

# CONTROL CLASICO MULTIVARIABLE DE UN FERRY RAPIDO

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

J. M. De La Cruz  
Dept. de Arquitectura de Computadores y Automática. U. Complutense. Madrid, jmcruz@dacya.ucm.es

## Resumen

*La disminución del índice de mareo en un ferry de alta velocidad repercute en un aumento del confort del pasaje y de la seguridad del navío. En este trabajo se presenta un estudio comparativo de la disminución del índice de mareo en un ferry de alta velocidad mediante la utilización de diferentes controladores clásicos multivariantes (PD, red de primer orden y red de segundo orden). La sintonía de los controladores se plantea como un problema de optimización no lineal que es resuelto mediante la utilización conjunta de un algoritmo genético y un algoritmo clásico de optimización no lineal.*

**Palabras Clave:** Control multivariable, PD, problema de optimización, algoritmos genéticos.

## 1 INTRODUCCION

El principal problema para el desarrollo de ferries de alta velocidad está relacionado con el confort de los pasajeros y la seguridad de los navíos. La aceleración vertical asociada con los movimientos de balance, cabeceo y arfada es la principal causa del mareo característico de este tipo de medios de transporte.

El control del balance no es problemático y un aumento de su amortiguamiento puede ser obtenido fácilmente. Sin embargo, los constructores de ferries están también interesados en conseguir un aumento de la atenuación de los movimientos de arfada y cabeceo. Para resolver este problema se debe de considerar actuadores apropiados controlados con un diseño adecuado. Previamente, se deben de desarrollar modelos de la dinámica vertical del ferry para el diseño, la evaluación y la verificación de los resultados.

Una vez terminada la etapa de modelado de la dinámica vertical del ferry ([1] y [3]) y de sus actuadores [5], la siguiente etapa es diseñar un control sobre el movimiento de arfada y el de

cabeceo que gobierne la posición de los actuadores. El objetivo final es disminuir las aceleraciones verticales responsables del mareo.

En este trabajo se realiza un estudio comparativo de diferentes controladores clásicos multivariantes: PD, red de primer orden y red de segundo orden. Utilizando estos diseños se consigue una disminución del índice de mareo.

## 2 MODELOS UTILIZADOS

### 2.1 MODELOS LINEALES DE LA DINÁMICA VERTICAL DE UN FERRY DE ALTA VELOCIDAD

La dinámica vertical de un ferry de alta velocidad puede ser descrita ([1] y [3]) por cuatro funciones de transferencia continuas:

- $G_{1H}(s)$  es la función de transferencia que tiene como entrada la altura de olas (m) y como salida la fuerza del movimiento de arfada (kN).
- $G_{2H}(s)$  es la función de transferencia que tiene como entrada la fuerza del movimiento de arfada (kN) y como salida el movimiento de arfada (m).
- $G_{1P}(s)$  es la función de transferencia que tiene como entrada la altura de olas (m) y como salida el momento del movimiento de cabeceo (kN·m).
- $G_{2P}(s)$  es la función de transferencia que tiene como entrada el momento del movimiento de cabeceo (kN.m) y como salida el movimiento de cabeceo (grados).

En la Figura 1 se muestra el diagrama de bloques del modelo de la dinámica vertical de un ferry de alta velocidad, donde:

- $F_A$  es la fuerza del movimiento de arfada ejercida por los actuadores.

- $M_A$  es el momento del movimiento de cabeceo ejercido por los actuadores.
- $F_W$  es la fuerza del movimiento de arfada ejercida por las olas.
- $M_W$  es el momento del movimiento de cabeceo ejercido por las olas.

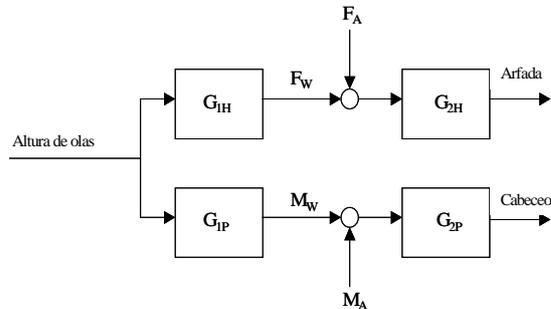


Figura 1 : Diagrama de bloques de la dinámica vertical de un ferry de alta velocidad

Agrupando las funciones de transferencia  $G_{1H}$  y  $G_{1P}$  dentro del bloque wh2(F&M), y agrupando  $G_{2H}$  y  $G_{2P}$  dentro del bloque (F&M)2mov, se obtiene el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 2.

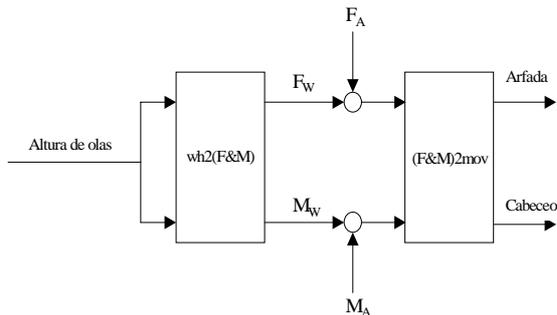


Figura 2: Diagrama de bloques agrupados del modelo de la dinámica vertical del ferry.

## 2.2 MODELO DE LOS ACTUADORES

Se diseñaron dos tipos de actuadores [5] para intentar disminuir las aceleraciones verticales en el ferry. Por un lado unas aletas en proa (“T-Foil”) y por otro lado unos alerones en popa (“Flaps”). El movimiento de los “Flaps” estaba limitado hacia arriba, mientras que el movimiento del “T-Foil” podía realizarse hacia arriba o hacia abajo dentro de un cierto límite.

Se implementó un modelo no lineal de los actuadores en Simulink. También se obtuvieron modelos lineales que son una buena aproximación si no se produce saturación.

En la Figura 3 se muestra el modelo no lineal de los actuadores. Este bloque tiene cuatro entradas y dos salidas. Las entradas son ref\_Flap y ref\_Tfoil, que gobiernan las posiciones de los “Flaps” y del “T-Foil” respectivamente, y los movimientos de arfada y cabeceo. Las salidas son  $F_A$  y  $M_A$ .

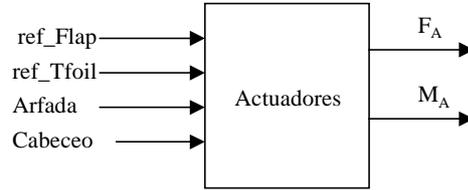


Figura 3: Modelo no lineal de los actuadores.

## 2.3 MODELO DEL PROCESO

El modelo del proceso está constituido por el modelo de la dinámica vertical del ferry conectado apropiadamente al modelo de actuadores. Se trata de un proceso multivariable con dos variables manipulables (ref\_Flap y ref\_Tfoil) y dos variables controladas (movimiento de arfada y movimiento de cabeceo). Además, el proceso está sometido a una perturbación: la altura de ola. En la Figura 4 se muestra el diagrama de bloques del proceso.

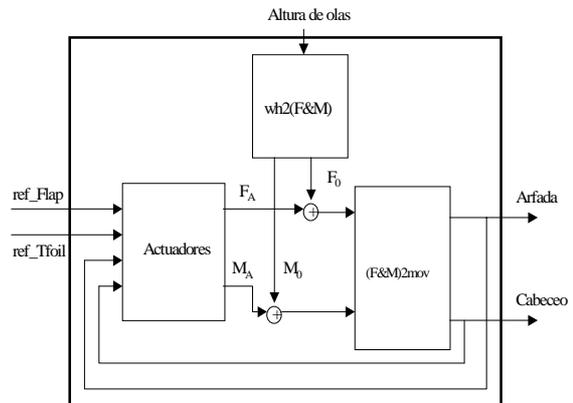


Figura 4: Diagrama de bloques del proceso

Es importante conocer el índice de interacción entre las variables del proceso para poder diseñar la estrategia de control. El cálculo de la matriz de ganancias relativas (RGM) permite conocer el índice de interacción [2] y resolver el problema de emparejamiento entre las variables manipulables y las variables controladas.

Si se utiliza el modelo lineal de los actuadores y no se considera la perturbación el modelo del proceso se puede expresar por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} arfada(s) &= G_{11}(s) \cdot ref\_Flap(s) + G_{12}(s) \cdot ref\_Tfoil(s) \\ cabeceo(s) &= G_{21}(s) \cdot ref\_Flap(s) + G_{22}(s) \cdot ref\_Tfoil(s) \end{aligned} \quad (1)$$

La matriz de ganancias relativas (RGM) puede ser obtenida utilizando la siguiente sentencia de MATLAB:

$$RGM = SSGM * (inv(SSGM))' \quad (2)$$

donde SSGM es la matriz de ganancias en estado estacionario.

Para una velocidad del ferry de 40 nudos se obtienen las siguientes SSGM y RGM:

$$SSGM = \begin{bmatrix} 0.0045 & -0.0043 \\ 0.0008 & 0.0011 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$RGM = \begin{bmatrix} 0.5835 & 0.4164 \\ 0.4164 & 0.5835 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Analizando la magnitud de los elementos de la RGM se deducen los siguientes emparejamientos:

- 1) La variable manipulable ref\_Flap se asociará con la variable controlada movimiento de arfada.
- 2) La variable manipulable ref\_Tfoil se asociará con la variable controlada movimiento de cabeceo.

Si se aplica el teorema de Niederlinski [8] se puede probar que estos emparejamientos no producen inestabilidad.

## 2.4 MODELO DE LA RED DE DESACOPLO

La elevada magnitud de los elementos fuera de la diagonal de la RGM aconseja añadir una red de desacoplo al proceso (ver Figura 5).

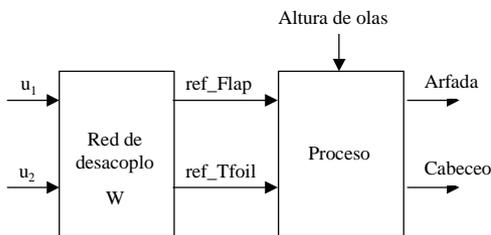


Fig. 5: Red de desacoplo añadida al proceso

La red de desacoplo utilizada es:

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} \\ w_{21} & w_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{12}}{G_{11}} \\ -\frac{G_{21}}{G_{22}} & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

El bloque que implementa W posee dos entradas  $u_1$  y  $u_2$  para los controladores y dos salidas ref\_Flap y ref\_Tfoil.

## 3 DISEÑO DE LOS CONTROLADORES

### 3.1 ESPECIFICACIONES

Se desea disminuir el índice de mareo MSI (Motion Sickness Incidence o porcentaje de personas que vomitan dentro de las dos horas) ([4] y [6]), por lo que es necesario disminuir las aceleraciones verticales que sufre el ferry a consecuencia del movimiento de cabeceo y del movimiento de arfada provocados por el oleaje al que se encuentra sometido.

Sea  $acv40(t_i)$  la aceleración vertical medida a 40 metros del centro de gravedad en el instante de tiempo  $t_i = 0.25 \cdot (i-1)$  con  $i=1, \dots, N$ . Siendo N el número total de muestras.

$$acv40(t_i) = a_{vH}(t_i) + a_{vP}(t_i) \quad (6)$$

$$acv40(t_i) = \frac{d^2 heave(t_i)}{dt^2} - 40 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \frac{d^2 pitch(t_i)}{dt^2} \quad (7)$$

El valor medio  $\overline{acv40}$  de la serie temporal  $acv40$  medida a lo largo de una carrera es:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |acv40(t_i)| \quad (8)$$

Como consecuencia directa de la reducción en el valor de J se producirá una disminución del MSI, que viene definido por:

$$MSI = 100 \cdot \left[ 0.5 \pm erf \left( \frac{\pm \log_{10} (J/g) \mp \mu_{MSI}}{0.4} \right) \right] \quad (9)$$

donde

$$\mu_{MSI} = -0.819 + 2.32 (\log_{10} \omega_e)^2 \quad (10)$$

siendo g la aceleración de la gravedad y  $\omega_e$  la frecuencia de encuentro.

El principal objetivo es obtener la máxima reducción posible del MSI, que depende de la velocidad del ferry y del estado de la mar (SSN Sea State Number).

### 3.2 ESQUEMA DE CONTROL UTILIZADO

En la Figura 6 se muestra el esquema de control utilizado en el diseño.

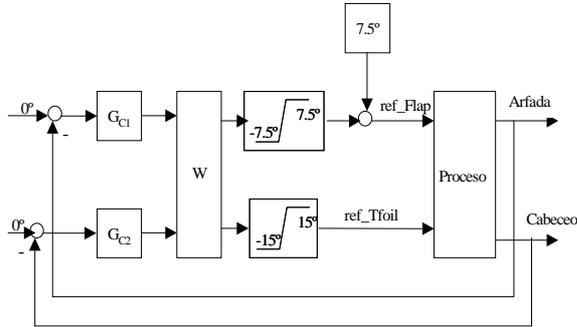


Figura 6: Esquema de control utilizado

Se utilizaron los siguientes controladores clásicos multivariables: PD, red de primer orden y red de segundo orden.

Controladores PD. Las funciones de transferencia de  $G_{C1}$  y  $G_{C2}$  son:

$$G_{C1} = K_{p1} \left[ \frac{1 + 1.1T_{D1}s}{0.1T_{D1}s + 1} \right] \quad G_{C2} = K_{p2} \left[ \frac{1 + 1.1T_{D2}s}{0.1T_{D2}s + 1} \right] \quad (11)$$

El vector de parámetros es:

$$\theta = [K_{p1}, T_{D1}, K_{p2}, T_{D2}]^T \quad (12)$$

Redes de primer orden. Las funciones de transferencia de  $G_{C1}$  y  $G_{C2}$  son:

$$G_{C1} = K_{C1} \left[ \frac{s + z_{C1}}{s + p_{C1}} \right] \quad G_{C2} = K_{C2} \left[ \frac{s + z_{C2}}{s + p_{C2}} \right] \quad (13)$$

El vector de parámetros es:

$$\theta = [K_{C1}, z_{C1}, p_{C1}, K_{C2}, z_{C2}, p_{C2}]^T \quad (14)$$

Redes de segundo orden. Las funciones de transferencia de  $G_{C1}$  y  $G_{C2}$  son:

$$G_{C1} = K_{C1} \left[ \frac{s^2 + A_1 s + B_1}{s^2 + C_1 s + D_1} \right] \quad G_{C2} = K_{C2} \left[ \frac{s^2 + A_2 s + B_2}{s^2 + C_2 s + D_2} \right] \quad (15)$$

El vector de parámetros es:

$$\theta = [K_{C1}, A_{C1}, B_{C1}, C_{C1}, D_{C1}, K_{C2}, A_{C2}, B_{C2}, C_{C2}, D_{C2}]^T \quad (16)$$

### 3.3 SINTONIA DE LOS CONTROLADORES

La sintonía de  $G_{C1}$  y  $G_{C2}$  consiste en la resolución de un problema de optimización no lineal.

$$J(\theta_{opt}) = \min_{\theta \in S} J \quad (17)$$

donde  $J$  es la aceleración vertical media definida en (8) y  $S$  es el rango de valores permitidos para los elementos del vector de parámetros  $\theta$ . La selección del rango  $S$  fue realizada de acuerdo a los siguientes criterios:

- $G_{C1}$  y  $G_{C2}$  deben ser estables
- Evitar una saturación excesiva de los actuadores.
- Trabajar dentro del rango de frecuencias de encuentro  $\omega_e = [0.1 \ 10]$  rad/seg donde las olas tienen toda la energía que excita al proceso.

Por lo tanto los rangos  $S$  seleccionados son:

1) Controladores PD:

$$S = \{1 \leq K_{p1} \leq 30; 0.1 \leq T_{D1} \leq 3; 1 \leq K_{p2} \leq 15; 0.1 \leq T_{D2} \leq 3\} \quad (18)$$

2) Redes de primer orden

$$S = \{1 \leq K_{C1} \leq 250; 0.1 \leq z_{C1} \leq 15; 1 \leq p_{C1} \leq 100; 1 \leq K_{C2} \leq 175; 0.1 \leq z_{C2} \leq 2; 1 \leq p_{C2} \leq 10\} \quad (19)$$

3) Redes de segundo orden

$$S = \{1 \leq K_{C1} \leq 250; 0.2 \leq A_{C1} \leq 30; 1 \leq B_{C1} \leq 250; 0.2 \leq C_{C1} \leq 50; 0.01 \leq D_{C1} \leq 634; 1 \leq K_{C2} \leq 175; 0.1 \leq A_{C2} \leq 4; 0.01 \leq B_{C2} \leq 29; 0.2 \leq C_{C2} \leq 20; 0.01 \leq D_{C2} \leq 125\} \quad (20)$$

El método de sintonía utiliza dos procedimientos diferentes de optimización. En primer lugar un algoritmo genético [7] busca una buena condición inicial para el vector de parámetros y después un algoritmo clásico de optimización no lineal, comenzando con esta condición inicial, calcula el vector de parámetros óptimo.

El algoritmo genético utilizado únicamente resuelve problemas de maximización. Por lo tanto la función de coste (8) debe ser modificada adecuadamente:

$$J_G(\theta) = 5 - J \quad (21)$$

El máximo de  $J_G$  es el mínimo de  $J$ .

Los parámetros del algoritmo genético son configurados con los siguientes valores:

- Tamaño de la población: 15
- Número máximo de generaciones: 300
- Probabilidad de cruce: 0.8
- Probabilidad de mutación: 0.15

El método de sintonía consta de tres pasos:

- 1) Se configura el estado de la mar (SSN) y la velocidad del ferry (V) para seleccionar la serie temporal de altura de olas que se va a utilizar para perturbar al sistema.
- 2) El algoritmo genético se lanza para maximizar la función de coste  $J_G$ . Cuando el algoritmo termina, se ha generado un buen vector de parámetros inicial  $\theta_G$ , con todos sus elementos incluidos dentro del rango S.
- 3) A continuación y partiendo del vector  $\theta_G$  calculado en el paso 2, se lanza el algoritmo clásico de optimización no lineal, que finaliza cuando converge al valor óptimo  $\theta_{opt}$  o cuando se excede un número máximo de iteraciones preestablecido.

En cada iteración, tanto el algoritmo genético como el algoritmo clásico de optimización no lineal requieren evaluar varias veces las funciones de coste  $J_G$  y  $J$ , respectivamente. Cada evaluación corre una simulación de un modelo Simulink (modelo del proceso + controladores + red de desacoplo) que es excitado por la serie temporal de altura de ola seleccionada en el paso 1.

## 4 RESULTADOS

Las funciones de transferencia de  $G_{C1}$  y de  $G_{C2}$  obtenidas a V=40 nudos son:

1) Controladores PD:

$$G_{C1} = \frac{1.016s + 2.075}{s + 0.0449} \quad G_{C2} = \frac{14.2s + 9.128}{s + 0.1414}$$

2) Redes de primer orden

$$G_{C1} = \frac{228.7s + 29.88}{s + 92.76} \quad G_{C2} = \frac{170.4s + 17.53}{s + 7.687}$$

3) Redes de segundo orden

$$G_{C1} = \frac{41.64s^2 + 59.63s + 2897}{s^2 + 14.17s + 441.8}$$

$$G_{C2} = \frac{170.3s^2 + 385.6s + 518.7}{s^2 + 2.172s + 18.47}$$

En la Figura 7 se muestran los porcentajes de reducción del MSI obtenidos en simulación a V=40 y SSN=4 utilizando diferentes controladores clásicos multivariables.

En la Figura 8 se muestran los porcentajes de reducción del MSI obtenidos en simulación a V=40 y SSN=5 utilizando diferentes controladores clásicos multivariables.

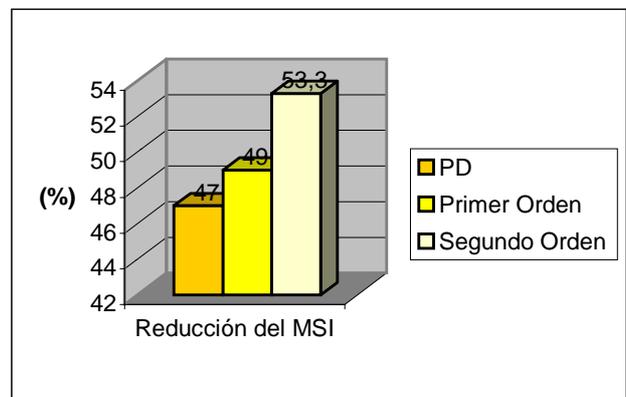


Figura 7: Disminución del MSI obtenido en simulación a V=40 nudos y SSN=4 utilizando diferentes controladores clásicos multivariables.

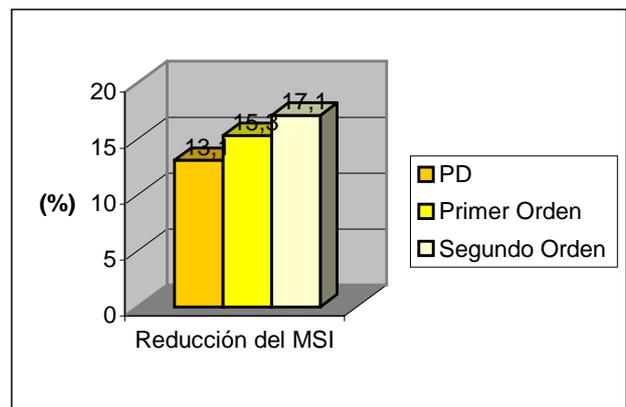


Figura 8: Disminución del MSI obtenido en simulación a V=40 nudos y SSN=5 utilizando diferentes controladores clásicos multivariables.

## 5 CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio comparativo de la disminución del índice de mareo (MSI) en un ferry de alta velocidad, utilizando distintos controladores

clásicos multivariados (PD, red de primer orden y red de segundo orden).

En la Figura 8 y en la Figura 9 se puede observar que la reducción del índice de mareo es mayor conforme aumenta la complejidad del controlador utilizado. Las máximas reducciones son conseguidas con las redes de segundo orden y la mínimas reducciones con los controladores PD. Este resultado es esperado ya que el número de parámetros ajustables es mayor en las redes de segundo orden que en los controladores PD. No obstante la diferencia entre ambos tipos de controladores no es excesivamente grande ya que a 40 nudos y SSN=4 la diferencia en las reducciones es del 6.3 % mientras que a 40 nudos y SSN=5 la diferencia en las reducciones es del 4%.

Por lo tanto cuanto mayor es el estado de la mar, mayor es la aceleración vertical producida por las olas y la acción de los actuadores es menos efectiva ya que tienen que compensar unas fuerzas y unos momentos mayores.

Aunque se utiliza una red de desacoplo, el acoplo existente en el proceso no es aún despreciable ya que la red de desacoplo ha sido diseñada a partir de los modelos lineales de los actuadores, que sólo son válidos si los actuadores no se encuentran en saturación. No obstante, si no se utiliza la red de desacoplo las reducciones del MSI que se consiguen son más pequeñas.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado bajo el proyecto de la CICYT : DPI2000-0386-C03-01.

## Referencias

- [1] Aranda, J., J.M. de la Cruz, J.M. Díaz, B. De Andrés, P. Ruipérez, S. Esteban, J.M. Girón. (2000) Modelling of a High Speed Craft by a non-linear Least Squares Method with Constraints. *Proceedings of 5th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts MCMC2000*. Aalborg.. pp. 227-232.
- [2] Bristol, E. H. (1966). On a new measure of interactions for multivariable process control. *IEEE Trans. Auto. Cont., AC-11*; pp.133-134.
- [3] De la Cruz, J.M., J. Aranda, J.M. Díaz, P. Ruipérez, A. Marón. (1998) Identification of the vertical plane motion model of a high speed craft by model testing in irregular waves. *Proceedings of IFAC Conference CAMS'98 Control Applications in Marine Systems*. Fukuoka. pp. 277-282.
- [4] De la Cruz, J. M. (2000). Evaluation Technical Report (in Spanish) CRIBAV-01-04 of project TAP97-0607-C03-01 (ctb.dia.uned.es/cribav/).
- [5] Esteban, S., J.M. Girón, J.M. de la Cruz, B. de Andres, J.M. Díaz, J. Aranda. (2000) Fast Ferry Vertical Accelerations Reduction with Active Flaps and T-Foil. *Proceedings of 5th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts MCMC2000*. Aalborg. pp. 233-238.
- [6] Lloyd, A.R.J.M. (1989) *Seakeeping. Ship Behaviour in Rough Weather*. Ellis Horwood,
- [7] Michalewicz, Z. (1999). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Third, revised and extended edition. Springer.
- [8] Niederlinski, A. (1971) A heuristic Approach to the design of linear multivariable interacting control systems. *Automatica*, Vol. 7, pp. 691-701.