

**XIX Jornadas de Automática  
16-18 septiembre 1998  
Madrid, España  
Comité Español de Automática de la IFAC**

**IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK DE LOS MODELOS IDENTIFICADOS DE  
LA DINAMICA VERTICAL DE UN BUQUE DE ALTA VELOCIDAD**

**J.M. de la Cruz, J. Aranda, P. Ruipérez, J.M. Díaz**

**pp.:251-255**

# IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK DE LOS MODELOS IDENTIFICADOS DE LA DINÁMICA VERTICAL DE UN BUQUE DE ALTA VELOCIDAD

J. Aranda, J.M. Díaz, P. Ruipérez  
 Dept. de Informática y Automática. UNED. Madrid. Spain.  
 e-mail:jaranda@dia.uned.es

J.M. de la Cruz<sup>1</sup>  
 Dept. de Arquitectura de ordenadores y Automática. U. Complutense. Madrid. Spain.

A. Marón<sup>3</sup>  
 Canal de Experiencias Hidrodinámicas de el Pardo (CEHIPAR). El Pardo. Spain.

*En este trabajo se presenta la identificación de los modelos de la dinámica vertical de un buque de alta velocidad para distintas velocidades y condiciones del mar. Se desarrollan las ecuaciones que describen dicha dinámica y se obtienen las funciones de transferencia correspondiente, haciéndose un estudio de los modelos obtenidos, viéndose como varían los polos de los mismos a cambios en la velocidad y condiciones del mar. Por último se desarrolla un modelo "Simulink" para estos modelos.*

## 1.-Introducción.-

Las características más importantes que se exigen a los barcos de alta velocidad es la de proporcionar confort a los pasajeros, mejorar las condiciones de trabajo de la tripulación y presentar elevados niveles de seguridad. En los barcos de alta velocidad el efecto del cabeceo es una de las principales causas de que no se cumplan estas características. Para conseguir reducir estos efectos a los niveles adecuados de confortabilidad y seguridad es necesario diseñar controles adecuados de pitch. Previo a ello se requiere disponer de un modelo adecuado del movimiento longitudinal que permita el diseño y evaluación de los controladores.

Un modelo considerando los 6 grados de libertad se puede encontrar en Fossen(1994) y en Fossen y Fjellstad(1995), en Lewis(1989) también hay una descripción de la respuesta del barco sometido a olas regulares.

En este artículo se presenta la identificación de un modelo de la dinámica longitudinal (pitch y heave) de un barco de alta velocidad mediante ensayos de comportamiento en la mar efectuados con un modelo a escala en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas (CEHIPAR) sometido a olas irregulares, y la implementación de estos modelos en Simulink.

## 2.-Ecuaciones lineales del movimiento vertical.

Como se puede ver en Lewis (1989) ,como consecuencia de utilizar teoría lineal y de la existencia en el barco de simetría babor/estribor, es posible la separación de la respuesta del barco en dos planos de movimiento: vertical y

horizontal. No existe ningún tipo de acoplo entre ambos.

Las ecuaciones lineales de los movimientos de pitch y heave son (ver Lewis 1989):

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{z} - \Delta x_G \ddot{\theta} &= -[A_{33} \ddot{z} + B_{33} \dot{z} + C_{33} z + A_{35} \ddot{\theta} + B_{35} \dot{\theta} + C_{35} \theta] + F_{ex_z} \\ I_{yy} \ddot{\theta} - \Delta x_G \ddot{z} &= -[A_{53} \ddot{z} + B_{53} \dot{z} + C_{53} z + A_{55} \ddot{\theta} + B_{55} \dot{\theta} + C_{55} \theta] + M_{ex} \end{aligned}$$

donde:

$\Delta$  es la masa total del barco.

$Z$  es el desplazamiento de heave.

$(x_G, 0, z_G)$  son las coordenadas del centro de gravedad del barco.

$\theta$  es el desplazamiento de pitch.

$A_{jk}$  masa añadida conjunta.( los subindices j,k indican modos)

$B_{jk}$  .amortiguamiento conjunto.

$C_{jk}$  restauración conjunta.

$I_{yy}$  momento de inercia alrededor del eje-y

$F_{ex_z}$  fuerzas de extinción debido a las olas.

$M_{ex}$  momento de extinción debido a las olas.

De aquí, se puede obtener:

$$\begin{aligned} (\Delta + A_{33}) \ddot{z} + (A_{35} - \Delta x_G) \ddot{\theta} &= -[B_{33} \dot{z} + C_{33} z + B_{35} \dot{\theta} + C_{35} \theta] + F_{ex_z} \\ (A_{53} - \Delta x_G) \ddot{z} + (I_{yy} + A_{55}) \ddot{\theta} &= -[B_{53} \dot{\theta} + C_{53} z + B_{55} \dot{\theta} + C_{55} \theta] + M_{ex} \end{aligned}$$

Aplicando transformadas de Laplace a las ecuaciones anteriores y una aproximación de segundo orden para las fuerzas y los momentos, se llega a la función de transferencia siguiente, donde  $u$  es la elevación de la ola:

$$z(s) = \frac{H_{22}(s)F(s) - H_{12}(s)M(s)}{H_{11}(s)H_{22}(s) - H_{21}(s)H_{12}(s)}u(s) \quad (1)$$

$$\theta(s) = \frac{H_{11}(s)M(s) - H_{21}(s)F(s)}{H_{11}(s)H_{22}(s) - H_{21}(s)H_{12}(s)}u(s) \quad (2)$$

donde:

$$H_{11}(s) = (\Delta + A_{35})s^2 + B_{33}s + C_{33}$$

$$H_{12}(s) = (A_{35} - \Delta x_G)s^2 + B_{35}s + C_{35}$$

$$H_{21}(s) = (A_{534} - \Delta x_G)s^2 + B_{53}s + C_{53}$$

$$H_{22}(s) = (I_{yy} + A_{55})s^2 + B_{55}s + C_{55}$$

$$F(s) = f_1s^2 + f_2s + f_3$$

$$M(s) = m_1s^2 + m_2s + m_3$$

### 3.-Ensayos con la maqueta a escala del barco.

Los ensayos con la maqueta a escala del barco fueron realizadas en el estanque preparado para tal efecto en el CEHIPAR. La maqueta podía moverse libremente en las direcciones de pitch y de heave. El estado de la mar (SSN), de acuerdo a STANAG 4194 (Standardized Wave and Wind Environments and Shipboard Reporting of Sea Conditions), fue 4, 5 and 6. El espectro de las olas fue del tipo JONSWAP (ver Figure 1).

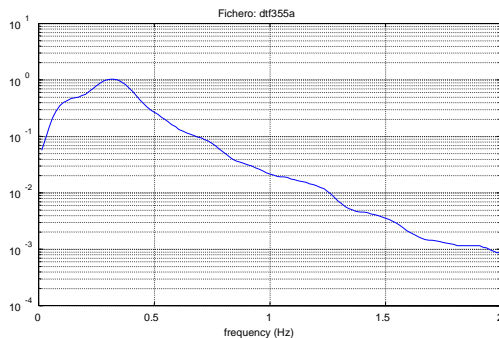


Figura 1: Espectro de las olas medido a 35 nudos y estado de la mar 5.

La altura de las olas fue medida a 3.8 m por delante de la proa de la maqueta (Esto es equivalente a 95 m en escala real). Este punto de medida introduce un retardo de fase en las series temporales registradas para cada componente en frecuencia. El retardo de fase para cada componente en frecuencia es  $kx$ , donde  $k$  es el número de onda ( $k = \omega^2/g$ ), y  $x$  es la distancia medida desde la proa del barco al sensor,  $\omega$  es la frecuencia de la componente de la ola,  $g$  es la aceleración de la gravedad. El retardo de fase es proporcional a  $\omega^2$ . Es posible realizar una aproximación racional para describir tal retardo, la distribución de polos y de ceros sería similar a la mostrada en la Figura 2.

Además, se realizaron ensayos para diferentes velocidades del barco y direcciones de las olas.

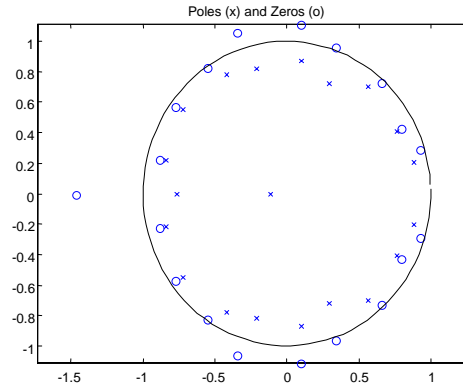


Figura 2: Distribución de ceros y polos para olas con retardo de fase.

### 4.-Proceso de identificación.

En esta sección se realiza la identificación de las dinámicas de pitch y de heave de acuerdo a los modelos matemáticos propuestos en la sección 2. En estos modelos se utiliza la aproximación para el retardo de fase de la sección 3.

Se utilizan para la identificación modelos ARX:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - n_k) + e(t)$$

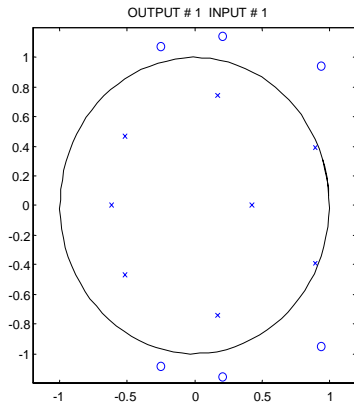
donde  $n_k$  es el retardo temporal,  $q$  es el operador desplazamiento,  $A(q)$  y  $B(q)$  son polinomios en  $q$ .

La estructura del modelo se selecciona utilizando el criterio de Akaike. En la tabla 1 se muestra el orden de los modelos para velocidades de 30, 35 y 40 nudos y estado de la mar 4.

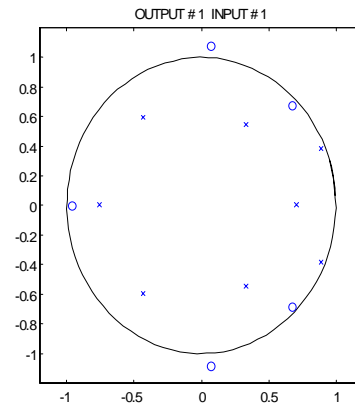
	Velocidad (nudos)		
	30	35	40
	$(n_a, n_b, n_k)$	$(n_a, n_b, n_k)$	$(n_a, n_b, n_k)$
Pitch	(8,7,10)	(8,7,9)	(8,7,10)
Heave	(8,7,6)	(8,7,7)	(8,7,7)

Tabla 1: Estructura de los modelos para las dinámicas de pitch y de heave ( $n_a$ : orden de  $A(q)$ ,  $n_b$ : orden de  $B(q)$ ,  $n_k$ : retardo)

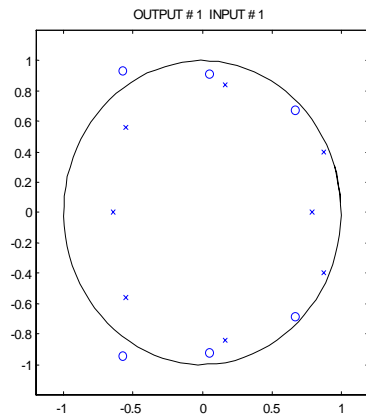
En las Figuras 3 y 4 se representan los diagramas de polos y de ceros para los modelos de pitch y de heave obtenidos a distintas velocidades del buque y estado de la mar 4.



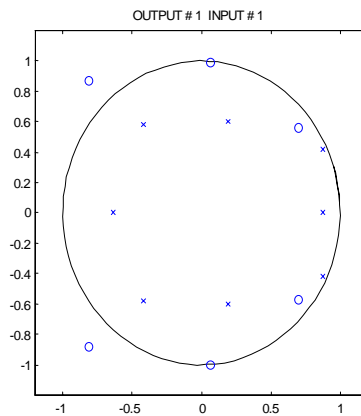
(a)30 nudos



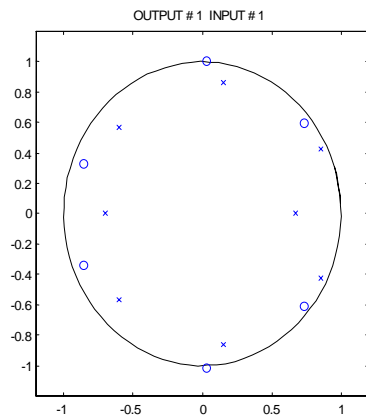
(a)30 nudos



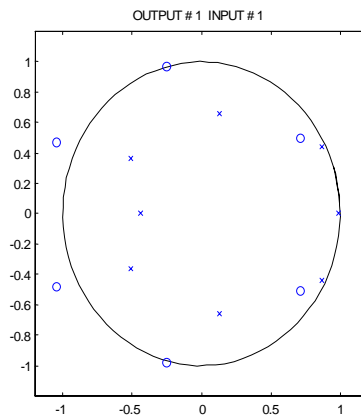
(b)35 nudos



(b)35 nudos



(c)40 nudos



(c)40 nudos

Figura 3:Polos y ceros para modelos del pitch para estado de la mar 4.

Figura 4:Polos y ceros para modelos del heave para estado de la mar 4.

En la Figura 5 se muestra la autocorrelación de los residuos para los modelos (8,7,10) del pitch y (8,7,6) del heave.

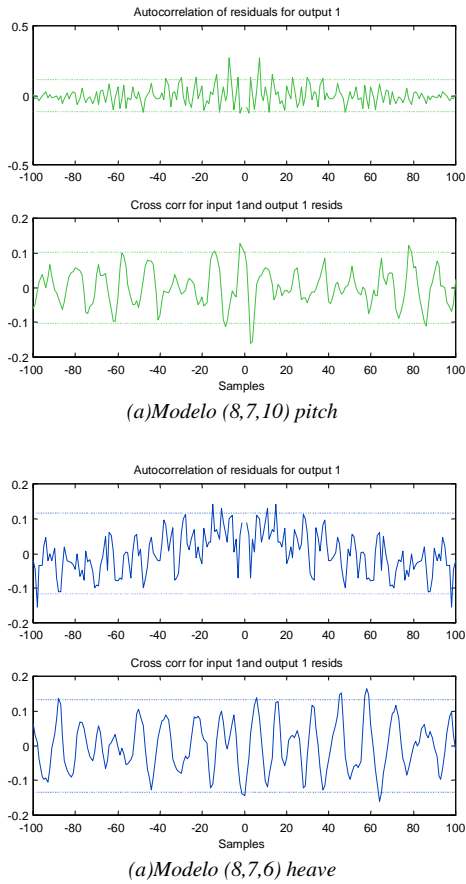


Figura 5: Autocorrelación de los residuos.

En la Tabla 3 se muestran los errores cuadráticos medios obtenidos.

Estado de la mar	Velocidad	Modelos	Error cuadrático medio <sup>(c)</sup>
4	30	(8,7,10)P	0.10636
		(8,7,6)H	0.02508
	35	(8,7,9)P	0.09407
		(8,7,7)H	0.03360
	40	(8,7,10)P	0.08798
		(8,7,7)H	0.06379
5	30	(10,10,10)P	0.20232
		(10,10,5)H	0.07788
	35	(10,10,8)P	0.21373
		(10,10,65)H	0.07335
	40	(10,10,9)P	0.17862
		(10,10,7)H	0.08950
6	30	(10,10,8)P	0.59073
		(10,10,10)H	0.22114
	35	(10,9,7)P	0.61229
		(10,10,10)h	0.26689

(c) Las unidades del error cuadrático medio son de  $m^2$  para el PITCH y de  $(^\circ)^2$  para el HEAVE

Tabla 5: Errores cuadráticos medios para diferentes modelos.

Se están considerando modelos cuyos parámetros son función de la velocidad del barco y del estado de la mar. En la Figura 6 se muestra como los polos y los ceros dependen de la velocidad del buque. También se observa un comportamiento similar con el estado de la mar.

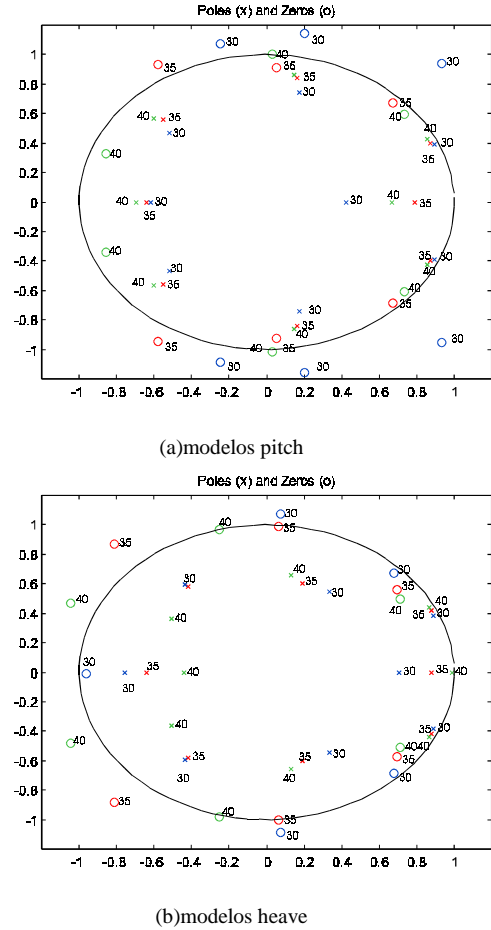


Figura 6: Polos y ceros en función de la velocidad del buque

Para estos modelos se puede obtener una representación en variables de estado de acuerdo con la sección 2. Se puede ver el acoplo entre el pitch y el heave.

## 6.- Modelo Simulink.-

En la figura 7 se muestran los bloques que componen el modelo simulink implementado para simular las dinámicas de PITCH y de HEAVE dados el estado de la mar (SSN) y la velocidad del buque.

El modelo simulink consta como componentes más relevantes de dos bloques que contienen funciones-S: **sfoleaje** y **sfbarco**.

La función **Sfoleaje.m** selecciona series temporales de altura de olas. En esta primera versión se utilizan las series temporales proporcionados por el CEHIPAR, en concreto se

utilizan 501 muestras para cada serie. Estas series temporales se encuentran almacenadas en la variable **matriz** dentro del fichero **datos.mat**.

Únicamente requiere como parámetros de entrada la velocidad del buque y el estado de la mar.

**Sfbarco.m** esta función S selecciona un modelo lineal discreto de los mostrados en la sección 1, únicamente requiere como parámetros de entrada la velocidad del buque y el estado de la mar.

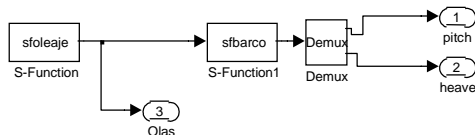


Figura 7: Modelo Simulink utilizado para la simulación de las dinámicas verticales

## 5.-Conclusiones.-

Se han utilizado técnicas de identificación con el fin de obtener un modelo matemático de la dinámica vertical de un barco. Una colección de ensayos fueron realizados utilizando olas irregulares en un estanque de pruebas. Los datos recogidos se utilizaron para ajustar los parámetros de los diferentes modelos ARX para las dinámicas de pitch y de heave. A partir de los modelos identificados se ha construido un modelo en Simulink donde se incluyen cada uno de los modelos lineales para las diferentes velocidades y estados de la mar e analizados.

## Agradecimientos

Esta investigación fue realizada gracias al CICYT bajo contrato TAP97-0607

## Bibliografía

- T.I. Fossen. Guidance and Control of Ocean Vehicles. John Wiley & sons, 1994.
- T.I. Fossen and O.E. Fjellstad. Nonlinear Modelling of Marine Vehicles in 6 Degrees of Freedom. Journal of Mathematical Modelling of Systems, Vol. 1, No. 1, 1995.
- E.V. Lewis (editor). Principles of Naval Architecture. Second Revision. Volume III. Motions in Waves and Controllability. Society of Naval Architects and Marine Engineers. 1989.