por el esfuerzo del viento. En otras palabras, la actividad de giros termohalinos puede enmascarar el efecto del viento sobre la superficie del océano, siendo el comportamiento resultante del nivel del mar, indiferente a cambios en dirección e intensidad de los campos de viento.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los institutos IFREMER y AVISO quienes ofrecen datos de alta calidad para la investigación oceanográfica. Al Capitán de Navío Ricardo Molares Babra por su revisión y acertados comentarios que conllevaron a engrandecer la calidad del presente trabajo investigativo.

REFERENCIAS

- [1] GILL, Adrian. 1982 Atmosphere-Ocean Dynamics. International Geophysics Series Vol. 30. Academic Press, San Diego, cop., pp 317-328
- [2] BAKUN, A; NELSON, C. The Seasonal Cycle of the Wind-Stress Curl in Subtropical Eastern Boundary Regions. J. Phys. Oceanogr., 21, 1815-1834.

3. COCA, J; RAMOS, A; REDONDO, A. Calculo del bombeo de Ekman a partir de datos del dispersómetro de viento SeaWinds a bordo del satélite QuikSCAT. Revista de Teledetección. Número especial:40-44. Consultado el 10/01/2011, disponible en <http://www.aet.org.es/revistas/revista25/AET25-08.pdf>
4. IFREMER (Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar), disponible en <ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/mwf-quickcat>, consultado el 15 de marzo de 2010
5. AVISO (Archivo, validación e interpretación de datos oceanográficos satelitales), disponible en la página de internet-ftp <ftp://ftp.aviso.oceanobs.com/global/dt/upd/sla/j1/> , consultado el 12 de junio de 2011
6. LARGE, W; POND, S. Open Ocean Momentum Flux Measurements in Moderate to Strong Winds. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 11, 1981.
7. NAKAMURA, Joyce. 1992 *Applied numerical methods with software*, Prentice-Hall, México, p. 570.
8. KOWALIK, Z., & T.S. Murty. 1995 *Numerical modeling of the ocean dynamics*. World Scientific, Singapore, p. 481.
9. PEDLOSKY, Joseph. 1982. *Geophysical Fluid Dynamics*, N.Y.
10. CoastWatchCaribbean/Gulf of Mexico Regional Node; disponible en <http://www.aoml.noaa.gov/phod/dataphod/work/trinanes/INTERFACE/index.html> consultado el 17 de mayo de 2011.

EVALUACIÓN FUNCIONAL DE ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN LITORAL EN EL SECTOR DE LA BOCANA ESTABILIZADA HASTA LA PUNTA SANTO DOMINGO

Edwin Andrés Alonso *
edalton42@gmail.com

Juan Pablo Huertas Cuevas**
juanp107@gmail.com

Fecha de recepción: diciembre de 2011, Fecha de aceptación: septiembre de 2012

Resumen: Para la obtención de resultados que determinaron el grado de afectación de las obras de infraestructura costera que moldean la costa en Cartagena de Indias, en el área de la Bocana estabilizada a la punta de Santo Domingo, se realizó un análisis de parámetros de oleaje sintético (altura, período y dirección) mediante programación MATLAB. A través del “Sistema de Modelado Costero 2.5” se simuló el comportamiento de procesos de transformación del oleaje en su aproximación a la costa, sus corrientes asociadas y potencialidad de transporte de sedimentos, en tres épocas 1961, 1983 y 2003, obteniendo el comportamiento de la dinámica costera y su influencia en la línea de costa. Con imágenes georreferenciadas suministradas por el C.I.O.H, analizadas con la herramienta DSAS se identificaron los niveles de erosión y acreción, y como resultado se determinó que las estructuras costeras presentan falencias en su funcionalidad.

Palabras Clave: oleaje sintético, Sistema de Modelado Costero 2.5, herramienta DSAS.

Abstract: An analysis of parameters of synthetic waves (height, period and direction) was realized to obtain results that determine the degree of involvement of coastal infrastructure that shape the coast at Cartagena de Indias, in the area of the stabilized entrance to the top of Santo Domingo, by MATLAB programming. Through the “Coastal Modeling 2.5 System” it was simulated the behavior of processes of transformation of the waves in his approach to the coast, its associated flows and potentiality of transport of sediment, in three times 1961, 1983 and 2003 three times, which allowed to get the behavior of the coastal dynamics and its influence on the coast line. Likewise, geo-referenced images supplied by the C.I.O.H, were analyzed with the tool DSAS to identify the levels of erosion and accretion, and as final result it was determined that coastal structures presents shortcomings in its functionality.

Key words: synthetic waves, Coastal Modeling System 2.5, tool DSAS.

* Teniente de Navío de la Armada Nacional. Alumno Curso de Extensión Profesional en Oceanografía Física, Escuela Naval “Almirante Padilla”.

**Teniente de Navío de la Armada Nacional. Profesional en Ciencias Navales, Escuela Naval “Almirante Padilla”. Alumno Curso de Extensión Profesional en Oceanografía Física, Escuela Naval “Almirante Padilla”.

INTRODUCCIÓN

Las obras de protección litoral, se constituyen en uno de los factores que modifican las líneas de costa. Cartagena, como una ciudad turística de gran importancia, ha sido sometida a un gran desarrollo urbanístico, lo cual sumado a los diferentes fenómenos extremos a que es sujeta su zona costera, se ha desequilibrado la línea de costa. Teniendo esto, se desarrolló una comparación del comportamiento de los principales elementos que moldean la línea de costa, antes y después de las obras de infraestructura costera dispuestas[1]; Esta comparación, está delimitada entre la Bocana estabilizada y la punta de Santo Domingo, la cual, se considera de gran impacto socio-económico, tanto para la administración distrital como para la Dirección General Marítima.

A través del “Sistema de Modelado Costero 2.5” se desarrolló la modelación del área seleccionada en dos épocas diferentes, la primera estacionada en 1961 y la segunda con datos actuales, la información fue suministrada por el CIOH y el interés radica en conocer, el grado de afectación de las obras de infraestructura costera sobre los parámetros que moldean la costa, lo que supone un análisis de parámetros como el oleaje y su transformación a medida que se aproxima a la costa, un análisis a largo plazo, bajo estas dos condiciones de tiempo y lugar, establecerán cual es la tendencia del tramo de costa de interés, buscando establecer si se encuentran o no en equilibrio.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA

La zona de estudio corresponde a depósitos cuaternarios de origen marino del tipo playas y playones entre 10 y 30m, por material granular tipo arena limosa de color gris a pardo rojizo, y rocas tipo calizas arrecifales (caracolejos) y chert.

Su morfología está determinada por procesos dinámicos y estructurales, relacionados estrechamente con la evolución de la plataforma continental, sus aportes fluviales y la dinámica marina en escalas local y global, se perciben que la mayoría de la unidad geomorfológica del área de estudio son marismas propias de costas bajas. Además, esta zona se encuentra influenciada por médanos costeros en el sector de Marbella, y procesos antropogenicos como la construcción de la avenida Santander en el año de 1969[2]. En general, el viento es fuerte en invierno entre los meses de noviembre y marzo, seguido por una rápida disminución de su velocidad entre los meses de marzo y mayo. Hay un incremento en la intensidad durante junio y septiembre conocido como “veranillo de San Juan”, seguido por una disminución en la intensidad hasta noviembre cuando la estación de vientos comienza nuevamente (Andrade, C. A., 1993) [3].

RECOLECCIÓN DE DATOS

Tabla 1. Características generales de la información batimétrica, topográfica, hidrológica y de oleaje utilizada en el estudio.

Información	Fuente	Observaciones
Batimétrica	Primaria: (1) levantamiento batimétrico hasta una distancia de 200 m. con respecto a la línea de costa en la bahía de Cartagena. Secundaria: cartas náuticas CIOH (Servicio Hidrográfico Nacional)	Primaria: (1) información levantada por el Área de Hidrografía del CIOH en el 2010 en el marco de sus proyectos misionales. Secundaria: Cartas COL042, COL 255, COL259
Oleaje	Datos Wave Watch III (WWIII - National Oceanographic and Atmospheric Administration)	(1) Información de oleaje sintético (altura, periodo y dirección) en dos puntos comprendidos entre las latitudes 10.00°N y 10.75°N y las longitudes 75.75°W – 76.00°W; (2) información suministrada por el Estudio Morfodinámico del Parque Nacional Natural Los Corales del Rosario y de San Bernardo CIOH 2010
Nivel del mar	Primaria: datos obtenidos por medio de un oleómetro WTR-9 Serie 129 instalado en I. Tesoro (10°23N, 75°74W), entre el 24 de enero y el 17 de febrero de 2010, tomada del Estudio Morfodinámico del Parque Nacional Natural Los Corales del Rosario y de San Bernardo CIOH 2010.	Secundaria: información del mareógrafo de Cartagena (IDEAM) (10°23N, 75°32W), tomada del Estudio Morfodinámico del Parque Nacional Natural Los Corales del Rosario y de San Bernardo CIOH 2010.
Fotografías aéreas	Primaria: Fotografías aéreas del Instituto Agustín Codazzi de los años 1961, 1983 y 2003	Secundaria: Vuelo C-987 año 1961 fotos 7,106, Vuelo C-2096 año 1983 fotos 184,189,201, Vuelo C-2688 año 2003 fotos 015,114

Para el análisis se tomaron dos sitios de propagación de oleaje desde aguas indefinidas hacia aguas someras teniendo como criterios: (1) proximidad a la ciudad de Cartagena, y (2) capacidad para reflejar los procesos de transformación del oleaje en su tránsito desde aguas profundas a intermedias. Posteriormente, estos datos seleccionados (Punto 2 y Punto 3) fueron clasificados por cuadrante de arribo (22.5°) y a nivel estacional para definir la dirección predominante, la altura significativa y el periodo pico del oleaje incidente en el sistema.

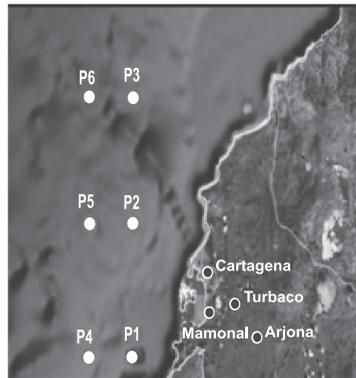


Figura 1. Localización de información de oleaje - datos WWII. Punto 2 (P2: 10°30N, 75°45W), Punto 3 (P3: 10°45N, 75°45W).

Estos datos se obtuvieron a través del programa MATLAB rutina CAROL, el procedimiento que se siguió fue extraer estos datos y sectorizar en la rosa de maniobra en 16 espacios además de las variables ya mencionadas obtuvimos los porcentajes en la dirección predominante.

Se procedió a modelar los dos datos de mayor probabilidad a través del Sistema de Modelado Costero (SMC) que forma parte del proyecto titulado “Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral”, proyecto llevado a cabo por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C.) de la Universidad de Cantabria; El SMC es una herramienta que integra una serie de modelos numéricos, dentro del cual encontramos el Programa de Morfodinámica de Playas (MOPLA). Este programa permite modelar la evolución morfodinámica de playas a corto plazo, y lo componen seis modelos numéricos, los cuales simulan la propagación del oleaje, el sistema de corrientes inducido por la rotura del oleaje, el cálculo del transporte de sedimentos y la evolución de la batimetría[4].

Aspectos relevantes para este tipo de modelos es la parametrización de la función exacta de transferencia no lineal de energía contiene el mismo número de grados de libertad que el espectro en sí mismo y el balance de energía es cerrado o ajustado mediante la especificación de una función de disipación [5].

El análisis multitemporal se realizó mediante el software ArcMapy su herramienta DSAS, la cual genero zonas de erosión-acreción y calculó áreas de avance y retroceso en mts2del área estudiada.

RESULTADOS

Condiciones Hidrodinámicas

El procesamiento de 49200 datos WWII de dirección, periodo y altura de las olas (Puntos 2 y 3, Figura 1), recopilan las variables mencionadas, para el sector centro

oriental del mar Caribe, y establecen que el clima de las olas, en este sector marino proximal está dominado en un 76,05% por ocurrencia de trenes de oleaje que provienen de una zona de generación localizada al nor-este (NE). En aguas profundas, estas olas presentan una altura promedio de 0.6937 ± 1.3305 m, con un periodo promedio de 6.2492 ± 9.3187 s, respectivamente (Tabla 2).

Tabla 2. Resumen estadístico de la serie de oleaje en aguas profundas para el sector de interés.

Sector	Dirección dominante Dp (°)			Altura significativa Hs (m)			Periodo Pico Tp (s)		
	Min	Prom	Max	Min	Prom	Max	Min	Prom	Max
NNE (10.97)	11.5750	29.2602	34.0000	0.1700	1.3305	3.5850	2.9300	6.2492	10.1250
NE(76.05)	34.0050	39.8370	56.4700	0.0700	1.3125	3.4750	2.8800	7.0121	14.7200
ENE (0.01)	57.4700	61.8663	74.5050	0.3450	0.6937	1.0600	4.7900	9.3187	12.4850
SE (2.49)	124.680	138.948	146.480	0.2250	0.7010	1.4750	2.8450	5.2906	8.5150
SSW (0.47)	191.535	201.506	213.860	0.0700	0.7561	2.2705	2.6650	5.2998	9.2200
SW (2.34)	214.130	228.274	236.500	0.2250	0.7259	1.7950	2.7350	4.3014	5.6200
WSW (2.03)	236.545	245.710	258.670	0.1050	0.7334	2.2600	2.9250	4.4536	5.8200

Nota. Molares (2005) realizó un análisis armónico de una serie de nivel del mar obtenido por el IDEAM en Cartagena durante el periodo comprendido entre 1990-2000. Fuente. Molares, 2004 [6]

Una vez estimados estos regímenes medios de oleaje, y con el fin de evaluar el efecto de los procesos de asomeramiento, refracción, difracción, disipación y rotura sobre la propagación del oleaje en aguas someras, se seleccionaron estados de mar (Hs, Fp, Dp) característicos en aguas profundas que fueron propagados hacia el área de interés, mediante el modelo numérico de propagación de oleaje Oluca-SP.

A partir de la información estadística obtenida del oleaje sintético (Tabla 2), fueron establecidos casos específicos para la propagación a partir de su dinámica en aguas profundas, oleaje proveniente del NE, NNE, SW y WSW. Para cada uno de estos cuadrantes de arriba se realizó un análisis de distribución de frecuencias para la dirección dominante y se seleccionó la combinación más representativa por medio de análisis de probabilidades conjuntas.

Este análisis de probabilidad conjunta para los cuadrantes de arriba provenientes del NE (76.05 %) y NNE (10.97 %), nos muestra que la mayor parte del tiempo, la altura significativa del oleaje es menor a 2.5 m, y periodos pico de 4 a 8 s, mientras que para los oleajes provenientes del SW (2.34%) y WSW (2.03%) su altura significativa de oleaje está entre 0.1 a 1.3 m, con periodos picos que varían entre 2.5 y 5 s, estos escenarios son los que presentan la mayor probabilidad de ocurrencia, indicando que las condiciones de oleaje más frecuentes, son las menos energéticas.

Sistema de Modelación Costero 2.5

A continuación se inicia la descripción de los resultados obtenidos con el Sistema de Modelación Costera 2.5 con las probabilidades de mayor ocurrencia, la grafica se encuentra dividida en el caso A proveniente del NE y el caso B que corresponde al NNE la línea blanca nos indica la línea de costa, la cual es modificada cada año de estudio.

La propagación del oleaje ve afectado su acercamiento a las zonas costeras por la variación del fondo marino, esta afectación determina la dirección y fuerza de las corrientes en la costa cercana, esta propagación permite establecer alturas significativas en la zona de estudio, para lo cual se presentan los casos más significativos de oleajes provenientes del NE y NNE.

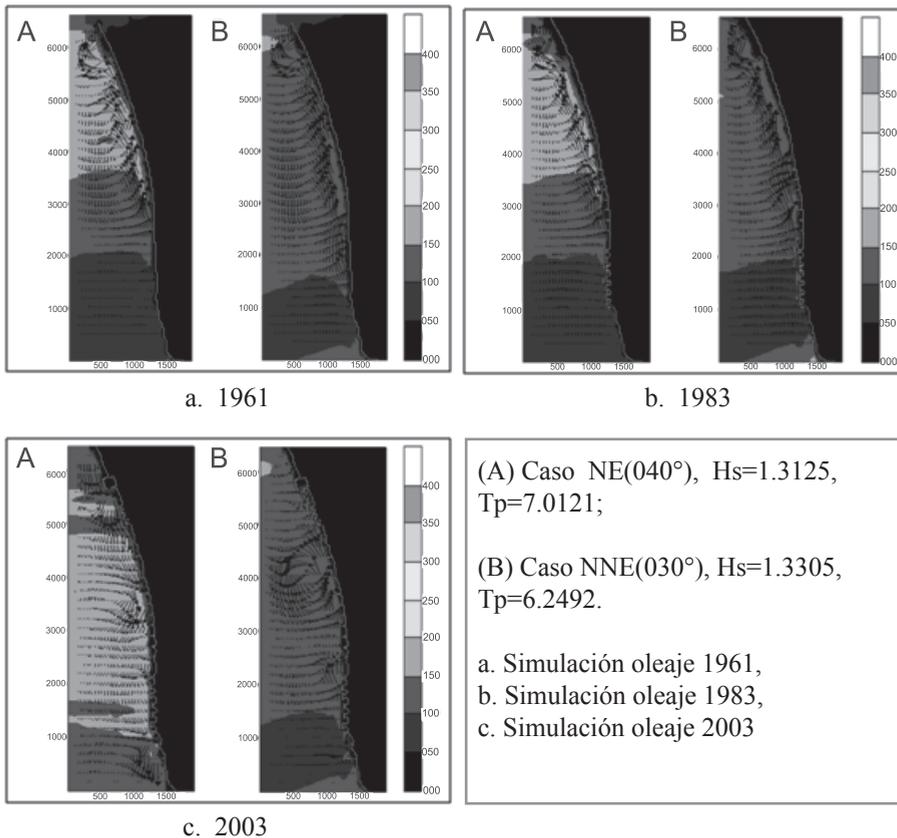


Figura 3. Resultado simulación propagación oleaje

Para el año de 1961 en el caso A, se observa que la zona norte tiene alturas de ola de 2 m, zona central de 1.5m y zona sur de 1 m, para el caso NNE observamos que a excepción de la zona sur se presenta una altura de la ola de 1.5 m, su aproximación a la costa es de forma oblicua y va tomando una dirección sur norte en las proximidades a la costa. Para el año 1983 las características de altura de la ola y propagación se mantienen. su aproximación a la línea de costa es de forma oblicua y frontal, las construcciones en la zona central afectan la propagación en sentido sur norte y sur occidente. Para el año 2003 en el caso NE observamos una altura de 2 metros en la mayor parte del área estudiada y para el caso NNE se mantiene las condiciones de altura, se puede observar sobre la línea de costa un cambio de dirección para el caso NE de norte a sur mostrando su mayor intensidad en el sector de la bocana y en la

zona media, para el caso NNE se mantiene la dirección sur norte presentando fuertes cambios de dirección en la zona central.

Las corrientes longitudinales son de especial importancia en la disposición de equilibrio de una playa, y más comúnmente, en su forma en planta, dado su importante capacidad de transporte de sedimentos. De hecho, las corrientes longitudinales se producen en la zona de rotura del oleaje y, por tanto, en un área donde el sedimento se encuentra en suspensión (por la acción propia de la rotura del oleaje) y es fácilmente transportable por efecto de dichas corrientes[7].

La figura 4 muestra para el año 1961 desde la zona central en dirección norte una fuerte corriente en la proximidad a la costa lo cual permite un alto volumen en el transporte de sedimentos. Para el año 1983 continua con características similares al año 1961, la influencia de las obras que se encuentran en la zona sur no es significativa y para el año 2003 en el caso NE observamos un cambio de dirección y presenta valores más fuertes en la zona norte y central, para el caso NNE mantiene su dirección sur-norte, pero igual presenta la mayor magnitud en la zona central.

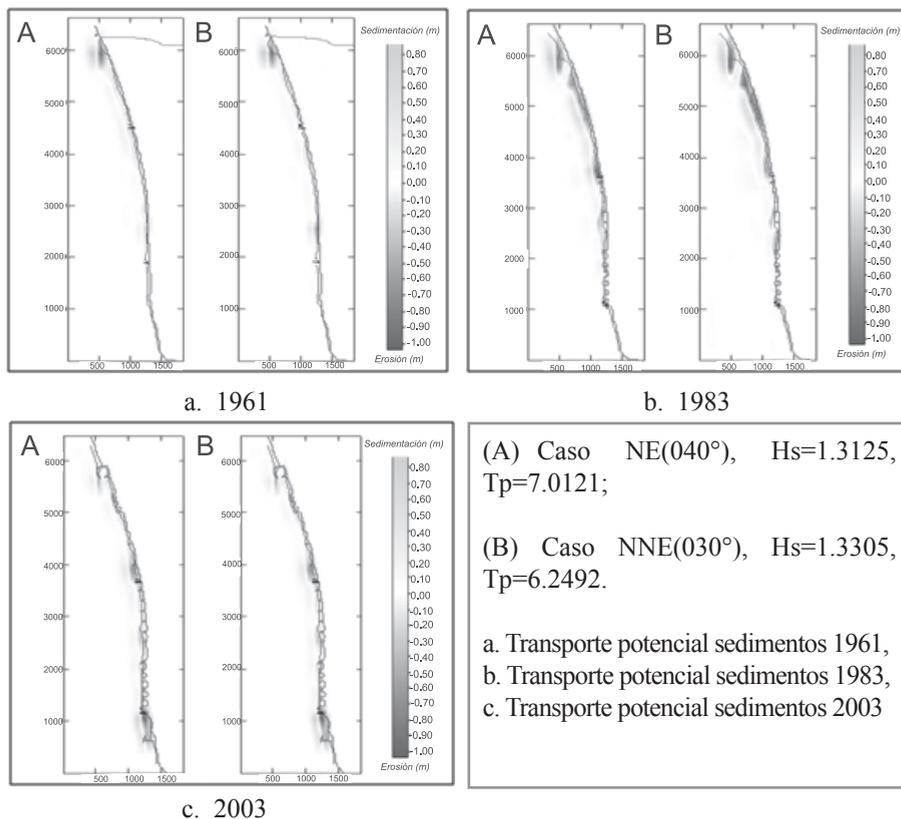


Figura 5. Resultado simulación transporte potencial sedimentos

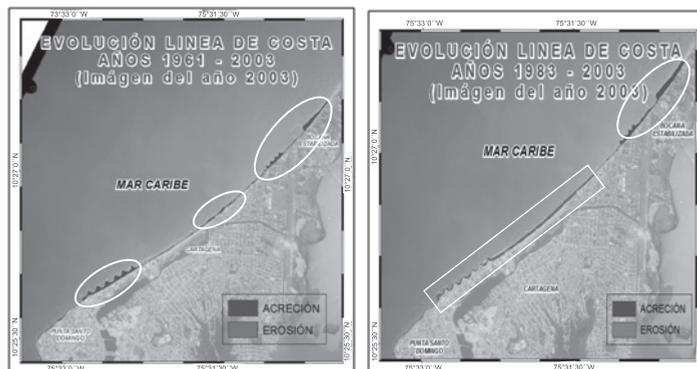
En la figura 5 se observa que para el año 1961 los lugares de mayor erosión se encuentran en la zona norte. De igual forma el transporte potencial de sedimentos presentan un comportamiento similar a las corrientes litorales, para los casos de propagación provenientes del noreste. Para el año 1983 se observan incrementos de sedimentación en la zona norte y la zona central y para el año 2003 disminuye su erosión y sedimentación, con esto se puede percibir que la construcciones en la zona norte influenciaron en el control de erosión, sin embargo la longitud de las obras no parece suficiente para un control total.

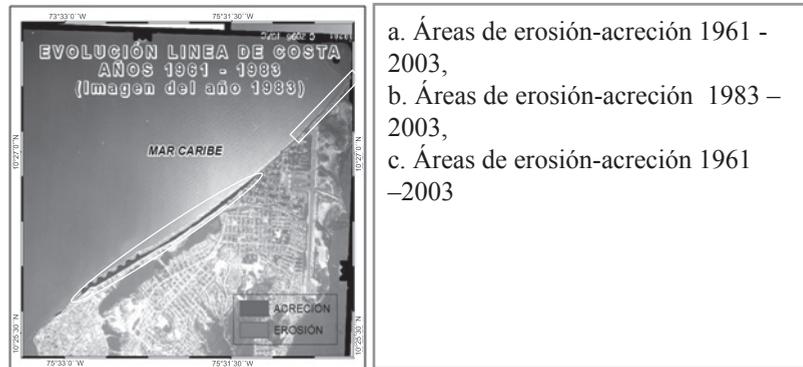
Análisis Multitemporal de la Línea de Costa

Los cambios erosivos y/o acumulativos que ocurren en el litoral, son el producto de fenómenos regionales y locales, tales como actividad oceánica y atmosférica, cambios de la geología de la zona, ascenso del nivel medio del mar, intervenciones antrópicas, entre otros. La línea costera requiere la aplicación de metodologías que permitan analizar la evolución espacio-temporal en un sector específico, el uso de fotografías aéreas se ha convertido en una de las herramientas más recurrentes a la hora de realizar estudios de erosión-acreción, con ayuda de métodos fotogramétricos que permiten efectuar comparaciones cuantitativas, siendo efectivos, no sólo por su alta resolución, que hace fiable la identificación de la línea de costa, sino además, por la posibilidad de adquirir imágenes de diferentes años correspondientes a una misma zona (en Colombia existen fotografías aéreas, tomadas por el IGAC, a partir del año 1936).

Para el análisis de tasas de erosión-acreción de la línea de costa se seleccionaron fotografías aéreas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) de los años 1961, 1983 y 2003, que por su distanciamiento temporal de aproximadamente 20 años, proporcionan una clara idea de la dinámica costera en éste sector.

Entre los años 1961 y 2003, como se observa claramente en la figura, se presentó en casi la totalidad de la zona de estudio una marcada acreción estimada en 216.832,06 m², manteniendo un comportamiento estable, esto pudo haber sido ocasionado por la construcción de obras de protección costera, las cuales en su instalación siempre serán acompañadas por rellenos artificiales para la regeneración de sus playas.





- a. Áreas de erosión-acreción 1961 - 2003,
- b. Áreas de erosión-acreción 1983 - 2003,
- c. Áreas de erosión-acreción 1961 - 2003

Figura 6. Áreas de erosión-acreción

Pero, analizando lo ocurrido entre los años 1983 y 2003 se observa un sector de acreción, de 111.455,84 m², en la parte norte del área de estudio y un sector de erosión en la parte sur en donde la pérdida de material fue de 81.844,76 m².

Por otro lado, se observa que en el transcurso de los años 1961 y 1983 se presentó pérdida de material en la parte norte del área de estudio, en donde la erosión fue de 39.408,72 m² y en el sector sur presentó acreción con una ganancia de 229.740,25 m²

CONCLUSIONES

La batimetría y el oleaje son determinantes en la formación de las corrientes litorales en la zona de estudio, para este caso tenemos unos perfiles de playa que indican unas isobatas paralelas a la costa, sin embargo estas playas se han visto afectadas por el oleaje ante diferentes fenómenos extremos, y tienen una fuerte influencia sobre las playas el tránsito sedimentario, el cual es controlado por la acción dinámica del oleaje.

Las playas se han visto afectadas por el oleaje ante diferentes fenómenos, con fuerte influencia del tránsito sedimentario.

Se utilizó el Sistema de Modelación Costera SMC para representar parámetros de modificación morfodinámico en la zona de estudio, lo cual arrojó un promedio de altura de ola de 1m, con corrientes fuertes que provienen de la zona norte, y su mayor sedimentación puede darse a la altura de la bocana estabilizada, presentando erosión baja en el sector de Marbella.

El oleaje en el área de estudio se disipa a medida que llega a la costa, la altura de la ola durante los tres años simulados no supera los 1.5 mts, además se mantiene una constante de su comportamiento en toda la malla, la cual oscila entre 0.5 y 2.00 mts, esto puede generar cambios morfodinámicos en la línea de costa, teniendo en cuenta que el oleaje llega de forma frontal u oblicua, las corrientes generadas no superan valores de 0.5 m/s, por lo cual hace que las playas muestren indicios de erosión sobre

una parte de la costa, exceptuando la zona sur, que presenta corrientes de magnitudes menores y haciendo que este fenómeno no sea muy concurrido.

Al igual que las corrientes, el transporte potencial de sedimentos presenta un comportamiento similar en los tres años simulados. Su variabilidad en el comportamiento de la costa para las variables de sedimentación y erosión dependieron de la altura de la ola, la cual es de 1.5 mts y su ángulo de incidencia.

El análisis multitemporal permitió observar que la zona norte paso de una perdida de material a una recuperación la cual duplico su cantidad, el área general de Marbella paso de un incremento a una perdida, la cual fue menor comparada con este incremento; En el análisis total se observa una acreción en toda la zona lo cual permite concluir que las obras ha aportado protección a la línea de costa, sin embargo su efectividad no es completa debido a que la longitud de estas estructuras no alcanza las áreas de sedimentación y erosión observada en las graficas y la falta de mantenimiento de estas estructuras.

REFERENCIAS

1. HASKONING CARINZA. 1996. Proyecto Bocana Estabilizada en la Ciénaga de la Virgen. Ministerio de Transporte. 50 pp.
2. Carvajal, A. y J. Jurado 2009. Caracterización fisico-biótica del litoral del departamento de Bolívar. Pp. 17. En: DIMAR-CIOH. 2009. Caracterización fisico-biótica del litoral Caribe Colombiano. Tomo II. Dirección General Marítima-Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Ed. DIMAR, Serie Publicaciones Especiales CIOH Vol.2. Cartagena de Indias, Colombia. 100 Pp.
3. DÍAZ, G., 2007. Influencia del oleaje y deriva litoral en la región costera de Cartagena de Indias (Sector la Boquilla el Laguito). Disponible en <http://www.cioh.org.co/meteorol>.
4. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2000 Dirección General de Costas: Modelo de Ayuda a la Gestión Litoral. Universidad de Cantabria, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. ESPAÑA., Pp 116.
5. OSORIO. A, MONTOYA. R, MESA. J, BERNAL. G, 2009. Reconstrucción de 40 años de datos de oleaje en el mar Caribe Colombiano empleando el modelo WWIITM y diferentes fuentes de datos. Boletín científico CIOH. __, 37-55.
6. MORALES. R, 2004. Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe Colombiano. Boletín Científico No22 CIOH p 105-113.
7. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, 2010. Estudio Morfodinámico del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y de San Bernardo fase I. Edición. 273 pp.

IDENTIFICACION DE UNA SEÑAL DE SONAR MEDIANTE EL USO DE LA TECNICA DE LA CORRELACION

Carlos Andrés Martínez Ledesma*
ledesmann@yahoo.com

Fecha de recepción: diciembre de 2011, Fecha de aceptación: septiembre de 2012

Resumen: Se estudiaron las ondas de sonido a través del análisis de Fourier. Debido a que se estudia la propagación en el medio marino, se tuvo en cuenta la manera en que el océano influye en las ondas acústicas, enfocándose principalmente en el aspecto de la atenuación. Se detalló el proceso de determinación del tiempo de retardo (Δt) para el cual una señal reflejada es idéntica a la señal emitida, mediante la aplicación de la correlación cruzada entre la señal emitida y la señal total recibida. Posterior a esto, se procede a efectuar el proceso de filtrado del ruido que viene en la onda total captada para aislar la onda reflejada, a través de la correlación cruzada entre la onda emitida y la onda captada en un tiempo determinado (Δt).

Palabras clave: Análisis de Fourier, tiempo de retardo, ruido, atenuación, autocorrelación, correlación cruzada, ondas de sonido.

Abstract: The sound waves were studied thru the Fourier analysis. Because it's studied the propagation thru the marine environment, takes place the way the ocean has influence in the sound waves, mainly focus in the attenuation issue. In addition to the former information, It has been detailed the time of delay (Δt) determination process, by which a reflected signal it's identical to the emitted signal thru the cross correlation application between the emitted signal and the total received signal. After this, its proceed to effect the noise filter process, which its coming into the total received signal, in order to insulate the reflected signal, thru the cross correlation between the emitted signal and the total received signal at determinate time (Δt).

Key words: Fourier analysis, time of delay, noise, attenuation, autocorrelation, cross correlation, sound wave.

* Oceanógrafo Físico. Escuela Naval "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia.

INTRODUCCION

En el medio acuático, un transdúcer de sonar emite una señal la cual al chocar con un objeto reflectante (blanco), se refleja hacia su fuente y es captada por el transdúcer acompañada de ruido, el cual, dependiendo de su radio, dificulta la identificación de la señal deseada (señal reflejada).

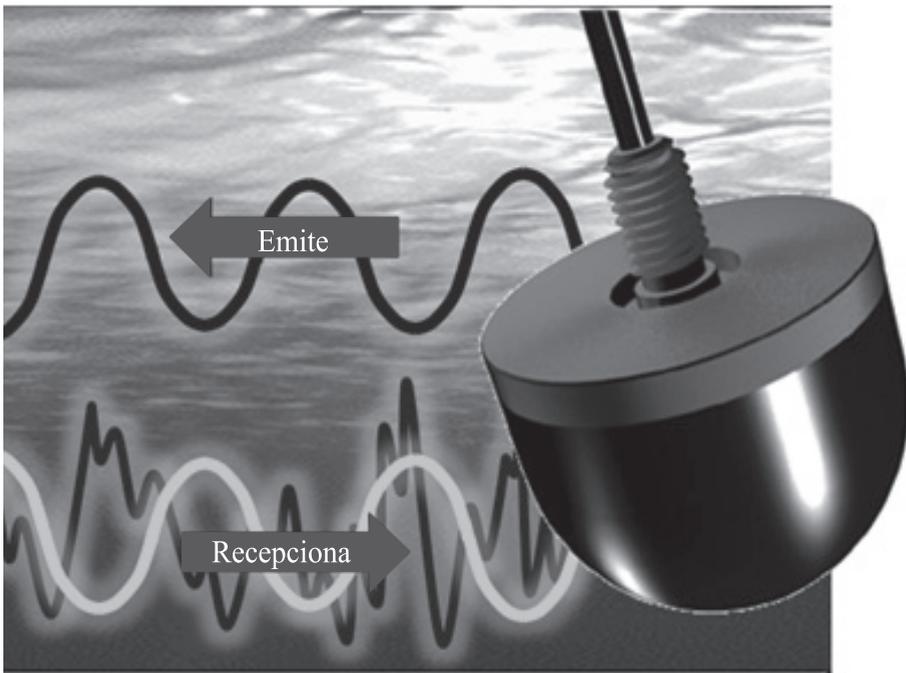


Figura 1. Representación del proceso de emisión y recepción de señales de un transdúcer

El objeto del presente trabajo consiste en identificar una señal reflejada mezclada con ruido generado por el medio ambiente, conociendo de antemano las características de la señal emitida.

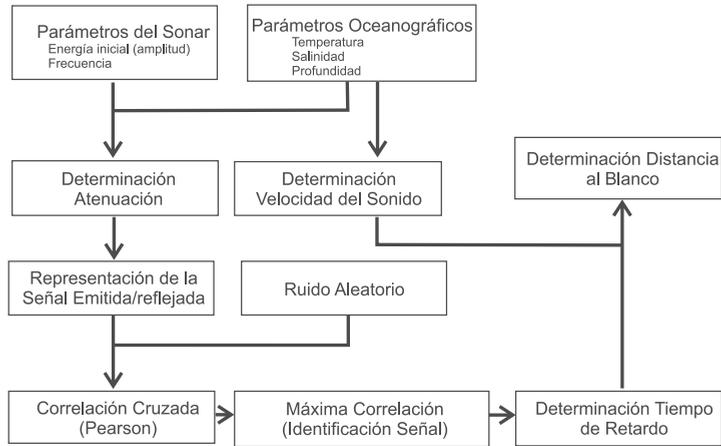


Figura 2. Representación del proceso matemático discriminado paso a paso, en el cual se introducen parámetros de entrada (parámetros del sonar, parámetros oceanográficos y ruido aleatorio) para obtener el filtrado de la señal y el acceso a la información que proporciona (atenuación, tiempo de retardo, velocidad del sonido y distancia al blanco).

REPRESENTACION DE LAS SEÑALES DE SONAR

Inicialmente, se deben representar las señales del sonar mediante el uso del análisis de Fourier, el cual sirve para representar tanto señales periódicas como señales no periódicas, siempre y cuando estas no sean de carácter aleatorio como el ruido (definido mediante parámetros estadísticos), sino de carácter determinista (determinado por una ecuación definitoria), quedando determinada así:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nw_0 \cdot t) + b_n \sin(nw_0 \cdot t), \text{ donde}$$

- $a_0, a_n,$ y b_n = Son los coeficientes de Fourier
- w_0 = Frecuencia inicial
- n = Número de términos

Siendo las fórmulas de los componentes de la serie de Fourier las siguientes:

- $a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$
- $a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(nw_0 t) dt$
- $b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(nw_0 t) dt$
- $w_0 = \frac{2\pi}{T}$

A medida que se incrementa el número de los coeficientes, el resultado de la función $f(t)$ es cada vez más parecido a la función original de la señal (en nuestro caso, la señal hidroacústica). Es por esta razón que los coeficientes son conocidos por aportar "el peso" de la función[1].

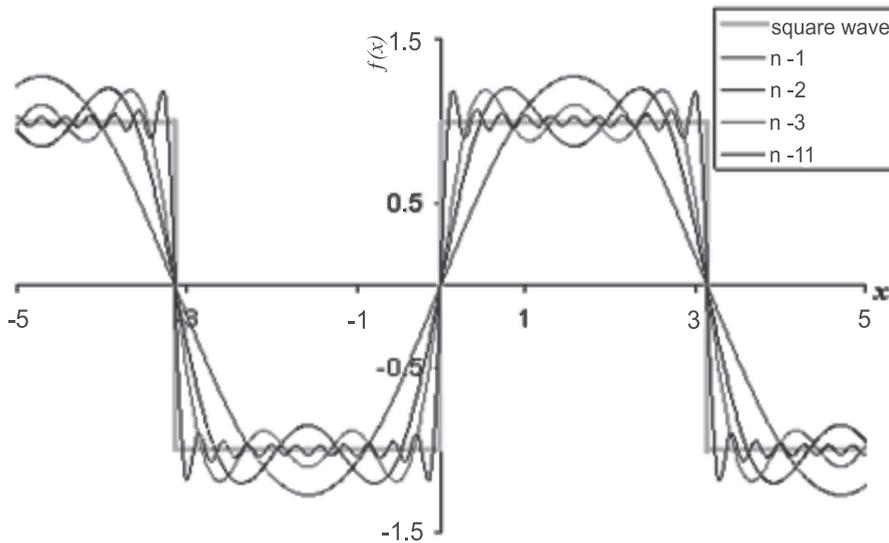


Figura 3. Peso de los coeficientes de Fourier en la función

Como se puede detallar en la figura3, a medida que aumenta el número de coeficientes, el resultado de la graficación de la función resultante se va "pareciendo" cada vez más a la función original (en este caso, una función rectangular), hasta alcanzar un perfil lineal idéntico cuando n tiende a infinito, (para el caso dado, debido a que la función original no es analítica en los vértices).

Al desarrollar la fórmula y representarla en términos de Euler, queda la señal representada así:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(w) e^{i(w.t)} dw$$

que viene siendo la antitrans formada de Fourier y la representación de una serie periódica, y tenemos también la fórmula:

$$F(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i(w.t)} dt$$

Que viene siendo la transformada de Fourier, y la representación de una serie no periódica.

PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS

En el agua, la densidad influye en la propagación de las ondas acústicas, y esta depende principalmente de los siguientes parámetros:

- T= Temperatura (m/s)
- S= Salinidad
- D= Profundidad (m)

VELOCIDAD DEL SONIDO

En el agua, el sonido se propaga mejor que en la atmósfera, siendo afectado por los parámetros oceanográficos anteriormente descritos. Existen varias formulaciones para calcular la velocidad del sonido en el agua[2],[3], pero debido a su mayor sencillez, en el programa desarrollado a manera de interfase GUI de Matlab se trabajó con la fórmula desarrollada por Mackenzie[4] la cual define que:

$$C = 1448,96 + 4,591T - 5,304 \times 10^{-2} \cdot T^2 + 2,374 \times 10^{-4} \cdot T^3 + 1,340 \cdot (S-35) + 1,630 \times 10^{-2} \cdot D + 1,675 \times 10^{-7} \cdot T^2 - 1,025 \times 10^{-2} \cdot T \cdot (S-35) - 7,139 \times 10^{-13} \cdot T \cdot D^3$$

Donde

- C= Velocidad del sonido en el mar ($\frac{m}{s}$)
- T= Temperatura del agua (°C)
- S= Salinidad
- D= Profundidad (m)

NOTA: Esta ecuación sólo es válida en los siguientes parámetros

- $0^{\circ}C \leq T \leq 30^{\circ}C$
- $30 \leq S \leq 40$
- $0m \leq D \leq 8000m$

ATENUACION

Como característica típica de las señales de sonido, se tiene observado que al aumentar la distancia recorrida por el haz de sonido, su intensidad disminuye, lo que es conocido como atenuación. Debido a que la atenuación varía de acuerdo a las características del medio en que se desplaza una señal acústica, y teniendo en cuenta que el objeto del presente trabajo consiste en describir y analizar dicho comportamiento en el océano, se trabajó entonces con la fórmula[5] que aplica en todo el rango de frecuencias, la cual fue basada en los planteamientos de desarrollados por Thorp (1967)[4]. Esta técnica, especifica que la atenuación del sonido en el mar, identificada con la notación A_t (expresado en dB/kyd), se define por el valor de una variable de atenuación, o la suma de dos variables, de un total de cuatro existentes, a saber:

Tabla 1. Especificación del valor de atenuación de acuerdo a la frecuencia utilizada

Coefficiente	Rango de Frecuencia (regiones)	Rango de Atenuación	Fórmula	Proceso
A ₁	510 kHz ≤ f	0,1094 - superior	$2,68 \times 10^{-2} \cdot \frac{D \cdot F^2}{T}$	Viscosidad
A ₂ &A ₁	490 kHz < f < 510 kHz		A ₂ + A ₁	Viscosidad/ Relajación de ácido bórico
A ₂	15 kHz ≤ f ≤ 490 kHz	0,001094-0,1094	$1,86 \times 10^{-2} \cdot \frac{S \cdot D \cdot f_T \cdot F^2}{f_T^2 + F^2}$	Relajación de ácido bórico (MgSO ₄)
A ₃ &A ₂	5 kHz < f < 15 kHz		A ₃ + A ₂	Relajación de ácido bórico/ Esparción
A ₃	0,210 kHz ≤ f ≤ 5 kHz	0,0001094-0,001094	$\frac{0,1 \cdot F^2}{1 + F^2}$	Esparción o filtración por inhomogeneidades
A ₄ &A ₃	0,190 kHz < f < 0,210 kHz		A ₄ + A ₃	Esparción/ posible efecto límite
A ₄	0,016 kHz ≤ f ≤ 0,190 kHz	0,000001094-0,00001094	0,33.F ²	Posiblemente, un efecto límite

A continuación se describen las convenciones para interpretar las fórmulas, así:

d= Profundidad (m)

D=1-1,93 x 10⁻⁵.d (función de profundidad)

F= Frecuencia (kHz)

T= Temperatura (°C)

S= Salinidad

f_T= 2,19 x 10¹⁷·($\frac{1520}{T+273}$) (función de temperatura)

Con el fin expresar las unidades del valor de atenuación como dB/m, solo se debe multiplicar el coeficiente de atenuación por la constante 0,001094.

Ahora bien, una vez obtenida la atenuación, se tiene que la energía inicial de la onda es equivalente al valor de la amplitud inicial, así: E₀ ~ Amp

La variación de la energía, es la atenuación multiplicada por la distancia recorrida, así:

$$\Delta E_x = A_t * X_x \text{ (dB)}$$

Para finalmente, obtener el coeficiente de atenuación, el cual es obtenido así:

$$\alpha_x = 1 - (\Delta E_x / E_0)$$

Con el fin de expresar mejor lo anteriormente descrito, se muestra un ejemplo en gráfico a continuación:

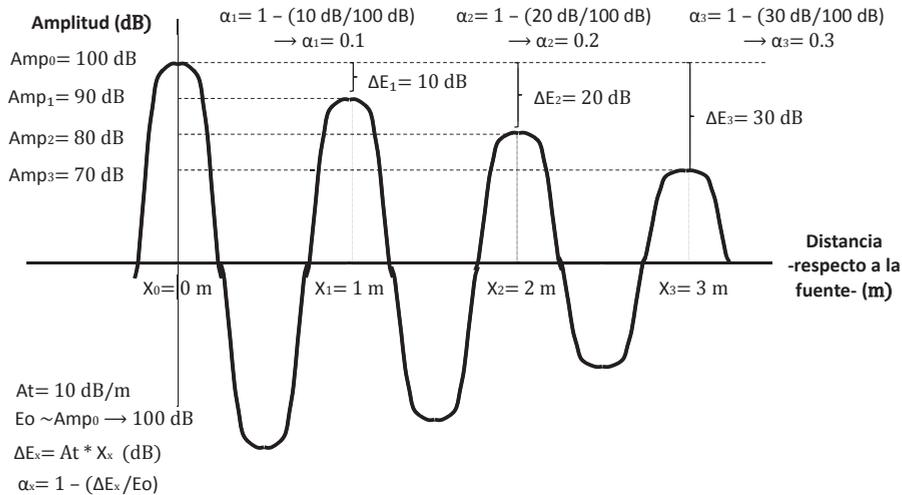


Figura 4. Representación del proceso de atenuación de una señal con una atenuación (arbitrariamente asignada) de 10 dB/m, y que recorre una distancia de 03 m. Nótese la aplicación de las fórmulas de energía inicial, variación de energía y coeficiente de atenuación a cada metro de avance.

ANALISIS

La atenuación afecta la intensidad de la onda reflejada (que viene siendo la misma onda emitida con un sentido de movimiento contrario -por lo que posee un desfase de tiempo-), disminuyendo su energía y por ende, su amplitud. Pero debido a que la correlación se enfoca exclusivamente en el perfil lineal de un parámetro sin reparar en su amplitud, la atenuación no afecta el análisis de correlación que se utiliza para identificar el eco reflejado.

A partir de esto, se muestra una composición mejorada (o mejor, actualizada) de la onda total captada[6], así:

$$q(t) = r(t) + \alpha e(t - \Delta t)$$

Donde

- $q(t)$ = Señal total captada
- $r(t)$ = Ruido aleatorio
- α = Coeficiente de atenuación
- $e(t)$ = Señal emitida
- $\alpha e(t - \Delta t)$ = Señal reflejada (buscada)
- Δt = Tiempo de retardo

A pesar de lo anteriormente visto, es más común buscar la señal reflejada a partir de la correlación cruzada entre una señal de referencia (que en este caso, sería la señal emitida) y la señal total captada, lo que quedaría plasmado de la siguiente manera:

$$e(t) \odot q(t) = e(t) \odot [r(t) + \alpha e(t - \Delta t)] \rightarrow$$

$$e(t) \odot q(t) = e(t) \odot r(t) + e(t) \odot \alpha e(t - \Delta t)$$

Debido a que el ruido (teóricamente) no está correlacionado con la señal emitida ni esta con el ruido, esto es, $r \odot e = 0$, o $e \odot r = 0$, entonces se reemplaza dicho valor en la fórmula anterior, así:

$$e(t) \odot q(t) = (0) + e(t) \odot \alpha e(t - \Delta t) \rightarrow$$

$$e(t) \odot q(t) = e(t) \odot \alpha e(t - \Delta t)$$

Lo que quiere decir que esta correlación cruzada (ideal) es un múltiplo de la autocorrelación de la señal de referencia (en este caso, la señal emitida), afectada por el coeficiente de atenuación α y con un desfase en el tiempo[7].

Ahora bien, esto en un ambiente ideal, pero como se vio anteriormente, el ruido puede (y de hecho, en un ambiente real lo tiene) tener cierta correlación con otros parámetros, incluido el ruido mismo, por lo que, aunque esos valores tiendan a cero, alteran la información y suministran valores, aunque muy pequeños, que se suelen despreciar.

En la correlación cruzada entre una señal de referencia (que en este caso, sería la señal emitida) y la señal total captada, el tiempo de mayor correlación demarca un valor que multiplicado por dt ($1/[10 \text{ elevado a un valor superior a } 10000]$ S) generando el tiempo de retardo (Δt), esto es, el tiempo que toma la onda en ir, reflejarse en un obstáculo, y en volver (ver figura5). Lo anterior es práctico para hallar la distancia recorrida, teniendo definido el tiempo de retardo (dividido entre 2, ya que incluye ambos trayectos) y la velocidad del sonido en esas condiciones del mar[8], [9].

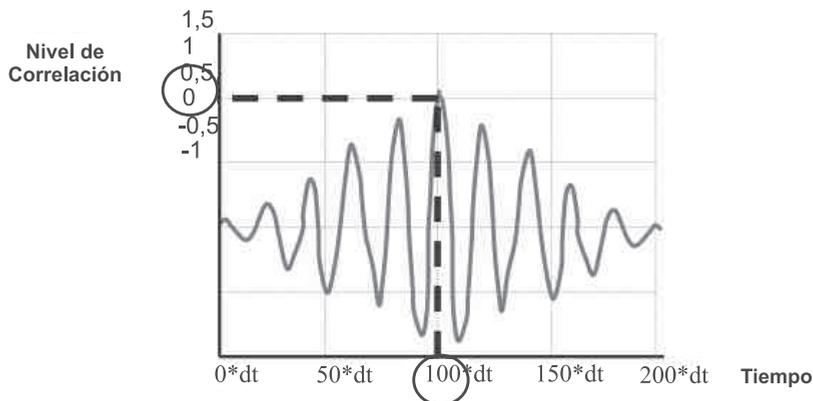


Figura 5. El tiempo de retardo (en este caso, un valor de $100 * dt$ S) es determinado de acuerdo al mayor nivel de correlación (en este caso, 1).

DETERMINACION DE LA DISTANCIA AL OBJETO REFLECTANTE (BLANCO)

Finalmente, una vez determinado el tiempo de retardo, y con la velocidad del sonido establecida según los parámetros oceanográficos, se determina la distancia al objeto reflectante mediante la fórmula $D = \frac{\Delta T}{2} * C$, donde

- D= Distancia al objeto reflectante
- C= Velocidad del sonido
- ΔT = Tiempo de retardo

CONCLUSIONES

En condiciones ideales, a través del método de la correlación es perfectamente posible establecer la identificación de la señal reflejada, filtrándola del ruido del medio ambiente, teniendo conocimiento previo de los parámetros de la señal original. En relación a la atenuación, a pesar de afectar negativamente la señal reflejada, no afecta sustancialmente el método aquí propuesto, ya que no altera de manera significativa el perfil lineal de la señal reflejada respecto a la señal emitida.

Las señales emitidas de sonar son clasificadas como señales periódicas, debido a que repiten cíclicamente un comportamiento determinado en un intervalo de tiempo definido.

El método de la identificación de una señal de sonar mediante el uso de la técnica de la correlación, funciona para identificar tanto señales periódicas como series no periódicas, siempre y cuando sean de naturaleza determinista, teniendo como base el hecho de que en este contexto, toda onda de sonido puede representarse a través del análisis de Fourier (el ruido no es una señal determinista sino aleatoria, por lo cual siempre no tendrá correlación -porcentaje de correlación mínimo o irrisorio- con cualquier señal con la que se compare).

Con el fin de verificar la exactitud del método, se comprobó que a menor dt , menor error en la medición del tiempo de retardo Δt respecto al valor real del tiempo final. En cambio se comprobó que el desfase de la señal reflejada, sin importar su valor, no afecta el valor máximo de la correlación cruzada ni la determinación del tiempo de retardo Δt , y por tanto, la identificación la misma a partir del método de correlación cruzada entre la señal emitida y la señal total captada.

REFERENCIAS

1. RENÉ SCHWARZ, 2010. Fourier Synthesis Square Wave animated gif. Disponible en <http://www.diracdelta.co.uk/science/source/f/o/fourier%20analysis/source.html>

2. AINSLIE M. A., MCCOLM J. G., 1998. A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water, *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(3), 1671-1672.
3. FRANCOIS R. E., GARRISON G. R., 1982. Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions, Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption", *Journal of the Acoustical Society of America*
4. PAUL C. ETTER. E & FN SPON. 1996. *Underwater Acoustic Modeling - Principles, techniques and applications*
5. JERALD W. CARUTHERS. 1977. *Fundamentals of marine Acoustics*. Elsevier Scientific Publishing Company,
6. DEVRIES, PAUL L. *Computational Physics*. Editorial Jhon Wiley & Sons.
7. *Physics For My Mom: 2010. Fourier Analysis 2 More Complicated Sound Waves*. Blogspot.com. Disponible en <http://physicsformom.blogspot.com/2009/11/fourier-analysis-2-more-complicated.html>
8. *Auditory-Based 2005. Time-Frequency Representations and Feature Extraction Techniques for Sonar Processing*. Robert Mill and Guy Brown/Speech and Hearing Research Group/Department of Computer Science / University of Sheffield. Disponible en <http://www.dcs.shef.ac.uk/intranet/research/resmes/CS0512.pdf>
9. ANDONI I. 1999. *Convolución/5º curso Tratamiento Digital de Señal/Capítulo 2*. Disponible en <http://www.tecnun.es/asignaturas/tratamiento%20digital/tema2.pdf>

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS FIJOS PARA VEHÍCULOS DE SUPERFICIE NO TRIPULADOS

Gómez Rey David Guillermo *
david.gomez@enap.edu.co

Rodríguez Robles Miguel Ángel **
marnavy@hotmail.com.

Resumen: El objetivo de este proyecto es el diseño y la implementación de un sistema de evasión de obstáculos fijos para el prototipo USV desarrollado actualmente en la Escuela Naval Almirante Padilla. Para el desarrollo de la propuesta inicial se realizaron diversas acciones, recolección de datos, su comparación y un estudio detallado del sistema de control actual del prototipo de USV. El aspecto más promisorio a alcanzar es que el USV realice un análisis y cálculo matemático de su entorno cercano de navegación y tome una acción con el fin de realizar una navegación segura mediante la evasión de obstáculos. En la práctica real se demuestra mediante la aplicación de una navegación con el USV con obstáculos reales durante su ruta.

Palabras Claves: USV, Evasión, Algoritmo, Campo de fuerzas virtuales, Modelamiento

Abstract: The objective of this project is a fixed obstacle avoidance system design and execution for the USV developed by the Colombian Naval Academy. For the initial development many actions were realized as well as data collection, comparison and a detailed study of the actual control system of the USV prototype. The final goal is for the USV to be able to mathematically analyze its near navigation environment and take an avoidance action for the safety navigation of the prototype. This is demonstrated on a real navigation using the USV with obstacles on the way.

Key words: USV, Evoidance, Algorithm, Virtual force field, Modelling.

* Profesional en Ciencias Navales de la Escuela Naval Almirante Padilla.

** Profesional en Ciencias Navales de la Escuela Naval Almirante Padilla; Licenciado en Matemáticas y Física de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC.

INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta que la Armada Nacional tiene contemplado incorporar vehículos de superficie no tripulados en el desarrollo de operaciones marítimas. La Escuela Naval Almirante Padilla en convenio con COTECMAR (Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industrial Naval), se encuentran desarrollando un prototipo de Vehículo de Superficie no tripulado que cumpla con dicho requerimiento.

Con el propósito de garantizar que un vehículo de superficie no tripulado USV, sea autónomo en su navegación, es necesario que este cuente con un sistema que permita la evasión de obstáculos fijos, a continuación se mostrará el desarrollo e implementación de un sistema de evasión de obstáculos fijos para el prototipo USV nombrado.

El desarrollo del sistema de evasión de obstáculos fijos está fundamentado en la consecución de un modelo de la dinámica del prototipo, el desarrollo de un controlador que permita el seguimiento de una ruta, la implementación de un sistema de adquisición de datos sobre el contacto (su marcación y distancia) y el desarrollo de un algoritmo de evasión el cual está basado en la teoría de campos de fuerzas virtuales (CFV). Así mismo se describirán las pruebas de campo que se efectuaron con el prototipo USV y los resultados obtenidos.

1. DESARROLLO

Con el fin de implementar una secuencia lógica de pasos para el desarrollo del sistema de evasión de obstáculo se planteó el siguiente esquema:

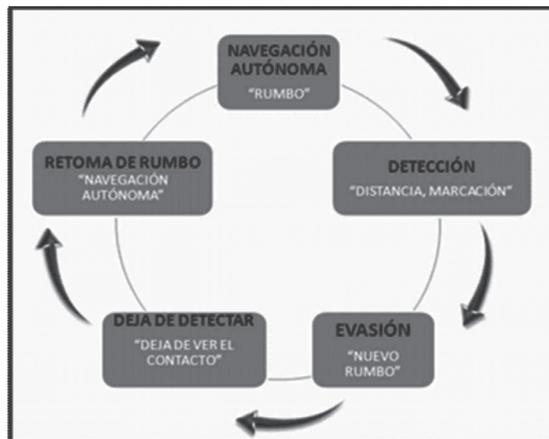


Figura 1: Ciclo de evasión

2. IDENTIFICACIÓN DE LA DINÁMICA Y DISEÑO DEL CONTROL DE NAVEGACIÓN DEL USV

Para obtener el modelo matemático que describe la dinámica del USV mediante la técnica identificación se procedió a realizar varios experimentos de tomas de datos de entrada y salida a partir de pruebas de curvas de evolución con el prototipo USV de la Escuela Naval Almirante Padilla, esta prueba se define como “la trayectoria descrita por el centro de gravedad de un buque cuando se le hace girar manteniendo un régimen de máquinas y un ángulo de timón constante” [1]. Como variable de entrada se considera el ángulo de timón y como variable de salida el ángulo de rumbo. La velocidad del vehículo de superficie se mantuvo constante en 1.3m/seg (velocidad máxima). Los resultados se grafican en la figura 02.

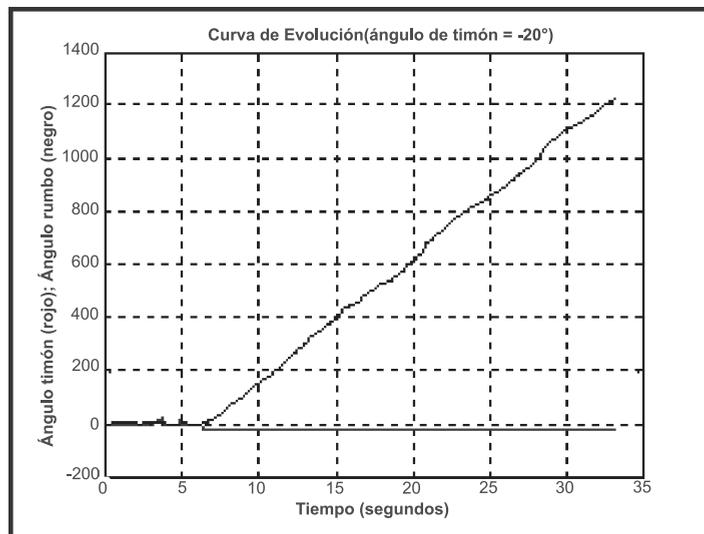


Figura 2. Datos experimentales para identificación de la dinámica del modelo de buque con ángulo de timón en -20°

Para la identificación del modelo a utilizar se optó por la técnica del método de identificación obteniendo un modelo paramétrico donde se relacionen las variables (rumbo y ángulo de timón) del sistema mediante una ecuación matemáticas [2]. Aplicando una regresión a los datos obtenidos (rumbo y ángulo del timón) mediante la herramienta Ident de Matlab se obtuvo el modelo que mejor se aproxima a la dinámica representada por los datos experimentales. El resultado arrojó una estructura armax con $n_a = 3$; $n_b = 3$; $n_c = 3$ y $n_k = 1$, su resultado puede observarse en la figura 03.

$$\frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{0.3004s^2 + 11.29s - 190.8}{s^3 + 22.82s^2 + 80.03s + 0.2249}$$

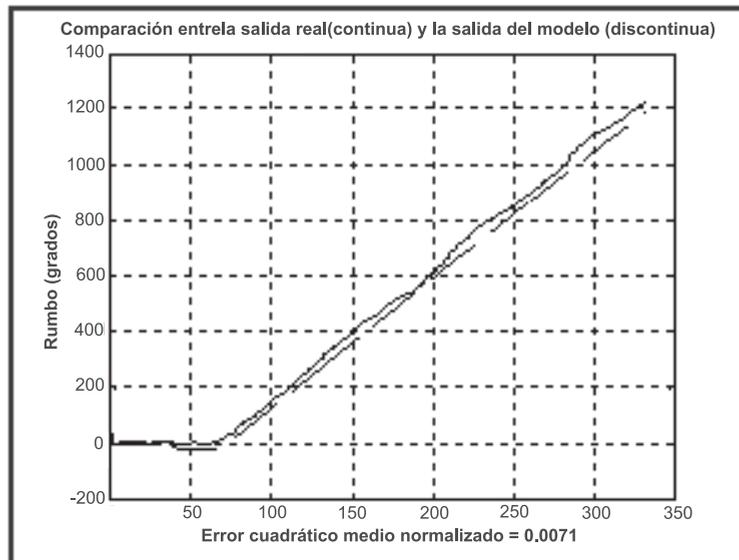


Figura 3. Resultado de la identificación del modelo armax con ángulo de timón en -20°

Debido a que el USV posee diferentes dinámicas en su maniobra hacia estribor y babor se procedió a realizar un modelo para cada costado y observando el lugar de las raíces de cada modelo se llegó a la conclusión de utilizar un solo modelo con ganancia $K_p = -0.4$ el cual simularía ambos comportamientos; así mismo cada modelo presenta un polo muy cercano al origen del plano S, lo cual conlleva a pensar que el sistema podría ser controlado por un controlador proporcional con baja ganancia ya que el integrador (en caso de un controlador PI) estaría inmerso en el sistema mismo.

3. IMPLEMENTACIÓN HARDWARE PARA DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS

Con el fin de realizar una correcta toma de datos de la distancia hacia el contacto que el USV tendría que evadir, se procedió a configurar los siguientes elementos: 01 Sonar LV-MAXSONAR-EZ1, 01 servomotor Hi-Tec HS-81; estos se ubicaron sobre la cubierta principal en la línea de crujía a la altura de las aletas a 20,5 cm de la proa.

Esta configuración permite realizar un barrido con el sensor de -90 a 90 grados aunque por especificaciones no se llevará a los límites el servomotor así que sus parámetros de giro quedaron de -55 a 55 grados, la velocidad de barrido se dejó constante. En la figura 04 se puede observar la posición del sistema de detección con respecto a la cubierta del USV.

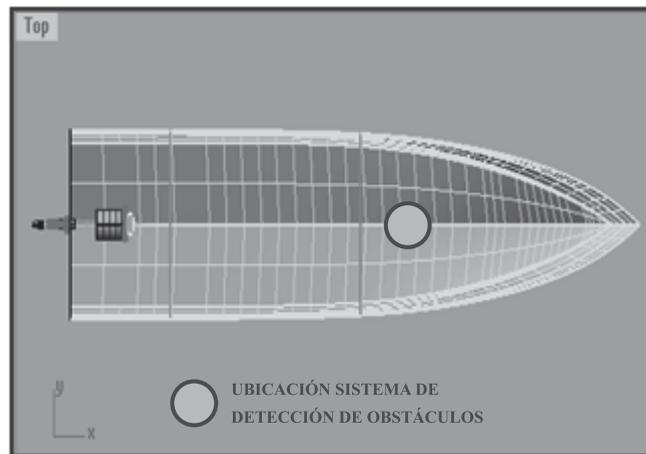


Figura 4. Posición en el plano del sistema de detección de obstáculos

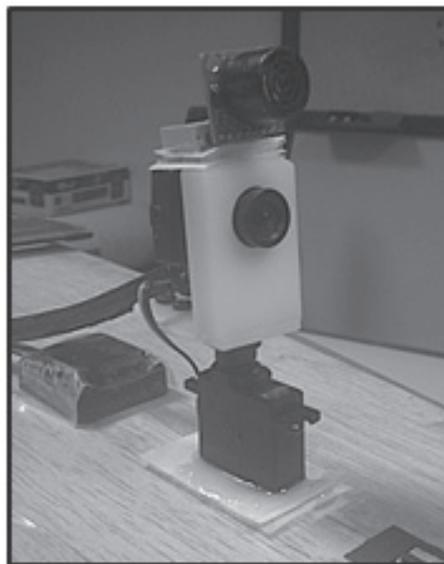


Figura 5. Vista real del sistema de detección de obstáculos

4. MODELO DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS

Para la evasión de obstáculos del USV se implementó la teoría de Campos de Fuerzas Virtuales descrita por Borenstein y trabajada por otros autores [3], en donde el equipo móvil experimenta una atracción hacia su meta, en este caso un rumbo, así mismo experimenta una fuerza de repulsión asociada a los obstáculos que detecta durante la navegación. La atracción y repulsión son modelados como vectores que representan

fuerzas virtuales a las que se ve sometido el equipo móvil, donde dichos vectores poseen una magnitud y un ángulo relativo al sistema mismo. Al hacer un barrido de las mediciones de distancia con el sensor de ultrasonido es posible encontrar obstáculos sobre la ruta o no encontrar ninguno en absoluto, en este último caso el sistema no experimenta repulsión. En el caso de encontrar un obstáculo sobre la ruta del sistema, este será censado, el generará una fuerza en sentido contrario, cuya magnitud depende inversamente de la distancia medida. Teóricamente si encontrara varios obstáculos durante la ruta, se sumarían vectorialmente todas las fuerzas repulsivas y una atractiva que va en sentido de la dirección del waypoint, el vector resultante representará el rumbo que debe mantener para evitar colisionar [4].

Debido a que se aplicó la teoría de campos de fuerza virtuales se deben calcular varias variables como son la fuerza de atracción, fuerza de repulsión, marcación y distancia del obstáculo, distancia al *waypoint*, constantes de repulsión y atracción. La magnitud de las fuerzas de repulsión como de atracción se consideran bajo una serie de premisas de lógica de relación. En el caso de la magnitud de la fuerza de repulsión, la magnitud es inversamente proporcional a la distancia de detección del obstáculo generando que el cambio en el rumbo sea más drástico a medida que el obstáculo se encuentre más cerca.

$$F_r = \frac{1}{d} \quad \begin{array}{l} F_r = \text{magnitud de la fuerza de repulsión.} \\ d = \text{distancia al obstáculo} \end{array}$$

Para el caso de la fuerza de atracción su magnitud dependerá del ángulo donde se encuentre el obstáculo, su distancia, la fuerza de repulsión y una constante estimada empíricamente que representara el margen de seguridad con el que USV evade el obstáculo.

$$F_a = K * F_{rF} * d / 200 * \text{abs}(\theta)$$

F_a = Magnitud fuerza de atracción

K = constante de repulsión

F_{rF} = magnitud fuerza de repulsión resultante

D = distancia al obstáculo

θ = Angulo de la marcación del obstáculo

Hallados las componentes y magnitudes de F_a y F_r se proceden a sumarse estos dos vectores obteniendo un vector resultante F_t , el ángulo entre vector F_t con respecto a la proa del USV será el rumbo que cambiará con respecto a la navegación, si el ángulo es negativo generará una caída de rumbo a babor y viceversa.

Cuando el obstáculo durante la evasión salga del rango de detección de -45 a 45 grados se iniciara una interrupción del programa de evasión y continuara el programa de seguimiento de ruta.

5. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Debido a que solo se cuenta con un sensor de detección de obstáculos se optó por utilizarlo en movimiento para realizar un barrido del área en frente donde se efectúa la ruta. Tomando en cuenta estas restricciones se realizaron diversas pruebas de evasión de obstáculos bajo tres escenarios en la piscina de la Escuela Naval bajo condiciones de viento despreciables y ninguna corriente. La zona de prueba es de tamaño rectangular de 50m x 25m.

Los tres escenarios se relacionan así:

Caso 1: Obstáculo a 15 grados a babor de la ruta del USV y a 30 metros del punto de partida. La navegación se realiza en línea recta manteniendo un rumbo automáticamente en dirección 180. Los resultados se observan en la figura 06.

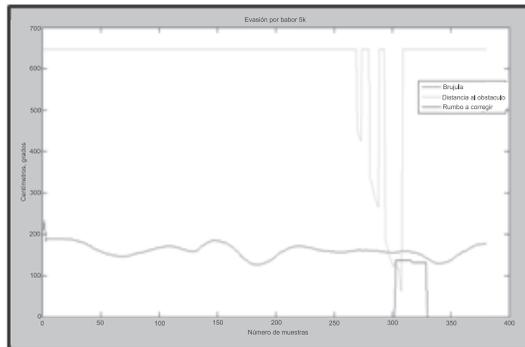


Figura 6. Resultados de los datos obtenidos en el caso 1

Caso 2: Obstáculo a 15 grados a estribor de la ruta del USV y a 30 metros del punto de partida. La navegación se realiza en línea recta manteniendo un rumbo automáticamente en dirección 180. Los resultados se observan en la figura 07.

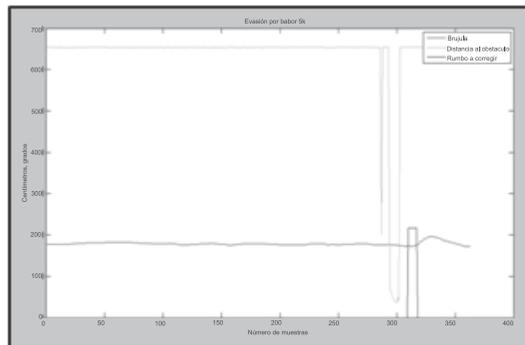


Figura 7. Resultados de los datos obtenidos en el caso 2

Caso 3: Obstáculo sobre la ruta del USV y a 30 metros del punto de partida. La navegación se realiza en línea recta manteniendo un rumbo automáticamente en dirección 180. . Los resultados se observan en la figura 08.

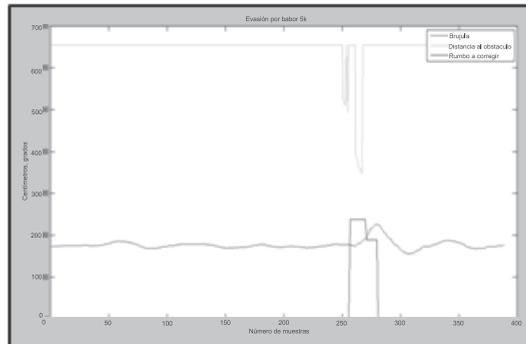


Figura 8. Resultados de los datos obtenidos en el caso 3

6. CONCLUSIONES

El sensor disponible e implementado (LV-MAXSONAR-EZ1) con el que se adquiere la información básica para la evasión de obstáculos fijos no es el adecuado, pues sus características de funcionamiento limitan el desempeño del sistema de evasión de obstáculos referente a imprecisiones de medición y retardos en la adquisición de datos.

El sistema de evasión de obstáculos fijos funciona adecuadamente pero con limitaciones a causa de su reacción, donde la reacción depende del tiempo de duración del barrido del sonar, y este a su vez depende de la velocidad del servomotor y ángulo de barrido.

REFERENCIAS

1. J.M.J. Journée, J.A. Pinkster, Ship Hydromechanics, parte 1, pp 88-94, Enero 2001
2. Benjamin C. Kuo, Sistemas de control automático. VII edición, Cap 10.1.3 pag 670, Prentice Hall, 1996.
3. BORENSTEEM. Johan y KOREN. Yoram. The Vector Field Histogram- Fast obstacle avoidance for mobile robots. Vol. 7, No. 4, 1991, pp 535-549.
4. CELIS A. NAVIA G. VELAZQUEZ C. Sistema acústico de navegación para robots móviles, TG-048, Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, pp 46-48, 2005.

ESTUDIO GENERAL SOBRE EL ESTADO DEL ARTE DE SENSORES ÓPTICOS E INFRARROJOS Y SU APLICACIÓN EN VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

Tomás Ramiro Pérez Romero*
topero1@gmail.com

Resumen: El presente trabajo de grado está enfocado a la apropiación de los conocimientos referidos al estudio de los sensores ópticos e infrarrojos, desde el estado del arte de su tecnología en captación y formación de imágenes hasta la aplicación de modelos para la predicción de detección, reconocimiento e identificación de contactos específicos. Se estudia la teoría de radiometría y de formación de imágenes basadas en percepción con el fin de fijar los parámetros respectivos para evaluar mediante un modelo matemático desarrollado en Matlab®, las probabilidades de detección, reconocimiento e identificación de blancos específicos (acuerdo los criterios de Johnson).

Palabras Clave: Percepción, detección, identificación, reconocimiento, misión, y modelo.

Abstract: The present study is focused on the compilation of information referred of the optic and infrared sensors. Beginning from the state of the art of this technology to the application of models to predict de detection and formation of images, knowledge and identification of specific contacts on the study shows the theory of radiometry and the formation of images based on the perception to fix the receptive parameters to evaluate them in a mathematical model developed in Matlab. The chances of detection, recognition and identification of specific objects (according to Johnson's criteria) are considered important to the well progress of Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) missions carried out by the UAV's.

Key Words: Perception, Detection, Identification, recogning, mission, and model .

* Teniente de Navío de la Armada Nacional. Alumno curso de complementación en Ingeniería Naval Electrónica, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla"

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado, está enfocado en revisar los aspectos de tecnologías de los actuales sistemas de visión, que pueden ser portados por vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aircraft Vehicle-UAV) de diferentes características, con la intención final de lograr avanzar en este campo en materia de investigación y conocimiento para poder evaluar y comparar desempeños y posteriormente optimizar sus aplicaciones con base en las características especiales con las que se debe contar para dar cumplimiento a la misión principal de proporcionar información para Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento (Intelligence surveillance and reconnaissance-ISR)¹.

Las técnicas más antiguas para la obtención de imágenes se basaban en el uso de las películas fotográficas para capturar imágenes, pasando posteriormente a cámaras electrónicas basadas en tubos captadores, hasta el registro de la verdadera evolución con la invención del dispositivo de carga acoplada (charge coupled device-CCD) y su respectiva competencia CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor).

Finalmente, con base en los estudios previos, se desarrolla un modelo en guaje Matlab®, donde se logra evaluar matemáticamente la probabilidad de detección, reconocimiento e identificación de blancos específicos (acuerdo los criterios de Johnson) que se consideraron importantes para el desarrollo de misiones ISR.²

1. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE VISIÓN

Los sistemas de visión se pueden clasificar en los que trabajan en el espectro visible y los de visión térmica³.

1.1 Espectro visible

Porción del espectro electromagnético que es visible para el hombre, la radiación electromagnética en este rango de longitud de onda es llamada luz visible. El ojo humano responde a la banda de frecuencia cercana a los 400 y 790 THz⁴.

¹ GRUPO IN-NOVA, COTECMAR, 2011, Capacitación para la evaluación operativa de UAVs con sistemas de visión, pagina 04.

² Ibid.

³ Ibid.

⁴ Cecie Starr (2005). Biology: Concepts and Applications. Thomson Brooks/Cole

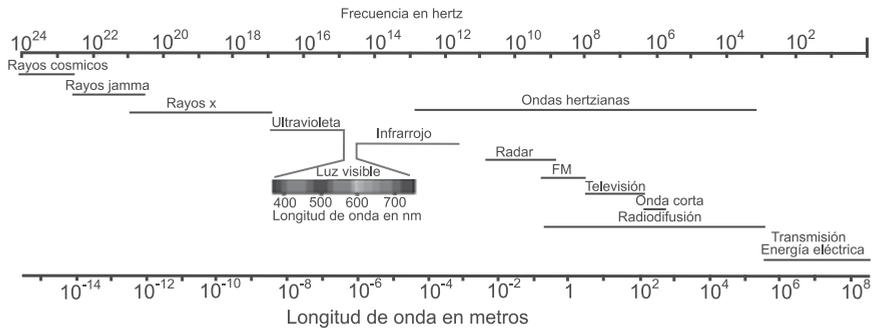


Figura 1. Espectro electromagnético extendido

1.2 Infrarrojos, visión térmica

Las cámaras térmicas entregan imágenes usando la radiación de temperatura (radiación Infrarroja) de los objetos, la cual es emitida todo el tiempo, por lo cual se puede decir que todo sistema de visión térmica puede funcionar como una forma de visión nocturna⁵.

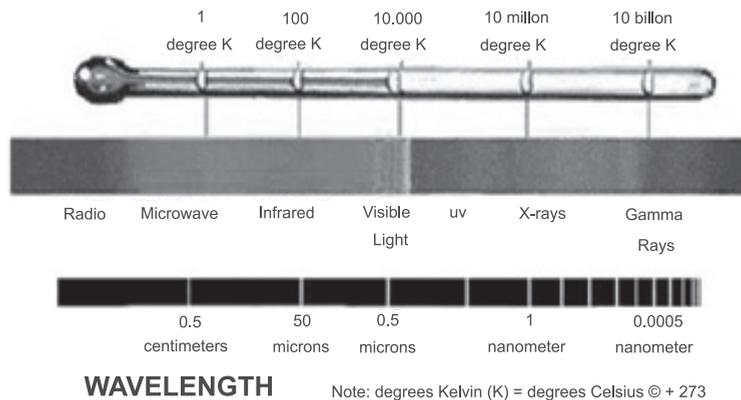


Figura 2. Longitudes de onda asociadas a la temperatura respectiva

La radiación infrarroja es un tipo de radiación electromagnética que se encuentra por encima de la luz visible pero por debajo de las de microondas. Los rayos infrarrojos tienen una longitud de onda entre 700nm y un milímetro⁶.

⁵ Robert C. Harney, Ph.D., 2004, Combat systems, Vol. 2. Sensor Elements-Part II Sensor Technologies, Charter 7 Thermal Imagers.

⁶Sánchez, Velásquez, 2010, Imágenes por radiación infrarroja y termografía, Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA) e Instituto de Ciencias de la Salud (CES)

2. TECNOLOGÍA EN CAPTADORES DE IMAGEN

2.1 Espectro visible

En la actualidad, la formación de imágenes en espectro visible se logra con diversas tecnologías de captación, donde las imperantes en los sistemas de espectro visible son la basada en dispositivo de acoplamiento de carga (ChargeCoupleDevice, CCD) y la basada en dispositivos CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor).

Actualmente se marca una clara tendencia al avance de los captadores de imagen por la línea de los CMOS, encontrándose en desarrollo la siguiente generación de sensores Back-IlluminatedCMOS, los cuales tendrán una capa de pixeles para la formación de la estructura de iluminado posterior sobre el chip que contiene la sección de circuitos para el procesamiento de la señal, en lugar de la capa de sustrato de silicio que tienen los sensores de imagen convencionales Back IlluminatedCMOS⁷.

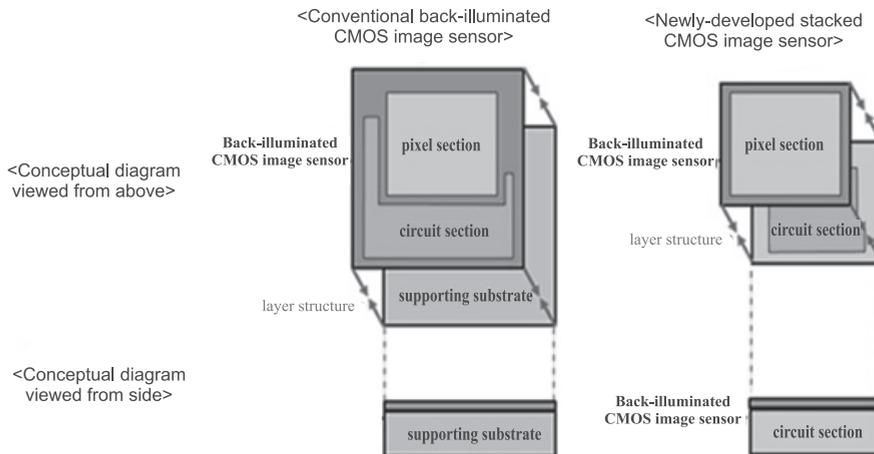


Figura 3. Estructura de ensamblaje del sensor de imagen Back IluminatedCMOS

2.2 Radiación infrarroja

Los detectores térmicos responden a la energía total transportada por la radiación. Característicamente esta energía es absorbida por el elemento detector produciendo un cambio de temperatura en el mismo. Esta clase de detectores incluye los siguientes tipos generales. En detectores bolométricos (O bolómetros) el cambio de temperatura altera la resistividad del material⁸.

⁷ Tomado de: <http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/201201/12-009E/index.html>

⁸ Robert C. Harney, Ph.D., Combat systems, 2004, Vol. 2. Sensor Elements-Part II Sensor Technologies, Charter 7 Thermal Imagers.

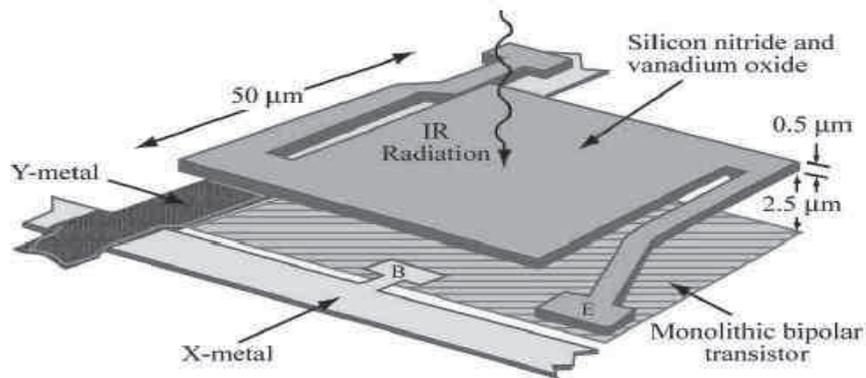


Figura 4. Estructura de un píxel en un bolómetro

3. IMÁGENES BASADAS EN PERCEPCIÓN

Las imágenes visuales son la mayor fuente de información usada por los seres humanos para el desarrollo de cualquier función. Nosotros podemos usar nuestra visión para detectar objetos, reconocimiento específico y poder determinar probablemente la clase de objeto desconocido. El término “reconocimiento” es algo libremente definido, en algunos casos se usa para referirse a toda clase de proceso percepción humana, más allá de encontrar el objetivo de detección. En otros casos tiene un significado muy específico y se refiere a un determinado nivel de rendimiento de la percepción.

3.1 Criterios de Johnson

El criterio de Johnson dice 2.0 ± 0.5 líneas de resolución a través de la mínima dimensión del contacto podía ser percibido entonces el observador tenía un 50% de probabilidad de detección del contacto. Si 8.0 ± 1.6 líneas de resolución eran distinguidas, entonces el observador tenía una probabilidad de un 50% de reconocer el contacto. Los cuatro valores para el criterio de Johnson, son⁹,

2.0 resels por la mínima dimensión	50% de probabilidad de detección.
2.8 resels por la mínima dimensión	50% de probabilidad de orientación.
8.0 resels por la mínima dimensión	50% de probabilidad de reconocimiento.
12.8 resels por la mínima dimensión	50% de probabilidad de identificación.

Se observó que estos valores eran esencialmente independientes de la relación escena señal-ruido y contacto-contraste de fondo, siempre y cuando los valores de resolución

⁹ Robert C. Harney, Ph.D., 2004, Combat systems, Vol. 1, Sensor Elements Part I Sensor Funtional Characteristics, Charter 14.Imaging and image-based perception.Pg 426

para estos parámetros fueran más o menos lo mismo. Estudios similares con otros contactos han confirmado los criterios de Johnson.

Tabla1. Criterios de Johnson

TARGET (BROADSIDE VIEW)	RESOLUTION ELEMENTS ACROSS MINIMUM DIMENSION (AT60% PROB.)			
	DETECTION	ORIENTATION	RECOGNITION	IDENTIFICATION
TRUCK	1.8	2.5	9.0	16.0
M=48 TANK	1.5	2.4	7.0	14.0
STALIN TANK	1.5	2.4	6.6	12.0
CENTURION TANK	1.5	2.4	7.0	12.0
HALF - TRACK	2.0	3.0	8.0	10.0
JEEP	2.4	3.0	9.0	11.0
COMMAND CAR	2.4	3.0	8.6	11.0
SOLDIER (STANDING)	3.0	3.6	7.6	16.0
105 MM HOWITZER	2.0	3.0	9.6	12.0
AVERAGE ± STD. DEV.	2.0 ± 0.5	2.8 ± 0.7	8.0 ± 1.6	12.8 ± 3.0

3.2 Aplicación del criterio de Johnson

El uso más simple de este criterio está relacionado con la estimación de la apertura mínima para los sensores de imágenes si combinamos cualquier expresión de resolución angular apropiada, tal como,

$$\alpha = X\lambda / D$$

Donde X es la constante en la expresión de resolución (X=1.220 para el criterio de Rayleigh¹⁰ y una respuesta en función aérea) con una expresión para tamaño lineal l de un objeto de tamaño angular θ a una distancia R ,

$$l = \theta R$$

Y con la apropiación del criterio de Johnson N_{50} (El número de elementos de resolución a través de la mínima dimensión del contacto dando mínimo 50% de probabilidad para desarrollar una tarea específica e percepción - $N_{50}=2$ para la detección) se obtiene,

$$R = \frac{l}{\alpha N_{50}} = \frac{ID}{X\lambda N_{50}}$$

La ecuación anterior nos da la distancia máxima en que un criterio de Johnson determinado puede ser satisfactorio para el contacto de l dimensión mínima, la resolución $X\lambda/D$ para un sensor con longitud de onda λ y diámetro de apertura D . Esta expresión está representada en la figura 2.20, para un número de sensores. El criterio puede ser usado también para reconocimiento ($N_{50}=8$) e identificación ($N_{50}=12.8$). El

¹⁰ Tomado de: cee.uma.pt/people/faculty/luis.../T/optica.t13.pdf, 2012.

criterio de resolución de Rayleigh fue usado para todos los sensores y una dimensión de contacto asumida de 2.5m.

Si se tiene en cuenta que un tiempo infinito se puede utilizar para la búsqueda de un campo de mira, la probabilidad de detección está dada por,

$$P_{\infty} = \frac{(N / N_{50})^E}{1 + (N / N_{50})^E}$$

Donde E es,

$$E = 2.7 + 0.7 (N / N_{50})$$

N es el número de ciclos (un ciclo es igual a dos resels) a través de la dimensión del contacto y N_{50} es el número de ciclos a través del contacto para 50% de probabilidad de detección.

4. IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DE SENSORES

Se desarrolla un modelo en Matlab® que permita la predicción de la probabilidad de detección de blancos de interés para Vehículos aéreos no tripulados bajo los criterios de Johnson, confrontado con la Distancia. De igual manera se relaciona la probabilidad de detección con el número de resels recibidos del contacto a una distancia determinada.

4.1 Relación de probabilidad de detección Vs distancia

Se procede con las formulas anteriormente descritas, así:

$$R = \frac{l}{\alpha N_{50}} = \frac{l}{\alpha N}$$

$$P_{\infty} = \frac{(N / N_{50})^E}{1 + (N / N_{50})^E}$$

Se despeja N ,

Obteniendo,

$$N = \frac{l}{\alpha R}$$

$$P = \frac{\left(\frac{l / \alpha R}{N_{50}} \right)^{2.7 + 0.7 (l / \alpha R) / N_{50}}}{1 + \left(\frac{l / \alpha R}{N_{50}} \right)^{2.7 + 0.7 (l / \alpha R) / N_{50}}}$$

Seguidamente se reemplaza N en,

Con esta expresión matemática se coloca a variar la distancia R en metros utilizando el lenguaje de programación Matlab®, obteniendo las relaciones de probabilidad de detección y distancia para los resels contemplados en los criterios de Johnson en detección, orientación, reconocimiento e identificación, de blancos de interés para las misiones de los UAVs. Dichos blancos de interés son caracterizados como camiones,

carros, Jeep y personas, teniendo en cuenta que para el tipo de misión en cual se enmarca la operación de los UAVs donde irían emplazados los sensores ópticos. Posterior a esto, se crea en Matlab® una matriz de las 4 probabilidades (detección, orientación, reconocimiento e identificación) Vs. Distancia, con el fin de lograr evaluar la probabilidad deseada, con base en parámetros de longitud de onda, tamaño mínimo de detección y diámetro de apertura del sensor, obteniendo finalmente la distancia máxima correspondiente a la probabilidad ingresada.

4.2 Relación de probabilidad de detección Vs resels

Dada las formulas anteriores, se requiere relacionar matemáticamente los resels recibidos a través del contacto con la probabilidad de detección, por lo cual se plantea que N_{50} será reemplazado por los criterios de Johnson para los contactos específicos a evaluar, de esta manera se hace la relación respectiva.

$$P_{\infty} = \frac{(N / N_{50})^E}{1 + (N / N_{50})^E}$$

Con esta expresión matemática se coloca a variar los resels recibidos a través del contacto que se esté evaluando (camión, carro, Jeep persona), utilizando el lenguaje de programación Matlab®. De esta manera se obtiene las relaciones de probabilidad de detección, orientación, reconocimiento e identificación y los resels recibidos a través del contacto acuerdo a los criterios de Johnson. Posteriormente, se toman los valores de la probabilidad deseada en el punto anterior, y se relacionan con una segunda matriz creada en Matlab®, donde se tienen los resels variando de 1 a 40 y las probabilidades de detección, orientación, reconocimiento e identificación acuerdo los criterios de Jonhson, obteniendo los resels indicados para cada valor de probabilidad ingresado, el cual también tiene su relación con la distancia respectiva donde se logrará dicha probabilidad.

4.3 Desarrollo en Matlab

Se crean los respectivos códigos y se verifica el desempeño del respectivo programa, corriéndolo con diferentes datos, obteniendo resultados coherentes. Finalmente se documenta un ejemplo ingresando las características de una cámara SONY HAD CCD 600TVL, la cual es la que viene emplazada en el UAVShepherd 1000, recientemente adquirido por COTECMAR. En este ejemplo se efectúa un análisis de los resultados obtenidos, los cuales muestran coherencia y lógica.

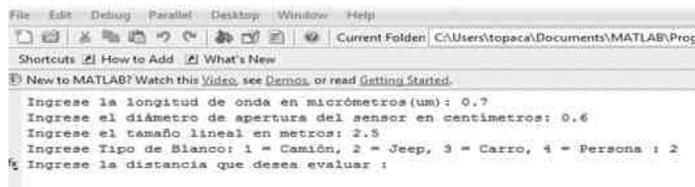


Figura 5. Pantalla de datos, Matlab®

Al introducir los parámetros mostrados en la figura anterior, se obtiene la siguiente gráfica,

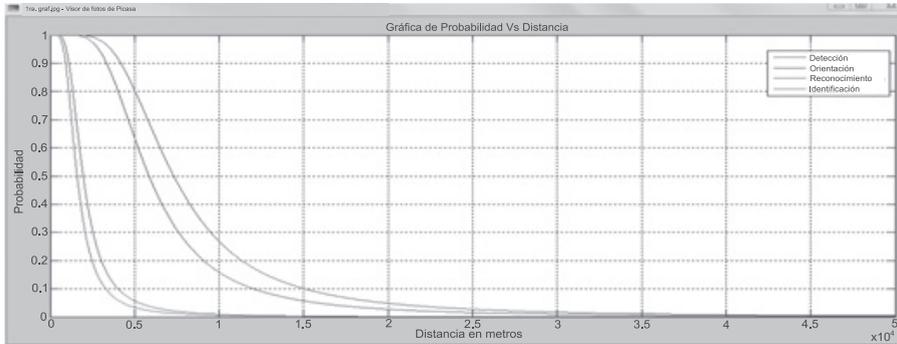


Figura 6. Gráfica Probabilidad Vs. Distancia

Con base en lo anterior, se puede ingresar una distancia específica en la cual se desea saber exactamente la probabilidad respectiva.



Figura 7. Segunda pantalla de datos, Matlab®

Ahora bien, si el operador desea saber a qué distancia y con qué parámetros puede obtener una probabilidad de detección, reconocimiento e identificación específica, con base en una probabilidad deseada, lo puede hacer ingresando los valores de las probabilidades que se deseen obtener. De igual manera, el modelo muestra los resels que se reciben para lograr las probabilidades en mención.

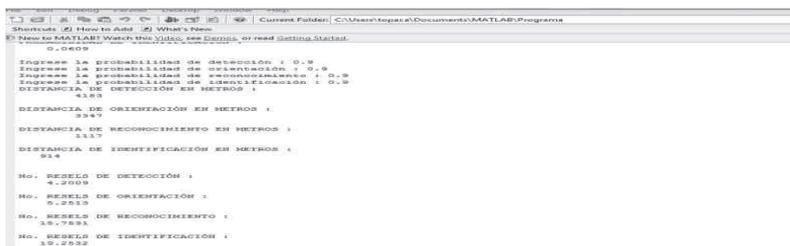


Figura 8. Continuación pantalla de datos, Matlab®.

Se obtiene la siguiente gráfica,

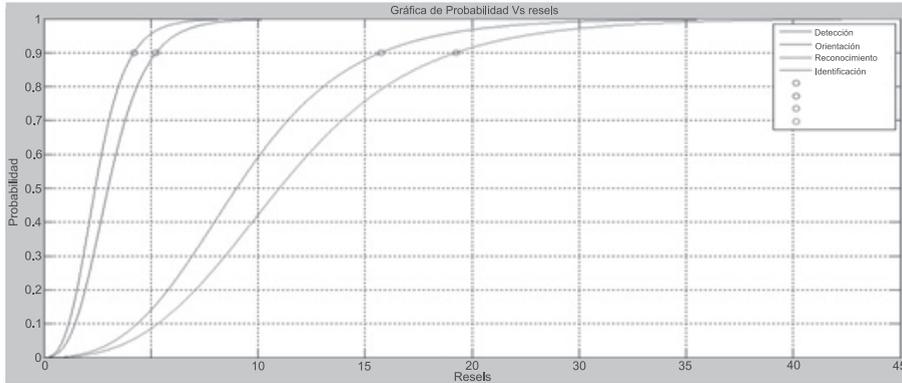


Figura 9. Gráfica Probabilidad Vs. Resels

Con base en los resultados obtenidos al correr el modelo, se observa coherencia entre los mismos, validando las operaciones matemáticas que sustentan el modelo en mención.

5. CONCLUSIONES

- La tecnología en captadores de imágenes se encuentra en un nivel tecnológico maduro, por lo cual las mejoras tangibles sobre la misma línea tecnológica serán mínimas.
- Se identifica claramente que con el uso de los mismos parámetros se logra establecer la relación de probabilidad de detección, orientación, reconocimiento e identificación con el desempeño de diferentes tipos de sensores infrarrojos y ópticos, teniendo en cuenta condiciones de propagación ideales.
- Se alcanza un modelo que logra relacionar matemáticamente las probabilidades de detección, orientación, reconocimiento e identificación con las distancias y resels respectivos, el cual ayuda a obtener valores que permitan comparar desempeños para la elección de un sensor para una misión particular determinada por el operador.

REFERENCIAS

1. Córdoba, M.A., 2008. "TheEfigenia EJ-1B MOZART UAV".2º Conferencia/ Workshop de Vehículos/Sistemas No-Tripulados (UV/S) de América Latina. Panamá.
2. Olarte, Botero, Cañón Zabaleta, Aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo, Agosto de 2011. Universidad Tecnológica Pereira.
3. Robert C. Harney, Ph.D., 2004, Combat systems, Vol. 2, Sensor Elements Part II Sensor Technologies.

4. Robert C. Harney, Ph.D., 2004, Combat systems, Vol. 1, Sensor Elements Part I Sensor Functional Characteristics
5. Steven K. Moyer, In partial Fulfillment of the Requirements for the degree Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Georgia Institute of Technology Modeling Challenges of Advanced Thermal Imagers, 2006.
6. GRUPO IN-NOVA, COTECMAR, 2011, Capacitación para la evaluación operativa de UAVs con sistemas de visión.
7. Informe de tendencias tecnológicas, 2011, instrumentación electrónica, sensores y sistemas de visión. Grupo IN-NOVA
8. U.S Army Night vision and Electronic Sensors Directorate, Modeling & Simulation division Fort Belvoir, Night Vision Thermal Imaging Systems Performance Model.2001.

METODOLOGÍA PARA EXPLORACIÓN CONCEPTUAL DE BUQUES DE SUPERFICIE CON BASE EN CRITERIOS DE COSTOS Y EFECTIVIDAD

Héctor Camilo Agudelo Medina*

hcagudelo165@gmail.com

Juan Guillermo Guzmán Urbina**

jguzman@gmail.com

Jose Manuel Gomez (Director)* **

jmgomez@cotecmar.com

Resumen: En este artículo se presenta la elaboración de un modelo de efectividad bien sustentado para medir plataformas de superficie que lograrán satisfacer los requerimientos misionales que posee la Armada Nacional en el desarrollo de sus funciones, una herramienta lógica y poderosa para efectuar la toma de decisiones apropiada en las etapas del diseño inicial de un buque.

Palabras clave: Modelo de efectividad (MOE – PLAT), diseño paramétrico de buques, plataforma de superficie.

Abstract: In this article is presented the elaboration of an effective and well sustained model for measuring the surface platforms that can satisfy the missionary requirements of the Colombian Navy in the development of functions, a very powerful and logic tool in the process of decision taking in the initial steps of the design of a ship.

Key words: Model of effectiveness (MOE - PLAT), parametric design of ships, platform surface, surface platforms

* Teniente de Navío Héctor Camilo Agudelo Medina, Oficial Graduado de la Escuela Naval Almirante Padilla año 2002, Profesional en Ciencias Navales Escuela Naval Almirante Padilla, Especialista en Gestión Humana universidad EAN, Cartagena, Colombia.

**Teniente de Navío Juan Guillermo Guzmán Urbina, Oficial Naval Graduado de la Escuela Naval Almirante Padilla año 2003, Especialista en Gerencia de Proyectos y Administración financiera universidad EAN, Cartagena, Colombia.:

***Capitán de Corbeta José Manuel Gómez, MSSE naval postgrade school , Monterrey, MSME naval postgrade school, Monterrey, CA 2012, Oficial Naval Graduado de la Escuela Naval Almirante Padilla, Ingeniero Naval (énfasis electrónica) año 2003, Cartagena, Colombia.

INTRODUCCIÓN

Como parte del proyecto estratégico de superficie de la marina de guerra Colombiana se hace pertinente establecer una metodología apropiada para la evaluación de los diferentes componentes de un buque de superficie. La relación de efectividad existente entre una plataforma y el sistema de armas que pueda tener se convierte claramente en un factor de importancia e indispensable a la hora de efectuar la optimización en el diseño de una plataforma de superficie.

La metodología para la selección apropiada de una plataforma de superficie abarca un amplio espectro de variables y parámetros que afectaran directamente en la relación final de costos y efectividad, contemplar los factores y repercusiones de los diferentes sistemas de armas en la ejecución de un modelo apropiado de plataforma será un objetivo de alta relevancia para una marina de guerra que busca el máximo porcentaje de efectividad en el desarrollo de las operaciones marítimas.

Realizar una investigación minuciosa sobre los aspectos mencionados anteriormente traerá sin duda beneficios directos a la institución y al desarrollo mismo de la metodología para el diseño de plataformas de superficie, el tener claros los recursos con los que se cuenta y el saber como potencializarlos y optimizarlos al máximo se convierte en una prioridad para una marina que quiere crecer y se encuentra en desarrollo.

1. MATERIAL Y MÉTODOS

El método utilizado fue el Sistémico - funcional. Las necesidades u objetivos problema a solucionar fueron abordados desde enfoques adecuados a dicha complejidad, pues se tomo el universo de los “Métodos utilizados para el diseño de plataformas de superficie .vs. Sistema de armas” como un elemento interdependiente que se estudia desde cada una de sus complejidades, mencionado universo fue abordado de una manera más simplificada limitando el universo de “Las plataformas de superficie”, con un tonelaje de acuerdo con las capacidades y experiencias manejadas en la Armada Colombiana y que aplican directamente al tipo de desarrollo de una misión institucional.

El principal material utilizado fue la información, la principal fuente primaria fue la documental, pues el presente estudio se baso en la percepción expresada de la necesidad del “DESARROLLO DE LA METODOLOGIA PARA LA TOMA DE DECISIONES EN EL DISEÑO DE PLATAFORMAS DE SUPERFICIE”. Las fuentes de información secundarias se obtuvieron a partir de resultados de estudios realizados en diversas fuentes de información especializada (accesos otorgado por COTECMAR).

El acceso a información de carácter confidencial fue un punto destacable y el acceso para la creación de múltiples criterios de evaluación solo pudo ser dimensionado con el apoyo correspondiente del centro asesor. Las características técnicas de la información fueron consultadas en fuentes bibliográficas no convencionales cuando se dimensionaron los "sistemas de armas", con el único fin de lograr cumplir los requisitos que se propusieron en la investigación correspondiente.

Los métodos de decisión multicriterio son poderosas herramientas que ayudan a generar consenso en contextos complejos de decisión. Se pueden aplicar estas técnicas a casos en los que sea necesaria la confluencia de intereses y puntos de vista de diferentes grupos o personas. Esto permite que todas las partes interesadas participen en el proceso de toma de decisiones¹.

Efectuando una revisión objetiva, general y bajo apoyos bibliográficos directamente tomados por proyectos de desarrollo marítimo similares a los que pretenden efectuar la Armada Nacional se mencionaron los siguientes métodos como los más utilizados, estudiados y empleados para la toma de decisiones multicriterio:

- Proceso Analítico Jerárquico – AHP (Analytical Hierarchy Process – AHP)
- La Teoría de Utilidad Multiatributo – MAUT (Multiattribute Utility Theory –MAUT)
- La Suma Ponderada Simple – WS ó SAW
- La Suma Ponderada Jerárquica – HWS

Proceso analítico jerárquico – AHP. Es una técnica estructurada para tratar con decisiones complejas. En vez de prescribir la decisión "correcta", ayuda a los tomadores de decisión a encontrar la solución que mejor se ajusta a sus necesidades y a su comprensión del problema. El proceso analítico jerárquico es una técnica que permite considerar tanto factores objetivos como subjetivos en la elección de la mejor alternativa, permitiendo la adecuada modelación de problemas con una alta complejidad. Se compone de tres etapas fundamentales:

1. La modelación y análisis
2. La emisión de juicios mediante comparaciones pareadas.
3. Priorización y síntesis.

Análisis de las herramientas disponibles para la síntesis del buque durante el diseño conceptual.

Para el análisis en cuestión se efectuaron comparaciones indicando claramente las ventajas y desventajas de cada uno, valiéndose de puntos de referencia comunes como lo son:

¹ VÍCTOR PÉREZ LEÓN, ISIS CAMARGO TORIBIO, RAFAEL CABALLERO FERNÁNDEZ y MERCEDES GONZÁLEZ LOZANO. Selección multicriterio de nuevos productos. Universidad de Pinar del Río, Cuba. P 104-105

- La geometría de definición del casco (manga, calado, eslora, puntal, etc.)
- Velocidad del buque
- Pesos y espacios destinados por grupos constructivos en el diseño de la plataforma
- Desplazamiento
- Potencia

Los programas mencionados a continuación fueron objeto de análisis y la comparación dimensionada desde la perspectiva planteada en el anterior aparte permitió llegar a una elección razonable. Las herramientas computacionales que fueron analizadas para efectuar el diseño de las plataformas de superficie en la etapa conceptual fueron:

- Compass (comercial version of parametric assessment of ship systems)
- Comcast michigan (michigan naval ship design synthesis system v. 2.0 mnsdss)

COMPASS (Comercial version of parametric assessment of ship systems-parametrical analysis ship system). El programa genera una síntesis paramétrica de un buque nuevo a partir un patrón, cuya información se encuentra previamente cargada en la base de datos del software. De acuerdo a la información suministrada en el manual el programa tiene la capacidad de ser alimentado por datos existentes de buques similares al que se requiere producir, lo que garantiza un proceso de autocorrección en las medidas de diseño y brinda la posibilidad de generar producciones continuas de buques tipo. La configuración del programa también ofrece la posibilidad de integrar variables de diseño generosas con sistemas de diversos tipos de propulsores como waterjets, pumpjets y alternativas de configuración combinada.²

Modelo de evaluación de efectividad para plataformas de superficie.

Se estudiaron los métodos de evaluación de efectividad disponibles en COTECMAR para lo cual se contó con el apoyo de mencionada corporación mediante la ilustración de procesos ya ejecutados, todos ellos con una base teórica y practica reconocida. El enfoque de mencionada propuesta de modelo de efectividad fue influenciado por los requerimientos, misiones y necesidades que experimenta la Armada Nacional. En esta etapa se busco en primera instancia desarrollar la metodología para la búsqueda de la medida de efectividad de las plataformas de superficie (MOE-PLAT), para tal fin se definieron un grupo de requerimientos misionales que tendría que cumplir una plataforma de superficie hipotética generada, estos requerimientos influyen directamente en la asignación de pesos que se da en el desarrollo del MOE-PLAT.

² PASS USER GUIDE & TUTORIAL , commercial version of Parametric Assessment of Ship Systems,p4 - 8

MISIÓN	MEDIDAS DE DESEMPEÑO
1. Permanencia en el área de operaciones en zonas fronterizas.	0,1
2. Seguridad en la Navegación y versatilidad de reacción ante demandas operativas inmediatas.	0,18
3. Capacidad de respuesta en operaciones de interdicción marítima.	0,22
4. Protección de bases navales y capacidad de ataque a unidades enemigas.	0,36
5. Apoyo Logístico en el desarrollo de operaciones navales.	0,15

Grafica 1. Ponderación de pesos de las misiones

Fuente. Elaboración propia de los autores

Análisis de la efectividad de diferentes configuraciones de sistemas de armas y los requerimientos de área, peso y potencia sobre la plataforma.

Las configuraciones que se van a presentar fueron sintetizadas buscando extraer la información necesaria para la ejecución de los siguientes pasos:

- Las dimensiones, volúmenes, áreas, pesos y potencias de consumo (para ser utilizadas en la búsqueda de las soluciones del diseño conceptual con la herramienta seleccionada COMPASS).

Tabla 1. Componentes de las configuraciones de sistemas de armas

CONFIGURACIÓN 1	CONFIGURACIÓN 2	CONFIGURACIÓN 3
<p>Sensores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Radar de Navegación • Radar de vigilancia 2D • Tracker <p>Armas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cañón 76 mm • Cañón 20 mm • Sam - misiles superficie aire : 8 Misiles 	<p>Sensores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Radar de Navegación • radar de vigilancia 3D • Tracker • ES • Data Link <p>Armas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Chaff • Cañón 75 mm • Cañón 20 mm • SSM - Misiles superficie : 12 Misiles • SAM - Misiles superficie aire: 8 Misiles 	<p>Sensores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Radar de Navegación • Radar de Vigilancia 3D • Tracker • ES • Data link <p>Armas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Chaff • Gun 76 mm • Gun 20 mm • CIWS • ECM • Cañón 76 mm • Cañón 20 mm • SSM - Misiles superficie : 12 misiles • SAM - misiles superficie aire: 8 Misiles

Fuente. Elaboración propia de los autores

Después de efectuar este paso establecimos unos requerimientos (como si se tuviera un cliente con unas exigencias técnicas para una plataforma de superficie deseada), para lo cual se limitaron tres configuraciones y enunciaron de la siguiente forma:

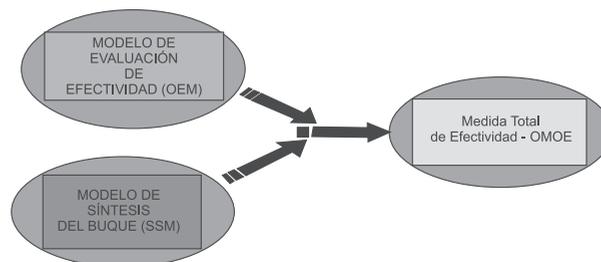
Tabla 2. Componentes de las configuraciones de sistemas de armas con datos para la definición de plataforma. (Configuración – 1).

CONFIGURACIÓN 1		
ESLORA	(Pies)	313-396
TRIPULACIÓN		90
AUTONOMÍA	Dias	30
ALCANCE	MN	5000-8000
VELOCIDAD	KN	24-33
ÁREA	m ²	480,64
VOLUMEN	m ³	1812,47
POTENCIA REQUERIDA EN LOS SISTEMAS ELECTRÓNICOS	KW	303,45
SISTEMAS DE ARMAS	PESO DE LA ELECTRÓNICA	6,5 Tn
	PESO ARTEFACTOS CAÑONES LANZADORES	4,99 Tn
	PESO DE LA MUNICIÓN F20	15,96 Tn

Fuente. Elaboración propia de los autores

De la misma forma se efectuó el proceso para totalizar las configuraciones 2 y 3. De esta forma se adquirió la totalidad de información para lograr cargar el programa de modelo de síntesis (COMPASS), lograr efectuar una búsqueda esquematizada y lógica del MOE – PLAT (con la metodología propuesta de matrices comparativas) y plantear los elementos necesarios para la búsqueda del MOE –AAW. Todos los esfuerzos de cálculo y búsqueda de información poco convencional fue efectuada para cumplir la siguiente ecuación:

$$OMOE = W1MOE-PLATAFORMA + W2 MOE(AAW)+W3MOE(ASW)...+WnMOE$$



Grafica 2. "Mapa conceptual de los componentes para obtener - OMOE "3.

Fuente. Elaboración propia de los autores

³ CCESP JOSE MANUEL GOMEZ.GRUPO INTERDISCIPLINARIO DE LA ARMADA NACIONAL. Ponderación de Misiones, MOPs, DPs y Construcción Curvas de Valor. Cartagena..Armada Nacional- Cotecmar. 2011. documento de trabajo no.4 – Cotecmar

Para desarrollar la primera matriz comparativa (tabla 1) fue necesario conservar el apoyo conceptual brindado en el marco teórico y tener siempre presente los requerimientos misionales que fueron propuestos, mencionado ejercicio garantizo la objetividad y asignación apropiada de pesos para el desarrollo de la metodología propuesta para la búsqueda de las medidas de efectividad (MOE-PLAT).

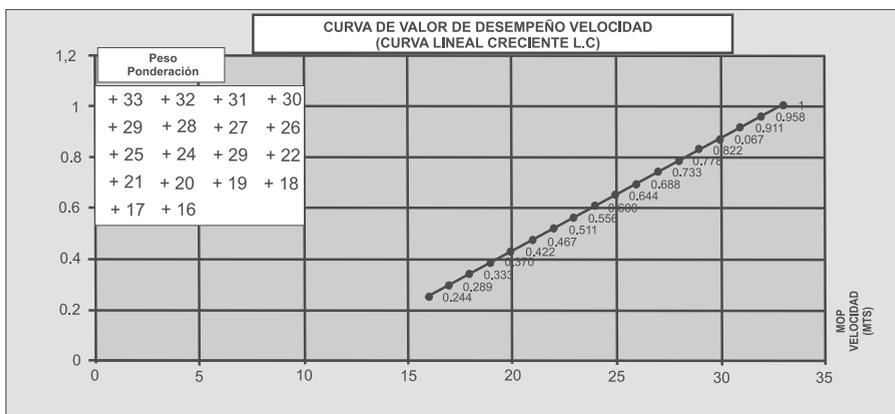
Establecida la ecuación, los requisitos para lograr el propósito final y haber establecido de manera clara la metodología, pusimos en acción el planteamiento así:

	CRITERIO	VELOCIDAD	ALCANCE	AUTONOMIA	SEAKEEPING	
	1	2	3	4	PESOS	
VELOCIDAD	1	1,0	1,9	1,8	1,7	0,364
ALCANCE	2	0,5	1,0	2,0	2,0	0,283
AUTONOMIA	3	0,6	0,5	1,0	1,9	0,203
SEAKEEPING	4	0,6	0,5	0,5	1,0	0,150
		0,4	0,3	0,2	0,2	1,000

Tabla 3. Matriz para la obtención de la medida de efectividad de las plataformas de superficie propuestas.

Fuente. Elaboración propia de los autores

Los cuatro criterios para la obtención de la medida de efectividad MOE-PLAT fue influenciada plenamente por los requerimientos misionales propuestos en las primeras etapas. Después de esto se abordó la segunda etapa (consistente en la segunda matriz comparativa tabla 6), pero previamente se establecieron las reglas para asignar los pesos de manera coherente y proporcional, mediante la utilización de curvas de desempeño como se ilustra a continuación:



Grafica3. Curva de valor de desempeño velocidad

Fuente. Elaboración propia de los autores

En esta curva de desempeño se puede ver claramente el planteamiento lineal creciente (proporcional y lógico) que permite asignar pesos a las soluciones de plataforma dependiendo de sus salidas en cuanto a la velocidad en este caso (también se establecieron estas curvas de desempeño para los criterios de alcance, autonomía y seakeeping). Después de establecer el método y las reglas para la asignación de pesos en la segunda etapa, procedimos a evaluar las diez primeras soluciones de plataforma de cada una de las configuraciones generadas por el programa de modelo de síntesis COMPASS:

Tabla 4. Ponderación de pesos y obtención de la medida de efectividad de las plataformas de superficie propuestas. (CONFIGURACION 2)

	VELOCIDAD	ALCANCE	AUTONOMA	SEAKEEPING	
PESOS RELATIVOS	0,0364	0,0283	0,0203	0,015	0,100
CRITERIO	1	2	3	4	PONDERACIÓN
PLATAFORMA SUPERFICIE					
PLATAFORMA 1 CONF. 2	6	3,26	4,66	8,686	0,536
POND. PARCIALES	0,2184	0,0923	0,0946	0,13	
PLATAFORMA 2 CONF. 2	6	3,7	5,66	9,286	0,577
POND. PARCIALES	0,2184	0,1047	0,1149	0,139	
PLATAFORMA 3 CONF. 2	6	3,933	6,66	9,586	0,609
POND. PARCIALES	0,2184	0,1113	0,1352	0,144	
PLATAFORMA 4 CONF. 2	6	3,26	4,66	8,68	0,535
POND. PARCIALES	0,2184	0,0923	0,0946	0,13	
PLATAFORMA 5 CONF. 2	6	3,7	5,66	9,304	0,578
POND. PARCIALES	0,2184	0,1047	0,1149	0,14	
PLATAFORMA 6 CONF. 2	6	3,935	6,66	9,586	0,609
POND. PARCIALES	0,2184	0,1114	0,1352	0,144	
PLATAFORMA 7 CONF. 2	6	3,26	4,66	8,68	0,535
POND. PARCIALES	0,2184	0,0923	0,0946	0,13	
PLATAFORMA 8 CONF. 2	6	3,7	5,66	7,686	0,553
POND. PARCIALES	0,2184	0,1047	0,1149	0,115	
PLATAFORMA 9 CONF. 2	6	3,94	6,66	7,998	0,585
POND. PARCIALES	0,2184	0,1115	0,1352	0,12	
PLATAFORMA 10 CONF. 2	6	3,26	4,66	7,08	0,511
POND. PARCIALES	0,2184	0,0923	0,0946	0,106	

Fuente. Elaboración propia de los autores

La anterior matriz comparativa se efectuó también para las configuraciones 1 y 3, cumpliendo claramente el objetivo de obtener la medida de efectividad MOE-PLAT. (En esta etapa continuamos teniendo en cuenta para la asignación de pesos la contribución directa de los criterios en el cumplimiento de los requerimientos misionales propuestos).

Aplicación de simulación de eventos discretos para obtener la medida de efectividad operativa AAW. (MOE – AAW): Un modelo de simulación deberá preservar el orden de aparición de los eventos. Los eventos simulados deberán ocurrir en el mismo orden que hubieran ocurrido en el mundo real. El sistema deberá soportar tanto el desarrollo de modelos como su uso en experimentos. La simulación por eventos discretos es una técnica informática de modelado dinámico de sistemas. Frente a su homóloga, la simulación de tiempo continuo, esta se caracteriza por un control en la variable del tiempo que permite avanzar a éste a intervalos variables, en función de la planificación de ocurrencia de tales eventos a un tiempo futuro.⁴

Para la obtención de la medida de efectividad MOE-AAW usamos la simulación de eventos discretos en un escenario de guerra antiaérea defensiva. El escenario y los modelos fueron desarrollados por COTECMAR, está relacionado con el ataque de dos aviones con misiles aire superficie contra un buque de superficie (El modelo de guerra antiaérea tiene en cuenta las características principales de sensores y armas de las configuraciones propuestas), Los resultados de la simulación fueron:

Tabla 5. Resultados de la simulación de eventos discretos para AAW.

CONFIGURACIÓN	MOE _{AAW}
Config. 1	0.834
Config. 2	0.947
Config. 3	0.968

Fuente. Elaboración resultados obtenidos con la herramienta de simulación de eventos discretos planteada⁵.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desarrollo y evaluación de alternativas de plataforma con base en la herramienta seleccionada para la síntesis del diseño.

En el Proceso para la obtención del grupo de soluciones de las plataformas de superficie (Diseño conceptual), los datos calculados y establecidos para las tres configuraciones fueron cargados en el programa COMPASS y generaron unas salidas (con sus equivalentes específicos por requerimientos determinados en la grafica 4 y 5), en primera instancia solo expondremos una representación grafica de ingreso de requerimientos de entrada .vs. Soluciones equivalentes que genero el programa (debido a la gran amplitud en la que consiste un grupo solución solo se exhibe una breve representación con el fin de hacer comprender la dimensión de cada una de las soluciones de plataforma generadas).

⁴ DR. EDUARDO MAGAÑA. Descripción y aplicación de simulación de eventos discretos, Universidad pública de Navarra, Ingeniería telemática aplicada, Lizarrondo.2010.pg 43-54

⁵ GÓMEZ, J.M., “Warship Combat System Selection Based On Discrete Event Simulation”, Tesis de Maestría, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, US, 2010

Ya para la presentación final de la medida total de efectividad OMOE, se diseñaron una serie de tablas comparativas para las primeras diez soluciones de plataforma en cada una de las configuraciones planteadas. En Las tablas comparativas de los MOE – PLAT, MOE – AAW , los costos aproximados de las plataformas de superficie generadas y los OMOE fueron expuestos siguiendo el siguiente esquema:

CONF. PLAT	CRITERIOS EVALUADOS PARA LA OBTENCIÓN DEL MOE - PLAT	MOE PLAT	COSTOS	OMOE =W1MOE-PLAT (AAW) + W3 MOE (ASW)... +WhM
------------	------------------------------------------------------	----------	--------	-----------------------------------------------

A continuación exponemos una de las tablas comparativas con el fin de exhibir lo mencionado en el párrafo anterior:

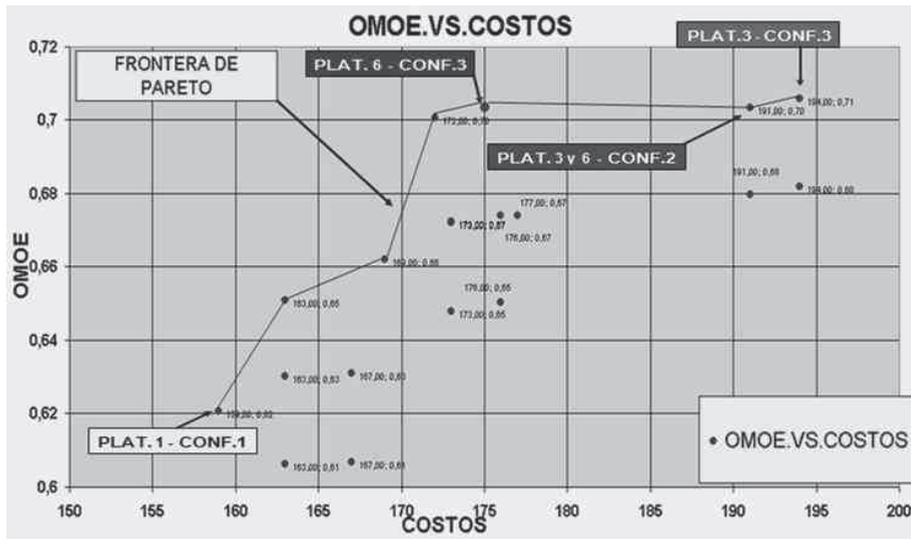
Tabla 6. Comparación de los MOE – PLAT, MOE – AAW, costos de adquisición de las soluciones de plataforma para la configuración 1 y medida total de efectividad (OMOE).

	VELOCIDAD	ALCANCE	AUTONOMA	SEAKEEPING			MOE AAW
PESOS RELATIVOS	0,0364	0,0283	0,0203	0,015	0,100		0,0834
CRITERIO	1	2	3	4	PONDERACIÓN	COSTOS	
PLATAFORMA SUPERFICIE							
PLATAFORMA 1 CONF. 2	6	3,2525	4,66	8,812	0,537	159	0,621
POND. PARCIALES	0,2184	0,092	0,0946	0,132			
PLATAFORMA 2 CONF. 2	6	3,6925	5,66	9,394	0,579	169	0,662
POND. PARCIALES	0,2184	0,1045	0,1149	0,141			
PLATAFORMA 3 CONF. 2	6	3,2525	4,66	8,812	0,537	159	0,621
POND. PARCIALES	0,2184	0,092	0,0946	0,132			
PLATAFORMA 4 CONF. 2	6	3,2525	4,66	8,812	0,537	159	0,621
POND. PARCIALES	0,2184	0,092	0,0946	0,132			
PLATAFORMA 5 CONF. 2	6	3,6925	5,66	9,394	0,579	169	0,662
POND. PARCIALES	0,2184	0,1045	0,1149	0,141			
PLATAFORMA 6 CONF. 2	6	4,6525	5,66	8,728	0,568	163	0,651
POND. PARCIALES	0,2184	0,1034	0,1149	0,131			
PLATAFORMA 7 CONF. 2	6	4,1337	7	9,322	0,617	172	0,701
POND. PARCIALES	0,2184	0,117	0,1421	0,14			
PLATAFORMA 8 CONF. 2	8,66	1,52	4	6,498	0,537	376	0,620
POND. PARCIALES	0,3152	0,043	0,0812	0,097			

Fuente. Elaboración propia de los autores

Este tipo de tabla comparativa fue elaborada también para las configuraciones 1 y 3, expone claramente las soluciones de plataforma con menor valor de costo de adquisición, las soluciones de plataforma con mayor efectividad MOE – PLAT y las soluciones con mayor medida de efectividad OMOE. Queda claro que estas tablas

sintetizan claramente uno de los principales objetivos del desarrollo de la metodología propuesta, ofrece una base bien sustentada de cuales serian las soluciones de plataforma más convenientes .vs. La mayor optimización de los recursos disponibles (en una postura hipotética de cliente), el método garantiza el cumplimiento de los requerimientos de diseño iniciales y permite garantizar la selección apropiada de un grupo de soluciones robusto y amplio.



Grafica 4. OMOE .VS. COSTOS

Fuente. Elaboración propia de los autores

3. CONCLUSIONES

Se puede concluir que el modelo total de efectividad para la elección de una alternativa de diseño de una plataforma de superficie depende de la aplicación apropiada de un modelo de síntesis e igualmente de la aplicación correcta del modelo de efectividad. Esta fusión lleva de un modo coherente, lógico y bien fundamentado a un muy posible éxito en el diseño de una plataforma de superficie.

La simulación de eventos discretos se presenta como una herramienta poderosa para la optimización de recursos y la obtención de medidas de efectividad certeras. Se utilizan modelos físicos y probabilísticos para evaluar la efectividad en misiones propuestas para una determinada plataforma que se requiera analizar.

Se puede concluir que la metodología propuesta reduce ampliamente la complejidad de los modelos de evaluación de efectividad utilizados anteriormente. La versatilidad de la propuesta permite ajustarla a los requerimientos y necesidades que se presenten en el ámbito.

Se concluye que la información consolidada en la presente tesis se convierte en una herramienta práctica, versátil y útil a la hora de analizar y efectuar decisiones sobre una plataforma de superficie que se requiera analizar. Permite obtener estimaciones de datos técnicos característicos de relevancia que finalmente se convierten en la base esencial para la toma de decisiones de adquisición o construcción de un buque de guerra.

Se concluye que la medida total de efectividad de una plataforma de superficie (OMOE) planteada en la presente tesis, relaciona capacidades y características de relevancia en una plataforma de superficie (armamento, sensores, alcance, velocidad, maniobrabilidad, confiabilidad, furtividad, etc), este hecho permite visualizar el proceso desde una perspectiva general y global que no deja ningún factor o requisito por fuera de la evaluación que se pueda generar

de cadetes "Almirante Padilla" y de igual forma podría analizarse, validarse y verificar la herramienta tecnológica de síntesis COMPASS unida a otra herramienta grafica de diseño. (la labor de la presente tesis llega hasta un punto en el proceso de diseño de una plataforma de superficie y culminarlo con la labor de graficación detallada puede validar aun más los resultados obtenidos.

Las simulaciones que se realizaron de los requerimientos operacionales en este caso el OPSIT de guerra antiaérea (para la obtención del MOE – AAW), se desarrollo de una forma realista en un escenario de combate en la cual se tuvo en cuenta condiciones ambientales y de las amenazas, se recomienda la evaluación de estos escenarios probabilísticos con el resto de OPSIT los cuales tienen que estar basados en los supuestos tácticos aterrizados a los requerimientos de la Armada Nacional y sus diferentes amenazas con el fin de poder tener mejores plataformas de superficie.

REFERENCIAS

1. THE UNIVERSITY OF MICHIGAN DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE AND MARINE ENGINEERING, Michigan Naval Ship Design Synthesis System v. 2.0, Prepared by Fatih Akcakoyunluoglu August 2004.
2. PASS USER GUIDE & TUTORIAL, commercial version of Parametric Assessment of Ship Systems.
3. VISUALIZACIÓN DE INFORMACIÓN EN EL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP), TURÓN LANUZA, Alberto Grupo Decisión Multicriterio Zaragoza, pág. 2-4.
4. DEL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO – AHP Thomas L. Saaty.
5. LA PROGRAMACIÓN LINEAL MULTICRITERIO, PANORAMA GENERAL FRENTE A LAS DECISIONES EMPRESARIALES, Francisco José Valero López, , pag729- 730.

6. PROYECTO PATRULLERO AMAZÓNICO, PONDERACIÓN DE MISIONES, MOPS, DPS Y CONSTRUCCIÓN CURVAS DE VALOR CON GRUPO INTERDISCIPLINARIO ARC, preparado por CCESP JOSE MANUEL GOMEZ, Cartagena 31 de Agosto 2011.
7. PASS USER GUIDE & TUTORIAL, PASS VERSION 329, 2005.
8. VIRGINIA POLYTECHNIC INSTITUTE AND STATE UNIVERSITY, Naval Ship Design and Synthesis Model Architecture Using a Model-Based Systems Engineering Approach, Alan J. Brown, Chairman Wayne Neu , Nikolaos Xiros, April 27, 2011,x Capitulo 2.
9. LA PROGRAMACIÓN LINEAL MULTICRITERIO, Panorama General Frente a las Decisiones Empresariales, Francisco José Valero López.
10. VECTOR MAXIMAL DECOMPOSITION PROGRAMMING WORKING PAPER, Universidad de california, geoffrion A, M los angeles septiembre 1970.
11. GÓMEZ, J.M., “Warship Combat System Selection Based On Discrete Event Simulation”, Tesis de Maestría, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, US, 2010.

ESTIMACIÓN DE LA FIRMA ACÚSTICA EN LA ETAPAS DE DISEÑO Y PRUEBAS DE MAR

Nicolás Bermúdez Arciniegas*
nicobermu@hotmail.com

Hugo Leonardo Murcia Gallo**
hugonavy@hotmail.com

Resumen: El presente artículo está enfocado para los Oficiales de la Armada Nacional que se encuentran en el proceso de desarrollo de la Plataforma Estratégica de Superficie, con la intención de brindarse como una herramienta de evaluación de aquellos equipos y accesorios necesarios para una estimación eficiente de la firma acústica, permitiendo con ello conocer de manera directa la manera en la cual se desarrolla el análisis y sus métodos para caracterizarla.

Palabras Claves: Firma Acústica, Generación y Propagación de Ruido, Aisladores, Hélices, Sistemas de Propulsión.

Abstrac: This article is focused to the officers of the Colombian Navy that encountered in the process of development of the Strategic Platform of Surface, with the intention of providing as an evaluation tool of those equipment and accessories necessary for an efficient estimation of acoustic signature, thereby directly know the way in which develops the analysis and methods to characterize her.

Keywords: Signature acoustic, generation and propagation of noise, insulators, propellers, propulsion systems.

* Oficial Graduado de la Escuela Naval Almirante Padilla año 2002, Profesional en Ciencias Navales Escuela Naval Almirante Padilla, Cartagena, Colombia.

**Oficial Naval Graduado de la Escuela Naval Almirante Padilla año 2003, Curso Básico de Ascenso, Cartagena, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis y estudio de la firma acústica presenta especial atención para el desarrollo de la Plataforma estratégica de superficie, ya que un alto nivel de esta firma puede significar una desventaja táctica en caso de un conflicto internacional y más si se tiene en cuenta que nuestros vecinos cuentan en sus flotas con unidades submarinas las cuales representa una alta amenaza a los buques de superficie.

2. METODOLOGÍA

La metodología que se usó para esta investigación fue de carácter descriptivo, buscando con esta poder describir el Estado del Arte, características, factores y métodos usados en la actualidad por parte de los ingenieros navales, con el cual se puede obtener reducciones considerables en la detectibilidad de los buques de superficie, realizando un mayor énfasis en la reducción de la firma acústica.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Uno de los principales requerimientos para poder garantizar la reducción de la generación de ruidos a bordo, es poder medir los niveles de producción para que así de esta manera se pueda cuantificar los logros obtenidos en la aplicación de distintos métodos que buscan la reducción significativa de la generación de estos.

Otro de los factores por los cuales es de vital importancia conocer los niveles de ruido propio, redundando en aspectos tácticos, ya que con esta identificación del ruido autogenerado se puede descartar contactos obtenidos por el sonar a bordo de los buques.

Cuando se trata del ruido producido por un buque ya sea por las vibraciones, hélices, maquinaria principal y auxiliar, se puede analizar y medir de dos maneras, la primera será durante la etapa de diseño, en la cual se podrán efectuar estudios de comportamientos en bancos de prueba para las hélices, maquinaria principal, auxiliar, etc. y con la ayuda de herramientas computacionales tales como el ANSYS que fundamenta su análisis en el método de los elementos finitos (MEF). Los análisis realizados por este tipo de herramientas utilizan un método numérico, que se basa en soluciones aproximadas mediante el uso de ecuaciones diferenciales parciales las cuales modelan diferentes aspectos establecidos por el diseñador.

Métodos usados para la estimación durante la etapa de diseño:

Durante la etapa de diseño los diseñadores deberán valerse de diferentes métodos tales como análisis numéricos y pruebas en bancos de diferentes tipos buscando determinar,

acuerdo a los resultados obtenidos las mejores alternativas para ser empleadas y garantizar así de esta manera la reducción de la firma acústica.

Los métodos numéricos se verán apoyados por los resultados obtenidos en bancos de pruebas, con estos se logra la integración de todas las fuentes acústicas lo que conforma un buque y de igual manera permiten la iteración del proceso hasta la obtención de los niveles deseados, a continuación se darán a conocer algunas de las herramientas con que cuentan los diseñadores.

Bancos de pruebas para motores y equipamiento:

En el programa se contemplan pruebas con distintas configuraciones del motor principal, dentro de las que se resaltan, pruebas de severidad vibratoria mediante la medida en partes no rotativas, alimentación por grupo DC, alimentación con rectificador, montaje resiliente/rígido, posibilidad de prueba de diferente acoplamientos, con el fin de obtener resultados de las mediciones de niveles globales de vibración y espectros en frecuencia en diferentes puntos del motor, ruido-potencia sonora/presión sonora; niveles de vibración en patas y anclajes; niveles de rizado de fuente de tensión; influencia de electro-ventiladores [1]. Para esto se observaron dos condiciones de funcionamiento habituales condición nominal de funcionamiento y condición de buque silencioso (Bajas RPM).

En la figura 1, se puede apreciar el banco de pruebas que se ha utilizado en un buque oceanográfico para la medición de los mismos.

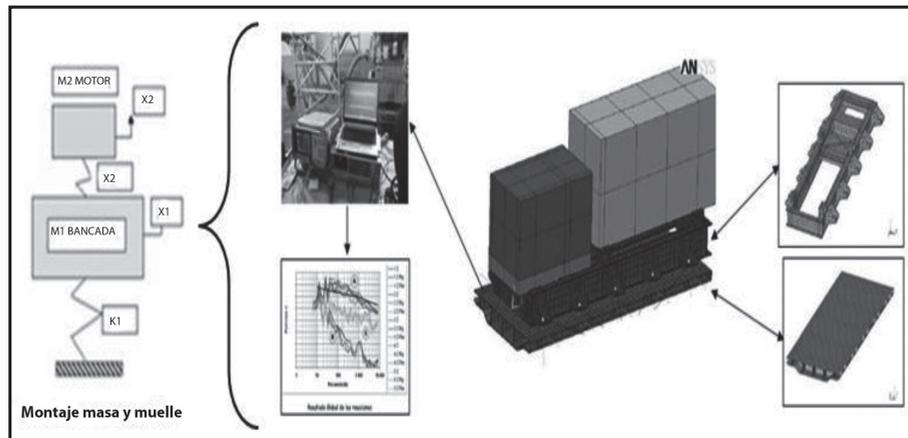


Figura 1. Imagen descriptiva de un banco de pruebas con transductores de masa y muelle.

Fuente: “Buque Oceanográfico Miguel Oliver”: La excelencia en ruido y vibraciones a bordo cumpliendo ICES n° 209” y modificado por los autores del trabajo.

Predicción por el método de elementos finitos (MEF) [2]

El método de los elementos finitos tiene la mayor aproximación en la solución de problemas en áreas donde el modelamiento matemático se hace presente, ya que permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales, los cuales se basaban en la verificación de errores de cálculo en prototipos, lo que elevaba el coste tanto económico como en tiempo de desarrollo [3].

Los diseñadores en el momento que inician su trabajo con el método de elementos finitos deberán contestarse 4 preguntas básicas que les permitirá desarrollar el método de manera eficaz, estas preguntas serán:

1. ¿Qué se pretende con el análisis? Las frecuencias propias y los modos de vibración asociados, tanto globales (buque - viga) como locales (cubiertas, mamparos, etc.)
2. ¿Cómo va a ser la geometría que se va analizar? La geometría dependerá de las líneas de forma del buque a analizar.
3. ¿Qué condiciones de contorno se imponen sobre el sistema a estudiar? Las condiciones de contorno estarán determinadas por aquellos aspectos en los que se involucran en los distintos niveles de operación ya sea en agua tranquilas, como en mar fuerte.
4. ¿Qué resultados se esperan obtener? Se espera predecir los Niveles de Vibración en la estructura del buque, los cuales serán comparados con los niveles de los límites establecidos por los requerimientos, ya sea de la normatividad de referencia o de los niveles solicitados por el oferente.

Dentro de la descripción del modelamiento matemático efectuado en el documento *"la excelencia en ruido y vibraciones a bordo cumpliendo ICES n° 209" del Astilleros M. CÍES de España*", se resalta que para modelar las características dinámicas (masas y rigideces) de la estructura del buque, se han empleado fundamentalmente elementos bidimensionales capaces de admitir deformaciones en su plano y en el perpendicular a éste, como son tipo placa (Shell), para esloras, baos fuertes y puntales, se empleó elementos unidimensionales (beam)[6]. Asimismo, también se ha considerado el efecto de la masa de agua arrastrada en aquellos elementos en contacto con el agua, con objeto de reflejar en el modelo matemático el efecto de que parte del buque vibra en un medio líquido, de mayor viscosidad y densidad comparado con el aire. También se ha contemplado el peso de fluido en tanques[7].

El método de análisis estadístico de la energía (StatisticalEnergyAnalysis SEA) alineación.

Es un método para predecir la transmisión de vibraciones dentro de sistemas dinámicos compuestos por compartimientos y estructuras acústicas (Predicción de

Ruido), lo que supone trabajar en alta frecuencia, y a su vez la inviabilidad de trabajar con métodos como análisis por elementos finitos (FEM) o por análisis de elementos de contorno (BEM).

Este método se asemeja al de elementos finitos, con la diferencia que el sistema estará descrito en el dominio de la energía; el modal del sistema dinámico de resonancias, contendrá a la energía potencial y la energía cinética. De igual manera se presentará una división por subsistemas, que garantizaran la solución del método de análisis estadístico de la energía. Las ventajas que proporciona el modelo del método SEA frente a otros métodos equivalentes, en este método se inicia con la creación de la topológica del buque, en ella estará presente la ubicación de los elementos estructurales (Mamparos, Cubiertas, etc.) [7] y su distribución detallada; una vez obtenido esto se dará paso a la creación del modelo de análisis de ruido, este incluirá información sobre el espesor de las chapas, espaciado entre refuerzos, definición de los focos de ruido, definición de locales receptores y locales emisores e información sobre los tratamientos acústicos empleados [8].

Túneles de cavitación: [9] La similitud dinámica se obtiene cuando se contabilizan adecuadamente los efectos de la gravitación, viscosidad, tensión superficial, características de vaporización, presión estática, velocidad, densidad del fluido, difusión de gas y así sucesivamente cada uno de los parámetros que caracterizan la parte dinámica. No obstante en muchos casos no se logra satisfacer todos estos parámetros por la complejidad de su obtención.

Los principales factores a ser tenidos en cuenta son [10]:

- Número de Froude
- Número de Reynolds
- Número de Weber
- Razón de avance

Número de cavitación: Partiendo de la suposición que el agua de mar y el agua empleada en los túneles de cavitación son idénticas, lo cual no es cierto, puede verse que las identidades que pueden obtenerse simultáneamente en este caso, serán las de los siguientes grupos:

- Número de Froude, Número de Cavitación y razón de avance, cuando la presión y la velocidad de rotación de la hélice pueden ser escogidas libremente.
- Número de Froude, Número de Cavitación, razón de avance y ψ (donde ψ es el número de gas contenido $d / (VD)$), acá nuevamente la presión y la velocidad de rotación de la hélice puede ser escogidas libremente, en altas velocidades de flujo donde el número de Reynolds no es problema.
- Número de Froude, Número de Cavitación, razón de avance y Θ (donde Θ es el número de gas contenido $CD / (V^2)$), donde una vez más la presión y la velocidad de rotación de la hélice puede ser escogidas libremente.

Como no es posible la satisfacción simultánea de la identidad del número de Froude y del número de Reynolds; la selección de velocidades deberá ser lo más alto posible para minimizar las diferencias del número de Reynolds entre lo modelado y la escala real, sin embargo esto generalmente no es posible en la mayoría de los laboratorios. En la mayoría de los casos, las pruebas de cavitación intentan seguir el segundo grupo de dimensiones. Las consecuencias de ignorar la identidad del Número de Froude, es que para algunos casos, el número de cavitación no será el mismo para el modelo que para el buque.

En la figura 2, se presenta un diagrama donde se puede observar como está compuesto un túnel de cavitación.

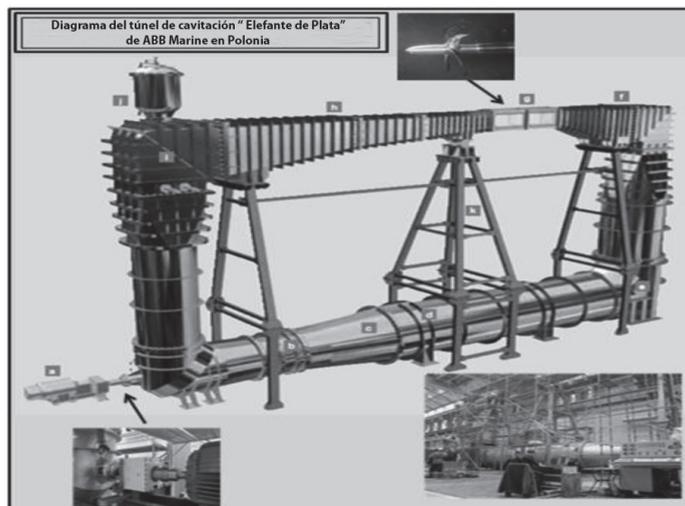


Figura 2. Diagrama explicativo de las partes del túnel de cavitación “Elefante de Plata” de la empresa ABB Marine de Polonia.

Fuente: Elaborado por: TadeuszKobus, AgnieszkaGabrysiak.

Método para la medición de la firma acústica mediante pruebas de mar

El objeto de la medida de ruido radiado al agua es determinar el ruido emitido por un buque, en sus diferentes condiciones de operación. Para la medida de ruido radiado al agua por el buque objeto del ensayo, es necesario contar con una o varias embarcaciones de apoyo en la que se despliegan diferentes arreglos de hidrófonos omnidireccionales, o preferiblemente con el apoyo en el caso de la marina Colombia de los submarinos tipo 209, que gracias a sus avanzados equipos y diferentes tipos de sonares realizarán una labor más precisa. Debido a los procesos de modernización a los cuales fueron sometidos, cuentan con el sistema ISU 90-111, el cual efectúa la integración de los diferentes sensores acústicos y mediante un análisis como el LOFAR, permitirán la caracterización de la firma del buque objeto del ensayo. Durante

el transcurso de las pruebas el buque (buques) de apoyo permanece a la deriva con todos los sistemas apagados, con el fin de evitar ruidos que afecten las mediciones, mientras que el buque a ensayar realiza varias corridas, frente a la embarcación de apoyo, a diferentes distancias y con rumbos pres establecidos.

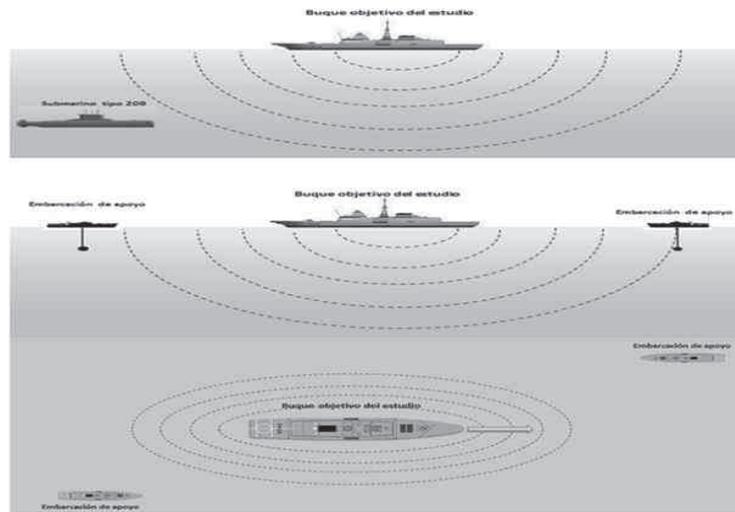


Figura 3. Diagrama descriptivo de las posibles formas de efectuar el análisis de la firma acústica.

FUENTE: Diagramas Elaborado por los autores del trabajo.

Las condiciones ambientales predominantes en el área de ensayo, son muy importantes para la obtención de unos resultados con la menor presencia posible de fuentes de ruido no deseables. Cuando las pruebas son efectuadas con embarcaciones de apoyo se debe tener en cuenta que los hidrófonos ubicados en estas embarcaciones, son sensibles a los cambios de presión hidrostática, producidos por los cambios de la profundidad, debido a efectos de las mareas y las olas, creando afectación al azonade bajafrecuenciadespectro, aumentando así los niveles de ruido no deseado; con base a la anterior explicación se debe tener muy en cuenta que para la realización de las pruebas el estado del mar debese ser lo más calmaposible para poder garantizar una alta fiabilidad de la prueba.

Adicionalmente, en el buque objeto del ensayo se instalan acelerómetros en las posibles fuentes de ruido: motores principales, auxiliares, e incluso en los costados del buque en contacto con el agua, además de detectores de cavitación cercanos a la hélice.

Los acelerómetros y los detectores de cavitación se conectan a un sistema de adquisición multicanal que adquirirá datos de manera simultánea de los ruidos irradiados, con el propósito de poder caracterizar las posibles componentes espectrales producidas por los diferentes focos acústicos.

Dentro de la metodología se debe velar que Todo los equipos y sensores usados dispongan de sus correspondientes certificados de calibración y/o verificación de acuerdo con la norma ISO 9001 (2000) [11].

CONCLUSIONES

En el desarrollo del presente se concluye que los focos generadores de ruido que constituyen la firma acústica, se pueden subdividir en dos grupos, el primero de estos representa a los focos de mayor trascendencia en el espectro acústico, en él encontramos a las hélice y a la maquinaria principal, en el segundo grupo se encontrara los sistemas de ventilación, maquinaria auxiliar, tomas y descargas al mar y estructuras, que presenta una ponderación más baja con respecto al grupo anterior pero no por esto una menor importancia en un análisis del espectro acústico. Acuerdo a esto los diseñadores deberán considerar dentro de los puntos críticos de la integración maquinaria vs el diseño, no solo como una correcta selección de la maquinaria y las hélices, que cumpla con los requerimientos de potencia, eficiencia, capacidad, velocidad, etc., demandados por el oferente, sino también para cumplir con las exigencias de emisiones de sonido, niveles de vibración y niveles de cavitación, que garanticen la reducción de la firma acuática.

Cuando normalmente se habla de espectro acústico, se piensa en sonido, pero durante la realización de este trabajo de grado, se pudo apreciar que por las características física tales como la alta densidad del medio de propagación de la firma acústica, se deben estudiar muy afondo todos aquellos aspectos que generan variación de presión en el medio, ya que esta variación será registrada por los sensores acústicos(hidrófonos) del enemigo; estas variaciones podrán ser las ondas sonoras radiadas a través del casco, como también las vibraciones que se generan por efectos de funcionamiento de la maquinaria principal y auxiliar, y se irradian al agua por medio de la estructura del buque; es decir cuando se analice el aporte al espectro acústico de un foco generador, debe verse tanto su aporte sonoro como su aporte vibratorio, y así de esta manera se garantiza un correcto estudio de cada foco.

REFERENCIAS

1. M Harris (Ed), shock and vibration handbook, 3a ed., Capitulo 13, McGraw-Hill- 1988.
2. ZIEWKIEWICZ, Charles , The finite element method, 3a ed., McGraw-Hill- 1988
3. COURANT, Ronald. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations.En: Bulletin of American Mathematical Society (15: 20-22, Enero: Washingtwn) Memories, Washington. 1943. p 35-43
4. PERIC, Owen. Some aspects of recent contributions to the mathematical theory of finite elements".Advances in Computational Methods in Structural Mechanics and Design.En: University o Alabama Press (9: 10-22, Abril:Mobile) Memories,Mobile. 1995. p 13-15

5. TURNER, Mike. Stiffness and deflection analysis of complex structures. En: Journal of Aeronautical Sciences (12: 23-25, Junio Washington) Memories, Washintown. 1956. p 23-29
6. ENCISO, Carmelo. Sobre transmisión de ruidos y vibraciones en el MAPA 70 de Astilleros M. Cies. En: Revista Ingenieros Navales (15: 20-22, Mayo: España) Memories, España. 2007. p 26-30
7. CARRASCO, Vicente. Buque Oceanográfico Miguel Oliver. Un reto tecnológico de SimadSpain En: Revista Ingenieros Navales (15: 20-22, Mayo: España) Memories, España. 2007. p 40-45, p 50-55
8. THE 16TH INTERNATIONAL SHIP AND OFFSHORE STRUCTURES CONGRESS. (3:8-12, Agosto, 2006: Southampton, Inglaterra) Memorias. Southampton. 2006. P. 130
9. BURRILL, L.C. PROPELLER CAVITATION: FURTHER TESTS ON 16 IN. PROPELLER MODELS IN THE KING'S COLLEGE CAVITATION TUNNEL. En: Propeller Marine Designer (15: 20-22, Mayo 1978: England) Memories, England. 1978. p 4-14
10. CARLTON, Jhon. Marine propeller and propulsion. 2 ed. Oxford: McGraw Hill, 2007 556 p. ISBN: 978-07506-8150-6
11. ENCISO, Carmelo. Sobre transmisión de ruidos y vibraciones en el MAPA 70 de Astilleros M. Cies. En: Revista Ingenieros Navales (15: 20-22, Mayo: España) Memories, España. 2007. p 26-40

OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE NAVEGACIÓN DEL R.O.V. PARA LA INSPECCIÓN DE CASCOS

Javier Gonzalo Loaiza Escarraga*
jagolo20@hotmail.com

José Luis Carlos Parra Vargas**
joseluiscarlos@gmail.com

Resumen: Identificación del modelo de maniobra del R.O.V en el plano horizontal, diseño, implementación y validación del controlador automático que permita que el R.O.V navegue en una trayectoria deseada, lo que facilite la operación del vehículo para la inspección de cascos de buque en aguas con visibilidad reducida.

Palabras clave: Buque, Controlador, Dinámica, Diseño, Horizontal, Maniobra, Modelo, Plano, R.O.V.

Abstract: Model identification maneuver from the R.O.V in the horizontal plane, designed, implementation and validation of the automatic controller that allows the R.O.V navigate to a desired trajectory, which facilitates the operation of the vehicle for inspection of ship hulls in waters with low visibility.

Keywords: Ship, Controller, Dynamics, Design, Horizontal, Maneuver, Model, Plane, ROV.

* Teniente de Navío de la Armada Nacional, Profesional en Ciencias Navales, Ing. Naval en la Especialidad de Electronica de la Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla".

**Teniente de Navío de la Armada Nacional, Profesional en Ciencias Navales, Especialista en Gerencia de Proyectos de la Universidad EAN, Ing. Naval en la Especialidad de Electrónica de la Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla".

INTRODUCCIÓN

El grupo de investigación en Control, Comunicaciones y Diseño Naval, de la Escuela Naval “Almirante Padilla”, ha venido desarrollando el proyecto: “Diseño y Construcción de Vehículo para Inspección Automática de Casco de Buque en Aguas Turbias”, que busca dar solución a la necesidad institucional y del gremio marítimo en Colombia, de tener la capacidad de efectuar inspecciones a los buques, sean comerciales o militares, mediante un sistema automático detección de anomalías en los cascos de los mismos, permitiendo disminuir el empleo de buzos (método más empleado actualmente), y con esto disminuir los costos y riesgos de las Inspecciones.

Se realizarán experimentos para la identificación del modelo de maniobra del ROV en el plano horizontal, utilizando pruebas de zigzag y curva de evolución. Con el modelo obtenido se procederá a diseñar, implementar y validar el controlador automático que permita que el R.O.V siga lo más fielmente posible una trayectoria deseada.

1. CARACTERIZACIÓN DE LA DINÁMICA DEL R.O.V.

Para garantizar que el control de navegación del R.O.V. cumpla satisfactoriamente con los objetivos para los cuales está diseñado, se requirió caracterizar la dinámica del R.O.V, obteniendo con esto un conocimiento detallado de su desempeño, y la representación de dicha dinámica, empleada para prever las dificultades a las que se va a enfrentar en su operación.

Este conocimiento se adquirió determinando las variables de mayor relevancia que afectaban el movimiento del R.O.V y su posicionamiento bajo el agua.

La determinación de las variables se obtuvo efectuando pruebas de maniobra del R.O.V, las cuales se pueden resumir en el desarrollo y análisis de la curva de evolución y la maniobra de zigzag. Si bien estas maniobras están diseñadas para determinar la capacidad de maniobra de una embarcación de superficie, dan una idea bastante aproximada de la dinámica del R.O.V.

Curva de Evolución: Esta maniobra hace referencia a la trayectoria que sigue el centro de gravedad de un buque a lo largo de un giro en el cual se mantiene constante la potencia de las máquinas y el ángulo del Timón. Las gráficas de dichas curvas se conocen como diagramas evolutivos¹.

¹ “Proyecto de la Configuración Marítima de los Puertos; Canales de Acceso y Áreas de Flotación” (ROM 3.1- 99), PUERTOS DEL ESTADO, 173

Maniobra Zigzag: Esta maniobra hace referencia a la trayectoria que sigue una embarcación cuando en un movimiento recto avante, cambia el ángulo de timón hasta un rumbo determinado, a partir del cual se vuelve a modificar el ángulo de timón por uno de igual magnitud pero del costado contrario, siguiendo este mismo procedimiento al menos dos veces por costado.²

Teniendo en cuenta que el R.O.V. no posee timones, fue necesario seguir el procedimiento anteriormente descrito mediante la variación de la magnitud del voltaje aplicado a los motores. Para las pruebas se efectuaron los virajes del R.O.V. aplicando voltaje máximo a un motor y quitándole voltaje al del costado contrario.

1.1. Identificación de la dinámica del R.O.V.

Para obtener el modelo matemático que describe la dinámica del ROV mediante la técnica Identificación, se procedió a realizar varios experimentos de tomas de datos de entrada y salida empleando pruebas como navegación en línea recta, cirulo de evolución y maniobra de tipo zig-zag al prototipo existente en la Escuela Naval Almirante Padilla.

Como variable de entrada se considera el voltaje aplicado a cada motor y como variable de salida el ángulo de rumbo. La velocidad del vehículo submarino se mantuvo constante aplicando 18 voltios a los motores.

La figura 1 muestra los resultados de la primera prueba, en la cual se aplicó una señal de voltaje al motor de estribor que iba de +18 voltios a 0 voltios.

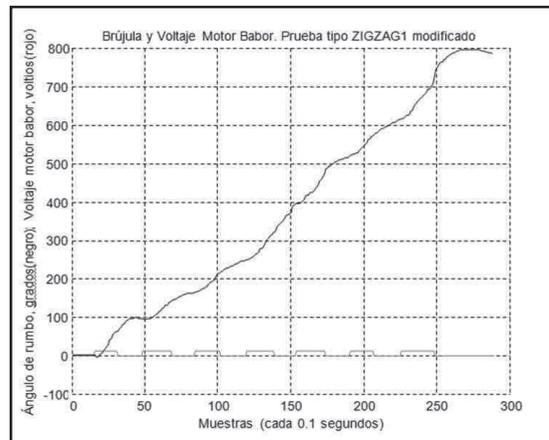


Figura 1. Datos experimentales para identificación de la dinámica del modelo de R.O.V.

Fuente: Los autores

² "Estudio Maniobrabilidad con modelos matemáticos.

Un modelo simple que describe el comportamiento dinámico de un buque puede expresarse mediante la ecuación diferencial (modelo de Nomoto de tercer orden)³:

$$\ddot{\psi}(t) + \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \dot{\psi}(t) + \frac{1}{T_1 T_2} \psi(t) = \frac{K}{T_1 T_2} \left(T_3 \dot{\delta}(t) + \delta(t) \right)$$

Donde $\Psi(t)$ es el ángulo de rumbo y $\delta(t)$ es el ángulo del timón. Si se asumen condiciones iniciales nulas, la ecuación de Nomoto se puede representar en el dominio de Laplace. La ecuación de Nomoto se puede representar en el dominio de Laplace mediante la siguiente función de transferencia⁴:

$$\frac{\Psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K(T_3 s + 1)}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

La anterior ecuación podría ser obtenida empleando un modelo ARX de tercer orden en el proceso de identificación. Utilizando la herramienta IDET de Matlab se procedió a hallar el modelo que mejor se aproximara a la dinámica representada por los datos experimentales.

Se utilizó la función selstruc de Matlab para seleccionar el orden del modelo y el mejor resultado fue un modelo de orden 10, como se muestra en la figura 2.

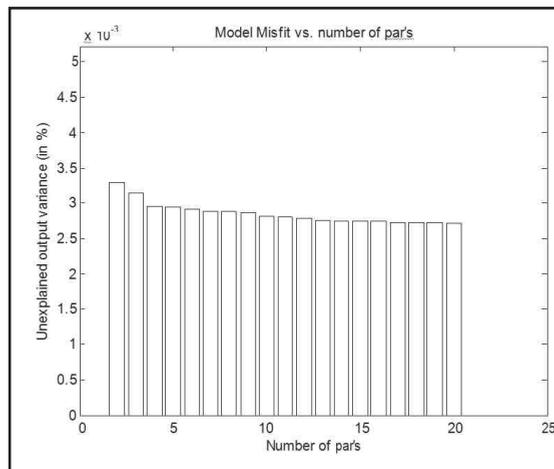


Figura 2. Selección del orden del modelo ARX

Fuente: Los autores

³ Contreras, J., (2011). "Generating Fuzzy Controllers for Ship Steering". 30th North American Fuzzy Information Processing Society Annual Conference, El Paso, Texas, USA. 2011. (ISBN: 978-1-61284-968-3)

⁴ Contreras J., Misa, R., Murillo, L. (2007). Interpretable Fuzzy Models from Data and Adaptive Fuzzy Control: A New Approach. IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Londres.

La selección del mejor orden del modelo empleando la función selstruc arrojó un $n_a = 10$; $n_b = 10$ y $n_k = 3$; es decir, hay un retardo de 3 muestras en la respuesta del sistema.

Los coeficientes del numerador y el denominador del modelo en tiempo discreto se presentan a continuación:

Numerador =

0 0 0 0.1414 -0.0503 0.0978 0.0648 -0.1202 0 . 0 1 2 5
 0.1357 -0.0267 -0.1430 0.1108

Denominador =

1.0000 -1.0872 -0.0954 0.1396 0.0552 -0.0442 -0.0213 0.0393 -0.0034 -
 0.0483 0.0653 0 0

La figura 3 muestra la comparación entre la salida del modelo (discontinua) y la salida real (rumbo) para la identificación y la validación respectivamente.

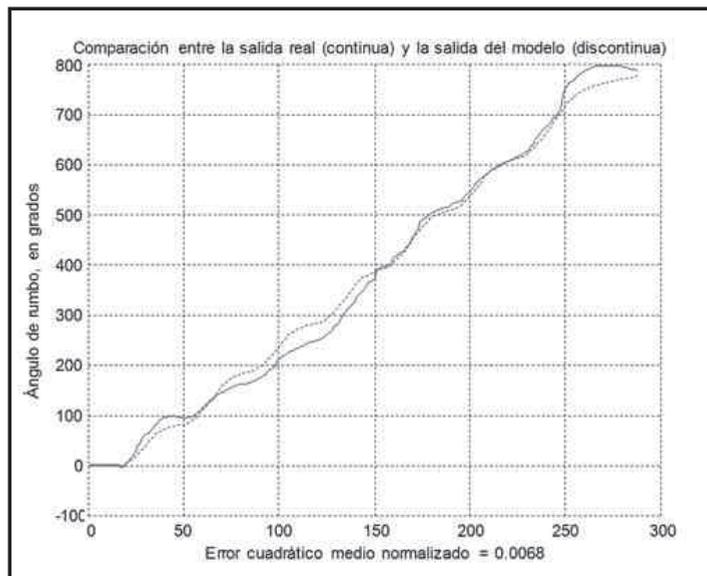


Figura 3. Resultado de la identificación del modelo ARX

Fuente: Los autores

Los resultados alcanzados con el proceso de identificación indican que el modelo es suficientemente bueno para proceder a diseñar el controlador.

2. CONTROL DE NAVEGACION

2.1. Análisis de estabilidad

El modelo del ROV en tiempo discreto está dado por:

$$0.1414 z^9 - 0.05033 z^8 + 0.09781 z^7 + 0.06478 z^6 - 0.1202 z^5 + 0.01252 z^4 + 0.1357 z^3 - 0.0267 z^2 - 0.143 z + 0.1108$$

$$z^{12} - 1.087 z^{11} - 0.0954 z^{10} + 0.1396 z^9 + 0.0552 z^8 - 0.04421 z^7 - 0.02134 z^6 + 0.03929 z^5 - 0.003425 z^4 - 0.04833 z^3 + 0.06528 z^2$$

En tiempo continuo, tenemos:

$$-0.0002796 s^{12} - 32.67 s^{11} + 1806 s^{10} - 1.444e005 s^9 + 6.978e006 s^8 - 1.801e008 s^7 + 3.272e009 s^6 - 4.255e010 s^5 + 3.183e011 s^4 - 2.302e012 s^3 + 1.677e013 s^2 + 5.453e013 s + 4.56e014$$

$$s^{12} + 208.5 s^{11} + 2.242e004 s^{10} + 1.324e006 s^9 + 5.399e007 s^8 + 1.523e009 s^7 + 2.969e010 s^6 + 4.146e011 s^5 + 3.984e012 s^4 + 2.417e013 s^3 + 9.582e013 s^2 + 1.062e014 s - 1.06e012$$

Las figuras 4 y 5 muestran la ubicación de las raíces del sistema.

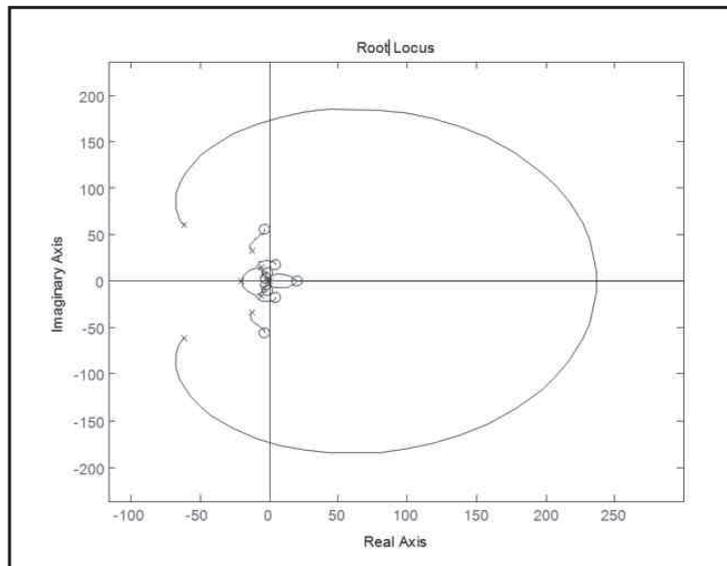


Figura 4. Lugar de las raíces del modelo del ROV

Fuente: Los autores.

Ampliando el lugar de las raíces se apreciará mejor la trayectoria de los polos de lazo cerrado que pueden hacer inestable el sistema, como se aprecia en la figura 5.

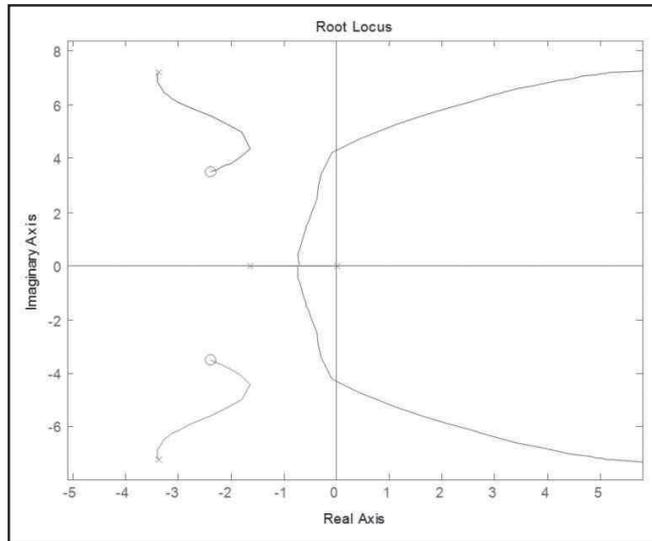


Figura 5. Lugar de las raíces ampliado del modelo del R.O.V.
Fuente: Los autores

El lugar de las raíces muestra que el sistema es estable para valores de ganancia bajos, es decir valores inferiores a $K = 2.5456$; pero valores superiores pueden llevar el sistema a una condición de inestabilidad. Evaluando en la función de transferencia de lazo abierto, los polos que cruzan por el eje imaginario, se pudo determinar el valor de ganancia para el cual el R.O.V se hace inestable. Este valor es aproximadamente de $K = 2.5456$

Por otro lado, el sistema muestra un polo en el origen, lo que lleva a inferir que es un sistema tipo 1, por lo cual, ante una entrada tipo escalón, puede conseguirse un error nulo en estado estacionario con un controlador proporcional.

2.2. Diseño del controlador

La información obtenida de los lugares geométricos de las raíces genera unas primeras conclusiones que son útiles para el diseño del controlador, así:

La ganancia del controlador debe mantenerse en valores inferiores a $K = 2.5456$ para evitar que el sistema (R.O.V) entre en condición de inestabilidad. El modelo presenta un cero en el origen del plano S , lo cual conlleva a pensar que el sistema podría ser controlado con un controlador proporcional con baja ganancia, y que el integrador (en caso de un controlador PI) estaría incluido en el sistema mismo.

Con esas consideraciones se procedió a simular el sistema empleando MATLAB-SIMULINK, con un controlador proporcional como se muestra en la figura 6.

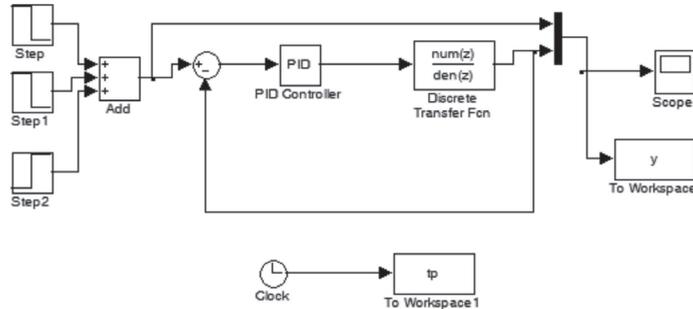


Figura 6. Control proporcional para cambio de rumbo del ROV
Fuente: los autores.

Para valores de ganancia cercanos a 2.5456 se consiguió un error nulo en estado estacionario pero el sistema es tipo subamortiguada, con valores altos de sobreimpulso. Para valores menores de 0.5 se consigue una respuesta rápida, sobreamortiguada y con error estacionario de valor cero, como se aprecia en la figura 7.

Se realizaron pruebas del controlador en el plano de navegación del R.O.V. dándole la instrucción al prototipo para que navegará en un rumbo establecido y posteriormente dándole una nueva orden de rumbo, para que efectuara el viraje y las respectivas correcciones para mantener el nuevo rumbo de manera automática.

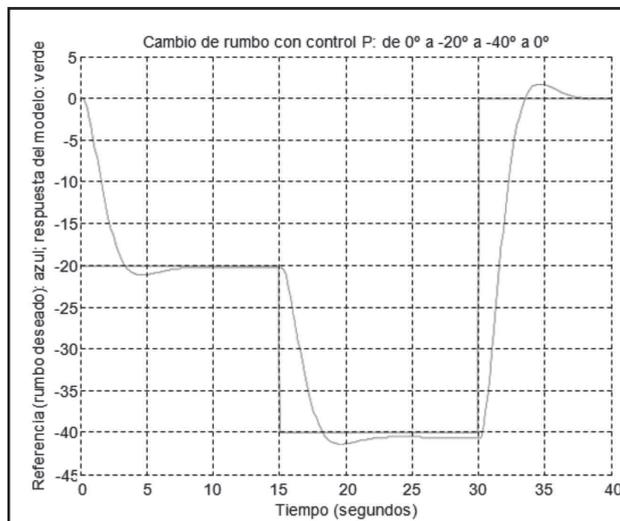


Figura 7, Respuesta del sistema controlado con $K_p=0.15$
Fuente: Los autores

En la figura 8 se muestra la respuesta que tuvo el controlador del R.O.V, al darle un rumbo inicial de 140 y posteriormente cambiarlo a un rumbo de 270.

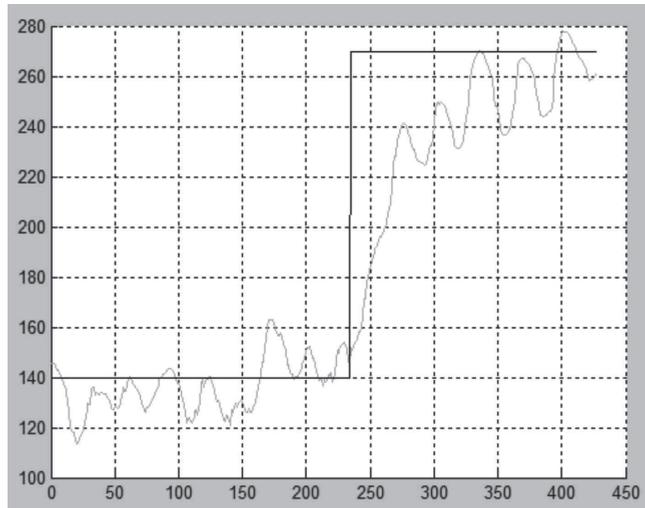


Figura 8. Respuesta del controlador

Fuente: Los autores.

Con estos resultados obtenidos mostrados en la figura 8, se puede observar que el R.O.V responde ante las ordenes de seguimiento de rumbo y posteriormente al darle la orden de cambio de rumbo, realiza las correcciones necesarias para cumplir con la nueva orden; en esta transición teniendo en cuenta que la velocidad de muestreo es cada 0,1 seg, con las gráficas se puede observar que el modelo se estabiliza en el nuevo rumbo en aproximadamente 10 segundos.

3. CONCLUSIONES

Observando el lugar de las raíces, se determina que se puede implementar un controlador de tipo proporcional debido a que tiene una raíz ubicada en el origen del sistema.

Durante el modelamiento del R.O.V, se pudo establecer que el sistema es estable para valores de ganancia bajos (inferiores a 2.5456), valores superiores a este hacían que el sistema presentara una condición de inestabilidad. Para el caso de este trabajo de grado, el controlador se trabajó con una ganancia de 1,0 el cual presentó la mejor respuesta durante las pruebas realizadas.

Durante el desarrollo de las pruebas se observó que el sistema responde de acuerdo con lo esperado con el control de navegación en el plano horizontal diseñado al aplicar valores de tensión bajos a los motores, efectuando cambios de rumbo sin la necesidad de llegar a valores de tensión muy altos (superiores a 13,5 voltios) en los motores.

REFERENCIAS:

1. "Proyecto de la Configuración Marítima de los Puertos; Canales de Acceso y Áreas de Flotación" (ROM 3.1-99), PUERTOS DEL ESTADO, 173
2. Estudio Maniobrabilidad con modelos matemáticos.
3. Contreras J., Misa, R., Murillo, L. (2008). Obtención de Modelos Borrosos Interpretables de Procesos Dinámicos. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, Vol. 5, No. 3
4. Contreras J., Misa, R., Murillo, L. (2007). Interpretable Fuzzy Models from Data and Adaptive Fuzzy Control: A New Approach. IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Londres.
5. Contreras, J., (2012). "Generating fuzzy singleton controllers to ship course control". The 14th IASTED International Conference on Control and Applications (CA 2012), Editorial ACTA Press (ISBN: 978-0-88986-922-6) Crete, Grecia. 2012.
6. Contreras, J., (2011). "Generating Fuzzy Controllers for Ship Steering". 30th North American Fuzzy Information Processing Society Annual Conference, El Paso, Texas, USA. 2011. (ISBN: 978-1-61284-968-3).
7. Contreras, J., Fernando J. Durán M., Alejandro Castro C. (2011) "Generating Fuzzy autopilot for ship maneuvering". 2st International Ship Design and Naval Engineering Congress. Cartagena, Colombia. 2011.