

# Modelo predictivo de comportamiento de barcos

Boroni G., Vénere M., Lotito P., Clausse A.  
Universidad Nacional del Centro, Tandil, Pcia. de Buenos Aires  
{gboroni,venerem,plotito,clausse@exa.unicen.edu.ar}

Martinetti Osvaldo D.

Jefe del Servicio de Análisis Operativos Armas y Guerra Electrónica, Armada Argentina

Grasso Oscar P.

Jefe dpto. Tecnología de la Información, Armada Argentina

{opgrasso@ciudad.com.ar}

**Resumen:** el problema de simular los movimientos y la dinámica de un barco es estudiado principalmente para el desarrollo de simuladores de maniobra y entrenamiento. En general existen varios niveles posibles de solución, con diversos grados de complejidad y de exactitud. No obstante, todas las soluciones basadas en modelos matemáticos conducen naturalmente a dos acercamientos básicos: modelos dinámicos de desplazamiento, y modelos cinemáticos de predicción. En este trabajo se presenta el desarrollo de un nuevo modelo matemático simplificado, que permite predecir la dinámica de maniobra y la cinemática de movimiento, en base a las características del barco, y a los valores de velocidades y aceleraciones instantáneas.

## Introducción

La mayoría de los modelos matemáticos modernos de comportamientos de buques usados en simuladores, se construyen según el principio modular, es decir, incluyen sub-modelos separados para los distintos componentes: el casco, el timón, el motor, etc. (Inoue 1981, Crane 1989 y Chislett 1996). Cada sub-modelo contiene generalmente fórmulas empíricas para la descripción de componentes de fuerzas y de momentos. Todo esto agrega flexibilidad a los modelos y mejora la velocidad de cómputo.

Para convertir un modelo dinámico de maniobra complejo en un modelo rápido, es razonable simplificar los más sofisticado, eliminando todas las características y efectos menos importantes (Degre 1998). Las siguientes consideraciones podrán ser discutidas para obtener dicha simplificación:

- El movimiento de rolido puede afectar sensiblemente en las maniobras. Este efecto en la mayoría de los casos es débil, y puede ser sacrificado fácilmente.
- La inercia del motor es mucho más baja que la inercia de la nave misma, y se puede descartar bajo el supuesto de que la velocidad de rotación del propulsor puede cambiar inmediatamente.
- Se puede crear un modelo matemático conveniente para las fuerzas longitudinales (Inoue 1981), pero con representaciones simplificadas para la resistencia de la nave y para la fuerza de la oleada inducida por el timón.
- La dinámica del engranaje de manejo puede también ser descuidada en muchos casos, pero su presencia es altamente deseable cuando se considera la simulación de control automático.
- Es deseable proveer en el modelo de leyes de control para la ejecución maniobras típicas.

En la sección siguiente se presenta un modelo de comportamiento de barcos, que combina un sub-modelo cinemático de desplazamiento, ecuaciones de control para la aceleración tangencial y ángulo del timón, y un sub-modelo de levantamiento y cabeceo.

## Modelo para el desplazamiento horizontal del barco

Considerando según la figura 1 que el origen C es el centro de masa del barco, el modelo simplificado propuesto maneja las siguientes variables en el intervalo de tiempo  $t \in [t_p, t_p + T_p]$

- $\psi$  es el ángulo que forma el barco con el eje  $x$ ;
- $\xi$  es la componente  $x$  de la posición del barco;
- $\eta$  es la componente  $y$  de la posición del barco;
- $u$  es la componente  $x$  de la velocidad del barco;
- $v$  es la componente  $y$  de la velocidad del barco;
- $r$  es la velocidad tangencial del barco.

Considerando el efecto de las aceleraciones en cada una de las componentes de velocidades, y  $t$  el tiempo actual, el modelo cinemático de desplazamiento propuesto es

$$\begin{aligned} \psi &= \psi_{t_p} + r_{t_p} (t - t_p) & \xi &= \xi_{t_p} + v_{t_p} (t - t_p) & r &= a_{t_p} (t - t_p) \\ \eta &= \eta_{t_p} + u_{t_p} (t - t_p) & V &= V_{t_p} + a_b (t - t_p) \\ u &= V_{t_p} \cos(\psi) & v &= V_{t_p} \sin(\psi) \end{aligned} \quad (1)$$

donde

- $V_{t_p}$  es la velocidad del barco;
- $a_{t_p}$  es la aceleración tangencial;
- $a_{b,t_p}$  es la aceleración del barco.

El subíndice  $t_p$  se refiere a los valores obtenidos en dicho tiempo. Como se mencionó anteriormente, las Ecs. 1 se pueden complementar con leyes de control, representando un piloto automático o un operador humano (Sutulo 2002). Por ejemplo, para el cambio de curso de maniobra, la ley de control es:

$$\delta = f(\psi, \dot{\psi}, \xi_c, \dot{\xi}_c, \eta_c, \dot{\eta}_c, u, v, \dots), \quad (2)$$

donde se pueden introducir parámetros adicionales de acuerdo a la complejidad esperada del modelo. En base a lo anterior, se propone agregar al modelo (1) las ecuaciones de control para representar la aceleración tangencial  $a_{t_p}$  y el ángulo de inclinación del barco  $\delta_b$

$$a_{t_p} = C_b \delta_T (t + \rho) V_{t_p} / \varepsilon_m L \quad \delta_b = -C_i \delta_T (t + \rho) V_{t_p} / \varepsilon_m L, \quad (3)$$

donde

- $\varepsilon_m$  máxima velocidad de giro del timón;
- $L$  es la longitud del barco;
- $\delta_T$  es el ángulo del timón;
- $C_b$  es el coeficiente de ajuste de aceleración del timón;
- $C_i$  es el coeficiente de ajuste de inclinación del barco;
- $\rho$  es el coeficiente de retardo.

A partir de las Ec. 3, se obtiene que la aceleración tangencial y el ángulo de inclinación del barco son proporcionales a la velocidad del barco, e inversamente proporcional a la longitud del mismo. Se puede ver que cuando la velocidad  $V_p$  es 0, no hay aceleración tangencial, y además el barco no se inclina por efecto de una maniobra de giro.

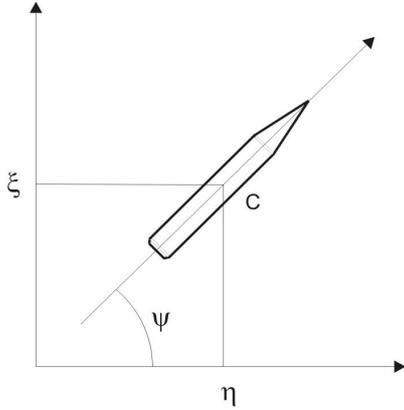


Fig. 1. Esquema de variables y parámetros del modelo.

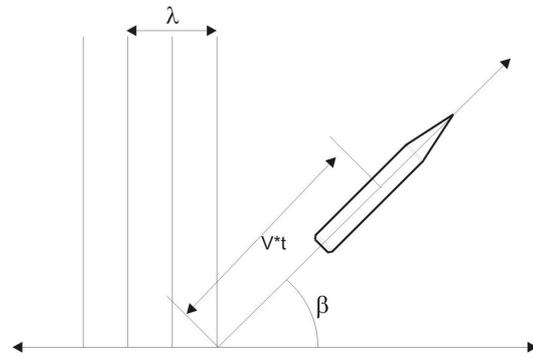


Fig. 2. Movimiento relativo de las olas respecto del barco que avanza con velocidad V.

### Modelo para el levantamiento y cabeceo del barco

Considerar que las olas se aproximan al buque desde cualquier ángulo  $\beta$  respecto de la dirección de su movimiento (ver figura 2), y con diferentes frecuencias; para un observador que avanza con el buque a velocidad V, las olas se las recibe con una frecuencia de encuentro dada por

$$\omega_e = \omega_0 - kV \cos \beta, \quad (4)$$

donde

- $\omega_0 = \sqrt{kg}$  es la frecuencia propia de la ola;
- $\lambda$  es la longitud de la ola;
- $k = 2\pi/\lambda$  es el número de la ola.

La función que describe la superficie de la ola de amplitud  $a$ , esta dada por

$$\eta(x, y, t) = a \sin[k(x \cos \beta + y \sin \beta) + \omega_e t], \quad (5)$$

donde las coordenadas  $(x, y)$  especifican un punto de la superficie del mar, respecto del sistema que se desplaza con el barco. Despreciando el ancho de la cubierta en proa, la ecuación 5 representa la elevación de la superficie en el punto  $(x, y)$ .

En este trabajo se ha restringido al caso olas de proa ( $\beta = 180$ ), debido que se considera más alta la exigencia en lo que se refiere a respuesta vertical. Esto a su vez va a producir la mayor posibilidad de que la cubierta se sumerja en la superficie del mar. Luego, las ecuaciones 4 y 5 se transforman en

$$\omega_e = \omega_0 + kV \quad \eta_{proa}(t) = a \sin[kL/2 + \omega_e t]. \quad (6)$$

Al igual que la ecuación 6, las características asociadas al levantamiento  $z$  y cabeceo  $\theta$  se pueden modelar respecto de la frecuencia de encuentro con las olas (figura 3)

$$z(t) = z_0 \sin(\omega_e t + \gamma) \quad \theta(t) = \theta_0 \sin(\omega_e t + \varphi). \quad (7)$$

Muchas veces resulta conveniente calcular el movimiento relativo de la proa del barco, en función de la elevación de la superficie del mar. A partir de las ecs. 6 y 7 es posible calcular dicha medida

$$w(t) = -z(t) + x_{proa}(t) - \eta_{proa}(t). \quad (8)$$

La estructura modular del modelo matemático propuesto, permite incorporar nuevas características y sub-modelos dependiendo de la necesidad de exactitud en la predicción.

### Resultado numéricos

El primer caso de estudio es un análisis predictivo de desplazamiento del barco. Para ello se simuló el modelo completo para  $t \in [0, 500]$ , aplicando los eventos temporales declarados en la tabla 1. En la figura 4 se grafica la posición del barco ( $x, y$ ) en función del tiempo. En dicha figura se puede ver que a medida que se incrementa la velocidad del barco, aumenta la aceleración tangencial.

En el segundo caso de estudio se analizó el movimiento relativo de la proa según las ecuaciones 6, 7 y 8. Los valores iniciales utilizados se presentan en la tabla 2. En la figura 5 se muestra como varían respecto de la frecuencia de encuentro de las olas, un punto definido por  $w$ +francobordo (francobordo es la distancia entre proa y línea de flotación), y la elevación de la superficie  $\eta_{proa}(t)$ . En dicha figura se puede ver que la diferencia mínima entre ambas medidas es de 0.5m, con lo cual la cubierta del barco no llega a sumergirse en el mar.

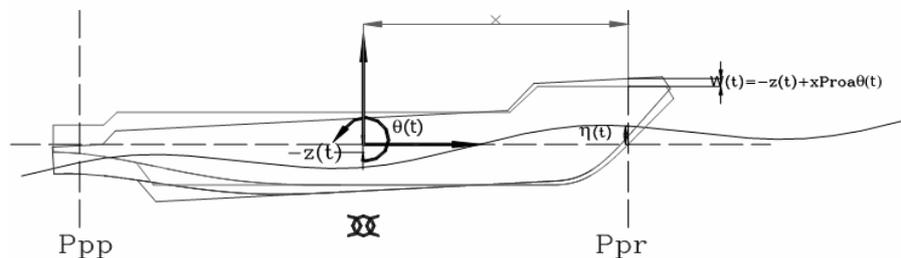


Fig. 3. Movimiento relativo de la proa.

Tiempo	$a_{b,p}$	$\delta_T$
$100*k \leq t \leq 50 + (100*k), k=0,1,2..$	0.005	0.9
otro	0	0

Tabla 1.

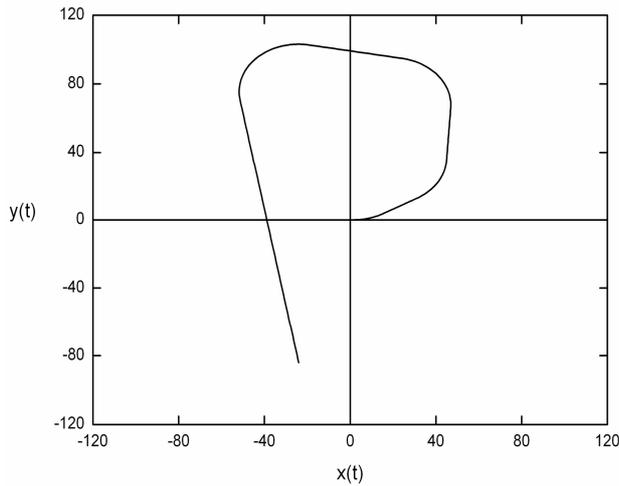


Fig. 4. Posición del barco  $(x,y)$  en función del tiempo.

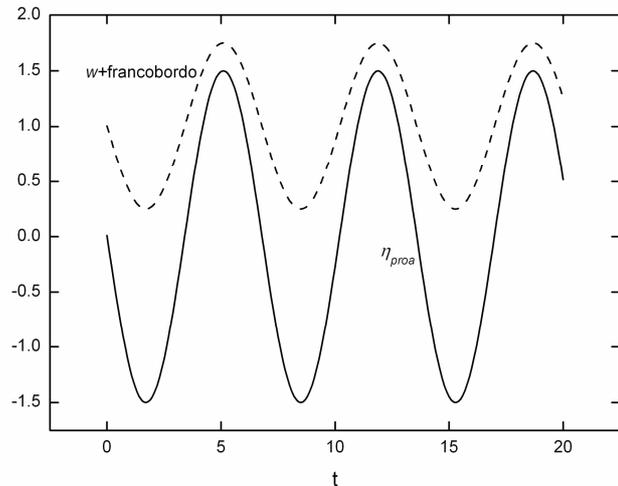


Fig. 5.  $w+\text{francobordo}$  y  $\eta_{\text{proa}}(t)$  respecto de la frecuencia de encuentro de la ola.

Variable/constante	Valor
$\lambda$	30
$k$	$2\pi / \lambda$
$a$	1
$\omega_0$	0.8
$\theta_0$	0.5
$z_0$	0.5
$\varphi$	0
$\gamma$	0

Tabla 2.

## Referencias

1. Sutulo S., Moreira L., Guedes Soares C., 2002. Mathematical models for ship path prediction in manoeuvring simulation systems. *Ocean Engineering* 29, pp 1–19.
2. Chislett, M.S., 1996. A generalised math model for manoeuvring. In: Chislett, M.S. (Ed.), *Marine Simulation and Ship Manoeuvrability*. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 593–606.
3. Crane, C.L., Eda, H. and Landsburg, A., 1989. Controllability. In: Lewis, E.V. (Ed.), *Principles of naval architecture*, vol. 3, Jersey City, SNAME, pp. 191–365.
4. Degre, T., Guedes Soares, C., 1998. Ship's movement prediction in the Maritime Traffic Image Advanced System (MATIAS). In: Sciutto, G., Brebbia, C.A. (Eds.), *Maritime Engineering and Ports*. Computational Mechanics Publications, Southampton, pp. 207–216.
5. Inoue, S., Hirano, M., Kijima, K., Takashina, J., 1981a. A practical calculation method of ship maneuvering motion. *International Shipbuilding Progress* 28 (325), 207–222.
6. Inoue, S., Hirano, M., Kijima, K., 1981b. Hydrodynamic derivatives on ship maneuvering. *Internacional Shipbuilding Progress* 28 (321), 112–125.