



DERROTERO

Edición No. 4 • Año 2010

ISSN 2027-0658

Revista para la Ciencia e Investigación de la E.N.A.P

Escuela Naval "Almirante Padilla"

Navegamos hacia la excelencia en la formación Profesional de los Oficiales Navales



Derrot.
C. I. ENAP

Cartagena
Colombia

Vol. 4

Año 2010

Páginas
1 - 178

ISSN 2027-0658



DERROTERO

Edición No. 4 • Año 2010

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.

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



1935-2010

Derrot. C.I. ENAP	Cartagena Colombia	Vol. 4	2010	Páginas 1-178	ISSN 2027-0658
----------------------	-----------------------	--------	------	------------------	----------------



El Compás Magnético es una brújula acondicionada de forma que cubre los requerimientos para ser instalada en embarcaciones, se reemplaza la aguja imanada por una rosa de los vientos que tiene un polo rojo (busca-norte) en su 0° - N (norte) y que es la que puede girar hasta detenerse apuntando al Norte Magnético. Se utiliza para determinar la dirección y el rumbo.*

La Bitácora es la caja y soporte que contiene el compás magnético, va dotado de una serie de elementos correctores y auxiliares, que eliminan las perturbaciones producidas por los aceros estructurales del buque y, como consecuencia, los desvíos de este se reducen al mínimo.**

*www.paranauticos.com. Garro, Roberto Publicación 1, Módulo Magnetismo.

**www.mgar.net

Foto de la portada
Jorge Andrés Giraldo Bedoya
Centro de Audiovisuales
Armada Nacional

DERROTERO

REVISTA DE CIENCIA E INVESTIGACIÓN DE LA ENAP

DIRECTOR: CALM. Luis Alberto Ordóñez Rubio, MSc

SUBDIRECTOR: CN. William Édgar Lugo Villalba, MBA

DECANO ACADÉMICO: CF. Campo Antonio Nova García, MBA

EDITOR: CF. Juan Carlos Acosta Chady, MSc

COMITÉ EDITORIAL: CF. Juan Carlos Acosta Chady, MSc
CF. Germán García Castellanos
Gisela Mayo Mancebo, MSc (c)
Luz Marina Ballestas Bossio, PF

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

Impresores: Calidad Gráfica

CONTENIDO

EDITORIAL	7
DINÁMICA DIARIA DE LA CAPA DE MEZCLA	
<i>Serguei Lonin, Mary Luz Cañón, Claudia Dagua, Victoria Domínguez, Eva Martin, Mabel Mendoza, Nelson Murillo, Jaime Orejarena, Víctor Pinzón, Camilo Platz, Juan Felipe Sierra, Mónica Toloza, María Alejandra Vélez</i>	9
TEMPORADA DE CICLONES TROPICALES 2009 EN EL OCÉANO ATLÁNTICO	
<i>Irina Lonina</i>	19
CARACTERIZACIÓN EN ÉPOCA SECA DE LAS VARIABLES OCEANOGRÁFICAS POR LA INCIDENCIA DEL CANAL DEL DIQUE EN LA BAHÍA DE CARTAGENA	
<i>Nelson Enrique Murillo Gómez, Stella Betancur Turizo</i>	41
ESTUDIO DE LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN UNA CARGA INDUCTIVA	
<i>Yesid Bernardo Gómez Gamboa, John Jairo Gutiérrez Maya</i>	55
CONSTRUCCIÓN DE VEHÍCULO SUBACUÁTICO DE BAJO COSTO PARA INSPECCIÓN DE CASCOS DE BUQUES	
<i>Mario Vélez Forero, Víctor Bernal Gil, Sandra Carrillo, Luis Cárdenas, Edgar Vergara, William Cuadrado, Juan Contreras, Vladimir Díaz, David Muñoz</i>	71
CONSTRUCCIÓN DE BOYA DE DERIVA DE BAJO COSTO	
<i>Sandra Carrillo, Luis Cárdenas, Edgar Vergara, William Cuadrado, Juan Contreras, Vladimir Díaz, David Muñoz, Alcides Arrieta</i>	83
CLASIFICACIÓN DE FIRMAS ACÚSTICAS SUBACUÁTICAS EMPLEANDO IDENTIFICADOR DIFUSO	
<i>Francisco José Castañeda Angulo, Juan Antonio Contreras Montes</i>	99
SISTEMA DE COMUNICACIONES PARA BOYA DERIVA ARMADA NACIONAL	
<i>William Cuadrado, Alcides Ramos, David Muñoz</i>	111

**CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE REMOLCADORES
FLUVIALES DE EMPUJE**

*Michael Eyles Sánchez Blanco, Juan Carlos Hincapié Agudelo,
Fabio Zapata Casas* 127

EL pH, UN IMPORTANTE INDICADOR DE LA SALUD DE LOS OCÉANOS

Alejandro Rueda Durán 141

HIDRATO DE GAS. UNA ALTERNATIVA ENERGÉTICA DEL FUTURO

Ricardo Andrés De la Rosa Namen, Gisela Mayo Mancebo 151

CIRCULACIÓN TERMOHALINA

Juan Carlos Ortiz Royero 163

GUÍA PARA PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS 176

CONTENTS

EDITORIAL	7
DAILY DYNAMICS OF THE MIXED LAYER <i>Serguei Lonin, Mary Luz Cañón, Claudia Dagua, Victoria Domínguez, Eva Martin, Mabel Mendoza, Nelson Murillo, Jaime Orejarena, Víctor Pinzón, Camilo Platz, Juan Felipe Sierra, Mónica Toloza, María Alejandra Vélez</i>	9
TROPICAL CYCLONES 2009 SEASON IN THE ATLANTIC OCEAN <i>Irina Lonina</i>	19
CHARACTERIZATION OF THE OCEANOGRAPHIC VARIABLES IN DRY SEASON DUE TO THE INCIDENCE OF THE EL DIQUE CHANNEL ON THE CARTAGENA BAY <i>Nelson Enrique Murillo Gómez, Stella Betancur Turizo</i>	41
STUDY OF THE CORRECTION OF THE FACTOR OF POWER IN ONE INDUCTIVE LOAD <i>Yesid Bernardo Gómez Gamboa, John Jairo Gutiérrez Maya</i>	55
BUILDING LOW COST ROV FOR THE INSPECTING SHIP'S HULL <i>Mario Vélez Forero, Víctor Bernal Gil, Sandra Carrillo, Luis Cárdenas, Edgar Vergara, William Cuadrado, Juan Contreras, Vladimir Díaz, David Muñoz</i>	71
BUILDING LOW COST DRIFTING BUOYS <i>Sandra Carrillo, Luis Cárdenas, Edgar Vergara, William Cuadrado, Juan Contreras, Vladimir Díaz, David Muñoz, Alcides Arrieta</i>	83
CLASSIFICATION OF UNDERWATER ACOUSTIC SIGNALS USING FUZZY IDENTIFIER <i>Francisco José Castañeda Angulo, Juan Antonio Contreras Montes</i>	99
COMMUNICATIONS SYSTEM FOR NATIONAL NAVY DRIFTING BUOY <i>William Cuadrado, Alcides Ramos, David Muñoz</i>	111
CONSIDERATIONS FOR THE DESIGN OF SHALLOW DRAFT TUGS <i>Michael Eyles Sánchez Blanco, Juan Carlos Hincapié Agudelo, Fabio Zapata Casas</i> ..	127

THE pH, AN IMPORTANT INDICATOR OF THE OCEANS HEALTH	
<i>Alejandro Rueda Durán</i>	141
GAS HYDRATE. AN ENERGETIC ALTERNATIVE OF THE FUTURE	
<i>Ricardo Andrés De la Rosa Namen, Gisela Mayo Mancebo</i>	151
THE TERMOHALINE CIRCULATION	
Juan Carlos Ortiz Royero	163
GUIDELINES FOR ARTICLE PUBLICATION	176

EDITORIAL

El mundo y la ciencia se encuentran íntimamente ligados y de su relación depende en gran medida el desarrollo económico de una Nación. Esta debe ser la motivación para que Colombia cada vez impulse e incentive más a las nuevas generaciones a aventurarse en el conocimiento y la innovación científica. Es aquí, donde las universidades se convierten en un instrumento fundamental para entregar a los jóvenes la capacitación adecuada que les permitirá adaptarse al mundo cambiante. Esto significa, que con fuerza laboral bien educada y entrenada, y con los insumos adecuados se puede llegar a hacer crecer al país en forma más acelerada.

En este sentido, la Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”, consciente de la importancia de la investigación científica en la formación de nuevos profesionales, a través del Grupo de Investigación en Oceanología (GIO) y el Grupo de Control, Comunicaciones y Diseño Naval (GCCDN), incentiva la producción científica presentando a la comunidad académica y científica los resultados de los proyectos de investigación desarrollados en las áreas de Oceanografía Física e Ingeniería Naval, durante el año 2009, los cuales se constituyen en un escalón más hacia la construcción de capacidades y en una oportunidad para entregar nuevos conocimientos e innovación para aprovechamiento de la comunidad en general.

En su septuagésimo quinto aniversario, la Escuela Naval con la motivación permanente de tener un país cada vez mejor y con el constante deseo de acertar, renovará su compromiso con la comunidad académica y científica para que en forma dedicada y esmerada se continúe por el derrotero de entregar profesionales con la capacidad de resolver los grandes problemas nacionales.

Contralmirante LUIS ALBERTO ORDÓÑEZ RUBIO
Director Escuela Naval “Almirante Padilla”

ARTÍCULO

DINÁMICA DIARIA DE LA CAPA DE MEZCLA

Serguei Lonin*, Mary Luz Cañón**, Claudia Dagua**
slonin@costa.net.co, marlucpaez@gmail.com, claudiadagua@hotmail.com,

Victoria Domínguez**, Eva Martín**, Mabel Mendoza**
esthervic@enap.edu.com, evamartin360@hotmail.com, mmendoza@ceniagua.org

Nelson Murillo**, Jaime Orejarena**, Víctor Pinzón**
nelmurillo20@hotmail.com, jaimeorejarena@yahoo.es, asrael03@hotmail.com

Camilo Platz**, Juan Felipe Sierra**, Mónica Toloza**, María Alejandra Vélez**
camplatz@hotmail.com, jsierra@ceniagua.org, monikt16@hotmail.com,
m_aleja10@hotmail.com

Resumen: Empleando un sistema de ecuaciones hidro-termodinámicas unidimensionales, se describe el comportamiento diario, tanto del flujo de calor como de difusión turbulenta molecular en la capa de mezcla, estimando las variaciones latitudinales del espesor de la capa de mezcla y la velocidad superficial de la corriente. Se obtuvo que tanto para los trópicos como para las latitudes medias, la estratificación, producto de la acción de la energía solar sobre la superficie del mar durante las horas de luz, impide que la turbulencia generada en la capa de mezcla, se propague por debajo de la termoclina diaria aun en presencia de viento constante. Las pulsaciones de turbulencia ejercen trabajo contra las fuerzas de flotabilidad. La energía se concentra en los primeros metros de la superficie lo que origina eventos de aceleración de la corriente superficial (*summer jets*). Se determinó que durante las horas de la noche la estratificación diurna desaparece y la termoclina se profundiza.

Palabras clave: Termoclina diaria, Capa de mezcla, Difusión turbulenta, *Summer Jets*.

Abstract: Daily behavior of both heat flux, and molecular turbulent diffusion in the mixed-layer were described using a 1-D Hydro-thermodynamic model in order to estimate latitudinal variations of the mixed-layer thickness and changes in superficial current's speed. It was also concluded that both in the tropic and in the middle latitudes, the thermal stratification, produced by solar energy over the sea surface during light hours, prevents turbulence from the mixed layer, to propagate below the daily thermocline, even in steady wind conditions. Turbulence exerts work against buoyancy forces. Energy concentrates in the upper meters and superficial current accelerates ('summer jets'). Thermocline goes deeper in the water column during night conditions, when daytime stratification disappears.

Key words: Daily Thermocline, Mixed layer, Turbulent diffusion, *Summer Jets*.

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

** Estudiante Maestría en Oceanografía. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia.

INTRODUCCIÓN

Cerca de la mitad de la energía solar que llega al planeta es absorbida y almacenada en las capas superficiales del océano y la tierra. De la energía almacenada por el océano, la mayoría es devuelta y radiada de nuevo a la atmósfera y el espacio, principalmente por evaporación y radiación infrarroja. La restante es transportada por las corrientes hacia otras regiones especialmente hacia latitudes medias; de esta manera, el calor que se acumula en los océanos tropicales, es la mayor fuente de calor necesaria para mantener la circulación termohalina [1].

Como producto de la interacción entre el océano y la atmósfera, se han identificado tres diferentes termoclinas o zonas donde la temperatura cambia rápidamente con la profundidad. Una denominada termoclina principal, la cual está dominada por procesos muy lentos y donde los efectos de la turbulencia no están presentes. El tiempo característico de la formación de la termoclina principal es de 30 años [2]. La termoclina estacional, es muy significativa en latitudes medias y altas, mas no así en el trópico. Sin embargo, en este último su generación puede estar asociada a los vientos y a la nubosidad variada estacionalmente.

El otro tipo de termoclina es la diaria, muy poco pronunciada en el tiempo, ya que depende principalmente del ciclo diario solar, es decir del flujo de radiación solar y de la posición geográfica. La Figura 1 muestra el comportamiento típico del perfil de temperatura del agua en el océano.

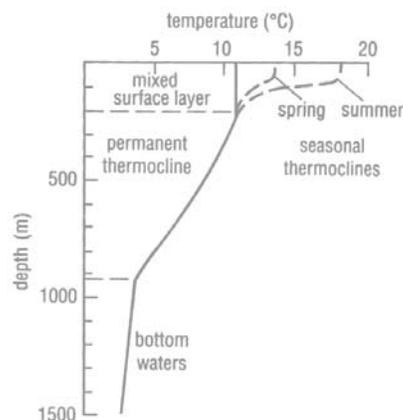


Figura 1. Perfil de temperatura. Indica la profundidad promedio de la capa de mezcla, la termoclina estacional y permanente [3]

En la estabilidad de la columna de agua, las variaciones de temperatura cobran mayor importancia que las variaciones de salinidad, es por esto que la temperatura es un factor relevante cuando se consideran procesos que involucren la interacción entre el océano y la atmósfera. Los factores de estratificación también juegan un papel dominante en la dinámica de los sistemas someros [4].

La formación de la estratificación térmica, como regla, está relacionada con el calentamiento diario de la capa superficial del agua y, para las profundidades mayores, con la variación estacional de las características atmosféricas. En ambos casos, la aparición de la termoclina favorece a la “clausura” de las capas inferiores del agua y al aumento de velocidad de las corrientes en la capa superior.

Otro proceso que afecta la dinámica de la termoclina es cuando un fluido turbulento dentro de la capa de mezcla, incorpora un fluido adyacente no turbulento (*entrainment*), el cual se genera siempre hacia la capa no turbulenta [5].

Por otra parte, se puede indicar que el aumento de la temperatura en la capa de mezcla, producto de la radiación solar, genera turbulencia, y esta a su vez, un trabajo contra la fuerza de boyancia, de manera que el impulso se propaga hacia otra capa donde la densidad cambia. Esto genera que los remolinos de la capa turbulenta pierdan su energía (por el cambio de la fuerza de boyancia) retornando los vórtices a su lugar de origen [6]. Este proceso hace que el impulso tienda a cero, de manera que al propagarse debe presentar una recompensación de la masa, permitiendo que los dos niveles (medios laminar y turbulento) se mezclen parcialmente.

El presente trabajo está orientado a estimar la influencia de la variación diaria del balance de calor en la superficie del mar, de las corrientes de deriva y del estado térmico de la columna dentro de la capa de mezcla. Estas variables fueron determinadas mediante la realización de un modelo unidimensional programado en *Fortran*, lo cual permitió conocer cómo la dinámica de la termoclina en esta capa afecta las corrientes y viceversa.

1. METODOLOGÍA

En la práctica de la modelación dinámica de los procesos océano-atmosféricos, se utilizan parametrizaciones basadas en ecuaciones termodinámicas unidimensionales en la vertical no estacionarias y con un bloque de turbulencia con clausura de nivel 2.5, según la clasificación de Mellor y Yamada, con el cual se busca una perfección

prácticamente suficiente para describir los procesos estudiados en el presente trabajo. Para este estudio, se van a considerar un sistema de ecuaciones que describen un bloque hidro-termodinámico. [Ecuaciones 1-3]:

$$\partial u / \partial t - fv = \partial / \partial z [(K_z + v) \partial u / \partial z], \quad (1)$$

$$\partial v / \partial t + fu = \partial / \partial z [(K_z + v) \partial v / \partial z], \quad (2)$$

$$C_{pw} \rho_w \partial T / \partial t = C_{pw} \rho_w \partial / \partial z [(\alpha_T K_z + \chi) \partial T / \partial z] - \partial Q_R / \partial z, \quad (3)$$

$$\rho = \rho(T) \quad (4)$$

Adicionalmente, se tienen en cuenta un sistema de ecuaciones que describen un bloque de turbulencia [Ecuaciones 5-7], para contemplar efectos de la disipación de energía cinética, boyancia y la difusión de las tasas de disipación de la energía.

$$K_z = C_\mu b^2 / \varepsilon, \quad (5)$$

$$\partial b / \partial t = K_z [(\partial u / \partial z)^2 + (\partial v / \partial z)^2] + \partial / \partial z (\alpha_b K_z \partial b / \partial z) + g \alpha_T \alpha K_z \partial T / \partial z - \varepsilon, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \partial \varepsilon / \partial t = & C_{1\varepsilon} \varepsilon / b K_z [(\partial u / \partial z)^2 + (\partial v / \partial z)^2] + \partial / \partial z (K_z / \sigma_\varepsilon \partial \varepsilon / \partial z) + \\ & + C_{3\varepsilon} \varepsilon / b g \alpha_T \alpha K_z \partial T / \partial z - C_{2\varepsilon} \varepsilon^2 / b, \end{aligned} \quad (7)$$

con la ecuación (4) directamente utilizada en (6) y (7).

Aquí u y v son las componentes horizontales de la velocidad de corriente en las direcciones x y y ; z es la coordenada en la vertical; T corresponde a la temperatura; f es el parámetro de Coriolis; t - tiempo; ν - viscosidad molecular del agua; ρ_w , C_{pw} corresponde a la densidad y capacidad específica de calor del agua; g es la gravedad; Q_R componente de onda corta de la radiación solar que penetra dentro de la columna de agua bajo la superficie; b la energía cinética turbulenta; ε - tasa de disipación de la energía cinética turbulenta; α - el coeficiente de expansión térmica; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, σ_ε , C_μ , α_b , α_ε - son constantes, con valores iguales a 1.38, 1.40, 1.40, 1.0, 0.08, 1.0, 1.0, respectivamente.

Definiendo como condiciones de contorno para el sistema en la superficie ($z=0$)

$$\begin{aligned} (K_z + \nu) \partial u / \partial z = -\tau_x / \rho_w; \quad (K_z + \nu) \partial v / \partial z = -\tau_y / \rho_w; \\ (\alpha_T K_z + \chi) \partial T / \partial z = -Q_T; \quad \alpha_b K_z \partial b / \partial z = 0; \quad \alpha_\varepsilon K_z \partial \varepsilon / \partial z = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

Para el límite inferior tomado como $H=100$ m ($z = H$):

$$u = v = 0 ; b = 0 ; \varepsilon = 0 ; T = \text{Const} \quad (9)$$

τ_x, τ_y en (8) son componentes tangenciales del estrés del viento en la superficie del mar; Q_T – flujo de calor en la capa límite.

Suponiendo que el 40% de la radiación solar incidente F_i penetra a través de la superficie del mar, entonces

$$Q_R = 0.4 F_i \exp(-\beta_Q z), \quad (10)$$

donde β_Q – es el coeficiente de atenuación difusa ($\beta_Q = a/z_d$; $a \approx 2$; z_d es la profundidad a la cual solo el 10% del flujo superficial penetra). En (10) F_i es determinado por la radiación F_{i0} y el albedo A' , i.e. $F_i = F_{i0} (1 - A')$.

El balance de calor superficial Q_T queda entonces determinado por

$$Q_T = 0.6 F_i + F_{\text{eff}} + H_T + LE_T, \quad (11)$$

donde F_{eff} – corresponde a la radiación efectiva de onda larga; H_T, LE_T son los flujos de calor sensible y latente respectivamente.

Los últimos componentes de flujo y el estrés del viento han sido calculados por la fórmula gruesa (*bulk formulae*), tomando en cuenta la estratificación de la atmósfera en la capa cercana a la superficie y la rugosidad de la superficie [6]. El parámetro de rugosidad fue determinado por la fórmula de Charnok ($z_0 \sim u_*^2/g$) dependiendo de las propiedades hidrodinámicas de la superficie del mar.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el empleo del modelo *unidimensional para el cálculo de las propiedades termodinámicas de la capa activa oceánica*, se efectuaron las simulaciones de la dinámica diaria, tanto para el perfil de temperatura, el coeficiente de turbulencia y el módulo de velocidad de corrientes de viento a latitudes diferentes, de lo cual se logró evidenciar que durante el día, en latitudes cercanas al Ecuador, la incidencia de la radiación solar sobre la superficie del mar, genera una termoclina diaria a una profundidad de 20 m aproximadamente y la termoclina estacional se presenta a una profundidad de 50 m

(Figura 2) en la fase de su formación. El tiempo de cálculo (3 días) no permitió el desarrollo completo de la termoclina estacional; el enfoque de este estudio es en la termoclina diaria.

El proceso involucra la estratificación por efecto de la radiación solar sobre la superficie del mar, que produce un balance entre la generación de turbulencia y su disipación, así como, un trabajo contra las fuerzas de flotabilidad y la difusión turbulenta de las propiedades físicas.

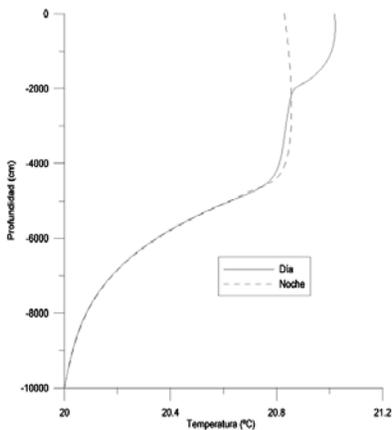


Figura 2. Perfil de temperatura (°C) en 5° latitud norte (comparar con la Figura 1)

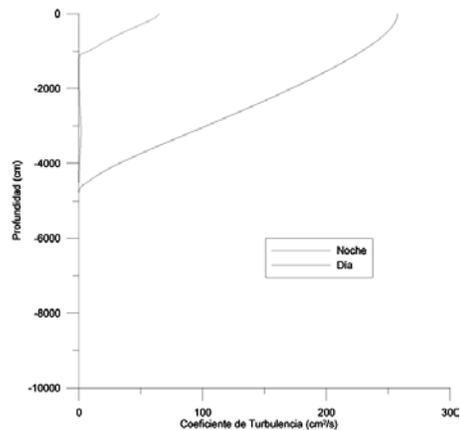


Figura 3. Perfil del Coeficiente de Turbulencia (kz) en 5° latitud norte

La estratificación causa que el proceso de difusión molecular debajo de la capa de mezcla diaria durante las horas de luz, impida la propagación del impulso hacia la profundidad. La termoclina se profundiza durante las horas de la noche, cuando la estratificación diurna desaparece. Durante las horas del día en las que ingresa la radiación solar la estratificación de la masa de agua causa la disminución del impulso vertical de mezcla, ya que actúa como barrera que impide la difusión hacia la profundidad. En cambio, en las horas de la noche la estratificación se profundiza ya que los efectos de la radiación solar son ausentes y el calor absorbido durante el día se propaga hacia la profundidad, lo que favorece que el proceso turbulento de difusión alcance mayores profundidades (aproximadamente 48 m) (Figura 3).

Considerando que durante el día se generan cambios en el proceso de calentamiento, se hace más estable la capa y por lo tanto se disminuye la propagación de impulso

de la energía mecánica a las capas inferiores, favoreciendo que la capa se profundice durante la noche [7].

Tanto en latitudes medias (45°N) como en el trópico (5°N), la radiación solar aumenta la temperatura en la superficie y la estratificación, impidiendo de esta manera la propagación del impulso a capas inferiores de la columna de agua aun en presencia de viento constante (Figura 4). Adicionalmente, debido a las variaciones de densidad los remolinos producidos por la turbulencia no se disipan sino que hacen trabajo contra las fuerzas de flotabilidad, por lo tanto generan mezcla haciendo que la capa se vuelva homogénea, con lo que la entropía del sistema cambia; por ejemplo, la energía del viento distribuida en 50 metros durante la noche, se concentra en 10 metros durante el día, generando eventos en los que la corriente se acelera (*summer jets*) [8].

En cuanto al comportamiento de las corrientes superficiales, se observa que la velocidad para diferentes latitudes varía en su magnitud tanto en el día como en la noche, siendo mayor en latitudes tropicales con respecto a latitudes medias. Además, se observa un mayor espesor de la capa de mezcla en los trópicos debido a que en esa zona el parámetro de Coriolis tiende a cero, por lo tanto se reduce el balance en las ecuaciones propuestas por Ekman, porque no ocurre para latitudes medias [9].

Adicionalmente se evidenció, que por debajo de los 48 metros no hay corriente por la presencia de la termoclina y la corriente aumenta su velocidad en la dirección norte, tanto en el día como en la noche (Figuras 4 y 5).

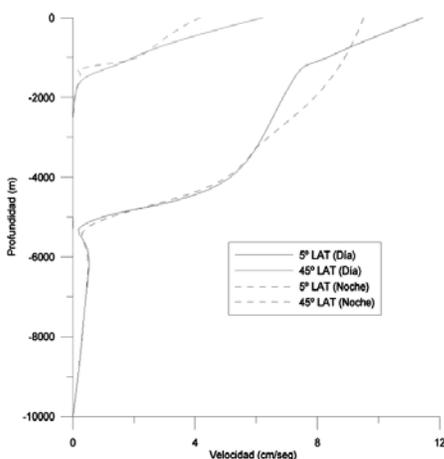


Figura 4. Perfil de velocidad de la corriente para latitudes tropicales y medias

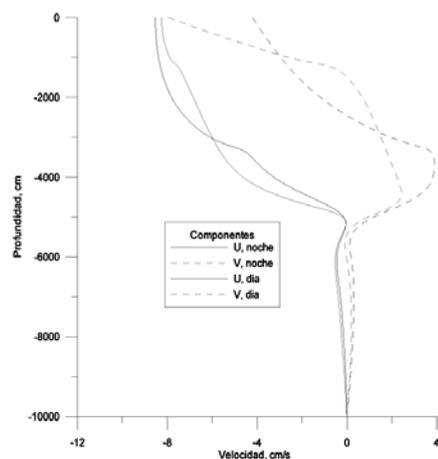


Figura 5. Componentes de velocidad en un ciclo diario para latitudes tropicales

Por otro lado, se observa que en el día las isotermas se encuentran más acentuadas indicando la formación de la termoclina muy cercana a la superficie que por ende no define una capa de mezcla; en esta la dirección de la corriente coincide con la del viento y el chorro está en una capa muy delgada. El gráfico de isotermas (Figura 6) muestra una estratificación térmica diurna por efecto de la radiación solar, mientras que en la noche la temperatura tiende a homogeneizarse en la columna de agua.

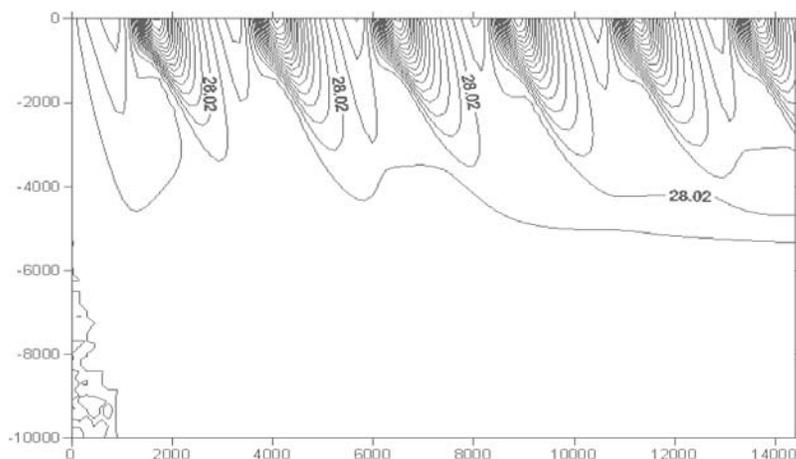


Figura 6. Variación de las isotermas en la vertical durante varios ciclos diarios

REFERENCIAS

- [1] Stewart, R. H. *Introduction to Physical Oceanography*. Department of Oceanography Texas A & M University, septiembre, 2007, p. 51.
- [2] Marchuk, G. I. *Evolución numérica de los problemas de dinámica de la atmósfera y el océano*. Leningrado, 1974, 303 p. (en ruso).
- [3] Muniz, Pablo. *Estructura y funcionamiento de Ecosistemas, Ecosistemas Marinos*. Sección Oceanología 2007 Diapositiva No. 12 URL http://hydrobio.fcien.edu.uy/EFE_archivos/CLASE15.pdf
- [4] Atkinson, L. P. & Blanton J. O. *Processes that affect stratification in shelf water*. Baroclin. Processes Continental Shelves-Wash. (D.C.): AGU, 1986, pp. 117-130.
- [5] American Meteorological Society. *Glosario de Meteorología* [on line]. Disponible en: <http://amsglossary.allenpress.com/glossary/search?id=entrainment1> (consultado en mayo 2009).

- [6] Monin, A. S.; Yaglom, A. M. *Statistical Fluid Mechanics*. Volume 2: Mechanics of Turbulence. Junio, 2007.
- [7] Stull, R. The energetics of entrainment across a density interface. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 33. July 1976, pp. 1268-1278.
- [8] Karlin, L. N. & Razumov, E. B. *Modelación de los frentes costeros, formados bajo la interacción local del océano y la atmósfera*. Trudi LGMI, 1988. Vol. 100, pp. 68-73 (en ruso).
- [9] James, I. D. A general three-dimensional eddy-resolving model for stratified seas. In *Three-dimensional models, marine and estuarine dynamics*. 1987, pp. 591-608.

ARTÍCULO

**TEMPORADA DE CICLONES TROPICALES 2009
EN EL OCÉANO ATLÁNTICO****Irina Lonina***

oceanmet.ltda@yahoo.com

Resumen: En el marco de la climatología multianual, se realizó un análisis detallado de la ocurrencia y desarrollo de los ciclones tropicales sobre el Océano Atlántico durante el año 2009. El análisis se efectuó con base en la información diaria, recolectada desde el Centro Nacional de Huracanes (EEUU) y otras fuentes operacionales del pronóstico meteorológico en la región. En el ejemplo del año 2009 se define que la presencia y categoría de los huracanes sobre el Atlántico fueron, ciertas veces, detectadas únicamente gracias a los sensores remotos satelitales.

Palabras clave: Ciclón tropical, Mar Caribe, Climatología.

Abstract: In the framework of multi-annual climatology, in a detailed way, the occurrence and the development of tropical cyclones in the Atlantic Ocean during 2009 are analyzed. This analysis uses daily information, which has been gathered by the National Hurricane Center (USA) and by other meteorological forecasting institutions in the abovementioned region. In the 2009's example, it is clear that, the presence and category of the hurricanes in the Atlantic Ocean were detected, in certain occasions, only with the help of the remote satellite sensors.

Key words: Tropical cyclone, Caribbean Sea, Climatology.

* Investigadora Grupo de Investigación en Oceanología, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla".

INTRODUCCIÓN

En el segundo semestre del año 2009, fueron realizados los Semilleros de Investigación en Meteorología “Temporada de los Huracanes del Atlántico Norte del 2009” con los alumnos del Grupo 2.2 SUPO de la ENAP. El objetivo de estos semilleros fue dar a los cadetes la información que se utiliza en la práctica operacional para el pronóstico y monitoreo sinóptico de los huracanes en el Atlántico Norte, igual como realizar una comparación de este año con los datos de climatología. El material acumulado durante este periodo sirvió como base para este artículo.

Ciclón tropical (CT), según la terminología empleada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), suprimir “un ciclón no frontal de escala sinóptica, de núcleo caliente, que se origina sobre aguas tropicales o subtropicales, dotado de convección profunda organizada y circulación cerrada de los vientos de superficie alrededor de un centro bien definido” [1]. CT pertenece al fenómeno de la naturaleza más poderoso, con gran energía y fuerza de destrucción. En el Atlántico, cuando la velocidad de vientos en un ciclón tropical supera 33 m/s, estos se identifican como Huracanes.

Los ciclones tropicales se forman, en la mayoría de los casos, entre 10° y 20° de latitud sobre sectores tropicales de los mares y océanos. En el océano Atlántico Norte y en el Mar Caribe estos se desarrollan en las áreas de baja presión y ondas del este sobre la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Con la presencia de condiciones específicas al principio se forma Depresión Tropical (DT), la cual posteriormente puede desarrollarse en Tormenta Tropical (TT) y Huracán [2]. La categoría a que pertenece un ciclón tropical se evalúa por escala de Saffir-Simpson (Tabla 1).

El periodo del año, oficialmente establecido como temporada de huracanes para el océano Atlántico, es desde el 1 de junio hasta el 30 de noviembre (1 de mayo-30 de noviembre para el océano Pacífico Oeste). Pero se encuentran años cuando este fenómeno en el océano Atlántico se observa durante los meses de abril, mayo o diciembre (Tabla 2). El análisis de la información climatológica sobre formación, desarrollo y trayectorias de ciclones tropicales para el océano Atlántico para el periodo

TABLA 1
 ESCALA DE SAFFIR-SIMPSON PARA LOS HURACANES [1,4]

	Velocidad de viento				Presión	Daños potenciales
	m/s	nudos	km/h	mph	hPa	
DT	< 17	< 33	< 62	< 38	>980	Lluvias que pueden llegar a causar graves daños e incluso inundaciones.
TT	18-32	34-63	63-117	39-73	>980	Lluvias abundantes que pueden provocar inundaciones devastadoras. Vientos fuertes que pueden generar tornados.
H1	33-42	64-82	118-153	74-95	980	Sin daños en las estructuras de los edificios. Daños básicamente en casas flotantes no amarradas, arbustos y árboles. Inundaciones en zonas costeras y daños de poco alcance en puertos.
H2	43-49	83-95	154-177	96-110	965-979	Daños en tejados, puertas y ventanas. Importantes daños en la vegetación, casas móviles, etc. Inundaciones en puertos así como ruptura de pequeños amarres.
H3	50-58	96-113	178-209	111-130	945-964	Daños estructurales en edificios pequeños. Destrucción de casas móviles. Las inundaciones destruyen edificaciones pequeñas en zonas costeras y objetos a la deriva pueden causar daños mayores en edificios. Posibilidad de inundaciones tierra adentro.
H4	59-69	114-135	210-249	131-155	920-944	Daños generalizados en estructuras protectoras, desplome de tejados en edificios pequeños. Alta erosión de bancales y playas. Inundaciones en terrenos interiores.
H5	≥ 70	≥ 136	≥ 250	≥ 156	<920	Destrucción completa de tejados en algunos edificios. Las inundaciones pueden llegar a las plantas bajas de los edificios cercanos a la costa. Puede ser requerida la evacuación masiva de áreas residenciales.

1970-2009[3] mostró, que durante la temporada se forman, en promedio, 11 ciclones tropicales y existe la posibilidad de un 75%, que un CT de una u otra manera afecte el mar Caribe. Es importante mencionar, que hasta el año 1994, la cantidad de ciclones formados durante la temporada variaba entre 4 (1983) y 13 (1971, 1984); desde el año 1995 cada año (excepto los años 1997 y 2006) formaron 12 o más ciclones tropicales; el año 2005 rompió el récord de ocurrencia con los 28 CT (Tabla 3).

TABLA 2

EVENTOS FUERA DEL PERÍODO OFICIALMENTE ESTABLECIDO PARA LOS CICLONES TROPICALES

Año	Día/Mes	Nombre
2009	28 de mayo – 29 de mayo	DT UNO
2007	6 de mayo – 29 de mayo	TS ANDREA
	10 de diciembre – 16 de diciembre	TT OLGA
2005	30 de diciembre 2005 – 7 de enero 2006	TT ZETA
2003	18 de abril – 27 de abril	TT ANA
	4 de diciembre – 9 de diciembre	TT ODETTE
	7 de diciembre – 11 de diciembre	TT PETER
1997	31 de mayo – 2 de junio	TS
1992	21 de abril – 24 de abril	TS
1984	12 de diciembre – 24 de diciembre	Huracán LILI
1981	6 de mayo – 9 de mayo	TT ARLENE
1978	18 de enero – 23 de enero	TS
1976	21 de mayo – 25 de mayo	TS
1975	9 de diciembre – 13 de diciembre	TS
1972	23 de mayo – 29 de mayo	TS ALPHA
1970	17 de mayo – 27 de mayo	Huracán ALMA

TABLA 3

FORMACIÓN DE LOS CICLONES TROPICALES DEL ATLÁNTICO NORTE (A) Y EL CARIBE (C), EN PARTICULAR, DURANTE EL PERÍODO LOS AÑOS 1970-2009

Año	Junio		Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Total año	
	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A
2009*	0	0	0	0	1	4	1	3	0	2	1	1	3	11
2008	0	1	1	3	1	3	0	4	1	4	1	1	4	16
2007*	0	1	0	1	2	3	0	7	1	1	0	0	3	15
2006	1	1	0	2	0	3	1	4	0	0	0	0	2	10
2005*	1	2	3	5	0	5	0	5	4	7	1	3	9	28
2004	0	0	0	1	3	7	1	4	0	2	0	1	4	15
2003*	0	1	1	2	0	3	0	5	1	2	0	0	3	16
2002	0	0	0	1	0	3	2	8	0	0	0	0	3	12
2001	0	1	0	0	1	3	0	4	3	4	0	3	4	15
2000	0	0	0	0	0	4	2	7	0	4	0	0	2	15
1999	0	1	0	0	0	4	0	3	2	2	1	2	3	12
1998	0	0	0	1	0	4	0	6	1	2	0	1	1	14
1997*	0	1	0	3	0	0	0	1	0	2	0	0	0	8

1996	0	1	0	2	0	4	0	2	1	3	1	1	2	13
1995	0	1	0	4	0	7	0	3	0	3	0	1	0	19
1994	0	1	0	0	0	2	0	2	0	0	0	2	0	7
1993	0	1	0	0	0	3	0	4	0	0	0	0	0	8
1992*	0	0	0	0	0	1	0	4	0	1	0	0	0	7
1991	0	1	0	0	0	1	0	3	0	3	0	0	0	8
1990	0	0	0	3	1	5	0	2	0	4	0	0	0	14
1989	0	1	0	3	0	3	1	2	0	1	1	1	2	11
1988	0	0	0	0	1	4	1	6	1	1	1	1	4	12
1987	0	0	0	0	0	3	1	3	1	1	0	0	2	7
1986	0	2	0	0	0	1	1	2	0	0	0	1	1	6
1985	0	0	0	2	2	3	0	3	1	2	0	1	4	11
1984*	0	0	0	0	0	4	0	6	0	1	1	1	1	13
1983	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	4
1982	0	2	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	6
1981*	0	1	0	0	1	3	1	4	0	1	1	2	4	12
1980	0	0	1	1	0	2	1	5	0	1	1	2	3	11
1979	1	1	1	2	2	3	0	2	0	1	0	0	4	9
1978*	0	0	0	1	1	4	1	3	0	3	0	0	2	12
1977	0	0	0	0	0	1	0	3	1	2	0	0	1	6
1976*	0	0	0	1	0	5	0	2	0	1	0	0	0	10
1975*	0	1	0	1	1	2	1	3	0	1	0	0	2	9
1974	0	1	0	1	1	4	2	4	0	1	0	0	3	11
1973	0	0	0	2	1	2	0	2	1	2	0	0	2	8
1972*	1	1	0	0	0	2	0	2	0	0	0	1	1	7
1971	0	0	0	1	1	4	2	6	0	1	1	1	4	13
1970*	0	0	2	2	1	2	1	3	0	2	0	0	4	10
Promedio	0,1	0,6	0,2	1,1	0,5	3,1	0,5	3,7	0,5	1,7	0,3	0,7	2	11

* años con ocurrencia de los CT fuera de periodo de temporada

El “primer puesto” entre los meses de temporada lo ocupa el mes de septiembre: durante este mes en diferencia con otros, cada año se forman como mínimo uno y hasta ocho (año 2002) CT, con un promedio de 3,7. Luego sigue el mes de agosto: con un promedio de 3,1. En los últimos 40 años solo durante el mes de agosto del año 1997 no se formó ningún CT en el océano Atlántico Norte. Después siguen los meses de octubre y julio con 1,7 y 1,1 ciclones en promedio por mes, respectivamente. La probabilidad de formación o paso de un CT en el mar Caribe durante los meses de junio a noviembre se refleja en la Tabla 4.

TABLA 4
PROBABILIDAD DE FORMACIÓN O PASO DE UN CICLÓN TROPICAL EN EL MAR CARIBE

	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
Probabilidad %	7,5	15,0	40,0	40,0	32,5	28,5

1. TEMPORADA DEL AÑO 2009

En total, en el Atlántico Norte durante los meses de mayo a noviembre del año 2009 se formaron once ciclones tropicales lo que permite concluir, que este año se encuentra en el rango climatológico por la ocurrencia del fenómeno (Tabla 5). Sin embargo, desde el punto de vista de los límites temporales, el año 2009 pertenece a los años exclusivos, debido a que la temporada de huracanes comenzó en el mes de mayo. Las coordenadas de trayectoria, velocidad del viento máximo y presión atmosférica mínima en el ciclón para las horas de salida de los avisos públicos del Centro Nacional de Huracanes (CNH) [4], se presentan en el Anexo.

TABLA 5
CICLONES TROPICALES DEL AÑO 2009 Y VALORES EXTREMOS DE LOS PARÁMETROS
METEOROLÓGICOS

Nombre	Fecha	Vientos máximos sostenidos (nudos)	Presión mínima (mb)	Categoría de huracán
DT UNO	28 de mayo – 30 de mayo	30	1006	-----
TT ANA	11 de agosto – 17 de agosto	35	1004	-----
Huracán BILL	15 de agosto – 24 de agosto	120	943	H4
TT CLAUDETTE	16 de agosto – 17 de agosto	45	1006	-----
TT DANNY	26 de agosto – 29 de agosto	45	1006	-----
TT ERIKA	1 de septiembre – 4 de septiembre	50	1004	-----
Huracán FRED	7 de septiembre – 12 de septiembre	105	960	H3
DT OCHO	25 de septiembre – 26 de septiembre	30	1008	-----
TT GRACE	5 de octubre – 6 de octubre	60	986	-----
TT HENRI	6 de octubre – 8 de octubre	45	1005	-----
Huracán IDA	4 de noviembre – 10 de noviembre	90	976	H2

• Depresión Tropical UNO

La Depresión Tropical UNO fue definida como ciclón tropical por el lugar de su origen. De un sistema de nubosidad, que estaba ubicado sobre las Islas Bahamas durante casi una semana del mes de mayo y coadyuvada con la llegada de un frente frío por la costa sureste de Estados Unidos, se formó un ciclón, moviéndose en la dirección

nor - noroeste y después haciendo un giro al norte - noreste, para el día 28 de mayo, cuando estaba en 150 millas este - noreste del Cabo Hatteras, este sistema se convirtió en la primera Depresión Tropical de la temporada (Figura 1). Durante las próximas 24 horas, la depresión se movió sobre las aguas de Corriente de Golfo hasta que se acopló con un frente cálido que se extendía hacia el sureste desde un área más amplia de baja presión sobre el este de Canadá el día 30 de mayo. La velocidad máxima del viento de 30 nudos fue registrada durante el periodo 21:00 UTC del día 28 hasta 15:00 UTC del 29 de mayo.

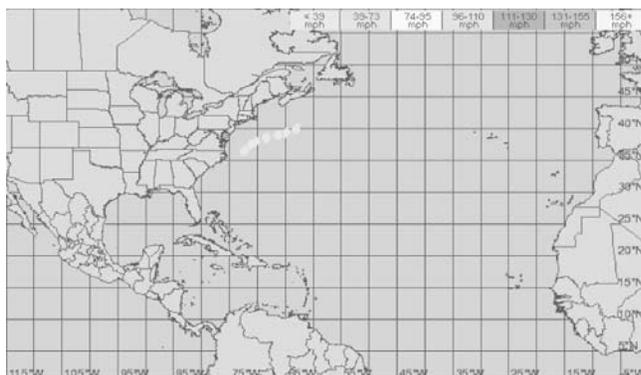


Figura 1. Trayectoria de la Depresión Tropical UNO, 28-29 de mayo 2009 [6]

El año 2009 también es diferente de los demás años de la década, debido a que, durante los meses de junio y julio no se presentó el desarrollo de ningún ciclón tropical desde el año 2000. El mes de agosto se marcó con los cuatro CT: tres TT y un huracán de categoría 4, el cual fue el sistema con mayor prevalencia de todos los ciclones de la temporada (la trayectoria y el período de existencia más largos) (Figura 2).



Figura 2. Trayectorias de los ciclones tropicales del mes de agosto, 2009 [6]

- Tormenta Tropical ANA

El día 11 de agosto en la imagen satelital fue identificada una depresión tropical (DT) que se formó de una onda tropical sobre la ZCIT en sector este del océano Atlántico (Figura 3). Esta depresión recibió el nombre DT DOS, su centro fue localizado con las coordenadas: latitud 14.4° N, longitud 26.6° W o alrededor de 280 millas (455 km) suroeste de las islas del Cabo Verde. Los vientos máximos sostenidos alcanzaron 25 nudos, la presión mínima en el centro fue identificada como 1006 mb, la depresión se movía en la dirección oeste con una velocidad de 13-15 mph. Durante los próximos dos días sus características (velocidad del viento, presión, dirección de movimiento) se quedaron sin cambios significativos y al final del día 13 de agosto la depresión pasó al estado “baja remante”. Como baja presión, este sistema continuaba su movimiento al oeste, pero el día 15 de agosto a las 04:30 UTC, cuando estaba a 1.075 millas al este de Antillas Menores, el CNH remitió nuevo aviso sobre su regeneración. A las 09:00 UTC del mismo día, se convirtió en tormenta tropical con el nombre ANA. El 16 de agosto ANA cruzó las Antillas Menores, pasando por Dominica, Islas Vírgenes Británicas, Islas Vírgenes de Estados Unidos y Puerto Rico. Pero ANA no pudo desarrollarse más y llegar al nivel de un huracán, se disipó el día 17 de agosto a los 230 km al este-sureste de Santo Domingo en República Dominicana.

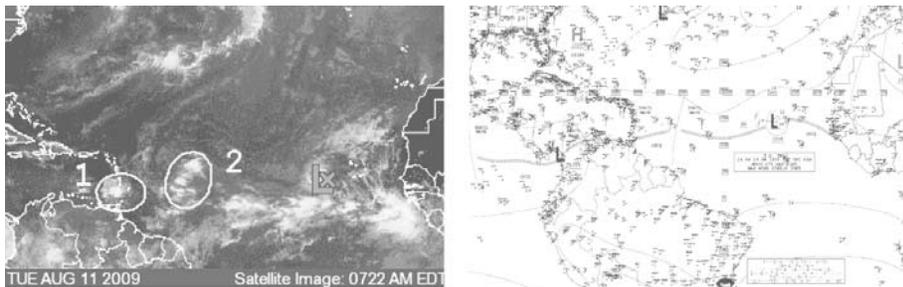


Figura 3. Imagen satelital (graphical Tropical Outlook, NHC), 12:22 UTC y mapa con el análisis sinóptico del 11 de agosto, 12:00 UTC, Centro de Predicción Tropical, FL. [4]

- Huracán BILL

El huracán BILL se formó como la DT sobre el Atlántico Este. El día 15 de agosto a las 15:00 UTC el CNH publicó el primer aviso sobre este fenómeno. Moviéndose al oeste, la DT se fortaleció rápidamente y para las 21:00 UTC del mismo día pasó a ser la TT con la presión mínima en el centro 1004 mb y velocidad del viento 35 nudos. Durante el día 16 de agosto TT BILL cambió un poco la dirección de su movimiento al norte - noroeste. Para las 09:00 UTC del día 17 de agosto BILL se convirtió en

el primer huracán del año 2009. A su máximo nivel de desarrollo, como huracán de categoría 4, BILL llegó el día 19 de agosto cuando estaba a 740 km este de Antillas Menores. Permaneciendo a esta categoría durante las próximas 24 horas, el huracán acercó a las islas hasta 500 km, la velocidad del viento permaneció constante y alcanzaba 120 nudos, radio con vientos de fuerza de tormenta expandieron hasta 400 km del centro del huracán. Olas de *swell*, generadas por el huracán y peligrosas por su acción llegaron a las Antillas Menores y Bahamas. Desde las 09:00 UTC del 20 de agosto BILL empezó a debilitarse. De todas las islas, como huracán de categoría 2, BILL pasó más cerca, a 320 km, de Bermudas el día 21 de agosto, afectando la isla por vientos, precipitaciones fuertes y marea de tormenta, la cual aumentó el nivel del mar a lo largo de la costa más que a 0.90 m por encima del nivel medio.

Durante los próximos dos días, el huracán BILL continuó su movimiento en la dirección noreste, aumentando velocidad de movimiento hasta 40-60 km/h pero bajando su categoría como huracán. El día 23 de agosto pasando por las latitudes 37-38 del Norte, BILL hizo giro al noreste. Permaneciendo a categoría 1, BILL pasó cerca, a 95 km, de la costa este de Nueva Scotia (Canadá) y a 190 km noroeste de cabo Race de Newfoundland. Radio con vientos de fuerza de huracán alcanzaban 100 km, de tormenta tropical - 510 km. Para las 09:00 UTC del 24 de agosto BILL pasó a la categoría de tormenta extratropical y más tarde se acopló con el sistema frontal de las latitudes altas. Coordenadas de trayectoria y parámetros meteorológicos del huracán BILL para las horas de avisos están presentadas en la Tabla del Anexo.

• Tormenta Tropical CLAUDETTE

TT CLAUDETTE se formó como DT CUATRO en la periferia de onda tropical del este el día 16 de agosto a 140 km oeste - suroeste de Tampa, Fl. sobre aguas calientes del Golfo de México (Figura 4). La depresión se movió en dirección norte - noreste con velocidad 26 km/h, acompañada por lluvias fuertes y produciendo surgencia de aguas en la costa de Florida hasta 1.00 m sobre nivel medio del mar. Para 18:00 UTC del mismo día, cuando el centro del ciclón se ubicaba en 65 km al sur de Apalachicola, Fl. la velocidad del viento aumentó hasta 43 nudos, DT se convirtió en TT y recibió nombre CLAUDETTE. A las 03:00 UTC el 17 de agosto CLAUDETTE tocó la tierra en 40 km oeste de Panamá City, Fl. Avanzando sobre noroeste de Florida y sur de Alabama, perdió su fuerza y se disipó.

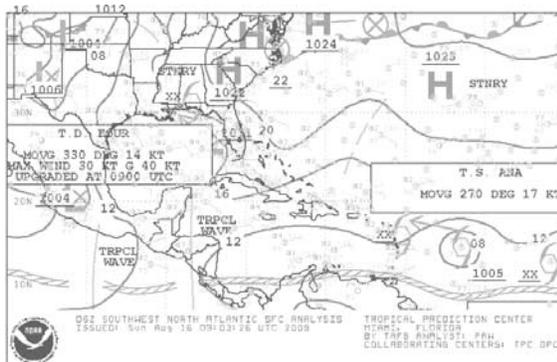


Figura 4. Análisis sinóptico de 16 de agosto, 06:00 UTC, Centro de predicción tropical, Fl. [4]

- Tormenta Tropical DANNY

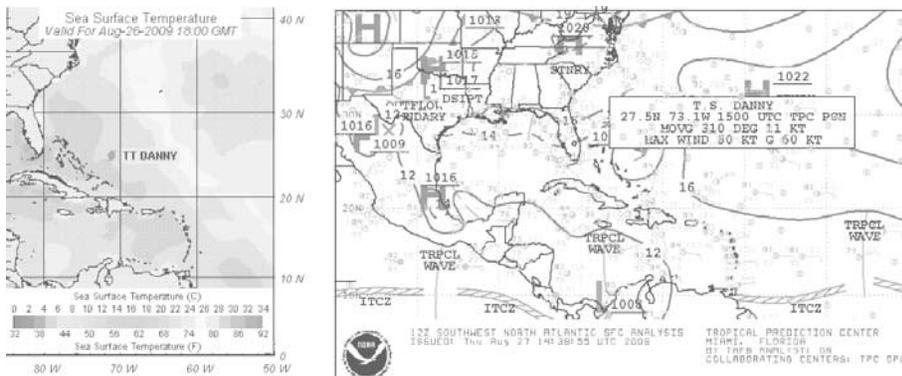


Figura 5. Campo de temperatura superficial de agua para el día 26 de agosto, PACS-SONET Oceanweather [5] y análisis sinóptico de 17 de agosto, 12:00 UTC, Centro de Predicción Tropical, Fl. [4]

TT DANNY se desarrolló sobre Atlántico oeste - central, a 715 km este de Nassau, Islas Bahamas, el día 26 de agosto. En la noche de 27 de agosto DANNY pasó en 480 km este Bahamas, vientos máximos sostenidos registrados en la tormenta alcanzaron 55 nudos en el radio hasta 330 km y por esta razón no afectaron las islas en forma directa. En la madrugada del día 29 de agosto DANNY, como ciclón extratropical, se acopló con el sistema de ciclones frontales de latitudes medias a 130 km sureste del Cabo Hatteras.

- Tormenta Tropical ERIKA

La primera tormenta tropical del mes de septiembre por la trayectoria, sus caracterís-

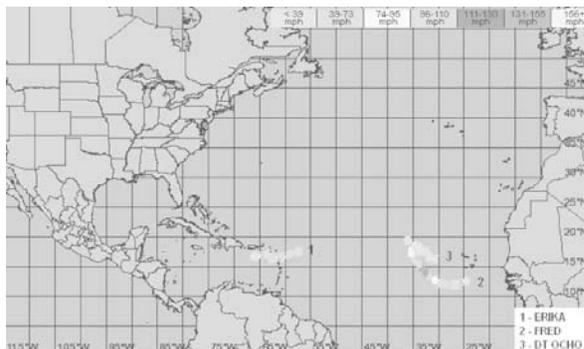


Figura 6. Trayectorias de los ciclones tropicales del mes de septiembre, 2009 [6]

ticas y comportamiento fueron muy parecidas a TT ANA (Figura 6, Tabla en Anexo). El día 1 de septiembre en las imágenes satelitales sobre ZCIT, aproximadamente 625 km al noreste de Antillas Menores, estaba visualizado un sistema de nubosidad convectiva, bien organizada con alta posibilidad de desarrollo (Figura 7). De este sistema se formó un ciclón el cual durante el mismo día se convirtió en una tormenta tropical. ERIKA se movía en dirección oeste y en la noche del 2 de septiembre cruzó las islas en el sector (Dominica, Islas Vírgenes Británicas, Islas Vírgenes de Estados Unidos), muy cerca de Guadalupe (110 km) y a los 160-200 km al sur de islas St. Croix. Durante el día siguiente bajo su actividad, pasó ser la DT y para 03:00 UTC de 4 de septiembre se disipó. En el momento de paso por las islas y el sector noreste del Caribe, los vientos máximos registrados estaban en el rango de 35-45 nudos y se extendieron hasta 370 km desde el centro del ciclón. Las islas, en general, fueron afectadas por las lluvias moderadas.

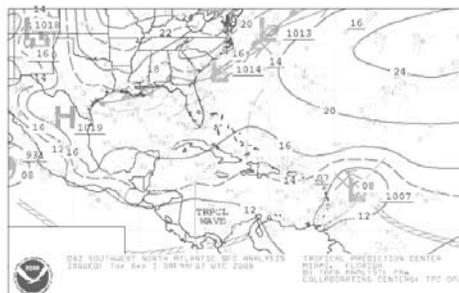


Figura 7. Imagen satelital del 1 de septiembre, 12:22 UTC y análisis sinóptico de 1 de septiembre, 06:00 UTC, Centro de Predicción Tropical, FL [4]



Figura 8. Imagen satelital del 7 de septiembre, 12:22 UTC [4]

- Huracán FRED

El segundo huracán de la temporada, se formó como a 250 km al sur - suroeste de las Islas del Cabo Verde el día 7 de septiembre (Figura 8); la trayectoria de FRED pasó por las aguas del océano Atlántico Central. A su máximo nivel de desarrollo (huracán de categoría 3 por la escala de Saffir-Simpson) FRED llegó el día 9 de septiembre. En el aviso a las 15:00 UTC, el CNH reportó sobre vientos máximos sostenidos, determinados por las imágenes satelitales, de 105 nudos con ráfagas más fuertes y presión en el centro del ciclón 958 mb, vientos de fuerza de TT se extendieron en radio 185 km. FRED se movió en dirección nor-noroeste con velocidad en promedio de 10 km/h bajando la velocidad de su movimiento y para el día 12 de septiembre estaba casi estacionario. Durante este día la velocidad del viento bajó hasta 35-30 nudos. Fred rápidamente perdió su fuerza, pasó a estado DT y “se llenó”.

- Depresión Tropical OCHO

Desde el día 23 de septiembre por las imágenes satelitales fue identificado un área de baja presión con la circulación ciclónica bien definida entre la costa occidental de África y las Islas del Cabo Verde. Los buques y estaciones de superficie también reportaron sobre lluvias fuertes con tormentas eléctricas en este sector. Durante los próximos días este sistema se movió en la dirección oeste-noroeste, presentando actividades eléctricas y convección bien organizada, con la velocidad del viento hasta 30 nudos, que provocó clasificar este ciclón como DT. A las 21:00 UTC del 25 de septiembre el centro de DT OCHO se ubicaba cerca de la latitud 16.4°N, longitud 31.6°W, o a 815 km oeste de las Islas de Cabo Verde (Figura 6). Se esperaba que durante la misma noche DT se fortaleciera y se convirtiera a una tormenta tropical. Pero el día

siguiente no ocurrieron cambios significativos en su desarrollo, al final del día 26 de septiembre DT OCHO se disipó.

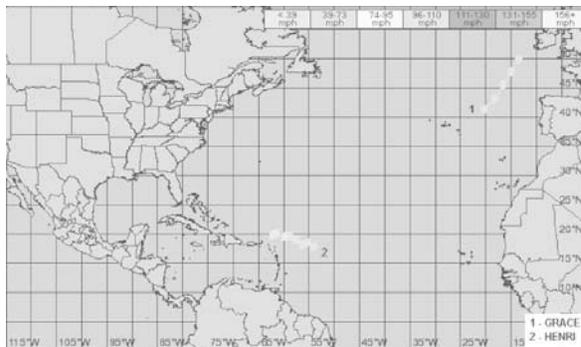


Figura 9. Trayectorias de los ciclones tropicales del mes de octubre, 2009 [6]

- Tormenta Tropical GRACE

GRACE fue una rara tormenta tropical en el océano Atlántico Noreste que se formó como un sistema de baja presión sobre el frente frío de un ciclón extratropical el día 27 de septiembre cerca de las coordenadas 45°N, 43°W. Moviéndose en la dirección sureste, el día 1 de octubre GRACE bajó hasta la latitud de 36°N, luego durante los siguientes cuatro días hizo una vuelta al norte, hasta 43°N y regresó al 38°N. El día 4 de octubre pasó por las Islas Azores, se fortaleció y en la madrugada del 5 de octubre, cuando estaba a 645 km noreste de Islas Azores, se convirtió en una tormenta tropical con velocidad del viento de 55-60 nudos. GRACE se trasladó al noreste, hacia las Islas Británicas (Figura 10) y, teniendo en cuenta, que no fue grande, por características dimensionales, y estaba en latitudes relativamente altas, en el mismo día en la noche fue absorbida por el sistema frontal de baja presión no-tropical a los 335 km suroeste de Cork, Irlanda.



Figura 10. Imagen satelital del día 5 de octubre, 14:00 UTC [4]

- Tormenta Tropical HENRI

HENRI se formó como un sistema de baja presión el día 4 de octubre desde una onda del este sobre la ZCIT (Figura 11). Este sistema se movía en la dirección noreste y para las 09:00 UTC del 6 de octubre se encontraba a unas 675 millas al este de las Antillas Menores. Por nubosidad conectiva bien desarrollada y organizada, y la velocidad del viento definida como 30 nudos, fue considerada como una depresión tropical. En el período entre 12:00 UTC del 6 de octubre y 00:00 UTC del 8 de octubre, la depresión pasó al nivel de tormenta tropical con velocidad del viento 35-45 nudos. El día 8 de octubre HENRI empezó a perder su fuerza, para las 03:00 UTC regresó al estado de depresión tropical y doce horas más tarde se redujo a una baja. HENRI pasó a 130 - 160 millas norte - noreste de las Antillas Menores sin afectar las islas.

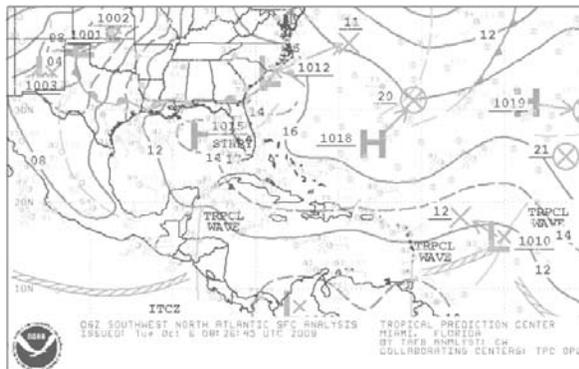


Figura 11. Mapa del análisis sinóptico del 6 de octubre, 06:00 UTC, Centro de Predicción Tropical, FL [4]

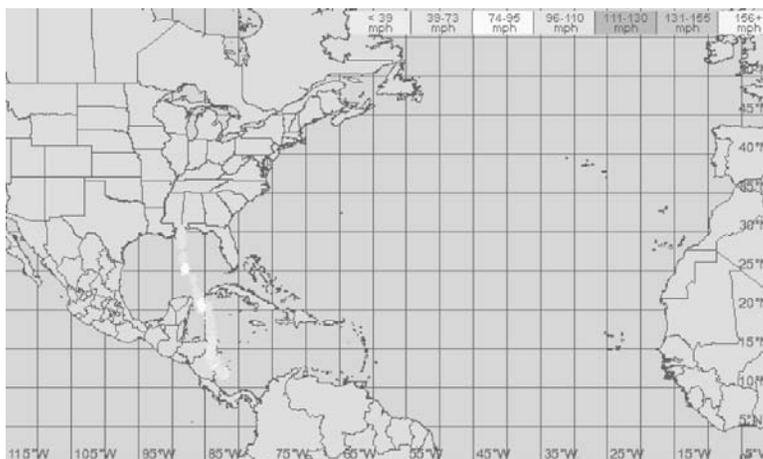


Figura 12. Trayectoria del Huracán IDA, noviembre 2009 [6]

- Huracán IDA

El último ciclón tropical del año 2009 se formó en el mes de noviembre sobre el sector noroeste del mar Caribe, “cumpliendo” las reglas de la climatología.

Durante finales de octubre y primeros días de noviembre, ZCIT se ubicaba cerca a 10°N - 12°N sobre el Pacífico Este, igual como en el Atlántico y mar Caribe que favoreció al desarrollo de la circulación ciclónica sobre la América Central con entrada del aire relativamente frío por la troposfera media (5-6 km) (Figura 13).

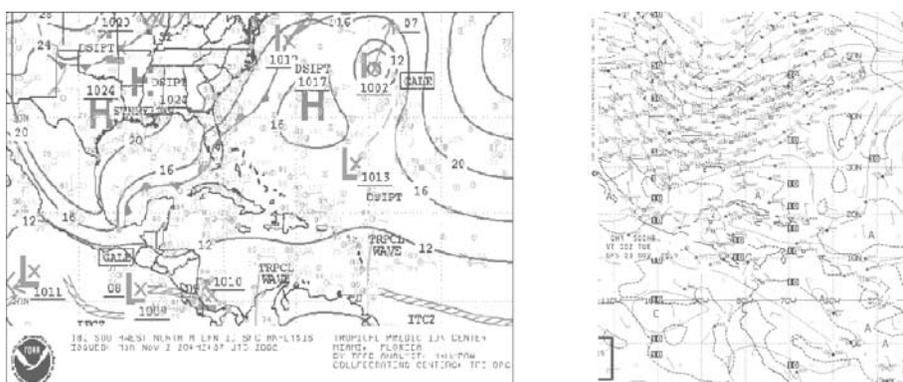


Figura 13. Mapa de análisis sinóptico del 2 de noviembre, 18:00 UTC, Centro de Predicción Tropical, Fl. Y el mapa aerológico de la superficie 500 mb, 3 de noviembre 00:00 UTC [4]

Para el día 4 de noviembre esta zona fue identificada con posibilidad alta (más de 50%) de formación de un ciclón tropical (Figura 14) y en las horas de la mañana CNH remitió el primer aviso sobre DT ONCE. A las 15:00 UTC, el centro de DT se ubicaba cerca a las coordenadas 11.6°N, 82.0°W o a 105 km sur-suroeste de San Andrés y Providencia; velocidad del viento máximo sostenido alcanzaba 30 nudos, depresión se movió en la dirección noroeste. En la tarde del mismo día (21:00 UTC) DT pasó a siguiente nivel de desarrollo de un ciclón tropical, Tormenta Tropical con el nombre IDA. La velocidad del viento aumentó hasta 55 nudos y fue extendido en un radio de 45 millas (75 km) del centro del ciclón. TT IDA pasó a 90 km suroeste de San Andrés, afectando la isla por las lluvias moderadas durante los días 4-5 de noviembre.

A las 12:00 UTC, el día 5 de noviembre, cuando IDA fue localizada en 65 millas (100 km aproximadamente) nor-noreste de Bluefields (Nicaragua), la velocidad del viento aumentó hasta 65 nudos y la tormenta se convirtió en un huracán de la categoría 1 por la escala de Saffir-Simpson (Anexo). En la tarde del 5 de noviembre el huracán



Figura 14. Imagen satelital del 4 de noviembre, 11:56 UT [4]

IDA tocó la tierra entre Bluefields y Puerto Cabezas (Nicaragua) y desde este momento empezó a perder su fuerza, regresó al estado de TT y a las 06:00 UTC del día 6 de noviembre a DT. Avanzando por la tierra en dirección norte, en las horas de la madrugada el día 7 de noviembre IDA regresó a las aguas del Caribe noroccidental. El día 8 de noviembre, pasando a 100 millas al este de Cozumel (México) y a 110 millas suroeste de la punta oeste de Cuba, IDA otra vez volvió a ser el huracán de la categoría 1 y más tarde aumentó su categoría como huracán 2. Vientos máximos registrados alcanzaron 90 nudos en un radio de 35 millas y vientos de fuerza de tormenta tropical extendieron en un radio de 175 millas del centro del ciclón. La península Yucatán y la costa oeste de Cuba fueron afectadas por las lluvias y olas de *swell*, que llevó al aumento del nivel del mar en más de 1 m sobre el nivel medio del mar a lo largo de la costa.

Desde las 15:00 UTC del 9 de noviembre IDA pasó a ser una Tormenta Tropical. A la costa de Estados Unidos, cerca de Mobile, Alabama, IDA llegó como DT con velocidad del viento de 30 nudos y lluvias moderadas. Posteriormente, el día 10 de noviembre a las 15:00 UTC, se convirtió en un sistema de baja presión no-tropical.

2. CONCLUSIONES

En la actualidad, la aparición, dinámica y parámetros meteorológicos (velocidad y dirección de viento, desarrollo de las nubes convectivas) de los ciclones tropicales se encuentran bajo las observaciones satelitales. Las trayectorias de las tormentas tropicales, tales como DANNY en agosto, el huracán FRED y la depresión tropical OCHO en el mes de diciembre, las tormentas tropicales GRACE y HENRI en octubre pasaron completamente sobre el agua del océano, sin tocar las costas de los continentes. La

depresión tropical UNO en el mes de mayo excepcionalmente pasó entre 35 y 40°N, lo que sin observaciones remotas, se podría, por su trayectoria, considerar como un ciclón de latitudes medias. Sin embargo, al conocer remotamente su origen (noreste de Bermudas), fue posible identificarlo como un ciclón tropical.

Hay que tener en cuenta que todos los ciclones mencionados fueron detectados gracias a las observaciones satelitales. Es posible, que en el pasado, durante los 150 años de reportes sobre los ciclones tropicales en el Atlántico, la cantidad real de las tormentas era mayor de lo observado y, por lo tanto, la climatología de huracanes subestima su actividad.

REFERENCIAS

- [1] Organización Meteorológica Mundial, documento técnico. Programa de ciclones tropicales. Asociación Regional IV (América del Norte, América Central y el Caribe). Plan Operativo sobre Huracanes. Ginebra, Suiza. Edición de 2005, 98 p.
- [2] Matveev, L. T. *Fundamentos de meteorología general. Física de la atmósfera*. L., Gidrometeoizdat, 1984, 782 p.
- [3] *Atlantic Tropical Storm Tracking by Year from Tropical Prediction Center*. <http://weather.unisys.com/hurricane/atlantic/>
- [4] NOAA, National Weather Service, National Hurricane Center. <http://www.nhc.noaa.gov/>
- [5] Pan American Climate Studies Sounding Network (PACS-SONET). <http://www.nssl.noaa.gov/projects/pacs/web>
- [6] Weather underground-Tropical Weather. <http://www.wunderground.com/tropical>

ANEXO

Nombre	Fecha/ Hora (UTC)		Latitud (°N)	Longitud (°W)	Vel. viento (nudos)	Presión (mb)	Categoría	
DT UNO	28.05	09:00	36.1	72.9	25	1007	DT	
		15:00	37.3	71.0	25	1007	DT	
		21:00	37.7	69.4	30	1006	DT	
	29.05	03:00	38.1	67.8	30	1006	DT	
		09:00	38.6	66.3	30	1006	DT	
		15:00	39.6	64.0	30	1006	DT	
	30.05	21:00	40.3	62.3	25	1006	DT	
		03:00	40.6	61.0	25	1007	CR	
09:00		41.0	58.6	25	1007	CR		
ANA	15.08	04:30	14.6	45.8	30	1005	DT	
		09:00	14.6	46.8	35	1005	TT	
		15:00	14.3	48.3	35	1005	TT	
		21:00	14.4	50.0	35	1005	TT	
	16.08	03:00	14.4	50.5	35	1004	TT	
		09:00	14.6	53.8	35	1005	TT	
		15:00	14.6	55.8	35	1005	TT	
		21:00	15.1	58.8	26	1008	DT	
	17.08	03:00	16.0	61.2	26	1008	DT	
		09:00	16.6	63.9	26	1008	DT	
		15:00	17.3	66.2	26	1008	DT	
		21:00	17.5	68.0	26	1011	DT	
	BILL	15.08	15:00	11.5	34.0	30	1006	DT
21:00			11.3	35.2	35	1004	TT	
16.08			03:00	11.3	36.6	35	1004	TT
16.08		09:00	11.4	37.2	40	1002	TT	
		15:00	12.1	28.4	52	997	TT	
		21:00	12.8	40.0	56	994	TT	
17.08		03:00	13.4	41.7	61	990	TT	
		09:00	13.8	44.0	65	987	H1	
		15:00	14.1	45.2	78	963	H1	
18.08		21:00	14.6	46.7	78	962	H2	
		03:00	15.0	48.3	87	967	H2	
		09:00	15.5	49.7	87	967	H2	

Nombre	Fecha/ Hora (UTC)		Latitud (°N)	Longitud (°W)	Vel. viento (nudos)	Presión (mb)	Categoría
		15:00	15.9	51.2	91	963	H2
		21:00	16.6	52.2	95	962	H2
	19.08	03:00	17.2	53.4	110	952	H3
		09:00	18.0	54.9	120	948	H4
		15:00	18.7	56.3	120	950	H4
		21:00	19.8	57.6	120	947	H4
	20.08	03:00	20.7	58.9	120	945	H4
		09:00	21.6	60.3	110	949	H3
		15:00	22.6	61.7	105	951	H3
		21:00	22.8	63.2	110	948	H3
	21.08	03:00	24.9	64.3	110	943	H3
		09:00	26.2	65.4	105	951	H3
		15:00	29.4	66.9	100	958	H3
		21:00	29.4	66.9	90	954	H2
	22.08	03:00	30.1	67.8	75	961	H1
		09:00	33.2	66.5	75	961	H1
		15:00	35.3	64.0	75	967	H1
		21:00	37.0	68.8	75	961	H1
	23.08	03:00	38.1	67.8	75	961	H1
		09:00	41.2	66.5	75	961	H1
		15:00	43.3	64.0	75	967	H1
		21:00	45.1	60.8	65	970	H1
	24.08	03:00	47.1	55.5	65	975	H1
		09:00	48.6	50.2	61	980	TT
CLAUDETTE	16.08	09:00	27.7	83.9	30	1011	DT
		15:00	28.7	84.6	30	1011	DT
		21:00	29.5	85.6	45	1008	TT
	17.08	03:00	30.2	86.1	45	1008	TT
		09:00	30.9	87.0	35	1006	DT
		12:00	31.3	87.2	30	1011	DT
DANNY	26.08	15:00	24.9	70.3	40	1009	TT
		21:00	25.2	71.2	40	1009	TT
	27.08	03:00	26.0	71.6	45	1006	TT
		09:00	27.4	72.1	55	1006	TT

Nombre	Fecha/ Hora (UTC)		Latitud (°N)	Longitud (°W)	Vel. viento (nudos)	Presión (mb)	Categoría
		15:00	27.5	73.1	55	1006	TT
		21:00	27.5	73.5	45	1008	TT
	28.08	03:00	28.4	73.5	35	1008	TT
		09:00	29.5	74.4	35	1008	TT
		15:00	30.1	75.5	35	1008	TT
		21:00	30.4	75.4	35	1007	TT
	29.08	03:00	31.4	74.9	35	1006	TT
		09:00	34.3	74.6	30	1007	DT
ERIKA	1.09	21:00	17.2	57.3	45	1007	TT
	2.09	03:00	17.5	57.6	50	1004	TT
		09:00	17.0	59.0	45	1005	TT
		15:00	16.5	60.4	35	1008	TT
		21:00	16.4	61.7	35	1007	TT
	3.09	03:00	16.1	62.4	35	1008	TT
		09:00	16.5	62.7	35	1008	TT
		15:00	16.9	63.5	35	1010	TT
		21:00	16.7	65.3	30	1007	DT
	4.09	03:00	16.8	65.6	26	1009	DT
FRED	7.09	21:00	12.5	24.5	30	1005	DT
	8.09	03:00	11.8	26.3	35	1004	TT
		09:00	11.8	27.3	45	1000	TT
		15:00	11.9	28.6	55	994	TT
		21:00	12.1	29.8	60	990	TT
	9.09	03:00	12.6	30.6	65	987	H1
		09:00	13.2	31.7	90	970	H2
		15:00	13.9	32.4	105	985	H3
		21:00	14.8	33.3	100	960	H3
	10.09	03:00	15.3	33.7	90	965	H2
		09:00	15.9	34.6	90	970	H2
		15:00	16.8	35.1	89	974	H2
		21:00	17.3	35.1	78	975	H1
	11.09	03:00	17.4	35.1	75	980	H1
		09:00	17.7	35.1	75	980	H1
		15:00	18.0	35.0	70	983	H1

Nombre	Fecha/ Hora (UTC)	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Vel. viento (nudos)	Presión (mb)	Categoría	
		21:00	18.1	34.6	61	987	TT
	12.09	03:00	18.0	33.6	52	998	TT
		09:00	17.8	33.6	40	1002	TT
		15:00	17.5	33.7	35	1002	TT
		21:00	17.7	33.7	30	1005	DT
DT OCHO	25.09	21:00	16.4	31.6	30	1008	DT
	26.09	03:00	17.4	38.3	30	1008	DT
		09:00	17.6	33.8	30	1008	DT
		15:00	18.0	34.8	30	1008	DT
		21:00	18.9	35.7	26	1008	DT
GRACE	5.10	03:00	41.2	20.3	56	990	TT
		09:00	43.0	18.0	60	989	TT
		15:00	45.4	16.4	56	990	TT
		21:00	47.7	14.8	52	990	TT
	6.10	03:00	49.7	13.4	43	986	TT
HENRI	6.10	09:00	16.1	50.5	30	1007	DT
		12:00	17.0	51.9	35	1007	TT
		18:00	17.6	53.4	35	1007	TT
		21:00	17.8	54.0	35	1007	TT
	7.10	03:00	18.4	55.3	40	1006	TT
		09:00	18.1	56.1	43	1005	TT
		15:00	18.9	57.4	40	1007	TT
		21:00	19.4	58.6	35	1008	TT
	8.10	03:00	19.5	59.7	30	1009	DT
		09:00	19.9	61.3	30	1009	DT
		15:00	19.8	62.0	30	1010	DT
IDA	4.11	15:00	11.6	82.0	30	1006	DT
		21:00	12.0	82.7	50	996	TT
	5.11	03:00	12.5	83.1	55	995	TT
		09:00	12.8	83.4	60	991	TT
		15:00	13.1	83.7	65	987	H1
		21:00	13.3	83.7	50	990	TT

Nombre	Fecha/ Hora (UTC)		Latitud (°N)	Longitud (°W)	Vel. viento (nudos)	Presión (mb)	Categoría
	6.11	03:00	13.8	84.1	30	1004	DT
		09:00	14.4	84.1	30	1005	DT
		15:00	15.0	84.0	30	1007	DT
		21:00	15.7	83.9	30	1007	DT
	7.11	03:00	16.2	84.0	30	1006	DT
		09:00	17.1	84.1	40	1002	TT
		15:00	17.9	84.1	50	997	TT
		21:00	18.9	84.3	60	990	TT
	8.11	03:00	20.1	84.6	60	990	TT
		09:00	20.5	85.6	80	984	H1
		15:00	21.2	86.0	80	983	H1
		21:00	22.2	86.3	90	976	H2
	9.11	03:00	23.7	86.7	90	979	H2
		09:00	25.1	87.9	80	988	H1
		15:00	26.5	88.3	60	996	TT
		21:00	28.4	88.5	60	991	TT
	10.11	03:00	29.3	88.6	60	997	TT
		09:00	29.9	88.5	45	999	TT
		15:00	30.6	87.6	30	1000	DT

ARTÍCULO

CARACTERIZACIÓN EN ÉPOCA SECA DE LAS VARIABLES OCEANOGRÁFICAS POR LA INCIDENCIA DEL CANAL DEL DIQUE EN LA BAHÍA DE CARTAGENA

Nelson Enrique Murillo Gómez*

nelmurillo20@hotmail.com

Stella Betancur Turizo**

sbetancur@enap.edu.co

Resumen: Se observaron 4 imágenes de satélite SPOT, donde se identificaron 4 comportamientos superficiales para época seca de la descarga fluvial del Canal del Dique y sirvió de soporte para seleccionar 4 transeptos representativos con 28 estaciones. Se programaron salidas de campo, recolectaron, procesaron y analizaron los datos para caracterizar la estructura de la pluma turbia del Canal del Dique sobre la Bahía de Cartagena, en extensión y profundidad. Las aguas turbias del Dique llegaron en superficie hasta 3000 m al interior de la bahía, impulsadas por la velocidad de descargue, esta distancia fue reducida cuando se alcanzó mayor profundidad. Esto produjo que las aguas turbias tendieran a depositarse en el sur-este de la bahía con ayuda del impulso de las corrientes que llegaban de Bocachica a 10 m de profundidad.

Palabras clave: Bahía de Cartagena, Pluma Turbia, Imágenes SPOT, Transeptos.

Abstract: The satellite images were used for the description of the structure of the plume of the Dique Channel in the Cartagena Bay. SPOT satellite images from the Dry season of four different years were examined; these images were used for identifying the near surface pattern. Four Hydrographic transepts with 28 stations were planned based on that information. These data were used for the determination of the area of dispersion and depth of the plume of the Dique Channel in the Cartagena Bay. The turbid waters of the Dique Channel dispersed 3000 meters inside the Bay driven by the velocity of discharge. This distance is reduced in the deeper areas. Turbid waters gathered in the South Eastern area of the Bay under the influence of the currents coming through the Bocachica Channel 10 m deep.

Key words: Cartagena Bay, Turbid Plume, SPOT Images, Transepts.

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

** Investigadora Grupo de Investigación en Oceanología, Jefe programa Oceanografía Física Facultad de Oceanografía Física, Escuela Naval "Almirante Padilla", Isla Manzanillo, Cartagena.

INTRODUCCIÓN

Desde 1952 la Bahía de Cartagena recibe un aporte importante de agua continental que altera sus condiciones oceanográficas, químicas, sedimentológicas y su línea de costa. Estos cambios deben ser monitoreados y analizados en el tiempo por la comunidad científica, que permita tomar acciones y recomendaciones para el desarrollo científico e industrial de la ciudad. En este sentido se han realizado estudios tales como, el de Buitrago [1], donde se analizaron las variaciones morfológicas en las costas de la Bahía de Cartagena, y el de Pagliardini [2], que estudió las características climáticas, marinas y continentales que inciden en los procesos marinos de la Bahía de Cartagena.

Más adelante, Andrade y Thomas [3] con ayuda de sensores remotos realizaron estudios como: un análisis de un mosaico fotográfico de imágenes obtenidas por el HRV-1 del satélite SPOT sobre la región de Cartagena el 27/03/86, con tratamiento especial para observar sedimentos en suspensión (turbidez). Con la densidad de la turbidez se pudo establecer la influencia y circulación de las aguas del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena, los sedimentos en suspensión e hidrodinámica al sureste del delta del río Magdalena, la turbidez, circulación y erosión de la región de Cartagena. En el año 1992, [6], analizaron los diferentes comportamientos de la masa de agua de la bahía a través de los sedimentos en suspensión originados por la pluma turbia del dique. Lonin y Mendoza [4], calcularon la transparencia del agua en la Bahía de Cartagena basados en el transporte de las partículas suspendidas provenientes del Canal del Dique.

En estudios más recientes [5], se analizaron los patrones de dispersión de la pluma turbia del canal en la Bahía de Cartagena, mediante el análisis de 69 imágenes SPOT recolectadas durante 17 años permitiendo detectar el comportamiento espacial de la pluma turbia en diferentes épocas del año. Igualmente los autores mencionados analizaron los cambios de profundidad ocurridos recientemente (último siglo) en los fondos de la Bahía de Cartagena mediante la comparación de levantamientos batimétricos efectuados en 1935, 1987 y 2004 encontrando que el delta del dique avanzó tres kilómetros y medio al interior de la bahía.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron como base las informaciones históricas obtenidas de los estudios ocea-

nográficos realizados por el CIOH y diferentes autores en la Bahía de Cartagena, se revisaron y analizaron diferentes caracterizaciones que facilitaron el desarrollo del proyecto que comprendieron las siguientes fases:

1. Se recopilaron 4 imágenes (Figuras 1, 2, 3 y 4) de satélite SPOT tomadas para la misma época en diferentes años y fueron correlacionadas con los patrones identificados en el Boletín No. 22 del CIOH, artículo “*Patrones de la pluma turbia del Canal del Dique en la bahía de Cartagena*” y que sirvieron de referencia para nuestra descripción:

Figura 1 (27 marzo-86). Pluma con tendencia única en dirección norte, gran magnitud de aporte de sedimentos y cubrimiento limitado de la parte lateral del este, extendiéndose hasta el sector más al norte de la bahía, la bahía interior; es decir, sectores noroeste y sureste. Se presume que este tipo de comportamiento es consecuencia de un evento previo de lluvias y de la ausencia de vientos [5].

Figura 2 (31 marzo-93). Pluma dividida en dos brazos, uno al norte, tendiendo a Tierrabomba y un segundo al oeste, dirigido al canal de Bocachica; gran cantidad de aportes de sedimentos, concentrados en los dos brazos y con cubrimiento extendido sobre la totalidad de la bahía incluyendo la bahía interior. Se presume que este tipo de comportamiento [5] es consecuencia de un evento previo de lluvias y presencia de vientos del noroeste.

Figura 3 (febrero-00). Pluma con tendencia única en dirección norte, poco aporte de sedimentos y cubrimiento limitado a la parte inferior, concentrándose en la desembocadura del canal; es decir, sector sureste. Se presume que este tipo de comportamiento es consecuencia de un viento previo de escasas lluvias y ausencia de vientos [5].

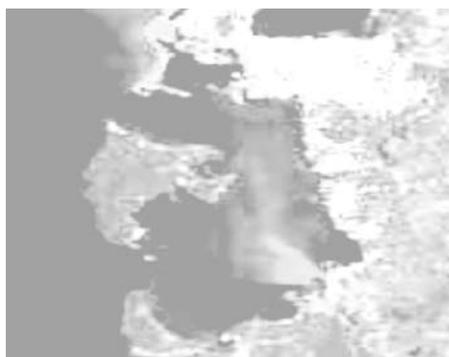


Figura 1. Pluma turbia, marzo 1986



Figura 2. Pluma turbia, marzo 1993



Figura 3. Pluma turbia, febrero 2000



Figura 4. Pluma turbia, febrero 2003

La Figura 4 (17 febrero-03). Pluma con tendencia única de dirección noroeste, dirigida a la parte sureste de la isla de Tierrabomba; aportes moderados de sedimentos, concentrados en la desembocadura del canal y con cubrimiento parcial, localizados en el sector suroeste de la bahía. Se presume que este tipo de comportamiento es consecuencia de un viento previo de pocas lluvias y presencia de vientos del noroeste [5].

2. BÚSQUEDA Y RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Después de observadas las imágenes de satélite en diferentes años para la misma época, se determinó el comportamiento en superficie de los sedimentos en suspensión, los cuales sirvieron de apoyo inicialmente para el diseño de una grilla de 28 estaciones abarcando los 4 transeptos representativos así: Dique a Bocagrande, Dique a sur de Tierrabomba, Dique a zona industrial de Mamonal y Dique a Bocachica.

Para la toma de muestras se efectuaron salidas de campo programadas a bordo de un bote donde se midieron desde la superficie hasta el fondo del cuerpo de agua la corriente, salinidad, temperatura y turbidez. Al finalizar se analizó la información entregada por el perfilador acústico doppler de corriente en toda la columna de agua de los sitios escogidos, teniendo en cuenta para la calibración del equipo, la variación magnética de la región geográfica de la bahía y así obtener un dato exacto en dirección y velocidad. La dirección se registró en tres dígitos y se aproximó al siguiente grado, siendo la velocidad expresada en cm/s.

Se utilizó el CTD con un sensor de turbidez, para medir los campos de temperatura, conductividad, turbidez y profundidad en la columna de agua. Este equipo fue descen-

dido hasta el fondo de cada estación con una línea de vida que lo aseguraba y un peso en la parte inferior para evitar ser llevado a otra posición por efecto de las corrientes profundas.

Se tomaron los datos de salinidad de la segunda salida de campo del mismo proyecto “Un modelo geodinámico de bahía tropical: La Bahía de Cartagena” realizado en la época seca de agosto del mismo año. Se efectuó comparación entre estaciones de las dos salidas de campo del transecto 1, sacando la diferencia de unidades de salinidad en los datos a igual profundidad. Obteniendo estas diferencias se pudo determinar la moda o diferencia más repetitiva en los datos con un valor de 9.5 PSU. Este valor de la moda fue tomado como el margen de error del equipo para los datos obtenidos del presente trabajo. Con esta comparación de estaciones se asumió que la época seca del mes de agosto fue igual a la de abril, es decir no hubo cambios estacionales del parámetro.

El disco SECCHI de 45 estándar, se utilizó para determinar la transparencia del agua, el cual estaba sujetado en la parte superior por una línea de vida y un peso adicional en la parte inferior y así evitar desviaciones de posición por influencia del viento y/o corriente. En este procedimiento se tuvo el cuidado al lanzar el disco hacia la banda del mismo lado de la posición del sol con el fin de observar la máxima transparencia.

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS

Los datos recolectados se trabajaron en GRAPHER y en SURFER (2D) para obtener los perfiles verticales y horizontales de las 28 estaciones representativas de la bahía, se realizó la interpolación gráfica de los parámetros de estudio y se representó en diagramas X-Y-Z. El resultado de las imágenes fue manejado en forma descriptiva y cuantitativa. Se consideraron los análisis de 04 imágenes SPOT para la misma época seca de años anteriores, que sirvieron de referencia para confrontar las diferentes calidades de agua y la turbidez por reflectividad del IR, en las aguas de la bahía.

4. RESULTADOS

En las figuras 5, 6, 7 y 8 se observaron los perfiles de Temperatura (T), Salinidad (S), Turbidez (Tb) de los 4 transectos representativos de la Bahía.

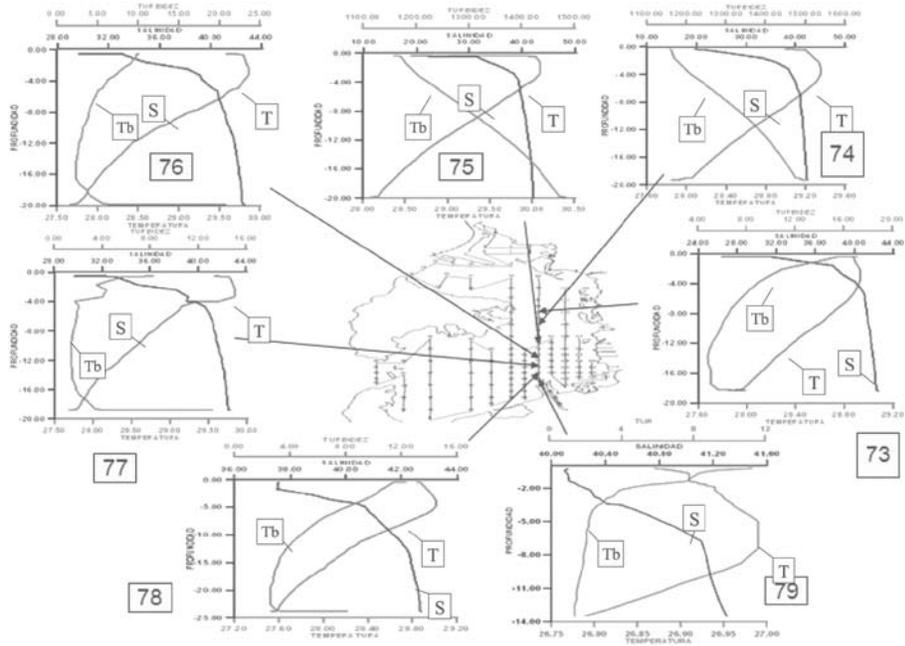


Figura 5. Perfiles de parámetros oceanográficos transecto 1

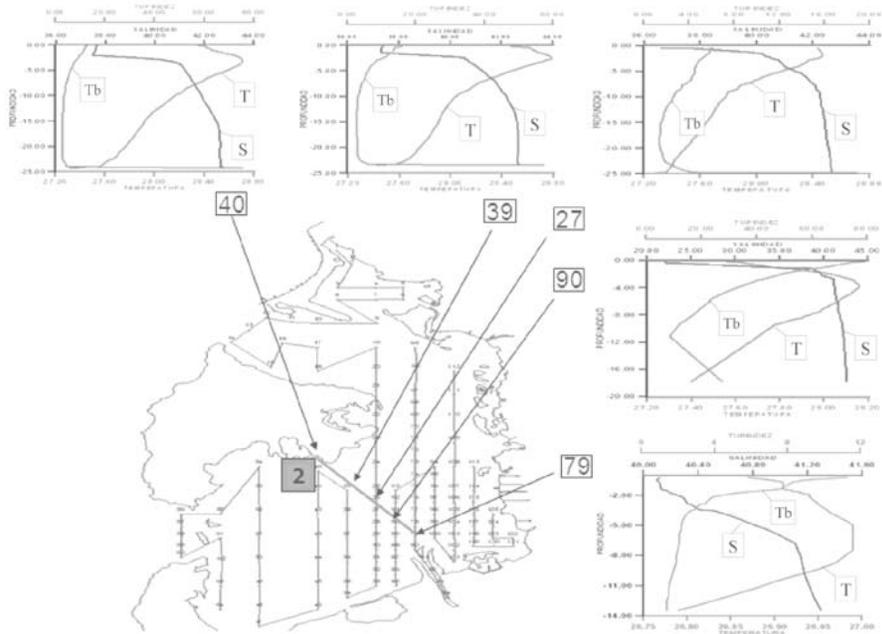


Figura 6. Perfiles de parámetros oceanográficos transecto 2

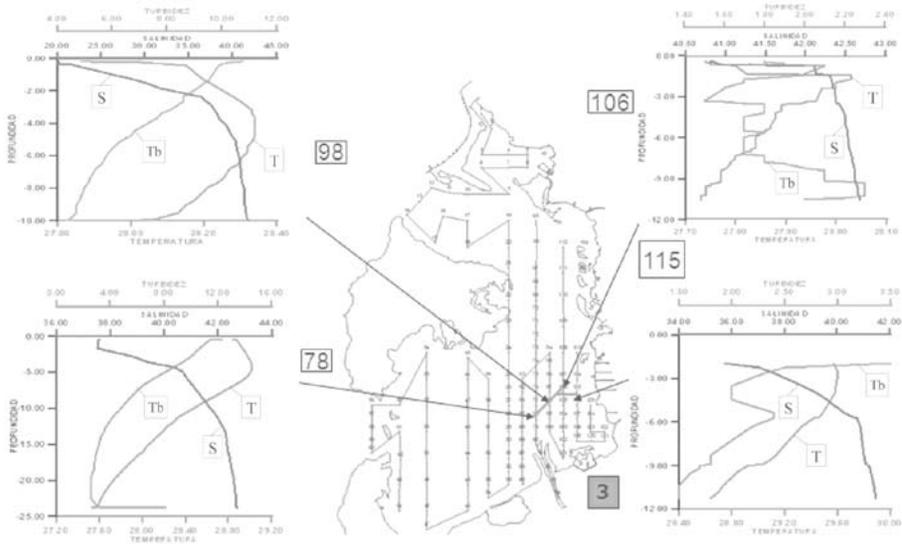


Figura 7. Perfiles de parámetros oceanográficos transepto 3

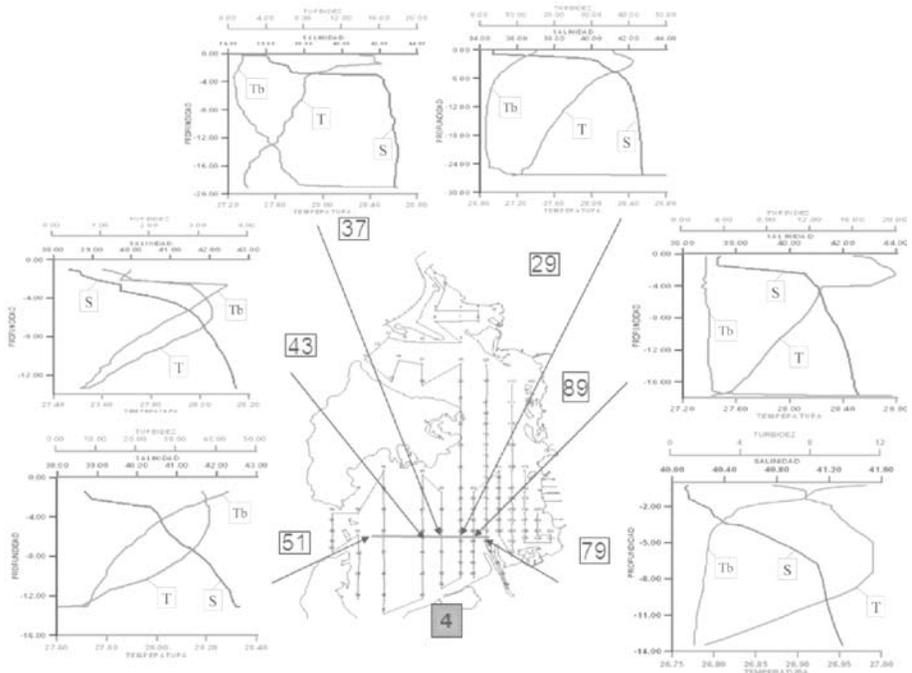


Figura 8. Perfiles de parámetros oceanográficos transepto 4

En las figuras 9, 10, 11 y 12 se observaron los perfiles verticales de temperatura (arriba derecha), salinidad (abajo izquierda), turbidez (abajo derecha) de los 4 transeptos representativos de la Bahía.

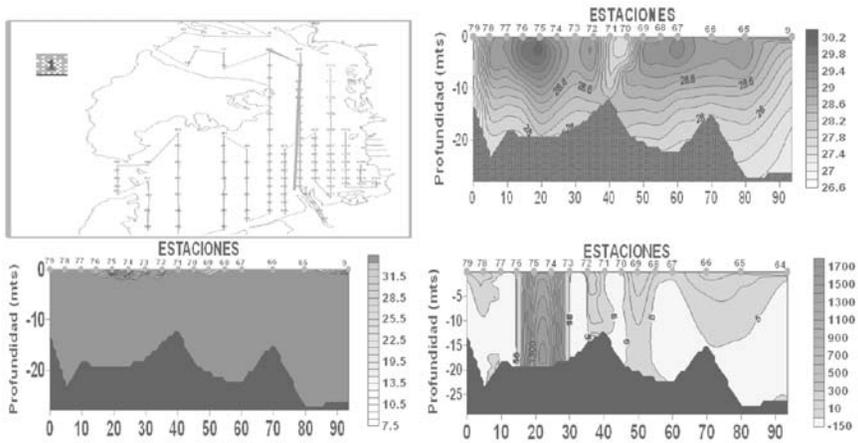


Figura 9. Perfiles verticales transepto 1 (Distancia eje “x” es metros x 100)

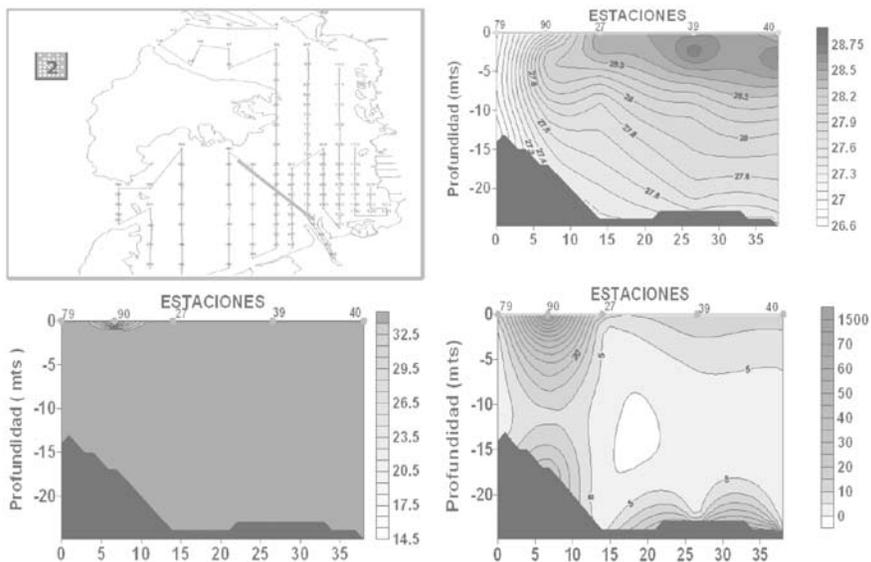


Figura 10. Perfiles verticales transepto 2 (Distancia eje “x” es metros x 100)

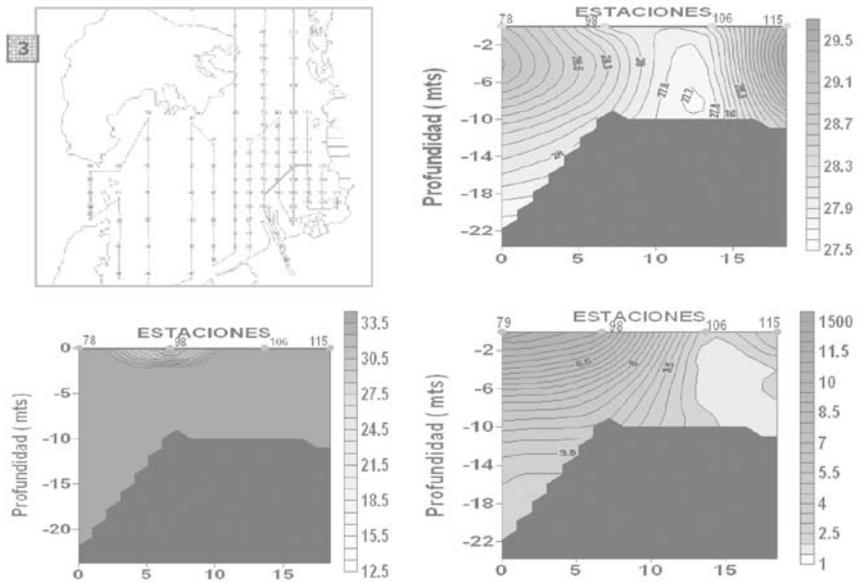


Figura 11. Perfiles verticales transecto 3 (Distancia eje "x" es metros x 100)

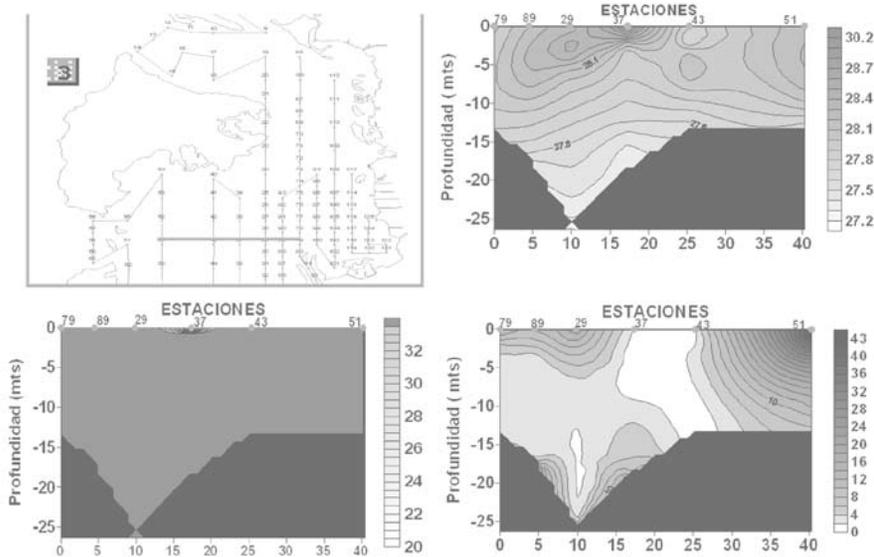


Figura 12. Perfiles verticales transecto 4 (Distancia eje "x" es metros x 100)

En las figuras 13, 14, 15 y 16 se observan los perfiles horizontales de salinidad, temperatura, turbidez y corrientes de los 4 transectos representativos de la Bahía a diferentes profundidades.

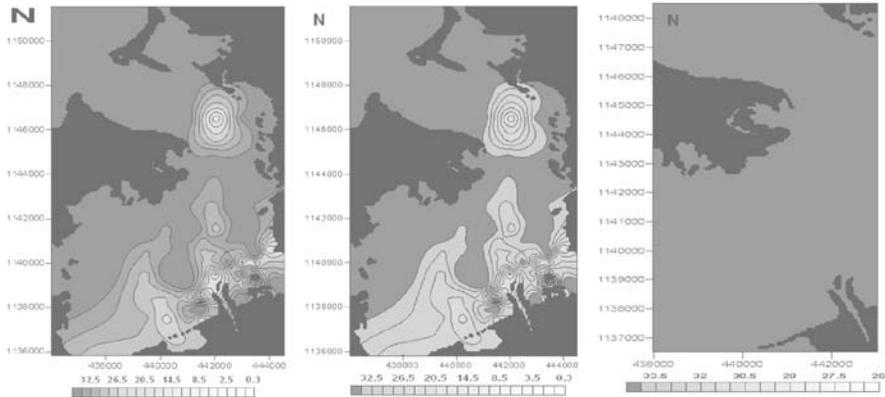


Figura 13. Perfiles horizontales de salinidad a 0.5, 6.5, 20 mts

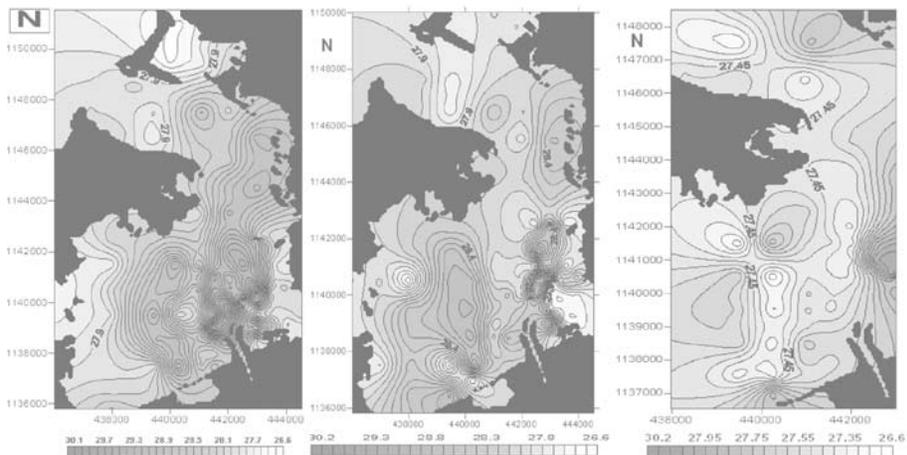


Figura 14. Perfiles horizontales de temperatura a 0.5, 6.5, 20 mts

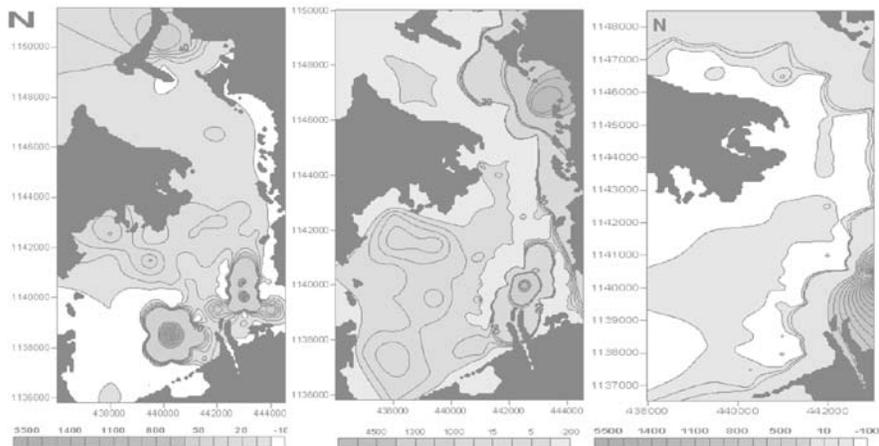


Figura 15. Perfiles horizontales de turbidez a 0.5, 6.5, 20 mts

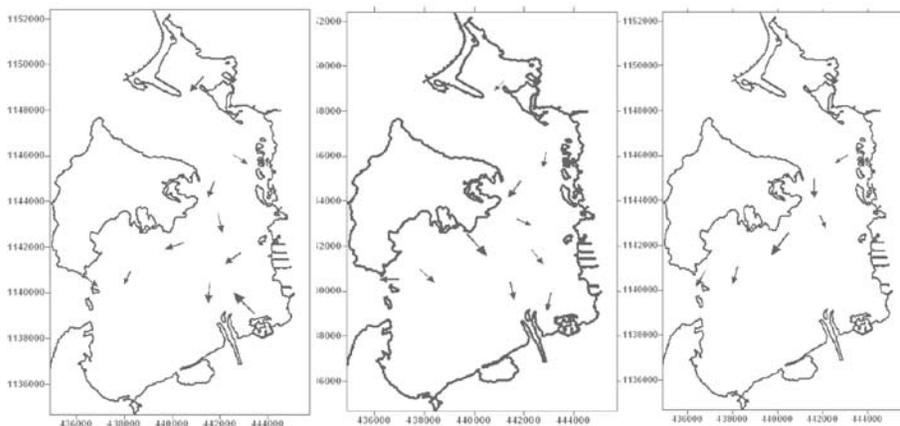


Figura 16. Perfiles horizontales de las corrientes a 1, 6.5, 10 mts

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las aguas menos cálidas del dique se distribuyeron al norte a 400 m en superficie, al este hasta 700 m y oeste hasta 300 m de la desembocadura en toda la columna de agua.

La termoclina en la medida que las estaciones se alejaron del dique, tendió a encontrarse a menos profundidad, en el transecto 1, de 5 a 2 m y en los transectos 2, 3 y 4 de 5 a 3 m. El transecto hacia Bocachica no presentó cambios considerables en la temperatura.

Turbidez: Los sólidos en suspensión se distribuyeron al norte hasta 3.000 m en superficie para luego depositarse, al este y oeste hasta 1000 m en toda la columna de agua. Esto se debe a la velocidad de descarga. Este parámetro presentó sus mayores valores en superficie sobre la línea de descarga del dique, en un abanico con sentido nor-noroeste y sentido este, es decir, un comportamiento muy similar de la pluma al llegar el veranillo de San Juan (abril). “Los vientos recobran fuerza y soplan con más regularidad, con esta nueva dinámica las aguas del dique subsisten en los bordes este y oeste de la bahía, desapareciendo totalmente en su centro, es un periodo de acción regresiva” [6]. Los vientos y las corrientes influyeron para que la gran cantidad de sedimentos se depositaran en el sur de la bahía.

Salinidad: Se encontró que las aguas del canal se desplazaron en superficie sobre las aguas de la bahía. Las concentraciones menos salinas en superficie y que fueron producidas por el dique, se encontraron al norte hasta 2.000 m, este y oeste hasta 500 m en una franja de espesor de 1 m de profundidad.

Corrientes: Este parámetro (hasta 2.000 m) del dique influyó en la distribución espacial de los parámetros anteriormente descritos y que en su primer metro de profundidad tiene relación directa con los patrones de viento de la época. Este comportamiento para la fecha del estudio fue observado en años anteriores, “La dispersión de las aguas dulces en la bahía dependen directamente del régimen de los vientos: durante la época de los alisios, las aguas turbias y marrón poco se mezclan con las de la bahía y se mantienen restringidas en la desembocadura y en las orillas externas” [2].

Se observaron, especialmente entre 1 y 5 m de profundidad, que las corrientes en la bahía tienen sentido sur por el braceaje de los vientos alisios. Según [2] “Se observa entonces un movimiento superficial de dirección global sur y una circulación profunda hacia el norte”.

Tomando como referencia las imágenes de satélite SPOT para la misma época del año pero en diferentes años y la magnitud y dirección de las corrientes se pudo evidenciar que “las aguas del dique chocan con las aguas de la bahía en sentido norte (por las corrientes superficiales) y se desplazan en superficie haciendo su descarga máxima de sólidos transportados entre los 2000 m y 2.500 m al interior de la bahía” [5].

6. AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigaciones Oceanográficas. A los señores CN(R) Andrade Carlos,

CC Ricardo Morales y Carlos Parra que con su asesoramiento permanente y oportuno me ayudaron a este proceso. A la señorita STELLA BETANCUR TURIZO por sus conocimientos y recomendaciones en este proceso de edición. Al acompañamiento profesional del Centre Nationale de Recherche Scientifique du France Laboratoire du Géographie Physique – Université Paris 1, que con IVES THOMAS fueron importantes para el inicio y desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Buitrago (1977). “Variaciones morfológicas de las costas de la Bahía de Cartagena a partir del siglo XV”. *Boletín Investigación marina y costera*. pp. 57-124.
- [2] Pagliardini, J.; Gómez, M.; Gutiérrez, H. *et al.* (1982). “Síntesis del Proyecto Bahía de Cartagena”. *Boletín Científico CIOH*, No. 4. pp. 49-109.
- [3] Andrade, C.; Thomas, I. (1988). “Nota sobre la turbidez, Circulación y erosión en la región de Cartagena (Colombia)”. *Boletín Científico CIOH*, No. 8. pp. 27-34.
- [4] Lonin, S. y Mendoza (1997). “Transparencia del agua en la Bahía de Cartagena”. *Artículo Científico CIOH*.
- [5] Andrade, C.; Lonin, S.; Thomas, I.; Parra, C. (2004). “Patrones de dispersión de la pluma turbia del canal en la Bahía de Cartagena”. *Boletín Científico*, No. 22. pp. 77-89.
- [6] Urbano, J.; Thomas, I.; Parra, C.; Genet, P. (1992). “Dinámica de la pluma de turbidez del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena”. *Boletín Científico CIOH*, No. 11. pp. 3-14.

ARTÍCULO

ESTUDIO DE LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN UNA CARGA INDUCTIVA

Yesid Bernardo Gómez Gamboa*

Yesid.bgg@gmail.com

John Jairo Gutiérrez Maya*

Johnjgutierrez@hotmail.com

Resumen: Con el propósito de considerar los requisitos y conceptos de calidad de energía, los sistemas eléctricos de potencia modernos deben garantizar mayor flexibilidad, estabilidad y confiabilidad en su operación, dentro de los cuales se viene proliferando el uso de cargas no lineales tales como balastos, motores, transformadores, motores eléctricos con baja carga, máquinas soldadoras, hornos de arco y de inducción, rectificadores de potencia, entre otros que contaminan la red eléctrica. La capacidad de estudiar y entender lo relacionado con la calidad de energía se ha convertido en una necesidad para toda instalación domiciliaria, comercial e industrial, que tenga que ver con la prestación del servicio eléctrico en términos de competitividad y ahorro de recursos.

Palabras clave: Calidad de Energía, Electrónica de Potencia, Factor de Potencia, Capacitor, Cargas Inductivas, Ángulo de Fase.

Abstract: In order to consider the requirements and concepts of energy quality, the modern electrical power systems must ensure greater flexibility, stability and reliability in their operation, within which the use of nonlinear loads such as ballast motors, transformers, electric motors with low load, welding machines, arc and induction furnaces, power rectifiers, among others which pollute the power grid. The capability of studying and understanding all related with power quality has become a need for every home, commercial, and industrial installation, that has to do with the electric service supply in terms of competitiveness and resource savings.

Key words: Power Quality, Power Electronics, Power Factor, Capacitors, Inductive Loads, Phase Angle.

* Teniente de Navío de la Armada Nacional. Profesional en Ciencias Navales. Alumno Curso de Complementación Profesional Electrónica, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla".

INTRODUCCIÓN

Los motores eléctricos son cargas inductivas cuya operación, por su naturaleza misma es causante de diversos problemas relacionados con la calidad de energía como son los *flickers* o fluctuaciones de tensión, armónicos, desbalance y en ocasiones operación con bajo factor de potencia lo cual influye en el costo de la energía, penalizaciones y en la productividad misma. Es por esto que se han venido desarrollando modelos en las instalaciones terrestres que permiten comprender y sirven de herramienta en el estudio de situaciones generales en sistemas de distribución eléctrica. Los beneficios de la corrección del factor de potencia en la atenuación de problemas relacionados con calidad de energía en sistemas de distribución han sido reconocidos por parte de empresas relacionadas con la prestación del servicio y la industria, por lo cual se vienen desarrollando en todo el mundo, cada vez más, proyectos que involucran este tipo de tecnología. En este artículo se presenta un caso práctico en el cual se corrigió el factor de potencia en un motor eléctrico de carga baja de uso domiciliario el cual presentaba un bajo factor de potencia, para su compensación se instaló un capacitor en paralelo con la carga, donde su aporte de potencia reactiva fue el esperado, por lo tanto, implementar un modelo sencillo de la aplicación de capacitores para la compensación del factor de potencia facilita su estudio y análisis dentro de un sistema de distribución. Con los resultados obtenidos se pretende generar un concepto en cuanto a operación de estos elementos y la viabilidad o no de la utilización de un sistema de compensación para atenuar sus perturbaciones. Finalmente, la Armada Nacional con el estudio de este tipo de casos podrá incluir dentro de sus proyectos y presupuesto la generalización e implementación del banco de capacitores, tanto en unidades terrestres y de superficie.

1. MARCO TEÓRICO

La electrónica de potencia ha tenido un gran desarrollo en las últimas décadas, debido principalmente a la elevada eficiencia de los convertidores electrónicos y su gran versatilidad, lo cual permiten hacer ahora una mejor y más eficiente conversión de potencia para múltiples aplicaciones que pueden variar desde fuentes de alimentación conmutadas, control de motores eléctricos, sistemas de alimentación ininterrumpida, transporte de energía y en especial el tema materia de este artículo: los sistemas de control del factor de potencia.

1.1 Antecedentes

En el contexto nacional a partir del año 1994 nace la Comisión de Regulación de Energía, una entidad eminentemente técnica cuyo fin es el de regular las actividades de los servicios públicos.

Es así como se crea la Resolución 047 de 2004 en la que estableció normas sobre control del consumo de energía reactiva, aplicables mientras se regula el suministro y consumo de energía reactiva en el Sistema Interconectado Nacional [4].

La energía reactiva que se presenta en las redes eléctricas por la demanda de los usuarios, genera una mayor circulación de corriente eléctrica e impone un mayor esfuerzo a los sistemas de transmisión por los que se transporta, que incide en la vida útil de tales equipos y elementos de transmisión, razón por la cual debe ser controlada después de límites técnicamente admisibles [3].

La gran mayoría de equipos eléctricos que suministran energía ya sea en forma de luz, calor, sonido, rotación, movimiento y otros, consumen una cantidad de energía eléctrica equivalente a la entregada directamente de la fuente de electricidad a la cual están conectados. Esta energía consumida se denomina *ACTIVA*, la cual se registra en los medidores y es facturada al consumidor por las respectivas empresas de suministro eléctrico. Algunos aparatos, debido a su principio de funcionamiento toman de la fuente de electricidad una cantidad de energía mayor a la que registra el medidor. Una parte de esta energía es la ya mencionada energía activa y la parte restante no es en realidad consumida sino mantenida entre el aparato y la red eléctrica. Esta energía entretenida es denominada *REACTIVA* y no es registrada por los medidores de la empresa prestadora del servicio eléctrico [5].

La energía total (formada por la Activa y la Reactiva) que es tomada de la red eléctrica se denomina *APARENTE* y es la que finalmente se transporta hasta el punto de consumo. El hecho de transportar una energía mayor a la que realmente se consume, impone la necesidad de que los conductores, transformadores y demás dispositivos que participan en el suministro de esta energía sean de mayor dimensión, por lo tanto elevan el costo del sistema de distribución.

Además, el efecto resultante de gran cantidad de usuarios en esta condición, provoca que disminuya en gran medida la calidad del servicio de electricidad (altibajos de tensión, cortes de electricidad, etc.). Por estos motivos las compañías de distribución toman medidas que tienden a compensar económicamente esta situación (penalizando o facturando la utilización de energía reactiva) o bien a regularizarla (induciendo a los

usuarios a que corrijan sus instalaciones y generen un mínimo de energía reactiva). El interés de este equipo de investigación es precisamente llevar a bordo de las unidades a flote todo este avance en criterios y especificaciones técnicas de diseño y medidas regulatorias del ámbito terrestre, para obtener grandes beneficios reflejados en el ahorro de energía, en nuestro caso (combustible), y la incidencia en la vida útil de la maquinaria que se alimenta del suministro de energía eléctrica producida por los motores generadores de la unidad a flote.

1.2 Conceptos Básicos de Potencia [3]

1.2.1 Potencia Reactiva: Es la encargada de generar el campo magnético que requieren para su funcionamiento los equipos inductivos como los motores y transformadores.

La potencia reactiva no produce por sí misma ningún trabajo, es por esto que resulta improductiva para el usuario, pero es requerida para el transporte de la potencia activa.

SÍMBOLO	UNIDAD	SÍMBOLO UNIDAD
Q	Volts ampers reactivos	VAR

1.2.2 Potencia Activa: Es aquella que puede ser aprovechada luego de ser transformada en calor o trabajo mecánico por la máquina receptora.

$$P = V \cdot I \cos \varphi$$

SÍMBOLO	UNIDAD	SÍMBOLO UNIDAD
P	Watts	W

1.2.3 Potencia Total o Aparente: Es la suma geométrica de la potencia efectiva y reactiva, ó bien el producto de la corriente y el voltaje; también es llamada potencia compleja. Su fórmula matemática está dada por:

$$S = V \cdot I \qquad S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Donde **I** es la corriente del circuito y **V** el voltaje.

SÍMBOLO	UNIDAD	SÍMBOLO UNIDAD
S	Volts - ampers	VA

Una instalación eléctrica de corriente alterna, que contiene máquinas como transformadores, motores, soldadoras, electrónica de potencia, y demás elementos donde la corriente está desfasada con respecto a la tensión, absorbe energía aparente.

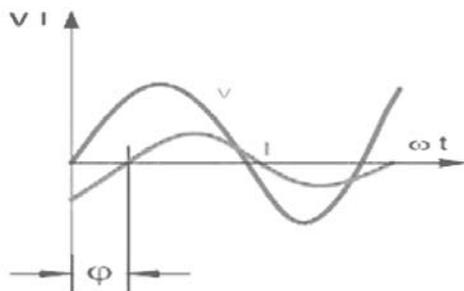


Figura 1. Desfase (ϕ) ° entre corriente y tensión

1.2.4 Triángulo de Potencias Eléctricas: Es la herramienta geométrica que puede ser usada para ilustrar la relación entre las formas de potencia.

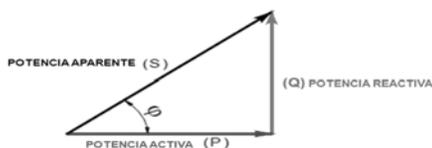


Figura 2. Triángulo de potencias

Por lo anterior (Figura 2) podremos obtener cualquiera de las potencias a través del teorema de Pitágoras.

1.2.5 Factor de Potencia (FP): [1] Es un término utilizado para describir la cantidad de energía eléctrica que se ha convertido en trabajo y se define matemáticamente como el cociente de la potencia activa (en watts, W) entre la potencia aparente (en volts-amperes, VA), describiendo la relación entre la potencia de trabajo o real y la potencia total consumida.

El factor de potencia (FP) está definido por la siguiente ecuación:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \phi$$

El factor de potencia expresa en términos generales, el desplazamiento o no de la

corriente con relación al voltaje y es utilizado como indicador del correcto aprovechamiento de la energía eléctrica, el cual puede tomar valores entre cero (0) y uno (1.0), siendo la unidad (1.0) el valor máximo del FP, indicando que toda la energía consumida por los aparatos ha sido transformada en trabajo y por tanto el mejor aprovechamiento de energía.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, conviene que la energía reactiva (Q) sea baja (tendiendo a cero) y por tanto el ángulo φ tenderá a cero. El coseno de un ángulo cercano a cero tiende a uno y por tanto el factor de potencia para un caso con baja energía reactiva tiende a uno que representa la condición ideal y significa que no hay consumo de energía reactiva lo cual muestra que se trata de una carga puramente resistiva. Por tanto, un usuario deberá llevar su factor de potencia lo más cercano a uno.

En electrotecnia, el ángulo φ nos indica si las señales de voltaje y corriente se encuentran en fase (Figura 1). Dependiendo del tipo de carga, el factor de potencia puede ser: Adelantado, Retrasado, Igual a 1.

En las cargas resistivas como las lámparas incandescentes, el voltaje y la corriente están en fase. Por lo tanto $\varphi = 0$. En este caso se tiene un factor de potencia unitario.

En las cargas inductivas como los motores y transformadores, la corriente se encuentra retrasada respecto al voltaje. Por lo tanto $\varphi < 0$. En este caso se tiene un factor de potencia retrasado.

En las cargas capacitivas como los condensadores, la corriente se encuentra adelantada respecto al voltaje. Por lo tanto $\varphi > 0$. En este caso se tiene un factor de potencia adelantado. Según el tipo de carga, se tienen los siguientes diagramas:

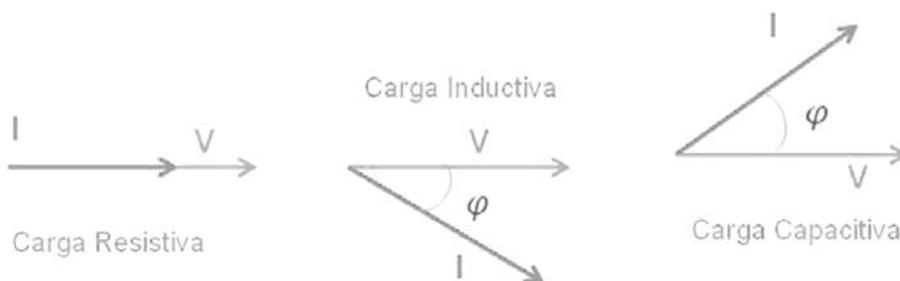


Figura 3. Diagramas fasoriales de tensión y corriente

1.2.6 Causas del bajo Factor de Potencia: Las cargas inductivas como balastos, motores, transformadores, motores eléctricos con baja carga, máquinas soldadoras, hornos de arco y de inducción, rectificadores de potencia, son el origen del bajo factor de potencia ya que son cargas no lineales que contaminan la red eléctrica, en este tipo de equipos el consumo de corriente se desfasa con relación a la tensión lo que provoca un bajo factor de potencia.

Para producir un trabajo, las cargas eléctricas requieren un cierto consumo de energía y cuando este consumo es en su mayoría energía reactiva, el valor del ángulo ϕ se incrementa y disminuye el factor de potencia como lo podemos observar en la Figura 4.

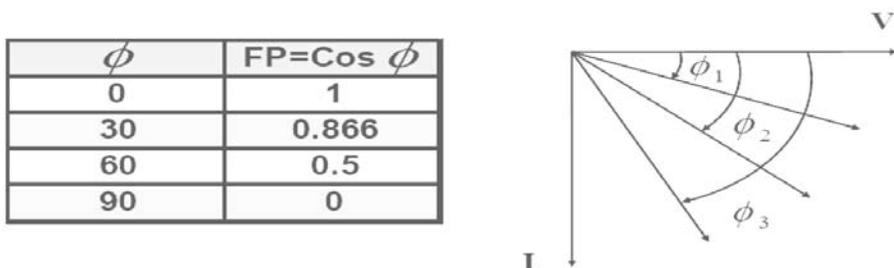


Figura 4. Factor de Potencia Vs ángulo ϕ

1.2.7 Consecuencias del bajo Factor de Potencia: Las instalaciones eléctricas que operan con un factor de potencia menor a uno, afectan a la red eléctrica tanto en alta tensión como en baja tensión, además tiene las siguientes consecuencias en la medida que el factor de potencia disminuye:

a. Incremento en las pérdidas por efecto Joule

La potencia que se pierde por calentamiento está dada por la expresión $I^2 R$ donde I es la corriente total y R es la resistencia eléctrica de los equipos (bobinado de los generadores y transformadores, conductores de los circuitos de distribución, etc.). Las pérdidas por efecto Joule se manifestarán en: calentamiento de cables, calentamiento de los bobinados de los transformadores de distribución, disparo sin causa aparente de los dispositivos de protección.

Uno de los mayores problemas que causa el sobrecalentamiento es el deterioro irreversible del aislamiento de los conductores que, además de reducir la vida útil de los equipos, puede causar cortocircuitos.

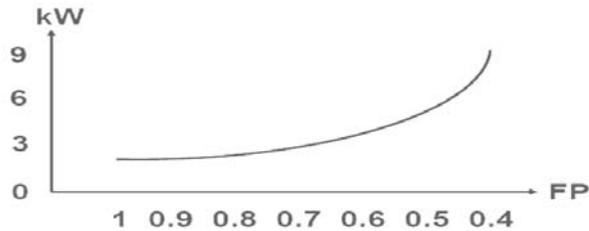


Figura 5. Pérdidas en un conductor Vs Factor de Potencia

b. Sobrecarga de los generadores, transformadores y líneas de distribución

El exceso de corriente debido a un bajo factor de potencia, ocasiona que los transformadores, generadores y las líneas de distribución trabajen con cierta sobrecarga y reduzcan su vida útil, debido a que estos equipos, se diseñan para un cierto valor de corriente y para no ocasionarles daño, se deben operar sin que este valor se rebase.

c. Aumento de la caída de tensión

La circulación de corriente a través de los conductores ocasiona una pérdida de potencia transportada por el cable y una caída de tensión o diferencia entre las tensiones de origen y la que lo canaliza, resultando en un insuficiente suministro de potencia a las cargas (motores, lámparas, etc.); estas cargas sufren una reducción en su potencia de salida, esta caída de voltaje afecta a: embobinados de los transformadores de distribución, cables de alimentación, sistemas de protección y control.

d. Incremento en la facturación eléctrica

Debido a que un bajo factor de potencia implica pérdidas de energía en la red eléctrica, el productor y proveedor de la energía eléctrica se ve en la necesidad de penalizar al usuario haciendo que pague más por su consumo de electricidad.

1.2.8 Importancia de la Corrección del Factor de Potencia: [2] La Corrección del Factor de Potencia (CFP) en una instalación eléctrica consiste en compensar parcial o totalmente la energía reactiva consumida por esa instalación.

Existen varios métodos para corregir o mejorar el factor de potencia, entre los que se destacan la instalación de capacitores eléctricos o bien, la aplicación de motores sincrónicos que finalmente actúan como capacitores, entre los sistemas técnicamente disponibles para compensar la energía reactiva, los *capacitores* son usados con mayor frecuencia porque presentan las siguientes ventajas: no consumen energía activa, su costo es comparativamente menor, son fáciles de instalar, poseen larga vida útil, prácticamente no requieren mantenimiento.

Un capacitor está formado por dos placas conductoras separadas por un material aislante (dieléctrico). Cuando el capacitor es conectado a una tensión senoidal, su vector de corriente toma una fase 90° adelantada al vector tensión.

En forma inversa, los componentes inductivos (motores, transformadores, etc.) producen una corriente desfasada 90° en atraso con respecto a la tensión.

La composición vectorial de estas potencias reactivas (inductiva o capacitiva) da como resultado una potencia reactiva inferior al valor existente antes de la instalación de los capacitores. En términos más simples, se puede decir que las cargas inductivas (motores, transformadores, etc.) consumen energía reactiva mientras que los capacitores producen energía reactiva.

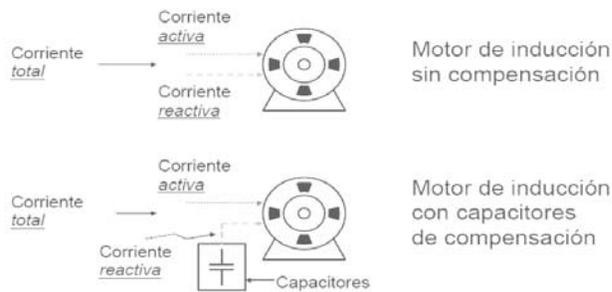


Figura 6. Compensación del Factor de Potencia en un motor de inducción

Un buen factor de potencia optimiza el consumo de una instalación eléctrica y proporciona las siguientes ventajas:

- Evita el pago de recargos por consumo de energía reactiva.
- Reducción del valor de potencia aparente.
- Reducción de pérdidas de energía activa al reducirse la corriente conducida en la instalación.
- Reducción en las pérdidas de los conductores.
- Disminución de caída de tensión en el cableado, aumentando así el nivel de tensión en el extremo de la distribución.
- Mayor potencia disponible en los transformadores, líneas de transmisión y generadores.
- Incremento de la vida útil de las instalaciones.

Complementando lo ilustrado en la Figura 6, donde las cargas inductivas requieren

potencia reactiva para su funcionamiento, podemos ver de manera gráfica en el triángulo de potencias, cómo esta demanda de reactivos se puede reducir e incluso anular colocando capacitores en paralelo con la carga así:

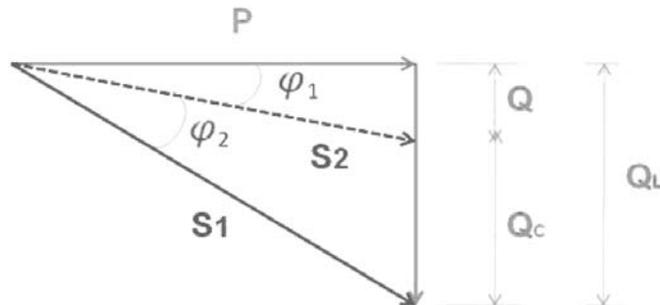


Figura 7. Compensación del FP – Triángulo de potencias

En la figura anterior se tiene:

- Q_L es la demanda de reactivos de una carga inductiva y S_1 es la potencia aparente correspondiente.
- Q_C es el suministro de reactivos del capacitor de compensación.
- La compensación de reactivos no afecta el consumo de potencia activa, por lo que P es constante.
- Como efecto del empleo de los capacitores, el valor del ángulo φ_1 se reduce a φ_2 .
- La potencia aparente S_1 también disminuye, tomando el valor de S_2 .
- Al disminuir el ángulo φ se incrementa el factor de potencia.

2. DESARROLLO

2.1 Consideraciones

Elemento a medir: Motor de corriente alterna de baja carga de uso domiciliario, marca Samurai, Potencia Activa 60 Watt, Tensión de entrada 120 V, 3 velocidades, Estado: Reparado (cambio de embobinado).

Elementos y equipos utilizados:

Resistencias: Se usan dos resistencias de 5W conectadas en paralelo (10 ohmios y 6,8 ohmios) dando como resultado una resistencia de 4,04 ohmios y un valor real de 4,5 ohmios. Con las consideraciones de tensión y corriente se estimó la potencia de estas.

Capacitor: Bipolar de 8 microfaradios a 120V.

Osciloscopio: Marca Phillips, modelo PM 3211 0-15 MHz, 110-240V, 30 VA, 50-400 Hz, con transformador de aislamiento.

Multímetro: Marca Fluke.

2.2 Procedimiento en la obtención del factor de potencia del motor

Inicialmente se obtuvo la medida del factor de potencia del motor para saber si estaba siendo afectado y qué tan alejado de la unidad (1.0) se encontraba. El método para obtener la medida del factor de potencia fue la comparación de las señales de corriente y tensión en el osciloscopio, para observar el ángulo de desfase entre ellas. Se tomó la medida en el osciloscopio de la señal de tensión de entrada con un valor de 124 voltios rms. De igual forma para analizar la señal de la corriente fue necesario conectar una pequeña resistencia (4,5 ohmios valor real) en serie con el ventilador para obtener la señal de tensión producida por el paso de la corriente a través de ella y medirla en el osciloscopio, dando como resultado una tensión de 2,7 voltios rms.



Figura 8. *Conexión de resistencias conectadas en paralelo y conexión de pinzas del osciloscopio*

Se hicieron mediciones en las tres velocidades invirtiendo una de las señales y se observan en el osciloscopio, notándose que el mayor desfase se produce en la máxima velocidad, en la cual la señal de corriente se atrasa a la tensión, en las otras dos el desfase es muy pequeño y por lo tanto se descartará la corrección para estas velocidades, posteriormente se hace el cálculo del ángulo existente entre las dos señales encontrando que para un periodo completo de 360° las señales miden 3,25 unidades de la cuadrícula y el desfase entre las dos es de 0,26 unidades, a partir de esta información se obtiene que el ángulo entre ellas es de $28,8^\circ$ y por lo tanto el factor de potencia, que es igual al coseno de este ángulo es: $FP = 0,87$.

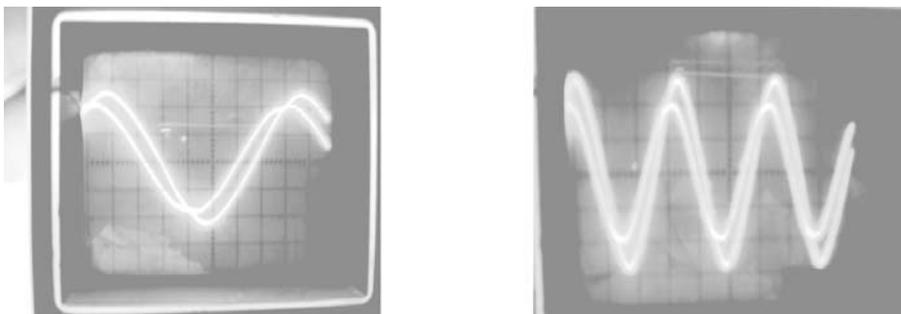


Figura 9. *Gráficas de osciloscopio con señal de tensión y corriente sin corrección*

La corriente demandada por el motor en esta configuración es de 0,79 amperios que multiplicada por el voltaje de entrada de 124 voltios nos da como resultado una potencia de 97,96 VA equivalente a la potencia aparente (S) del motor, si bien en este motor no se cuenta con datos exactos de potencia de consumo, debido a que los parámetros de fabricación fueron alterados al ser modificada la bobina del estator, el factor de potencia puede servirnos de referencia ya que esta debe ser aproximadamente el 87% de la potencia aparente, es decir el 87% de 97,96 = 85,22 W la cual podemos aproximar a 80W.

Una vez determinado el factor de potencia y encontrando que se desperdicia un porcentaje considerable de la potencia suministrada, nos basamos en esto para sustentar el beneficio de la corrección del factor de potencia con el fin de aprovechar mejor la energía o en este caso de estudio el ahorro de este recurso.

La corrección se realizará al punto más cercano posible a la unidad, para lo cual se requiere hallar la potencia reactiva (Q) la cual podremos hallar con el triángulo de potencias:

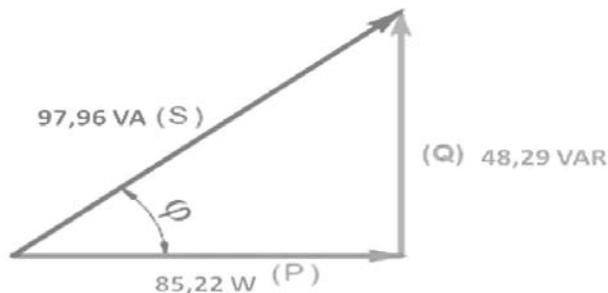


Figura 10. Triángulo de potencias con valores iniciales

Por Pitágoras se halla $Q_c = 48,29 \text{ VAR}$

Para realizar la corrección del factor de potencia requerimos reducir esta potencia (Q_c) al valor más cercano a cero, es decir el valor de (Q_c) que tendremos en cuenta, para la ecuación será el mismo de (Q_c) el cual será modificado por una carga capacitiva a calcular:

$$C = \frac{Q_c}{(W) (V_{rms}^2)}$$

$W = 2\pi f$ (Radianes), cuyo resultado del capacitor es de 8,33 microfaradios.



Figura 11. Conexión del capacitor y toma de medidas

Se necesita un capacitor de 8,33 microfaradios a 120V en paralelo con la carga para que el factor de potencia sea de 1.0, comercialmente se consigue un capacitor de 8 microfaradios, con el cual se hacen los cálculos respectivos para hallar la (Q_c) que quedaría en el triángulo de potencias, quedando de la siguiente forma de acuerdo a los siguientes cálculos:

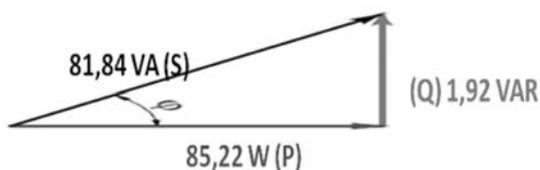


Figura 12. Triángulo de potencias con valores obtenidos después de la corrección

Se realizaron las mismas mediciones para el montaje con el capacitor instalado, notando que para la velocidad máxima no se observó desfase entre la tensión y la corriente lo que demuestra que fue corregido este por medio de la carga capacitiva producida.

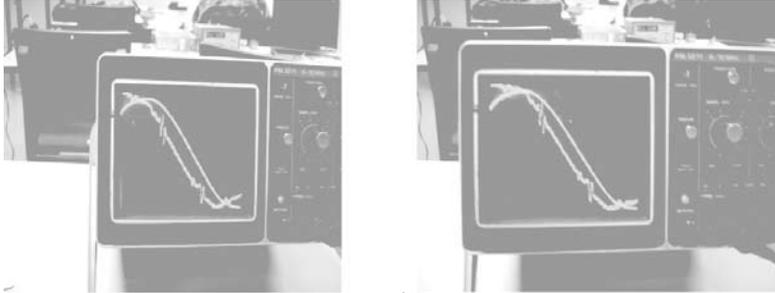


Figura 13. Gráficas de osciloscopio de señal de tensión y corriente con corrección de FP

También se realizan las mediciones en las demás velocidades, observando que existe un desfase notorio en estas, pero en esta ocasión se presenta adelanto de la señal de corriente con respecto a la de tensión, debido a la modificación efectuada, ya que sin

la corrección del capacitor el factor de potencia se encontraba así:

Velocidad media, $FP = 0.98$ y Velocidad baja, $FP = 0.99$



a)

Figura 14. a) Señal de tensión y corriente a baja velocidad (corriente adelantada). b) Señal de tensión y corriente a media velocidad (corriente adelantada)

Finalmente el factor de potencia que se obtuvo después de su corrección fue de:

$FP = 0.9997$ frente a $FP = 0.87$ que presentó al inicio del trabajo y una reducción de corriente de 0.66 amperios, frente a 0.79 amperios de consumo inicial.

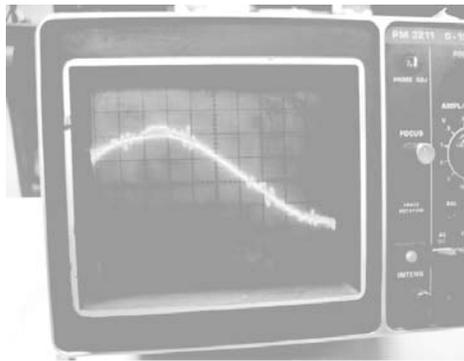


Figura 15. Señal de tensión y corriente en fase, con la corrección del FP

3. CONCLUSIONES

La solución tecnológica de la instalación de un capacitor, es una solución práctica y económica para la corrección del factor de potencia, representado en una relación costo beneficio muy favorable, refiriendo el costo del elemento capacitivo que es ínfimo en comparación con el costo de KW/H facturado por la empresa de energía eléctrica que suministra el servicio.

Al efectuar las mediciones, cálculos y análisis, se observó que a mayor velocidad del motor sin compensación de FP, el ángulo de desfase se incrementó y en las velocidades media y baja no fue necesario efectuar corrección. El cálculo del capacitor implementado logró llevar a fase la tensión y la corriente, pero afectó el ángulo entre estas dos magnitudes en las velocidades media y baja, adelantando la corriente frente a la tensión.

La relación de corriente que alimenta al motor antes de la compensación del FP, frente a la corriente generada con el capacitor en funcionamiento, permitió ver que se redujo más de un 15% su magnitud, lo que se representa en ahorro de energía y de recursos económicos.

En las gráficas obtenidas a través del osciloscopio, se logró observar la distorsión de la señal de tensión de la resistencia, equivalente a la señal de corriente, dicha distorsión es generada por los armónicos, que al ser absorbidos por el capacitor que muestra una baja impedancia para las corrientes armónicas, incrementa su temperatura, lo cual nos explica el porqué sufrió recalentamiento el capacitor en el desarrollo de la práctica.

El presente artículo, será la base de un trabajo de investigación con el cual se tendrán en cuenta las experiencias documentadas en instalaciones domiciliarias, comerciales e industriales, para la presentación de una propuesta a la Armada Nacional para ser implementada a bordo de las unidades navales.

REFERENCIAS

- [1] Salvador Acevedo. Corrección de Factor de Potencia usando filtros desintonizados. Departamento de Ingeniería Eléctrica Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Monterrey, México 64849.
- [2] ELECOND, Representante de EPCOS en Argentina, *Catálogo general de productos para la Corrección del Factor de Potencia*. Enlace www.elecond.com.ar
- [3] Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, CONAE, Dirección de Demanda Eléctrica. Enlace www.conae.gov.mx
- [4] CREG, Comisión de Regulación de Energía y Gas de Colombia, Resolución CREG-047 de 2004. Enlace www.creg.gov.co
- [5] Colección de tesis digitales, Corrección del Factor de Potencia, Capítulo 1, Universidad de las Américas, Puebla-México, disponible en Internet: <http://www.catarina.udlap.mx>

ARTÍCULO

CONSTRUCCIÓN DE VEHÍCULO SUBACUÁTICO DE BAJO COSTO PARA INSPECCIÓN DE CASCOS DE BUQUES

Mario Vélez Forero*, Víctor Bernal Gil*, Sandra Carrillo**

mario_velez@hotmail.com, victorbernal65@hotmail.com, spcarrillo@gmail.com

Luis Cárdenas**, Edgar Vergara**, William Cuadrado**

lecardenasg@gmail.com, eevv1027@gmail.com, escuadradowi@yahoo.com

Juan Contreras***, Vladimir Díaz****, David Muñoz****

epcontrerasj@ieee.org, ohcalv@hotmail.com, daviermual@hotmail.com

Resumen: Se describen los componentes de un vehículo subacuático de bajo costo utilizado en operaciones de inspección de cascos de buques. El vehículo fue construido utilizando tubería PVC. Para apoyar al sistema de visión cuando la inspección se realiza en aguas turbias se incorporó una ecosonda y un control difuso de inmersión para asegurar que cada recorrido horizontal de inspección se hiciera con nivel de profundidad estable.

Palabras clave: ROV de bajo costo, Inspección de cascos de buques, Control de inmersión, Ecosonda.

Abstract: A low cost underwater robot used for ship hull inspection is described. The vehicle has been constructed using commercial pipe of Polyvinyl Chloride PVC. Hull inspection is realized by using a vision system and an echosounder. To assure a right horizontal survey, the vehicle sways at the desired depth using a fuzzy controller.

Key words: Low cost ROV, Ship Hull inspection, Depth controller, Echosounder.

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

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

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

**** Investigador invitado.

Apoyos y Subvenciones: Escuela Naval "Almirante Padilla" - Colciencias (Proyecto código: 1126-425-20747).

INTRODUCCIÓN

Las inspecciones subacuáticas ha sido un ejercicio laborioso y costoso que requiere un registro lento de los cascos de embarcaciones y muros de muelles a cargo de buzos, frecuentemente en condiciones de agua turbia. Los accidentes ocurridos a los buzos que realizan labores de inspección en cascos de buques han alcanzado cifras alarmantes [15], lo que ha incrementado el interés en el desarrollo de soluciones alternativas que garanticen la seguridad y la integridad de las personas dedicadas a estas labores y que, al mismo tiempo, minimice el impacto sobre el tráfico comercial, disminuyendo los tiempos de inspección, y aumente la confiabilidad de los resultados de las búsquedas o inspecciones. En la última década se han logrado significativos avances en soluciones basadas en vehículos autónomos no tripulados ROV (por su acrónimo en inglés: *Remote Operated Vehicles*).

La gran dificultad en las inspecciones de cascos han sido las formas complejas en las estructuras, especialmente en la zona de propulsión y en las formas de bulbos [12]. Esto ha conllevado al desarrollo de nuevos sensores y/o nuevas técnicas para inspeccionar áreas de difícil acceso [1].

Una amplia descripción sobre las diferentes técnicas de visión y control por computador de sistemas de evasión de obstáculos (OAS) empleando sonares y algoritmos para procesar la imagen del sonar, así como también de los algoritmos para planificación de trayectoria es presentada en [6]-[9]. El uso del sonar y el tratamiento de la imagen generada es relativamente novedoso y puede ser empleada, mediante una adaptación, en la inspección de cascos de buques.

En cuanto al diseño estructural de los ROVs, la literatura científica internacional relacionada presenta desarrollos en diferentes áreas: en cuanto a diseño mecánico se destacan la propuesta de Gomes *et al.* [6] donde se presenta un diseño modular para optimizar: la simetría, la ubicación de los motores (*thruster*), la ubicación de los demás elementos del ROV y la estabilidad, con el fin de que el vehículo diseñado pueda operar en diferentes escenarios; y la de Stipanov *et al.* [16] que presenta una metodología de diseño modular para transformar, a bajo costo, un vehículo submarino operado remotamente (ROV) en un vehículo submarino autónomo (UAV) con el mínimo costo de tiempo y sin alterar los circuitos del ROV. Presenta también una estrategia de lazo abierto para identificar el modelo que describe la dinámica de la guiñada y

describe el hardware desarrollado incluyendo la estrategia de comunicación empleando una red CAN. Ramírez *et al.* [14] presenta una alternativa de diseño mecánico de un ROV para inspección de cascos de buques y estructuras sumergidas con características específicas para un tipo de operación. Las investigaciones sobre mini ROVs, en especial a los desarrollados con fines militares o de defensa, se han diseccionado hacia el desarrollo de sistemas robustos de control y nuevos diseños mecánicos para contrarrestar el efecto perturbador de las propelas, cuyo torque afecta negativamente la estabilidad del sistema [2].

En cuanto a las técnicas de identificación y control del ROV, se resaltan los trabajos de [10]-[13], donde se presentan diferentes estrategias para modelar y controlar la dinámica no lineal de estos vehículos.

Los direccionamientos de la industria militar en el desarrollo de ROVs y AUVs (del acrónimo en inglés: *Autonomous Underwater Vehicles*) se plasman en [5] y [17].

1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El ROV fue construido utilizando tubería PVC comercial de la empleada en las instalaciones hidráulicas de edificaciones. Pesa alrededor de 12 kgs., y mide 98 x 71 x 45 cms. Contiene, entre otros, los siguientes elementos:

- o Tres motores de propulsión BTD 150, cada uno de 80 vatios, 19.5 voltios, con propela de 76 mm y 2.9 kg-f.
- o Instrumentación electrónica con: sensor de profundidad, compás magnético, sensor inercial, sensor de temperatura, sensor de humedad, sensor de presión interna.
- o Tarjetas de potencia y control de motores de propulsión.
- o 4 reguladores de voltaje de 120 vac a 19.5 vdc, 4.5 amperios.
- o Sistema de visión.
- o Ecosonda con opción de barrido horizontal y vertical.
- o Válvula de presurización.
- o Pesos de lastre y estabilidad.

Los sensores externos son colocados previamente en una unión universal que se rellena con masilla epóxica antes de conectarla a la estructura del ROV, lo que facilita el reemplazo ágil y seguro de cualquiera de los elementos electrónicos del vehículo. Para garantizar la estanqueidad se adicionó una válvula de presurización que permite

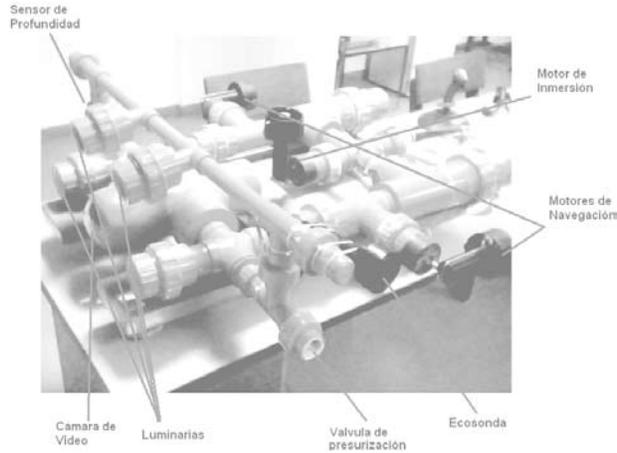


Figura 1. Componentes del ROV

aplicarle una presión de aire de hasta 25 psi y detectar así posibles fallas antes de proceder a la inmersión. De esta manera se posibilita revisar cada una de las uniones y adaptadores PVC que componen el ROV.

2. SISTEMA DE INSPECCIÓN DE CASCOS

El ROV cuenta con un sistema de visión que permite visualizar la imagen del casco del buque desde tres puntos diferentes, como se aprecia en la Figura 2: a través del monitor de un computador; a través de la pantalla de un televisor; o a través de unas gafas de realidad virtual que generan en el operador la sensación de estar operando el vehículo desde su interior.



Figura 2. Sistema de visión del ROV

Sin embargo, este sistema resulta poco eficaz cuando se realizan inspecciones en aguas turbias ya que se dificulta la visibilidad. Para contrarrestar este problema, se incluyó en el ROV una ecosonda Furuno FCV-620. Para verificar las especificaciones del fabricante sobre las distancias de operación de la ecosonda fueron realizadas en el tanque de pruebas de la Escuela Naval “Almirante Padilla” ENAP, como se aprecia en la Figura 3.

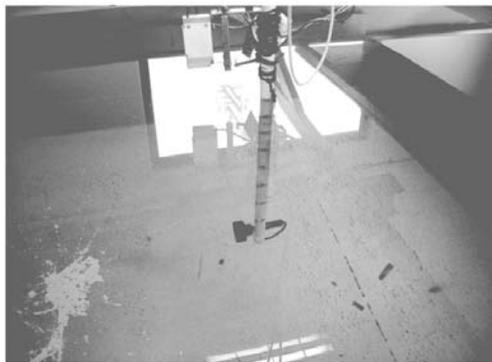


Figura 3. Experimentación con la ecosonda FCV-620 en el tanque de pruebas de la ENAP

La Figura 4 muestra el porcentaje de precisión en la medida de la ecosonda con respecto a la distancia real a la que se encuentra ubicada el objetivo de estudio.

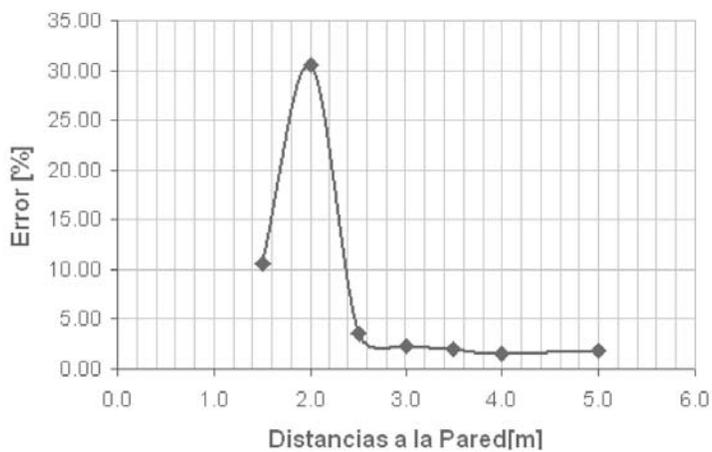


Figura 4. Precisión de la ecosonda FCV-620

La Figura 5 muestra el resultado de un barrido horizontal realizado a una figura sumergida.

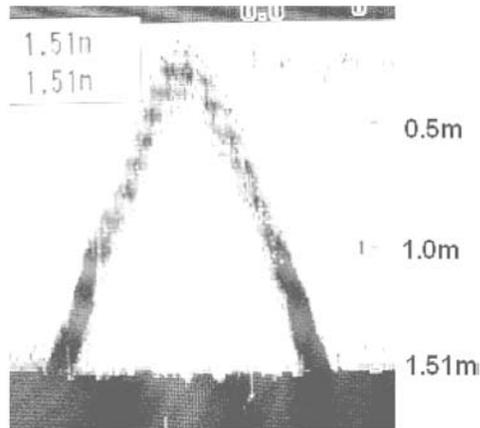


Figura 5. Resultado de barrido horizontal sobre volumen sumergido

3. SISTEMA DE INSPECCIÓN DE CASCOS

La inspección de un casco de buque debe hacerse a todo lo largo del buque (barrido horizontal) a diferentes medidas de profundidad. Por lo tanto, para una reconstrucción confiable de la imagen, el control de profundidad del vehículo debe ser muy preciso. Teniendo en cuenta la característica no lineal de la dinámica de inmersión, se decidió desarrollar un controlador difuso [3], [4], [10] el cual fue entrenado a partir de la información obtenida por la operación realizada por un operador humano.

Inicialmente, el ROV es operado por un experto humano y los datos de entrada y salida al motor de inmersión son almacenados. Esos datos son introducidos algoritmo de identificación borrosa para que genere el controlador borroso de inmersión que emulará la acción del operador humano.

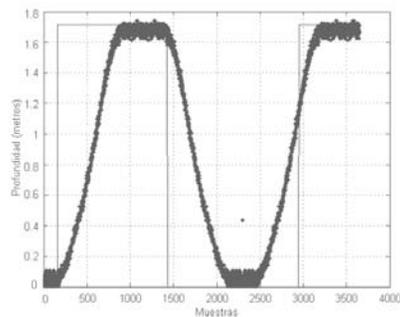


Figura 6. Regulación manual de la profundidad de un ROV

La Figura 6 muestra el control de profundidad realizado por un operador humano que varía la profundidad del ROV desde 0 metros (superficie) hasta 1.70 metros.

El voltaje aplicado al motor de inmersión para realizar el control de profundidad mencionado se muestra en la Figura 7.

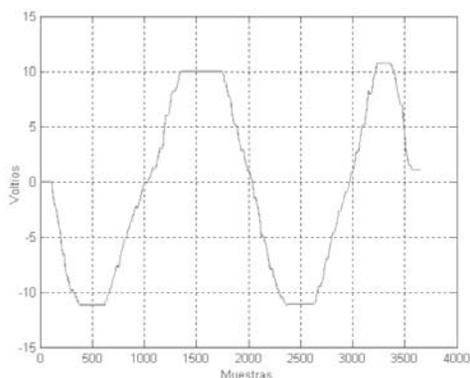


Figura 7. Voltaje aplicado al motor de inmersión del ROV

Con los datos mostrados en las Figuras 6 y 7 se procedió a obtener el controlador mediante identificación borrosa de la acción de control realizado por el experto humano. Se consideraron como variables de entrada valores pasados del voltaje aplicado $u(k-2)$ y del error $e(k-1)$ y como variable de salida la ubicación o profundidad del ROV $y(k)$. Para determinar qué valores pasados de las variables de entrada debían ser seleccionados se utilizó el mismo algoritmo de identificación borrosa propuesto, probando con diferentes valores pasados y seleccionando aquel que arrojará la mejor aproximación de acuerdo a una métrica del error (error cuadrático medio).

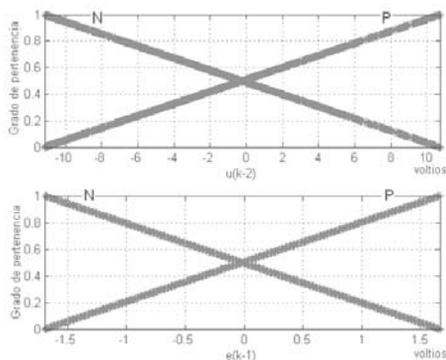


Figura 8. Partición de las variables de entrada del controlador difuso

El controlador difuso obtenido presenta dos funciones de pertenencia triangulares por cada variable de entrada $u(k-2)$ y $e(k-1)$, como se muestra en la Figura 8. Esto quiere decir que se generaron 4 consecuentes tipo singleton. Los conjuntos de ambas variables de entrada fueron etiquetados como Negativo N y Positivo P.

La proyección de los valores modales generaron los siguientes consecuentes (y por lo tanto las siguientes reglas):

Función de Pertenencia	Ubicación del Consecuente
$u_N(k-2)$	-11.20
$u_P(k-2)$	10.74
$e_N(k-1)$	9.99
$e_P(k-1)$	-11.15

Existen dos consecuentes que se ubican casi en la misma posición lo que nos permite fusionarlos (en un punto intermedio) y reducir el número de reglas, así:

Función de Pertenencia	Ubicación del Consecuente
$u_N(k-2) \Theta e_P(k-1)$	-11.20
$u_P(k-2)$	10.74
$e_N(k-1)$	9.99

Donde Θ no es una T-norma sino un operador del tipo promedio.

Luego de hacer el ajuste de consecuentes mediante mínimos cuadrados, el error cuadrático medio alcanzado MSE es de 0.000298. La Figura 9 muestra la comparación entre la respuesta del controlador borroso generado y la realizada por el operador humano. Se aprecia que el controlador borroso puede emular con gran precisión la labor realizada por el experto humano.

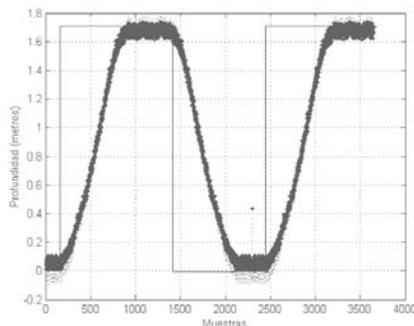


Figura 9. Comparación entre la respuesta del controlador difuso y la del experto

4. CONCLUSIONES

Se presenta el esquema general de un ROV de bajo costo para inspecciones en cascos de buques. El vehículo ha sido desarrollado utilizando tubería PVC hidráulica de fácil consecución en el mercado. Los sensores externos son colocados previamente en una unión universal que se rellena con masilla epóxica antes de conectarla a la estructura del ROV, lo que facilita el reemplazo ágil y seguro de cualquiera de los elementos electrónicos del vehículo. Se asegura la estanqueidad mediante la inserción de una válvula de presurización que permite aplicarle una presión de aire de hasta 25 psi y detectar así posibles fallas antes de proceder a la inmersión.

Para la inspección de cascos, el vehículo cuenta con cámara de video y una ecosonda. Esta última es utilizada en condición de agua turbia y permite obtener información sobre la forma del casco y detectar así posibles anomalías. Para obtener información precisa en cada nivel de profundidad se incorporó un controlador difuso de profundidad que fue entrenado a partir de los datos obtenidos de la operación realizada por un operador humano.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo logístico y económico brindado por la Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”, la Fundación Wise Innovations y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS (Proyecto código: 1126-425-20747).

REFERENCIAS

- [1] Abidin, Z. Z.; Arshad, M. R. “Visual Servoing with application to ROV for Ship Hull Inspection”. Proceedings of International Conference on Man-Machine Systems 2006. September 15-16, 2006, Langkawi, Malaysia.
- [2] Cavallo, E.; Michelini, R.C. “A Robotic Equipment for the Guidance of a Vectored Thruster AUV” 35th International Symposium on Robotics. Paris, 2004.
- [3] Contreras, J.; Misa, R.; Murillo, L. “Obtención de modelos borrosos interpretables de procesos dinámicos”. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial-RIAI*. Vol. 5, No. 3, pp. 70-77. 2008.

-
-
- [4] Contreras, J.; Misa, R.; Murillo, L. "Interpretable Fuzzy Models from Data and Adaptive Fuzzy Control: A New Approach". *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. IEEE Computational Intelligence Society. pp. 1591-1596. 2007.
- [5] Dunn, P. "Navy Unmanned Undersea Vehicle (UUV) Master Plan", Unmanned Underwater Vehicle Showcase, Conference Proceedings, pp. 105-126. 2000.
- [6] Gomes, R.; Sousa, A.; Fraga, S. L.; Martins, A.; Sousa, B.; Lobo Pereira, F. "A New Rov Design: Issues on Low Drag and Mechanical Symmetry", Oceans 05Europe, Brest, France, June 2005. [http:// paginas.fe.up.pt/~ajsousa/folders/publications/2005-OceansEurope.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~ajsousa/folders/publications/2005-OceansEurope.pdf)
- [7] Healey, A. J.; Horner, D. P. "Collaborative Vehicles in Future Naval Missions, Obstacle Detection and Avoidance", *Keynote Paper, Proceedings of the IFAC Conference on Modelling and Control of Marine Craft, MCMC*, 2006, Lisbon, Portugal, <http://web.nps.navy.mil/~me/healey/papers/MCMC06.pdf>
- [8] Healey, A. J.; Horner, D. P. "Obstacle Detection and Avoidance Using Blazed Array Forward Look Sonar", *End of Year Report*, 2006 ONR, <http://web.nps.navy.mil/~me/healey/papers/MWHealey2.doc>
- [9] Horner, D. P.; Yakimenko, O. "Recent Developments for an Obstacle Avoidance System for a Small AUV", IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems CAMS'07, Croatia. 2007. [http:// www.cams07.fer.hr/papers/final/f0087.pdf](http://www.cams07.fer.hr/papers/final/f0087.pdf)
- [10] Jiménez, F.; González, H.; Contreras, J. "Building an Adaptive Fuzzy Controller to Depth Control of a ROV". 2º Conferencia/Workshop de Vehículos/Sistemas No Tripulados de América Latina. Panamá. 2008.
- [11] Miskovic, N.; Vukic, Z. and Barisic, M. "Identification of Coupled Mathematical Models for Underwater Vehicles", Proceedings of the OCEANS'07 Conference, Aberdeen, Scotland. 2007.
- [12] Olson, D. L.; Mishra, B. "Assessment of the Emerging Technologies for the Detection and Measurement of Corrosion Wastage of Coated Marine Structures" in Proceedings of OMAE'03, The 22nd International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering, Cancun, Mexico, June 8-13, 2003.
- [13] Ridao, P.; Tiano, A.; El-Fakdi, A.; Carreras, M. and Zirilli, A. "On the Identification of Nonlinear Models of Unmanned Underwater Vehicles", *Control Engineering Practice* 12, 1483-1499. 2004.
- [14] Ramírez, J. A.; Gutiérrez, L. B.; Vásquez, R. E.; Flórez, D. A. "Diseño Mecánico de un vehículo sumergido operado remotamente para inspección subacuática". 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Perú 2007.

- [15] Reed, S.; Cormack, A.; Hamilton, K.; Tena Ruiz, I.; Lane, D. "Automatic Ship Hull Inspection using Unmanned Underwater Vehicles," Proceedings from the 7th International Symposium on Technology and the Mine Problem. Monterey, USA. May, 2006.
- [16] Stipanov, M.; Miskovic, N.; Vukic, Z.; Barisic, M. "ROV Autonomization – Yaw Identification and Automarine Module Architecture", IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems CAMS'07, Croatia, September 2007. <http://www.cams07.fer.hr/papers/final/f0008.pdf>
- [17] Wernli, R. 2000. "Low Cost for Military Applications: Is the Technology Ready?" Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego, California. USA. 2000. <http://www.nosc.mil/robots/pubs/pacon2001a.pdf>

ARTÍCULO

CONSTRUCCIÓN DE BOYA DE DERIVA DE BAJO COSTO

Sandra Carrillo*, **Luis Cárdenas***, **Edgar Vergara***
spcarrillo@gmail.com, lecardenasg@gmail.com, eevv1027@gmail.com

William Cuadrado*, **Juan Contreras****, **Vladimir Díaz*****
escuadradowi@yahoo.com, epcontrerasj@ieee.org, ohcalv@hotmail.com

David Muñoz***, **Alcides Arrieta*****
daviermual@hotmail.com, alcidesramos@yahoo.es

Resumen: Se describe el diseño y construcción de una boya de deriva de bajo costo. Se utilizó tubería PVC para la construcción del elemento flotador, por su bajo costo y fácil consecución. La boya de deriva cuenta con dos sistemas de transmisión: un sistema de transmisión RF con capacidad de 22 kilómetros línea vista; y otro sistema GPRS de comunicación vía celular. La boya monitorea la temperatura del agua cada 5 metros, en un rango de profundidad de 25 metros, y envía esta información, junto con la posición global obtenida por un GPS, a una estación local.

Palabras clave: Boya de Deriva, Estabilidad, Flotabilidad, GPS/GPRS.

Abstract: The design and construction of a low-cost drifting buoy is described. The drifter covers have been constructed using Polyvinyl Chloride (PVC) because of its low cost. The drift buoy has two transmission systems: an RF transmission system, with a capacity of 22 kilometers, and GPS/GPRS tracker. The temperature of the sea is monitored every 5 meters, at a depth of 25 meters; this information, together with the global position obtained by a GPS, are sent to a local station.

Key words: Drifter Buoy, Stability, Floatability GPS/GPRS.

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

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

*** Investigador invitado.

Apoyos y subvenciones: Escuela Naval "Almirante Padilla" - Colciencias (Proyecto código: 1126-452-21250).

INTRODUCCIÓN

Colombia ha sido bendecida al tener dos océanos que le representan una valiosa fuente de recursos y un medio de transporte, comercialización y/o comunicación con otras naciones. Sin embargo, el eficiente aprovechamiento de ese regalo de la naturaleza solo es posible si se tiene un conocimiento amplio de la dinámica de sus mares, de su efecto en el ecosistema y en la geografía de nuestras costas, de su repercusión en el clima, de su efecto en las ciudades costeras y en los recursos hídricos debido al calentamiento global, entre otros aspectos.

El conocimiento pleno de dinámica de las corrientes marinas permitiría determinar o predecir:

- La variación de la línea costera.
- El desplazamiento de vertimientos o derrames de productos contaminantes.
- La ubicación, de manera más precisa, de naufragos.
- La migración y dinámica de reproducción de las especies marinas.
- La predicción de las rutas de tormentas y/o huracanes.

Sin embargo, para lograr este conocimiento, plasmado en modelos matemáticos, es necesario realizar previamente monitoreos de las corrientes marinas y otras variables de influencia, como la temperatura, salinidad, pH, etc., [2], [3], [6], [8] lo cual solo es posible mediante el empleo de boyas de deriva, que tienen un alto costo en el mercado y que, además, por la forma de operación existe una alta probabilidad de no recuperarse una vez botadas al mar.

La utilización de las boyas a la deriva en oceanografía, principalmente para medir las corrientes, tiene una larga historia, aunque la localización de las boyas ha supuesto siempre dificultades. La concepción e instalación de sistemas seguros de satélites, como NIMBUS y EOLE, que pueden detectar plataformas superficiales en todo el mundo, significó la posibilidad, hasta entonces inexistente, de realizar mediciones tanto de las corrientes en alta mar como del medio ambiente. En el último decenio, la tecnología de los satélites ha progresado de modo tal que hoy en día existen plataformas dotadas de material electrónico de costo relativamente bajo que pueden facilitar datos en tiempo real y sin discontinuidad. Cuando a fines de 1978 se lanzó el satélite TIROS-N, se realizó la posibilidad de desplegar operacionalmente amplias redes de

boyas a la deriva que transmiten informaciones por conducto del Sistema Argos. Actualmente las redes que se utilizan para aplicar el Programa Los Océanos Tropicales y la Atmósfera Mundial (TOGA) en el hemisferio meridional siguen empleando el Sistema Argos y transmitiendo datos con fines tanto prácticos como de investigación. Las boyas a la deriva que se utilizan en el Programa TOGA son mucho más seguras que los *drifters* del primer experimento mundial del GARP (FGGE).

El Programa TOGA tiene tres objetivos científicos:

- a) Obtener una descripción de los océanos tropicales y de la atmósfera mundial como sistema cronodependiente, a fin de determinar en qué medida cabe predecirlo en escalas temporales de meses a años, y comprender los mecanismos y procesos que permiten predecir ese sistema.
- b) Estudiar la viabilidad de elaborar un modelo del sistema conjunto océano-atmósfera a fin de predecir sus variaciones.
- c) Proporcionar el fundamento científico necesario para elaborar un sistema de observación y transmisión de datos para predicciones operacionales, si los modelos demuestran que es factible [9].

A nivel internacional existe una tendencia creciente en las investigaciones relacionadas con el modelamiento de corrientes marinas [1], [5], [7] y, por ende, del diseño de nuevos equipos para monitoreo de estas corrientes, bien sea superficiales u oceánicas. De las actividades que se destacan se pueden mencionar las realizadas por el Grupo de Oceanografía Física del Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados IMEDEA, el cual ha logrado desarrollar algunas boyas de deriva de tipo superficiales y oceánicas.

Por otro lado, el proyecto de Establecimiento de un Sistema Español de Oceanografía Operacional ESEOO [4] ha venido trabajando en la obtención de información océano-meteorológica con el fin de desarrollar un sistema de toma de decisiones en caso de un vertido. Este proyecto nació, al parecer, por la situación precaria de la Oceanografía Operacional en España evidenciada durante el derramamiento de crudo ocasionado por el hundimiento del Prestige ocurrido en noviembre de 2002, en el Cabo Finisterre, Galicia, España. En ese entonces, España, Portugal y Francia crearon una célula de previsión para anticipar la deriva con el fin de organizar los desplazamientos de la flota de lucha e informar a las autoridades terrestres. En Francia, un grupo de trabajo se estableció, integrando los especialistas de deriva de Meteo France, de la Marina nacional francesa y del Cedre para establecer y controlar la deriva de las manchas susceptibles de penetrar por el sur del Golfo de Gascuña (Vizcaya). Rápidamente

transformada en comisión técnica por la iniciativa de la Secretaría General del Mar, reagrupó los expertos de Meteo France, del SHOM, de IFREMER y del Cedre y se encargó diariamente de proporcionar al Prefecto Marítimo del Atlántico datos coherentes y apropiados sobre la deriva de las manchas. El comité, que trabajaba en contacto directo con los observadores y modelizadores portugueses y españoles, realizaba todas las tardes un mapa con las observaciones diarias y las previsiones de tres días.

1. BOYAS DE DERIVA

Las primeras mediciones mediante boyas a la deriva de que se tiene noticia fueron llevadas a cabo por Leonardo da Vinci (1452-1519), para medir la velocidad del agua de las corrientes. Lanzando al agua un simple flotador, consistente en un vástago compensado y una vejiga de flotación, y midiendo la distancia recorrida corriente abajo al cabo de cierto tiempo, pudo obtener datos suficientes para calcular el caudal real de la corriente.

Una boya de deriva es una plataforma diseñada para moverse con la corriente oceánica. Para lograrlo, la boya de deriva tiene que incorporar un dispositivo de flotación, o flotador, y un elemento de arrastre que va sumergido y sujeto a la parte inferior del flotador para permitir que las corrientes marinas arrastren la boya de deriva.

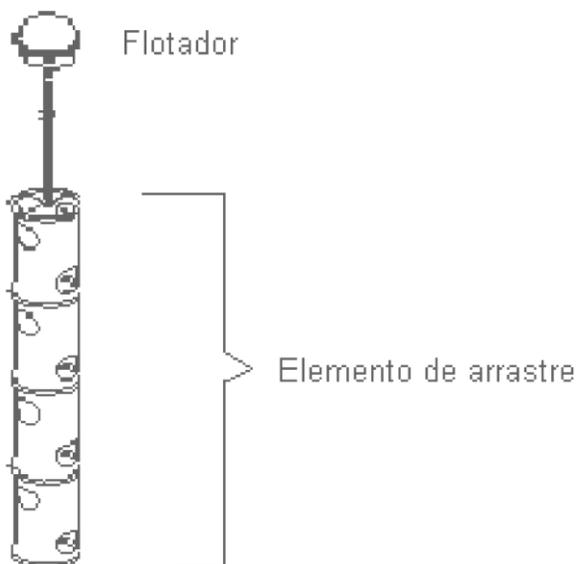


Figura 1. Boya de deriva

Es posible distinguir dos tipos de boyas de deriva. Las boyas de deriva superficiales tienen un flotador en la superficie y pueden por lo tanto transmitir datos vía satélite. Si se las diseña para recoger la información de la superficie del océano, estas van con instrumentos meteorológicos ubicados encima del flotador y un sensor de temperatura, y ocasionalmente un sensor de salinidad debajo del flotador. Para evitar que los fuertes vientos arrastren las boyas fuera del área de interés, estas se acondicionan con un “sistema de arrastre o peso muerto” a una cierta profundidad. Si se diseñan para dar información sobre las características subsuperficiales del océano, los sensores adicionales se colocan entre el flotador superficial y el peso muerto. El rango de profundidad de las boyas superficiales generalmente se limita a menos de 100 m.

Los flotadores usados para boyas de deriva subsuperficiales se diseñan de tal manera que para una profundidad dada, tengan flotabilidad neutra. Estas boyas se han utilizado para seguir corrientes oceánicas a distintas profundidades, que van desde algunos cientos de metros hasta profundidades por debajo de 1000 m. Los primeros de tales flotadores transmitían sus datos acústicamente a través del océano a las estaciones costeras de recepción. Debido a que el sonido viaja bien en la profundidad del mínimo de la velocidad sónica (el canal del sonido o SOFAR, el cual se encuentra a unos 1000 m de profundidad), estos flotadores tipo SOFAR se pueden utilizar solamente en profundidades cercanas a los 1000 m.

Los flotadores subsuperficiales modernos permanecen hundidos por varias semanas y salen brevemente a la superficie para transmitir sus datos a un satélite para luego regresar a su profundidad asignada. Por lo tanto, estos flotadores se pueden programar para estudiar cualquier profundidad y pueden también medir datos de temperatura y salinidad (CTD) durante su ascenso a la superficie. El arsenal más completo de tales flotadores, conocido como Argo, comenzó en el año 2000. Los flotadores Argo miden la temperatura y salinidad por encima de los 2000 m del océano. Esto permitirá un continuo monitoreo del estado del clima oceánico, con todos los datos que son retransmitidos y disponibles al público horas después de la colección. Cuando el programa Argo sea completamente operativo, en cualquier momento habrá unos 3000 flotadores en los océanos del mundo.

2. DESARROLLO DE BOYA DE DERIVA DE BAJO COSTO

2.1 Diseño del flotador

Inicialmente se desarrolló una boya cilíndrica de PVC de 0,076 m de radio exterior, 0,3 m de altura y 0,004 m de espesor, que flota en agua de mar con su eje vertical y con dos tercios de su altura sumergidos. Una cadena del mismo material de la boya cuelga de su base con el fin de garantizar su estabilidad. Posteriormente se fue modi-

ficando el diseño hasta obtener el modelo de una boya (Figura 2) con las siguientes características:

MODELO BOYA 2 (L= 2m)

	kg
$m_{unión}$	0.613398
m_{adap}	0.613398
m_{tapa}	0.113398
m_{cuerpo}	5.9675
$m_{totalboya}$	7.307694

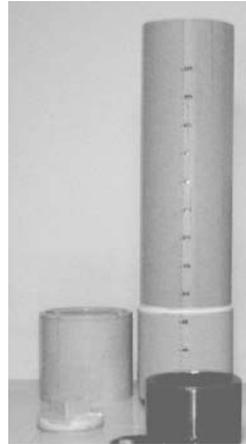


Figura 2. Modelo boya 2

Densidad del agua de mar: 1025 kg/m³.

Densidad del material de la boya: 1450 kg/m³.

Peso estimado $m_{peso} = 7.4$ kg

Datos de entrada

π	3.1416	
ρ	0.086	m
∇	0.02566604	m ³
η	1.10461548	m
dagua	1025	kg/m ³
dboya	1450	kg/m ³

Cálculos

Vext	0.02566604	m ³
Vint	0.01263239	m ³
Vboy	0.01303365	m ³
Masa boya	18.8987922	kg
Masa agua des.	26.307694	kg
Masa del peso	7.40890183	kg

Para lo cual se toma el modelo final de boya con la altura de 2 m acoplada con la vela, pesos y contrapeso.

	kg
$m_{unión}$	0.613398
m_{adap}	0.613398
m_{tapa}	0.113398
m_{cuerpo}	5.9675
$m_{totalboya}$	7.307694

DESPLAZAMIENTO TOTAL DE LA BOYA CON PESOS

	kg
$m_{totalboya}$	7.307694
m_{peso}	7
$m_{contrapeso}$	8
m_{vela}	4
m_{total}	26.307694

Para calcular la altura de la boya sumergida, se utiliza el principio de Arquímedes:

$$\nabla = \Delta \cdot \rho$$

Donde:

- Δ es el desplazamiento y se expresa en toneladas (1.000 kilos)
- ∇ es el volumen desplazado o sumergido y
- ρ es la densidad del líquido en el que flota, con 1025 kg/m³ para el agua del mar.

Por tanto el volumen sumergido:

Δ	26.307694	kg
ρ	1025	kg/m ³
∇	0.02566604	m³

$$V_{cilindro} = \pi r^2 h$$

Entonces $h = V_{\text{cilindro}} / \pi r^2$

pi	3.1416	
r	0.086	m
∇	0.02566604	m ³
h	1.10461548	m

La boya tendrá un calado de 1.10 m en teoría. En la Figura 2 se muestra el flotador en PVC de manera gráfica para indicar cada término utilizado en los cálculos de flotabilidad y estabilidad, y el desarrollo de sus fórmulas. El cilindro flota en el agua con densidad ρ , con una profundidad de inmersión h . El centro de flotación es C , mientras que G_c y G_b son los centros de gravedad del cilindro y del lastre, respectivamente. El centro de gravedad final es G y su metacentro es M . Otras dimensiones están mostradas en la figura. La masas del lastre, m_b , será medidas durante la actividad.

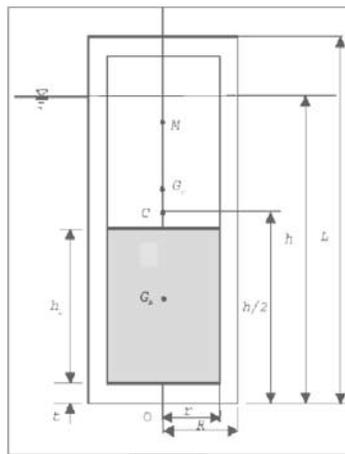


Figura 3. Flotador

La altura del cilindro sumergido h , en términos del radio del cilindro R , de la densidad del líquido ρ y de las masas m_c y m_b , está dada por:

$$h = \frac{(m_c + m_b)}{\pi R^2 \rho}$$

La fórmula para el centro de gravedad referenciado OG en términos de las dimensiones del cilindro con el lastre y las masas, m_c y m_b es:

$$OG = \frac{(OG_c \cdot m_c + OG_b \cdot m_b)}{m_c + m_b} = \frac{(m_c \cdot L / 2 + m_b \cdot (h_b / 2 + t))}{m_c + m_b}$$

La altura metacéntrica, GM , se obtiene entonces a partir de:

$$GM = CM - CG = CM - (OG - OC)$$

$$GM = \frac{I_0}{V} - \frac{(m_c \cdot L / 2 + m_b \cdot (h_b / 2 + t))}{m_c + m_b} + \frac{h}{2}$$

$$GM = \frac{R^2}{4h} - \frac{(m_c \cdot L / 2 + m_b \cdot (h_b / 2 + t))}{m_c + m_b} + \frac{h}{2}$$

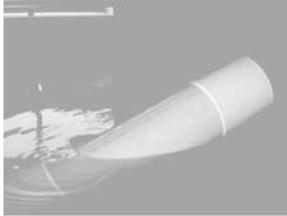
Nomenclatura utilizada:

M	Metacentro
h	Altura del cilindro sumergido
h_b	Altura del lastre
L	Altura del cilindro
hi	Distancia desde "O" hasta la base de las pesas
G_b	Centro de gravedad del lastre
G_c	Centro de gravedad cilindro
C	Centroide volumen sumergido
O	Punto de referencia de medidas
r	Radio interno
R	Radio exterior
t	Espesor
h_i	Altura de la base a las masas
m_c	Masa cilindro
m_b	Masa lastre
OG	Centro de gravedad referenciado en O
GM	Altura metacéntrica
CG	Distancia desde el centroide y centro de gravedad
OC	Distancia del centroide referenciada en O
I_0	Momento de inercia plano de flotación

DESARROLLO DE ENSAYOS

A continuación se muestran los ensayos obtenidos en laboratorios para determinar la flotabilidad y estabilidad adecuada para nuestras condiciones. Estas pruebas fueron inicialmente realizadas en el tanque de prueba de la Escuela Naval, posteriormente en piscina y después en mar abierto, para lo cual se realizó la corrección de la densidad.

ENSAYO 1



h_i (m)	0.07
R (m)	0.084
L (m)	0.748
m_c (kg)	7.307694
m_b (kg)	0
h (m)	0.42
h_b (m)	0.102
OG (m)	0.374
GM (m)	0.584

ENSAYO 2



h_{i1} (m)	0.07	h_{i2} (m)	0.023
R (m)	0.084	R (m)	0.084
L (m)	0.748	L (m)	0.748
m_c (kg)	7.307694	m_c (kg)	7.307694
m_{b1} (kg)	0	m_{b2} (kg)	0
h (m)	0.48	h (m)	0.48
h_{b1} (m)	0.102	h_{b1} (m)	0
OG (m)	0.374		
GM (m)	0.614		

ENSAYO 3



h_i (m)	0.07	h_{i2} (m)	0.023
R (m)	0.084	R (m)	0.084
L (m)	0.748	L (m)	0.748
m_c (kg)	7.307694	m_c (kg)	7.307694
m_b (kg)	0	m_{b2} (kg)	0
h (m)	0.545	h (m)	0.545
h_b (m)	0	h_{b1} (m)	0
OG (m)	0.374		
GM (m)	0.6465		

ENSAYO 4


h_1 (m)	0.07	h_{12} (m)	0.023
R (m)	0.084	R (m)	0.084
L (m)	0.748	L (m)	0.748
m_c (kg)	7.307694	m_c (kg)	7.307694
m_b (kg)	0	m_{b2} (kg)	0
h (m)	0.59	h (m)	0.59
h_b (m)	0.102	h_{b1} (m)	0
OG (m)	0.374		
GM (m)	0.669		

ENSAYO 5


h_1 (m)	0.07	h_{12} (m)	0.023
R (m)	0.084	R (m)	0.084
L (m)	0.748	L (m)	0.748
m_c (kg)	7.307694	m_c (kg)	7.307694
m_b (kg)	0	m_{b2} (kg)	0
h (m)	0.64	h (m)	0.64
h_b (m)	0.102	h_{b1} (m)	0
OG (m)	0.374		
GM (m)	0.694		

Descartando los resultados obtenidos en el ensayo 1, ya que como se pudo apreciar en la fotografía, es inestable, se realiza la corrección por densidad:

ensayo	(mb)	h_{fw} (m)	h_{sw} (m)	ρ_{sw}/ρ_{fw}
2	6.475	0.48	0.47	1.021276596
3	7.541	0.545	0.53	1.028301887
4	8.602	0.59	0.58	1.017241379
5	9.659	0.64	0.62	1.032258065
Resultado promedio experimental				1.024769482

La Figura 4 muestra la estabilidad del flotador de la boya de deriva en las pruebas de mar realizadas.



Figura 4. Prueba de estabilidad del flotador de la boya de deriva

2.2 Sistema de transmisión de datos de la boya de deriva

La boya de deriva cuenta con dos sistemas de transmisión: un sistema de transmisión RF con capacidad de 22 kilómetros línea vista; y otro sistema GPRS de comunicación vía celular. Para el sistema de comunicación RF fue necesario montar una antena y realizar una extensión del conductor en unos 15 metros.

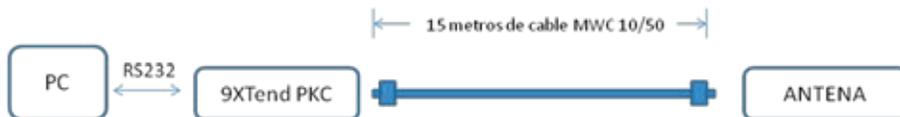


Figura 5. Conexión de la antena RF al computador

El equipo trabaja a una frecuencia de 900 MHz por tanto implementó 15 metros de cable de 14 dB/100m en baja atenuación, siendo la especificación MWC 10/50 de cable coaxial de Nordix. Con el fin de corroborar que el cable de 15 metros no afectaba el sistema, se realizó la medición del análisis espectral de la señal al prolongar el cable de 15 metros obteniendo que se mantiene la señal en 910 MHz como frecuencia central. Se realizó una prueba de transmisión desde la coordenada $10^{\circ} 23' 22.75''$ N, $75^{\circ} 31' 54.67''$ W (Punto A) haciendo recorrido entre $10^{\circ} 24' 3.042''$ N, $75^{\circ} 23' 11.052''$ W (Punto C) y la coordenada $10^{\circ} 23' 32.118''$ N, $75^{\circ} 32' 46.5252''$ W (Punto B) de la Figura 6.

Para la comunicación vía celular se incluyó el sistema modem GM862 que integra GPRS, GSM y GPS, como se muestra en la Figura 7.



Figura 6. Pruebas del sistema de transmisión RF

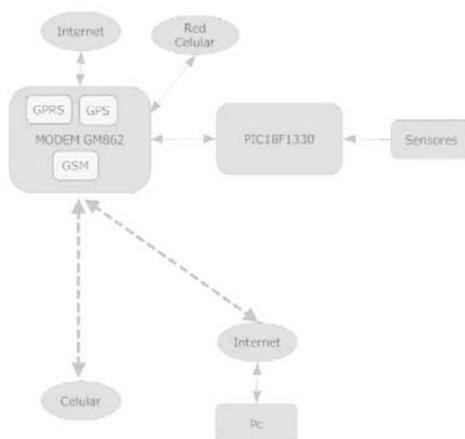


Figura 7. Sistema de comunicación celular

El módulo está conectado permanentemente tanto a la red celular como a Internet y a la red satelital GPS. Y comunicado de manera bi-direccional vía RS232 con un microcontrolador.

La lógica de operación del dispositivo es:

1. EL módulo se conecta a la red celular GSM, al Internet GPS y a la red Satelital GPS.
2. El módulo envía un mensaje de texto a un teléfono previamente establecido y modificable por software en el PC de la dirección IP que tomó de la red GPRS o conexión a Internet.

3. Cuando se utilice la aplicación en el PC que debe estar conectado a Internet en cualquier parte del planeta, se le debe dar la dirección IP del dispositivo y se conecta mediante un enlace TCP/IP al módulo y recibe información en tiempo real de la posición de la boya y de los sensores utilizados, para el caso temperatura.

Si por alguna razón el módulo perdió la IP asignada y toma una diferente, lo notifica vía GSM con un mensaje de texto a una línea celular.

El módulo puede manejarse vía celular de la siguiente manera:

1. Vía celular se puede enviar un mensaje al módulo con una frase programada y este envía al celular que envió el mensaje, la dirección IP que ha tomado de Internet.
2. Si se envía el mensaje de texto con otra palabra programada, el módulo será capaz de regresar un mensaje de texto al celular que envió el mensaje con los datos de la posición de la boya y los sensores leídos.

La aplicación en el PC puede programar al módulo para que analice la información que recibe y si está fuera de unos parámetros establecidos lo avise a un número de celular vía mensaje de texto.

Es indispensable que la simcard utilizada en el modem tenga plan de datos preferiblemente ilimitado. Sin embargo debido a que el módulo permanece en bajo consumo de energía esperando que se le solicite envío de información por GPRS y al ser una información de pocos bytes no es costoso; puede tener simplemente saldo, en este caso el operario tendría que recargar la simcard cada vez que se agote el saldo con un valor determinado, en caso que se apruebe el plan de datos ilimitado para la boya.

3. CONCLUSIONES

Se presenta el diseño del flotador de una boya de deriva en PVC, empleando tubería comercial como la utilizada para instalaciones sanitarias. Para la comunicación se utilizan dos sistemas: uno basado en transmisión RF, el cual presenta como desventaja que el receptor-emisor debe estar a línea de vista; la segunda alternativa emplea GPRS, lo cual posibilita el acceso a la información de la boya desde un celular o desde un computador personal.

La boya de deriva desarrollada es de muy bajo costo, lo cual posibilita el acceso de estos equipos a las entidades interesadas en conocer la dinámica de las corrientes marinas en nuestras costas.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo logístico y económico brindado por la Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”, la Fundación Wise Innovations y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS (Proyecto código: 1126-452-21250).

REFERENCIAS

- [1] Gomis, D.; Ruiz, S.; Sotillo, M. G.; Alvarez_Fanjul, E.; Terradas, J. Low Frequency Sea Level Variability in the Mediterranean Sea: The Contribution of Atmospheric Pressure and Wind. *Globay Research Abstract*. Vol. 9. 2007.
- [2] Jian_Hwa, Hu; You, J. W.; Lee, I. H.; Huang, C. Y.; Ou, C. H. The Development and Application of GPS Drifter for Ocean Current Measurement. In *Proceedings of IEEE Fifth Working Conference on Current Measurement*. Vol. 7(9), pp. 169-176. 1995.
- [3] Martínez, M.; Garau, B.; Roig, D.; Álvarez, A.; Tintore, J. Electronic Design in a Low-Cost Autonomous Vehicle for Coastal Sea Monitoring. In *Proceedings of Second International Workshop on Marine Technology, MARTECH 2007*, Vilanova y la Geltru, Barcelona, España, 2007.
- [4] Medina, R. Los modelos de deriva en la predicción de vertidos, 1ª. Jornada Científico-Técnica de Lucha contra la Contaminación Marina, A. Coruña, España, 2006.
- [5] Nural, A.; Nittel, S.; Trigoni, N.; Pettigrew, N. A Model for Motion Pattern in Ocean Drifter Networks. In *Proceedings of The Conference on Coastal Environmental Sensing Networks* CESN. Boston. 2007.
- [6] Wilson, T. C.; Barth, J. A.; Kosro, P. M.; Waldorf, B. W. A Lagrangian drifter with inexpensive wide area differential GPS positioning, *Proceedings of the OCEAN'96 MTS/IEEE Conference*, Vol. 2, pp. 851-856, 1996.
- [7] Tweedie, M. S.; Stanitski, D. M.; Snyder, H. D.; Hammond, J. N. Follow the World's Ocean Currents with the Ocean's Surface Currents Web Side and Adopt a Drifter Program. *Marine Technology Society Journal*, Vol. 39(4), pp. 83-89. USA. 2006.
- [8] Yang, X.; Ong., K. G.; Dreschel, W. R.; Zeng, K.; Mungle, C. S.; Grimes, C. A. Design of a Wireless Sensor Networks for Long Term, *In Situ Monitoring of an Aqueous Environment, Sensors*, Vol. 2, pp. 455-472. 2002.

- [9] Organización Meteorológica Mundial, Guía de Utilización de Boyas a la Deriva para Acopio e Intercambio de Datos Oceanográficos. Comisión Oceanográfica Intergubernamental, UNESCO, 1998.

ARTÍCULO

CLASIFICACIÓN DE FIRMAS ACÚSTICAS SUBACUÁTICAS EMPLEANDO IDENTIFICADOR DIFUSO

Francisco José Castañeda Angulo*

francho79@gmail.com

Juan Antonio Contreras Montes**

epcontrerasj@yahoo.com

Resumen: Se describe la aplicación de un nuevo método de identificación difusa para clasificar señales acústicas subacuáticas. Las señales acústicas son recopiladas y clasificadas previamente de acuerdo al tipo de embarcación. En el proceso de entrenamiento se utiliza como señal de entrada las densidades espectrales de cada muestra y como salida, el tipo de embarcación o clase a la que pertenecen. La estructura del modelo difuso para predicción de la posición futura de la plataforma consiste de la partición triangular de las variables de entrada con solapamiento en 0.5 para no afectar la interpretabilidad del modelo. Los consecuentes son tipo singleton y se ajustan de manera automática empleando mínimos cuadrados recursivos.

Palabras clave: Señales Acústicas Subacuáticas, Densidad Espectral, Identificación Borrosa, Mínimos Cuadrados Recursivos.

Abstract: The application of a new fuzzy identification method for underwater acoustic signal classification is described. The acoustic signals are previously gathered and classified according to the type of vessel. In the training process the spectral densities of each sample are used as input signals and the type of vessel or class to which they belong are used as output signals. The fuzzy model structure for prediction of the vessel's future position consists of the triangular partition of the input variables with an overlapping of 0.5 so that the model interpretation would not be affected. The consequents are of the singleton type and they are automatically adjusted using minimal recursive squares.

Key words: Underwater Acoustic Signals, Spectral Density, Fuzzy Identification, Minimal Squares.

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

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

INTRODUCCIÓN

Los amplios escenarios de la guerra moderna, presentan complejos estudios en los procesos y técnicas de detección de blancos ya sean aéreos, de superficie o submarinos. Dando un enfoque más preciso, y enmarcando el estudio en la guerra submarina, y desde la invención del submarino, conocido como el “arma silente” y de su ingeniosa aplicación bélica, fundamentalmente en la Segunda Guerra Mundial, cuando se afianza la efectividad de dicho invento, y hasta nuestros días, cualquier potencia contemporánea le ha apostado a la optimización de dichos artefactos y en especial a los métodos para su detección, teniendo en cuenta la evolución que estos han tenido.

Dentro de los procesos de detección, se ha buscado desde principios de los años 90, profundizar los estudios en el importante proceso de clasificación, constituyéndose en uno de los mayores desafíos que se deben afrontar al momento de presentarse este tipo de amenazas, teniendo en cuenta la limitada capacidad de obtener información sobre el entorno submarino.

Por estas razones se hizo necesario desarrollar la posibilidad de clasificar y eventualmente identificar los contactos analizando los rumores que son generados por cualquier artefacto naval, teniendo en cuenta que normalmente este trabajo es llevado a cabo por los operadores de sonar (sonaristas) mediante la comparación aural basándose en su experiencia y habilidades adquiridas.

El complejo proceso de clasificación e identificación está enmarcado en la ciencia conocida como “La acústica subacuática”, la cual se encarga del estudio del comportamiento del sonido en el agua, siendo la base fundamental del presente estudio, permitiendo el desarrollo a nivel mundial de sistemas que solucionen nuevas necesidades y vayan a la par del creciente aumento tecnológico. Como punto de partida, la acústica subacuática nos permitirá adentrarnos en el amplio campo de la investigación, explotación y regulación de los efectos secundarios que conlleva el uso del agua como canal de información, siendo conscientes que las ondas acústicas se han constituido en el vehículo de transporte de energía y cantidad de movimiento, mas no de materia.

Ahora bien, dentro de los estudios lo que se busca es abarcar todas las posibles consideraciones que se deben tener presentes en la medición de las firmas acústicas

o ruido radiado, lo que permite conocer el nivel de presión sonora emitido por el objeto medido, las características espectrales y lo más importante, la variación del ruido en el dominio del tiempo (variación temporal de la amplitud) y de la frecuencia (estudio de los componentes de la frecuencia presentes), haciendo especial énfasis las pertinentes conversiones del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia por medio de algoritmos matemáticos basados en la Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform-FFT) y algoritmos de Identificación Difusa.

El análisis de señales acústicas subacuáticas para clasificación de embarcaciones ha sido un tema de gran interés por parte de la comunidad científica. En el año 1990, Boashash y O'Shea [1] propusieron un método para identificación de firmas acústicas subacuáticas empleando técnicas de análisis en Tiempo-Frecuencia. Xiang-Dong *et al.* [19] presentaron en 2006 un método basado en lógica difusa para identificación de vehículos subacuáticos de alta velocidad a partir de las señales acústicas emitidas. También en 2006, Wang y Zhang [18] presentaron un novedoso método de Distribución Espacial Tiempo-Frecuencia de las señales acústicas. Si-chun *et al.* [16] presentaron en 2009 una propuesta para clasificación de embarcaciones a partir de sus señales acústicas empleando un algoritmo entrenado con redes neuronales y basado en el bi-espectro cruzado. También se han desarrollado aportes significativos a la investigación en este campo mediante trabajos de grado, como el presentado por Mario Veloso [17] en el año 2007, para optar al título en Ingeniería Acústica de la Universidad Austral de Chile, donde se exponen distintas simulaciones de los campos sonoros emitidos por fuentes puntuales y arreglos lineales a partir del Método de Diferencias Finitas MDF en medio homogéneo y estratificado, con el fin de representar un modelo realista del fenómeno de propagación de ondas en medio marino.

En cuanto al desarrollo de sistemas difusos para modelamiento y/o clasificación, se ha demostrado la capacidad de estos sistemas para describir los sistemas reales de manera similar a como lo interpreta un operador humano. Inicialmente, un sistema difuso era construido a partir de la información suministrada por un experto. Sin embargo, muy pronto apareció el problema de que para sistemas complejos y parcialmente desconocidos el modelo difuso así construido no alcanzaba resultados satisfactorios [9]. Por esta razón, en los últimos años se ha presentado un creciente auge en el desarrollo de métodos automáticos para construir un sistema difuso a partir de datos experimentales de entrada y salida [2]-[12], [14], [15].

En la Armada Nacional de Colombia, es de suma importancia lograr el desarrollo de un sistema de estas características, para su explotación a bordo de las unidades mayores tanto de superficie como submarinas, unidades que hoy día cuentan con los sensores

necesarios para la obtención de las firmas acústicas más comúnmente presentes en el desarrollo de las diferentes operaciones, en especial contra el narcotráfico y el transporte ilegal de armas y explosivos.

1. MÉTODO DE IDENTIFICACIÓN DIFUSA

1.1 Estructura del Modelo Borroso

Buscando un equilibrio entre la aproximación numérica y la interpretabilidad del sistema borroso resultante se consideran los siguientes criterios para la selección de los parámetros:

Funciones de Pertenencia

La partición de los universos de las variables de entrada en el proceso de aprendizaje se hace con conjuntos triangulares normalizados con solapamiento específico de 0.5. Las funciones de pertenencia triangulares permiten la reconstrucción del valor lingüístico en el mismo valor numérico, luego de aplicar un método de defuzzyficación [13]; además, el solapamiento en 0.5 asegura que los soportes de los conjuntos difusos sean diferentes. Los conjuntos difusos generados para la variable de salida son tipo singleton.

Distribución de las Funciones de Pertenencia

Los conjuntos difusos triangulares de las variables de entrada se distribuyen uniformemente en cada universo respectivo de manera tal que cada uno de los elementos de los universos de discurso de cada variable debe pertenecer, al menos, a un conjunto difuso.

Operadores

Para la combinación de los antecedentes se emplea un operador de combinación tipo OWA, como se muestra en (6).

Método de Inferencia

El método de inferencia empleado está dado por

$$f(x^{(i)}) = \frac{\sum_{j=1}^L \delta_j m_j(x^{(i)})}{\sum_{j=1}^L m_j(x^{(i)})} \quad (5)$$

donde

$$m_j(x^{(i)}) = u_{A_1^j}(x_1^{(i)}) u_{A_2^j}(x_2^{(i)}) \dots u_{A_n^j}(x_n^{(i)}) = \frac{u_{A_1^j}(x_1^{(i)}) + u_{A_2^j}(x_2^{(i)}) + \dots + u_{A_n^j}(x_n^{(i)})}{n} \quad (6)$$

es el grado de la salida de la j -ésima regla con n antecedentes, δ_j es el valor del singleton correspondiente a la regla j .

Método de Ajuste de Parámetros Consecuentes

El ajuste de los parámetros consecuentes, o singletons de salida, se realiza empleando el método de mínimos cuadrados. La ecuación (5) puede expresarse de la forma

$$f(x^{(i)}) = \sum_{j=1}^L \delta_j \cdot w_j(x^{(i)}) \tag{7}$$

donde

$$w_j(x^{(i)}) = \frac{m_j(x^{(i)})}{\sum_{j=1}^L m_j(x^{(i)})} = w_j^i \tag{8}$$

Los valores de salida pueden representarse como $Y = W\theta + E$, que en forma matricial está dada por

$$\begin{bmatrix} y^1 \\ y^2 \\ \vdots \\ y^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1^1 & w_2^1 & \dots & w_L^1 \\ w_1^2 & w_2^2 & \dots & w_L^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1^n & w_2^n & \dots & w_L^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta^1 \\ \theta^2 \\ \vdots \\ \theta^L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \tag{9}$$

donde E es el error de aproximación, el cual debe ser minimizado. Empleando la norma del error cuadrático se tiene

$$E^2 = (Y - W\theta)^2 = (Y^2 - 2YW\theta + (W\theta)^2) \tag{10}$$

La solución a este problema de mínimos cuadrados está dada por

$$\frac{\partial E^2}{\partial \theta} = 0 = -2YW + 2W^T W\theta \tag{11}$$

de donde se obtiene

$$\theta = \frac{Y^T W}{W^T W} = (W^T W)^{-1} Y^T W \tag{12}$$

Esta solución es válida si $(W^T W)$ es no singular; en caso contrario la estimación por mínimos cuadrados debe hacerse de manera recursiva.

1.2 Algoritmo de identificación borrosa

El algoritmo solo requiere de la definición previa de la forma de las funciones de pertenencia que conformarán la partición del antecedente y calcula el número y la distribución final de las funciones de pertenencia del antecedente, garantizando partición suma 1, así como las posiciones de los consecuentes, del tipo singleton.

A partir de una colección de datos experimentales de entrada y salida $\{x_k, y_k\}$, $k = 1, \dots, N$, donde x_k es el vector de entrada p-dimensional $x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^p$ y y_k es el vector unidimensional de salida, el primer paso consiste en la organización del conjunto de N pares de datos de entrada-salida $\{(x_i, y_i) \mid i = 1, 2, \dots, N\}$, donde $x_i \in \mathcal{R}^p$ son vectores de entrada y y_i son escalares de salida. El algoritmo se describe en el siguiente diagrama de flujo.

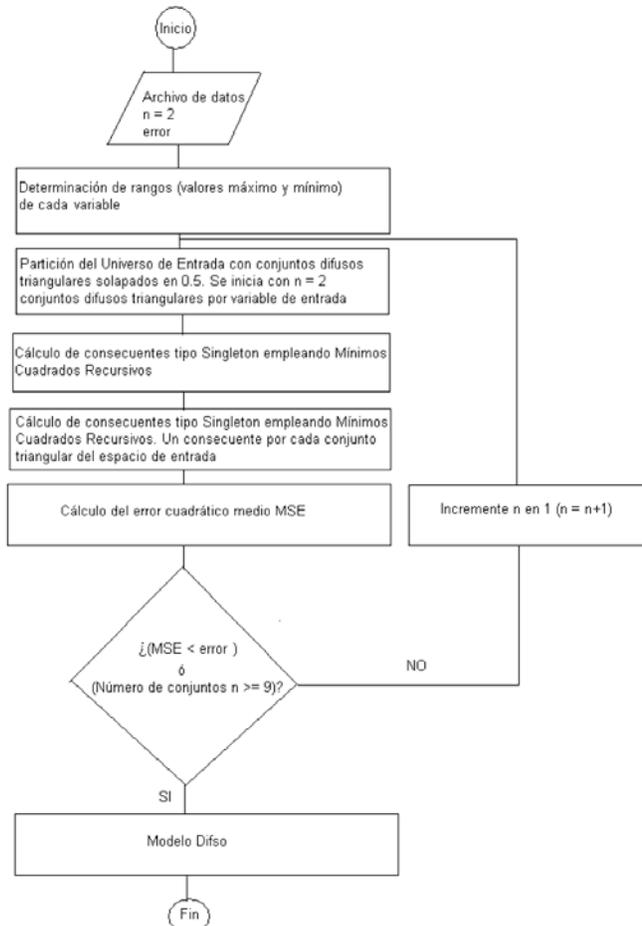


Figura 1. Algoritmo de identificación difusa

Con el algoritmo descrito se consigue un modelo difuso interpretable con una buena precisión y solo se requiere del ajuste de los parámetros del consecuente, que son tipo singleton, lo que disminuye el tiempo de entrenamiento. Es posible lograr una mayor aproximación (“ajuste fino”) si al finalizar el proceso mencionado se aplica el método del gradiente descendiente para ajustar la ubicación de los valores modales de los conjuntos triangulares del antecedente, conservando la partición suma 1 y, por lo tanto la interpretabilidad del sistema, como explica Espinosa [6], [7].

2. RESULTADOS

Procesos de identificación y detección de lanchas rápidas y buques de guerra mediante sus firmas acústicas

Se realizó el entrenamiento utilizando una base de datos suministrada por el submarino ARC “Pijao”. Se consideraron 9 archivos de sonido de lanchas rápidas y 10 archivos de buques de guerra. Las Figuras 2 y 3, muestran los espectros de frecuencias de las señales de sonido analizadas para las lanchas rápidas y los buques de guerra respectivamente.

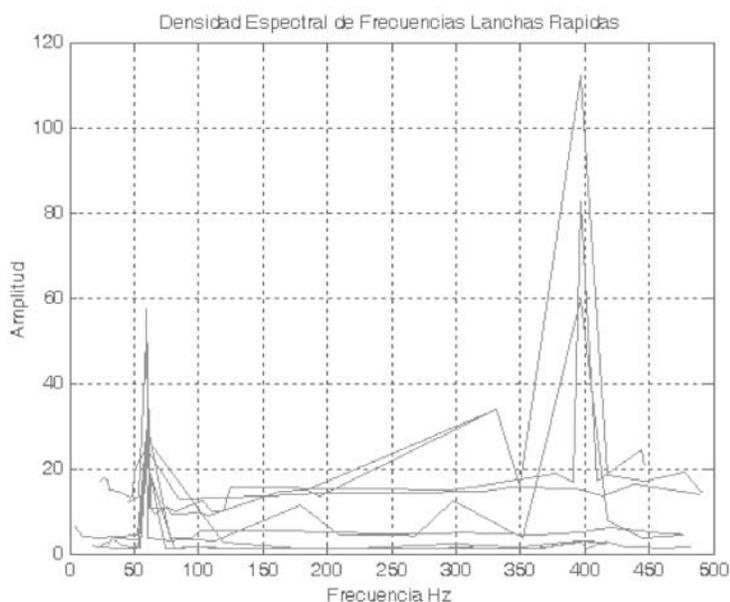


Figura 2. Espectro de frecuencias archivos lanchas rápidas

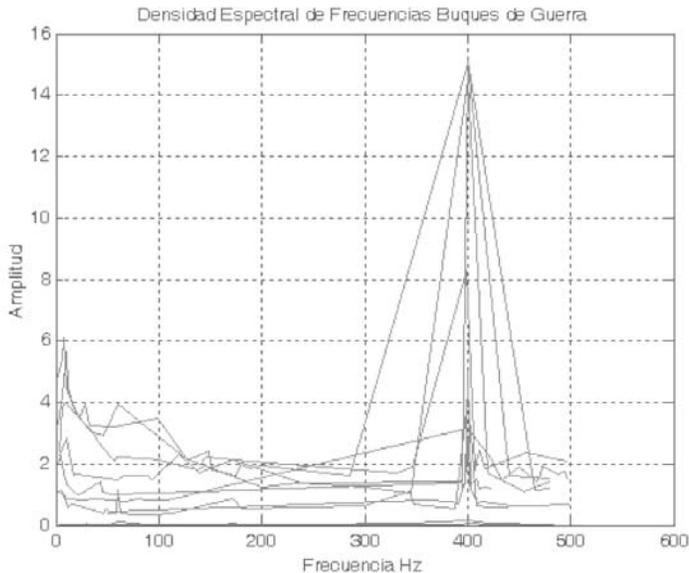


Figura 3. Espectro de frecuencias archivos buques de guerra

El algoritmo de entrenamiento tomó como entradas las 20 potencias más significativas del espectro de frecuencia de cada embarcación. Se clasificaron las lanchas rápidas como clase uno (valor 1) y los buques de guerra como clase cinco (valor 5). De esta manera, se obtienen dos modelos difusos. Cuando se ingrese un archivo de densidad espectral de la firma acústica de una embarcación, un modelo difuso arrojará un valor cercano a 1 para indicar que se está en presencia de una lancha rápida, y el otro modelo difuso arrojará un valor cercano a 5 para indicar que se trata de un buque de guerra. La clase que más se aproxime (menor error de desviación) será la que el sistema defina como el tipo de embarcación.

Cuando se sometieron las señales de 9 embarcaciones tipo lancha rápida, los errores que arrojaron los modelos están descritos en la Tabla 1.

La precisión alcanzada fue del 66,66%. Se revisaron los 3 archivos de datos que no fueron correctamente clasificados y se encontró que presentaban un bajo nivel de potencia con respecto al resto de las señales. La información suministrada no incluyó la distancia de la embarcación lo que impidió hacer el ajuste necesario para optimizar el algoritmo de clasificación.

TABLA 1
ERRORES ARROJADOS SEÑALES LANCHAS RÁPIDAS

Error Modelo Difuso 1 (Lancha Rápida)	Error Modelo Difuso 2 (Buque de Guerra)	Clasificación
0.0129	0.2901	Lancha Rápida
0.1705	0.1268	Buque de Guerra
0.0742	0.2059	Lancha Rápida
0.1977	0.1035	Buque de Guerra
0.3957	0.6136	Lancha Rápida
0.4146	0.6531	Lancha Rápida
0.1983	0.1038	Buque de Guerra
0.2681	0.4915	Lancha Rápida
0.4109	0.6522	Lancha Rápida

Cuando se sometieron las señales de 10 embarcaciones tipo buque de guerra, los errores que arrojaron los modelos están descritos en la Tabla 2.

TABLA 2
ERRORES ARROJADOS SEÑALES BUQUES DE GUERRA

Error Modelo Difuso 1 (Lancha Rápida)	Error Modelo Difuso 2 (Buque de Guerra)	Clasificación
0.2904	0.0301	Buque de Guerra
0.2665	0.0506	Buque de Guerra
0.2916	0.0290	Buque de Guerra
0.2140	0.0951	Buque de Guerra
0.1672	0.1299	Buque de Guerra
0.1578	0.1381	Buque de Guerra
0.2576	0.0588	Buque de Guerra
0.2406	0.0718	Buque de Guerra
0.2438	0.0690	Buque de Guerra
0.1965	0.1091	Buque de Guerra

Como se aprecia, la precisión alcanzada fue del 100%.

3. CONCLUSIONES

Se presenta un método de identificación difusa a partir de datos experimentales de entrada y salida, con ajuste de parámetros consecuentes, tipo singleton, mediante mínimos cuadrados. El método de modelamiento, basado en lógica difusa, no requiere del empleo de otras técnicas de inteligencia artificial.

En el proceso de entrenamiento se consideraron dos tipos de embarcaciones, lanchas rápidas y buques de guerra, por lo que se generaron dos modelos difusos. Los datos de las densidades espectrales de las señales acústicas son ingresados a cada modelo difuso y el que arroje menor error de precisión será el que defina la clase o tipo de embarcación.

Si se incluye el dato de la distancia del vehículo al cual se le está recopilando la señal acústica, se puede mejorar la precisión del sistema de detección y clasificación.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo logístico y económico brindado por la Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”, la Fundación Wise Innovations y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS (Proyecto código: 1126-425-20747).

REFERENCIAS

- [1] Boashash, B.; O’Shea, P. (1990). “A Methodology for Detection and Classification of Some Underwater Acoustic Signals Using Time-Frequency Analysis Techniques”. *IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing*. Vol. 8, No. 11, pp. 1829-1841.
- [2] Chen, W. and Saif, M. (2005). “A Novel Fuzzy System With Dynamic Rule Base”, *IEEE Trans. Fuzzy Systems*. Vol. 13, No. 5, pp. 569-582.
- [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, pp. 70-77.
- [4] Contreras, J.; Misa, R.; Murillo, L. (2007). Interpretable Fuzzy Models from Data and Adaptive Fuzzy Control: A New Approach. In *Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. pp. 1591-1596. ISBN: 1-4244-1210-2.
- [5] Díez, J. L.; Navarro, J. L.; Sala, A. (2004). Algoritmos de Agrupamiento en la Identificación de Modelos Borrosos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*.
- [6] Espinosa, J.; Vandewalle, J. (2000). “Constructing fuzzy models with linguistic integrity form numerical data-afreli algorithm”, *IEEE Trans. Fuzzy Systems*. Vol. 8, pp. 591-600.

-
-
- [7] Espinosa, J.; Vandewalle, J.; Wertz, V. *Fuzzy Logic, Identification and Predictive Control*. Springer. Estados Unidos. 2005.
- [8] Gaweda, A.; Zurada, J. (2003). "Data-Driven Linguistic Modeling Using Relational Fuzzy Rules". *IEEE Trans. Fuzzy System*. Vol. 11, pp. 121-134.
- [9] Guillaume, S.; Carnomordic, B. (2004). "Generating an interpretable Family of Fuzzy Partitions Form Data". *IEEE Trans. Fuzzy Systems*. Vol. 12, No. 3, pp. 324-335.
- [10] Guztafson, E. E.; Kessel, W. C. (1979). *Fuzzy Clustering with a Fuzzy Covariance Matrix*. *IEEE CDC*, San Diego, California, pp. 503-516.
- [11] Nauck, D.; Kruse, R. (1995). "Nefclass a neuro-fuzzy approach for the classification of data". In *Proceedings of the Symposium on Applied Computing*.
- [12] Paiva, R. P.; Dourado, A. (2004). "Interpretability and learning in neuro-fuzzy systems". *Fuzzy Sets and System*. 147, pp. 17-38. 2004.
- [13] Pedrycz, W. (1994). "Why Triangular Membership Functions?". *IEEE Trans. Fuzzy Sets and System*. Vol. 64, pp. 21-30, 1994.
- [14] Sala, A. (1998). *Validación y Aproximación Funcional en Sistemas de Control Basados en Lógica Borrosa*. Universidad Politécnica de Valencia. Tesis Doctoral.
- [15] Sala, A.; Albertos, P. (2001). Inference error minimisation: fuzzy modelling of ambiguous functions. *Fuzzy Sets and Systems*. 121 pp. 95-111.
- [16] Si-chun, L.; De-sen, Y.; Li-ping, J. (2009). "Classifying ships by their acoustic signals with a cross-bispectrum algorithm and a radial basis function neural network". *Journal of Marine. Science and Application*. Vol. 8, pp. 53-57.
- [17] Veloso, M. (2007). "Simulación de propagación de ondas sonoras con aplicaciones en acústica subacuática". Tesis para optar al título profesional en Ingeniería Acústica. Universidad Austral de Chile.
- [18] Wangl, H.; Zhang, A. (2006). "Underwater Acoustic Signals Blind Separation Based on Time-Frequency Analysis". *International Journal of Computational Intelligence Research*. Vol. 2, No. 1, pp. 91-94.
- [19] Xiang-Dong, J.; De-Sen, Y.; Sheng-guo, S.; Si-Chun, L. (2006). "The research on high speed underwater target recognition based on fuzzy logic inference". *Journal of Marine. Science and Application*. Vol. 5, No. 2, pp. 19-23.

ARTÍCULO

**SISTEMA DE COMUNICACIONES PARA
BOYA DERIVA ARMADA NACIONAL****William Cuadrado***

escuadradowi@yahoo.com

Alcides Ramos, David Muñoz****

alcidesramos@yahoo.es, daviermual@hotmail.com

Resumen: El presente artículo describe la metodología seguida para el diseño e implementación del sistema de comunicación utilizado para la transmisión de datos de temperaturas y posición geográfica utilizados en una boya deriva, desarrollada por la Armada Nacional de Colombia. El sistema cuenta con dos módulos de comunicaciones, el primero, corresponde a un sistema de radiofrecuencia a 910MHz; el segundo a un sistema GSM, GPS y GPRS, articulado mediante un microcontrolador PIC 18F2550.

El documento muestra la memoria de cálculo de la ingeniería de enlace RF, los resultados y el análisis de los mismos, obtenidos en el transcurso de las pruebas realizadas en campo.

Palabras clave: Boya de Deriva, Modem RF, Módulo GSM, GPS y GPRS.

Abstract: This paper describes the methodology for the design and implementation of the communication system used for transmission of temperature data and geographic location used in drifting buoy, developed by the National Navy of Colombia. The system has two communication modules, the first, carries a 910MHz radio frequency system, the second a GSM system, GPS and GPRS, articulated by a PIC 18F2550 microcontroller.

The document shows the memory for calculating the RF link engineering; results and analysis thereof, obtained during field tests.

Key words: Drifting buoy, Modem RF, Modulo GSM, GPS and GPRS.

* Docente investigador Facultad de Ingeniería Naval Almirante Padilla, Cartagena, Colombia. Grupo de Investigación en Control, Comunicaciones y Diseño Naval.

** Investigadores invitados.

Apoyos y subvenciones: Escuela Naval "Almirante Padilla" - Colciencias (Proyecto código: 1126-452-21250).

INTRODUCCIÓN

En busca de aportar un sistema de comunicación para la boya de deriva, económico y por lo tanto diseñado e implementado, con materiales de fácil consecución, se realizó el acople de dos módulos de sistemas de comunicaciones comerciales, uno un modem RF, de 910MHz, y otro un modem GSM, GPRS, GPS; este último equipo de características similares al utilizado por el Grupo de Oceanografía Física del Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados IMEDEA, el cual ha logrado desarrollar algunas boyas de deriva de tipo superficiales y oceánicas [1].

Los dos sistemas sirven de soporte el uno al otro, pues el primero realiza el envío de la información, de temperaturas y posición a una estación base ubicada en tierra o en una embarcación, dentro del área de cobertura del equipo, y siempre que exista línea en vista; y el segundo envía la información vía Internet o celular en el caso de que sea solicitada mediante un mensaje de texto al sistema de comunicación. El acople de los dos equipos fue realizado mediante un sistema microcontrolado, lo cual permite realizar cambios de manera sencilla, en las órdenes que se deseen programar, con respecto al funcionamiento del sistema.

Con el objeto de que exista una mejor comprensión de este documento, se pasa a describir algunas de las expresiones que posteriormente serán utilizadas en el desarrollo del mismo:

GSM: Es el Sistema Global para las comunicaciones Móviles de forma digital que soporta voz, datos y mensajes de texto funcionando con una cobertura de sistema roaming en varios países [2].

GPS: Es el Sistema de Posicionamiento Global a través de un dispositivo que se comunica a través de un sistema de satélites permitiendo determinar la ubicación en grados, minutos y segundos [2].

GPRS: Es el servicio general de paquetes vía radio, el cual, es una extensión del sistema GSM para la transmisión de datos no conmutada (o por paquetes). Comúnmente usado para los servicios WAP (Protocolo de aplicaciones inalámbricas), SMS (Mensajería de textos cortos), MMS (Servicio de mensajería multimedia) e Internet para los servicios de conmutación de Emails y de la World Wide Web [3].

Alcance máximo posible de un enlace RF: El alcance máximo teórico posible, como una función de las alturas de las antenas sobre el nivel del mar, puede ser calculado, mediante la expresión:

$$d[\text{millas}] = \sqrt{2}h_t + \sqrt{2}h_r \quad (1)$$

Donde:

h_t : Corresponde a la altura de la antena transmisora en pies.

h_r : Corresponde a la altura de la antena receptora en pies.

Expresiones analíticas para el cálculo de la atenuación por coeficiente de reflexión: Para obtener la atenuación de la señal, debido al hecho que las antenas han sido protegidas mediante el tubo PVC, se tienen las siguientes expresiones:

Pérdidas por retorno: Se conocen así, a las pérdidas producidas en la propagación de una señal electromagnética, que al chocar sobre una superficie, generan una onda reflejada, que al interactuar con la onda incidente se producen posibles atenuaciones en dicha señal:

$$\text{Pérdidas}_{\text{por retorno}} = OL = |\Gamma_L|^2 \quad (2)$$

Coefficiente de reflexión: Parámetro que cuantifica la cantidad de onda electromagnética que se refleja de una señal, al chocar contra una superficie de diferente impedancia intrínseca:

$$\Gamma = \frac{\eta_{ent} - \eta_o}{\eta_{ent} + \eta_o} \quad (3)$$

Impedancia intrínseca de los diferentes medios: Corresponde al valor de la impedancia del medio en el cual se propaga una onda electromagnética:

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \quad (4)$$

Impedancia intrínseca a la entrada: Corresponde al valor de la impedancia puntual, cuando la onda electromagnética se propaga entre dos medios de características eléctricas diferentes:

$$\eta_{ent} = \eta_{PVC} \frac{\eta_o + j\eta_{PVC} \tan(\beta_{PVC} \times L_{PVC})}{\eta_{PVC} + j\eta_o \tan(\beta_{PVC} \times L_{PVC})} \quad (5)$$

Factor de fase: Parámetro que indica cómo se modifica el ángulo de fase de la señal, a medida que se desplaza en el espacio:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_r}}{C} \quad (6)$$

Donde:

C: Velocidad de la luz, 3×10^8 m/s

ϵ_r : Permitividad del material sobre el cual se propaga la onda electromagnética.

Atenuación de la línea de transmisión: La atenuación presentada en el cable de comunicación depende de dos factores, el primero al de atenuación y en especial al efecto piel, presente en la línea, consecuencia de la transmisión en alta frecuencia y el segundo debido al desacople existente entre la antena y el cable propiamente dicho, por las diferencias entre sus impedancias. La expresión para el cálculo de dicha atenuación es la siguiente:

$$A_{LX} = A_{LX}(\alpha) + A_{LX}(ROE)$$

$$A_{LX} = -8.685[\alpha \cdot L] + 10 \log \left[\frac{4ROE}{(ROE + 1)^2} \right] \quad (7)$$

1. MATERIALES Y METODOLOGÍA

A continuación se realiza una breve descripción de los materiales, equipos y software utilizados para la implementación del sistema de comunicación y además se describe la metodología seguida para el diseño e implementación del sistema:

1.1. Descripción de los equipos y software utilizados

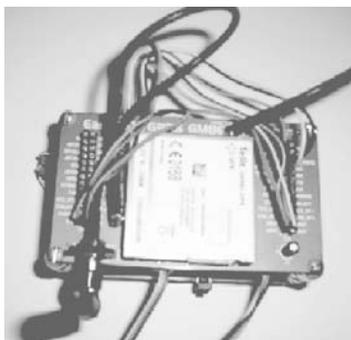
Modem RF: El equipo usado para transmitir en radiofrecuencia es de referencia **9XTEND PKG RS232/485 RF MODEM** [5], dicho dispositivo se muestra en la Figura 1. Este equipo desarrolla una transmisión en línea de vista de 22 km con la antena dipolo de media longitud de onda, tipo látigo e impedancia de 50 ohm, Ganancia directiva 1.64 [2.5dB].

El equipo fue configurado a una velocidad de transmisión de 9600 bps y una potencia de transmisión de 1W, consumiendo una corriente en el modo de transmisión de 900mA. Sensibilidad del receptor: -110 dBm (9600 bps Data Rate), -100 dBm (115.200 bps).



*Figura 1. Equipo 9XTEND
PKG RS232/485 RF modem*

Modem GSM, GPRS, GPS: El equipo utilizado para transmitir la información en zonas donde se tiene cobertura celular es el **Telit GM862-GPS, GM862-QUAD-PY and GM862-QUAD GSM/GPRS**, dicho dispositivo es mostrado en la Figura 2.



*Figura 2. Sistema de cobertura
celular Modem Telit GM862-
GPS, GM862-QUAD-PY and
GM862-QUAD GSM/GPRS*

Línea de Transmisión: El cable coaxial utilizado en la etapa de recepción de la señal RF, para conectar la antena de media longitud de onda, al modem **9XTEND PKG RS232/485**, en la estación base fue el **MWC 10/50 Nordix** [6]. Para conectar el equipo a la línea se utilizaron dos conectores OL de -8.84dB. En la Tabla1, se observan las principales características.

TABLA 1
DATASHEET DEL MWC 10/50 DE CABLE COAXIAL DE NORDIX

CARACTERÍSTICAS DATOS ELÉCTRICOS		
Velocidad de propagación	87%	
Resistencia a 20°C	4.3 Ohm / Km	
Capacitancia	78 ± 3nF / Km	
Impedancia	50 ± 2 Ohm	
Atenuación en dB/100m	900 MHz	13.7
	1500 MHz	18.1

Software Lview: Programa gráfico para medición y automatización, creado por la National Instrument. Sus principales características son:

- Adquisición de datos y análisis matemático
- Comunicación y control de instrumentos de cualquier fabricante
- Automatización industrial y programación de PACs (Controlador de Automatización Programable)
- Diseño de controladores: simulación, prototipaje rápido, hardware-en-el-ciclo (HIL) y validación
- Diseño embebido de micros y chips
- Control y supervisión de procesos
- Visión artificial y control de movimiento
- Robótica
- Demótica y redes de sensores inalámbricos

Software Delphi: Es un entorno de desarrollo de software diseñado para la programación de propósito general con énfasis en la programación visual. Su programación está en Pascal.

1.2 Descripción general del sistema electrónico de la boya deriva

El objetivo del proyecto es tomar las temperaturas registradas por cinco sensores de temperatura, a lo largo de una línea de 20 metros de profundidad sumergida en el mar, adicionarlas a la posición de la boya en el globo terráqueo, censada mediante un sistema de posicionamiento global o GPS y enviar toda esta información a una estación base en tierra o en una embarcación a flote, dentro del rango de cobertura de los equipos de comunicación utilizados para el proyecto; este proceso debe repetirse de manera automática, a intervalos regulares de tiempos, ajustables por software desde la

estación base. También existe la opción de solicitar el envío de la información en un tiempo específico, si el operador del sistema así lo requiere. Tomando en consideración el diagrama de bloque de la Figura 3, se hace una descripción del sistema:

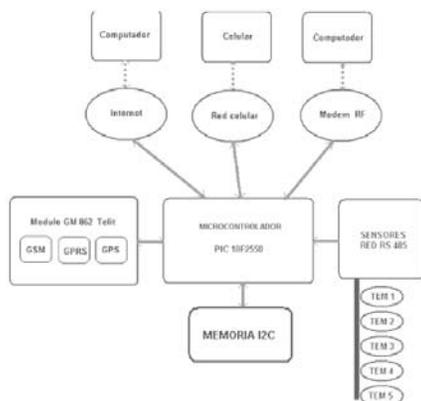


Figura 3. Diagrama de bloques del sistema general de la boya deriva

El corazón del sistema electrónico de la boya deriva, corresponde al microcontrolador 18F2550 [4], quien tendrá la función de tomar los datos que vienen de la Red de sensores RS 485, intégralos con la posición de la boya, obtenida a partir del GPS, embebido en el modem GM862 y envíalos a la estación base tanto por el sistema RF de manera permanente, por vía celular o bien por vía Internet según sea el requerimiento planteado por el operario del sistema.

1.3 Descripción del sistema de comunicaciones de la boya deriva

Una vez en operación la boya, el módulo GM682 se encontrará conectado de manera permanente a la red celular, a Internet y a la red satelital GPS. De igual forma el módulo GM862, se comunicará de manera bi-direccional vía RS-232 con el microcontrolador PIC 18F2550 [4], y este a su vez con el modem RF MaxStream. La lógica de operación del sistema de comunicación es la siguiente:

- a. Se conecta a la red celular GSM, al Internet GPRS y a la red Satelital GPS
- b. Envía periódicamente datos vía RF y los almacena en la memoria I2C.
- c. Responde a mensajes de textos, enviados a través de un celular de la siguiente manera:
 - “RESET”, al recibir este mensaje el sistema se inicializa.
 - “MEN= #CELULAR”, al recibir este mensaje el sistema responde vía GSM al celular deseado en #CELULAR, con los datos de posición y temperatura.

- “PC=#IPDESEADA”, al recibir este mensaje el módulo se enlaza continuamente al computador con dicho #IP deseado, hasta que el PC finalice la conexión; envía continuamente los datos de posición y temperatura y el computador, los almacena en una base de datos.
 - “RF”, en este caso, envía el dato vía modem RF, de manera instantánea.
- d. El Sistema, también recibe datos también RF vía modem y responde de la siguiente manera:
- “Memoria”, envía los datos guardados en la memoria.
 - “Tiempo=#minutos”, cambia el periodo de envío de datos a #minutos.
- e. Para recibir los datos RF desde el sistema, se utiliza una aplicación en labview instalado en el computador de la estación base. La Figura 4, muestra una imagen del despliegue de dicha aplicación en operación.



Figura 4. Aplicación realizada en labview, que debe estar instalada en el computador base para la recepción de datos vía modem RF MaxStream

- f. Para recibir datos vía GPRS, en el computador de la estación base, debe estar instalada una aplicación desarrollada en Delphi, para dicha recepción. La Figura 5, muestra una imagen de dicha aplicación en operación.

Para este caso, el computador deberá estar conectado a Internet en cualquier parte del planeta, y mediante la utilización de la aplicación en Delphi, se detectará, su dirección IP pública, la cual será enviada al sistema de comunicaciones de la boya para iniciar el enlace TCP/IP, y poder adquirir y almacenar en tiempo real, los datos de posición y temperaturas.

- g. El sistema de comunicaciones de la boya deriva, envía también en la trama de datos, el nivel de voltaje de batería como una medida de seguridad del sistema.

FECHA	CONEXION	TITULO	TIEMPO	MUESTRA	
12/09/2010 04:17:29 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	179	196	11.3
12/09/2010 04:17:31 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	206	209	11.2
12/09/2010 04:17:32 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	207	209	11.2
12/09/2010 04:18:09 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	213	210	11.2
12/09/2010 04:18:10 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	206	206	11.2
12/09/2010 04:18:31 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	207	208	11.2
12/09/2010 04:18:47 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	209	208	11.2
12/09/2010 04:18:51 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	203	208	11.2
12/09/2010 04:18:59 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	206	212	11.1
12/09/2010 04:19:21 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	204	204	11.2
12/09/2010 04:20:03 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	205	214	11.2
12/09/2010 04:20:44 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	203	207	11.1
12/09/2010 04:19:59 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	210	213	11.1
12/09/2010 04:20:00 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	203	207	11.2
12/09/2010 04:20:16 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	203	211	11.2
12/09/2010 04:20:40 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	203	211	11.2
12/09/2010 04:20:40 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	212	214	11.2
12/09/2010 04:20:59 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	177	211	11.2
12/09/2010 04:21:08 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	213	211	11.1
12/09/2010 04:21:29 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	177	213	11.1
12/09/2010 04:21:42 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	181	208	11.2
12/09/2010 04:21:47 p.m.	PROCESANDO	PROCESANDO	209	208	11.3

Figura 5. Se muestra la aplicación desarrollada en Delphi, para la recepción de los datos recolectados por la red RS 485, vía GPRS

- h. Es indispensable que la simcard utilizada en el modem GM682 tenga plan de datos, preferiblemente ilimitado; sin embargo debido que el modem GM862 permanece en el modo de bajo consumo de energía, esperando que se le solicite envío de información vía GPRS, y al ser esta una información de pocos bytes, el sistema resulta económico.

1.4 Memoria de cálculo de sistema de enlace vía modem RF MaxStream

A continuación se presenta la memoria de cálculo de la ingeniería del enlace RF, pertinentes a la utilización del modem RF MaxStream:

a. Determinación de la frecuencia de trabajo

Para encontrar la frecuencia de trabajo del sistema modem RF MaxStream, se utilizó el analizador de espectro BK PRECISION SPECTRUM ANALYZER 3.3GHz 2650, la Figura 6, muestra los resultados obtenidos durante la transmisión, obteniéndose una frecuencia portadora de 910 MHz.



Figura 6. Imagen del analizador de Espectro BK PRECISION SPECTRUM ANALYZER 3.3GHz 2650, se observa la frecuencia portadora del modem RF MaxStream en 910MHz

b. Potencia de transmisión del modem RF MaxStream

Para establecer la potencia de transmisión del sistema modem RF MaxStream, se utilizó el software **X-TEND PKG**, propio del mismo sistema, mediante el cual se puede programar la potencia de salida en los límites de “máxima transmisión”, es decir en los cuales se tienen las siguientes especificaciones de trabajo:

- Potencia de transmisión: 1W a 900mA
- Distancia de transmisión: 64 km en línea de vista, siempre y cuando se utilice una antena de alta ganancia.

La Figura 7, muestra el despliegue realizado por el software X-TEND PKG, al momento de realizar el establecimiento de la potencia de salida.

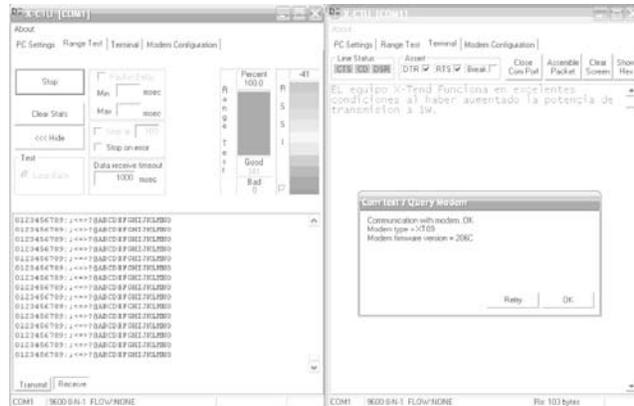


Figura 7. Se muestra el despliegue realizado por el software X-TEND PKG, al momento de realizar el establecimiento de la potencia de salida en 1W, 900mA

c. Cálculo del alcance máximo teórico

A partir de la expresión (1), y considerando la altura de la antena en la boya 1 m sobre el nivel del mar (s.n.m.) y una altura de 10 m, s.n.m. en la estación base, en una embarcación a flote, se puede calcular el máximo alcance del enlace RF, considerando que existe línea en vista de manera permanente:

$$d[\text{millas}] = \sqrt{2} \left[\frac{1}{0.3048} \right] + \sqrt{2} \left[\frac{10}{0.3048} \right] = 51 \text{ millas} \cong 81.65 \text{ km}$$

En teoría, con dicho transmisor se puede tener un enlace de 22 km, siempre y cuando exista línea en vista.

d. Memoria de cálculo de la ingeniería del enlace

Para el cálculo de la ingeniería del enlace han sido considerados los siguientes factores de atenuación en el trayecto de la señal:

Atenuación debido al PVC del flotador de la boya

Dado que las antenas del sistema de comunicación de la boya deriva, se instalaron dentro de la boya, por la seguridad de los mismos, se realizó el cálculo de la atenuación de las señales, al atravesar el material de la tubería PVC.

El Modelo del sistema con la antena dentro de la tubería PVC, puede ser observado en la Figura 8.

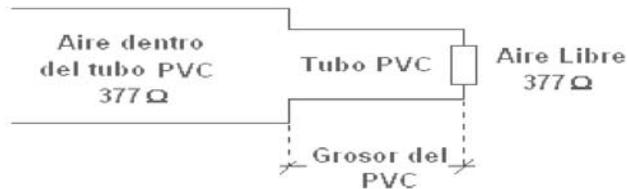


Figura 8. Modelo analítico de la configuración de las antenas del sistema de comunicaciones dentro de la boya

La metodología para el cálculo de la atenuación de potencia en la transmisión, del sistema de comunicación, debido a la ubicación de sus antenas dentro del flotador construido con tubería PVC, es la siguiente:

- Se calculan la impedancia intrínseca y el tubo PVC, para lo cual se usa la expresión (4)

$$\eta_o = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o \epsilon_r}} = \frac{377\Omega}{\sqrt{3.2}} = 210.74\Omega$$

- Se encuentra la impedancia a la entrada mediante (5).

El factor de fase β , puede ser calculado mediante (6):

$$\beta_{PVC} = \frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_r}}{C} = \frac{2\pi \times (910 \times 10^6) \sqrt{3.2}}{3 \times 10^8} = 34.091 \text{ rad / m}$$

- Impedancia intrínseca a la entrada del tubo PVC,

Dado que el espesor del tubo PVC es de 4 mm, y además la impedancia intrínseca del aire es 377Ω , mediante (5), se obtiene:

$$\eta_{ent} = (210.74) \frac{377 + j210.74 \tan(34.09 \times 4 \times 10^{-3})}{210.74 + j377 \tan(34.09 \times 4 \times 10^{-3})} = 376.99 \angle -0.16^\circ$$

- Coeficiente de reflexión, mediante (3).

$$\Gamma = \frac{376.99 \angle -0.16^\circ - 377}{376.99 \angle -0.16^\circ + 377} = 0.00146 \angle -90.16$$

- Finalmente se consigue el valor de las pérdidas por retorno, OL, mediante (2).

$$OL = |0.00146|^2 = 2.13 \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-4}\%$$

Es decir no se presenta atenuación de la potencia de transmisión la presencia de la tubería PVC en la trayectoria de las señales. Este análisis permitió introducir las antenas del sistema de comunicación dentro del flotador de la boya.

Cálculo de la atenuación en la línea de transmisión

Dado que en la estación base, bien en tierra o en una embarcación a flote, se espera instalar la antena a una altura mínima de 10 metros, s.n.m., se realizó el cálculo de la atenuación en la potencia de transmisión para la longitud de cable utilizado, el cual fue de 15 m. La Tabla 1, muestra las especificaciones del cable coaxial utilizado, correspondiente al cable MWC 10/50 Nordix [6]. De acuerdo con la expresión (7), y tomando los datos de la Tabla 1, se obtiene:

Realizando la interpolación de la atenuación para 910MHz, se obtiene, la atenuación debido a 910MHz:

$$m = \frac{\Delta Aten[dB]}{\Delta \log_{10} f} = \frac{18.1 - 13.7}{\log_{10} 1500 \times 10^6 - \log_{10} 900 \times 10^6} = \frac{18.1 - Aten[910MHz]}{\log_{10} 1500 \times 10^6 - \log_{10} 910 \times 10^6}$$

Por lo tanto: $Aten[910MHz] = 13.80dB/100m$, de donde se desprende que la atenuación por el factor de atenuación corresponde a:

$$A(\alpha)_{910MHz} = \frac{13.80}{100} \times 15 = 2.07dB$$

Por otro lado, la atenuación debido al desacople de la antena:

- Se calculó el coeficiente de reflexión debido al desacople de impedancia, entre la línea de transmisión y la antena. Para la antena de media longitud de onda, su impedancia es de $73+j42\Omega$.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} = \frac{73 + j42 - 50}{73 + j42 + 50} = 0.37 \angle 42.44^\circ$$

- Luego se calculó la relación de onda estacionaria ROE:

$$ROE = SWR = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|} = \frac{1 + 0.37}{1 - 0.37} = 2.17$$

- Por lo tanto la atenuación debido al desacople tiene un valor de:

$$A(ROE)_{900MHz} = \log \left[\frac{4 \times 2.17}{(2.17 + 1)^2} \right] = -6.36 \times 10^{-2} dB$$

- La atenuación total será entonces de:

$$Aten = 2.07 + 6.36 \times 10^{-2} = 2.13 dB$$

Cálculo del máximo alcance, y verificación con el umbral del receptor:

Para el cálculo del enlace ha sido considerada la siguiente expresión:

$$P_R = \frac{P_T}{4\pi R_{\max}^2} \cdot D_T \cdot A_{\text{eff}} \cdot A_{LT} \cdot A_{\text{conec}} \geq P_U \quad \text{con} \quad A_{\text{eff}} = \left[\frac{\lambda^2}{4\pi} \right] \cdot D_R$$

Donde:

- P_R : Es la potencia en el receptor
- P_T : Es la potencia disponible en el transmisor
- R : Es la máxima distancia del enlace RF
- D_T : Ganancia directiva de la antena
- A_{eff} : Área efectiva de la antena receptora
- D_R : Ganancia directiva de la antena receptora
- A_{LT} : Atenuación en la línea de transmisión
- A_{conec} : Atenuación en los conectores utilizados

P_U : Potencia Umbral, el mínimo valor de potencia para que exista enlace RF

$$P_R [dBW] = P_T [dBW] + D_T + A_{LT} + A_{conec} + A_{eff} [dB] - 11 - 20 \log_{10} R_{max}$$

Reemplazando los valores se obtiene:

$$-110 - 30dB = 0 + 2.15 - 2.13 - 17.69 - 18.48 - 11 - 20 \log_{10} R_{max}$$

$$20 \log_{10} R_{max} = 92.85$$

Por lo tanto el máximo enlace teórico corresponde a:

2. RESULTADOS

- a. Una vez realizados los cálculos de la posible atenuación debido a la presencia del material PVC, en el camino de la señal RF, se procedió a introducir las antenas dentro del flotador, fabricado con tubería PVC, obteniéndose, como se esperaba, buena señal de transmisión.
- b. Las pruebas realizadas con el sistema Modem GSM, GPRS, GPS, no presentó problemas. La limitante del sistema, es el hecho de que para poder utilizarlo, la boya debe estar en una zona donde exista cobertura celular, además de ser indispensable que la simcard utilizada en el modem tenga plan de datos preferiblemente ilimitado.
- c. Pruebas realizadas al sistema 9XTEND PKG RS232/485 RF MODEM, con estación base en tierra. La Figura 9, muestra la representación de las coordenadas obtenidas a partir del GPS, al utilizar la estación base en tierra, instalada en la Escuela Naval “Almirante Padilla” en Cartagena. Las antenas se encontraban así: altura de la antena en la boya 1m; altura de la antena en la torre en tierra 5 m. La máxima distancia donde se recibió señal de ubicación y sensores fue de 2.47 km. Se confirma que mientras no exista línea en vista, no se da la comunicación.
- d. Pruebas realizadas al sistema 9XTEND PKG RS232/485 RF MODEM, con estación base a bordo de una embarcación a flote. La Figura 10, muestra los resultados obtenidos, en las pruebas realizadas en la bahía de Cartagena. La boya se dejó a la deriva en la bahía, perdiéndose contacto con ella a los 1.39 km. Las alturas de las antenas fueron las siguientes: altura de la antena en boya 1 m; altura de la antena de la estación base en un yate a flote 2 m. Nuevamente se demuestra que la comunicación se pierde mientras no exista línea en vista.

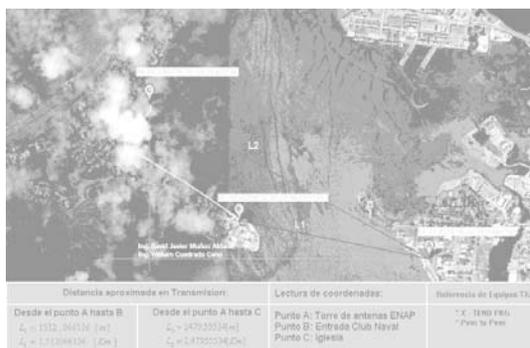


Figura 9. Coordenadas del GPS, recibidas con el sistema 9XTEND PKG RS232/485 RF MODEM, con estación base en tierra



Figura 10. Coordenadas del GPS, recibidas con el sistema 9XTEND PKG RS232/485 RF MODEM, con estación base a bordo de un yate

3. CONCLUSIONES

Se logró comprobar que la instalación de las antenas de los sistemas de comunicación al interior del flotador fabricado en material PVC, no origina atenuación de potencia en la transmisión de los dos sistemas utilizados: 9XTEND PKG RS232/485 RF MODEM y el Modem GSM, GPRS, GPS.

El sistema Modem GSM, GPRS, GPS, no presentó fallas en la transmisión de los datos de posicionamiento global y de las temperaturas censadas, sin embargo se debe hacer claridad que en el evento de ser utilizado, es indispensable que exista cobertura celular en la zona donde derive la boya; y además se debe contar con un plan de datos

con alguna empresa que suministre el servicio de comunicación celular.

Se deben revisar los detalles de la ingeniería del enlace RF, con el equipo 9XTEND PKG RS232/485 RF MODEM, dado que aunque la comunicación se dio cuando existía línea en vista, esta nunca llenó las expectativas de las distancias teóricas suministradas por el fabricante ni las presentadas en las memorias de la ingeniería del enlace RF. Factores a tener en cuenta, son los siguientes: La refracción de la señal, y las pérdidas por difracción, esto último por la presencia de las olas a lo largo de la trayectoria de la señal.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo logístico y económico brindado por la Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla”, la Fundación Wise Innovations y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS (Proyecto código: 1126-452-21250).

REFERENCIAS

- [1] Medina, R. Los Modelos de Deriva en la Predicción de Vertidos, 1ª. Jornada Científico-Técnica de Lucha contra la Contaminación Marina, A. Coruña, España, 2006.
- [2] Tilet Wireless solution. GM 862 - GPS Modem. [en línea]. http://www.telit.com/en/products/gsm-gprs.php?p_ac=show&p=7. [citado en 07 de marzo de 2010].
- [3] Universidad de Valencia. Sistemas GPRS. [en línea]. <http://www.uv.es/montan/redes/trabajos/GPRS.doc>. [citado en 07 de marzo de 2010].
- [4] Microchip. PIC 18F2455/2550/4455/4550 data sheet. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632b.pdf> [citado en 07 de marzo de 2010].
- [5] Digi.com. 9xTend – PKG - R™ RS 232/485 RF Modem. [en línea]. http://ftp1.digi.com/support/documentation/productmanual_xtend_pkgr_rs232rs485r-fmodem.pdf. [citado en 07 de marzo de 2010].
- [6] Dipol. Coaxial cable (50 ohm): MWC 10/50 Nordix [100m]. [en línea]. [citado en 07 de marzo de 2010]. http://www.dipolnet.com/coaxial_cable_50_ohm_mwc_10-50_nordix_100m_E1185_100.htm.

ARTÍCULO

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE REMOLCADORES FLUVIALES DE EMPUJE

Michael Eyles Sánchez Blanco*, Juan Carlos Hincapié Agudelo*
micsanchez60@hotmail.com, juanolehinca@gmail.com

Fabio Zapata Casas**
fzapata73@yahoo.com

Resumen: El transporte fluvial de carga en Colombia se ha intensificando durante las últimas décadas, y con más relevancia a través del río Magdalena, sin embargo, los datos de archivos de las inspecciones fluviales acerca de remolcadores de empuje que operan en la actualidad, muestran cómo la gran mayoría datan de la década de los 50, cuestión que impulsa la necesidad de realizar nuevos proyectos de investigación para el desarrollo de unidades de este tipo, que cumplan con las demandas actuales de mercado y más aún, con los parámetros establecidos para el diseño y construcción naval de acuerdo a casas clasificadoras, esto a través del uso de métodos, herramientas y estudios modernos, que de manera global garantizan la integridad y seguridad de estas naves. Este documento muestra algunas consideraciones para el diseño de este tipo de embarcaciones.

Palabra clave: Túneles de popa, Líneas de forma, Resistencia al avance, Escantillado, Empujador, Empuje.

Abstract: River transport of cargo in Colombia has increased in recent decades, and more important through the Magdalena River; however, records on river push tugs inspections currently operating show that most of them are from the '50s, an issue that drives the need for new research projects for the development of these type of vessel, that meet current market demands and even more, with the parameters set forth for ship design and construction in accordance with the classification societies. All of this through the use of methods, tools and modern studies that comprehensively ensure the integrity and safety of these ships. This document presents some considerations for the design of this type of ships.

Key words: Stern tunnels, Lines of form, Ship resistance, Scantling, Push tug, Thrust.

* Teniente de Navío, Estudiante de Ingeniería Naval Especialidad Mecánica, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia.

** Capitán de Corbeta, Arquitecto Naval & Ingeniero Marino Director Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Naval "Almirante Padilla", Cartagena, Colombia.

INTRODUCCIÓN

El enfoque principal de este artículo se basa en la investigación realizada para el diseño de un remolcador de empuje para el río Magdalena [1], cimentado en la aplicación de métodos y estudios modernos para la construcción de buques, el uso de herramientas computacionales como Maxsurf y Navcad de la empresa FORMSYS, además de la puesta en práctica de parámetros establecidos por casas clasificadoras como la *ABS (American Bureau Shipping)*, que para el presente estudio será la norma de referencia. En este estudio se presenta la evaluación de datos de campo obtenidos del sector fluvial comercial que opera en el río Magdalena, así como la referencia de documentos sobre estudios de diseño de remolcadores fluviales de empuje, que soportaron la toma de decisiones final para los aspectos de cálculo y diseño del buque proyecto.

1. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

El sustento general parte del proceso conocido como “Espiral de Diseño” (ver Figura 1), donde el proyecto resume todas las áreas de Ingeniería Naval que se deben tener en cuenta para el diseño y construcción de un buque, en este caso el remolcador de empuje. Como la finalidad principal es el diseño preliminar, se debe tener claridad sobre el concepto de este proceso y el alcance en la construcción del buque. El diseño básico [2] se define como la etapa inicial del proceso, en donde se incluye la definición de las características más generales del buque a diseñar, aspectos que pueden llegar a afectar el costo y desempeño, así como las formas y dimensiones del casco que posteriormente permiten al diseñador hacer el cálculo de la potencia y su estructura.

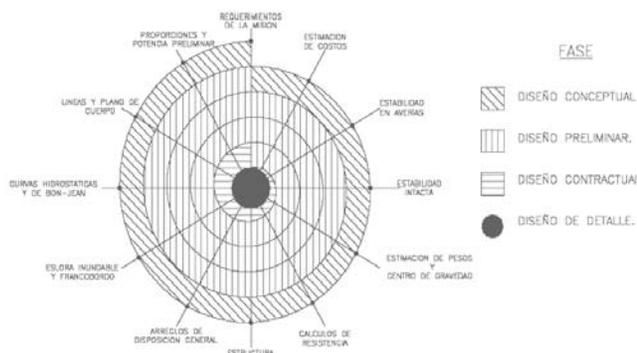


Figura 1. Espiral de diseño

2. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

Es importante la problemática general expresada por la población relacionada con el proyecto, en este caso las empresas de transporte de carga fluvial del río Magdalena y el Ministerio de Transporte, y además el panorama actual del medio ambiente de esta rivera visualizado en estudios del Ministerio de Medio Ambiente, lo cual muestran la preocupación por el cambio y descenso del nivel del río, la necesidad de modernizar las flotas de remolcadores en servicio y la apremiante tarea de cumplir con los estándares nacionales para la construcción y operación de buques.

Se estableció como objetivo efectuar el diseño preliminar de un Remolcador Fluvial de Empuje, que de acuerdo a datos de encuestas y diferentes entrevistas realizadas a armadores y tripulantes del sector, evaluaciones del mercado del transporte de carga fluvial sobre el río Magdalena y el análisis de los artefactos fluviales en servicio actualmente, cumpliera con los siguientes requerimientos:

- Como ruta de operación se estableció la cuenca fluvial del río Magdalena desde Barranquilla (Atlántico) hasta Puerto Berrío (Antioquia).
- Puertos bases Cartagena y/o Barranquilla, puertos de destino Barrancabermeja y Puerto Berrío.
- Dimensiones principales de 15 a 20 metros de eslora y menos de 1 metro de calado.
- Capacidad de empuje aproximadamente de 2.000 toneladas.
- Tiempo de operación entre un puerto y otro aproximadamente 8 días.
- Habitabilidad para 5 personas.
- Diseño bajo los criterios de construcción naval de las casas clasificadoras y las normas de seguridad marítima colombiana.

3. DIMENSIONAMIENTO

La metodología del dimensionamiento regularmente considera a la eslora como la de mayor importancia, sin embargo en el caso del proyecto del remolcador se tendrán en cuenta tres consideraciones, por su importancia la manga que es la dimensión más importante para un remolcador, ya que está directamente relacionada con la estabilidad del mismo, las otras dos son la capacidad de empuje requerido y el calado.

Como punto de partida se realizó el análisis de embarcaciones similares (ver Tabla 1), no solo de las que operan actualmente en esta cuenca, sino de buques modernos construidos en la última década y que se aproximan a las dimensiones requeridas. Lo anterior ilustró las tendencias de diseño, que con respecto a los factores críticos ayudaron a determinar las dimensiones favorables de la embarcación.

Como dato principal se puede observar que la tendencia de la relación de potencia y capacidad de empuje para este tipo de embarcaciones se mantiene en un margen aproximado de 3 a 1, es decir, por cada caballo de potencia BHP se empujan 3 toneladas. Las tendencias generales de la observación realizada concluyeron el resultado final de las dimensiones de diseño (ver Tabla 2).

TABLA 1
REMOLCADORES SIMILARES PARA ESTUDIO

Nombre	Potencia	Eslora (m)	Manga (m)	Calado (m)	Cap. Empuje	Año
PB_401_Push_Boat	600 HP	16,6	5,3	1,3	1800 Ton.	2009
M/N Transflucol No. 3	166 HP	17,6	3,9	1,16	500 Ton.	1953
M/N Tigui	200 HP	15	4,2	1,5	600 Ton.	1993
M/N Sua	480 HP	15,9	6,7	1,22	1440 Ton.	1956
M/N Pluton	370 HP	16,7	6	1,22	1114 Ton.	1951
M/N Omaira	326 HP	17,4	6	1,18	978 Ton.	1988
M/N La perla de Chicagua	345 HP	19,65	4,7	1,1	1036 Ton.	1963
M/N Inmarco 4	317 HP	15,24	4,26	1,5	953 Ton.	1947
M/N Guaranday	256 HP	15,5	3,85	1,32	770 Ton.	1964
M/N Guadalupe	650 HP	18,9	7	1,52	1950 Ton.	1947
M/N Galapa	512 HP	18	6	1,5	1537 Ton.	1947
M/N El Capi	500 HP	20	5,75	1,2	1500 Ton.	2002
M/N Colon R-1	2100 HP	17	4,5	1,22	6420 Ton.	1952
M/N Capricornio	340 HP	14,8	4,93	1,27	1041 Ton.	1975
M/N Hugo Javier	725 HP	17	5,70	0,90	2188 Ton.	2008
M/N Bary	245 HP	15,24	4,26	1,15	730 Ton.	1947
M/N Ayacucho	480 HP	15,8	4,5	1,42	1442 Ton.	1947
Grafton Boat for US ARMY	600 HP	14	5,66	1,44	1800 Ton.	1970

TABLA 2
DIMENSIONES DE DISEÑO

Resultados Dimensiones de Diseño	
Dimensión	Valor
ESLORA	16 m
MANGA	6 m
CALADO MÁXIMO	0,9 m
PUNTAL	1,2 m
POTENCIA	700 HP
CAPACIDAD EMPUJE	2.100 Ton

4. CONSIDERACIONES IMPORTANTES PARA EL DISEÑO

4.1 Túneles

Debido que se tiene restricción de calado y por las condiciones de la cuenca fluvial del Magdalena, se deben diseñar túneles que permitan un mayor diámetro de hélice y minimicen los problemas de vibración que se pueden presentar, ya que la popa del remolcador es más delgada respecto al resto del casco generando un efecto de viga empotrada, donde el peso mismo de esta sección sumado a los esfuerzos generados por el sistema propulsivo pueden generar vibraciones nocivas.

De acuerdo con las características de construcción de unidades de este tipo, hay que tener en consideración el dimensionamiento de los túneles de popa para el alojamiento de la propela y línea de ejes [3], [4] los cuales principalmente deben asegurar que el espacio comprendido entre los límites de la propela y todos los lados del túnel (casco) se mantengan entre el 15 y el 20% del diámetro de la propela (ver Figura 2).

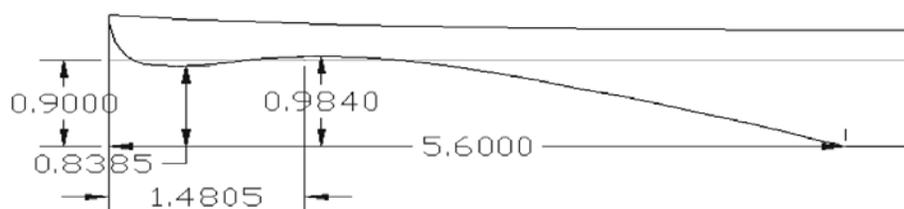


Figura 2. Túnel remolcador diseñado vista lateral. En Autocad

Las demás líneas de forma representan el casco general de la embarcación en tres planos espaciales, de forma longitudinal, de planta y de forma transversal, que de manera global deben asegurar un diseño hidrodinámico. Con base en las dimensiones obtenidas anteriormente en las dimensiones de diseño y a los factores de líneas de forma, se llega al modelo preliminar de la embarcación (ver Figura 3), con el cual se calcula el desplazamiento del buque al calado de diseño requerido y la resistencia al avance, se podrán determinar los espacios destinados para la habitabilidad, capacidad de tanques, espacios para bodegaje y las condiciones generales para la estimación de las condiciones hidrostáticas del buque, asegurando el cumplimiento de los requerimientos del armador, las condiciones seguras de navegación y la reglamentación existente para este tipo de embarcación.

4.2 Compartimentación

Un remolcador básicamente es una “máquina de potencia flotante”, en donde la ma-

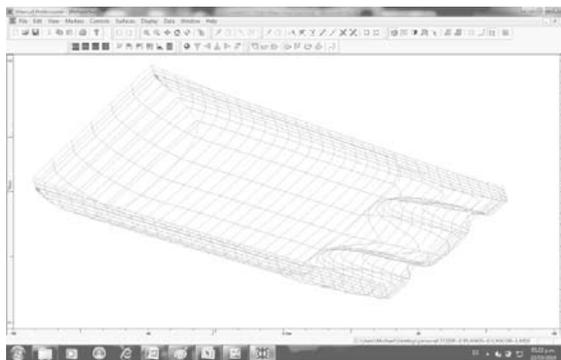


Figura 3. Diseño del casco del remolcador en Maxsurf

yoría del espacio disponible en el casco, está ocupado por la maquinaria principal de propulsión y demás equipos auxiliares [5]. Se consideró para el diseño del Remolcador de Empuje, las normas del ABS (*American Bureau Shipping*), las recomendaciones del *Ship Design and Construction* y de las normas de clasificación de embarcaciones fluviales para Colombia, donde básicamente se buscó cumplir con los requisitos de seguridad, comodidad y misión para los cuales será utilizada la embarcación (ver Figura 4).

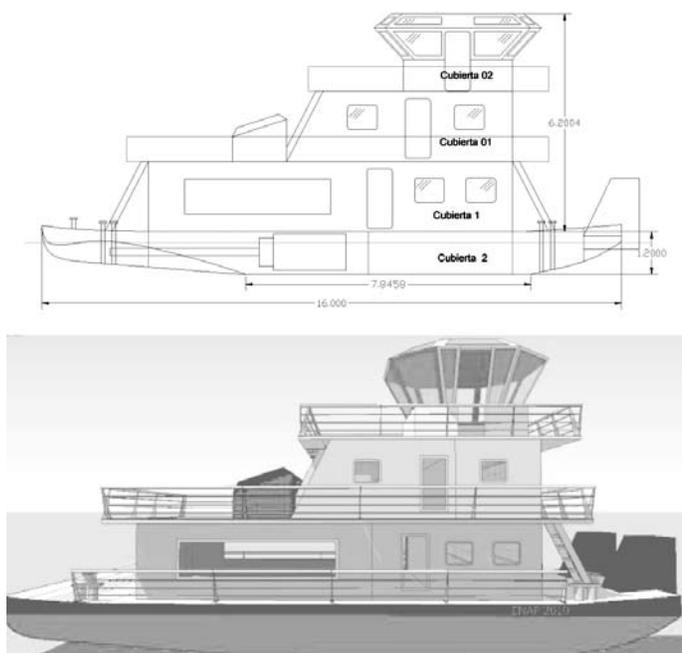


Figura 4. Plano distribución espacios Remolcador en Autocad

Para el diseño de los componentes de esta embarcación, se tomó el casco desarrollado en Maxsurf, de allí se exportó a Autocad, donde se generaron superficies en dos dimensiones, efectuando el cálculo de la distribución de espacios de acuerdo a las necesidades anteriormente expresadas.

4.3 Cuaderna Maestra

Para la determinación del Escantillonado del remolcador, se requiere el análisis de las fuerzas que afectan la estructura del casco, empleando el concepto de considerar el casco como una viga (viga buque), determinando las condiciones mínimas que debe cumplir la estructura de la embarcación para soportar las cargas a las cuales será sometido durante su vida útil.

El módulo de sección de la cuaderna maestra (de la viga buque), se debe determinar en las cercanías del máximo momento flector. El momento máximo de flexión ocurre no muy lejos de la sección media para amplias formas del buque y de condiciones de carga. Se debe asegurar que la resistencia longitudinal sea adecuada en la sección media para soportar el máximo momento flector definido por las reglas clasificatorias, el módulo de sección en la sección media requerido en estas reglas debe ser extendido a través de al menos cuatro décimas de la longitud ($40\% L$) centrada en la sección media.

Se seleccionó la estructura tipo “D” del capítulo 3.2.4. Figura 1, de la regla para clasificación y construcción de buques de servicio en río de la ABS de 2007, así mismo, los espesores y números de perfil fueron seleccionados de acuerdo a los parámetros y módulos de sección requeridos por la norma y de fácil consecución comercial en el país.

5. RESISTENCIA AL AVANCE Y SELECCIÓN SISTEMA PROPULSIVO

Para calcular la potencia a ser instalada en el remolcador, se estimaron los valores de potencia necesarios para poder cumplir por un lado, con la velocidad especificada para el proyecto, como para cumplir la condición de empuje de 2.000 toneladas y un tiro a punto fijo de 8.05 t. Tras realizar este estudio, nos quedamos con el valor de la potencia estimada para la condición más exigente.

El estudio del sistema de propulsión se hará bajo los fundamentos del “Propeller Handbook” [6], documento referencia de gran aceptación y uso a nivel comercial e industrial. Contiene un capítulo dedicado a estudios realizados para remolcadores de empuje.

La estimación de los BHP necesarios para el proyecto de acuerdo a este documento se realiza de acuerdo fórmula relacionada con el peso promedio de empuje del tren de barcasas, para el caso estudio es de 2000 toneladas, así:

$$BHP = \frac{2000Ton + 599,9}{3,43} = 757,95 \text{ BHP}$$

De igual forma se corrobora este dato simulando la resistencia al avance en el programa NavCad en su opción de cálculo de resistencia con tren de barcasas de empuje, ingresando los datos dimensionales del proyecto y la carga de empuje requerida. Lo anterior nos arrojó un potencia requerida de 720 EHP, lo cual equivale a 749 BHP después de realizar los ajustes por pérdidas (4% aprox.) a lo largo de la línea de propulsión. Como se puede apreciar los dos cálculos son similares y serán requeridos para determinar el motor a instalar, teniendo obviamente otras consideraciones como peso del motor, consumo de combustible promedio, eficiencia mecánica y soporte técnico y comercial.

6. VELOCIDAD DE EMPUJE

Para el cálculo de la velocidad de empuje para remolcadores de acuerdo al “Propeller Handbook” se estima lo siguiente:

$$V = 1,43 * BHP^{0,21}$$

Nuestro BHP en el caso estudio corresponde a los aportados por dos motores comerciales de 404 BHP seleccionados, que cumplen con lo requerido por la resistencia al avance de 757,95 BHP, de esta forma la velocidad de empuje será:

$$V = 1,43 * (808)^{0,21} = 5,83 \text{ Nudos aproximadamente}$$

Velocidad que sería recomendable en cuanto a las normas de seguridad en el remolque de bingos o barcasas, ya que si al peso total del convoy se le sumará la velocidad de diseño de 10 nudos, pondría en riesgo la navegación en el río, por las limitaciones de profundidad, ancho del canal, y velocidad de frenado en caso de emergencia. Por lo anterior se asume como velocidad de empuje para el remolcador 6 nudos. Este dato igualmente se corrobora con los datos de campo obtenidos; para embarcaciones de este tipo y de dimensiones similares la velocidad real de empuje en las mismas circunstancias de carga es de un promedio de 5 nudos río arriba y 7 nudos río abajo.

7. SISTEMA DE ENGRANAJE REDUCTOR

Se efectúa la mejor selección del engranaje reductor, teniendo en cuenta que los remolcadores utilizan motores de rating continuo CD (*continuous duty*), y que su principal característica es la fuerza y no la velocidad por lo cual se requiere un reductor que permita reducir a muy bajas revoluciones en el eje, desde 1.800 rpm del motor a unas 400 rpm en el eje, por tal motivo se requiere una relación de transmisión de 4.50 (4,5 a 1).

8. EJES

Para el cálculo del diámetro del eje, tomamos las recomendaciones del libro *Elements of Marine Propulsion* [7] y la norma ABS para la construcción de buques de acero de menos de 90 metros de eslora, donde básicamente con las rpm de la hélice (rpm motor reducidas) y con los SHP en la línea de ejes utilizamos las siguientes fórmulas:

Elements of Marine Propulsion

$$D = 92 * \left(p * \frac{(1+k)}{q} N \right)^{\frac{1}{3}} = 97 \text{ mm}$$

Donde, P = 845/2 SHP (cada eje)

N = 400 rpm

K = q * (a-1)

q = 0,4 para motores 4 tiempos

a = 1,2 (cte)

ABS – RULES (Diseño y construcción de buques de menos de 90 mts de eslora)

$$D = 100 * k * \sqrt[3]{\left(\frac{H}{R}\right) * \left(\frac{C1}{U + C2}\right)} = 93 \text{ mm}$$

D = Diámetro del eje

K = Factor de diseño = 1,22

H = SHP=315 KW

R = RPM en el eje = 400

U = constante material= 600 N/mm²

C1 = 416,4 constante

C2 = 160 constante

Por lo anterior nos da como resultado un eje de diámetro entre $D = 97$ y 93 mm, al comparar los dos métodos, los cuales nos dan valores muy cercanos y de acuerdo a recomendaciones para buques de tamaño pequeño se sugieren ejes en acero inoxidable.

9. HÉLICES

Para la selección de hélice se debe considerar siempre que la mayor eficiencia se logrará con la hélice que tenga el mayor diámetro y la menor aceleración de empuje, mayor diámetro que será compatible con el tamaño que nos permita el arbotante ya instalado en el barco y que sustenta o soporta al eje, y para nuestro caso el espacio del diámetro de los túneles del casco. Además en todos los casos se deberá respetar una luz o distancia mínima entre el casco y las aspas de la hélice, distancia la cual se recomienda de dos formas, la primera deberá ser mayor a una pulgada ($1'' = 2,54$ cm) o más si es posible, y la segunda respecto al 15 ó 20% del diámetro de la hélice respetando este valor como margen de espacio al casco. Acuerdo referencia de Robert Latorre [8]. Una hélice con menor diámetro significa menor masa de agua en movimiento, por lo que para igualar el empuje habrá que acelerar más a la masa en movimiento, o sea incrementar el paso de una hélice sustituta de menor diámetro.

Hay que evitar poner una hélice con un número de aspas que sea múltiplo del número de cilindros del motor. Para nuestro caso se tiene un motor de 6 cilindros, no debemos instalar hélices de 2, 3 ó de 6 aspas; pero sí en cambio de 4 ó 5. Esto se hace para evitar vibraciones torsionales y sincronismos inducidos por empuje axial de las aspas.

El paso de la hélice tiene que ser compatible en cálculo con el número de revoluciones del motor propulsor y con la curva de potencia que el mismo motor presente. Si por ejemplo diseñamos una hélice que tenga poco paso, el motor podrá estar trabajando suavemente buscando más empuje (carga) a mayores RPM. Girará en vacío, el buque andará lentamente e incluso podrá dispararse en vueltas ocasionando daños mecánicos o carbonizando dentro de los cilindros y expulsando humo negro por el escape originado en el exceso de combustible no quemado enviado por la bomba de inyección a las cámaras de combustión. Si por el contrario nos excedemos en el paso, el motor propulsor no podrá levantar más que un número de vueltas limitado (sin llegar al máximo); comenzará a recalentarse indicando mayores temperaturas en los gases de escape o expulsando humo blanco por el escape. Humo que es originado por un

mayor consumo de aceite presente en las cámaras de combustión. Además las formas del casco “perturbarán” el flujo continuo de agua que llega desde la proa hasta la posición de la hélice moderadamente ordenado, disminuyendo por tanto su eficiencia. Por esto es fundamental asegurar un flujo libre de interferencias y con líneas suaves hacia la posición en que trabajará la hélice. El diseño de la hélice más adecuada para cada buque implica, como todos los aspectos de la hidrodinámica relacionados con el proyecto, una solución de compromiso para hacer frente a diversas necesidades muchas veces contrapuestas.

En la actualidad existen dos métodos apropiados para el correcto proyecto de una hélice:

- Por series sistemáticas (el más utilizado).
- Por teoría de circulación (se utiliza cuando la hélice está muy cargada o cuando ha de trabajar con un reparto de estela muy poco uniforme).

A pesar que el método de Crouch por series sistemáticas es el más utilizado para determinar el paso, y diámetro de la hélice, basándonos en la limitación de espacio en los túneles de la popa y para conservar las reglas de espacio entre hélice y casco del remolcador diseñado donde se establece que la distancia entre la punta de la propela y el casco debe ser, como regla general, de 10 al 15 por ciento del diámetro de la propela. Esta brecha es necesaria para minimizar las explosiones del aspa al pasar cerca del casco, causantes de ruido y vibración en la cabina. Las propelas van aumentando la cantidad de aspas según la embarcación y si sus máquinas necesitan más área de presión y succión. Si se necesita un diámetro específico y no se puede instalar la propela porque no se tiene el espacio necesario, se puede considerar aumentar la cantidad de aspas. De esta manera, se evita la vibración en la cabina a causa de un diámetro más grande de lo aceptable, así mismo para buques de trabajo y especialmente los remolcadores se debe buscar una relación diámetro-paso de la propela que sea igual a la unidad ($D/P = 1$), basados en el tipo de trabajo a realizar por el buque y la velocidad de trabajo, se recomiendan las siguientes características para la hélice, así:

TABLA 3
SELECCIÓN DIÁMETRO Y PASO DE LA HÉLICE

HÉLICE	
DIÁMETRO	30" (76 cm)
PASO	28-30"
ASPAS	5

10. CONCLUSIONES

Las normas de las casas clasificadoras son importantes a la hora del diseño, y deben ser objeto de estudio por parte de los diseñadores, pues soportan en gran medida la factibilidad posterior del proyecto y su aceptación comercial, tanto por parte del *sponsor* como de los futuros clientes.

Son fundamentales y de gran ayuda las herramientas computacionales, Maxsurf - Hydromax, Hullspeed, Autocad, Navcad, Google – Sketchup, las cuales evidencian cómo los software minimizan los tiempos de evaluación y estudio, y facilitan las tareas de los diseñadores a la hora de cálculos, sin embargo es de mayor prioridad que no solo el diseñador sepa manejar la herramienta, sino que de fondo se conozcan los efectos en estudios y sus relaciones dentro del proyecto.

Es importante el juicio de expertos en la toma de datos para el desarrollo de proyectos, ya que no solo las normas dan pautas para la aplicación de criterios, sino de igual forma, las investigaciones de campo, donde se obtienen informaciones de las personas que navegan, operan y realizan mantenimiento a este tipo de buque, aportan conocimiento práctico por su interacción directa con el medio y sus interacciones.

Para la gran mayoría de los casos, los remolcadores de empuje cumplen con las siguientes características: relación potencia BHP y toneladas de empuje de 1 a 3, relación paso-diámetro de la hélice igual a 1 aproximadamente y la manga a tener en cuenta como mayor factor de diseño.

REFERENCIAS

- [1] Sánchez Blanco, Michael e Hincapié Agudelo, Juan Carlos. Diseño Preliminar Remolcador Fluvial de empuje para el río Magdalena. Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Naval especialidad Mecánica, Escuela Naval “Almirante Padilla”, Cartagena, 2010.
- [2] Lamb, Thomas. Ship Design and Construction. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, SNAME, Jersey City, NJ, USA, 2003.
- [3] Mulder, Chris y Williams, Patrick. Improving the Performance of shallow Draft Tugs in Northern Canada. Paper No. D18.
- [4] Elizalde Lavayen, Pedro Y. Estudio Preliminar para establecer un sistema de transportación fluvial en la subcuenca del río Daule. Tesis de grado Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, 2002.

- [5] Gutiérrez, Wilson; Kleber, Jacinto. Diseño preliminar de un Remolcador prototipo para la Armada Nacional. Tesis de grado Ingeniería Naval. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, 2003.
- [6] Gerr, Dave. "Propeller Handbook", International Marine, Camden, Maine, 2001.
- [7] General Motors Corporation. "Elements of Marine Propulsion", 2a. Edition 1974.
- [8] Latorre, Robert. Shallow River PushBoat Preliminary Desing. Presented at the September, 1983, VIII Pan American Congress of Naval Engineering, Maritime Transportation and Port Engineering, held at Washington, D.C., sponsored by the Institute of Pan American Naval Engineers.

ENSAYO

EL pH, UN IMPORTANTE INDICADOR DE LA SALUD DE LOS OCÉANOS

Alejandro Rueda Durán*

alejandro_rueda76@yahoo.com

Resumen: Desde los cursos más elementales de Química y Biología constantemente se ha manejado de una u otra forma el concepto general del pH, pero con los actuales niveles de variación de las condiciones oceanográficas de los océanos, es necesario profundizar un poco más en su real importancia y por tanto en el funcionamiento y el equilibrio de la biomasa que de él depende; con lo que de manera directa o indirecta se incluye a los seres humanos, dado que al alterarse los niveles de acidez o basicidad de este fluido, se puede en muy poco tiempo modificar la estructura animal y vegetal que hoy conocemos y denominamos normal, tanto al interior de los océanos como fuera de ellos.

Palabras clave: Acidez, Basicidad, Carbonato de Calcio, Dióxido de Carbono, Océanos, pH.

Abstract: From the most basic chemistry and biology courses, the general concept on pH has been constantly handled in one way or the other; but with today's levels of variation in oceanographic conditions of the oceans, it is necessary to go deeper in its true importance and therefore in both the functioning and balance of the biomass depending on it; thereby directly or indirectly human beings are involved, since by altering levels of acidity or basicity of this fluid, in a very short time changes in the animals and plants structures which we now know and call normal can take place, both inside and outside the oceans themselves.

Key words: Acidity, Basicity, Calcium carbonate, Carbon dioxide, Oceans, pH.

* Teniente de Navío de la Armada Nacional. Profesional en Ciencias Navales, Escuela Naval "Almirante Padilla". Oceanógrafo Físico, Escuela Naval "Almirante Padilla". Especialista en Política y Estrategia Marítima, Escuela Naval "Almirante Padilla".

EL ORIGEN DEL pH

En 1909 el bioquímico danés S.P.L. Sorensen definió el potencial Hidrógeno (pH) "como el logaritmo negativo de la actividad de los iones hidrógeno". Lo que numéricamente fue representado por [1] como:

$$\text{pH} = -\log_{10}[a_{\text{H}^+}]$$

Donde pH corresponde a la actividad del ion hidrógeno. Desde entonces, el término pH ha sido universalmente utilizado por la facilidad de su uso, evitando así el manejo de cifras largas y complejas. En disoluciones diluidas en lugar de utilizar la actividad del ion hidrógeno, se le puede aproximar utilizando la concentración molar del ion hidrógeno; un ejemplo que ilustra la facilidad con que el empleo de la notación del pH simplifica la nomenclatura es el siguiente: Una concentración de $[\text{H}^+] = 1 \times 10^{-8} \text{ M}$ (0,0000001) es simplemente un pH de 8 ya que: $\text{pH} = -\log[10^{-8}] = 8$

El pH es ya una unidad de medida aceptada para determinar la alcalinidad o acidez de una sustancia cualquiera. Pero como tal el pH no representa nada más que un valor numérico, el verdadero valor está representado por una característica que poseen los ácidos y bases los cuales nos permiten poder medirlos: esto es la concentración de los iones de hidrógeno. Los ácidos fuertes tienen altas concentraciones de iones de hidrógeno y los ácidos débiles tienen concentraciones bajas.

Hay centenares de ácidos, ácidos fuertes como el ácido sulfúrico, que puede disolver los clavos de acero y ácidos débiles como el ácido bórico, que es bastante seguro de utilizar en el aseo de los ojos. Hay también muchas soluciones alcalinas, llamadas bases, las soluciones alcalinas suaves como la leche de magnesia, que calma los trastornos del estómago y las soluciones alcalinas fuertes como la soda cáustica o hidróxido de sodio que puede disolver el cabello humano o destapar una cañería.

Los valores numéricos verdaderos para estas concentraciones de ion de hidrógeno son típicamente una fracción muy pequeña, del orden de: 1/10.000.000. Debido a que este es un número incómodo con el que trabajar, una escala única fue ideada.

La escala creada utiliza el logaritmo negativo de la concentración del ion de hidrógeno (o actividad) para las soluciones ácidas y básicas. Los valores leídos en esta escala se llaman las medidas del pH [1].

Los números a partir del 0 al 7 en la escala indican las soluciones ácidas, y del 7 al 14 indican soluciones alcalinas. Cuanto más ácida es una sustancia, más cercano su pH estará a 0; cuanto más alcalina es una sustancia, más cercano su pH estará a 14; cuando una sustancia tiene su pH cercano a 7 se dice que es neutra.



Extraído de la página web de wáter-USGS

1. EL EFECTO DEL pH EN EL OCÉANO

Para comprender la importancia del pH en los océanos, debemos recordar que una de las principales características del agua de mar es que se comporta como una solución buffer, es decir que puede resistir los cambios de pH cuando se le agregan cantidades de ácido o base. Las soluciones buffer son conocidas como disoluciones, soluciones amortiguadoras o tampón. Más técnicamente se podría decir que están compuestas por el ion común de un ácido débil o una base débil en una sal conjugada, donde ambos componentes deben de estar presentes [2].

Partiendo de que el océano se comporta como una solución buffer, el que ocurran muchas de las reacciones que podríamos considerar normales se debe en gran medida a que estas solo ocurren en condiciones muy específicas de acidez o basicidad, en la siguiente tabla se pueden observar algunos de los límites de pH en los que estos procesos se pueden presentar:

Uno de los procesos más importantes que solo ocurren en condiciones específicas de pH es el de la formación y sostenimiento de los corales, los cuales debido a que

TABLA 2
EFECTOS DEL pH SOBRE LA VIDA ACUÁTICA

Valores del pH		
Mínimo	Máximo	Efectos
4.0	10.1	Límite para los peces más resistentes
5.0	9.0	Rango tolerable para la mayoría de los peces
5.4	11.4	Los peces evitan las aguas más allá de estos límites
6.0	7.2	Rango óptimo para las huevas de peces
1.0	--	La larva del mosquito muere por debajo de este valor
3.	4.7	La larva del mosquito vive en este rango
7.5	8.4	Rango óptimo para algas

poseen una estructura esquelética a base de carbonato de calcio (CaCO_3), requieren que el nivel del pH en el agua circundante se mantenga en valores entre 8 y 8.4 [2]. Algunos estudios científicos han demostrado que cuando se presenta una disminución importante en el pH del agua de mar (es decir que aumenta la acidez) cercana a 7.3 los esqueletos de carbonato de calcio empiezan a disolverse y los pólipos se exponen completamente, pero estudios más recientes mostraron que en dos especies de corales mediterráneos, *Oculina patagonica* y *Madracis pharensis* los pólipos sobrevivían en estas aguas ácidas y que su reproducción era acelerada [3]. Aunque existen excepciones, la mayoría de los corales y especies con exoesqueletos calcáreos presentan deterioro en su estructura al aumentar la acidez por efecto de la disminución del pH en el agua de mar, reduciendo la saturación de carbonatos en el agua y haciendo más difícil los procesos de calcificación.

El pH también regula actividades en los microorganismos, bien sean fotosintéticos o no, debido a que puede ocasionar una disminución en la disponibilidad de nutrientes producto del impacto directo en los procesos de fotosíntesis ocasionado a través de las algas, quienes sufren durante los procesos de calcificación, al igual que los organismos con exoesqueletos. Adicionalmente, no es difícil de suponer que se presenten variaciones en la composición celular de las especies que traten de adaptarse a los cambios, modificando su morfología y posiblemente hasta su valor nutricional, con lo que se ocasionaría un efecto nocivo en toda la red trófica.

Pero el impacto del pH no se limita a los corales y algas, estudios biológicos como lo demuestra Fairless (2007) manifestaron que la reducción de los niveles de pH en la sangre, reducen la capacidad de transportar oxígeno, lo que podría ocasionar una disminución de la biomasa en organismos de mayor tamaño [3].

2. FACTORES QUE REGULAN EL pH EN EL OCÉANO

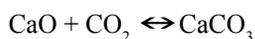
Aunque el agua de mar se comporta como una solución buffer, existen factores que modifican sustancialmente los valores del pH en el océano, tanto por procesos naturales como por adiciones de origen antropogénico. Si los pudiéramos dividir, los principales aspectos naturales que condicionan el pH son: la temperatura, la salinidad, la densidad y la presión, y el antropogénico es la adición de contaminantes.

2.1 Temperatura

Es tal vez junto con el CO_2 el factor más común en los procesos que alteran los niveles del pH, aunque no por eso el de mayor impacto. La primera relación con la variación de los niveles del pH en el océano se da a partir de los procesos de evaporación, los cuales ocurren por efecto de la adición de calor en la capa superficial del océano, los cuales en una proporción medianamente baja, aumentan los niveles de salinidad, ocasionando que disminuyan los niveles de iones de hidrógeno, elevando los valores del pH en un área determinada.

Otra explicación sobre la relación con la temperatura nos la dan Morelos *et al.* (2002) “el pH tiene un comportamiento inverso al de la temperatura, cuando la temperatura aumenta el pH tiende a bajar, mientras que cuando la temperatura baja el pH tiende a subir, suponemos que esto tiene relación con la generación de ácidos por los microorganismos” [4].

La temperatura tiene un importante efecto sobre los niveles de pH, debido a la capacidad de absorción de dióxido de carbono (CO_2), esta relación está dada en la capacidad que posee el agua fría de absorber una proporción mayor de CO_2 ; podemos explicar mejor lo anterior recordando la ecuación de formación del carbonato de calcio:



El equilibrio de esta ecuación se ve afectado principalmente por la temperatura. El CaCO_3 “se disuelve” en agua fría, favoreciendo la generación de CO_2 . A la inversa, conforme la temperatura del agua aumenta, el CO_2 se combina con el CaO y se precipita. El CO_2 en el agua integra un ácido débil: H_2CO_3 , disminuyendo el pH (haciéndolo más ácido). Por lo tanto, al retirarse del agua para formar carbonato de calcio, el pH aumenta, disminuyendo su acidez [5].

2.2 Salinidad

La principal variación que presenta el pH por efecto de la salinidad se debe al aumento o disminución de las proporciones en que se encuentre, debido a la variación de la cantidad de iones de hidrógeno, los que al aumentar generan una disminución en el pH ocasionando un aumento en la acidez, de forma inversa, la disminución del número de iones de hidrógeno genera un incremento en el nivel del pH, lo que ocasiona un aumento en la basicidad del agua.

A mayor salinidad la capacidad del océano para absorber gases disminuye, con lo que el agua disminuye su capacidad de solvencia y por lo tanto entran al océano menor cantidad de gases que alteren el pH.

2.3 Presión

El efecto más conocido de la presión sobre las variaciones de los niveles de pH en los océanos, se desarrolla en la atmósfera, y su impacto está dado por el efecto que generan las diferencias de presiones atmosféricas en la ocurrencia de los vientos, dado que al desarrollarse vientos más fuertes que afecten la capa superficial del océano se produce un mayor intercambio del CO_2 entre la atmósfera y el océano, aumentando su absorción, producto de la turbulencia generada sobre la superficie.

La presión parcial del CO_2 en la atmósfera y en el agua debe estar en equilibrio. Si hay demasiado CO_2 en la atmósfera, el océano absorberá más. Si la presión parcial de CO_2 en el agua es más alta que en la atmósfera, el CO_2 pasará del océano a la atmósfera y el pH del océano aumentará [6].

El aspecto más delicado que relaciona a la presión con el pH, está en la capacidad de mantener bajo altas presiones y muy bajas temperaturas a los hidratos de metano en su condición original, impidiendo su liberación al océano; 1m^3 de metano en condiciones de depósito puede contener hasta 164m^3 de metano al nivel del mar [7].

2.4 Densidad

Al referirse a la densidad, se debe tener presente que en el océano, es una propiedad que varía en función de la temperatura, la salinidad y la presión, pero cuando se trata de su efecto en el pH, su variación no tiene relación con ninguna de las tres anteriores; es decir que existe una relación directa entre las variaciones de la densidad y las del pH independientemente quien ejerza mayor influencia sobre la densidad.

Un estudio realizado por Hernández (2003), orientado a determinar la relación entre el

pH y la densidad, encontró que: Existe una relación entre el pH y la densidad de aguas superficiales y subsuperficiales de una región de la Antártica y las de la costa oeste de Baja California. En las aguas de la Antártica, el pH se encontró bien correlacionado con la densidad y la salinidad pero no con la temperatura porque la estabilidad de la columna de agua era controlada por la salinidad. En la costa occidental de Baja California se encontró lo opuesto, dado que la densidad era controlada por temperatura. Esto demuestra que el pH sigue a la densidad, independientemente de qué la controle [8].

De igual forma el anterior estudio encontró que el pH se correlaciona inversamente con salinidad y densidad en la Antártica porque las bajas salinidades de la superficie del agua indican estratificación; de este modo, la capa de mezcla soporta el aumento fotosintético del pH.

Desde el punto de vista de la solvencia y de la entrada de gases que puedan alterar los niveles de pH del océano, entre más densa sea el agua menor será su solubilidad; a mayor temperatura menor densidad y, a mayor salinidad mayor densidad, con lo que es posible entender que en aguas frías la solvencia del océano es mayor, dado que es una función principalmente de salinidad y de concentraciones; con lo que el espacio disponible para realizar los enlaces que puedan atraer gases disminuye, lo anterior contribuye a explicar que las aguas frías y menos salobres del polo pueden absorber más gases, los cuales tienen la capacidad de alterar los niveles de pH del océano.

2.5 Contaminantes

Sin lugar a dudas el principal contaminante y elemento modificador de los niveles de pH del océano es el CO_2 , pero es indispensable entender que no todo el dióxido de carbono que se encuentra en el océano es producto de la contaminación. La naturaleza en el normal desarrollo de sus procesos de respiración libera grandes cantidades de CO_2 .

Pero es el exceso de dióxido de carbono, producto de actividades antropogénicas, que está entrando en el océano, el que puede alterar sus niveles de pH y por ende alterar el equilibrio de la biomasa.

Las estadísticas muy de moda hoy en día, por efecto del calentamiento global, nos indican que los océanos reciben cada año cerca de dos mil millones de toneladas de CO_2 y han acumulado más de 118.000 millones de toneladas desde la época preindustrial (año 1800), que son cantidades suficientes para alterar progresivamente el equilibrio del pH oceánico [9].

Los océanos son considerados como el mayor depósito de dióxido de carbono, con una capacidad de absorción mucho más alta que la atmósfera y la biosfera, ya que absorbe el 33% de las emisiones. Hoy en día se calcula que el pH de la superficie del agua podría haber disminuido en 0,1 unidades, una cifra muy alta, para el equilibrio de la biomasa [9].

Si las emisiones de CO_2 continúan al mismo ritmo es posible, de acuerdo con estudios realizados por agencias europeas, que para el año 2010 el pH podría disminuir hasta 0,5 unidades, lo que correspondería a triplicar la concentración de iones de hidrógeno. Como manifiesta el informe: “sería el pH más bajo que han experimentado los océanos en los últimos centenares de millones de años, lo que podría comprometer, quizás de forma devastadora, el desarrollo de organismos marinos, sobre todo de aquellos que tienen un esqueleto de carbonato de calcio” [10].

El aumento de las concentraciones de CO_2 pueden impedir la formación del carbonato de calcio, pero al aumentar la acidez del océano, las áreas donde se empieza a presentar con mayor rapidez, también sufrirán de la ausencia de la biomasa, la cual emigrará a aguas o profundidades con condiciones más benignas, alterando las concentraciones y distribución de toda la cadena trófica.

Pero el dióxido de carbono no es el único contaminante en el océano que puede alterar los niveles de pH. Dos elementos contaminantes ingresan al océano cada vez más, producto del incremento de la lluvia ácida. El dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), que al reaccionar con la humedad de la atmósfera propician la



Figura 1. Efecto del gas en los océanos

Tomado del artículo “El mar se vuelve más ácido y caliente, con efectos impredecibles para las especies” [10]

formación de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3), respectivamente, los cuales al llover caen sobre el océano disminuyendo los niveles de pH [11].

3. CONCLUSIONES

Los niveles de pH del océano están disminuyendo por efecto de la acción del hombre, el cual al alterar las condiciones químicas del planeta está alterando su equilibrio al interior de los océanos.

La destrucción acelerada de los corales producto de la desintegración del carbonato de calcio, la migración de los peces a aguas más básicas, son solo algunos de los resultados del efecto de la disminución de los niveles del pH en el océano.

Sin lugar a dudas lo que más ha alterado los niveles del pH del océano es el aumento de los niveles de CO_2 los cuales han incrementado la acidez del agua en cerca de 0.5 unidades, aunque el proceso de calentamiento global, y el correspondiente aumento en la temperatura media de los océanos también han contribuido a un descenso en los niveles de pH.

Si bien es cierto que no es un problema independiente ni local, es necesario entender que la variación de los niveles de pH en el mar pueden ocasionar la destrucción o una alteración de manera definitiva de la biomasa de los océanos, tanto diezmandola, como haciéndola mutar para adaptarse a las nuevas condiciones químicas que dominarán nuestros mares en los años venideros.

REFERENCIAS

- [1] COLOMBIA. Biblioteca Virtual Luis Ángel Arango. [documento en línea]. En: SENA. Aprendamos a tomar muestras de suelo, Cartilla 3, p. 11. 1992.
- [2] Cognetti, G.; Sarà, M. y Magazzú, G. Biología marina [documento en línea]. Barcelona: Editorial Ariel, 2001. Disponible en internet en http://danival.org/100%20biolomar/1300mar/mar_carquim.html. Entrada el 3 de enero de 2008.
- [3] FAIRLESS, Daemon. Corals can survive acidic waters. Mediterranean corals could strip, but not die, in response to climate change. BioEd Online Nature. 2007. [documento en línea]. Disponible en internet en <http://www.bioedonline.org/news/news.cfm?art=3235>. Entrada el 8 de enero de 2008.

- [4] Morelos, Carlos; Rodríguez, Jorge; Noyola, Adalberto. Evaluación del comportamiento del color, pH y alcalinidad en una planta de tratamiento anaerobio. XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. [documento en línea]. Guanajuato, México, 17 al 20 de abril, 2002. Disponible en Internet en <http://www.femisca.org/publicaciones/XIIIcongreso/XIIICNIS146.pdf>. Entrada el 14 de enero de 2008.
- [5] ARGENTINA. Página web del diario *AQUÍ LA NOTICIA.COM*. [documento en línea]. El océano ya no nos protege. Ecología. Edición: 1033, 18 de mayo. 2007. Disponible en internet en <http://www.aquilanoticia.com/nota.asp?IDNoticia=8574> Entrada el 14 de enero de 2008.
- [6] FRANCIA. Página Web de Schlumberger Excellence in Educational Development. Clima. (SEED). [documento en línea]. Dióxido de carbono en los océanos. Disponible en Internet en <http://www.seed.slb.com/qa2/FAQView.cfm?ID=898&Language=ES>. Entrada el 14 de enero de 2008.
- [7] González Pacheco, Eduardo. *Revista de Marina*. Hidratos de Gas (Primera parte). Chile, edición 2, p. 54. 2002.
- [8] HERNÁNDEZ-AYÓN, Martín *et al*. Relación pH-densidad en el agua de mar. [documento en línea]. Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad de Baja California. *Revista de Ciencias Marinas*, 29(4), p. 497-508. 2003. Disponible en Internet en <http://usuario.cicese.mx/~marinone/publicaciones/pdfs/2003/25MARTIN.PDF>. Entrada el 8 de enero de 2008.
- [9] CALDEIRA, Ken. WITKET, Michael. Anthropogenic carbon and ocean pH. [documento en línea]. *NATURE*, Vol. 425, 25 septiembre, 2003. Entrada el 10 de octubre de 2009. Disponible en: www.nature.com/nature
- [10] ROMAR, Raúl. ESPAÑA. La voz de Galicia. [documento en línea]. Sociedad. El mar se vuelve más ácido y caliente, con efectos impredecibles para las especies. 12 de octubre de 2005. Disponible en <http://www.lavozdegalicia.es/hemeroteca/2005/10/12/4154275.shtml>. Entrada el 10 de enero de 2008.
- [11] MÉXICO. Sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México. [documento en línea]. Lluvia ácida. Disponible en <http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnlluvia.htm>. Entrada el 26 de enero de 2008.

ENSAYO

HIDRATO DE GAS. UNA ALTERNATIVA ENERGÉTICA DEL FUTURO

Ricardo Andrés De la Rosa Namen*, Gisela Mayo Mancebo**
rdelarosana@enap.edu.co, gmayom@enap.edu.co

Resumen: El hallazgo de los hidratos de gas, una forma de energía muy concentrada, descubierta en las profundidades del océano, ha llamado la atención de las naciones hacia la búsqueda y explotación de este recurso, así como de los diferentes estudios acerca de sus impactos y consecuencias en el medio ambiente. Teniendo en cuenta que todo lo relacionado con los hidratos de gas está estrechamente ligado a las ramas de la oceanografía, este documento se encuentra orientado, básicamente a la descripción general de su hallazgo, a la explicación de acerca de qué consisten, cuál es su formación, algunos métodos para su exploración, extracción y transporte hasta los continentes, con el propósito de motivar a la comunidad científica, académica y oceanográfica nacional, para que se interesen por los temas afines con esta prometedora fuente de energía del futuro.

Palabras clave: Hidrato de Gas, Metano, Energía Concentrada, Combustible Fósil, Efecto Invernadero.

Abstract: The finding of Gas Hydrates, a form of very concentrated energy, discovered in the depths of the ocean, has drawn attention of the nations towards the search and operation of this resource, as well as the different studies about their impact and consequences on the environment. Considering that all closely related to gas hydrates is closely bound to the branches of oceanography this paper is basically oriented, towards the general description of their finding, to the explanation about what they consist of, what they are composed of, some methods for their exploration, extraction and transport up to the continents in order to motivate the scientific, academic, and oceanographic national community, to become interested in issues related to this promising energy source of the future.

Key words: Gas Hydrate, Methane, Concentrated energy, Fossil combustible, Greenhouse effect.

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

** Investigador Grupo de Investigación en Oceanología, Facultad de Oceanografía Física, Escuela Naval "Almirante Padilla" (ENAP), Isla Manzanillo, Cartagena, Colombia.

INTRODUCCIÓN

El hombre al principio, solo sabía utilizar la energía de su propio cuerpo, después usó herramientas que le ayudaban a sacar el mejor partido de su propia energía y de la de los animales. Cuando descubrió el fuego, aprendió a obtener energía calorífica a partir de la madera, luego creó artefactos que aprovechaban la energía del fuego, utilizando como combustible la madera y el carbón, hasta llegar a nuestros días donde la principal fuente energética es el petróleo [1].

A lo largo del tiempo el hombre ha comprendiendo la importancia que tiene la energía para su propio bienestar y progreso, aprendiendo a obtenerla, almacenarla, transportarla y transformarla para el uso de todas sus necesidades y actividades.

El ser humano ha sabido aprovechar la energía que le ofrece la naturaleza pero, algunas de estas fuentes de energía son limitadas. Teniendo en cuenta la demanda y explotación de las actuales fuentes de energía no renovables, como por ejemplo, el gas natural, el carbón, la madera y el petróleo, es importante para un futuro cercano la necesidad de buscar nuevas fuentes rentables de energía, así como también desarrollar la tecnología necesaria para emplear al máximo las fuentes de energía renovables, como las que ofrecen el Sol, el viento, los ríos y océanos, entre otros. Debido a que en la sociedad moderna, la industria y el comercio dependen principalmente del petróleo y el gas natural, y, dado que la demanda por todos los usos de estos recursos minerales y sus derivados es cada vez mayor, la necesidad de estas fuentes de energía han suscitado a través de las últimas décadas, el interés de aumentar los esfuerzos de su búsqueda, llegando incluso a volcar la mirada hacia los mares, lugar donde son muy abundantes.

Frente al hecho de que el petróleo y el gas natural tendrán que agotarse algún día (no son renovables) el descubrimiento de una de las formas de energía más concentradas en el planeta se presenta como una nueva alternativa para mantener el abastecimiento de energía del futuro. El hidrato de gas, un combustible detectado en las lunas de Júpiter, pero que en la Tierra se encontró hace muy poco tiempo, despierta el interés de la comunidad científica y de las naciones, dado que es factible su extracción y que los estudios iniciales acerca de su ubicación, estiman que existen más reservas de este recurso que de carbón, petróleo y gas juntos. Los “Hidratos de gas” o “Hielo Inflamable”, son una forma sólida de los gases semejante al hielo que aparece en la mayoría

de los fondos oceánicos del mundo y ha despertado un gran interés en los últimos años tanto en la comunidad científica, como en los organismos estatales dedicados a la investigación de recursos naturales y energéticos, así como también en empresas de exploración de hidrocarburos. Este interés está principalmente fundamentado, por el resultado de las primeras evaluaciones científicas, las que estiman que el volumen de gas contenido en los reservorios de hidratos podrían exceder al de las reservas mundiales de gas conocidas en la actualidad [2].

Recientemente se ha encontrado que en el golfo de México hay suficiente energía para abastecer a los Estados Unidos por lo menos 2.000 años. Algunos científicos consideran que hay suficiente para abastecer a la raza humana durante 3.000 años [1].

El objetivo de este documento, es ilustrar a la comunidad oceanográfica nacional acerca de esta novedosa fuente de energía y mirar algunos aspectos básicos de su origen, composición química, exploración, extracción y relación con la oceanografía y sus diferentes ramas.

1. DESARROLLO DEL TEMA

1.1 Reseña histórica

Los científicos se percataron de la presencia de hidratos de gas inicialmente en el espacio exterior al determinarse su presencia en las lunas de Júpiter. El primer hecho importante en el descubrimiento de los hidratos tuvo lugar en 1812, cuando el químico británico Sir Humphry Davy, descubrió hidratos de cloro mientras trataba de licuar cloro en presencia de agua. Para la década de 1930 se observó que los hidratos de gas se formaban en los gasoductos y líneas de gas natural, obstruyendo el flujo libre del gas, convirtiéndose en un problema para la infraestructura de los sistemas de transporte del gas.

Solo hasta 1970, se efectuó la primera detección en el mar de los hidratos de gas en su estado natural, utilizando métodos geofísicos, cuando los investigadores George Bryan y John Ewing del “Lamont-Doberty Earth Observatory” de la Universidad de Columbia, realizaron los primeros estudios sismológicos en el área de “Blake Ridge”, cerca de la costa de Carolina. “Aunque ya fueron descubiertos de forma experimental en 1811 por Sir Humphry Davy, fue muy posteriormente en 1970, cuando se detectaron por métodos geofísicos dentro de los sedimentos marinos del fondo del Blake Outer Ridge (EEUU). Este descubrimiento científico llegó casi casualmente, al obser-

var sobre los perfiles sísmicos un "eco" doble, que era un calco de la forma del fondo marino, y que siempre estaba asociado a la presencia de hidratos" [3].

Las primeras investigaciones acerca del potencial energético de los hidratos de gas motivaron a que algunas naciones se interesaran por este valioso recurso energético y fue así como en agosto de 1998 fue publicado, por el Departamento de Energía de Estados Unidos, las estrategias a seguir para los próximos años en cuanto a prospección y potencial de estos sólidos. A este interés se sumaron países como la India, Rusia, Noruega, Canadá, Japón, China, Brasil y Chile, lugares en donde se están iniciando importantes programas destinados a conocer y evaluar el potencial de la exploración y extracción de Hidratos de Gas. En 1999, los Estados Unidos formula su primer Programa Nacional de Hidratos de Metano. Dada la necesidad de incrementar los esfuerzos para mejorar las condiciones ambientales del planeta, y, teniendo en cuenta los riesgos e impactos que podría ocasionar la explotación de los hidratos de gas, países como Estados Unidos, Japón, Canadá y Alemania están mostrando gran preocupación por el tema y han adelantado importantes programas destinados a generar el conocimiento científico de este recurso, así como el desarrollo de tecnologías de explotación apropiadas.

1.2 El concepto de Hidrato

Un Hidrato, es una sustancia que se ha combinado con una proporción definida de moléculas de agua. Las fórmulas de los hidratos se escriben con un punto centrado entre las moléculas de agua y el compuesto que ha sido hidratado; por ejemplo, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, sulfato de cobre pentahidratado.

Cuando algunos compuestos se disuelven en agua y la disolución se deja evaporar lentamente, el compuesto disuelto precipita en forma de cristales que contienen cantidades definidas de agua. Los hidratos no son sustancias más o menos humedecidas sino compuestos definidos, porque su composición es constante. Pueden perder su agua de hidratación por calefacción y se pueden volver a formar por reacción de la sustancia anhidra con el agua. Esto demuestra que las fuerzas que mantienen unidas a las moléculas de agua en los hidratos no son muy fuertes.

El agua mantiene prácticamente invariable su estructura molecular en el hidrato, al estar unida al compuesto anhidro mediante enlaces covalentes coordinados a través de uno de los pares de electrones solitarios del oxígeno y, a veces, mediante enlaces de hidrógeno [4]. En otras palabras un hidrato es una combinación de un compuesto y agua, un cristal que contiene una molécula de agua.

1.3 El hidrato de gas

Los hidratos de gas también son comúnmente conocidos como “Hielo Inflamable”, debido a que su estructura molecular, en forma de cristales es muy similar a la del hielo y además a su composición sólida y a la gran concentración de energía interna, puede encenderse y generar combustión por un largo periodo de tiempo al colocarlo junto al fuego. Básicamente, son moléculas de gas atrapadas en moléculas de agua.



Figura 1. Combustión en un hidrato de gas

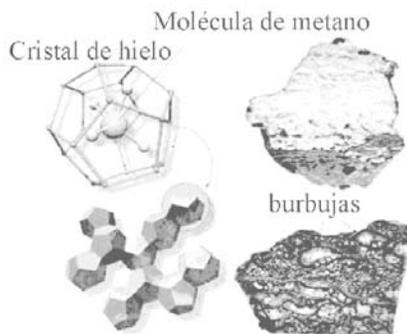


Figura 2. Estructura molecular hidrato de gas. Tomado de: <http://www.armada.cl>

Eduardo González Pacheco, en su artículo “Hidratos de Gas” sostiene que: “Los hidratos de gas son un grupo especial de sustancias químicas cristalinas que ocurren naturalmente de agua y gases de poco peso molecular, llamados compuestos de inclusión, que tienen una estructura clatrática o de jaula y que incluyen moléculas de gas metano. La estructura clatrática es agua en forma de hielo y la inclusión son el metano y otros gases” [5].

Generalmente todos los gases, con algunas excepciones, forman hidratos; sin embargo, los más abundantes en la naturaleza son los hidratos de metano, aunque pueden incluir etano y otros gases. Los hidratos pueden almacenar grandes concentraciones de gas en porcentajes por unidad de volumen, en condiciones de presión y temperatura estándar, la descomposición de 1 m³ de hidrato de metano produce 64 m³ de metano gaseoso y 0.8 m³ de agua.

1.4 Formación

Para la formación de los hidratos de gas, juegan un papel muy importante diferentes aspectos físicos y químicos. La formación del metano en el lecho marino, así como las condiciones termobáricas subsuperficiales, son fundamentales en la formación de

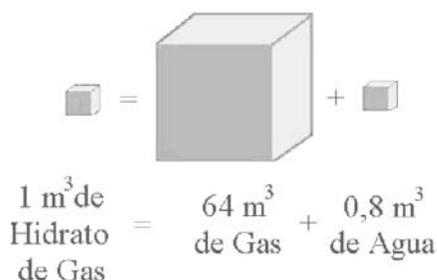


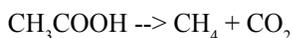
Figura 3. Volumen de hidrato de gas en relación a su contenido de gas y agua.
 Tomado de: <http://www.armada.cl>

los hidratos de gas y sus concentraciones. Existen fundamentalmente dos ambientes en donde se producen los nódulos de hidratos de gas y se encuentran en grandes proporciones: El primero es en las regiones polares, bajo la capa de suelo congelada permanente, conocida también como *permafrost*; y la segunda, es en los sedimentos marinos de los márgenes continentales, bajo ciertas condiciones especiales de presión y temperatura, aproximadamente a profundidades entre los 800 y 4000 metros.

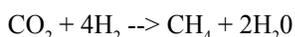
El metano que se genera en el subsuelo marino es producido principalmente por procesos microbianos o de degradación biológica y procesos termogénicos, o de generación térmica.

En el proceso microbiano los desechos orgánicos de los sedimentos que se depositan se descomponen a través de una compleja secuencia (metanogénesis) a metano por acción bacteriana en ambientes anóxicos. Esta descomposición se considera que tiene lugar ya sea por fermentación de ácido acético (acetato) o por reducción de dióxido de carbono

i) Fermentación de ácido acético



ii) Reducción de dióxido de carbono



En el proceso termogénico de generación de metano, tiene lugar la descomposición térmica (*cracking*) de materiales derivados orgánicamente para formar hidrocarburos

(incluyendo metano). Esto ocurre generalmente a considerable profundidad (más de 2 km) en cuencas sedimentarias donde las temperaturas exceden los 100°C. El metano termogénico puede producirse también a partir de degradación de petróleo a profundidades aún mayores, y a partir de la maduración de carbón [2].

Los hidratos de gas que se producen en los sedimentos marinos se forman cuando el metano asciende de los estratos generadores, hasta alcanzar las condiciones favorables de presión y temperatura en una zona de estabilidad del hidrato; iniciándose su formación en los espacios de poros y fracturas de los reservorios de gas en presencia de moléculas de agua, posteriormente se precipitan relleno progresivamente los espacios de los poros de los sedimentos y fracturas, y eventualmente se cementan para dar lugar a depósitos de hidratos masivos o en vetas.

Por otra parte, en las zonas de *permafrost* de las regiones polares son formados gracias a que estas capas se comportan como un buen cierre para formar trampas que retienen gases. Así, el gas metano y otros hidrocarburos livianos que ascienden desde capas profundas, se van acumulando bajo esta zona.

1.5 Exploración

Los estudios para la exploración de los hidratos de gas dentro de los sedimentos marinos normalmente se realizan mediante el empleo de métodos geofísicos indirectos. Algunos de los métodos más conocidos son: La Sísmica de Reflexión, el Transiente Electromagnético, por Flujo Calórico, Batimetría asociada a la Geomorfología y por Gravedad y Magnetismo.

La Sísmica de Reflexión, consiste en la detección de una anomalía sobre registros sísmicos marinos llamada BSR (*Bottom Simulating Reflector*). Esta detección es posible gracias a que los hidratos poseen una alta velocidad de propagación de ondas sísmicas, mucho mayor a la velocidad de los sedimentos del fondo marino que lo contienen, por lo que al contrastar las velocidades podemos detectar la fuerte reflexión de energía sísmica incidente que se produce.

El Transiente Electromagnético busca encontrar las diferencias a una respuesta eléctrica entre los sedimentos y los hidratos de gas, en donde los sedimentos se comportan como un material conductor, mientras que los hidratos presentan un comportamiento similar al de un cuerpo aislante, por lo que podemos distinguir la presencia de un estrato relativamente resistivo en un entorno conductor.

En el método de Flujo Calórico aprovechando la fuerte dependencia de las condicio-

nes de presión y temperatura a la que los hidratos de gas son estables, se busca por medio de una medición indirecta del flujo calorífico la determinación del área donde se estabilizan, posteriormente calibrando los instrumentos de medición a las condiciones específicas del medio, podemos obtener el gradiente geotérmico de la zona de estudio y en consecuencia la variación de temperatura a la que se encontrarían sobre la columna de sedimentos. Los métodos Magnético y Gravimétrico buscan discriminar las diferencias en densidad y magnetización de los sedimentos que alojan los hidratos de gas.

Los estudios Batimétricos y Geomorfológicos permiten reconocer y caracterizar la morfología del fondo marino y los diferentes sistemas estructurales que afloran a la superficie del piso oceánico. Gracias al desarrollo de las tecnologías actuales, como sistemas Multihaz y vehículos autónomos se pueden obtener imágenes del relieve del fondo marino de gran resolución donde se pueden apreciar yacimientos de petróleo, gas natural o hidratos de gas.

1.6 Extracción

La recuperación de metano desde los depósitos de los hidratos de gas es uno de los temas que mayor desafío representa para científicos e ingenieros; esto, debido a la dificultad que presenta la extracción y transporte del gas hasta el continente, y a que los posibles efectos causados por su uso descontrolado y a la aplicación de técnicas inadecuadas, ya que dada la condición del metano como gas de efecto invernadero, contribuiría a que se aumentara más el calentamiento de la Tierra. Además, algunos estudios plantean como teoría que los diferentes sismos y choques entre placas tectónicas ocasionan en la actualidad intensas liberaciones de metano hacia la atmósfera, procedentes de la acción de grandes deslizamientos de sedimentos, incluyendo los lugares donde se encuentran los depósitos de los hidratos. Existen métodos físicos y químicos para la producción y recuperación del gas metano a partir de los hidratos de gas; los procesos más conocidos son: por estimulación térmica, por despresurización y por inyección de inhibidores. En el proceso de estimulación térmica, se introduce energía térmica a los estratos que contienen hidratos por medio de un pozo de perforación, que bombee vapor o agua caliente hacia abajo, buscando que al aumentar la temperatura local de los nódulos se produzca la disociación del hidrato y se libere el gas. Posteriormente, el metano liberado es bombeado hacia la superficie a través de otro pozo de perforación.

Se considera que una de las claves para el éxito de este método, radica en el abastecimiento y manejo proporcionado de este calor, para que logre mantener un balance

termodinámico artificial, que permita la disociación controlada de hidrato y la recuperación del metano. En el proceso de despresurización, como su nombre lo indica, se busca exponer los hidratos a un ambiente de baja presión, para que se vuelvan inestables, disocie la estructura de la molécula de hidrato y se descomponga en metano y agua. En el proceso de inyección de inhibidores se pretende que, por medio de la adición de inhibidores químicos como el glicol o metanol, a la zona de hidratos, se logren deshacer las condiciones de estabilidad que requieren los hidratos; y, sus moléculas se disocian al contacto con estos alcoholes.

Uno de los principales problemas de extracción es que no se libere metano; ya que si liberamos metano a la atmósfera, podríamos incrementar el efecto invernadero de manera considerable; por lo que, lograr la disociación controlada de hidrato, recuperar en forma segura el metano sin alterar el medio ambiente marino y liberar el gas hacia la atmósfera son los obstáculos para vencer.

1.7 Transporte

De la misma forma como se hace el transporte del gas natural, el gas metano recuperado desde los hidratos podría ser transportado por medio de gasoductos submarinos. Sin embargo, es importante considerar que los altos costos de instalación e infraestructura requeridos por estos gasoductos deben ser contrapesados con los altos riesgos geológicos de avalanchas submarinas que suceden en el talud, por lo tanto no representa una opción viable. Otras alternativas son la de mantener embarcaciones o plataformas de perforación sobre los nódulos de manera que sirvan para realizar la licuefacción del gas sobre estos, almacenarlo y posteriormente transportarlo hasta tierra firme.

1.8 Aplicaciones

Además de usar los hidratos de metano como una fuente de energía combustible y generar subproductos de estos, la investigación acerca del sistema de hidratos de metano puede también generar y desarrollar otros usos directos e indirectos de ellos o de los procesos por los cuales los hidratos se forman. Por ejemplo, es posible realizar la desalinización de agua de mar o efectuar la separación de mezclas de gases aprovechando los conocimientos y estudios adelantados acerca del comportamiento de los hidratos, así mismo es posible almacenar CO₂ convirtiendo en hidrato en condiciones medioambientales de océano profundo. Quizás una de las ideas más ambiciosas es la generación de energía eléctrica, aprovechando el gran gradiente de presión que tendría un gasoducto capaz de extraer el metano desde las profundidades de los nódulos. “Una posibilidad interesante de generación de electricidad ha sido concebida en

la etapa de transporte de metano a través de gasoductos desde las fuentes profundas de hidratos hasta la costa [2]. Un gasoducto de estas características poseerá un gran gradiente de presión, el cual puede ser aprovechado convenientemente para impulsar turbinas generadoras de electricidad. Esto podría llevar a cabo el doble objetivo de reducir la velocidad de flujo de gas a través de la transferencia de energía cinética a energía eléctrica, y el de la producción de corriente eléctrica" [2].

2. CONCLUSIONES

A pesar de los progresos realizados hasta la fecha sobre este recurso, existen importantes interrogantes al nivel mundial referidos tanto a la localización y volúmenes, como a las tecnologías de explotación y transporte. La aplicación de los diferentes métodos de exploración, en su conjunto, permite alcanzar un entendimiento amplio de las características geológicas y termales que ocasionan que se generen los hidratos de gas; por lo que el adecuado entendimiento y conocimiento de estos estudios y técnicas permitirá un mejor aprovechamiento para su explotación en países, como Colombia, que carecen de abundantes recursos económicos para la investigación.

La recuperación de hidratos de gas requiere de una disociación forzada, que a su vez involucra una alteración de las condiciones del medio en donde se encuentran los nódulos. Dado que la continua salida de metano desde los hidratos de gas hacia el agua de fondo representa un medio ideal para la vida, especialmente de los organismos bentónicos del océano y que, por otra parte, la liberación de metano a la atmósfera puede incrementar el efecto invernadero sobre la Tierra, lograr obtener el equilibrio entre la disociación controlada de hidrato y la recuperación en forma segura del metano será el desafío para vencer, por parte de los científicos.

REFERENCIAS

- [1] Canal Discovery. Documental energías del futuro, 2007.
- [2] Universidad Católica de Valparaíso. Hidratos de gas submarino, una fuente de energía para el siglo XXI, en línea <http://www.hydrates.ucv.cl>, Chile
- [3] Energía: hidrato de gas, en línea en <http://hedgeohg.blogspot.com>, citado el marzo 24 de 2008.
- [4] "Hidrato" enciclopedia Microsoft Encarta en línea <http://es.encarta.msn.com> 1997-2007. Citado marzo 24 de 2008.
- [5] González P., Eduardo. Los hidratos de gas. Primera y segunda parte. En línea <http://www.revistamarina.cl/revistas/2002/2/gonzalez.pdf>. Chile

- [6] R.N. Edwards (1997). On the resource evaluation of marine gas hydrate deposits using the sea-floor transient electric dipole-dipole method, *geophysics*, 62, 63-74.
- [7] Markl, R. *et al.* (1970). Structure of the blake - Bahamas outer ridge. *Journal of Geophysical Research*, V. 75.
- [8] Iver, R. D. Hydrocarbon gas (methane) in canned deep sea drilling project core samples, in J. R.

ENSAYO

CIRCULACIÓN TERMOHALINA

Juan Carlos Ortiz Royero*

jortiz@uninorte.edu.co

Resumen: La circulación profunda o termohalina es un tema en la oceanografía que ha sido motivo de muchos estudios, existen importantes esfuerzos que se han realizado a través de los centros de investigación para entenderla, aun cuando queda mucho por explorar, muchos de los resultados de estas investigaciones han sido precursores de importantes publicaciones que hoy nos permiten entender mucho más este proceso y son la base de aquellos que hoy quieren entrar a explorar este interesante tema. El presente trabajo pretende reunir muchos de estos conceptos y resultados mostrando el esfuerzo de otros investigadores e importantes autores aportando una importante recopilación bibliográfica que nos permita ofrecer un estado actual del conocimiento alrededor del tema.

Palabras clave: Circulación Termohalina, Diagramas T-S, Masas de Agua.

Abstract: The deep circulation o termohaline is an issue in oceanography which has been the subject of a lot of studies; important efforts have been carried out by research centres in order to understand it; despite the fact that there is still a lot to explore, many of the findings of this research have been forerunners of important publications that nowadays help us understand this process a lot more and are the basis for those who want to start exploring this interesting issue. This paper intends to gather many of these concepts and findings showing the efforts made by other researchers and important authors, contributing with an important bibliographical compilation which allows us to offer a current state of knowledge around the issue.

Key words: Termohaline Circulation, T-S Diagrams, Water Masses.

* Ph.D en Oceanografía Física de la Universidad de Puerto Rico. Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales – IDEHA. Profesor del Dpto. de Física de la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.

INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que los océanos y la atmósfera están en una constante relación, una relación que es precursora de muchos fenómenos que modulan el clima y la dinámica oceánica global, el océano se encuentra en perpetua evolución debido a esta interacción, por lo tanto, su estudio requiere la intervención de muchas disciplinas como la dinámica, la termodinámica, la biogeoquímica, entre otras. Los oceanógrafos han comenzado a disponer de los instrumentos de observación requeridos, así como de herramientas numéricas (informáticas) que les permiten reunir las diferentes observaciones y los mecanismos conocidos en un esquema de conjunto. Precisamente la dificultad en tomar mediciones directas de velocidad en aguas profundas ha contribuido a que la circulación profunda sea menos conocida que la circulación superficial [1]

La enorme máquina térmica que es el océano tiene su motor principal en el Sol, que lo recalienta en las zonas tropicales, el calor que de esa manera se almacena en el agua, acaba por restituirse a la atmósfera en las latitudes más altas, lo que provoca su enfriamiento. De ese modo es como se generan las corrientes oceánicas, las cuales transportan ese calor desde el Ecuador hacia los polos y, al hacerlo así, también transportan las sustancias disueltas en el agua, como son la sal y el carbono. En los diferentes giros este transporte de calor, mitiga el frío extremo en algunas zonas o mantiene el calor moderado en otras, por lo tanto este transporte es responsable de la moderación del clima global.

Debido a su importancia son muchas las investigaciones alrededor de esta circulación y son muchos los autores que han hablado de la misma, por lo tanto, el presente escrito pretende recopilar muchos de esos escritos y tratar uno de los fenómenos más importantes de la interacción océano atmósfera: la circulación termohalina (CTH).

1. DEFINIENDO LA CIRCULACIÓN OCEÁNICA (CTH)

La CTH ha sido objeto de estudio de múltiples investigaciones debido a su importancia, y es uno de los procesos más nombrados en los temas y textos oceanográficos, su definición además ha sido tema de múltiples discusiones, una definición práctica es la siguiente:

“La CTH es el producto de los movimientos internos de agua en el océano profundo

ocasionados por las diferencias de densidad de las masas de agua que se ordenan las menos densas sobre las más densas”. Su nombre deriva del hecho de que la densidad del agua de mar está determinada por la temperatura y la salinidad. Es una característica importante del presente estado climático oceánico ya que permite el intercambio de calor y gases de efecto invernadero a través del interior del océano discusión producto de esto se encuentra el intercambio energético que modula el clima global [2].

Aun así el proceso es mucho más complejo y algunos autores recomiendan que para complementar su definición se deben tener en cuenta diferentes aspectos de los procesos que intervienen y hacen parte de la circulación. Stommel, Arons y Faller en una serie de trabajos de 1958 a 1960 dieron la fundamentación para entender la circulación termohalina, basados en tres ideas fundamentales [2]:

- La fuente del agua profunda es suplida por convección desde las altas latitudes en el Atlántico, siendo el mar de Groenlandia y el mar de Irminger en el Norte y el mar de Weddell en el Sur, sus fuentes principales.
- La mezcla uniforme en el océano entrega el agua fría y profunda de regreso a la superficie.
- La CTH es estrictamente geostrófica en el interior del océano y además la vorticidad potencial se conserva.

En lo sucesivo, el agua se hunde y se extiende horizontalmente fuera de su región de origen. Las propiedades de las masas de agua abisales (temperatura, salinidad, y trazadores antrópicos) son característicos de su región de origen y su proceso de formación. El agua puede seguirse a través de su trayectoria, aunque sea modificada por la mezcla con otras aguas y biogeoquímicos del envejecimiento. El ajuste de la densidad abisal de campo se llevará a cabo de manera que el flujo de profundidad pueda describir el equilibrio geostrófico. La estructura espacial de este ajuste geostrófico depende de los lugares donde el movimiento vertical se lleva a cabo ya sea de subducción o surgencia.

En las regiones de surgencia del océano las aguas profundas se mezclan por turbulencia con aguas más someras y las capas más superficiales adaptan las características de temperatura, salinidad y densidad que llegan del fondo. Estos procesos, resultado de la mezcla de diferentes masas de agua y de la formación de zonas de “surgencia” y “hundimiento”, responden a una forma de circulación particular (Figura 1). No debe confundirse con la surgencia y el hundimiento relacionado con el viento y descrito por la teoría de Ekman.

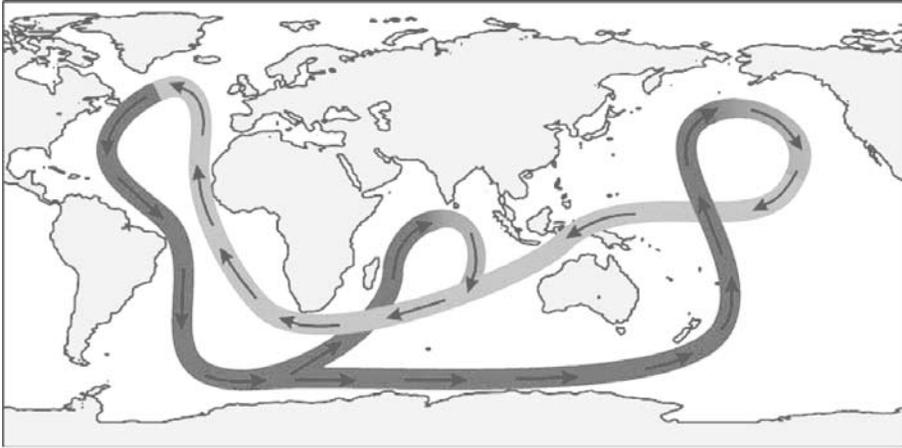


Figura 1. Circulación termohalina a nivel mundial. Color gris oscuro aguas cálidas, color gris claro aguas menos cálidas [3]

Teniendo en cuenta esto se puede afirmar que la distribución de esta circulación a lo largo de la geografía global se describe como un flujo de agua que se calienta en las latitudes tropicales del Pacífico y el Índico hasta el Atlántico, para finalmente hundirse en el Atlántico Norte, retornando a través de las profundidades.

La CTH es un proceso real en el océano, esto implica que es un proceso que es fuertemente determinado por la topografía actual, los continentes, la geomorfología submarina y los estrechos pasos que se forman entre las zonas someras como las islas y cayos, pero solo viendo la circulación a escalas menores que la global se puede entender este concepto, un ejemplo muy importante que se puede mencionar es la circulación en el Atlántico: La corriente superficial más importante circula hacia el norte. El agua se hunde en los mares Nórdicos y en el mar de Labrador. Desde allí, el flujo en niveles intermedios y profundos transporta agua hacia el sur. Los caudales son enormes. Vienen dados en sverdrups (1 sverdrup = 1 millón de metros cúbicos por segundo) (Figura 2).

Esta circulación llamada también MOC, (*meridional overturning circulation* / circulación meridiana volteante) funciona de forma continua. Su rodillo impulsor se encuentra en los mares Nórdicos y en el mar de Labrador. Los mares Nórdicos se encuentran en la zona subpolar del Atlántico, al norte del paralelo que pasa por Groenlandia-Islandia-Noruega.

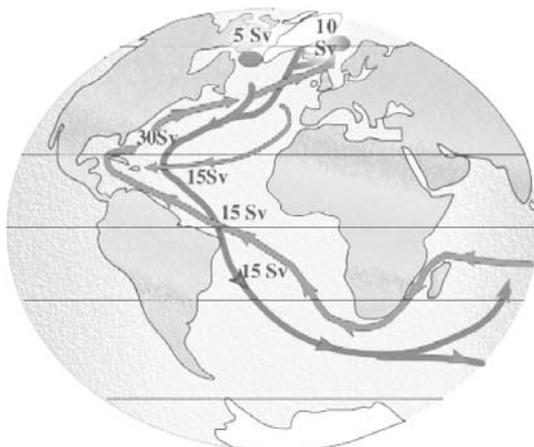


Figura 2. Representación de la circulación termohalina en el Atlántico: circula hacia el norte y transporta agua hacia el sur. No se representa en la figura el hundimiento de agua en algunas zonas próximas a la Antártida (mar de Weddell y Ross) (Tomado y modificado de <http://homepage.mac.com/uriarte/cirmarina.jpg>)

2. IMPORTANCIA DE LA CIRCULACIÓN TERMOHALINA

Son muchas las implicaciones que tiene la circulación termohalina o circulación profunda, su importancia radica en todos los niveles (biológico, climático, meteorológico, oceanográfico, etc.), y los autores han resaltado algunas que se consideran entre las más importantes:

En primer lugar como esa agua fría profunda se vierte desde el Atlántico Norte hacia el sur, y luego hacia los océanos Pacífico e Índico, es por demás necesario que exista una compensación de un aporte de agua en sentido inverso, el cual no puede ser sino el del agua de la superficie, caliente. El océano aporta aproximadamente 10^{15} Watts del Atlántico Sur hacia el Atlántico Norte. Ese calor se libera en la atmósfera y es el que contribuye a suavizar el clima en Europa.

En segundo lugar, el océano logra retardar considerablemente la manifestación de una perturbación climática cualquiera, e incluso en periodos que se prolongan varias decenas de años. Por ejemplo, bajo el efecto de las variaciones de intensidad de la radiación solar o a continuación de un incremento de gas con efecto invernadero debido a la presión en la atmósfera, la superficie del océano absorbe una gran parte del exceso

de calor (o atenúa su déficit) y lo almacena en el océano profundo.

Las corrientes también transportan sustancias disueltas, como la sal, y la circulación termohalina desempeña un papel particular en ese transporte. Así, por ejemplo, el retorno a la superficie del agua que sirve para compensar la pérdida de agua profunda del Atlántico Norte, reintegra al océano Atlántico agua más dulce (menos salada) que proviene del hemisferio sur y del océano Pacífico, compensando de esa manera el exceso de evaporación del océano Atlántico.

El fenómeno de hundimiento por convección que se produce en los mares septentrionales se intensifica al comienzo del invierno por el aumento de la salinidad. Ocurre cada otoño-invierno, durante la formación de los hielos marinos en áreas subárticas (Figura 3).



Figura 3. Salinidad oceánica promedio (en gramos de sal por kg de agua). Tomado de <http://homepage.mac.com/uriarte/circulaciontermohalina.html>

La alta salinidad del Atlántico se debe a que el volumen de agua evaporado supera ampliamente al volumen de agua aportado por las precipitaciones y las escorrentías de los ríos que desembocan en ese océano, mientras que en el Pacífico, los sistemas montañosos del oeste americano provocan lluvias abundantes y limitan la penetración de la humedad en el continente. El agua evaporada del Pacífico que los vientos del oeste llevan hacia Norteamérica, produce copiosas lluvias costeras y vuelve a ese océano sin apenas penetrar en el continente americano.

Adicionalmente, el agua evaporada en la región anticiclónica subtropical, que se extiende de las Bermudas a las Azores, es traspasada en gran medida al Pacífico, por los vientos alisios tropicales que atraviesan el istmo de Panamá. Este transvase atmosférico sumado a la evaporación, contribuye a que aumente la salinidad de las aguas

tropicales atlánticas. Por el contrario, en Europa no existen esas barreras topográficas y gran parte de la humedad atlántica, acarreada por vientos del Oeste, pasa de largo y se aleja hacia Asia, sin ser recuperada por el océano Atlántico.

Las mezclas producidas por el cambio de densidad y las variaciones de salinidad y temperatura tienen como efecto la generación de tipos y masas de agua:

2.1 Mezcla de masas de agua y diagramas T-S

Según lo descrito por [1], [2] y [3], las características que tienen el agua y, en particular, la temperatura y salinidad son adquiridas mientras se encuentra la superficie bajo la influencia de los procesos que afectan esas propiedades (radiación, evaporación, precipitación). Estas características se modifican al mezclarse con otras masas de agua, dejan la superficie para hundirse y difundirse, según su densidad. Estas corrientes que caminan por el océano producen los llamados tipos de agua o masas de agua, que tienen una temperatura y salinidad muy homogénea y al entrar en contacto con otras aguas producen una mezcla, que está relacionada con el proceso llamado subducción (Figura 4).

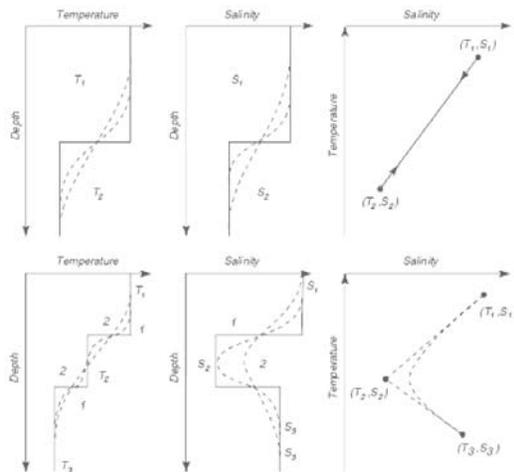


Figura 4. Arriba: mezcla de dos masas de agua produce una línea en un diagrama T-S. Abajo: mezcla entre tres masas de agua produce la intersección de dos líneas en un diagrama T-S [2]

La temperatura y la salinidad son propiedades conservativas, es decir que no hay fuentes o sumideros de calor y sal en el interior del océano, otras propiedades como el oxígeno es del tipo no conservativo, el oxígeno puede ser modificado por procesos

en el océano (respiración de especies, oxidación, etc.). Cada punto en un diagrama T-S es un tipo de agua, en sentido matemático ideal, algunos tipos de agua son muy homogéneos y pueden ser solo puntos en el diagrama, mientras que otros tipos menos homogéneos ocupan zonas en el diagrama. La Figura 5 muestra la mezcla de dos tipos de agua (L y G) con igual densidad, que produce agua más densa (M).

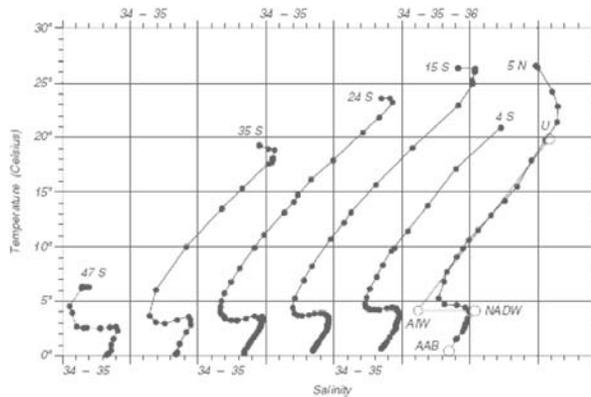


Figura 5. Mezcla de dos masas (L y G) de igual densidad produce agua más densa (M) [2]

Los diagramas T-S son de mucha utilidad a la hora de determinar las masas de agua, usando datos hidrográficos, se puede hacer una reconstrucción de las masas de agua en una región. A manera de ilustración se muestran (Figura 6) los resultados del análisis de datos recolectados en el Atlántico Sur (33° S hasta 11° N) y la Tabla 1 las masas de agua identificadas.

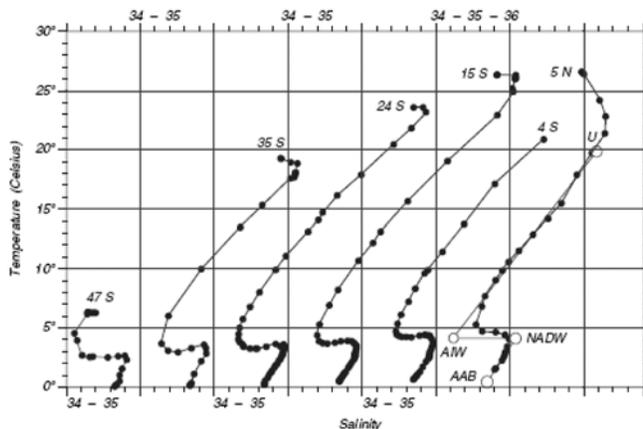


Figura 6. Diagrama T-S obtenido de datos hidrográficos en la región comprendida entre 33° S y 11° N [2]

TABLA 1
MASAS DE AGUA IDENTIFICADAS EN LA REGIÓN COMPRENDIDA ENTRE 33° S Y 11° N [2]

			Temp. (°C)	Salinity
Antarctic water	Antarctic Intermediate Water	AIW	3.3	34.15
	Antarctic Bottom Water	ABW	0.4	34.67
North Atlantic water	North Atlantic Deep Water	NADW	4.0	35.00
	North Atlantic Bottom Water	NABW	2.5	34.90
Thermocline water	Subtropical Lower Water	U	18.0	35.94

La Figura 7 muestra un bosquejo de la distribución de masas de agua en los océanos del mundo. AABW: Agua Antártica de Fondo (AABW: *Antarctic Bottom Water*), CPW: Agua Circumpolar (CPW: *Circumpolar Water*), NADW: Agua Profunda del Atlántico del Norte (NADW: *North Atlantic Deep Water*), PDW: Agua Profunda del Pacífico (PDW: *Pacific Deep Water*), AAIW: Agua Antártica Intermedia (AAIW: *Antarctic Intermediate Water*), AIW: Agua Ártica Intermedia (AIW: *Arctic Intermediate Water*), MedW: Agua Mediterránea (MedW: *Mediterranean Water*), RedSW: Agua del Mar Rojo (RedSW: *Red Sea Water*), dorada: Aguas Centrales (*Central Water*), marrón: Aguas Superficiales (*Surface Water*).

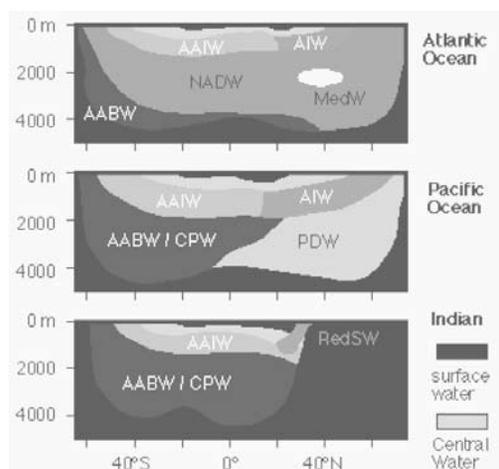


Figura 7. Bosquejo de la distribución de masas de agua en los océanos del mundo. <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/IntroOc/indespanol.html>

En cada área global las formaciones de las masas de agua suceden por diferentes mecanismos:

Los fenómenos de convergencia: Que se producen en zonas donde convergen las corrientes; esto provoca el hundimiento de grandes cantidades de agua de la superficie. Son llamados frentes. Las más notables en el mundo son:

Convergencia Antártida, entre 50° y 60° Lat. Sur rodean al globo (masas de agua intermedias).

Convergencia Ártica, en las zonas occidentales del Pacífico y el Atlántico (masas de agua profundas).

Convergencias Subtropicales, se les encuentra entre los 35° y 45° de latitudes Norte y Sur (aguas superiores).

Convergencias Tropicales, que se forman en la zona ecuatorial (determinan la formación de aguas superiores).

Los fenómenos de divergencia: Como el nombre lo sugiere, es el efecto contrario al anterior, donde las corrientes que divergen ocasionan un vacío momentáneo que ocasiona un movimiento vertical de aguas de fondo hacia arriba produciendo un afloramiento.

Las zonas de la Antártida son las más notables, sin embargo, por efecto de la fuerza de Coriolis, la divergencia puede no ser entre dos corrientes sino entre una corriente y las costas occidentales de los continentes; en este caso se denomina surgencias.

Las zonas de afloramiento más importantes son precisamente aquellas frentes a las costas de California, Perú, África nor-occidental y sur-occidental.

Topografía de la termoclina (factores ambientales). Es posible identificar una serie de capas ubicadas a diferentes profundidades, estas son diversas masas de agua y son:

Agua superficial, hasta 150 m de profundidad aproximadamente. Está muy influenciada por los factores externos.

Agua superior, suele encontrarse de 150 a 700 m de profundidad. Está determinada por la temperatura y por las corrientes.

Por debajo de estas dos capas, los fenómenos ambientales afectan poco en la determi-

nación de las masas de agua. Las que están por debajo de las ya mencionadas son:

Aguas intermedias, provienen de las aguas de las cuencas que descargan por encima del umbral y se vierten al océano buscando su nivel correspondiente de densidad (700-1500 mts).

Aguas profundas, se encuentran entre 1500 y 3000 m de profundidad. Se originan del hundimiento de las aguas en altas latitudes.

Aguas de fondo, se encuentran a partir de los 3000 m hacia abajo. Proviene del hundimiento de aguas muy densas derivadas de la formación de hielos.

Convección y recirculación: Este fenómeno generalmente se presenta en zonas subtropicales donde los cambios estacionales de temperatura son muy pronunciados.

3. MODELO DE STOMMEL PARA LA CIRCULACIÓN TERMOHALINA

Stommel (1958) propuso un modelo de circulación profunda bajo la premisa que el mecanismo principal era un flujo desde las zonas polares hacia el Ecuador, compensada por agua superficial desde el Ecuador hacia las zonas polares, como se mostró en la Figura 1. Dado que la principal dificultad es la falta de datos experimentales de velocidades, es necesario hacer uso de la información termohalina, es decir analizar observaciones de salinidad y temperatura, esencialmente es necesario estudiar las ecuaciones de conservación de sal y de temperatura. Analicemos la conservación de la temperatura.

3.1 Conservación de temperatura

De acuerdo a [1] las ecuaciones de conservación de temperatura (T) definida así:

$$\frac{dT}{dt} = K_t \nabla^2 T + Q_t \quad (1)$$

Donde K_t y Q_t son la difusividad cinemática y el término fuente respectivamente. Usando la aproximación de Reynolds, la ecuación (1) puede ser escrita en términos de los coeficientes de turbulencia (*eddy coefficient*) verticales (K_z) y horizontales (K_H):

$$\frac{dT}{dt} = K_H \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + K_z \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_t \quad (2)$$

Ya que se conoce muy poco acerca de las magnitudes de las velocidades en aguas profundas no podemos escalar (*scaling*) la ecuación (2) para analizar qué procesos dominan sobre otros, Stommel asumió que la difusión vertical debe balancearse con la advección vertical, también se asume que no hay fuentes, el océano está en estado estacionario y que las magnitudes de las velocidades horizontales (u y v) son equivalentes, tendríamos que:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = \frac{w \partial^2 T}{K_z \partial_z} \quad (3)$$

Cuya solución es de la forma:

$$T = C_1 + C_2 e^{\frac{w}{K_z} z} \quad (4)$$

Donde c_1 y c_2 son constantes. Usando balance geostrofico en el interior del océano, haciendo derivadas cruzadas para eliminar el término de la presión, usando aproximación de Boussinesq y la ecuación de continuidad tenemos que:

$$\beta v = f \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (5)$$

4. CONCLUSIONES

En general son muchas las implicaciones y aplicaciones en todos los niveles de la circulación termohalina. Un modelo climático de [4], con un sistema acoplado atmósfera-océano, predijo que un cambio en la circulación oceánica del Atlántico Norte podía provocar un enfriamiento de Europa. La hipótesis original, retomada más tarde por otros modelistas, argumentaba que un frenado de la Corriente del Golfo (*feedback* negativo) produciría el enfriamiento del continente. Esto se debería al calentamiento provocado por el efecto invernadero, el cual aumentaría el transporte aéreo de agua desde las latitudes tropicales a las latitudes medias y altas, llevando a que se intensificaran las precipitaciones septentrionales y la escorrentía de los ríos que desembocan en el Atlántico Norte, y por lo tanto, los aportes fluviales de agua dulce harían perder salinidad a las aguas marinas y el proceso de hundimiento del agua superficial que tiene lugar en los mares Nórdicos sería menos eficiente. Finalmente, el sistema termohalino de corrientes se debilitaría, perdiendo fuerza la Corriente del Golfo y serían más fríos los inviernos en las latitudes medias y altas del continente euroasiático.

Por lo tanto su estudio y su entendimiento se convierten en una materia importante en

la comunidad científica que tiene la misión de continuar con estos y cada uno de los importantes aportes que otros autores han hecho en el tema.

REFERENCIAS

- [1] Pond, S. and Pickard, G. *Introductory Dynamical Oceanography*. 1983. Second edition. Pergamon.
- [2] Stewart, R. 2007. *Introduction to physical Oceanography*. Department of Oceanography T & M University.
- [3] Von Aken, Hendrick. *The oceanic thermohaline circulation. An introduction*. 2007. Springer.
- [4] Manabe, S. and Stouffer, R. Are two modes of thermohaline circulation stable? *Tellus A*. Vol. 51.

REGLAMENTO DE PUBLICACIONES ENAP

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

DERROTERO

REVISTA DE CIENCIA E INVESTIGACIÓN DE LA ENAP

FORMATO DE CANJES

Nombres: _____ Apellidos: _____

Dirección: _____ Ciudad: _____ País: _____

Teléfono casa: _____ Teléfono oficina: _____ Teléfono móvil: _____

Correo Electrónico: _____ Ocupación: _____

Afiliación Institucional: _____

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

Firma: _____

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

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

CLÁUSULA DE CESIÓN DE LOS DERECHOS PATRIMONIALES DE AUTOR

CEDENTE: _____

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

Yo _____ en calidad de

autor del artículo titulado: _____

_____ que se publicará en

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

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

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

Se firma en señal de aceptación a los _____ días del mes de _____ de _____

Firma

Cedente

CONTENIDO

- Dinámica diaria de la capa de mezcla
- Temporada de ciclones tropicales 2009 en el océano Atlántico
- Caracterización en época seca de las variables oceanográficas por la incidencia del canal del dique en la bahía de Cartagena
- Estudio de la corrección del factor de potencia en una carga inductiva
- Construcción de vehículo subacuático de bajo costo para inspección de cascos de buques
- Construcción de boya de deriva de bajo costo
- Clasificación de firmas acústicas subacuáticas empleando identificador difuso
- Sistema de comunicaciones para boya deriva armada nacional
- Consideraciones para el diseño de remolcadores fluviales de empuje
- El pH, un importante indicador de la salud de los océanos
- Hidrato de gas una alternativa energética del futuro
- Circulación Termohalina



derrotero@enap.edu.co
www.escuelanaval.edu.co

ISSN 2027-0658



9 772027 065003