

CONTROLADORES CLÁSICOS PARA LA DISMINUCIÓN DE LA ACELERACIÓN VERTICAL DE UN BUQUE DE ALTA VELOCIDAD

Francisco J. Velasco González

Dpto. Tec. Elec., Ing. Sistemas y Automática. Univ. de Cantabria. velascof@unican.es

Eloy López García

Dpto. CC. y TT. de la Navegación, Máq. y Constr. Navales. UPV/EHU. cnplogae@lg.ehu.es

Teresa M. Rueda Rodríguez

Dpto. Tec. Elec., Ing. Sistemas y Automática. Univ. de Cantabria. tere@teisa.unican.es

Emiliano Moyano Pérez

Dpto. Matemática Aplicada y CC. de la Computación. Univ. de Cantabria. moyanoe@unican.es

Laura Bravo Sánchez

Dpto. Matemática Aplicada y CC. de la Computación. Univ. de Cantabria. bravol@unican.es

Niceto Pérez Cagigal

Dpto. Tec. Elec., Ing. Sistemas y Automática. Univ. de Cantabria. niceto@teisa.unican.es

Resumen

Este artículo describe la sintonía de diversas estructuras clásicas de control mediante algoritmos genéticos con el objetivo de reducir la aceleración vertical del buque de alta velocidad TF-120 y así disminuir el índice de mareo de los pasajeros. El objetivo en el diseño de cada controlador es obtener un buen comportamiento para todas las velocidades (20, 30 y 40 nudos) y estado de la mar (4 y 5). La variable controlada es la aceleración vertical medida en la posición del peor pasajero que es también la función de coste a minimizar en el algoritmo genético. Se ha comprobado que varios controladores proporcionan una reducción significativa.

Palabras Clave: Sistemas marinos, control de buques, sistemas de control, buques de alta velocidad, modelos de buques, estabilización "Heave", estabilización "Pitch", algoritmos genéticos.

1 INTRODUCCIÓN

En este artículo se presenta el diseño de diferentes controladores clásicos para la reducción de la aceleración vertical del buque de alta velocidad TF-120 (figura 1). Con dicha reducción se obtiene también una disminución en el índice de mareo con

lo que se consigue aumentar el confort tanto de los pasajeros como de la tripulación del buque.

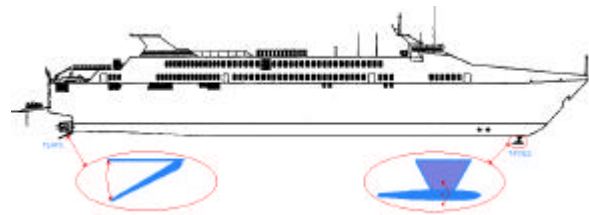


Figura 1: Buque de alta velocidad

La sintonía de los controladores se ha realizado mediante algoritmos genéticos minimizando la aceleración vertical medida en la posición del "peor pasajero". Los resultados se resumen en diversas tablas que indican el valor de los parámetros de los controladores, la reducción de la aceleración vertical y la mejora del índice de mareo. Así mismo se muestran gráficas para el caso con red de primer orden comparando el comportamiento del buque con y sin controlador para el movimiento de los actuadores, la aceleración vertical de "heave" y "pitch", la aceleración vertical medida en la posición del "peor pasajero" y el índice de mareo para las condiciones de velocidad del buque 40 y estado de la mar 4.

2 MODELO MATEMÁTICO

Para controlar el movimiento vertical del buque TF-120 con diferentes controladores clásicos se ha empleado el modelo simulink desarrollado en el proyecto de la CICYT TAP97-0607. El modelo permite sintonizar un único controlador para controlar todas las velocidades del buque (20, 30 y 40 nudos) y los estados de la mar 4 y 5 estudiados.

La dinámica vertical del buque está compuesta por varios modelos lineales continuos SISO que se identificaron a partir de los datos PRECAL [1],[2],[3] corregidos a proa, a las velocidades de 20, 30 y 40 nudos. Estos modelos vienen dados por sendas funciones de transferencia que relacionan la altura de las olas con la fuerza "heave" (w2hf) y el momento "pitch" (w2pm) así como la fuerza "heave" con el movimiento "heave" (hf2h) y el momento "pitch" con el movimiento "pitch" (pm2p).

El sistema cuenta con dos actuadores [6], un T-Foil y un Flap. El modelo de estos actuadores se podría representar por un bloque que tiene como entradas la posición del T-Foil y el Flap, y el "heave" y "pitch", y como salidas la fuerza "heave" y el momento "pitch".

De forma resumida se presenta el modelo del proceso según el diagrama de bloques de la figura 2:

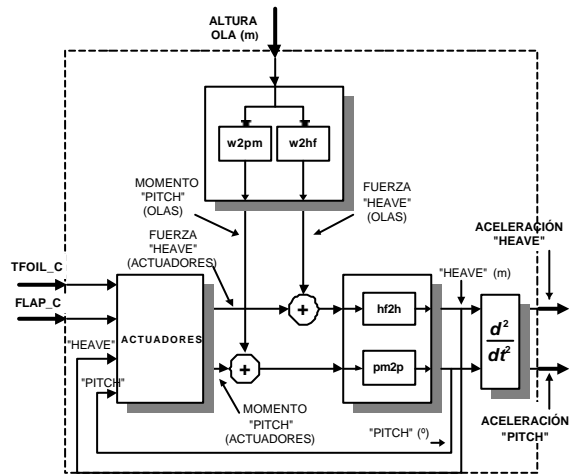


Figura 2: Modelo del proceso

3 ESQUEMA DE CONTROL

3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES

El sistema realimentado incluye el bloque controlador que estará compuesto por dos controladores, el controlador $G_{c(F)}$ actúa sobre el Flap para disminuir la aceleración en la componente

de "heave" y el controlador $G_{c(TF)}$ actúa sobre el T-Foil para disminuir la aceleración en la componente de "pitch". La variable controlada es la aceleración vertical media (WVA) medida a 40 metros a proa del centro de gravedad. En este punto se sitúa uno de los pasajeros de la primera fila, que soporta la mayor aceleración vertical y el mayor índice de mareo. El diagrama de bloques del sistema realimentado se presenta en la figura 3:

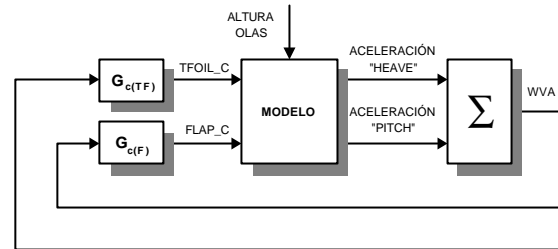


Figura 3: Esquema de control

3.2 ESPECIFICACIONES

El principal objetivo a cumplir en el diseño del controlador [4] es el aumento del confort de los pasajeros. La minimización de la aceleración vertical media que se obtiene a partir de las aceleraciones de "heave" y "pitch" de la forma:

$$acv40(t_i) = a_{vH}(t_i) + a_{vP}(t_i) = \frac{d^2 heave(t_i)}{dt^2} - 40 \frac{p}{180} \frac{d^2 pitch(t_i)}{dt^2} \quad (1)$$

consigue también reducir el índice de mareo ("Motion sickness incidence", MSI) que puede ser cuantificado por la expresión siguiente:

$$MSI = 100 \left(0.5 \pm erf \left(\frac{\pm \log(|\dot{s}_3| / g) \pm m_{MSI}}{0.4} \right) \right) \quad (2)$$

con $|\dot{s}_3|$, aceleración vertical en el punto elegido.

y:

$$m_{MSI} = -0.819 \pm 2.32 (\log_{10} w_e)^2 \quad (3)$$

3.3 CONTROLADORES

Se han implementado los siguientes tipos de controladores clásicos:

PID Mixto:

$$G_c(s) = kp \frac{aTiTd s^2 + [Ti + (a+1)Td]s + 1}{Ti s (aTd s + 1)} \quad (4)$$

4 ALGORITMOS GENÉTICOS

4.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Se han empleado algoritmos genéticos (AG) para obtener la sintonía óptima de los controladores. Esta técnica de optimización se basa en la teoría de la evolución, en la que se favorece la supervivencia de los miembros más aptos de una población en perjuicio de los más débiles. En este método de optimización se actúa sobre una población de individuos definidos por un cromosoma formado por genes binarios. Los AG actúan sobre los cromosomas utilizando las leyes de selección, cruzamiento y mutación, durante un número de generaciones dado. Para cuantificar la aptitud de los individuos se maximiza una función objetivo Φ . Se parte de la creación aleatoria de una población inicial $P(0)$, formada por p individuos. A esta población se le aplican unos operadores genéticos que la modifican de forma probabilística para crear una nueva población $P(1)$. El proceso se repite un número de generaciones T dado, obteniéndose las poblaciones sucesivas $P(t)$. La solución se obtiene entre los individuos de la última generación $P(T)$.

En la figura 4 se muestra el diagrama de flujo de un algoritmo genético y un breve resumen de la terminología.

PID Paralelo:

$$G_c(s) = \frac{kpaTiTd s^2 + [kpTi + (a+1)Td]s + 1}{Ti s (aTd s + 1)} \quad (5)$$

PID Serie:

$$G_c(s) = kp \frac{TiTd s^2 + (Ti + Td)s + 1}{Ti s (aTd s + 1)} \quad (6)$$

PD Mixto:

$$G_c(s) = kp \frac{(a+1)Td s + 1}{aTd s + 1} \quad (7)$$

PD Paralelo:

$$G_c(s) = \frac{(kpa + 1)Td s + kp}{aTd s + 1} \quad (8)$$

PD Serie:

$$G_c(s) = kp \frac{1 + Td s}{aTd s + 1} \quad (9)$$

Red de Primer Orden:

$$G_c(s) = kp \frac{s + z}{s + p} \quad (10)$$

Red de Adelanto:

$$G_c(s) = kp \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{aT}} \quad (11)$$

Red de Atraso-Adelanto:

$$G_c(s) = kp \frac{\left(s + \frac{1}{T1} \right) \left(s + \frac{1}{T2} \right)}{\left(s + \frac{a}{T1} \right) \left(s + \frac{1}{aT2} \right)} \quad (12)$$

para $0.05 < a < 0.95$.

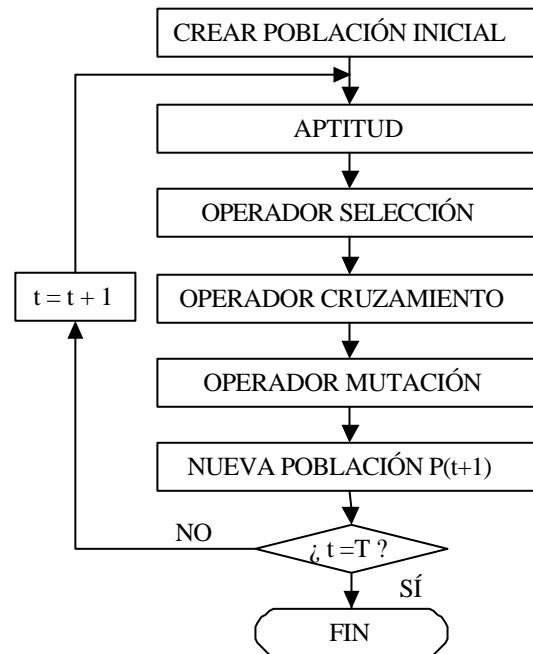


Figura 4: Algoritmo genético

Aptitud: La medida de la aptitud de los individuos de una población se realiza mediante la evaluación de los valores de la función objetivo Φ específica para cada problema dado. La aptitud de la población

correspondiente a una generación dada se puede expresar por

$$\Psi_t = \sum_{i=1}^p \Phi_{it} \quad (13)$$

Operador de selección: Se considera que la dimensión de la población se mantiene constante durante el proceso de selección. A cada individuo i de una población $P(t)$ se le asigna una probabilidad de selección basada en la medida de su aptitud

$$s_{it} = \frac{\Phi_{it}}{\Psi_t} \quad (14)$$

El operador selecciona de forma aleatoria los individuos de la población $P(t)$ en función de las probabilidades s_{it} generando una nueva población $P'(t+1)$ con un valor de Ψ_t mayor.

Operador de cruzamiento: A la población intermedia $P'(t+1)$ se le aplica el operador de cruzamiento a partir de una tasa de cruzamiento ($0 < r_c < 1$). Para cada individuo de $P'(t+1)$ se genera un número aleatorio ($0 < r_1 < 1$) y si $r_1 < r_c$ se selecciona para el cruzamiento. Así, se seleccionan un número par de individuos (padres) y eligiendo un punto aleatorio en sus cadenas de bits se combinan los cromosomas dando lugar a dos nuevos descendientes.

Sean A y B los padres de una población y un punto aleatorio k como se indica a continuación:

$$\begin{array}{r} A=10010 \mid 1100011 \\ B=10100 \mid 0001101 \\ \quad \quad \quad \downarrow k \end{array}$$

Utilizando el operador de cruzamiento se obtienen los cromosomas que se indican:

$$\begin{array}{r} A^*=10010 \mid 0001101 \\ B^*=10100 \mid 1100011 \\ \quad \quad \quad \downarrow k \end{array}$$

Así, se obtiene una nueva población $P''(t+1)$.

Operador de mutación: Mediante este operador se altera de forma aleatoria la población $P''(t+1)$ invirtiendo uno o más bits de la cadena de algún cromosoma, utilizando una probabilidad de mutación r_m , por ejemplo:

$$A = 1110001 \boxed{0} 110101$$

Después de la mutación quedaría:

$$A^* = 1110001 \boxed{1} 110101$$

La mutación se introduce para tratar de garantizar que se puede alcanzar cualquier punto del espacio de

búsqueda y para prevenir que el AG quede bloqueado en un óptimo local.

Los valores de las tasas de cruzamiento y mutación influyen en las características de convergencia del método, dependiendo del problema y del algoritmo que se trate.

4.2 SINTONÍA DE LOS CONTROLADORES

La función de coste que se maximiza en el algoritmo genético es $MejWVA = WVA$ (sin controlador) – WVA (con controlador). Esto es equivalente a minimizar WVA con controlador.

Con el modelo del buque utilizado para la sintonía se ha encontrado en cada caso un único controlador para controlar todas las velocidades del buque (20, 30 y 40 nudos) y todos los estados de la mar (4 y 5). Con este método se alcanza un comportamiento aceptable para todas las condiciones posibles. Se ha comprobado con la red de primer orden que diseñando un controlador para cada velocidad y estado de la mar se obtienen ligeras mejoras en la reducción de la aceleración vertical y del MSI.

5 SIMULACIONES

Se presenta en las tablas 1 y 2 un resumen de los resultados obtenidos con los controladores estudiados. En ellas se puede apreciar que la mejor reducción de la aceleración vertical y MSI se produce para la red de primer orden. Se obtienen también buenos resultados con una red de atraso-adelanto. Aunque con los controladores PID se alcanza también una reducción del MSI buena y mejor que con los controladores PD mixto y serie, el PD paralelo consigue unos mejores resultados sin el posible problema de la saturación integral.

Tabla 1: Parámetros de los controladores

		K	Zeros	Poles
PD Mixto	T_Foil	1123	-0.047	-0.518
	Flap	941.6	-0.0624	-0.686
PD Paralelo	T_Foil	159.15	-10.30	-10.99
	Flap	13.63	-0.147	-0.551
PD Serie	T_Foil	1496.3	-5.882	-58.823
	Flap	929	-9.091	-90.91
PID Mixto	T_Foil	50.8842	-125.65	0
	Flap	17.32	-0.783	-1.93
PID Paralelo	T_Foil	71.967	-8.27	0
	Flap	51.67	-0.602	-0.685
			-0.001	0
				-0.5936

PID Serie	T_Foil	609.3	- 0.478 - 0.085	0 - 0.854
	Flap	450.1	- 50 - 0.99	0 - 9.901
Red adelante	T_Foil	149.30	- 0.053	- 0.0812
	Flap	59.63	- 0.0754	- 0.0877
Red at-ad	T_Foil	133.11	- 0.09 - 0.104	- 0.077 - 0.1224
	Flap	148.42	- 3.33 - 33.33	- 0.533 - 208.33
Red 1 ^{er} orden	T_Foil	130.66	- 14.74	-11.09
	Flap	22.61	- 2.60	- 0.17
Red 2 ^o orden	T_Foil	143.11	- 1.11 - 4.62	- 10.43 - 0.05
	Flap	94.07	- 19.24 - 17.93	- 15.39 - 15.90

La posición de los polos y ceros del controlador PD paralelo es muy similar a la obtenida para la red de primer orden.

Tabla 2: Porcentaje de mejora promedio de WVA y MSI

	MejWVA (%)	MejMSI(%)
PD Mixto	16.04	25.7
PD Paralelo	18.73	29.54
PD Serie	17.34	27.57
PID Mixto	18.52	29.45
PID Paralelo	18.27	29
PID Serie	18.40	29.04
Red adelante	17.88	28.34
Red at-ad	18.79	29.54
Red 1 ^{er} orden	19.22	30.19
Red 2 ^o orden	18.53	29.47

Como muestra de los resultados obtenidos se adjuntan diversas gráficas para el caso de velocidad del buque 40 nudos y estado de la mar 4 y red de primer orden.

En la figura 5 se representan la posición del T_Foil y el Flap en cada instante de tiempo.

La figura 6 muestra la comparación entre las aceleraciones verticales de "heave" y "pitch" en el buque con y sin controlador.

La aceleración vertical media en función del tiempo y en función de la frecuencia se representa en la figura 7.

Por último en la figura 8 se compara el MSI cuando se navega sin controlador y con controlador.

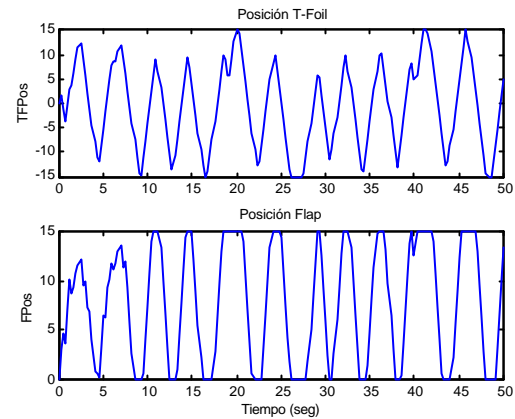


Figura 5: Posición de los actuadores

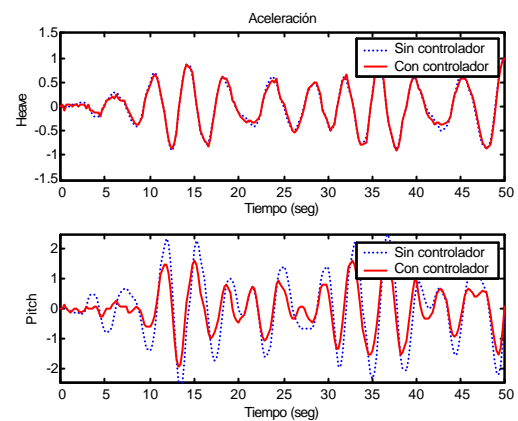


Figura 6: Serie temporal de la aceleración "heave" y "pitch"

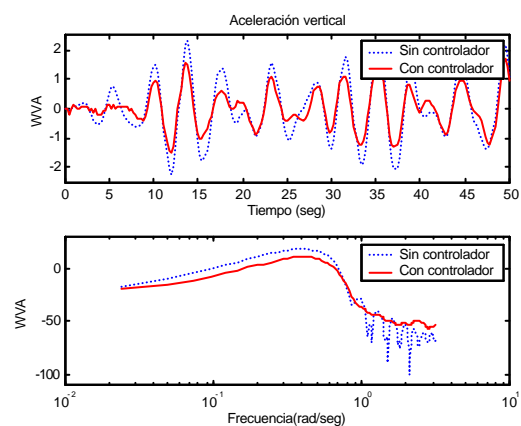


Figura 7: Serie temporal y bode de WVA

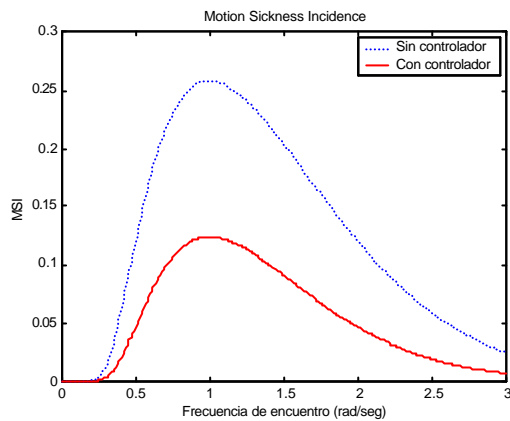


Figura 8: Índice de mareo

En las tablas 3 y 4 se muestran los resultados obtenidos con la red de primer orden ajustada con los mismos valores (mv) para todas las velocidades del buque y estados de la mar y los obtenidos cuando se sintoniza la red específicamente para cada caso.

Debido a que en todas las simulaciones se obtienen los mejores resultados para las condiciones 4e4 y 3e4 estos casos tienen el mayor peso en la función de coste promedio y por ello los controladores ajustados de forma específica para dichas condiciones tienen unos valores de los parámetros muy parecidos. En cualquier caso, la mejora obtenida con los controladores sintonizados específicamente no es muy importante comparada con la del controlador ajustado con los mismos valores para todos los casos.

Tabla 3: Parámetros de los controladores

		K	Ceros	Polos
Red 1 ^{er} orden	T_Foil	130.66	- 14.74	-11.09
	Flap	22.61	- 2.60	- 0.17
2e4	T_Foil	104.92	- 18.07	- 2.04
	Flap	71.32	- 5.02	- 0.11
2e5	T_Foil	77.06	- 1.6	- 0.05
	Flap	126.05	- 3.74	- 0.01
3e4	T_Foil	121	- 15.44	- 9.58
	Flap	31.83	- 3.8	- 0.05
3e5	T_Foil	54.022	- 19.65	- 11.28
	Flap	84.06	- 1.55	- 0.038
4e4	T_Foil	134.05	- 17.44	- 11.11
	Flap	26.05	- 2.12	- 0.07
4e5	T_Foil	139.16	- 12.88	- 11.71
	Flap	22.79	- 2.64	- 0.025

Tabla 4: Porcentaje de mejora de WVA y MSI

	MejWVA (%)	MejMSI (%)
2e4 mv	8.15	15.45
2e4	10.1196	19.0787
2e5 mv	5.20	7
2e5	6.4022	8.6380
3e4 mv	31.49	60.27
3e4	32.3459	61.5762
3e5 mv	14.74	15.91
3e5	14.85	16.05
4e4 mv	36.98	64.77
4e4	37.2419	65.1307
4e5 mv	18.76	17.72
4e5	19.00	18.10

6 CONCLUSIONES

Utilizando el método de optimización de algoritmos genéticos se ha conseguido una importante reducción de la aceleración vertical (y como consecuencia del índice de mareo) casi con todos los controladores estudiados y fundamentalmente con la red de primer orden.

Aunque en este artículo sólo se han presentado las gráficas de la simulación con la red de primer orden se ha comprobado que no existe mucha diferencia en el movimiento y saturación de los actuadores con unos controladores u otros. También se aprecia que la mayor disminución en la aceleración vertical del buque se debe a la reducción de la aceleración de "pitch". En algunos casos la disminución en la aceleración de "heave" es prácticamente inapreciable. En la representación frecuencial se observa una disminución de la amplitud en todo el rango de frecuencias y una disminución de la variación de la amplitud para frecuencias cercanas y superiores a 1 rad/seg que es la frecuencia a la que se produce el mayor índice de mareo.

Observando los polos y ceros de los controladores se pueden considerar algunas simplificaciones con las que se obtienen mejoras de la aceleración vertical WVA ligeramente inferiores a las obtenidas con las de los controladores de la Tabla 1.

En la red de atraso-adelanto se pueden cancelar los polos y ceros del controlador del T_Foil y eliminar el polo y cero alejados del controlador del Flap, resultando como controlador:

$$G_{c(TF)}(s) = 130.11 \quad (15)$$

$$G_{c(F)}(s) = 148.42 \frac{s + 3.33}{s + 0.533} \quad (16)$$

En el controlador PD paralelo se puede cancelar el polo y cero del controlador del T_Foil, resultando:

$$G_{c(TF)}(s) = 159.15 \quad (17)$$

$$G_{c(F)}(s) = 13.68 \frac{s + 0.147}{s + 0.551} \quad (18)$$

En la red de adelanto se pueden cancelar los polos y ceros tanto del controlador del T_Foil como del Flap, resultando:

$$G_{c(TF)}(s) = 149.3 \quad (19)$$

$$G_{c(F)}(s) = 59.63 \quad (20)$$

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo ha sido subvencionado por la CICYT con los proyectos TAP97-0607-C03-03 y DPI 2000-0386-C03-03.

Referencias

- [1] De Andrés, B., Esteban, S., Girón, J. M., De la Cruz, J. M., (2000). "Modelling the Motions of a Fast Ferry with the Help of Genetic Algorithms", *Proc. 3rd IMACS MATHMOD. Viena.*
- [2] Aranda, J., De la Cruz, J. M., De Andrés, B., Díaz, J. M., Esteban, S., Girón, J. M., Grau, L., López, J. A., Ruipérez, P., (1999). "Identification of continuous linear models for the vertical dynamic of TF-120 ship by genetic algorithm and non linear least squares", *Technical report TAP97-0607. CRIBAV-00-02.*
- [3] Aranda, J., De la Cruz, J. M., Díaz, J. M., De Andrés, B., Ruipérez, P., Girón, J. M., (2000). "Modelling of a High Speed Craft by a Non-Linear Least Squares Method with Constraints", *5th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts MCMC2000. Aalborg.*
- [4] De la Cruz, J. M. (2000). "Evaluation", *Technical report TAP97-0607. CRIBAV-01-04*

- [5] Michalewicz, Z., (1996). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Berlin. Springer.
- [6] Esteban, S., Girón, J. M., De la Cruz, J. M., (1999). "Actuators Modeling", *Technical report TAP97-0607. CRIBAV-01-03.*