

DISMINUCION DEL INDICE DE MAREO MEDIANTE UN CONTROL PD SOBRE EL MOVIMIENTO DE ARFADA Y EL ANGULO DE CABECEO EN UN BUQUE DE ALTA VELOCIDAD

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

En este trabajo se presenta la disminución del índice de mareo mediante un control PD sobre el movimiento de arfada y el movimiento de cabeceo en un buque de alta velocidad. Se describe el método de sintonía utilizado para ajustar el control PD y se muestran los resultados obtenidos para las velocidades del buque de 20, 30 y 40 nudos y para los estados de la mar 4, 5 y 6.

Palabras Clave: control buques, PID y ferries rápidos

1 INTRODUCCION

Cuando se navega en un buque de alta velocidad destinado al transporte de pasajeros, se debe procurar que la seguridad y el confort tanto de los pasajeros como de la tripulación sea lo más alto posible. Uno de los inconvenientes más desagradables del transporte marítimo es sin duda el mareo que se produce en las personas como consecuencia de los distintos movimientos del barco: balanceo (roll), cabeceo (pitch) y arfada (heave).

El amortiguamiento en el movimiento de balanceo, es fácil de conseguir, no ocurre así con el movimiento de cabeceo y el movimiento de arfada. Por esta razón los constructores de barcos están muy interesados en conseguir controladores robustos que controlen la acción de actuadores mecánicos diseñados para el amortiguamiento de estos movimientos.

Un buque es un sistema multivariable complejo que actúa en un medio que introduce una gran variedad de perturbaciones (olas, vientos, corrientes, aguas poco profundas, etc.). Una vez terminada la fase de modelado tanto de la dinámica vertical de un buque de alta velocidad [1], [3], [4], [5] y [8] como de los actuadores [9] y [10] que se van a colocar en el buque se está en disposición de diseñar controladores

que sean capaces de gobernar las acciones de los actuadores con el propósito de disminuir las aceleraciones verticales que sufre el buque a consecuencia del oleaje.

Se ha diseñado un control de posición implementado mediante dos controladores PD, para distintas velocidades y distintos estados de la mar sobre el movimiento de arfada y el movimiento de cabeceo. Con este esquema se ha producido una disminución de las aceleraciones verticales y por tanto del índice de mareo. Se presenta también el método utilizado para sintonizar los controladores que está basado en la minimización de una función de coste no lineal.

2 MODELOS UTILIZADOS

2.1 MODELOS LINEALES DE LA DINAMICA VERTICAL DE UN BUQUE DE ALTA VELOCIDAD.

En [3] se identificaron modelos lineales continuos SISO para el momento del movimiento de cabeceo, la fuerza del movimiento de arfada, el movimiento de cabeceo y el movimiento de arfada utilizando los datos de PRECAL [2] corregidos a proa, a las velocidades de 20, 30 y 40 nudos. Se utiliza la siguiente nomenclatura :

$G_{1H}(s)$ 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).

Estos modelos están normalizados, por lo que es necesario multiplicar el filtro G_{1H} por una ganancia K_1 , y multiplicar el filtro G_{2H} por una ganancia $1/K_1$. En el caso de G_{1P} la ganancia es K_2 y para G_{2P} la ganancia es $1/K_2$. Las ganancias K_1 y K_2 se calcularon utilizando los valores máximos de la fuerza del movimiento de arfada y del momento del movimiento de cabeceo que se obtuvieron en [10] para una determinada velocidad U , promediando entre las ganancias que se obtenían para los estados de la mar 4, 5 y 6. El diagrama de bloques del modelo de la dinámica vertical del buque se muestra en la Figura 1.

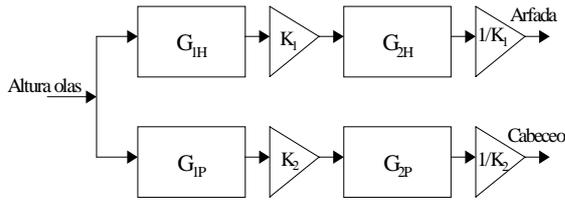


Figura 1: Diagrama de bloques del modelo de la dinámica vertical del buque.

Para el caso del filtro G_{2H} fue necesario multiplicarlo por el filtro G_{corr} :

$$G_{corr} = \frac{100}{s+100} \quad (1)$$

para aumentar el orden del denominador de G_{2H} introduciendo un polo lejano en $s=-100$ que no tiene ninguna influencia sobre el comportamiento del sistema.

Si se define :

$$\begin{aligned} G_{1He} &= K_1 \cdot G_{1H} & G_{2He} &= \frac{G_{2H}}{K_1} \cdot G_{corr} \\ G_{1Pe} &= K_2 \cdot G_{1P} & G_{2Pe} &= \frac{G_{2P}}{K_2} \end{aligned} \quad (2)$$

es posible dibujar el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 2 donde :

- F_0 es la fuerza del movimiento de arfada ejercida por el oleaje.
- F_A es la fuerza que del movimiento de arfada ejercida por los actuadores.
- M_0 es el momento del movimiento de cabeceo ejercido por el oleaje.
- M_A es el momento del movimiento de cabeceo ejercido por los actuadores.

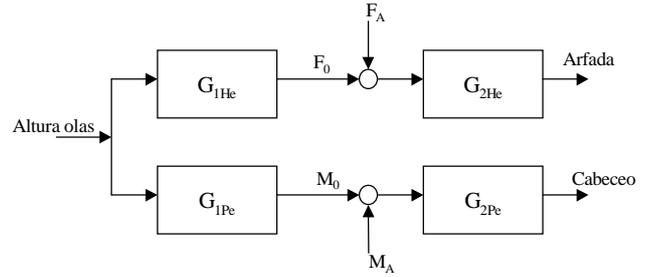


Figura 2: Diagrama de bloques del modelo de la dinámica vertical del buque incluyendo las entradas F_A y M_A .

Agrupando G_{1He} y G_{1Pe} dentro del bloque $olas2(F\&M)$ y agrupando G_{2He} y G_{2Pe} dentro del bloque $(F\&M)2mov$ se obtiene el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 3.

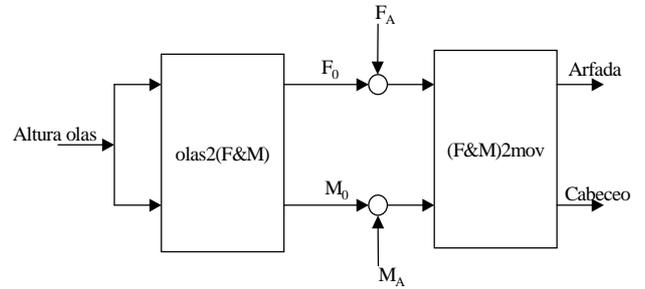


Figura 3: Diagrama de bloques agrupados del modelo de la dinámica vertical del buque.

2.2 MODELO DE LOS ACTUADORES

Se diseñaron dos actuadores [9] y [10] para intentar disminuir las aceleraciones verticales en el buque. Por un lado unas aletas en proa (T-Foil) y por otro lado un alerón en popa (Flap). Se obtuvo un modelo no lineal en Simulink para dichos actuadores, que permite realizar tanto control en posición como control en velocidad. También se obtuvieron modelos lineales para los actuadores, que son válidos siempre y cuando no se produzca saturación.

Básicamente el modelo de actuadores es un modelo no lineal con cuatro entradas (referencia posición o velocidad "Flap", referencia posición o velocidad "T-Foil", arfada y cabeceo) y dos salidas (F_A y M_A), como se muestra en la Figura 4.

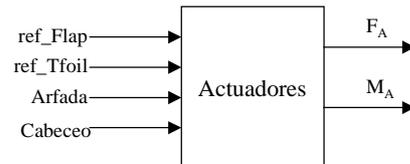


Figura 4: Modelo no lineal de los actuadores.

2.3 MODELO DEL PROCESO

El modelo completo del proceso consta del modelo de la dinámica vertical del buque conectado con el modelo no lineal de los actuadores. Se trata de un modelo multivariable de 2 variables manipulables (referencia en posición o en velocidad del “T-Foil” y referencia en posición o en velocidad del “Flap”), una variable de perturbación (la altura de las olas) y dos variables controladas (movimiento de arfada y movimiento de cabeceo). El diagrama de bloques del modelo del proceso se muestra en la Figura 5.

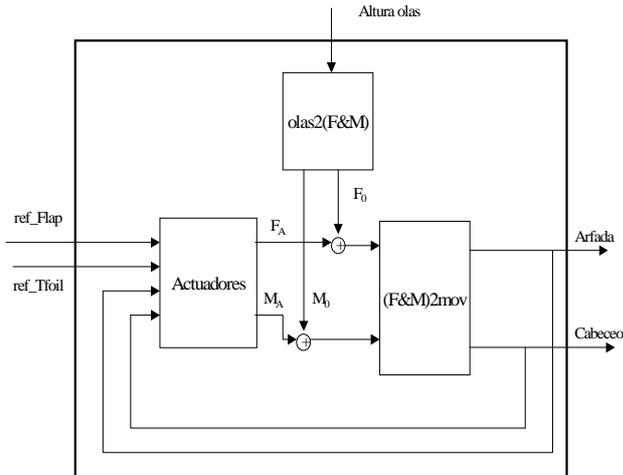


Figura 5: Diagrama de bloques del modelo del proceso.

2.3.1 Estudio de la Interacción entre las variables del proceso

La dificultad de controlar un proceso multivariable reside en el grado de interacción que existe entre sus variables, dicha interacción se manifiesta de un modo más acentuado cuando está funcionando el controlador. El análisis de la interacción nos permite conocer mucho mejor al proceso, decidir sobre la conveniencia o no de utilizar una estrategia de control centralizado o si con un control descentralizado es suficiente.

El cálculo de la matriz de ganancias relativas [6] o RGA, permitirá conocer el índice de interacción y resolver el problema del emparejamiento entre las variables manipuladas y las variables controladas (pairing). Es lógico controlar cada variable controlada con la variable manipulada que tenga mayor influencia sobre ella.

Si se utilizan el modelo lineal de los actuadores para control en posición, que es válido siempre que no se esté en saturación, es posible representar al proceso mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} heave(s) &= G_{11}(s) \cdot ref_Flap(s) + G_{12}(s) \cdot ref_Tfoil(s) + G_{13}(s) \cdot olas(s) \\ pitch(s) &= G_{21}(s) \cdot ref_Flap(s) + G_{22}(s) \cdot ref_Tfoil(s) + G_{23}(s) \cdot olas(s) \end{aligned}$$

Si no se consideran las perturbaciones del proceso, la ecuaciones del proceso linealizado son:

$$\begin{aligned} heave(s) &= G_{11}(s) \cdot ref_Flap(s) + G_{12}(s) \cdot ref_Tfoil(s) \quad (3) \\ pitch(s) &= G_{21}(s) \cdot ref_Flap(s) + G_{22}(s) \cdot ref_Tfoil(s) \end{aligned}$$

Las variables manipulables son ref_Flap y ref_Tfoil . Las variables controladas son el movimiento de arfada y el movimiento de cabeceo. Con estas consideraciones la matriz RGA viene dada por la sentencia de Matlab:

$$RGA = SSGM * (inv(SSGM))' \quad (4)$$

donde SSGM es la matriz de ganancias en estado estacionario.

Para el caso de velocidad del buque 30 nudos se obtienen las siguientes expresiones de la SSGM y de la RGA:

$$SSGM = \begin{bmatrix} 0.0025381 & -0.0002438 \\ 0.00038324 & 0.00051641 \end{bmatrix}$$

$$RGA = \begin{bmatrix} 0.58379 & 0.41621 \\ 0.41621 & 0.58379 \end{bmatrix}$$

Del análisis de la magnitud de los elementos de la RGA 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.

Aplicando el teorema de Niederlinski [12] se puede comprobar que estos emparejamientos no provocan inestabilidad en lazo cerrado.

Por otro lado la poca diferencia en magnitud entre los elementos de la diagonal y los elementos de fuera de la diagonal de la RGA, indican la existencia de un acoplo no despreciable. Es decir cualquier acción que se realice sobre alguna de las variables manipulables, afectará a ambas variables controladas y no sólo a la variable controlada con la que estaba emparejada. Con lo que se puede utilizar una estrategia de control descentralizado mediante el diseño adecuado de una red de desacoplo, o una estrategia de control centralizado.

2.4 MODELO DE LA RED DE DESACOPLO.

En la sección 2.3.1 al calcular la matriz RGA se ha puesto de manifiesto la necesidad de incluir en el

diseño una red de desacoplo. En la Figura 6 se muestra la red de desacoplo añadida al proceso.

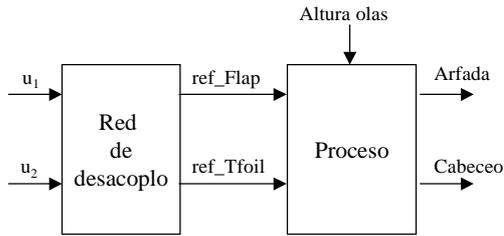


Figura 6: Red de desacoplo añadida al proceso.

La red de desacoplo W que se ha utilizado, viene dada en función de las funciones de transferencia del proceso linealizado G_{11} , G_{12} , G_{21} y G_{22} .

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

Tiene dos entradas u_1 y u_2 para los controladores y dos salidas ref_Flap y ref_Tfoil .

3 ESPECIFICACIONES

Se desea disminuir el índice de mareo MSI (Motion Sickness Incidence o porcentaje de personas que vomitan dentro de las dos horas) [7] y [11], por lo que es necesario disminuir las aceleraciones verticales que sufre el buque como consecuencia de el movimiento de cabeceo y el 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.

$$\begin{aligned} acv40(t_i) &= a_{vH}(t_i) + a_{vP}(t_i) \\ acv40(t_i) &= \frac{d^2 heave(t_i)}{dt^2} - 40 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \frac{d^2 pitch(t_i)}{dt^2} \end{aligned} \quad (5)$$

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

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |acv40(t_i)| \quad (6)$$

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

$$MSI = 100 \cdot \left[0.5 \pm \operatorname{erf} \left(\frac{\pm \log_{10} (J/g) \mp \mu_{MSI}}{0.4} \right) \right] \quad (7)$$

donde

$$\mu_{MSI} = -0.819 + 2.32 (\log_{10} \omega_e)^2 \quad (8)$$

siendo g la aceleración de la gravedad y ω_e la frecuencia de encuentro.

En la Tabla 1 se muestra el valor máximo del MSI/100 obtenido mediante la simulación de la dinámica vertical del buque sin actuadores a distintas velocidades y estados de la mar SNN (Sea State Number).

Velocidad	SSN=4	SSN=5	SSN=6
20	0.1668	0.33015	0.42609
30	0.17026	0.48296	0.56631
40	0.32889	0.62026	0.67947

Tabla 1: Valor máximo del MSI/100 obtenidos mediante la simulación de la dinámica vertical del buque sin actuadores a distintas velocidades y SNN.

Añadiendo los actuadores y utilizando el control adecuado, se debe reducir en la medida de lo posible el valor máximo del MSI, con respecto al caso cuando no se consideran los actuadores.

4 DISEÑO DE LOS CONTROLADORES

4.1 ESQUEMA DE CONTROL UTILIZADO

Se utiliza un control de tipo PD¹ sobre el movimiento de arfada y el movimiento de cabeceo como el que se muestra en la Figura 7:

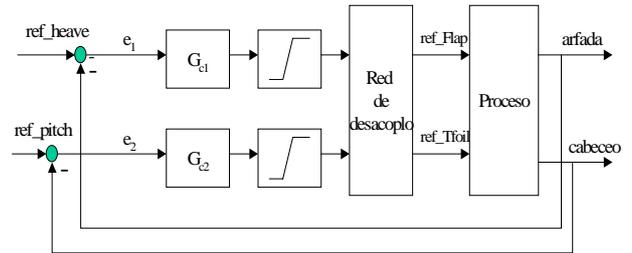


Figura 7: Esquema de control utilizado.

Se utilizan dos controladores G_{C1} y G_{C2} de tipo PD cuyas funciones de Transferencia son de la forma:

¹ En una primera inspección mediante ensayo y error se observó que la inclusión en los controladores de la acción integral no producía ninguna mejora en el comportamiento del sistema.

$$G_c = K_p \left[1 + \frac{T_D s}{\alpha T_D s + 1} \right] \quad (9)$$

Para la acción derivativa se ha utilizado un filtro derivativo con $\alpha=0.1$, con lo que operando se obtiene que las expresiones de las funciones de transferencia G_{c1} y G_{c2} son:

$$G_{c1} = K_{p1} \left[\frac{1 + 1.1T_{D1}s}{0.1T_{D1}s + 1} \right] \quad (10)$$

$$G_{c2} = K_{p2} \left[\frac{1 + 1.1T_{D2}s}{0.1T_{D2}s + 1} \right]$$

De acuerdo con el emparejamiento entre las variables controladas y las variables manipulables deducido del análisis de la RGA en la sección 2.3.1 se han seleccionado las siguientes entradas y salidas para G_{c1} y G_{c2} :

- El regulador G_{c1} tiene como entrada el error e_1 que se define como la diferencia entre la referencia para el movimiento de arfada (0 m) y el valor medido del movimiento de arfada. Tras pasar por el bloque de saturación la salida de G_{c1} está comprendida en el intervalo $[0^\circ, 15^\circ]$ que son los límites de la posición del Flap.
- El regulador G_{c2} tiene como entrada el error e_2 que se define como la diferencia entre la referencia para el movimiento de cabeceo (0°) y el valor medido del movimiento de cabeceo. Tras pasar por el bloque de saturación la salida de G_{c2} está comprendida en el intervalo $[-15^\circ, 15^\circ]$ que son los límites de la posición del Tfoil.

4.2 SINTONIA DE LOS CONTROLADORES.

Las ganancias K_p y las constantes derivativas T_D se obtienen minimizando J :

$$J(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |acv40(\theta, t_i)| \quad (11)$$

Donde θ es el vector de parámetros de los controladores G_{c1} y G_{c2} :

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

El problema de optimización no lineal a resolver consiste en la obtención del vector de parámetros θ_{opt} que minimice la función de coste J .

$$J(\theta_{opt}) = \min_{\theta \in S} J \quad (13)$$

Donde S es el rango de valores permitidos para las componentes de θ :

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

La selección del rango S para las componentes de θ se realizó tras una primera etapa de ensayos de prueba y error atendiendo a los siguientes criterios:

- Los polos de G_{c1} y de G_{c2} deben ser estables.
- Se han fijado el valor máximo de las constantes proporcionales K_{p1} y K_{p2} a un valor 30 y de 15 respectivamente, para evitar una saturación excesiva de los actuadores.
- Se han fijado el valor máximo de las constantes derivativas T_{D1} y T_{D2} a 3, para evitar una saturación excesiva de los actuadores.

El *método de sintonía* consta de los siguientes pasos:

1. Tras fijar el estado de la mar (SSN) y la velocidad del buque (V) nominal, se selecciona la serie temporal de altura de olas correspondiente.
2. Se selecciona un valor inicial θ_0 para el vector de parámetros, que se encuentre comprendido dentro del rango S .
3. Se ejecuta la función de optimización no lineal que minimiza la función de coste (11).
4. La función termina su ejecución cuando converge al valor óptimo θ_{opt} o cuando se supera el número máximo de iteraciones.

La función de optimización requiere en cada una de sus iteraciones evaluar la función de coste un número variable de veces. En cada una de estas evaluaciones se ejecuta una simulación en Simulink.

5 ESTUDIO DE LA DISMINUCION DEL INDICE DE MAREO CON POSICIONES FIJAS DE LOS ACTUADORES.

Dado una pareja de valores de velocidad del buque y estado de la mar, se desea encontrar aquella posición de los actuadores, prescindiendo de control, para la que se obtiene un porcentaje de reducción mayor en el valor máximo del MSI.

Se realizó un barrido de simulaciones, con un paso de 1° , para el rango de posiciones posibles del Tfoil $[-15^\circ, 15^\circ]$ y para el rango de posiciones posibles del Flap $[0^\circ, 15^\circ]$. En la Tabla 2 se muestra las posiciones del Flap y del T-Foil con las que se consigue un mayor porcentaje de reducción en el valor máximo del MSI para distintas velocidades y SSN.

V (nudos)	SSN=4		SSN=5		SSN=6	
	Fl	Tf	Fl	Tf	Fl	Tf
20	5°	12°	1°	-6°	2°	0°
30	0°	-15°	2°	6°	10°	2°
40	2°	-9°	12°	14°	4°	-2°

Tabla 2: Posiciones del Flap (Fl) y del T-Foil (Tf) con las que se consigue un mayor porcentaje de reducción en el valor máximo del MSI.

En la Tabla 3 se muestra el porcentaje de reducción en el valor máximo del MSI/100 que se obtiene simulando con las posiciones de los actuadores de la Tabla 2 a distintas velocidades y SSN.

Velocidad	SSN=4	SSN=5	SSN=6
20	11.68 %	5.56 %	2.56 %
30	11.91 %	7.04 %	3.47 %
40	10.07 %	6.79 %	3.54 %

Tabla 3: Porcentaje de reducción en el valor máximo del MSI/100 que se obtiene simulando con las posiciones de los actuadores de la Tabla 2.

6 RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 4, en la Tabla 5 y en la Tabla 6 se muestran los vectores θ_{opt} obtenidos tras aplicar el método de sintonía al esquema de control propuesto para distintas velocidades y estados de la mar.

Velocidad (nudos)	$\theta_{opt}=[K_{P1}, T_{D1}, K_{P2}, T_{D2}]$
20	[2.5449, 1.1508, 5.5944, 2.568]
30	[12.485, 1.5747, 11.605, 1.8292]
40	[1.1323, 0.4018, 7.7953, 1.2641]

Tabla 4: Vectores θ_{opt} obtenidos para distintas velocidades y estado de la mar 4.

Velocidad (nudos)	$\theta_{opt}=[K_{P1}, T_{D1}, K_{P2}, T_{D2}]$
20	[10.528, 0.8395, 7.6515, 1.9154]
30	[1.0725, 0.1553, 5.3702, 1.6734]
40	[21.185, 0.1, 3.4443, 1.8075]

Tabla 5: Vectores obtenidos θ_{opt} para distintas velocidades y estado de la mar 5.

Velocidad (nudos)	$\theta_{opt}=[K_{P1}, T_{D1}, K_{P2}, T_{D2}]$
20	[5.0414, 0.1249, 14.917, 0.8958]
30	[6.3795, 0.1, 6.2094, 1.3165]
40	[13.585, 0.3396, 3.3321, 1.2171]

Tabla 6: Vectores obtenidos θ_{opt} para distintas velocidades y estado de la mar 6.

En la Tabla 7 se muestra el porcentaje de reducción en el valor máximo del MSI/100 para distintas

velocidades y estados de la mar (SSN) utilizando el esquema de control propuesto.

Velocidad (nudos)	SSN=4	SSN=5	SSN=6
20	32.05 %	17.02 %	10.21 %
30	42.13 %	19.52 %	11.37 %
40	34.92 %	15.59 %	8.12 %

Tabla 7: Porcentajes de reducción del valor máximo del MSI/100 obtenido utilizando el esquema de control propuesto para distintas velocidades y SSN.

Desde la Figura 8 hasta la Figura 16 se representa para las aceleraciones sufridas con distintas velocidades y SSN el MSI/100 que se obtiene mediante simulación para: (a) El proceso sin actuadores. (b) El proceso con los actuadores en posición fija. (c) El proceso controlado.

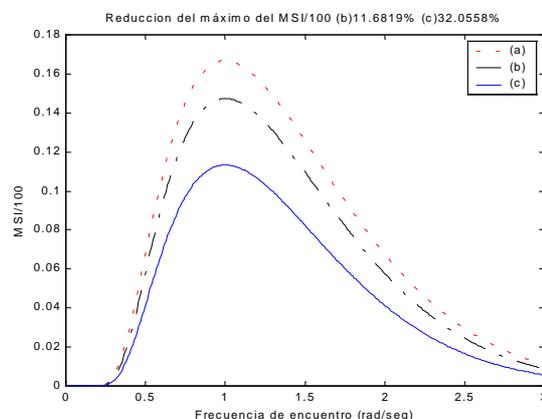


Figura 8: MSI/100 obtenido en: (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija ref_Flap= 5° y ref_Tfoil =12°. (c) el proceso controlado. V=20 nudos SSN=4.

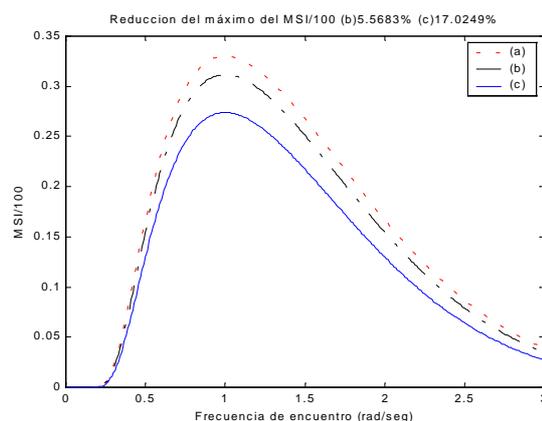


Figura 9: MSI/100 obtenido en: (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija ref_Flap=1° y ref_Tfoil =-6°. (c) el proceso controlado. V=20 nudos SSN=5.

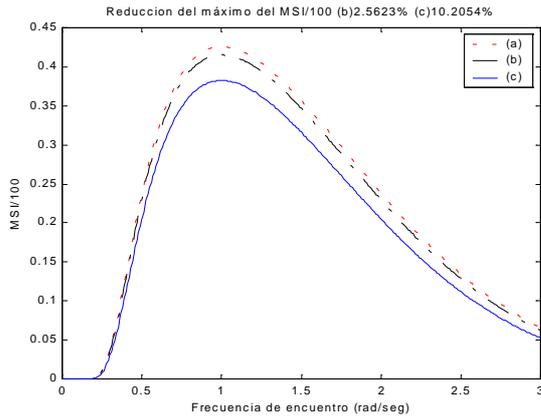


Figura 10: MSI/100 obtenido en: (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $\text{ref_Flap} = 2^\circ$ y $\text{ref_Tfoil} = 0^\circ$. (c) el proceso controlado $V=20$ nudos $\text{SSN}=6$.

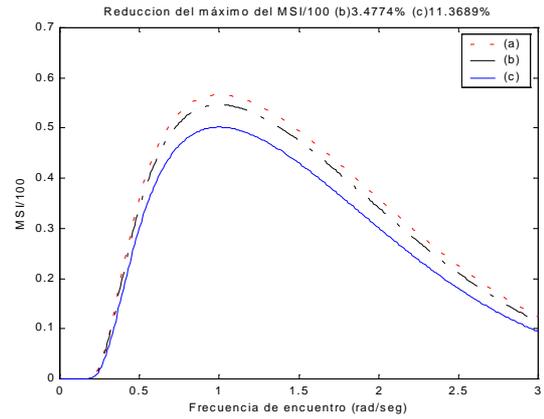


Figura 13: MSI/100 obtenido en: (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $\text{ref_Flap} = 10^\circ$ y $\text{ref_Tfoil} = 2^\circ$. (c) el proceso controlado. $V=30$ nudos $\text{SSN}=6$.

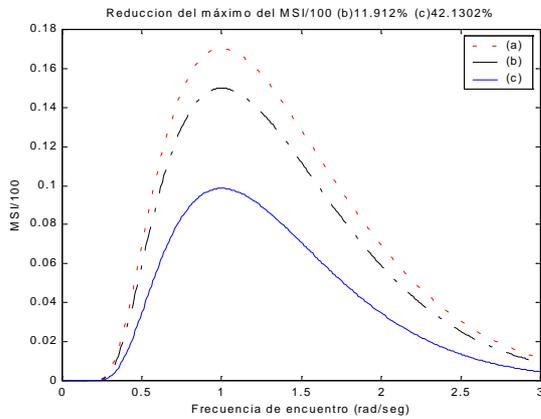


Figura 11: MSI/100 obtenido en: (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $\text{ref_Flap} = 0^\circ$ y $\text{ref_Tfoil} = -15^\circ$. (c) el proceso controlado. $V=30$ nudos $\text{SSN}=4$.

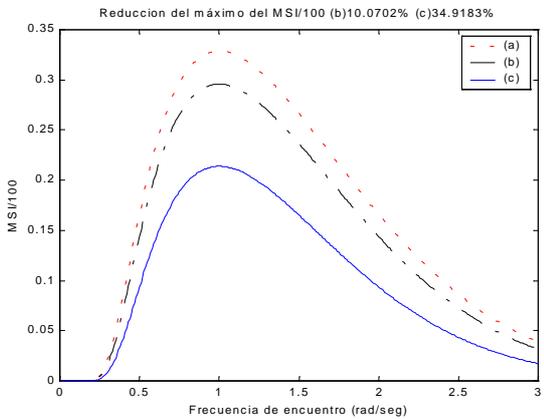


Figura 14: MSI/100 obtenido en: (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $\text{ref_Flap} = 2^\circ$ y $\text{ref_Tfoil} = -9^\circ$. (c) el proceso controlado. $V=40$ nudos $\text{SSN}=4$.

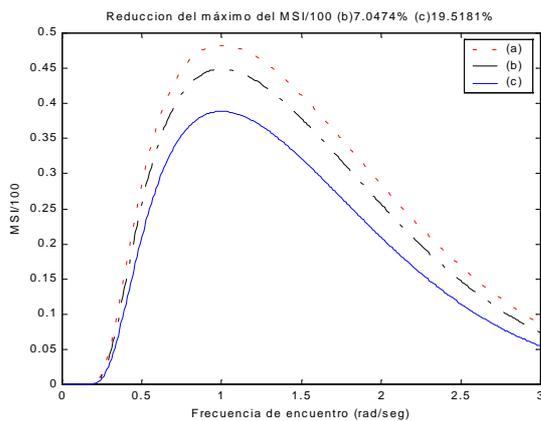


Figura 12: MSI/100 obtenido en: (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $\text{ref_Flap} = 2^\circ$ y $\text{ref_Tfoil} = 6^\circ$. (c) el proceso controlado. $V=30$ nudos $\text{SSN}=5$.

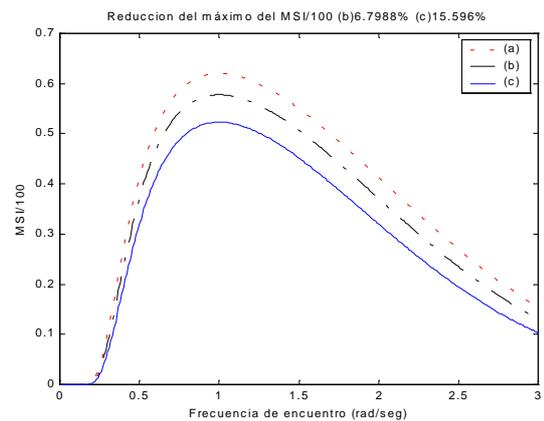


Figura 15: MSI/100 obtenido en: (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $\text{ref_Flap} = 12^\circ$ y $\text{ref_Tfoil} = 14^\circ$. (c) el proceso controlado. $V=40$ nudos $\text{SSN}=5$.

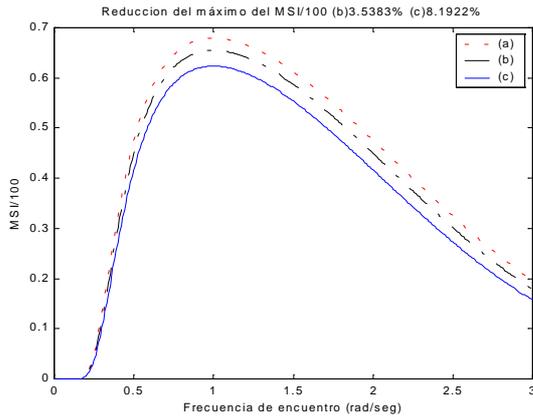


Figura 16: MSI/100 obtenido en: (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija ref_Flap= 4° y ref_Tfoil = -2°. (c) el proceso controlado. V=40 nudos SSN=6.

7 CONCLUSIONES

En este informe se ha presentado el diseño de un control PD sobre el movimiento de arfada y el movimiento de cabeceo en un buque de alta velocidad a las velocidades de 20, 30 y 40 nudos y estado de la mar 4, 5 y 6. Con este diseño se ha conseguido una disminución de las aceleraciones verticales que sufre el buque y por consiguiente del MSI (motion sickness incidence).

Los parámetros obtenidos para los controladores G_{C1} y G_{C2} son distintos para cada pareja de valores del estado de la mar y de la velocidad del buque como se puede ver en la Tabla 4, en la Tabla 5 y en la Tabla 6, de esta forma se tiene un esquema de ganancias programadas.

Es posible fijar un mismo vector de parámetros para todos los pares de condiciones de velocidad del buque y estado de la mar, sin que se produzca un empeoramiento excesivo del porcentaje de reducción del valor máximo del MSI/100. Por ejemplo si se toma el vector $\theta = [12.485, 1.5747, 11.605, 1.8292]^T$ que se obtiene para V=30 nudos y SSN=4 y se simula para el resto de velocidades y estados de la mar se obtiene los resultados que se muestran en la Tabla 8.

Velocidad	SSN=4	SSN=5	SSN=6
20	31.99 %	16.86 %	10.15 %
30	42.13 %	14.85 %	10.21 %
40	28.90 %	11.59 %	7.85 %

Tabla 8: Porcentajes de reducción del valor máximo del MSI/100 obtenido utilizando el esquema de control propuesto y fijando $\theta=[12.485, 1.5747, 11.605, 1.8292]^T$ para distintas velocidades y SSN.

En la Tabla 7, se observa que los mayores porcentajes de reducción en el valor del MSI/100 se obtienen para estado de la mar 4 y los menores porcentajes de reducción en el valor del MSI/100 se obtienen para el estado de la mar 6. Esto se debe a que cuanto menor es el estado de la mar menores son las aceleraciones verticales que se inducen en el plano vertical causantes del mareo y la acción de los actuadores es más efectiva al tener que compensar unas fuerzas y momentos inducidos por el oleaje menores.

La saturación de los actuadores aumenta conforme aumenta el estado de la mar, ya que al aumentar el estado de la mar mayores son las fuerzas y momentos inducidos en el plano vertical por el oleaje y mayores deben ser las fuerzas y momentos que ejerzan los actuadores.

De la comparación de la Tabla 3 con la Tabla 7 se deduce la conveniencia de aplicar una estrategia de control. El porcentaje de reducción en el valor máximo del MSI/100 es mayor si se utiliza el esquema de control propuesto que si se dejan los actuadores en una posición fija.

El comportamiento fuertemente perturbado del proceso a controlar impide la utilización de gran parte de los métodos clásicos de sintonía de controladores PD, por eso se ha utilizado un método de sintonía basado en la optimización de una función de coste no lineal que simula el proceso utilizando como entrada las series temporales de oleaje que fueron obtenidas en el CEHIPAR.

El esquema de control propuesto es una primera aproximación al problema de obtener una reducción en el índice de mareo. En esta misma línea de diseño se puede probar a utilizar controladores basados en redes de primer orden, redes de segundo orden, etc.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado bajo el proyecto de la CICYT :TAP97-0607

Referencias

- [1] J. Aranda, J.M. de la Cruz, J.M. Díaz, B. de Andrés, P. Ruipérez, J.M. Girón. (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.
- [2] J. Aranda, J.M. de la Cruz, B. de Andres, J.M. Díaz, S. Estebán, J.M. Girón, L. Grau, J.A. López, P.Ruipérez. (1999) *Datos utilizados en la*

- identificación de modelos lineales de la dinámica vertical del buque TF-120*. Informe técnico nº CRIBAV-00-01. Dpt. Inf. y Aut. UNED Proyecto TAP 97-0607-C03-02.(www.dia.uned.es/cribav/)
- [3] J. Aranda, J.M. de la Cruz, B. de Andres, J.M. Díaz, S. Estebán, J.M. Girón, L. Grau, J.A. López, P.Ruipérez. (1999) *Identificación de modelos lineales continuos para la dinámica vertical del buque TF-120 (mediante algoritmos genéticos y mínimos cuadrados no lineales)*. Informe técnico nº CRIBAV-00-02. Dpt. Inf. y Aut. UNED. Proyecto TAP 97-0607-C03-02.(www.dia.uned.es/cribav/)
- [4] J. Aranda, J.M. de la Cruz, J.M. Díaz, P. Ruipérez. (1999) *Identificación de modelos lineales para la dinámica vertical del buque TF-120*. Informe técnico nº CRIBAV-02-01. Dpt. Inf. y Aut. UNED. Proyecto TAP 97-0607-C03-02.(www.dia.uned.es/cribav/)
- [5] J. Aranda, J.M. de la Cruz, J.M. Díaz, P. Ruipérez. (1999) *Identificación de modelos lineales continuos con intervalos de confianza para la dinámica vertical del buque TF-120*. Informe técnico nº CRIBAV-02-02. Dpt. Inf. y Aut. UNED. Proyecto TAP 97-0607-C03-02.(www.dia.uned.es/cribav/).
- [6] Bristol, E. H. (1966): "*On a new measure of interactions for multivariable process control*". IEEE Trans. Auto. Cont., AC-11 ;pp.133-134.
- [7] J.M. de la Cruz. *Evaluación* (2000) Informe técnico nº CRIBAV-01-04. Dpt. Arq. Comp. y Aut. U. Complutense. Proyecto TAP 97-0607-C03-01.(www.dia.uned.es/cribav/).
- [8] J.M. de la Cruz, 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.
- [9] S. Esteban, J.M. Girón-Sierra, 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*. 5th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Crafts MCMC2000. Aalborg.
- [10] S. Esteban, J.M. Girón, J.M. de la Cruz. *Modelado de actuadores*.(1999) Informe técnico nº CRIBAV-01-03. Dpt. Arq. Comp. y Aut. U.
- Complutense Proyecto TAP 97-0607-C03-01.(www.dia.uned.es/cribav/)
- [11] A.R.J.M. Lloyd. (1989) *Seakeeping. Ship Behaviour in Rough Weather*. Ellis Horwood,
- [12] Niederlinski, A. (1971) : "*A heuristic Approach to the design of linear multivariable interacting control systems*". Automática, Vol. 7, pp. 691-701