

MODELIZACIÓN DE LA DINÁMICA DE UN BUQUE

J. AYZA, J. LÓPEZ, J. QUEVEDO

En este trabajo se han estudiado cinco modelos matemáticos de la dinámica del buque, bajo ciertas condiciones consideradas, se han presentado las expresiones de la fuerza y momento que ejercen las perturbaciones ambientales en el casco del buque, así como el esquema bloque de la máquina del timón.

En el primer modelo en ecuaciones de estado expuesto, intervienen las expresiones de la fuerza y momento exteriores establecidas bajo las condiciones de un mar regular y un viento y una corriente homogéneos y constantes.

El resto de los modelos estudiados contienen un reducido número de parámetros, que pueden ser definidos experimentalmente por medio de técnicas de identificación paramétrica.

Los estudios de simulación realizados constituyen un primer paso en el estudio de la validación y comparación de los modelos de buques planteado y será necesario recoger y analizar un mayor número de pruebas experimentales de diferentes buques para sacar conclusiones definitivas sobre la validación del modelo matemático de un buque, así como del conjunto identificador-modelo para los casos en que se requiere una adaptación continua del modelo a las condiciones de navegación existentes.

1. INTRODUCCION

El conocimiento de la dinámica de respuesta de los buques al actuar sobre la variable de mando (timón) y estar sujetos a perturbaciones exteriores (viento, olas, ...) es fundamental para resolver dos grandes problemas de la navegación marítima que tiene planteados el sector naval: seguridad y economía.

Efectivamente, el conocimiento del modelo matemático de un buque es básico para evaluar su capacidad de maniobrabilidad y para buscar maniobras de evasión en caso de encontrarse en una situación de posible colisión (seguridad), así como también es necesario para el diseño de un óptimo autopiloto que dirija al buque con el rumbo precisado (economía).

En una primera parte de este trabajo se han estudiado varios modelos matemáticos de la dinámica del buque a partir de las leyes dinámicas e hidrodinámicas y bajo ciertas condiciones específicas consideradas. También se han analizado las expresiones matemáticas de la fuerza y el momento que ejercen las condiciones ambientales: viento, olas, corrientes,

sobre el caso del buque y se presenta un modelo matemático simple de la máquina del timón.

En una segunda parte se presentan los resultados de la simulación digital de uno de los modelos matemáticos expuestos con parámetros constantes y conocidos para diferentes condiciones ambientales (olas y viento).

Por último se han simulado algunos de los modelos establecidos, aplicándoles la misma secuencia del timón introducida en una nave de experimentación y se han comparado los resultados obtenidos con cada modelo.

2. DINAMICA DEL BUQUE

2.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES

Un buque puede ser considerado como un sólido rígido con seis coordenadas independientes (Fig. 1) y seis grados de libertad. Si consideramos unos ejes solidarios al buque (x, y, z) y unos ejes solidarios a la tierra

- J. Ayza, J. López, J. Quevedo. Institut de Cibernètica. C.S.I.C.-UPB. ETSEIB. Av. Diagonal 647. Barcelona 28.
- Article rebut el Maig del 1980.

(x_0, y_0, z_0) , el buque puede realizar los siguientes movimientos: rotaciones respecto de los ejes (x, y, z) y desplazamientos sobre los ejes (x_0, y_0, z_0) . En general se considera que los movimientos más importantes de los grandes navíos o buques se producen en el plano horizontal (x_0, y_0) y por tanto, los movimientos de rotación respecto de los ejes (x, y) y desplazamiento en el eje z , se suponen despreciables.

Así el movimiento de un buque puede ser definido por las siguientes variables (Fig. 2):

- (x_0, y_0) posición del barco respecto a la referencia fija con tierra.
- δ es el ángulo que adopta el timón.
- ψ es el ángulo de encabezamiento o rumbo del buque.
- V es la velocidad absoluta del buque, siendo (u, v) sus componentes de la referencia (x, y) .

2.2 ECUACIONES FÍSICAS

Aplicando al buque las leyes de la dinámica de Newton sobre la conservación de la cantidad de movimiento y el momento cinético, suponiendo que las hélices del buque giran a una velocidad constante y que también, la velocidad de avance (u) es aproximadamente constante, se obtienen las expresiones:

$$m \cdot X_G \cdot \ddot{\psi} + m \cdot \dot{v} + m \cdot \dot{\psi} \cdot u = F_y \tag{1}$$

$$\ddot{\psi} \cdot I_{ZZ} + m \cdot X_G \cdot (\dot{v} + \dot{\psi} \cdot u) = M_z$$

siendo:

- m la masa del buque,
- X_G la posición en la coordenada X del centro de la masa,
- I_{ZZ} momento de inercia respecto del eje Z ,
- F_y la fuerza exterior ejercida en el eje y del buque, y
- M el momento exterior ejercido respecto del eje Z .

Las fuerzas y momentos que actúan sobre el buque son función de diversas variables:

$$F_y = F(v, \psi, \delta, \dot{v}, \dot{\psi}) \tag{2}$$

$$M_z = M(v, \psi, \delta, \dot{v}, \dot{\psi})$$

estas funciones no siempre dan una solución estacionaria al problema, sin embargo si restringimos el problema a las siguientes condiciones /3/:

- $\delta, \dot{\delta}, V, \dot{\psi}$ son siempre de valor pequeño,
- la profundidad del agua es grande en comparación con el calado del buque,
- no hay objetos ni costa en las cercanías del buque,

podemos aproximar las funciones F_y y M_z por la linealización siguiente:

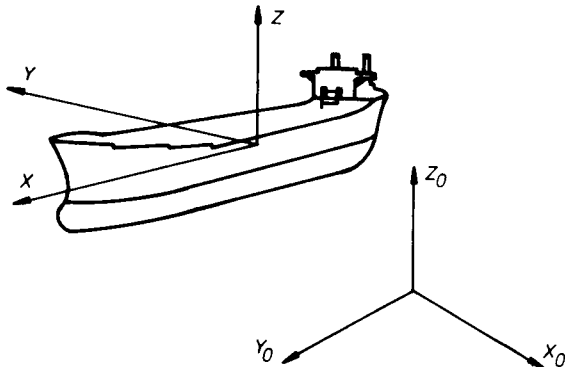


FIG.1 DEFINICIÓN DE LAS COORDENADAS DE UN BUQUE.

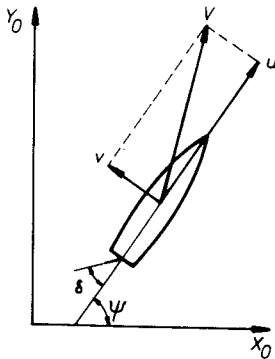


FIG.2 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE UN BUQUE.

$$F_y = v \cdot F_v + \dot{\psi} \cdot F_{\dot{\psi}} + \delta \cdot F_{\delta} + \dot{v} \cdot F_{\dot{v}} + \dot{\psi} \cdot F_{\dot{\psi}} + F_d \quad (3)$$

$$M_z = v \cdot M_v + \dot{\psi} \cdot M_{\dot{\psi}} + \delta \cdot M_{\delta} + \dot{v} \cdot M_{\dot{v}} + \dot{\psi} \cdot M_{\dot{\psi}} + M_d$$

siendo $F_v, \dots, F_{\dot{\psi}}, M_v, \dots, M_{\dot{\psi}}$ las derivadas parciales de F_y y M_z en torno a la solución estacionaria y siendo F_d y M_d las fuerzas y momentos ejercidos por las perturbaciones ambientales (viento, olas y corrientes). Sustituyendo ahora (3) en (1) y puesto en forma matricial se obtiene:

$$\begin{bmatrix} m - F_{\dot{v}} & mX_G - F_{\dot{\psi}} \\ mX_G - M_{\dot{v}} & I_{ZZ} - M_{\dot{\psi}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_v & F_{\dot{\psi}} - m \\ M_v & M_{\dot{\psi}} - mX_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{\delta} \\ M_{\delta} \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} F_d \\ M_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

y multiplicando los dos miembros por la inversa de la matriz del primer miembro, se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{22} \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_d \\ M_d \end{bmatrix} \quad (5)$$

ecuación que expresa la dinámica del barco.

2.3 MODELOS MATEMÁTICOS

Partiendo de (5), podemos obtener directamente el modelo en ecuación de estado siguiente:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v \\ \dot{\psi} \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \dot{\psi} \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{22} \\ 0 \end{bmatrix} \delta +$$

$$+ \begin{bmatrix} c_{12} & c_{22} & 0 \\ c_{21} & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_d \\ M_d \end{bmatrix} \quad (6)$$

modelo que utiliza un vector de estado de tres componentes $(v, \dot{\psi}, \psi)$, una entrada de gobierno δ , y dos entradas de perturbaciones ambientales (F_d, M_d) que son la fuerza y el momento que estas perturbaciones ejercen sobre el caso del buque.

Una variación sobre este modelo (6) en ecuación de estado, es el modelo (7) propuesto por /1/:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v \\ \dot{\psi} \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \dot{\psi} \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{22} \\ 0 \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

este modelo presenta como variación, el considerar las perturbaciones de un viento constante en el tiempo en los parámetros a_{13} y a_{23} y las oscilaciones de éste, en el vector $(e_1, e_2, 0)$, los restantes parámetros son los mismos que en la ecuación (5).

Del sistema de ecuaciones (6) y sin tener en cuenta las perturbaciones ambientales, se puede deducir la función de transferencia que relaciona el rumbo con la entrada del timón en transformación de Laplace (llamado modelo de Nomoto de 3er orden):

$$G_1(s) = \frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K(1+sT_3)}{s(1+sT_1)(1+sT_2)} = \frac{b_1s+b_2}{s^3+a_1s^2+a_2s} \quad (8)$$

siendo:

$$a_1 = -a_{11} - a_{22} \quad b_1 = b_{22}$$

$$a_2 = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \quad b_2 = a_{21}b_{11} - a_{11}b_{22}$$

Este modelo puede ser aproximado por otro de un orden inferior (modelo de Nomoto de 2º orden), de la forma:

$$G_2(s) = \frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K}{s(1+s\tau)} \quad (9)$$

siendo

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 - \tau_3$$

Analogamente de la ecuación (7) podemos obtener un modelo en función de la transferencia de la forma:

$$\frac{\psi(s)}{\delta(s)} = G_1(s) = \frac{b_2 s + b_3}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \quad (10)$$

siendo

$$a_1 = -a_{11} - a_{22} \quad b_2 = b_{21}$$

$$a_2 = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} - a_{23} \quad b_3 = a_{21}b_{11} - a_{11}b_{22}$$

$$a_3 = a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21}$$

siendo en esta ecuación (10), a_2 y a_3 los términos que son afectados por influencia del viento.

2.4 MODELO DE LA MÁQUINA DEL TIMÓN

La máquina que acciona el timón es un servomecanismo de posición angular, cuyo diagrama de bloque aparece en la Fig. 3 y por tanto las ecuaciones que rigen el comportamiento de este sistema son:

$$\frac{d\delta}{dt} = \begin{cases} K(\delta_r - \delta) & |\delta_r - \delta| < \varepsilon_m \\ K\varepsilon_m \operatorname{sign}(\delta_r - \delta) & \text{si } |\delta_r - \delta| \geq \varepsilon_m \end{cases} \quad (11)$$

siendo δ_r el ángulo de consigna del timón, δ ángulo real del timón y K y ε_m constantes que dependen de la máquina del timón.

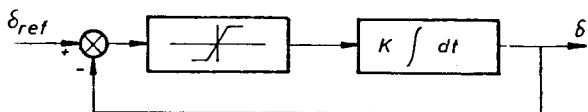


FIG. 3 Diagrama bloque de la máquina del timón

3. MODELIZACION DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES

En el modelo (5) descrito anteriormente, se han definido las entradas de perturbación: F_d y M_d , como las fuerzas y momentos que ejercen las perturbaciones en el casco del buque. A continuación se estudia por separado el efecto de las perturbaciones más importantes: olas, viento, corrientes.

3.1 PERTURBACIONES INTRODUCIDAS POR LAS OLAS

Las olas en la superficie del mar tienen un comportamiento estocástico. Ahora bien, la acción de las olas puede separarse en dos componentes: una la que caracteriza las olas en un mar regular, es decir con una altura, una frecuencia y una dirección de propagación constantes, y la otra componente caracterizada por un mar aleatorio. En este estudio nos hemos centrado en el efecto producido por las olas en un mar regular.

El comportamiento del mar regular puede ser descrito de una forma aproximada, por la ecuación de Laplace para el flujo irrotacional, estando entonces las olas caracterizadas por una función escalar ψ llamada velocidad potencial.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_0^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y_0^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z_0^2} = 0 \quad (12)$$

para unas condiciones de contorno

$$\frac{\partial \psi}{\partial z_0} + \frac{1}{g} \frac{\partial \psi}{\partial t^2} = 0 \quad \text{para } z_0 = 0$$

$g = \text{aceleración de la gravedad}$

a partir del potencial de velocidad, se pueden obtener, la coordenada de superficie u y la coordenada de presión P como

$$u = \frac{-1}{g} \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad \text{para } z_0 = 0$$

$$P = -\rho_w g \left(z_0 + \frac{1}{g} \frac{\partial \psi}{\partial t} \right) \quad (13)$$

donde ρ_w es la masa específica del líquido, siendo:

$$\psi = -\hat{\phi} e^{\chi z_0} \sin\left\{\omega_w t + \theta - \chi(x_0 \cos\mu + y_0 \sin\mu)\right\} \quad (14)$$

donde $\hat{\phi}$, ω_w , μ , θ son constantes arbitrarias siendo además $\hat{\phi}$ y ω_w positivas.

$$\chi = \frac{\omega_w^2}{g}$$

aplicando a (14) las expresiones (13) obtenemos:

$$u = \hat{u} \cos\left\{\omega_w t + \theta - \chi(x_0 \cos\mu + y_0 \sin\mu)\right\} \quad (15)$$

$$P = -\rho_w g(z_0 - e^{\chi z_0} u) \quad \text{siendo } \hat{u} = \frac{\omega_w \hat{\phi}}{g}$$

Estas ecuaciones (15) describen un mar de su superficie y profundidad infinita, con olas senoidales de anchura infinita.

Para hallar la fuerza y el momento que este mar regular ejerce sobre el casco del buque, hay que hacer primeramente unas consideraciones.

- Las fuerzas y momentos son solo resultado de la presión, se desprecia el intercambio de energía cinética entre olas y casco.
- El campo de las olas no queda perturbado por la presencia del buque.
- Se supone el casco del buque aproximado -- por un paralelepípedo de dimensiones $L \times B \times D$, siendo el centro del paralelepípedo el origen de coordenadas fijo respecto del barco.
- Se desprecia la fuerza y el momento que el mar ejerce sobre las caras de proa y popa del paralelepípedo.

Dicho esto y suponiendo la dirección de propagación de las olas, con $\mu=90^\circ$, o sea según la dirección y_0 . Podemos obtener las fuerzas y momentos integrando sobre toda la superficie del casco sumergido, las fuerzas y momentos sobre cada d_s , en la forma:

$$F_w = \int_s P \cdot d_s$$

$$M_w = \int_s x \cdot P \cdot d_s$$

siendo P la presión en el ds y x la distancia del ds al centro sobre el que hallamos los momentos. Efectuando estas integrales -- con la expresión segunda de (15), se obtiene:

$$\begin{aligned} F_w(t) &= -2\hat{P}L \sin\{1/2\chi B \cos\psi(t)\} \cdot \\ &\quad \cdot \frac{\sin\{1/2\chi L \sin\psi(t)\}}{1/2 \chi L \sin \psi(t)} \cdot \\ &\quad \cdot \sin\{\omega_w t - \chi y_0(t)\} \\ M_w(t) &= -\hat{P}L^2 \sin\{1/2\chi B \cos\psi(t)\} \cdot \\ &\quad \cdot \frac{1/2\chi L \sin\psi(t) \cos\{1/2\chi L \sin\psi(t)\} - \sin\{1/2\chi L \sin\psi(t)\}}{1/4 \chi^2 L^2 \sin^2\psi(t)} \cdot \\ &\quad \cdot \cos\{\omega_w t - \chi y_0(t)\} \end{aligned} \quad (16)$$

siendo

$$\hat{P} = -\rho_w g \hat{u} \frac{1 - e^{-\chi D}}{\chi}$$

si se desea hallar los valores medios de F_w y M_w en un período de tiempo T_s , comprendido entre un instante KT_s y un instante $(K+1)T_s$, (siendo K un número entero), tendremos que efectuar los siguientes cálculos:

$$F_w(K) = \frac{1}{T_s} \int_{KT_s}^{(K+1)T_s} F_w(t) dt$$

$$M_w(K) = \frac{1}{T_s} \int_{KT_s}^{(K+1)T_s} M_w(t) dt$$

si en estas expresiones sustituimos (16), se obtiene:

$$\begin{aligned} F_w(K) &= -2\hat{P}L \sin\{1/2\chi B \cos\psi(K)\} \cdot \\ &\quad \cdot \frac{\sin\{1/2\chi L \sin\psi(K)\} \sin\{1/2\omega_w^{\text{ref}}(K)T_s\}}{\{1/2\chi L \sin\psi(K)\} \{1/2\omega_w^{\text{ref}}(K)T_s\}} \cdot \\ &\quad \cdot \sin\{\psi(K) + \frac{1}{2}\omega_w^{\text{ref}}(K)T_s\} \\ M_w(K) &= -\hat{P}L^2 \sin\{1/2\chi B \cos\psi(K)\} \cdot \\ &\quad \cdot \frac{1/2\chi L \sin\psi(K) \cos\{1/2\chi L \sin\psi(K)\} - \sin\{1/2\chi L \sin\psi(K)\}}{1/4 \chi^2 L^2 \sin^2\psi(K)} \cdot \end{aligned} \quad (17)$$

$$\cdot \frac{\sin\{1/2\omega_w^{\text{ref}}(K) T_s\}}{1/2\omega_w^{\text{ref}}(K) T_s} \cdot \cos\{\Psi(K) + \frac{1}{2}\omega_w^{\text{ref}}(K) T_s\}$$

siendo

$$\omega_w^{\text{ref}}(K) = \omega_w - \chi u \sin \Psi(K) - \chi v(K) \cos \Psi(K)$$

$$\Psi(K) = K_w T - \chi y_0(K)$$

estas ecuaciones (16) y (17) proporcionan para cada instante de tiempo t (16) o para cada instante de muestreo K (17) el valor de la fuerza y el momento que sobre el casco -- del buque ejercen las olas.

Estas fuerzas y momentos dependen de las dimensiones del buque (L, B, D), del estado -- del mar ($\omega_w, \chi, \hat{u}$), del estado del buque -- (Ψ, y_0, v, u) y del instante de tiempo t o de muestreo K según utilicemos (16) o (17).

3.2 PERTURBACIONES INTRODUCIDAS POR EL VIENTO

El viento que actúa sobre un buque, puede -- ser considerado como la superposición de dos componentes. Una primera componente llamada viento medio, que consiste en una corriente de aire homogénea y horizontal y de posición constante en el tiempo. La segunda componente llamada turbulencia consiste en una fluctuación estocástica. Las fuerzas ejercidas -- por el viento medio son de mayor magnitud -- que las de la turbulencia, por lo que solo -- se exponen a continuación las fuerzas y momentos del primer efecto.

Así la fuerza y el momento que el viento medio ejerce sobre el casco puede ser aproximado por las siguientes expresiones:

$$F_v = C_F \cdot \sin \mu_a \cdot q \cdot A_L$$

$$M_v = C_M \cdot \sin 2\mu_a \cdot q \cdot A_L \cdot L_{oa}$$

siendo μ_a dirección de la velocidad del viento medio con respecto al eje x negativo del buque; q es la presión del viento sobre el -- buque, siendo igual a:

$$q = \frac{1}{2} \rho_a v_{\text{viento}}$$

donde ρ_a es la densidad del aire y v_{viento} -- su velocidad, A_L es el área sobre la línea de agua de la proyección del barco en el plano (x, y) , L_{oa} es la eslora del buque y C_F y C_M son dos constantes negativas que dependen de la estructura del buque.

3.3 PERTURBACIONES PRODUCIDAS POR LAS CORRIENTES

Las corrientes que actúan sobre un barco, -- pueden considerarse en general constantes y homogéneas. Por otra parte las fuerzas y momentos F_y y M_z solo dependen del movimiento -- del buque relativo al agua. Luego en el caso de que actúe una corriente en el buque deben considerarse las variables dv/dt , v , Ψ , $d\Psi/dt$ respecto del movimiento relativo buque-agua.

Así para una corriente homogénea y constante, las variables Ψ y $d\Psi/dt$ no están afectadas y en cambio la velocidad lateral v debe reemplazarse por $v - v_{\text{corriente}}$ y para $dv_{\text{corriente}}/dt$ tenemos que:

$$\frac{dv_{\text{corriente}}}{dt} = -\dot{\Psi} \cdot u_{\text{corriente}} \approx 0 \quad (18)$$

donde $u_{\text{corriente}}$ y $v_{\text{corriente}}$ son las componentes en los ejes (x, y) respectivamente, -- del vector corriente.

Aplicando estos resultados en las expresiones de F_y y M_z , se obtiene:

$$\begin{aligned} F_{y\text{total}} &= F_v \frac{dv}{dt} + F_v v + F_{\Psi} \frac{d\Psi}{dt} + \\ &+ F_{\Psi} \frac{d\Psi}{dt} + F_{\delta} \delta - F_v v_{\text{corriente}} + \\ &+ F_{\text{olas}} + F_{\text{viento}} \\ M_{z\text{total}} &= M_v \frac{dv}{dt} + M_v v + M_{\Psi} \frac{d\Psi}{dt} + M_{\Psi} \frac{d\Psi}{dt} + \\ &+ M_{\delta} \delta - M_v v_{\text{corriente}} + \\ &+ M_{\text{olas}} + M_{\text{viento}} \end{aligned} \quad (19)$$

luego la influencia de la corriente, es:

$$F_{\text{corriente}} = -F_v \cdot v_{\text{corriente}}$$

$$M_{\text{corriente}} = -M_v \cdot v_{\text{corriente}}$$

4. MODELO DE CAJA NEGRA

Un último modelo que se utiliza muy a menudo, actualmente, es el denominado caja negra que engloba la dinámica del buque, la respuesta de la máquina del timón y el efecto de las perturbaciones ambientales en el buque y es representado por una ecuación discreta y estocástica llamada ARMA (Auto Regressive Moving Average), cuyos parámetros y orden del modelo deben ser identificados a partir de los resultados experimentales.

La expresión de la ecuación discreta estocástica es:

$$A(q^{-1}) y(t) = q^{-k} B(q^{-1}) u(t) + \lambda C(q^{-1}) e(t) \quad (20)$$

donde la variable q significa el operador -- desplazamiento:

$$q \cdot x(t) = x(t+1)$$

$A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ y $C(q^{-1})$ son polinomios de orden n :

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}$$

$$B(q^{-1}) = b_1 q^{-1} + \dots + b_n q^{-n}$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_n q^{-n}$$

La variable de salida $y(t)$ representa el ángulo de encabezamiento, la entrada $u(t)$ el ángulo de la consigna del timón y $e(t)$ es una secuencia independiente de variables aleatorias de distribución normal $[0,1]$. El parámetro λ depende del nivel de perturbación externo existente y el parámetro k es un número entero múltiplo del intervalo de muestreo que representa el retardo puro creado por la inercia de la máquina del timón.

5. ESTUDIOS DE SIMULACION

Este estudio abarca la simulación de buques por medio de los diferentes modelos expuestos anteriormente. La simulación se ha llevado a cabo en el PACER 100 del Instituto de Cibernética a través del programa SIM-1 /4/.

Dicho programa discretiza los modelos continuos suponiendo que las entradas (ángulo de timón, fuerza y momentos ejercidos por las perturbaciones ambientales) son constantes entre dos instantes cualesquiera de muestreo.

5.1 SIMULACIÓN DEL MODELO DE ZUIDWEG CON DIFERENTES PERTURBACIONES AMBIENTALES

En una primera fase, se ha simulado un buque, representado por el modelo en ecuación de estado (6) con diferentes perturbaciones ambientales.

Las características del buque estudiado /3/, son: eslora 160 mts., manga 22,9 mts., calado 9,1 mts., velocidad de avance $u=7,81$ mts/seg. El período de muestreo adoptado es de 5,65 segundos y la prueba en simulación ha durado 100 períodos de muestreo.

Las constantes hidrodinámicas son:

$m - F_v = .4824 \text{ E } 8$	$F_{\psi} - m = -.1251 \text{ E } 9$
$mX_G - F_{\psi} = .1314 \text{ E } 9$	$M_v = -.9380 \text{ E } 8$
$mX_G - M_v = .1618 \text{ E } 9$	$M_r - mX_G = -.8952 \text{ E } 7$
$I_z - M_{\psi} = .6471 \text{ E } 11$	$F_{\delta} = -.1695 \text{ E } 7$
$F_v = -.2283 \text{ E } 7$	$M_{\delta} = .1350 \text{ E } 9$

Los casos que se han estudiado en simulación, son:

- 1°.- Modelo sin perturbaciones.
- 2°.- Modelo sin viento y con olas de 1,5 mts. y una dirección de propagación de 90°.
- 3°.- Modelo sin olas y con viento de 13 mts/seg. y una dirección de 45°.
- 4°.- Modelo con olas (1,5 mts., 90°) y con viento (13 mts/seg., 45°).

La Fig. 4 muestra la posición y rumbo obtenidos en estos cuatro casos, aplicándoles la misma secuencia de gobierno del timón (δ) en 100 períodos de muestreo.

Como puede observarse (fig. 4) en el segundo y tercer caso, la tendencia del buque es a colocarse bajo un ángulo de mínimo momento, que se consigue a 0° cuando solo actúan las olas y a 45° cuando solo actúa el viento, situándose con una dirección intermedia cuando se combinan las dos perturbaciones (cuarto caso).

5.2 VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE DIVERSOS MODELOS DEL ATLANTIC SONG

En una segunda parte, se ha simulado el comportamiento de la nave Atlantic Song /1/ a partir de 4 modelos (Nomoto de 2° y 3° orden, A.R.M.A. de 2° y 3° orden), cuyos parámetros han sido identificados experimentalmente por los autores de la referencia citada.

El ensayo consiste en el implementar estos cuatro modelos, aplicándoles la misma secuencia de entrada del timón que se introdujo en la nave y evaluar la aproximación de cada modelo a la respuesta real del Atlantic Song -

mediante un análisis de la varianza del error del rumbo.

El Atlantic Song es un buque de 197 metros - de eslora, 1500 toneladas de peso, la velocidad de avance en la prueba ha sido de 18,5 nudos, las olas tenían una altura de 4 metros, el viento una velocidad de 17:20 mts., el período de muestreo adoptado es de 15 seg. y la prueba dura 60 períodos. Los parámetros de los modelos son:

NOMOTO ORDEN 2

$$k = 0.055 \qquad T = 29,4$$

NOMOTO ORDEN 3

$$k = 0.115 \qquad T_1 = 172,3 \qquad T_2 = 22.9$$

$$T_3 = 95.5$$

ARMA ORDEN 2

$$a_1 = -1.60 \qquad a_2 = 0.61$$

$$b_1 = -0.161 \qquad b_2 = 0.285$$

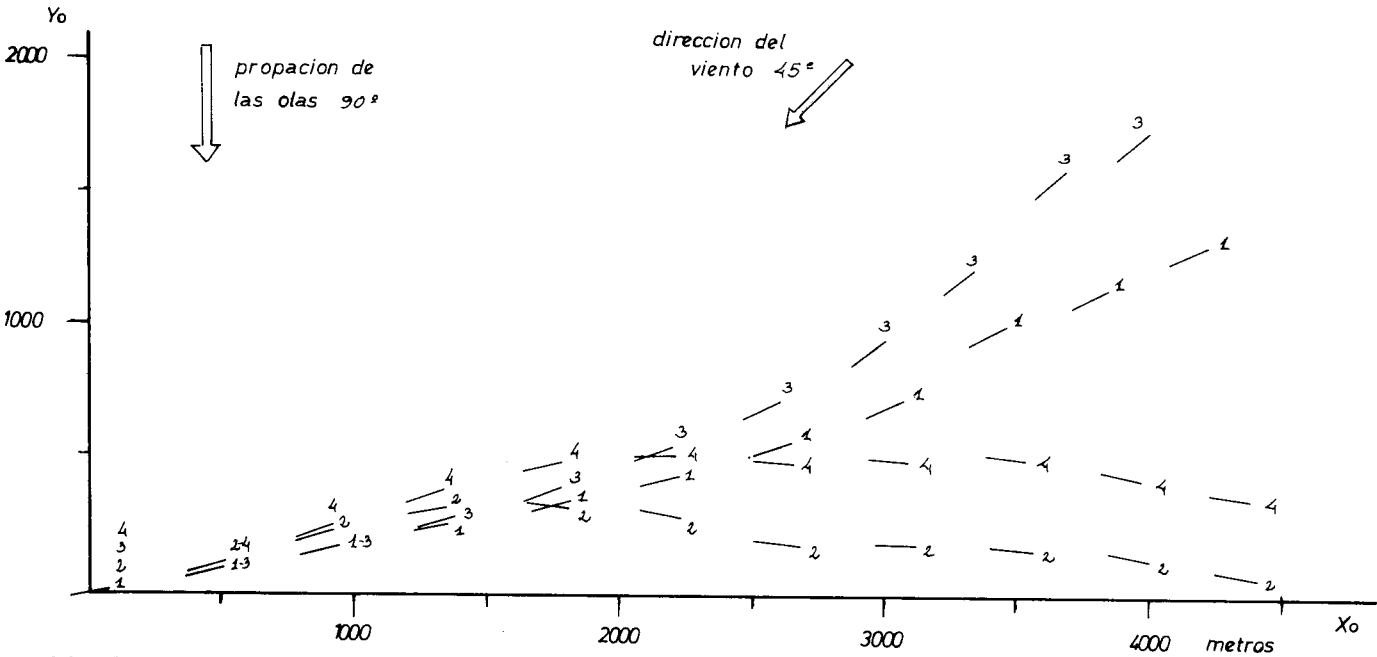


FIG.4 Trayectorias seguidas por un buque frente a distintas perturbaciones ambientales.

La simulacion se realiza por un modelo en ecuacion de estado .

velocidad de avance 7.81 m/s

ruta	altura ola	velocidad viento
1	0 m	0 m/s
2	1,5 m	0 m/s
3	0 m	13 m/s
4	1,5 m	13 m/s

$$c_1 = -0.37 \quad c_2 = -0.20$$

$$\lambda = 0,43$$

ARMA ORDEN 3

$$a_1 = -1.05 \quad a_2 = -0.34 \quad a_3 = 0.41$$

$$b_1 = -0.15 \quad b_2 = -0.38 \quad b_3 = -0.13$$

$$c_1 = 0.18 \quad c_2 = -0.18 \quad c_3 = 0$$

$$\lambda = 0,43$$

La Fig. 5 ilustra los resultados obtenidos - con los 4 modelos y el rumbo real del Atlantic Song y la Tabla I representa la varianza de la señal de error acumulada.

Si se observa esta tabla, el modelo que proporciona mejor aproximación al comportamiento real del buque es el modelo ARMA de 3° orden, seguido muy de cerca por el modelo ARMA de 2° orden. Mientras que el modelo NOMOTO -

de 2° orden empieza dando buenas aproximaciones, pero debido a las perturbaciones exteriores que no considera, la varianza del error aumenta, menos que en el modelo NOMOTO de 3° orden, pero poseyendo una mayor tendencia a crecer que el NOMOTO de orden superior.

6. CONCLUSIONES

Del conjunto de modelos analizados, hay dos grupos bien diferenciados:

- Uno de ellos es el formado por modelos obtenidos a partir de ecuaciones físicas considerando más o menos restricciones; el valor de los parámetros que intervienen es función de las características del buque - (relativamente constantes) y del valor de una serie de mediciones instantáneas (oleaje, viento, etc.). En los modelos más sim-

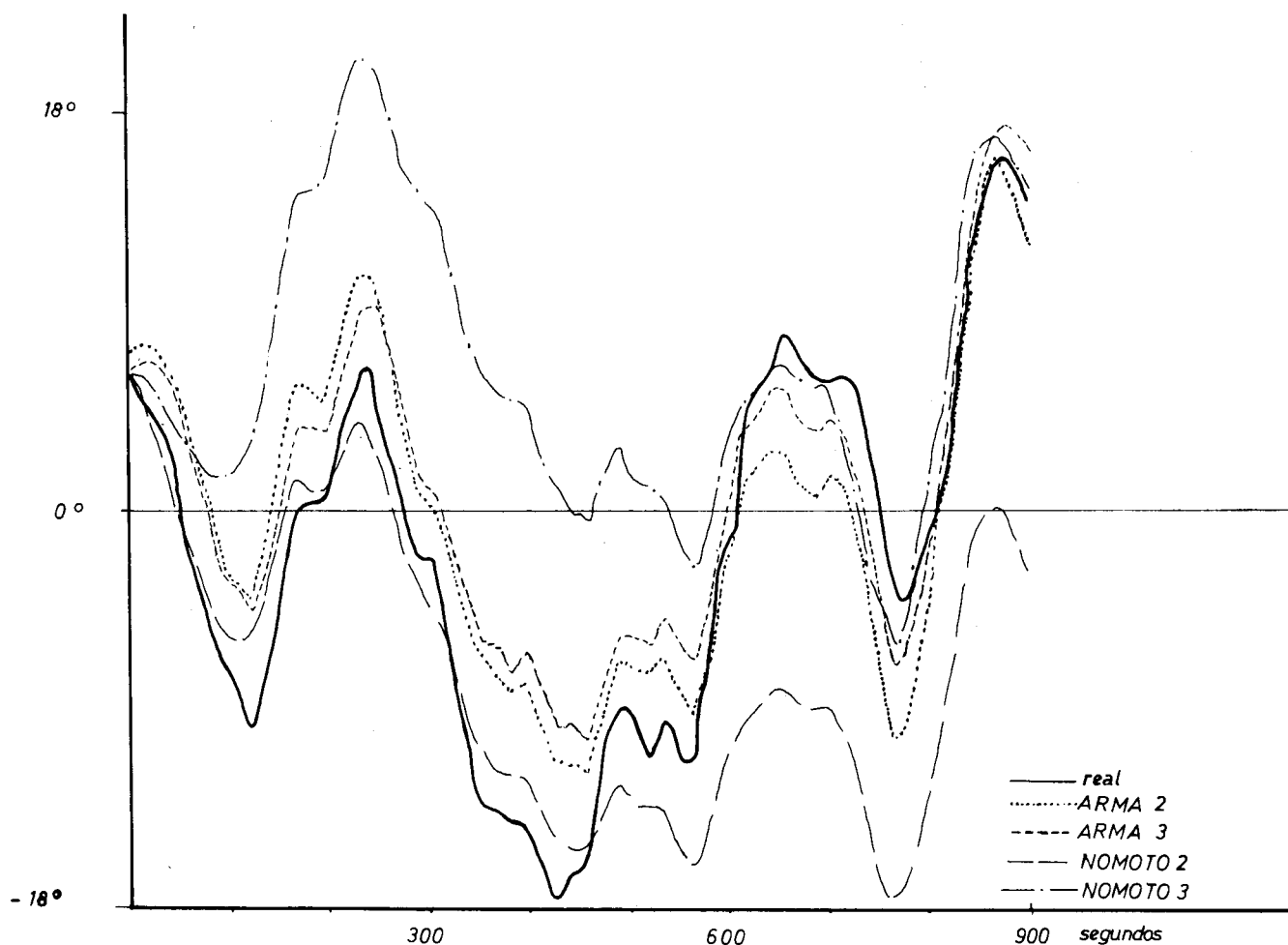


FIG 5 Comparación de modelos respecto del rumbo seguido por la nave Atlantic Song.

Tabla I.
Varianza de la señal de error acumulada

HASTA EL PERIODO	NOMOTO ORDEN 2	NOMOTO ORDEN 3	ARMA ORDEN 2	ARMA ORDEN 3
9	4.06	45.25	19.48	18.11
19	3.94	142.6	21.82	18.01
29	3.65	190.2	26.04	27.52
39	9.26	162.9	21.53	25.36
49	55.2	132.8	22.89	22.00
59	80.5	111.9	20.93	19.47

plificados se precinde de las mediciones y el modelo es constante, pero su comporta-- miento no es satisfactorio para condicio-- nes de navegación que se aparten de los su puestos considerados. Los modelos más complejos tienen un comportamiento más satis-- factorio pero precisan de mediciones conti-- nuas y son difíciles de implementar por su complejidad, en cualquier caso son válidos siempre que las condiciones de navegación se adapten a las hipótesis implícitas en - la obtención del modelo.

- El otro grupo es el constituido por mode-- los tipo "Caja Negra", este tipo de mode-- los precisa de una identificación continua de sus parámetros pero tienen una estructu-- ra simple, de fácil implementación, y son prácticamente válidos para cualquier condi-- ción de navegación puesto que la identifi-- cación continua los convierte en adaptati-- vos.

Como resumen de estos comentarios diremos -- que en aquellos casos en que se precise una implementación fácil y simple utilizaremos - modelos tipo NOMOTO (primer grupo); por el - contrario, si lo que se precisa es un modelo versátil, igualmente válido para múlti-- ples - condiciones de navegación utilizaremos un mo-- delo de "caja negra".

7. BIBLIOGRAFIA

/1/ ASTROM, K.J., KALLSTROM, C.G. "Identifi-- cation of Ship Steering Dynamics". Auto-- mática, vol. 12, 1976, págs. 9-22.

/2/ TIANO, A.: "Aplicazione de techniche di identificazione alla determinazione de-- lla dinamica della nave". Collana di Au-- tomatica, Identificazione dei sistemi -- stocastici CNR. Roma.

/3/ ZUIDWEG, J.K.: "Automatic Guidance of -- Ship's as a control Problem". Tesis Doc-- toral. Delft (Holanda), 1970.

/4/ LOPEZ, J.: "Comparación de diferentes mo-- delos matemáticos de buques". Proyecto - fin de Carrera. E.T.S.E.I.B., Barcelona, 1980.

/5/ AYZA, J., BASAÑEZ, L., QUEVEDO, J., CUNE-- RO, J., TIANO, A.: "Modal Control Approach to Ship's Autopilot Design". Simposio -- 'On the Ship Steering Automatic Control'. Genova, Junio 1980.