

# Maniobrabilidad de Buque Pesquero

Marcelo A. S. Neves<sup>1</sup>, William M. Cipriano<sup>2</sup>

Programa de Engenharia Oceânica - COPPE / LabOceano, Universidade Federal do Rio de Janeiro C.P. 68.508, Rio de Janeiro, RJ, CEP 21945-970, Brasil.

[masn@peno.coppe.ufrj.br](mailto:masn@peno.coppe.ufrj.br); [williamcipriano@peno.coppe.ufrj.br](mailto:williamcipriano@peno.coppe.ufrj.br)

## Resumen

El presente trabajo es un estudio sobre la maniobrabilidad del buque pesquero en condiciones de aguas tranquilas, en el cual se simula numéricamente la trayectoria de la embarcación, mediante un modelo matemático no lineal de tercera orden, y se considera solo tres grados de libertad, avance (surge), desvío (sway) y guiñada (yaw), este modelo numérico esta basado en el modelo matemático propuesto por Abkowitz. Este modelo pretende hacer una descripción comprensiva y robusta de las acciones fluidas relevantes para los movimientos simétricos y anti-simétricos del buque. El estudio presenta resultados de las simulaciones numéricas de la trayectoria de un buque en el dominio del tiempo, durante las maniobras estandarizadas de curva de giro, espiral y zig-zag. Consecuentemente estos resultados nos permiten tener algunas conclusiones finales que pueden ser tomadas en cuenta por el ingeniero naval, al momento de querer predecir la buena maniobrabilidad del buque pesquero en su anteproyecto.

## Abstract

The present work is a study on the maneuverability of the fishing vessel in calm waters, in which the trajectory of a vessel is simulated numerically by means of a nonlinear mathematical model of third order considering three degrees of freedom: surge, sway and yaw; this numerical model is based on the mathematical model proposed by Abkowitz. The model aims at describing, in a robust and comprehensive way, the most relevant fluid and rigid body actions relevant to the symmetric and anti-symmetric motions of a ship in a seaway. The study presents results of the numerical simulations of the trajectory of a ship in the time domain, during the spiral, zig-zag and steady turning standard maneuvers. Consequently these results allow us to have some final conclusions that can be taken into account by the naval architect, at the time of wanting to predict the good maneuverability of the fishing vessel in its stage of project.

---

<sup>1</sup> Ph.D., Profesor Principal, Programa de Ingeniería Oceánica, LabOceano-COPPE/UFRJ

<sup>2</sup> M.Sc., Alumno de Doctorado, Programa de Ingeniería Oceánica, COPPE/UFRJ

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los estudios e investigaciones en el campo de la hidrodinámica del buque ha afectado de forma especialmente significativa, en el curso de las últimas décadas, a una de las ramas de ésta: la maniobrabilidad. Por maniobrabilidad se entiende, generalmente, el estudio de los movimientos del buque en el plano horizontal. Podría por tanto, ser encuadrada dentro del estudio general de los movimientos del buque en la mar si no fuera por la restricción que normalmente se impone en considerar en aguas tranquilas.

La maniobrabilidad es una de las muchas áreas técnicas que contribuyen para la grande complejidad envuelta en el proyecto de buques. Las demandas para el proyectista pasan por establecer procedimientos y criterios tal que el buque sea capaz de operar eficiente y seguro en diferentes condiciones operacionales. Los modelos matemáticos envueltos en esos procedimientos derivan de la aplicación de la Segunda Ley de Newton a cuerpos rígidos, donde las ecuaciones diferenciales lineales tienen un alcance de actuación limitada. Modelos de simuladores no lineales son comúnmente empleados, siendo en general considerados como eficientes herramientas en el desarrollo y evaluación de proyectos.

El uso de la simulación en el diseño de sistemas de control de gobierno de un buque, ha hecho necesario el desarrollo de modelos dinámicos que conservando las principales características de comportamiento, permitan una implementación lo más sencilla posible. Dinámicamente un buque se puede considerar como un sólido rígido con seis grados de libertad; tres coordenadas para describir los movimientos de traslación respecto a los tres ejes, y otras tres para los respectivos movimientos de rotación.

El modelo de Abkowitz (1964), se propone tomar hasta el tercer orden del desarrollo en la serie de Taylor, los términos superiores al tercer orden no se consideran porque la experiencia ha demostrado que su inclusión no aumenta significativamente la exactitud. También se indica que se pueden desprestigiar varios términos debido a la simetría lateral de los buques, a que solo se tienen en consideración los términos con aceleración de primer orden y, el acoplamiento entre los términos de velocidad y aceleración es despreciable.

Muchos investigadores e instituciones involucrados con el avance del conocimiento en esta área han dado importantes contribuciones como: Nomoto (1957), Abkowitz (1964), Crane (1966), Inoue (1981), Baquero (1981), Clarke (1983), Kijima et al. (1990), Yoshimura et al. (2003), Neves, et al. (2005) entre otros. Muchos de estos trabajos han permitido identificar analítica, numérica y/o experimentalmente muchos fenómenos propios de la maniobrabilidad del buque, para los que, aún hoy en día, existen pocos o ningún criterio unánime de evaluación para la maniobrabilidad del buque pesquero.

En ese sentido intentar prever el comportamiento de una embarcación en su fase de proyecto se constituye un gran beneficio, proporcionando una gran flexibilidad al proyecto, esto permite que pueda ser reevaluado constantemente en términos de los requisitos de seguridad previstos. Ensayos de desempeño del casco son realizados con modelos reducidos en tanques de prueba, mismo así sus líneas se encuentren definidas, repetidas pruebas implican muchas veces inviabilidad económica del proyecto teniendo en cuenta el alto costo de estos ensayos. Como una forma de obtener esa previsión sin recorrer a los usuales tanques de prueba, la tendencia hoy es la utilización del proceso de simulación

numérica con el uso de computadores personales, a través de la implementación de formulaciones de la teoría hidrodinámica.

El presente trabajo pretende ser una contribución al desenvolvimiento y solución de los problemas expuestos anteriormente, así como también predecir las características maniobreras que debe reunir un buque pesquero en su fase inicial de proyecto. Por consiguiente se han planteado los siguientes objetivos para este trabajo:

- Simular numéricamente la trayectoria de un buque pesquero, mediante un modelo matemático no lineal, donde se considera solo tres grados de libertad, avance (surge), desvío (sway) y guiñada (yaw), este modelo numérico esta basado en el modelo matemático propuesto por Abkowitz (1964).
- Calcular la trayectoria del buque pesquero en el dominio del tiempo, sobre la acción del timón, durante las maniobras estandarizadas de curva de giro, espiral y zig-zag.
- La predicción cuantitativa del comportamiento en maniobras de un conjunto buque-timón determinado a partir de los resultados obtenidos.

### Maniobras Estandarizadas

a) **Maniobra de Espiral:** Esta maniobra muchas veces llamada de espiral de *Dieudonné*. La maniobra consiste en dar  $15^\circ$  para estribor y dejar el buque hacer una curva hasta alcanzar una razón constante de cambio de dirección. Esta razón es registrada y el ángulo de timón es entonces reducido para  $10^\circ$  y la nueva razón constante de cambio de dirección es medida. La operación es proseguida para  $5^\circ$  EB,  $4^\circ$  EB,  $3^\circ$  EB,  $2^\circ$  EB,  $1^\circ$  EB,  $0^\circ$ ,  $1^\circ$  BB,  $2^\circ$  BB,  $3^\circ$  BB,  $4^\circ$  BB,  $5^\circ$  BB,  $10^\circ$  BB,  $15^\circ$  BB. Así mismo, la razón constante de cambio de dirección es registrada para cada ángulo de timón. Con los valores de guiñada obtenidos a los ángulos de timón utilizados se sitúan en un sistema de ejes coordenados, con lo que puede obtenerse una tabla de valores de guiñada, a ángulo de timón dados, y a la velocidad que mantenía el buque durante la realización de la experiencia. Con dicha realización pueden ocurrir dos cosas: la curva pase por el centro en cuyo caso puede decirse que el buque tiene la propiedad de estabilidad de rumbo, o que no lo haga, en cuyo caso significa que ese buque tiene inestabilidad de rumbo, como puede observarse en la Figura 1. Con las curvas del buque con inestabilidad de rumbo se forma una superficie interior limitada por ellas, que recibe el nombre de área de histéresis, cuya cuantificación determina la mayor o menor inestabilidad de rumbo de un buque respecto a otro, vide Tupper (2002).

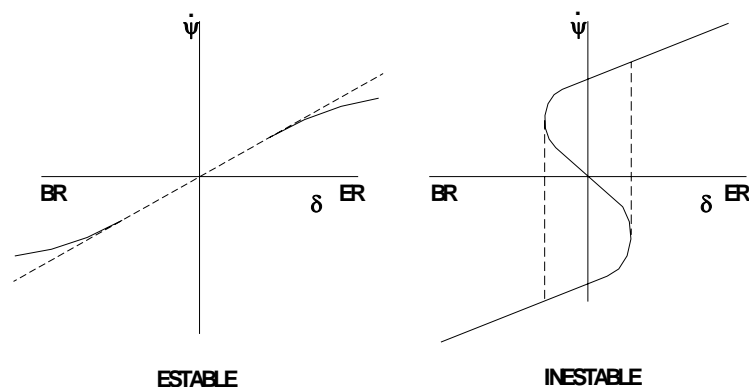


Figura 1. Maniobra de espiral o Dieudonné

**b) Maniobra de Giro:** Podemos definirla como la respuesta del buque a la acción conjunta de la maquina y del timón, para realizar un cambio de rumbo y llevar a cabo un fin previsto de acercamiento, alejamiento, estudio del comportamiento a distintas magnitudes de la incidencia de agentes internos y externos aplicados. La curva de giro esta definida por unos parámetros que acotan sus dimensiones para cada buque. Dichas características son observadas en la Figura 2, vide Tupper (2002).

**Avance:** distancia longitudinal recorrida por el buque hacia su proa hasta alcanzar la caída de  $90^\circ$  de su proa a la banda de metida del timón y a una determinada velocidad.

**Traslado Lateral:** distancia lateral alcanzada por el buque cuando su proa ha caído  $90^\circ$  de la proa inicial. Junto con el **avance** representa un punto del plano que define claramente la parte inicial de la curva de giro.

**Diámetro Táctico:** cuando la proa del buque ha caído  $180^\circ$  de su proa inicial.

**Diámetro de Giro:** a la distancia máxima de separación entre dos puntos opuestos del giro en el periodo uniforme. Si bien esta dimensión es la característica más conocida de la curva de giro, puede decirse que no quedan representados los condicionantes que limitan el espacio mínimo necesario para maniobrar en una zona dada.

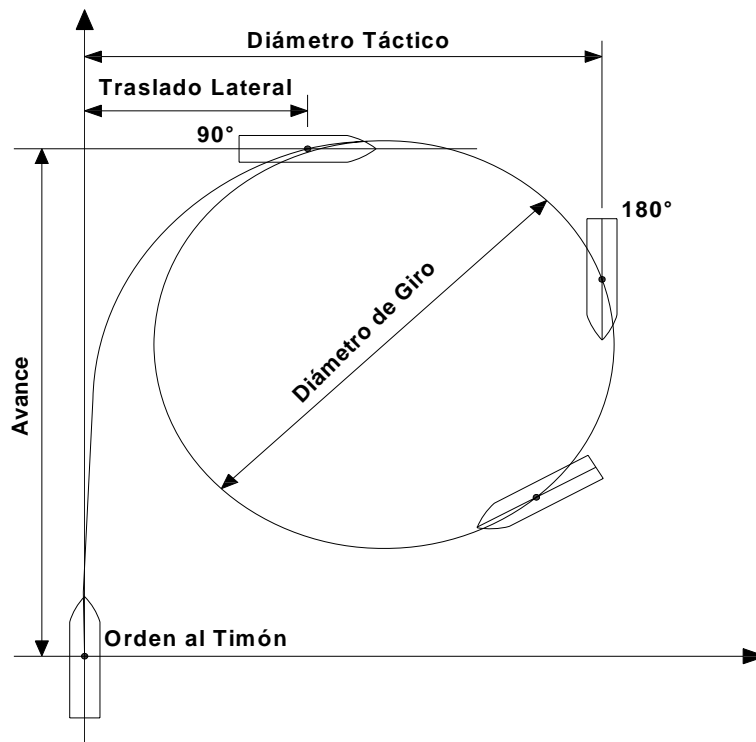
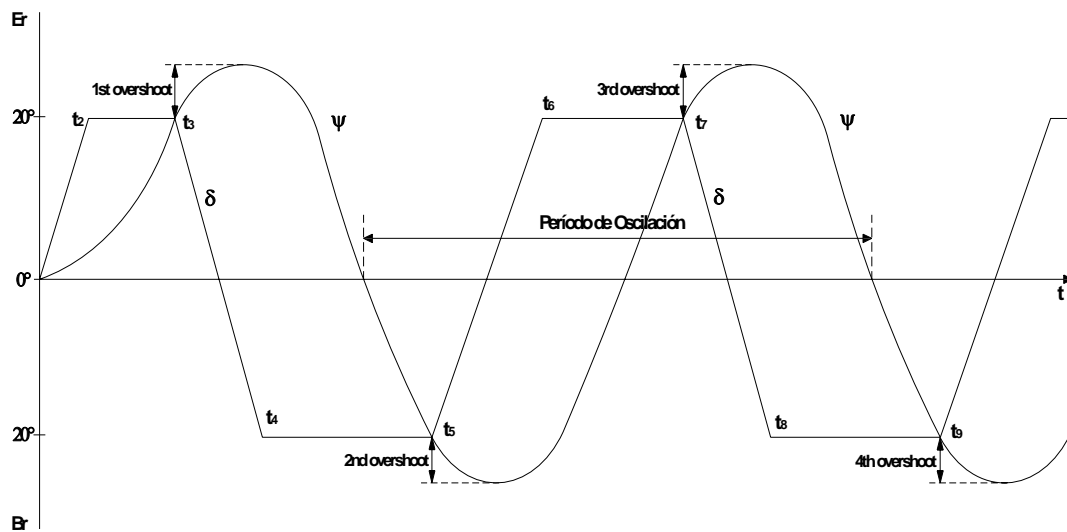


Figura 2 Curva de giro

**c) Maniobra de Zig-zag:** La maniobra de zig-zag o también conocida como maniobra de *Kempf*, es más completa y compleja que las utilizadas para conocer la estabilidad dinámica y de rumbo, es realizada para estudiar en detalles la respuesta inicial de un buque al movimiento del timón, ver Figura 3. La maniobra consistiría en mantener el buque a una velocidad constante, en línea recta, durante por lo menos un minuto. Después de alcanzar la condición de equilibrio, el timón es accionado y colocado a  $20^\circ$  y mantenido constante hasta que el buque cambie de curso de  $20^\circ$ . Entonces el ángulo del timón es cambiado para  $20^\circ$  del otro lado. Parámetros importantes en esta maniobra son: tiempo entre movimientos sucesivos del timón y el ángulo de *overshoot*, que mide en cuanto la dirección del buque excede los  $20^\circ$  aplicados. La maniobra es repetida para cubrir un determinado rango de

velocidad y para diferentes valores de ángulo de timón y cambio de dirección, vide Tupper (2002).



**Figura 3. Maniobra zig-zag**

Abkowitz (1964) formuló las acciones fluidas en avance, desvío y guiñada para un buque en maniobras en aguas tranquilas como siendo representables por medio de las expansiones en la Serie de Taylor multi-variables, en las cuales son definidas las llamadas derivadas de movimiento lento. Las expansiones son adecuadamente definidas en el entorno de un movimiento de referencia, usualmente la velocidad rectilínea uniforme de avance  $U$ . De esta forma la formulación de Abkowitz (1964) es pertinente para maniobras en la típica situación de velocidad de crucero la cual pequeñas perturbaciones son sobrepuestas, o sea, la velocidad media es bien mayor que aquellas inducidas en el curso de la maniobra.

Los simuladores de maniobras integran un modelo definido por un conjunto de ecuaciones diferenciales (generalmente envolviendo los movimientos de avance, desvío y guiñada) no lineales y un conjunto de datos que especifica características geométricas e inerciales del buque, y también como sus coeficientes hidrodinámicos, vide Neves (1997) y Santos (1999). Los coeficientes hidrodinámicos pueden, en principio, ser determinados por diferentes procedimientos: métodos teóricos, métodos numéricos, testes cautivos, testes semi-cautivos e interpolación en datos de series sistemáticas.

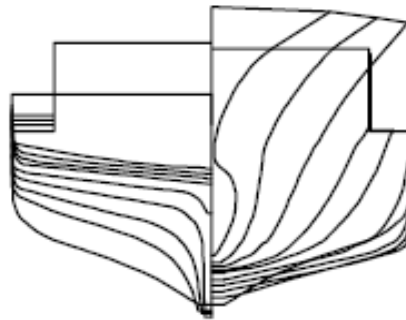
Este trabajo es un estudio sobre la maniobrabilidad del buque pesquero en condiciones de aguas tranquilas, en el cual se simula numéricamente la trayectoria de la embarcación, mediante un modelo matemático no lineal de tercera orden, y se considera solo tres grados de libertad, avance (surge), desvío (sway) y guiñada (yaw), este modelo numérico está basado en el modelo matemático propuesto por Abkowitz (1964), que considera los acoplamientos horizontales característicos de maniobra.

## CARACTERÍSTICAS DEL BUQUE

El buque ensayado por la ITTC para el presente trabajo corresponde a un pesquero rápido de cerco, de formas finas, denominado aquí, PS. Las características principales y plano de formas de este buque son presentados en la Tabla I y la Figura 4, respectivamente.

**Tabla I. Características del buque PS**

<b>Denominación</b>	
Eslora entre perpendiculares	34.50 m
Manga	7.60 m
Puntal	3.07 m
Calado medio	2.65 m
Radio de giro en rolido	3.86 m
Radio de giro en guiñada	3.28 m
Radio de giro en cabeceo	3.28 m
Altura metacéntrica transversal*	0.75 m
Posición vertical del C.G.	3.36 m



**Figura 4. Líneas de forma del buque PS.**

Este buque fue reproducido en escala 1/15 y fue efectuada una serie sistemática de ensayos radio-controlados que fueron utilizados en el *24th International Benchmark Testing of Numerical Modelling on Intact Stability 2005*, vide Cipriano (2005). Todos estos ensayos fueron realizados en el Tanque del Instituto de Ingeniería de Pesca de Japón (NRIFE). En la Tabla II se presenta las derivadas de maniobra del buque pesquero en forma adimensional, vide Hashimoto y Umeda (2001).

**Tabla II Coeficientes de maniobrabilidad del buque pesquero**

$X_{vr}$	0.01420	$N_v$	0.05949
$X_{vv}$	-0.02814	$N_r$	-0.091552
$X_{rr}$	0.01091	$N_{vvv}$	0.135666
$Y_v$	-0.628262	$N_{rrr}$	0.041432
$Y_r$	0.06720	$N_{vvr}$	-0.305274
$Y_{vvv}$	-1.208875	$N_{vrr}$	-0.02606
$Y_{rrr}$	0.125430		
$Y_{vvr}$	0.354240		
$Y_{vrr}$	-0.208090		

## CONTRIBUCIÓN DE OTRAS FUERZAS AL MOVIMIENTO DEL BUQUE

Para complementar el tratamiento de las fuerzas que actúan sobre el buque, las siguientes contribuciones son consideradas, vide De Kat (1988):

### Timón:

El timón, siendo un perfil hidrodinámico, sufre la acción de una fuerza de sustentación y de una fuerza de arrastre, cuando es sometido a un dado ángulo de ataque en relación al flujo de agua. Para un dado ángulo de ataque, la fuerza de sustentación depende de:

- Forma de la sección del perfil
- Área del timón
- Distribución de las secciones y en particular, la razón de aspecto del timón, esto es, la razón entre la altura del timón y la longitud media de la cuerda.
- Velocidad del agua atacando el timón.

Existen muchas formulas semi-empíricas para el calculo de las fuerzas en el timón, para su uso en la fase preliminar de proyecto, una de las formulas mas empleadas es la propuesta por Inoue (1981).

$$F_N = \frac{1}{2} \rho \frac{6.13\Lambda}{\Lambda + 2.25} A_R u^2$$

Donde:

$F_N$  : fuerza normal al timón, en N.

$A_R$  : área del timón en  $m^2$

$u$  : velocidad de avance (surge), en m/s

$\rho$  : densidad del agua

$\Lambda$  : razón de aspecto del timón

Para el cálculo de las derivadas lineales de la fuerza de desvío (sway) y el movimiento de guiñada (yaw) con respecto al ángulo del timón, son empleadas las siguientes formulaciones, vide Inoue (1981):

Para el movimiento de desvío:

$$Y_\delta = -(1 + a_H) F_N$$

Para el movimiento de guiñada:

$$N_\delta = -(1 + a_H) x_R F_N$$

Donde:

$Y_\delta$  : derivada lineal de la fuerza de desvío con respecto al ángulo del timón.

$N_\delta$  : derivada lineal del momento de guiñada con respecto al ángulo de timón.

$a_H$  : factor de interacción entre el casco y el timón.

$x_R$  : posición longitudinal del timón.

### Propulsión y Características de la Resistencia:

La característica de la resistencia referida aquí es la resistencia en aguas tranquilas, donde el buque navega con velocidad constante. Esta resistencia es grandemente afectada por efectos viscosos y por la formación de olas. La curva de resistencia en aguas tranquilas puede ser evaluada a partir de experiencias con modelos en escala reducida o estimada por métodos semi-empíricos o estadísticos.

Las características del propulsor pueden ser evaluadas de forma aproximada por diferentes procedimientos. La suposición básica es que la velocidad de rotación del propulsor  $\eta$  no varía con el tiempo. Conociendo el número de palas, diámetro y otras características, se pueden utilizar las llamadas curvas  $K_T$ ,  $K_Q$ ,  $J$  para estimar el empuje producido por el propulsor para diferentes velocidades de avance. Una representación esquemática de las curvas  $K_T$ ,  $K_Q$  versus  $J$ , para valores constantes de  $P/D$  (paso - diámetro) es mostrada en la Figura 5.

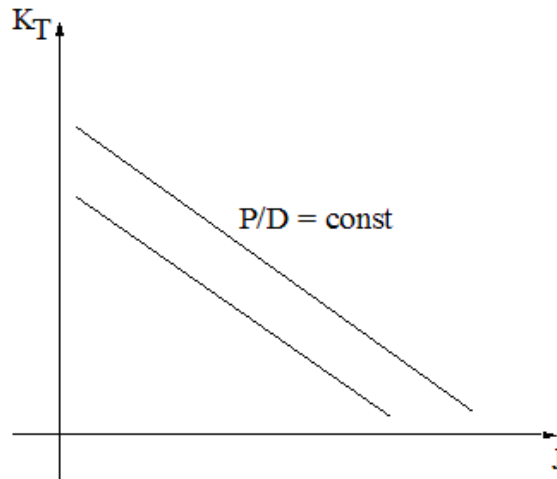


Figura 5. Curva  $K_T$

Las expresiones de los adimensionales  $K_T$  y  $J$  son mostradas a seguir:

$$K_T = \frac{T}{\rho \eta^2 D^4}$$

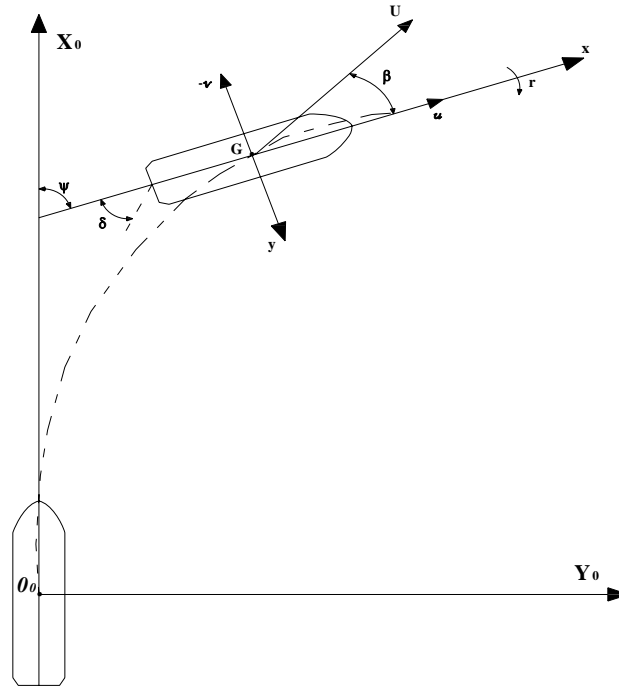
$$J = \frac{V}{\eta D}$$

Donde  $T$  es el empuje del propulsor,  $\rho$  es la densidad del agua,  $D$  es el diámetro del propulsor,  $\eta$  es el número de revoluciones del propulsor por segundo, y  $V$  es la velocidad de entrada del agua en el propulsor.

### MODELO MATEMÁTICO

Las ecuaciones básicas del movimiento en el plano horizontal pueden ser expresadas con respecto a un sistema fijo en el cuerpo y trayectorias en maniobras pueden ser referidas a

sistemas inerciales. La figura 6 muestra el sistema de referencia fijo en el cuerpo, *vide* American Bureau of Shipping (2006). El rumbo del buque es definido por la trayectoria de su centro de gravedad. El ángulo de incidencia o ángulo de guiñada ( $\psi$ ) se refiere a la orientación del eje longitudinal del buque con respecto al eje longitudinal del sistema inercial. La diferencia entre la orientación del rumbo actual y la incidencia del buque es definida por el ángulo de deriva ( $\beta$ ). La velocidad ( $U$ ) es la velocidad del curso, tangente al rumbo del buque.



**Figura 6. Sistemas de coordenadas y definición de los movimientos del buque.**

Muchos autores reúnen términos inerciales con términos hidrodinámicos, *vide* Velasco (2004), dejando del lado izquierdo de la ecuación de movimiento, solamente los términos ligados a la aceleración. Siguiendo el modelo de Abkowitz (1964), y momentáneamente desconsiderando el movimiento de rolo (roll), las ecuaciones de movimiento quedan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 (m - X_{\ddot{u}})\dot{u} &= (X_{vr} + m)vr + \frac{1}{2}X_{vv}v^2 + \frac{1}{2}X_{rr}r^2 \\
 &+ (X_u + \frac{1}{2}X_{vuu}v^2 + \frac{1}{2}X_{rru}r^2 + X_{\delta\delta u}\delta^2 + X_{vru}vr)\Delta u \\
 &+ \frac{1}{2}X_{uu}(\Delta u)^2 + \frac{1}{6}X_{uuu}(\Delta u)^3 + \frac{1}{2}X_{\delta\delta} \delta^2 + X_{\delta\delta u} \delta^2 \Delta u \\
 &+ X_{v\delta}v\delta + X_{v\delta u}v\delta\Delta u + X_{r\delta}r\delta + X_{r\delta u}r\delta\Delta u + X_u\Delta u
 \end{aligned}$$

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - Y_{\dot{r}}\dot{r} = Y_vv + (Y_r - mu)r + \frac{1}{2}Y_{vvr}v^2r + \frac{1}{2}Y_{vrr}vr^2 + \frac{1}{6}Y_{vvv}v^3$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{6} Y_{rrr} r^3 + (Y_{vu} v + Y_{ru} r)(\Delta u) + \left(\frac{1}{2} Y_{vu} v + \frac{1}{2} Y_{ru} r\right)(\Delta u)^2 + \frac{1}{2} Y_{rvv} r v^2 \\
& + \frac{1}{2} Y_{v\delta\delta} v \delta^2 + Y_{r\delta\delta} r \delta^2 + Y_{\delta} \delta + \frac{1}{6} Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 + \frac{1}{2} Y_{\delta v v} \delta v^2 + \frac{1}{2} Y_{\delta r r} \delta r^2 \\
& + Y_{\delta u} \delta \Delta u + \frac{1}{2} Y_{\delta u u} \delta (\Delta u)^2 + Y_{vr\delta} v r \delta \\
\\
& - N_{\dot{v}} \dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}}) \dot{r} = N_v v + N_r r + \frac{1}{2} N_{vvr} v^2 r + \frac{1}{2} N_{vrr} v r^2 + \frac{1}{6} N_{rrr} r^3 \\
& + \left(\frac{1}{2} N_{vu} v + \frac{1}{2} N_{ru} r\right)(\Delta u) + \left(\frac{1}{2} N_{vu} v + \frac{1}{2} N_{ru} r\right)(\Delta u)^2 + \frac{1}{2} N_{v\delta\delta} r \delta^2 \\
& + \frac{1}{2} N_{r\delta\delta} r \delta^2 + N_{\delta r} \delta r + \frac{1}{6} N_{\delta\delta\delta} \delta^3 + \frac{1}{2} N_{\delta v v} \delta v^2 + \frac{1}{2} N_{\delta r r} \delta r^2 \\
& + N_{\delta u} \delta \Delta u + \frac{1}{2} N_{\delta u u} \delta (\Delta u)^2 + N_{vr\delta} v r \delta
\end{aligned}$$

Estas ecuaciones representan los movimientos horizontales de avance, desvío y guiñada, acoplados, que describe los dos movimientos de traslación y uno de rotación, excitados por acciones hidrodinámicas generadas por la aplicación del timón. Los puntos sobre las variables anteriores denotan derivadas en relación al tiempo. Las variables con subíndices representan coeficientes de amortiguamiento, masa adicional y ángulo de timón, respectivamente. Las variables  $\Delta u(t)$  y  $v(t)$  están definidas como componentes del vector velocidad del centro de gravedad, descompuestas siguiendo los ejes fijos en el cuerpo.

## RESULTADOS NUMÉRICOS

Cálculos basados en el modelo matemático descrito anteriormente son realizados para tres tipos de maniobras, y los resultados obtenidos son mostrados gráficamente para un mejor entendimiento del movimiento del buque pesquero. A continuación describiremos los resultados numéricos y compararemos con algunos resultados experimentales y numéricos obtenidos por otras instituciones que participaron en el *24th International Benchmark Testing of Numerical Modelling on Intact Stability 2005*, vide Spyrou (2005), de cada una de las maniobras evaluadas en este trabajo, estos resultados numéricos obtenidos por la COPPE/UFRJ pueden ser encontrados en Cipriano (2008).

### Maniobra de Espiral:

Los cálculos de la maniobra de espiral realizados para el buque pesquero PS son mostrados en la Figuras 7, 8 y 9, puede ser mencionado de estas figuras que los resultados calculados son razonablemente buenos, especialmente los resultados explican el comportamiento sensible del buque durante la maniobra de espiral. No obstante, la estabilidad direccional no puede cuantificarse de forma directa.

Uno de los parámetros que puede ser evaluado es el ancho de histéresis, el cual se mide en el origen de coordenadas de la curva trazada con los datos obtenidos, como se muestra en

la Figura 7, donde observamos que nuestro resultado no muestra el ancho de histéresis, y podemos concluir que nuestro buque pesquero es direccionalmente estable.

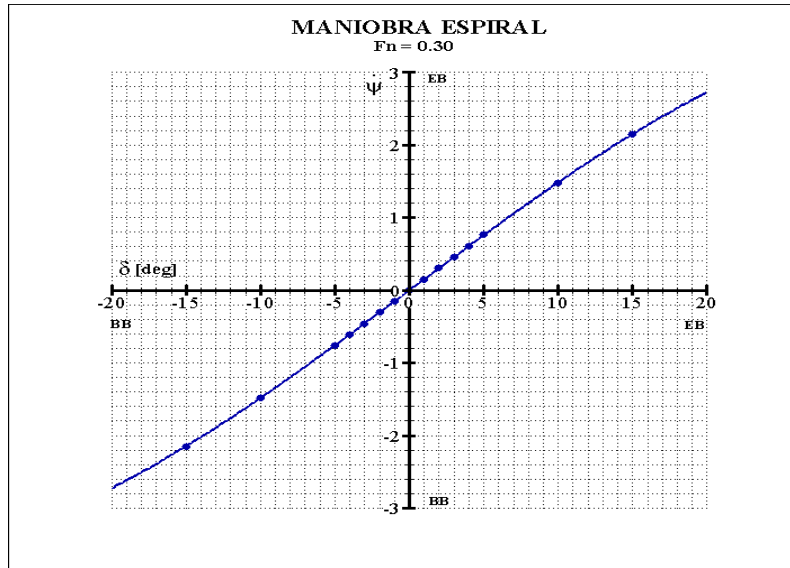


Figura 7. Maniobra espiral del buque pesquero PS

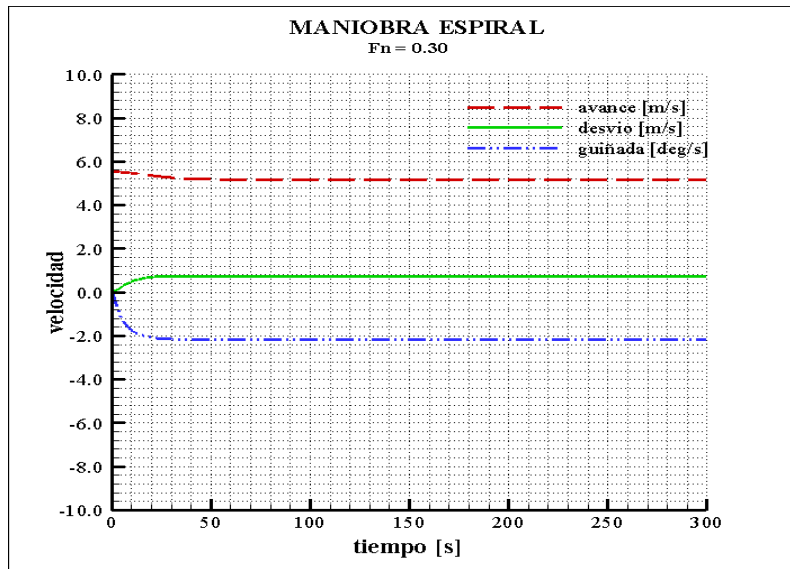


Figura 8. Velocidades del buque pesquero PS en la maniobra espiral

La serie temporal de las velocidades de avance (*surge*), desvío (*sway*) y guiñada (*yaw*), para el buque pesquero PS, y representada en la Figura 8, podemos observar que luego de los 20 segundos, ella continúa con un comportamiento permanente para la maniobra de espiral. Es importante mencionar que la denominación de maniobra de espiral se refiere a la trayectoria descrita por el buque pesquero durante la maniobra, como se puede ver en la Figura 9.

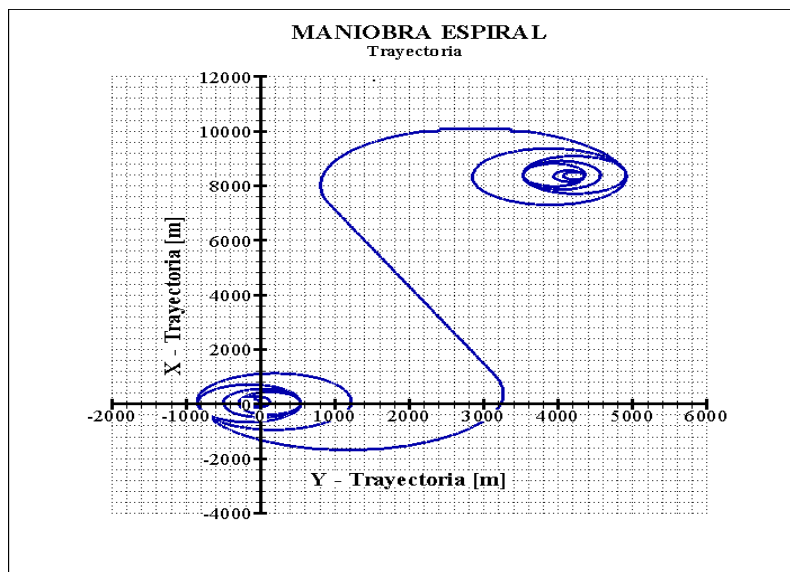


Figura 9. Trayectoria del buque pesquero PS en la maniobra espiral

### Maniobra de Giro:

Los resultados obtenidos de la maniobra de giro, para un ángulo de timón de  $35^\circ$  (a estribor) y una velocidad de  $10.73 \text{ knot}$ , es mostrado en la Figura 10. Además, en la Figura 11 se muestra una serie temporal para sus velocidades instantáneas durante esta maniobra. En la Tabla III, utilizamos la siguiente nomenclatura:

- $X_{90}$  : avance
- $X_{10}$  : avance para cambio de rumbo de  $10^\circ$
- $X_{20}$  : avance para cambio de rumbo de  $20^\circ$
- $Y_{90}$  : traslado lateral
- $D_T$  : diámetro táctico
- $D_G$  : diámetro de giro
- $\phi$  : ángulo de inclinación al realizar la maniobra de giro
- $\bar{r}$  : tasa de variación permanente del ángulo de guiñada

Tabla III. Resultados numéricos de la maniobra de giro

Participante	$X_{90}$	$X_{10}$	$X_{20}$	$Y_{90}$	$D_T$	$D_G$	$\phi$ [deg]	$\bar{r}$ [rad/s]
COPPE/UFRJ	2.91	1.20	1.59	1.30	3.07	2.34	4.64	4.43
PP*	3.02	1.08	1.52	1.46	3.38	N/A	4.53	3.84
Experimental	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	4.66	4.35

\*Promedio de los resultados numéricos de los demás participantes  
N/A: resultados no disponibles.

Es importante resaltar que los parámetros como avance  $X_{90}$ , traslado lateral  $Y_{90}$ , diámetro táctico  $D_T$  y diámetro de giro  $D_G$  son adimensionalizados por la eslora del buque.

De los resultados obtenidos, según los criterios de maniobrabilidad de la I.M.O. (1993), el avance del buque debe ser menor a 4.5 esloras, y para nuestro buque pesquero analizado

obtuvimos 2.91 esloras. Así también los valores del diámetro táctico no debe exceder a 5 esloras, nuestro resultado da un valor de 3.07 esloras. La capacidad de giro inicial no debe exceder las 2.5 esloras y para nuestro caso dio un valor de 1.20 esloras, como se puede observar en la Tabla III.

Así también de la Tabla III vemos que se cuenta con pocos resultados experimentales completos, y las comparaciones entre nuestros resultados numéricos y los resultados experimentales disponibles y los obtenidos por las demás instituciones nos permiten concluir que nuestro simulador numérico reproduce confiablemente la maniobra de giro

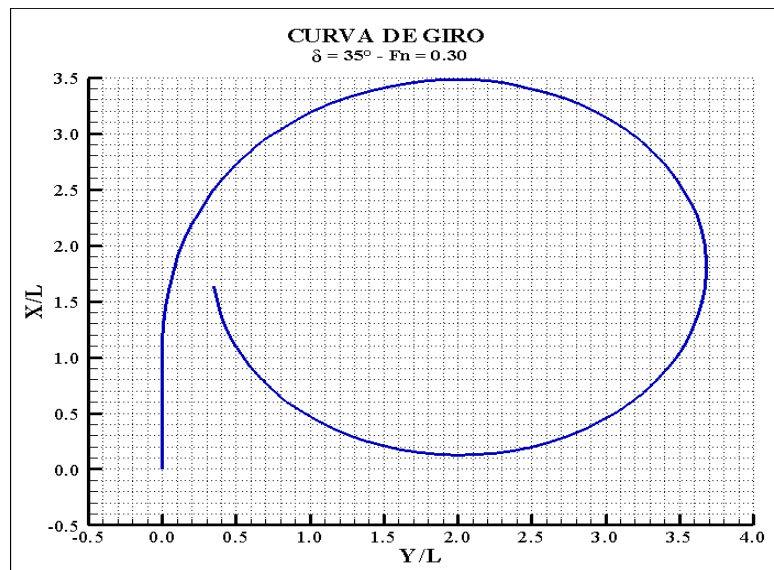


Figura 10. Maniobra de giro del buque pesquero PS

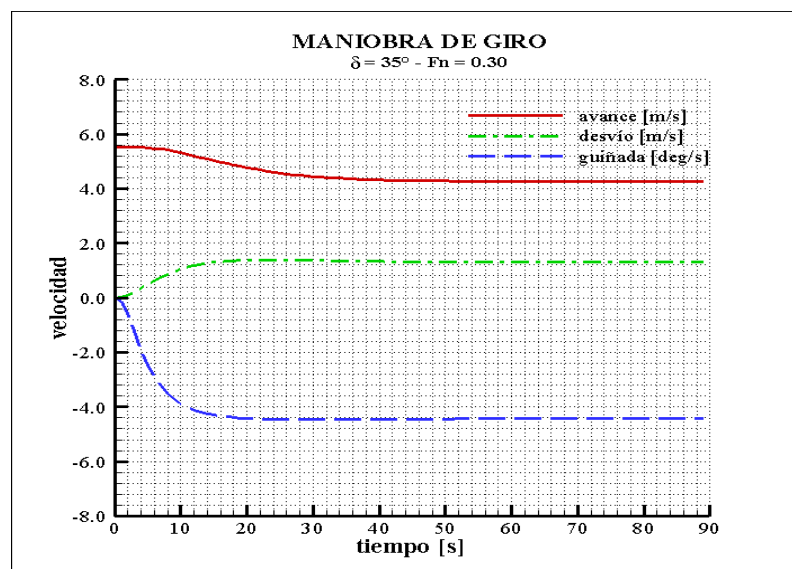


Figura 11. Velocidades del buque pesquero PS en la maniobra de giro

### Maniobra de Zig-Zag:

Las simulaciones numéricas para la maniobra de zig-zag fueron realizadas para condiciones de ángulo de timón de  $10^\circ/10^\circ$  y  $20^\circ/20^\circ$ , y una velocidad de 10.73 knot, donde son referenciados los overshoot en guiñada para la primera y segunda aplicaciones del timón, como se puede ver en la Tabla IV.

Tabla IV. Resultados numéricos de la maniobra de zig-zag

Participante	Acción del timón	1° overshoot [deg]	2° overshoot [deg]	1ra ejecución del timón [s]	2da ejecución del timón [s]
COPPE/UFRJ	$10^\circ/10^\circ$	4.49	4.70	12.15	40.57
	$20^\circ/20^\circ$	9.77	11.61	12.80	42.50
PP*		10.03	10.74	11.64	39.49

\* Promedio de los resultados numéricos de los demás participantes

También se puede observar en la Tabla IV, los resultados obtenidos para la acción del timón de  $10^\circ/10^\circ$ , el primer *overshoot* y el segundo *overshoot* cumplen con el criterio de la I.M.O. (1993) para maniobras, el valor numérico de nuestros *overshoot* esta por debajo de los  $10^\circ$ , teniendo en el primer *overshoot* el valor de  $4.49^\circ$  y para el segundo *overshoot* el valor de  $4.70^\circ$ , como es requerido por las recomendaciones.

A pesar de, en este caso, no contar con resultados experimentales, puede verse de la Tabla IV, que los resultados numéricos están próximos del promedio de las demás instituciones participantes, permitiéndonos concluir preliminarmente que nuestro código numérico es capaz de lidiar bien con maniobras extremas como la de zig-zag.

Las Figuras 12, 13 y 14 muestran las simulaciones numéricas de la maniobra de zig-zag  $10^\circ/10^\circ$  del buque pesquero PS en aguas tranquilas. La Figura 12 presenta la secuencia de aplicaciones del timón en la maniobra, y los correspondientes ángulos de rumbo, por ejemplo el primer *overshoot* se da antes de los primeros 20 segundos. La Figura 13 muestra las velocidades en avance, desvío y guiñada para la condición de maniobra zig-zag  $10^\circ/10^\circ$  del buque PS, y se observa también la excelente respuesta del barco pesquero en sus movimientos horizontales que predomina la maniobrabilidad. En la Figura 14 podemos ver la trayectoria del buque PS para esta maniobra, donde se ve la concordancia con las otras respuestas del buque pesquero.

Así también las Figuras 15, 16 y 17 muestran las simulaciones numéricas de la maniobra de zig-zag  $20^\circ/20^\circ$  del buque pesquero PS en aguas tranquilas. La Figura 15 presenta la secuencia de aplicaciones del timón en la maniobra, y los correspondientes ángulos de rumbo, el primer *overshoot* se da antes de los 20 segundos como en el caso anterior. La Figura 16 muestra las velocidades en avance, desvío y guiñada para la condición de maniobra zig-zag del buque PS, como es coherente la respuesta de la velocidad en guiñada (*yaw*) para la maniobra zig-zag  $20^\circ/20^\circ$  es mayor que de la maniobra zig-zag  $10^\circ/10^\circ$ . También es evidente que para un ángulo del timón mayor la respuesta de la trayectoria en Y debe ser mayor como se muestra en la Figura 17.

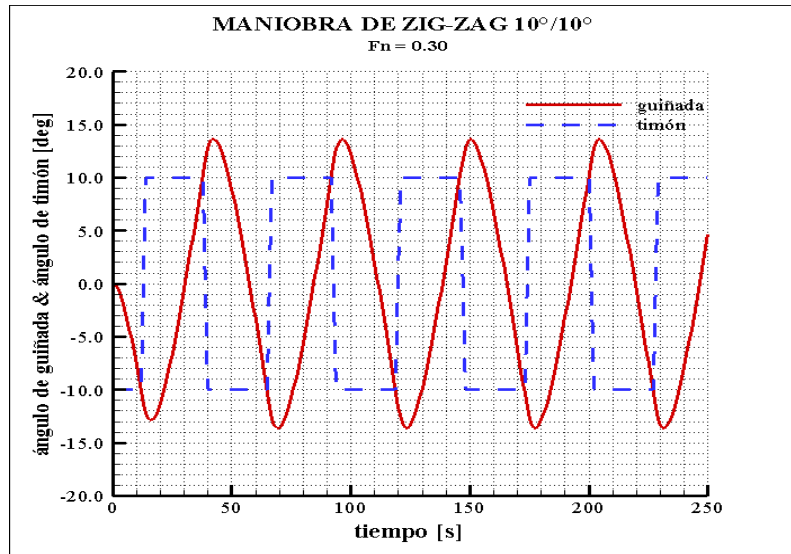


Figura 12. Maniobra zig-zag 10°/10° del buque pesquero PS

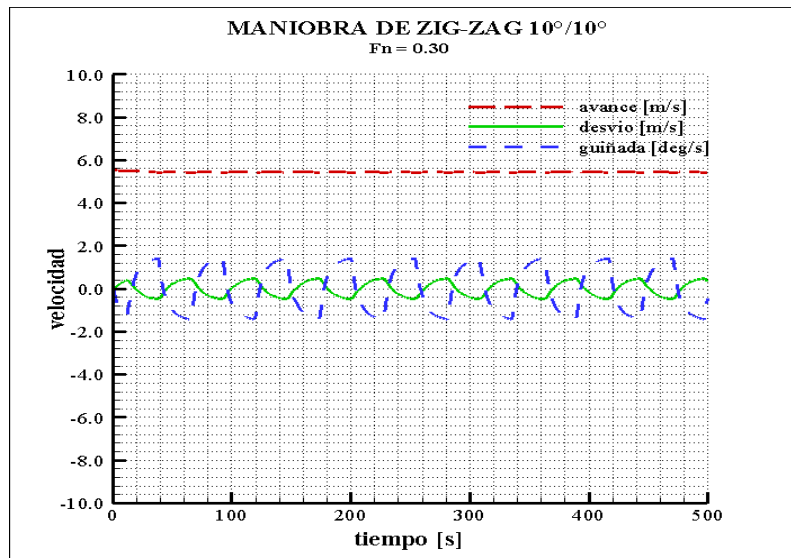


Figura 13. Velocidades del buque pesquero PS en la maniobra zig-zag 10°/10°

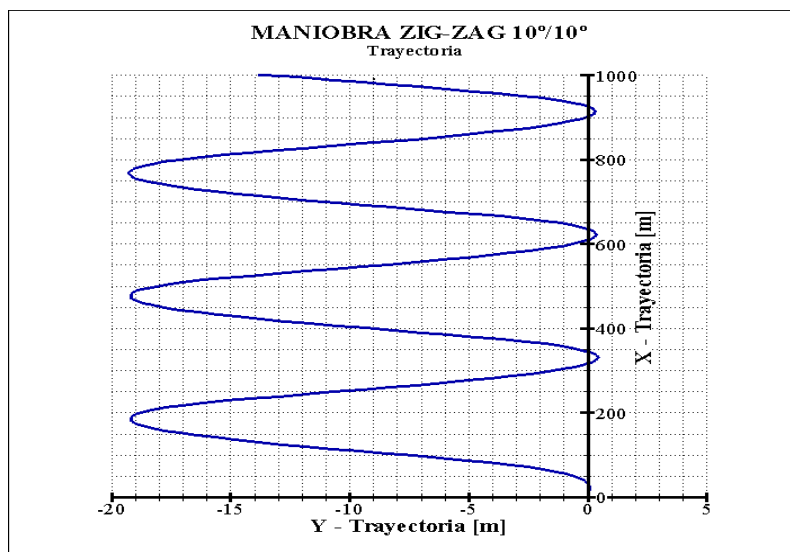


Figura 14. Trayectoria del buque pesquero PS en la maniobra zig-zag 10°/10°

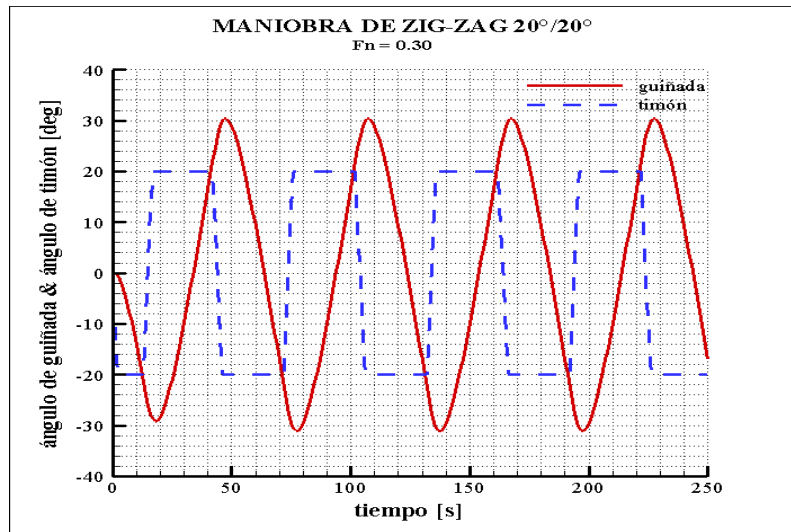


Figura 15. Maniobra zig-zag 20°/20° del buque pesquero PS

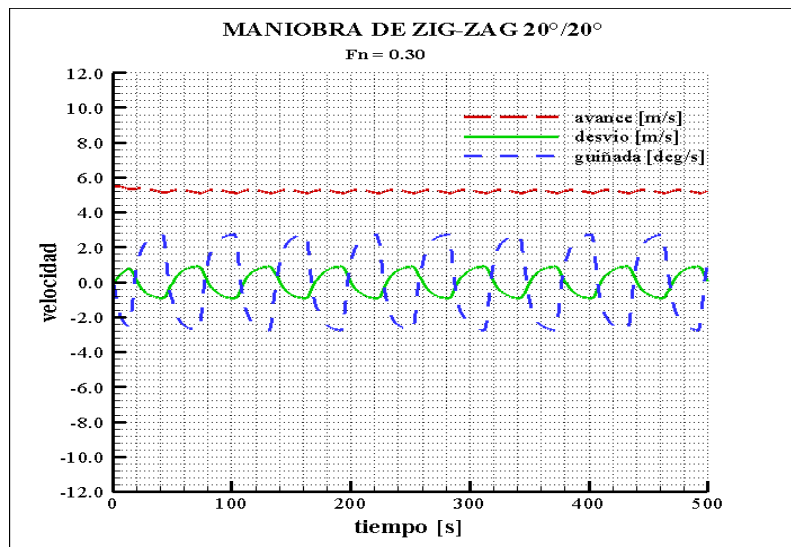


Figura 16. Velocidades del buque pesquero PS en la maniobra zig-zag 20°/20°

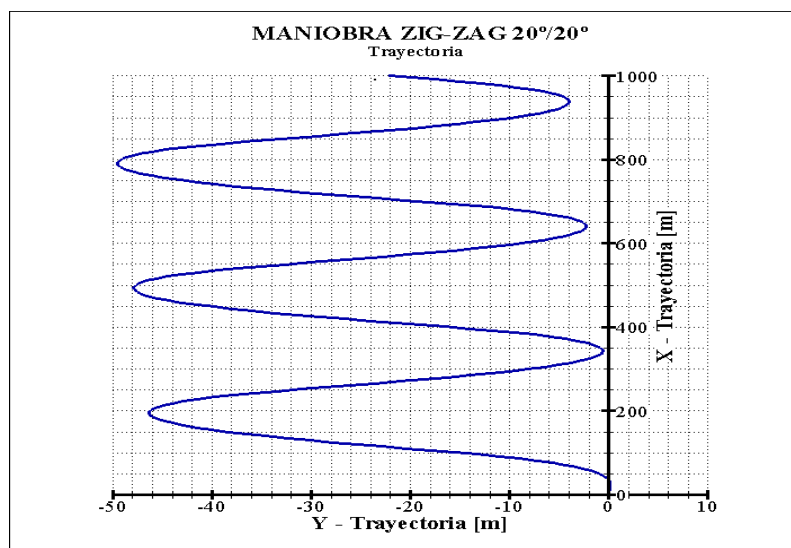


Figura 17. Trayectoria del buque pesquero PS en la maniobra zig-zag 20°/20°

Observamos en la Tabla IV, los resultados obtenidos para la acción del timón de  $20^\circ/20^\circ$ , el primer *overshoot* y el segundo *overshoot* con valores de  $9.77^\circ$  y  $11.61^\circ$  respectivamente, ambos cumpliendo los criterios de la I.M.O. (1993) para maniobras estandarizadas, como fue visto anteriormente.

## CONCLUSIONES

Como se mencionó al principio de este trabajo el objetivo era fundamentalmente de simular numéricamente la trayectoria de un buque pesquero, mediante un modelo matemático no lineal, en el dominio del tiempo, sobre la acción del timón, durante las maniobras estandarizadas de curva de giro, espiral y zig-zag. Esta es la aportación de tipo general más importante de este trabajo al estudio de la maniobrabilidad de buques pesqueros. No obstante lo anterior y como conclusiones particulares más destacadas se pueden señalar lo siguiente:

Una vez evaluadas numéricamente las cualidades de maniobrabilidad, sea mediante simulación numérica, o bien realizando ensayos con modelos o en las propias pruebas del mar del buque pesquero, se hace necesario juzgar dichas cualidades. Hasta el momento no existen criterios universalmente aceptados para evaluar la maniobrabilidad de buques pesqueros, pero la I.M.O. (1993), ha dado normas y directrices con respecto a la estandarización de la maniobrabilidad de buques, los cuales son vitales para garantizar viajes seguros y océanos limpios. Por lo tanto los valores mínimos aceptables que debe reunir un buque pesquero no han de diferir mucho, a los requerimientos exigidos por la I.M.O (1993).

El método de predicción para la maniobrabilidad del buque pesquero, basado en el modelo matemático no lineal propuesto por Abkowitz (1964), es demostrado su utilización de manera práctica en la etapa de anteproyecto, consecuentemente podemos verificar si el buque pesquero cumplirá o no, con los requerimientos de maniobrabilidad impuestos. Y estos estudios nos permiten tener algunas conclusiones finales que pueden ser tomadas en cuenta por el ingeniero naval, los cuales se enfrentan con dificultades para predecir la buena maniobrabilidad.

Las maniobras de curva de giro, espiral y zig-zag en aguas tranquilas son muy bien modeladas por los términos de tercera orden de maniobrabilidad en avance, desvío y guiñada. Existe una excelente adherencia en los resultados.

La simulación de la maniobra espiral que fue mostrada anteriormente, se puede mencionar que los resultados obtenidos son razonablemente buenos, especialmente los resultados explican el comportamiento sensible del buque pesquero durante la maniobra. No obstante, la estabilidad direccional no puede cuantificarse de forma directa. Uno de los parámetros puede ser el ancho de histéresis, el cual se mide en el origen de coordenadas de la curva trazada con los datos obtenidos, pero nuestro resultado muestra que no existe ningún ancho de histéresis, y concluimos que el buque pesquero es direccionalmente estable.

Los resultados de la maniobra de giro, para un ángulo de timón de  $35^\circ$ , sometidos a los criterios de maniobrabilidad, muestra que, la maniobra de giro es aquella que más

incorpora influencias no lineales asociadas a las características de maniobrabilidad en aguas tranquilas, mucho más que la maniobra de zig-zag. Una excelente concordancia de nuestros resultados apunta para el hecho de que la descripción de las acciones hidrodinámicas no-lineales relevantes para la dinámica del buque pesquero en el plano horizontal es satisfactoria, en la ausencia de olas.

Las respuestas de la maniobra de zig-zag para condiciones de ángulo de timón de  $10^\circ/10^\circ$  y  $20^\circ/20^\circ$ , podemos decir que existe una excelente concordancia en los resultados obtenidos. Para la acción del timón de  $10^\circ/10^\circ$  y  $20^\circ/20^\circ$ , el primer *overshoot* y el segundo *overshoot*, ambos cumplen con los criterios de maniobrabilidad de la I.M.O (1993).

Existen varios métodos para predecir la maniobrabilidad del buque y cada método tiene sus propios méritos y desméritos. Es importante mencionar que se debe establecer métodos exactos de pruebas de mar y también métodos para la evaluación de perturbaciones externas. Por esta razón es recomendable crear una base de datos de pruebas de mar que sirvan para validar y mejorar los métodos de predicción de la maniobrabilidad en buques pesqueros.

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo es parte de un proyecto de investigación financiado por CNPq y LabOceano/COPPE/UFRJ del Brasil. Los autores manifiestan su agradecimiento por el apoyo recibido.

## **REFERENCIAS**

Abkowitz, M. A., 1964, Lectures on Ship Hydrodynamics Steering and Maneuverability. Hydrodynamics Department Hydro-og Aerynodamisk Laboratorium, Report No Hy-5, Lyngby, Denmark.

American Bureau of Shipping, 2006, Guide for Vessel Maneuverability. ABS Plaza, Houston, TX 77060 USA.

Baquero, A., 1981, *Análisis del Comportamiento del Buque Bajo la Acción del Timón*. Tese de Dr. Ing., ETSIN – Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

Cipriano, W., 2005, Estabilidade do Navio em Condições Extremas: Estudo de um Modelo Numérico Não-Linear de Terceira Ordem, Acoplado em Seis Graus de Liberdade. Tese de M.Sc., COPPE - Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Cipriano, W., 2008, Aplicación de un Modelo Numérico para la Predicción de la Maniobrabilidad de Buques Pesqueros de Cerco. Tesis de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica – Escuela Profesional de Ingeniería Naval, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

- Clarke, D., 1983, “The Application of Maneuvering Criteria in Hull Design Using Linear Theory”. RINA transactions, Vol. 125.
- Crane, C. L., 1966, “Studies of Ship Maneuvering – Response to Propeller and Rudder Actions”. In: Ship Control Systems Symposium, Annapolis, U.S.A.
- De Kat, J. O., 1988, *Large Amplitude Ship Motions an Capsizing in Severe Sea Conditions*. Dissertation Ph.D., University of California, Berkeley, United States of America.
- Hashimoto, H., Umeda, N., 2001, “Importance of Wave Effects on Maneuvering Coefficients for Capsizing Prediction”. In: Proceedings of 5th International Workshop on Stability and Operational Safety of Ships, Trieste, Italy, pp. 6.4.1-6.4.8
- IMO, 1993, “Interim Standards for Ship Maneuverability”. Resolution A.751 (18).
- Inoue, S., Hirano, M., Kijima, K., 1981, “Hydrodynamics Derivates on Ship Manoeuvring”. International Shipbuilding Progress, vol. 28, N° 325.
- Kijima, K., et al., 1990 “On the Maneuvering Performance of a Ship with the Parameter of Loading Condition”, Journal of Society of Naval Architects of Japan, 168, pp 141-148.
- Neves, M., Valerio, L., 1997, Programa para Simulação Numérica de Manobras de Navios em Águas Calmas (INOUE-MANUAL). Fundação COPPETEC, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Mar.
- Nomoto, K., et al., 1957, “On the Steering Qualities of Ships”, International Shipbuilding Progress, vol. 4, no. 35.
- Santos, E. M., 1999, Uma Abordagem Sobre Modelos Matemáticos para Simulação de Manobras de Navios em Tempo Real. Tese de M.Sc., COPPE- Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Spyrou, K., Themelis, N., Tigkas, I., 2005, “Benchmark Study of Numerical Codes for the Prediction of Intact Stability of Ships in Extreme Seas: Phase II”, *Specialist Committee on Stability in Waves, ITTC Report, Athens*.
- Tupper, E., 2002, Introduction to Naval Architecture. Third Edition. Oxford, Great Britain, Elsevier Science.
- Velasco, F., Rueda, T., López, E., et al., 2004, “Modelos Matemáticos para el Control de Gobierno de Buques”. En: XXV Jornadas de Automática, Ciudad Real, España, Set.
- Yoshimura, Y. And Ma, N., 2003, “Manoeuvring Prediction of Fishing Vessel”, In: MARSIM’03, Kanazawa, Japan, Aug.