



CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

DOCUMENTO N°: **CRIBAV-02-03**

Fecha: **11/09/2000**

Código SubProyecto: **TAP97-0607-C03-02**

TÍTULO DEL DOCUMENTO

DISMINUCION DEL INDICE DE MAREO MEDIANTE UN CONTROL PD SOBRE HEAVE Y PITCH EN EL BUQUE TF-120

Autores:

Joaquín Aranda
Jesús Manuel De La Cruz
Jose Manuel Díaz
Pablo Ruipérez

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

DOCUMENTO N°: **CRIBAV-02-03**

Fecha: **11/09/2000**

Código SubProyecto: **TAP97-0607-C03-02**

TÍTULO DEL DOCUMENTO

DISMINUCION DEL INDICE DE MAREO MEDIANTE UN CONTROL PD SOBRE HEAVE Y PITCH EN EL BUQUE TF-120

Autores:

Joaquín Aranda
Jesús Manuel De La Cruz
Jose Manuel Díaz
Pablo Ruipérez

Grupo: UNED

Responsable del Grupo: Joaquín Aranda

Responsable del Informe: Joaquín Aranda

SubProyecto: TAP97-0607-C03-02

Version: 2

Lista y Filiación de Autores:

Joaquín Aranda (2)
Jesús Manuel De La Cruz (1)
Jose Manuel Díaz (2)
Pablo Ruipérez (2)

(1) Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática. Facultad de Ciencias Físicas. U. Complutense de Madrid

(2) Departamento de Informática y Automática. Facultad de Ciencias. UNED

Lista de distribución:

Jesús Manuel De la Cruz García	jmcruz@eucmax.sim.ucm.es
Jose María Girón Sierra	gironsi@eucmax.sim.ucm.es
Bonifacio De Andres Toro	deandres@eucmax.sim.ucm.es
Jose Antonio López Orozco	jalo@eucmax.sim.ucm.es
Segundo Esteban San Román	segundo@eucmos.sim.ucm.es
Matilde Santos Peña	msantos@eucmax.sim.ucm.es
Joaquín Aranda Almansa	jaranda@dia.uned.es
Pablo Ruipérez García	pruip@dia.uned.es
Luis Grau Fernández	lgrau@dia.uned.es
José Luis Fernández Marrón	jlmarron@dia.uned.es
José Sánchez Moreno	jsanchez@dia.uned.es
Francisco Jesús Velasco	velasco@teisa.unican.es

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Agradecimientos:

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

Resumen:

En este informe se presenta el diseño de un control PD sobre heave y pitch, con el objetivo de disminuir el índice de mareo (MSI) en el buque de alta velocidad TF-120. Se describe el método de sintonía utilizado para ajustar los controladores. 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.

CONTENIDO

1. INTRODUCCION	1
2. MODELOS UTILIZADOS	1
2.1 MODELOS LINEALES DE LA DINAMICA VERTICAL DE UN BUQUE DE ALTA VELOCIDAD.....	1
2.2 MODELO DE LOS ACTUADORES	3
2.3 MODELO DEL PROCESO	3
2.3.1 ESTUDIO DE LA INTERACCION ENTRE LAS VARIABLES DEL PROCESO.....	4
2.4 MODELO DE LA RED DE DESACOPLO.....	7
3. ESPECIFICACIONES	7
4. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES	9
4.1 ESQUEMA DE CONTROL UTILIZADO.....	9
4.2 SINTONIA DE LOS CONTROLADORES.....	10
5. ESTUDIO DE LA DISMINUCION DEL MSI CON POSICIONES FIJAS DE LOS ACTUADORES...11	11
6. RESULTADOS OBTENIDOS.....	12
6.1 VELOCIDAD 20 NUDOS.....	14
6.1.1 ESTADO DE LA MAR 4.....	14
6.1.2 ESTADO DE LA MAR 5.....	17
6.1.3 ESTADO DE LA MAR 6.....	21
6.2 VELOCIDAD 30 NUDOS.....	24
6.2.1 ESTADO DE LA MAR 4.....	24
6.2.2 ESTADO DE LA MAR 5.....	28
6.2.3 ESTADO DE LA MAR 6.....	31
6.3 VELOCIDAD 40 NUDOS.....	35
6.3.1 ESTADO DE LA MAR 4.....	35
6.3.2 ESTADO DE LA MAR 5.....	38
6.3.3 ESTADO DE LA MAR 6.....	42
7. CONCLUSIONES.....	45
APENDICE A : MODELOS LINEALES DE LA DINAMICA VERTICAL DEL BUQUE DE ALTA VELOCIDAD TF-120.....	47
A.1 VELOCIDAD 20 NUDOS.....	47
MODELO G_{1H}	47
MODELO G_{2H}	47
MODELO G_{1P}	47
MODELO G_{2P}	47
A.2 VELOCIDAD 30 NUDOS.....	48
MODELO G_{1H}	48
MODELO G_{2H}	48
MODELO G_{1P}	48
MODELO G_{2P}	48

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

A.3 VELOCIDAD 40 NUDOS.....	49
MODELO G_{1H}	49
MODELO G_{2H}	49
MODELO G_{1P}	49
MODELO G_{2P}	49
APENDICE B : MODELOS LINEALES PARA CONTROL EN POSICION DE LOS ACTUADORES. .50	
B.1 VELOCIDAD 20 NUDOS.....	50
B.2 VELOCIDAD 30 NUDOS.....	51
B.3 VELOCIDAD 40 NUDOS.....	51
APENDICE C : MODELO LINEAL DEL PROCESO52	
C.1 VELOCIDAD 20 NUDOS.	53
C.2 VELOCIDAD 30 NUDOS.....	54
C.3 VELOCIDAD 40 NUDOS.....	55
APENDICE D : DESCOMPOSICION EN VALORES SINGULARES.56	
APENDICE E: FRECUENCIA DE ENCUENTRO.....57	
APENDICE F: FUNCIONES PROGRAMADAS EN MATLAB59	
F.1 CAL_MSIM.....	60
F.2 CAL_RGAM.....	62
F.3 COSTE.M.....	62
F.4 GRAFOS.M.....	63
F.5 IMAREO.M.....	65
F.6 PREPARAR.M.....	65
F.7 SELECCION_OLA.M.....	66
F.8 SINTONIZANDO.M.....	66
F.9 SISTEMA.M.....	67
BIBLIOGRAFIA.....68	

Versión: 2

Fecha: 11/09/2000

SubProy.: TAP97-0607-C03-02

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

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: roll, pitch y heave.

El amortiguamiento en el movimiento de roll, es fácil de conseguir, no ocurre así con los movimientos de pitch y de heave. 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 los movimientos de pitch y de heave.

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] 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.

En este informe se presenta el diseño de un control de posición implementado mediante dos controladores PD, para distintas velocidades y distintos estados de la mar sobre heave y pitch. Con este esquema se ha producido una disminución 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 pitch, fuerza heave, movimiento de pitch y movimiento heave 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 heave (kN).

$G_{2H}(s)$ es la función de transferencia que tiene como entrada la fuerza heave (kN) y como salida el movimiento vertical de heave (m).

$G_{1P}(s)$ es la función de transferencia que tiene como entrada la altura de olas (m) y como salida el momento pitch (kN·m)

$G_{2P}(s)$ es la función de transferencia que tiene como entrada el momento pitch (kN·m) y como salida el movimiento pitch (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 fuerza heave y momento pitch 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 2.1. En el apéndice A se muestran las expresiones de las funciones de transferencia G_{1H} , G_{2H} , G_{1P} y G_{2P} ; y de las constantes K_1 y K_2 para las distintas velocidades.

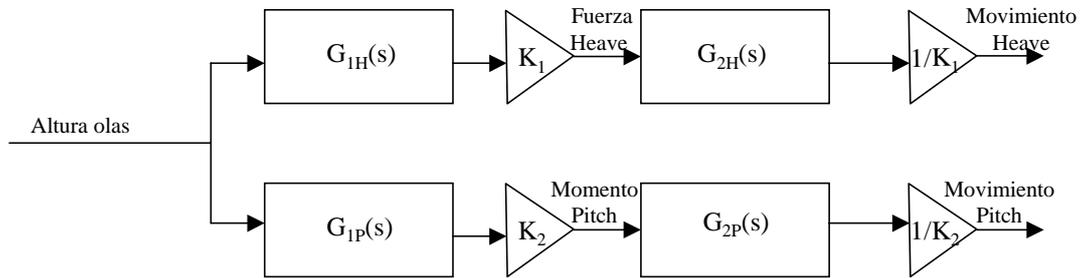


Figura 2.1: Diagrama de bloques del modelo de la dinámica vertical del buque.

Para el caso del filtro G_{2H} al tener el mismo orden en el numerador y en el denominador, daba problemas en las simulaciones con Simulink por lo que fue necesario multiplicarle por el filtro G_{corr} :

$$G_{corr} = \frac{100}{s + 100} \quad (2.1)$$

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 :

$$G_{1He} = K_1 \cdot G_{1H} \quad G_{2He} = \frac{G_{2H}}{K_1} \cdot G_{corr} \quad G_{1Pe} = K_2 \cdot G_{1P} \quad G_{2Pe} = \frac{G_{2P}}{K_2} \quad (2.2)$$

es posible dibujar el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 2.2 que incluye dos entradas procedentes de los actuadores, donde :

- F_A es la fuerza heave ejercida por los actuadores.
- M_A es el momento pitch ejercido por los actuadores.
- F_o es la fuerza heave ejercida por el oleaje.
- M_o es el momento pitch ejercido por el oleaje.

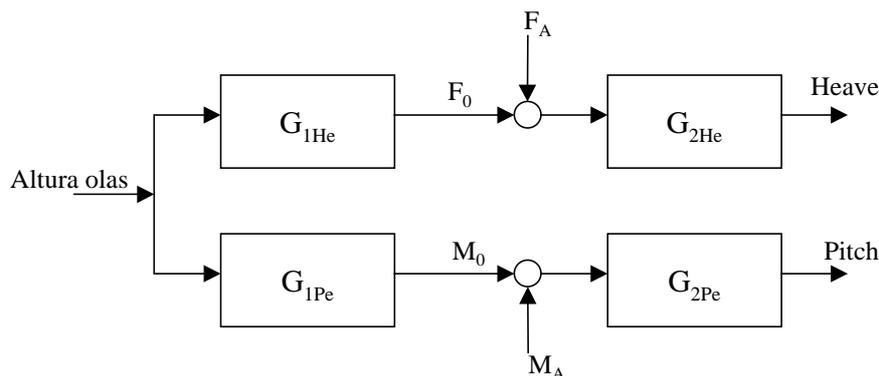


Figura 2.2: Diagrama de bloques del modelo de la dinámica vertical del buque incluyendo las entradas F_A y M_A procedentes de los actuadores.

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 2.3

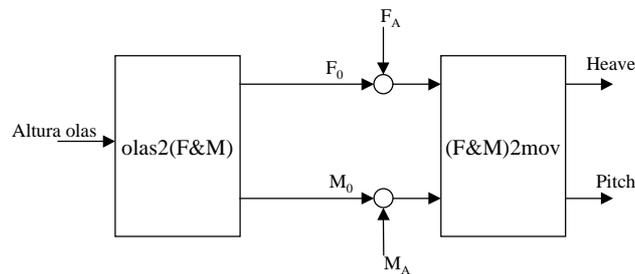


Figura 2.3: Diagrama de bloques agrupados del modelo de la dinámica vertical del buque incluyendo las entradas F_A y M_A .

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. En el apéndice B se muestran las funciones de transferencia del modelo lineal de los actuadores para el caso de control en posición

Básicamente el modelo de actuadores es un modelo no lineal con cuatro entradas (referencia posición o velocidad Flap, referencia posición o velocidad T-Foil, heave y pitch) y dos salidas (F_A y M_A), como se muestra en la Figura 2.4

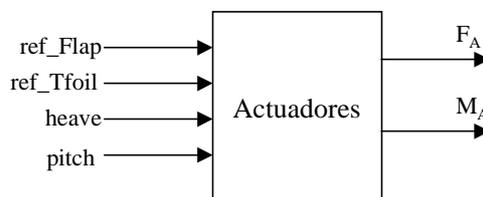


Figura 2.4: Modelo no lineal de los actuadores

2.3 MODELO DEL PROCESO

Por modelo del proceso se entenderá el modelo de la dinámica vertical del buque Tf-120 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 (heave y pitch). El diagrama de bloques del modelo del proceso se muestra en la Figura 2.5 y en detalle en la Figura 2.6.

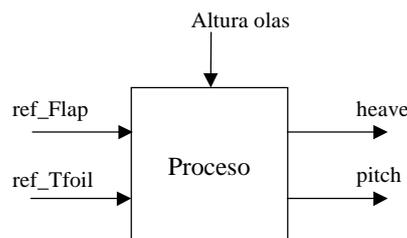


Figura 2.5: Diagrama de bloques del modelo del proceso

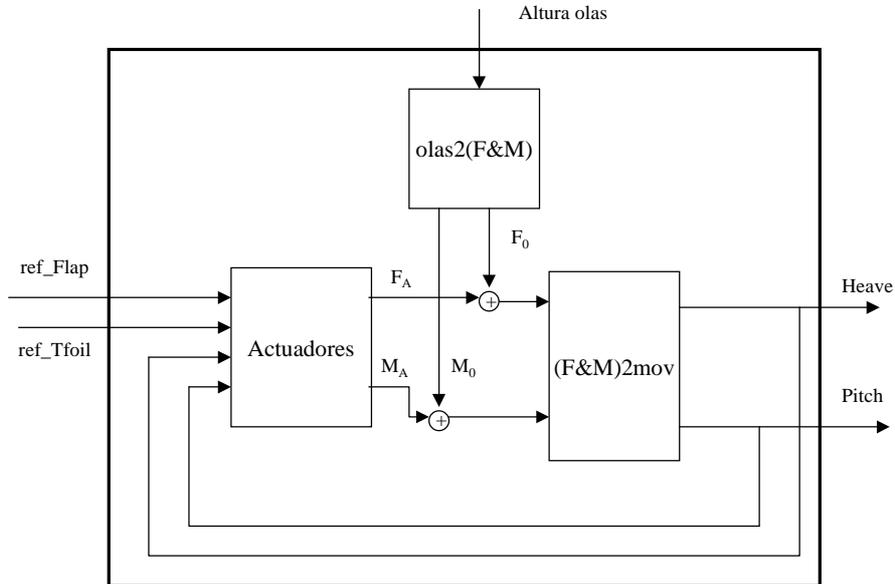


Figura 2.6: Detalle del diagrama de bloques del modelo del proceso

2.3.1 ESTUDIO DE LA INTERACCION 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],[12]) 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 [9] y [10] para control en posición, que es válido siempre que no se esté en saturación, es posible representar al proceso mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 heave(s) &= G_{11}(s) \cdot ref_Flap(s) + G_{12}(s) \cdot ref_Tfoil(s) + G_{13}(s) \cdot olas(s) \\
 pitch(s) &= G_{21}(s) \cdot ref_Flap(s) + G_{22}(s) \cdot ref_Tfoil(s) + G_{23}(s) \cdot olas(s)
 \end{aligned} \quad (2.3)$$

En el apéndice C, se muestran las expresiones analíticas de las funciones de transferencia $G_{11}, G_{12}, G_{13}, G_{21}, G_{22}$ y G_{23} . También aparecen las expresiones numéricas de estas funciones de transferencia para las velocidades 20, 30 y 40 nudos.

En la Figura 2.7 se muestra el diagrama de bloques del proceso linealizado

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

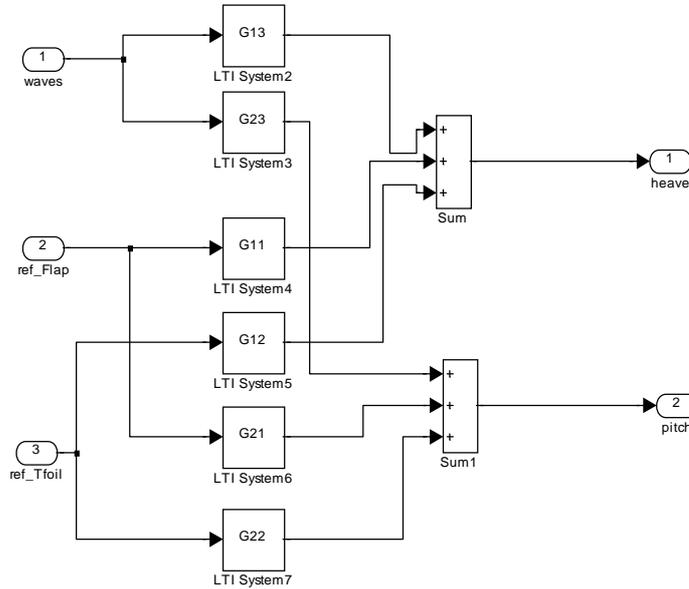


Figura 2.7: Diagrama de bloques del proceso linealizado

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

$$\begin{aligned}
 heave(s) &= G_{11}(s) \cdot ref_Flap(s) + G_{12}(s) \cdot ref_Tfoil(s) \\
 pitch(s) &= G_{21}(s) \cdot ref_Flap(s) + G_{22}(s) \cdot ref_Tfoil(s)
 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Las variables manipulables son ref_Flap y ref_Tfoil . Las variables controladas son $heave$ y $pitch$. La matriz RGA viene dada por la sentencia de Matlab [12]:

$$RGA = SSGM * (inv(SSGM))' \quad (2.5)$$

donde SSGM es la matriz de ganancias en estado estacionario.

Para el caso de velocidad 30 nudos, utilizando la función **sistema.m** (ver Apéndice F) se obtienen las expresiones de la SSGM y de la RGA:

$$SSGM = \begin{bmatrix} 0.0025381 & -0.002438 \\ 0.00038324 & 0.00051641 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$RGA = \begin{bmatrix} 0.58379 & 0.41621 \\ 0.41621 & 0.58379 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

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 $heave$.
- 2) La variable manipulable ref_Tfoil se asociará con la variable controlada $pitch$.

Además aplicando el teorema de Niederlinski [13] se puede comprobar que estos emparejamientos no provocan inestabilidad en lazo cerrado.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

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.

Otra medida de la interacción entre las variables de un proceso viene dada por el número de condición [12], que se obtienen de la descomposición en valores singulares SVD (ver Apéndice D) de la matriz de ganancias en estado estacionario SSGM.

Si se realiza la descomposición en valores singulares de la matriz SSGM del proceso para velocidad 30 nudos, expresada en (2.6) se obtiene :

$$U = \begin{bmatrix} 0.9997 & -0.0239 \\ -0.0239 & -0.9997 \end{bmatrix} \quad \Sigma = \begin{bmatrix} 0.0035205 & 0 \\ 0 & 0.0006377 \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} 0.7181 & -0.6959 \\ -0.6959 & -0.7181 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

siendo el número de condición (ver Apéndice D) :

$$\gamma = 0.0035205 / 0.0006377 = 5.5204 \quad (2.9)$$

En general, cuanto más alejado de la unidad esté el número de condición mayor es la sensibilidad del proceso a la dirección de las entradas y por tanto mayor es la interacción entre éstas y el conjunto de salidas

En la Figura 2.8 se representa el número de condición del proceso en función de la frecuencia de encuentro.

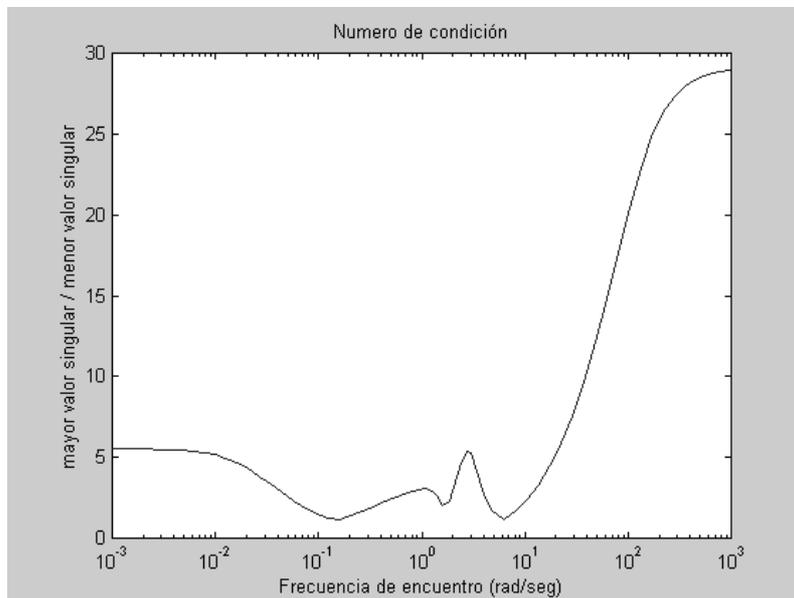


Figura 2.8: Número de condición del proceso en función de la frecuencia de encuentro.

En la Figura 2.8 se puede ver como en estado estacionario γ toma el valor 5.52, a partir de $\omega_e=0.01$ rad/seg comienza a disminuir hasta alcanzar sobre $\omega_e=0.1$ rad/seg un valor mínimo cercano a 1. A continuación γ va aumentando su valor hasta alcanzar un máximo local de aproximadamente 2.5 en $\omega_e=1$ rad/seg. Disminuye ligeramente y alcanza otro máximo local cercano a 5 en $\omega_e=2$ rad/seg, para volver a disminuir hasta alcanzar un mínimo cercano a 1 en $\omega_e=5$ rad/seg. A partir de este punto γ comienza un aumento hasta alcanzar un valor estacionario de 29 en $\omega_e=1000$ rad/seg.

Del análisis anterior se puede concluir que hasta $\omega_b=20$ rad/seg. la interacción no es excesivamente elevada. A partir de $\omega_b=1000$ rad/seg. la interacción aumenta considerablemente.

2.4 MODELO DE LA RED DE DESACOPLO.

En la sección 2.3.1 se ha puesto de manifiesto la necesidad de incluir en el diseño una red de desacoplo. En la Figura 2.9 se muestra la red de desacoplo añadida al proceso.

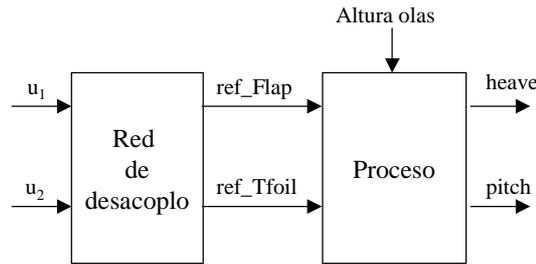


Figura 2.9: Red de desacoplo añadida al proceso.

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

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} \\ w_{21} & w_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -G_{12} \\ -G_{21} & G_{11} \\ G_{22} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Tiene dos entradas u_1 y u_2 para conectar 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 los movimientos de pitch y de heave 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

$$acv40(t_i) = a_{vH}(t_i) + a_{vP}(t_i) = \frac{d^2 heave(t_i)}{dt^2} - 40 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \frac{d^2 pitch(t_i)}{dt^2} \quad (3.1)$$

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

$$J = \overline{acv40} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |acv40(t_i)| \quad (3.2)$$

En la Tabla 3.1 se muestran los valores de J obtenido mediante la simulación (ver Apéndice F) de la dinámica vertical del buque sin actuadores a distintas velocidades y SNN

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Tabla 3.1 : Valores de J obtenidos mediante la simulación de la dinámica vertical del buque sin actuadores a distintas velocidades y SNN.

Velocidad	SSN=4	SSN=5	SSN=6
20	0.61025	0.9918	1.2522
30	0.6179	1.4293	1.7341
40	0.9886	1.9709	2.2839

Como consecuencia directa de la reducción en el valor de J se producirá una disminución del MSI. En la Tabla 3.2 se muestra el valor máximo del MSI/100, que se denotará por $MSI_{max}/100$, obtenido mediante la simulación del barco sin actuadores a distintas velocidades y SNN.

Tabla 3.2 : Valor del $MSI_{max}/100$ obtenidos mediante la simulación de la dinámica vertical del buque sin actuadores a distintas velocidades y SNN.

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

En la Tabla 3.3 se muestra el valor del MSI/100 evaluado en la frecuencia de encuentro dominante (ver apéndice D), que se denotará por $MSI_{SSN}/100$, obtenido mediante la simulación del barco sin actuadores a distintas velocidades y SNN

Tabla 3.3: Valor del $MSI_{SSN}/100$ obtenidos mediante la simulación de la dinámica vertical del buque sin actuadores a distintas velocidades y SNN.

Velocidad	SSN=4	SSN=5	SSN=6
20	0.11764	0.32957	0.38272
30	0.076861	0.46215	0.55459
40	0.11548	0.56168	0.67906

Añadiendo los actuadores descritos en [9] y [10] y utilizando el control adecuado, se debe reducir en la medida de lo posible el valor de J y por tanto del $MSI_{max}/100$ y del $MSI_{SSN}/100$, con respecto al caso cuando no se consideran los actuadores.

4. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES

4.1 ESQUEMA DE CONTROL UTILIZADO.

Se utiliza un esquema de control sobre pitch y heave como el que se muestra en la Figura 4.1:

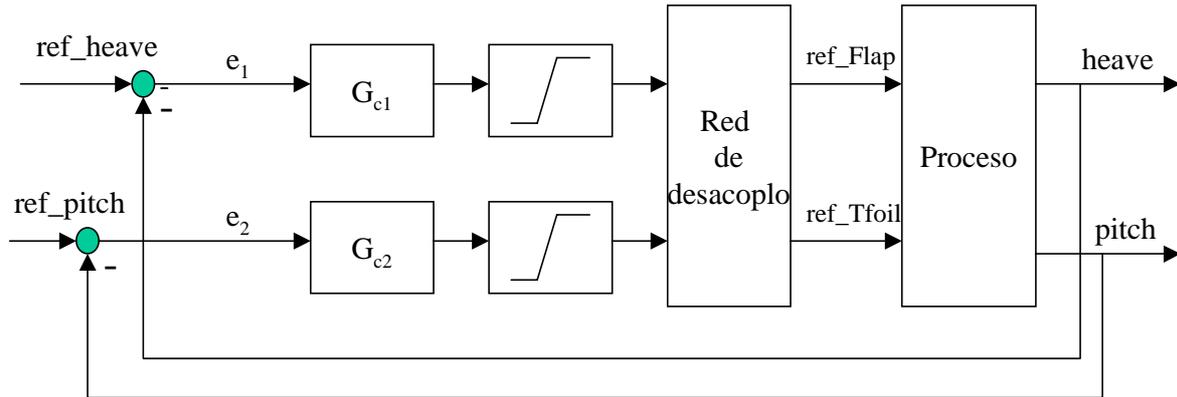


Figura 4.1: Esquema de control utilizado.

De acuerdo con el emparejamiento entre las variables controladas y las variables manipulables deducido del análisis de interacción 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 heave (0 m) y el valor medido del heave. La salida de G_{C1} está comprendida tras pasar por el bloque de saturación en el intervalo $[0^\circ, 15^\circ]$ que son los límites de la posición del Flap (ref_Flap)
- El regulador G_{C2} tiene como entrada el error e_2 que se define como la diferencia entre la referencia para el pitch (0°) y el valor medido del pitch. La salida de G_{C2} está comprendida tras pasar por el bloque de saturación en el intervalo $[-15^\circ, 15^\circ]$ que son los límites de la posición del Tfoil (ref_Tfoil)

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

$$G_c = K_p \left[1 + \frac{T_D s}{\alpha T_D s + 1} \right] \quad (4.1)$$

Para la acción derivativa se ha utilizado un filtro derivativo con $\alpha=0.1$, con lo que operando se obtienen las expresiones de las funciones de transferencia G_{C1} y G_{C2} :

$$G_{C1} = K_{P1} \left[\frac{1 + 1.1T_{D1}s}{0.1T_{D1}s + 1} \right] \quad G_{C2} = K_{P2} \left[\frac{1 + 1.1T_{D2}s}{0.1T_{D2}s + 1} \right] \quad (4.2)$$

El vector de parámetros de los controladores G_{C1} y G_{C2} es:

$$\theta = [K_{P1}, T_{D1}, K_{P2}, T_{D2}]^T \quad (4.3)$$

4.2 SINTONIA DE LOS CONTROLADORES.

La sintonía de los controladores G_{C1} y G_{C2} se realiza minimizando J :

$$J(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |acv40(\theta, t_i)| \quad (4.4)$$

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 .

$$J(\theta_{opt}) = \min_{\theta \in S} J \quad (4.5)$$

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

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.
- Evitar una saturación excesiva de los actuadores.
- Trabajar dentro de lo posible en la zona de frecuencias de encuentro en la que el oleaje posee la energía que excita el sistema $\omega_c = [0.1, 10]$ rad/seg.

De acuerdo con los criterios anteriores estos son los rangos seleccionados para los parámetros de los controladores PD ensayados.

$$S = \{1 \leq K_{P1} \leq 30 ; 0.1 \leq T_{D1} \leq 3 ; 1 \leq K_{P2} \leq 15 ; 0.1 \leq T_{D2} \leq 3 \} \quad (4.6)$$

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 llama a la función **sintonizando.m** que configura los parámetros de la función de optimización no lineal **fmincon.m**¹.
4. Se ejecuta **fmincon.m** que minimizará la función de coste J que está programada en **coste.m**. En cada iteración de **fmincon.m** se requiere evaluar la función J un número variable de veces. En cada evaluación es necesario correr una simulación del esquema Simulink **esquema2PS.mdl** que requiere como entrada la serie temporal de altura de ola seleccionada y que genera la serie temporal $acv40$, con la que se calcula el valor de J .
5. La función **fmincon.m** termina cuando converge al valor óptimo θ_{opt} o cuando se supera el número máximo de iteraciones.

En el apéndice F se muestra el código de las anteriores funciones programadas en Matlab, así como el esquema del modelo Simulink **esquema2PS.mdl**.

¹ Esta función pertenece a la toolbox OPTIM de MATLAB.

5. ESTUDIO DE LA DISMINUCION DEL MSI 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 de J y del MSI.

Se realizó un barrido de simulaciones, con un paso de 1°, para el rango de posiciones posibles del Tfoil [-15°,15°] y para el rango de posiciones posibles del Flap [0°,15°]. En la Tabla 5.1 se muestra los resultados obtenidos en el barrido de posiciones realizado:

Tabla 5.1: Resultados obtenidos en el barrido de posiciones realizado

	Mejor posición [pFlap, pT-foil]	Reducción de J	Reducción del MSI_{max}/100	Reducción del MSI_{SSN}/100
V=20 SSN=4	[5°, 12°]	7.20 %	11.68 %	12.94 %
V=20 SSN=5	[1°, -6°]	4.61 %	5.56 %	5.57 %
V=20 SSN=6	[2°, 0°]	2.53 %	2.56 %	2.76 %
V=30 SSN=4	[0°, -15°]	7.39 %	11.91 %	14.71 %
V=30 SSN=5	[2°, 6°]	7.58 %	7.04 %	7.32 %
V=30 SSN=6	[10°, 2°]	4.48 %	3.47 %	3.56 %
V=40 SSN=4	[2°, -9°]	8.26 %	10.07 %	14.90 %
V=40 SSN=5	[12°, 14°]	9.70 %	6.79 %	7.70 %
V=40 SSN=6	[4°, -2°]	5.92 %	3.54 %	3.54 %

6. RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 6.1 se muestran los vectores de parámetros θ_{opt} del control PD obtenidos tras aplicar el método de sintonía propuesto a distintas velocidades y SSN.

Tabla 6.1: Vectores de parámetros θ_{opt} del control PD obtenidos tras aplicar el método de sintonía propuesto a distintas velocidades y SSN

	K_{P1}	T_{D1}	K_{P2}	T_{D2}
V=20 SSN=4	2.5449	1.1508	5.5944	2.568
V=20 SSN=5	10.528	0.8395	7.6515	1.1915
V=20 SSN=6	5.0414	0.1249	14.917	0.8958
V=30 SSN=4	12.485	1.5747	11.605	1.8295
V=30 SSN=5	1.0725	0.1553	5.3702	1.6734
V=30 SSN=6	6.3795	0.1	6.2094	1.3165
V=40 SSN=4	1.1323	0.4018	7.7953	1.2641
V=40 SSN=5	21.185	0.1	3.4443	1.8075
V=40 SSN=6	13.585	0.3396	3.3321	1.2171

En la Tabla 6.2 se muestra el valor de J obtenido utilizando un control de tipo PD para distintas velocidades y SSN.

Tabla 6.2: Valor de J obtenido utilizando un control de tipo PD para distintas velocidades y SSN.

	J sin actuadores	J con control	Reducción
V=20 SSN=4	0.6102	0.4882	19.98 %
V=20 SSN=5	0.9918	0.8547	13.82 %
V=20 SSN=6	1.2522	1.1292	9.83 %
V=30 SSN=4	0.6179	0.4531	26.67 %
V=30 SSN=5	1.4293	1.1459	19.83 %
V=30 SSN=6	1.7341	1.5161	12.57 %
V=40 SSN=4	0.9886	0.7165	27.53 %
V=40 SSN=5	1.9709	1.5697	20.36 %
V=40 SSN=6	2.2839	1.9879	12.96 %

En la Tabla 6.3 se muestra el valor del $MSI_{max}/100$ obtenido utilizando un control de tipo PD para distintas velocidades y SSN.

Tabla 6.3: Valor del $MSI_{max}/100$ obtenido utilizando un control de tipo PD para distintas velocidades y SSN.

	MSI_{max}/100 sin actuadores	MSI_{max}/100 con control	Reducción
V=20 SSN=4	0.1668	0.1133	32.05 %
V=20 SSN=5	0.3301	0.2739	17.02 %
V=20 SSN=6	0.4261	0.3826	20.21 %
V=30 SSN=4	0.1703	0.0985	42.13 %
V=30 SSN=5	0.4829	0.3886	19.52 %
V=30 SSN=6	0.5663	0.5085	10.22 %
V=40 SSN=4	0.3289	0.8140	34.92 %
V=40 SSN=5	0.6203	0.5235	15.59 %
V=40 SSN=6	0.6795	0.6237	8.12 %

En la Tabla 6.4 se muestra el valor del $MSI_{SSN}/100$ obtenido utilizando un control de tipo PD para distintas velocidades y SSN.

Tabla 6.4: Valor del $MSI_{SSN}/100$ obtenido utilizando un control de tipo PD para distintas velocidades y SSN.

	MSI_{SSN}/100 sin actuadores	MSI_{SSN}/100 con control	Reducción
V=20 SSN=4	0.1176	0.0760	34.97 %
V=20 SSN=5	0.3296	0.2734	17.05 %
V=20 SSN=6	0.3827	0.3407	10.98 %
V=30 SSN=4	0.0768	0.0389	49.36 %
V=30 SSN=5	0.4621	0.3688	20.19 %
V=30 SSN=6	0.5546	0.4966	10.46 %
V=40 SSN=4	0.1159	0.0601	47.29 %
V=40 SSN=5	0.5617	0.4634	17.50 %
V=40 SSN=6	0.6791	0.6234	8.20 %

En la Tabla 6.5 se comparan las reducciones en el $MSI_{SSN}/100$ obtenidas utilizando como vector de parámetros el obtenido como óptimo para V=30 nudos y SSN=4, que se denotará como θ_{304} , y utilizando el vector óptimo θ_{opt} obtenido para cada velocidad y SSN.

Tabla 6.5: Reducción del $MSI_{SSN}/100$ obtenida con θ_{304} y con θ_{opt}

	Reducción del MSI_{max}/100 con θ_{304}	Reducción del MSI_{max}/100 con θ_{opt}
V=20 SSN=4	31.99 %	32.05 %
V=20 SSN=5	16.86 %	17.02 %
V=20 SSN=6	10.15 %	20.21 %
V=30 SSN=4	42.13 %	42.13 %
V=30 SSN=5	14.85 %	19.52 %
V=30 SSN=6	10.21 %	10.22 %
V=40 SSN=4	28.90 %	34.92 %
V=40 SSN=5	11.59 %	15.59 %
V=40 SSN=6	7.85 %	8.12 %

6.1 VELOCIDAD 20 NUDOS

6.1.1 ESTADO DE LA MAR 4

Los parámetros de los controladores G_{C1} y G_{C2} , que se obtienen tras aplicar el método de sintonía son :

$$K_{P1}= 2.5449 \quad T_{D1}=1.1508 \quad K_{P2}=5.5944 \quad T_{D2}=2.568$$

Las funciones de transferencia G_{C1} y G_{C2} son :

$$G_{C1} = \frac{3.222s + 2.545}{0.1151s + 1} \quad G_{C2} = \frac{15.8s + 5.594}{0.2568s + 1}$$

En la Tabla 6.6 se muestran los ceros y los polos de G_{C1} y de G_{C2}

Tabla 6.6: Ceros y Polos de G_{C1} y G_{C2}

	Ceros	Polos
Gc1	-0.7899	-8.6897
Gc2	-0.354	-3.894

En la Figura 6.1 y la Figura 6.2 se muestra la señal de control generada por G_{C1} y por G_{C2} para la posición del Flap y del Tfoil respectivamente cuando se realiza la simulación del proceso controlado

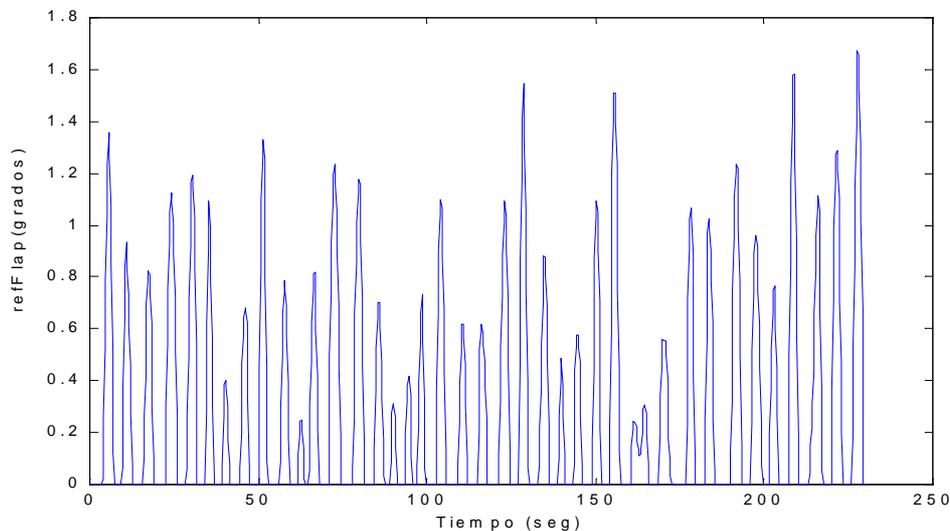


Figura 6.1: Señal de control generada por G_{C1} para la posición del Flap obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

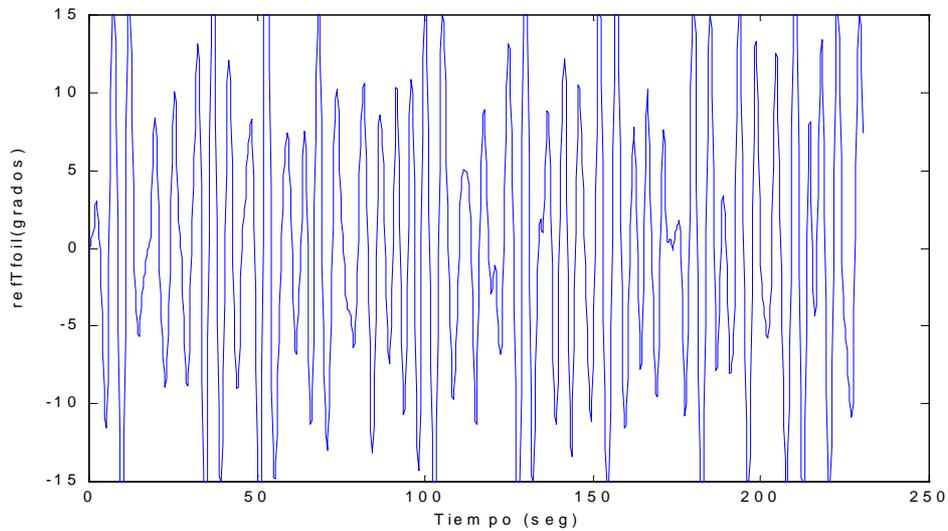


Figura 6.2: Señal de control generada por G_{C2} para la posición del T-foil obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

En la Figura 6.3 se muestra la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m)

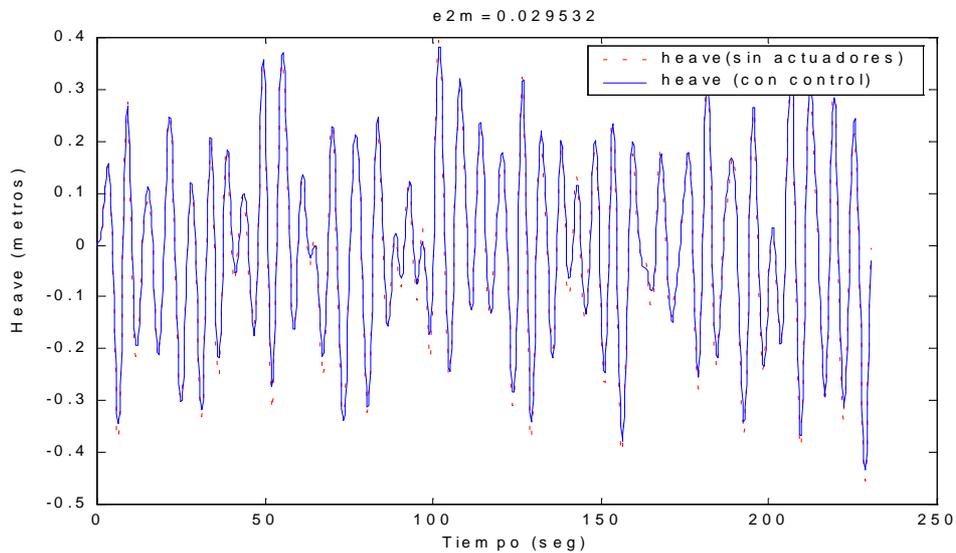


Figura 6.3: Serie temporal del heave del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del heave del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.4 se muestra la serie temporal de pitch que se obtendría al simular al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0°)

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

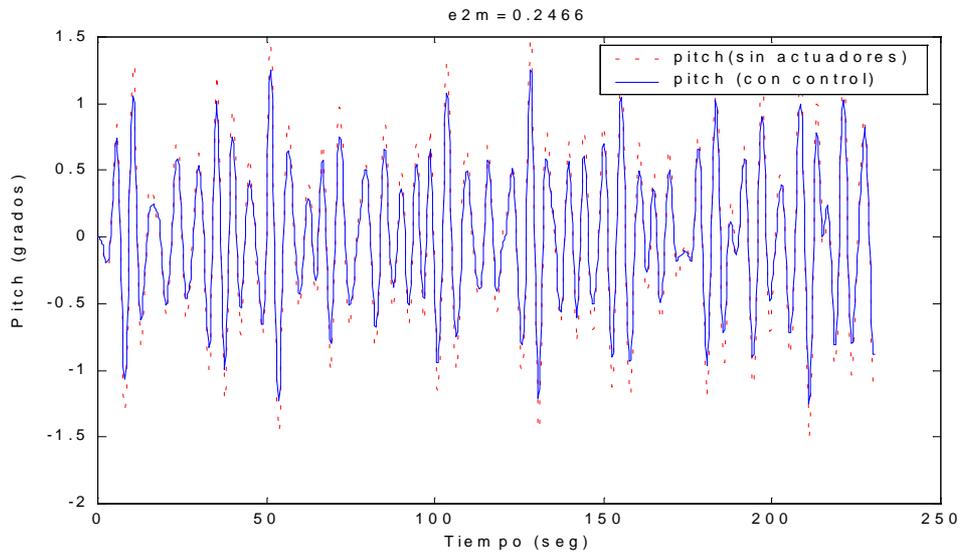


Figura 6.4: Serie temporal del pitch del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del pitch del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.5 se muestra la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m/s^2).

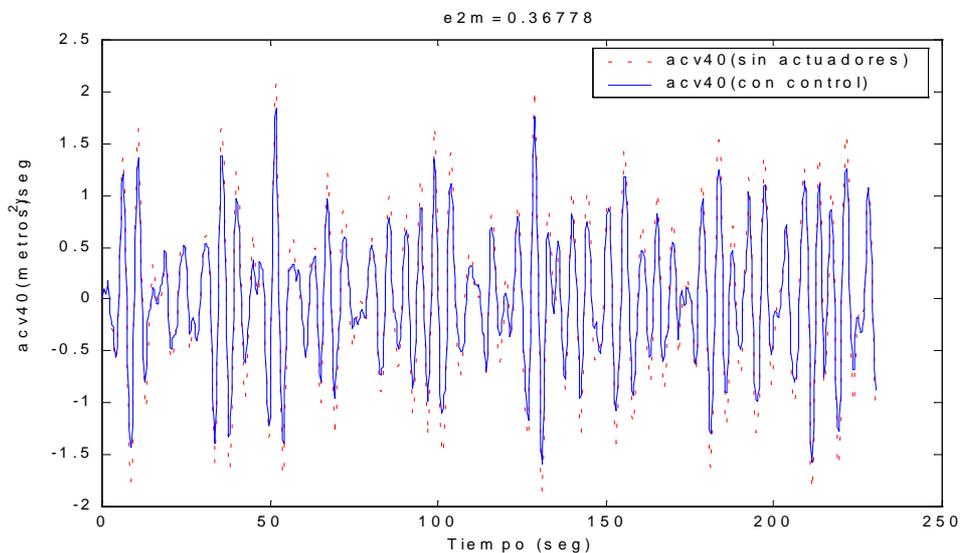


Figura 6.5: Serie temporal de la acv40 del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal de la acv40 del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.6 se muestra en el rango de frecuencias de encuentro $\omega_e \in [0,3]$ rad/seg el MSI/100 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores, el que se obtendría al poner los actuadores en las posiciones fijas de $\text{ref_Flap} = 5^\circ$ y $\text{ref_Tfoil} = 12^\circ$ y el que se obtendría al simular el proceso controlado.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

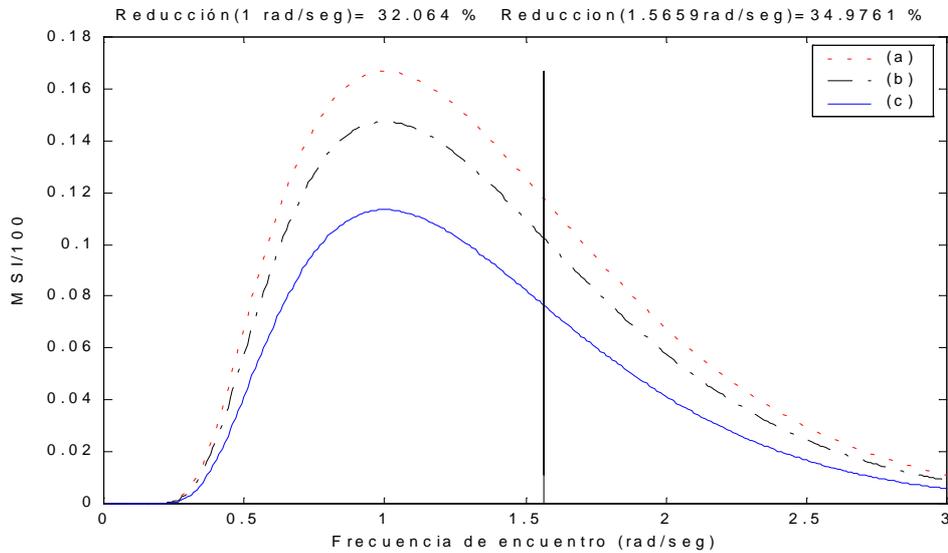


Figura 6.6: MSI/100 obtenido en : (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $ref_Flap= 5^\circ$ y $ref_Tfoil = 12^\circ$. (c) el proceso controlado

6.1.2 ESTADO DE LA MAR 5

Los parámetros de los controladores G_{C1} y G_{C2} , que se obtienen tras aplicar el método de sintonía son :

$$K_{P1}=10.528 \quad T_{D1}=0.8395 \quad K_{P2}=7.6515 \quad T_{D2}=1.9154$$

Las funciones de transferencia G_{C1} y G_{C2} son :

$$G_{C1} = \frac{9.722s + 10.53}{0.0839s + 1} \quad G_{C2} = \frac{16.12s + 7.651}{0.1915s + 1}$$

En la Tabla 6.7 se muestran los ceros y los polos de G_{C1} y de G_{C2}

Tabla 6.7: Ceros y Polos de G_{C1} y G_{C2}

	Ceros	Polos
Gc1	-1.0829	-11.912
Gc2	-0.4746	-5.2209

En la Figura 6.7 y la Figura 6.8 se muestra la señal de control generada por G_{C1} y por G_{C2} para la posición del Flap y del Tfoil respectivamente cuando se realiza la simulación del proceso controlado

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

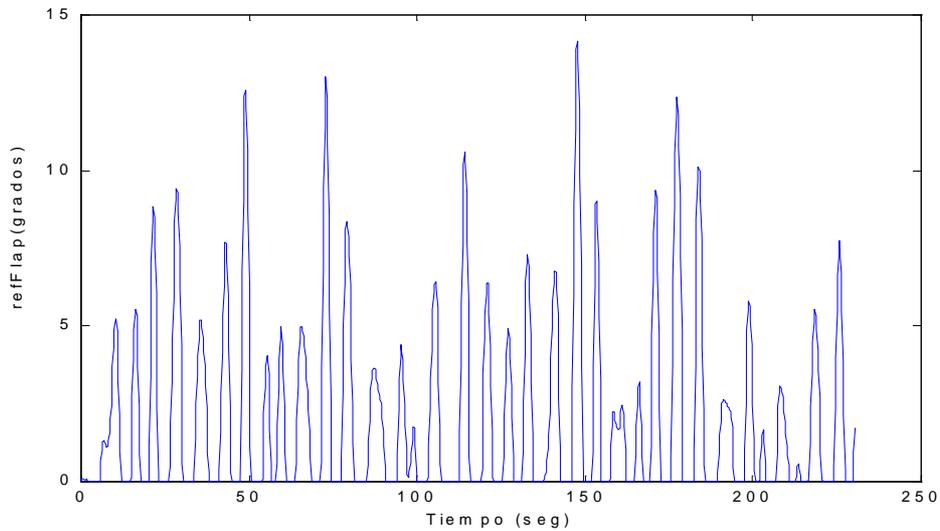


Figura 6.7: Señal de control generada por G_{C1} para la posición del Flap obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

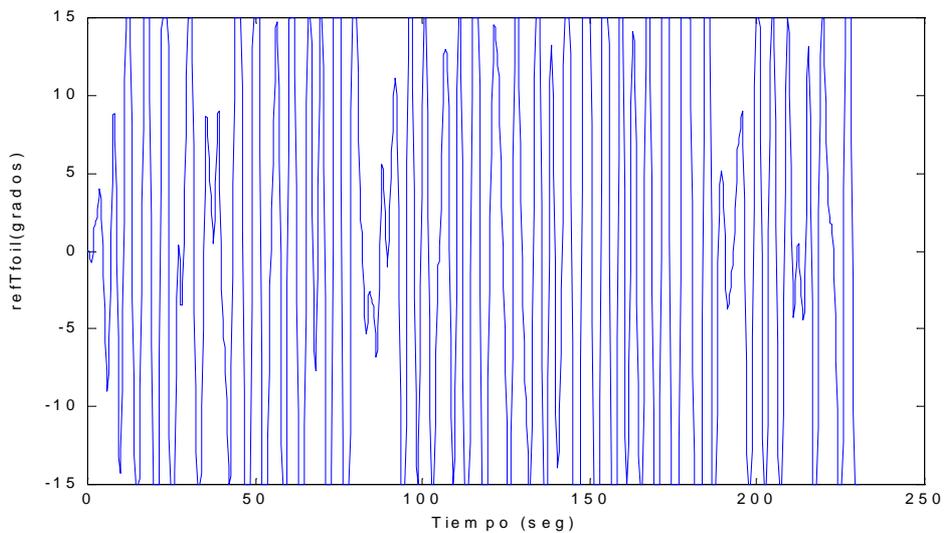


Figura 6.8: Señal de control generada por G_{C2} para la posición del T-foil obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

En la Figura 6.9 se muestra la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráficas se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m)

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

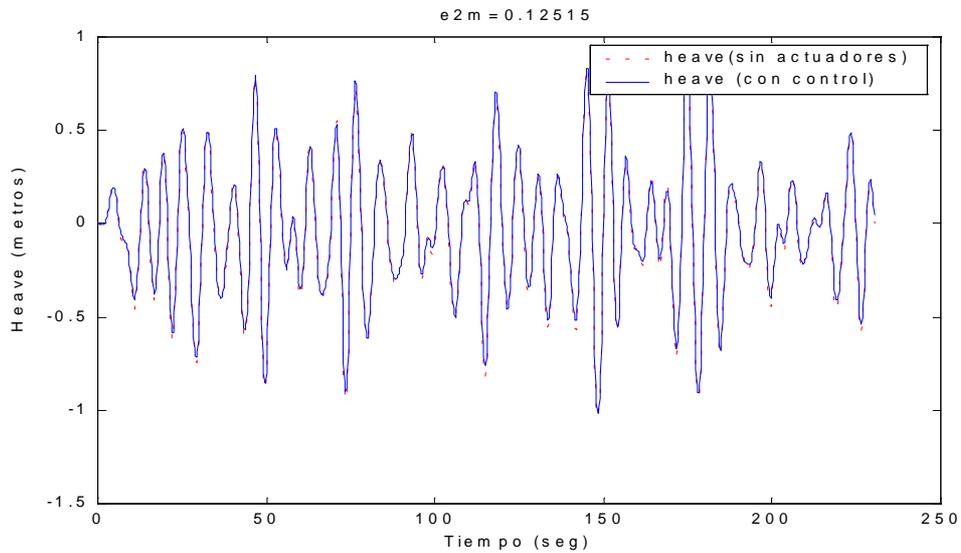


Figura 6.9: Serie temporal del heave del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del heave del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.10 se muestra la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0°)

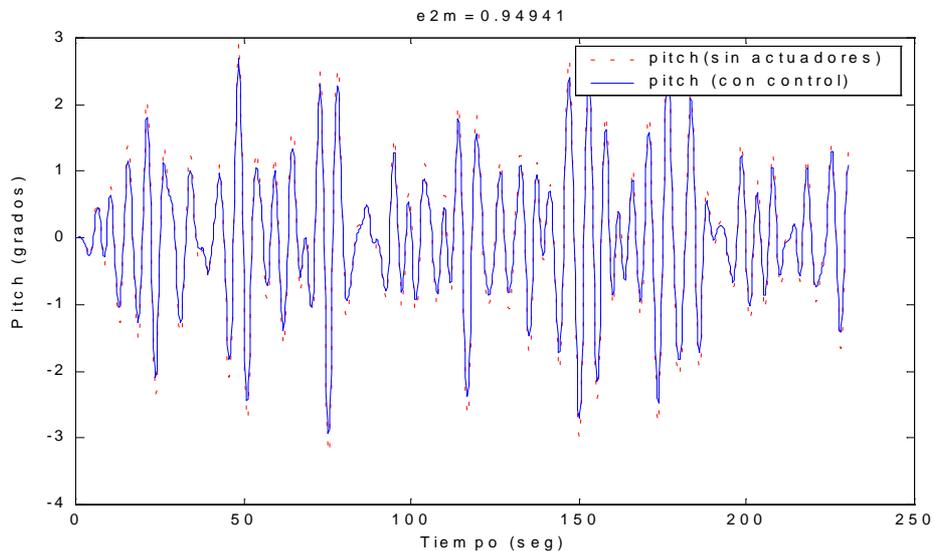


Figura 6.10: Serie temporal del pitch del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del pitch del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.11 se muestra la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m/s^2).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

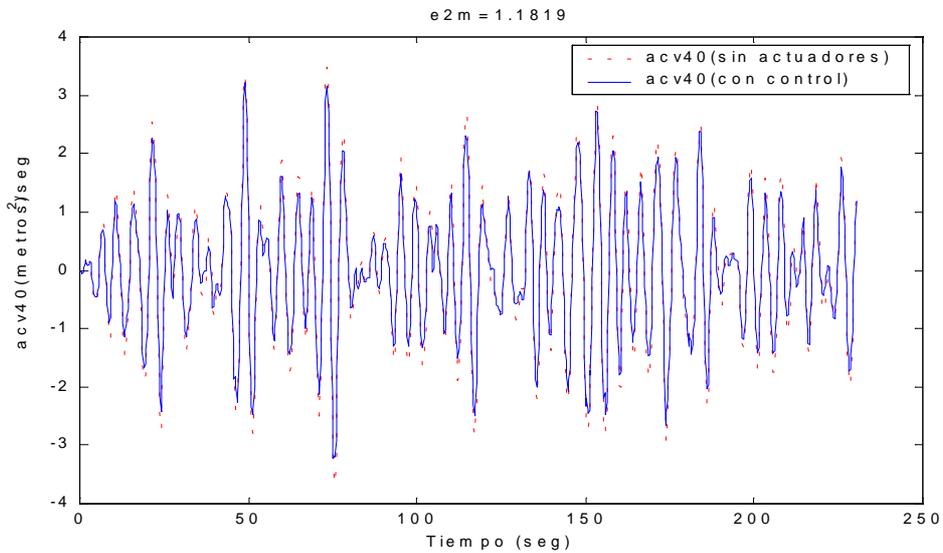


Figura 6.11: Serie temporal de la acv40 del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal de la acv40 del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.12 se muestra el MSI/100 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores, el que se obtendría al poner los actuadores en las posiciones fijas de $ref_Flap=1^\circ$ y $ref_Tfoil=-6^\circ$ y el que se obtendría al simular el proceso controlado.

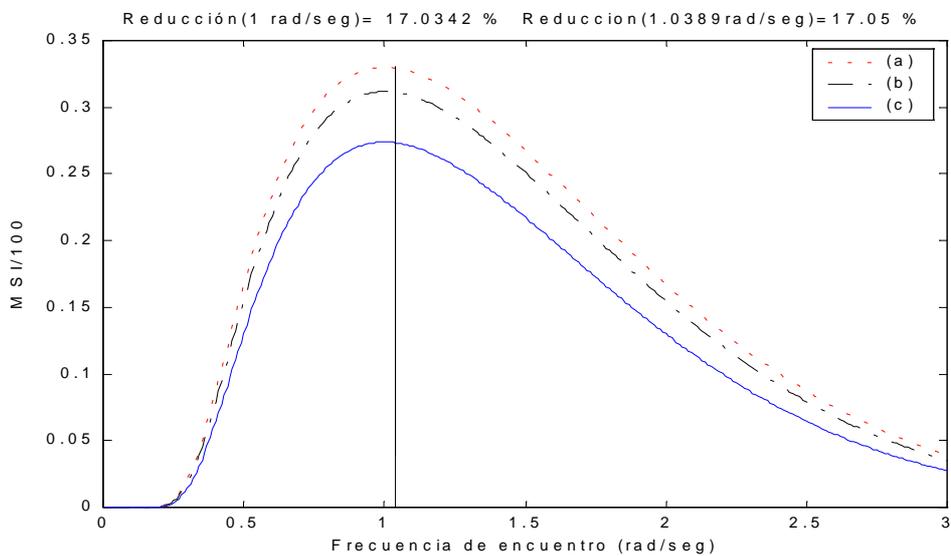


Figura 6.12: MSI/100 obtenido en : (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $ref_Flap=1^\circ$ y $ref_Tfoil=-6^\circ$. (c) el proceso controlado

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

6.1.3 ESTADO DE LA MAR 6

Los parámetros de los controladores G_{C1} y G_{C2} , que se obtienen tras aplicar el método de sintonía son :

$$K_{P1}=5.0414 \quad T_{D1}=0.12493 \quad K_{P2}=14.917 \quad T_{D2}=0.89588$$

Las funciones de transferencia G_{C1} y G_{C2} son :

$$G_{C1} = \frac{0.6928s + 5.041}{0.01249s + 1} \quad G_{C2} = \frac{14.7s + 14.92}{0.08959s + 1}$$

En la Tabla 6.8 se muestran los ceros y los polos de G_{C1} y de G_{C2}

Tabla 6.8 : Ceros y Polos de G_{C1} y G_{C2}

	Ceros	Polos
Gc1	-7.2767	-80.044
Gc2	-1.0147	-11.162

En la Figura 6.13 y la Figura 6.14 se muestra la señal de control generada por G_{C1} y por G_{C2} para la posición del Flap y del Tfoil respectivamente cuando se realiza la simulación del proceso controlado

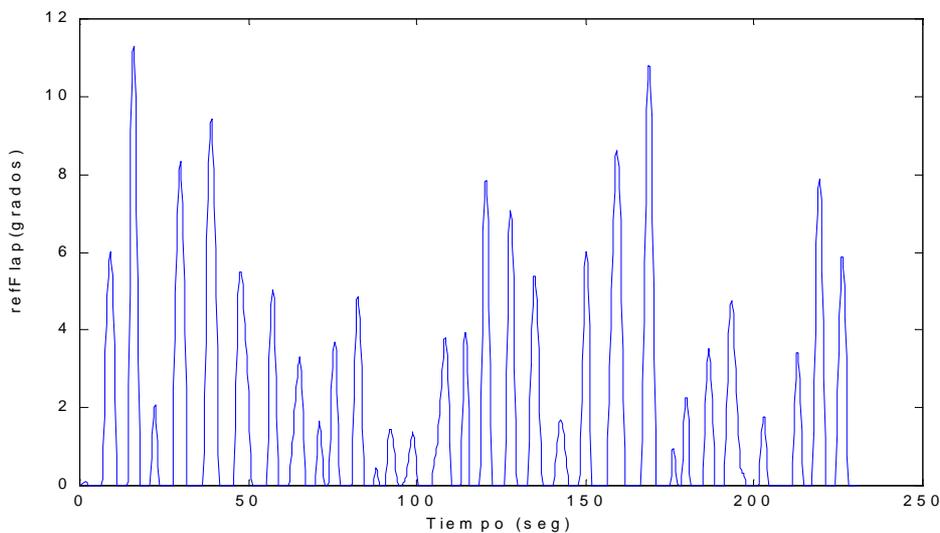


Figura 6.13: Señal de control generada por G_{C1} para la posición del Flap obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

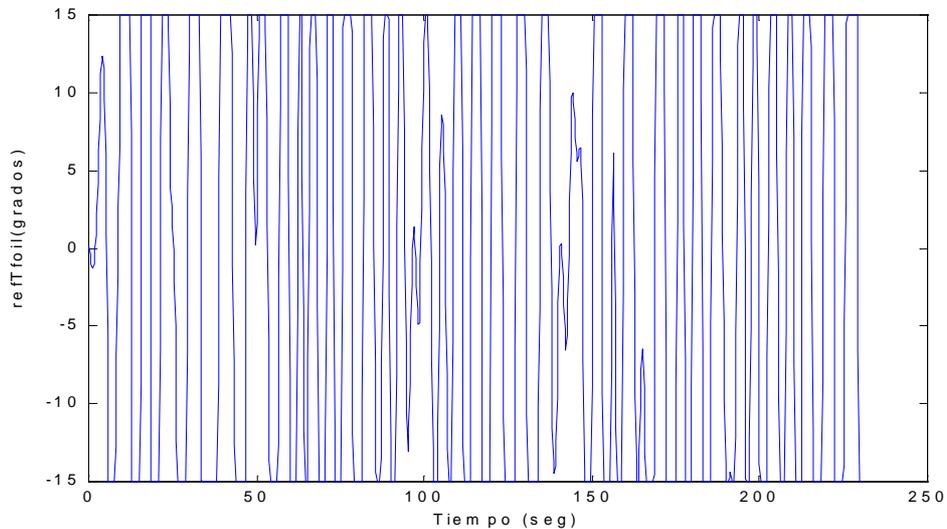


Figura 6.14: Señal de control generada por G_{C2} para la posición del T-foil obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

En la Figura 6.15 se muestra la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m)

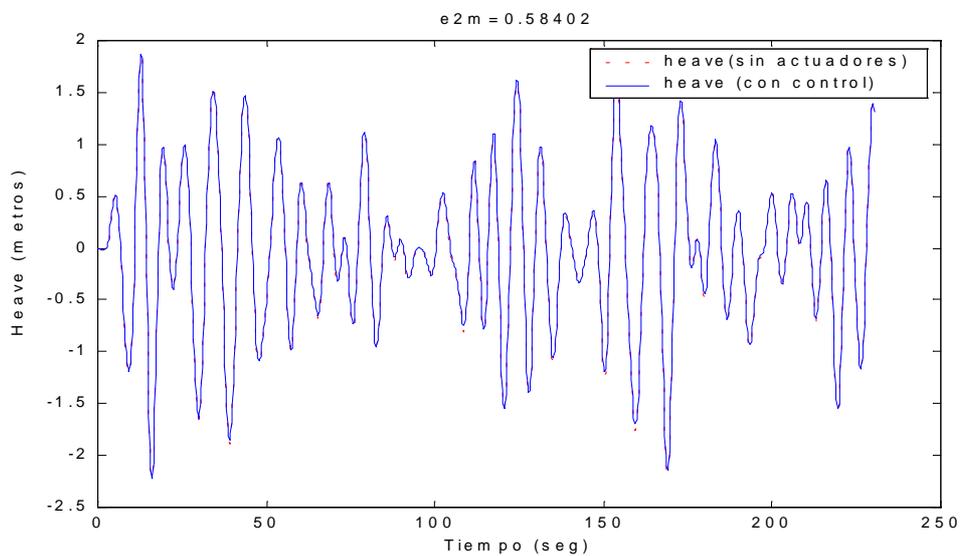


Figura 6.15: Serie temporal del heave del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del heave del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.16 se muestra la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0°)

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

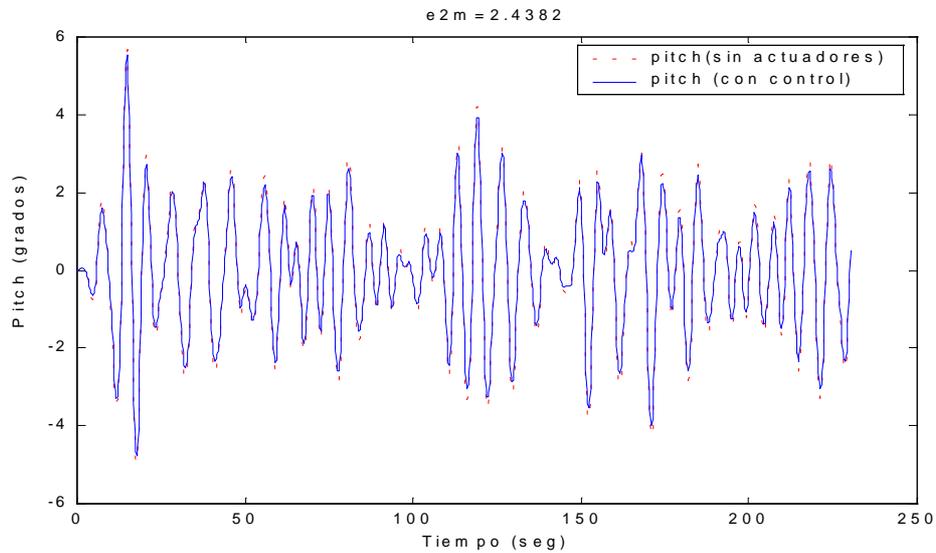


Figura 6.16: Serie temporal del pitch del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del pitch del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.17 se muestra la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m/s^2).

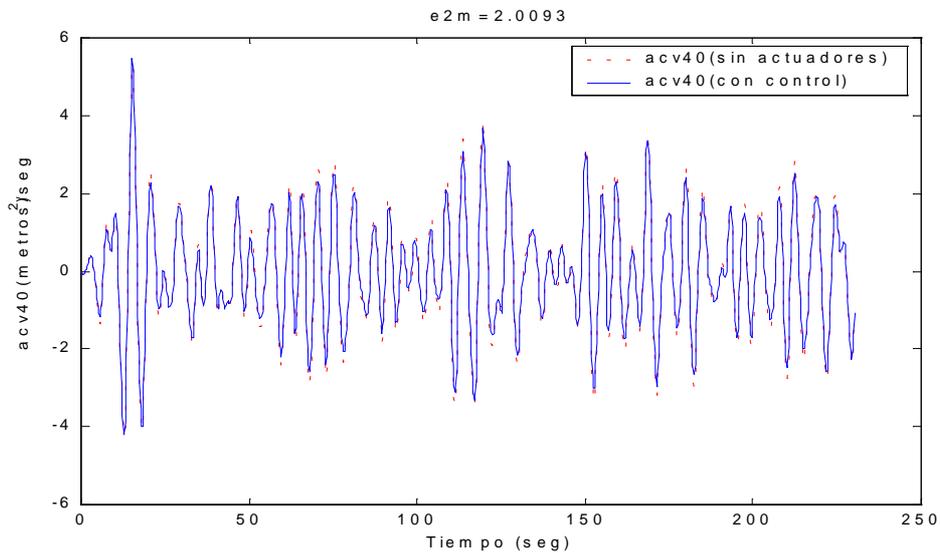


Figura 6.17: Serie temporal de la acv40 del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal de la acv40 del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.18 se muestra el MSI/100 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores, el que se obtendría al poner los actuadores en las posiciones fijas de $\text{ref_Flap} = 2^\circ$ y $\text{ref_Tfoil} = 0^\circ$ y el que se obtendría al simular el proceso controlado.

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

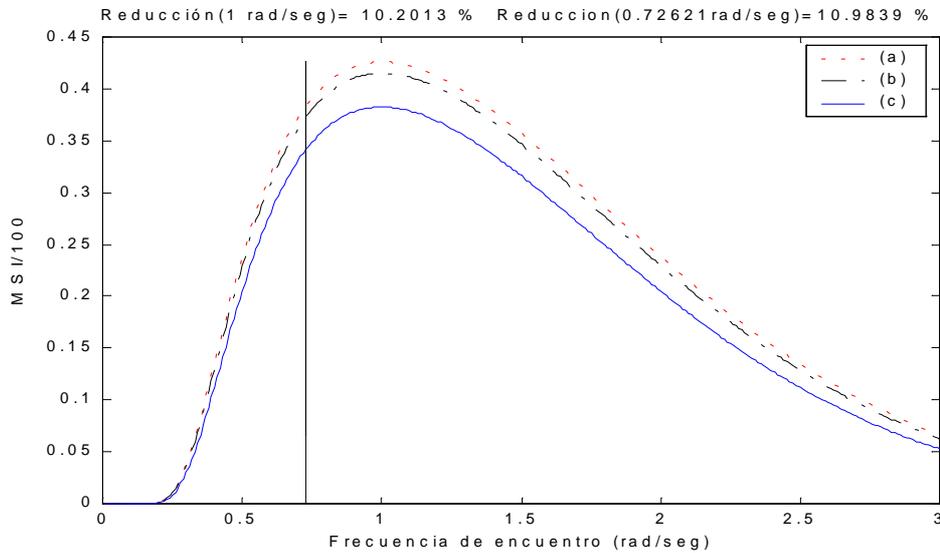


Figura 6.18: MSI/100 obtenido en : (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $ref_Flap = 2^\circ$ y $ref_Tfoil = 0^\circ$. (c) el proceso controlado

6.2 VELOCIDAD 30 NUDOS

6.2.1 ESTADO DE LA MAR 4

Los parámetros de los controladores G_{C1} y G_{C2} , que se obtienen tras aplicar el método de sintonía son :

$$K_{P1}=12.485 \quad T_{D1}=1.5747 \quad K_{P2}=11.605 \quad T_{D2}=1.8292$$

Las funciones de transferencia G_{C1} y G_{C2} son :

$$G_{C1} = \frac{21.63s + 12.49}{0.1575s + 1} \quad G_{C2} = \frac{23.35s + 11.6}{0.1829s + 1}$$

En la Tabla 6.9 se muestran los ceros y los polos de G_{C1} y de G_{C2}

Tabla 6.9 : Ceros y Polos de G_{C1} y G_{C2}

	Ceros	Polos
Gc1	-0.5773	-6.3505
Gc2	-0.4969	-5.4669

En la Figura 6.19 y la Figura 6.20 se muestra la señal de control generada por G_{C1} y por G_{C2} para la posición del Flap y del Tfoil respectivamente cuando se realiza la simulación del proceso controlado

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

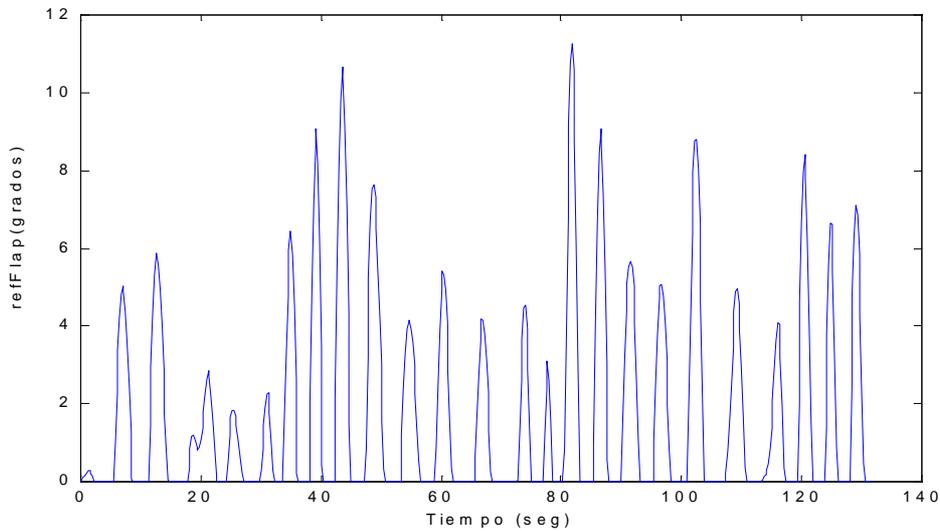


Figura 6.19: Señal de control generada por G_{C1} para la posición del Flap obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

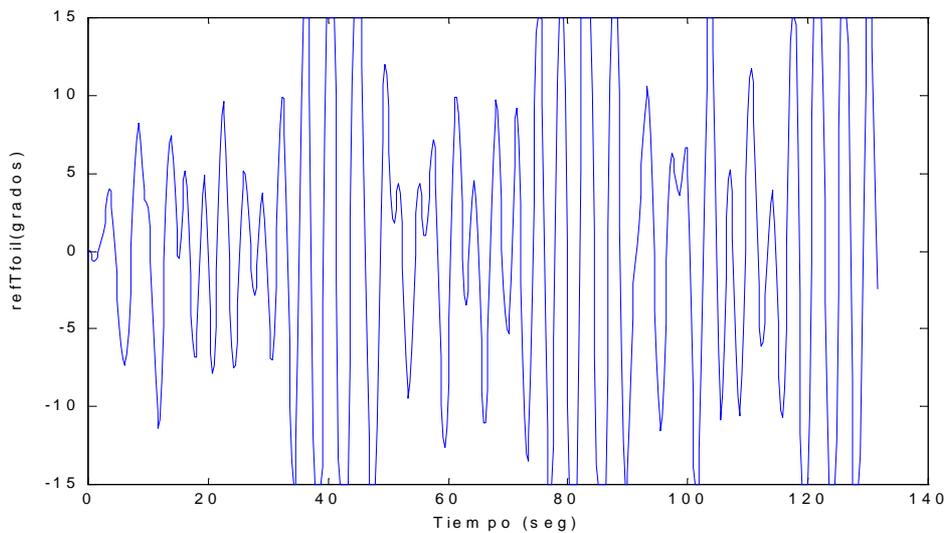


Figura 6.20: Señal de control generada por G_{C2} para la posición del T-foil obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

En la Figura 6.21 se muestra la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráficas se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m)

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

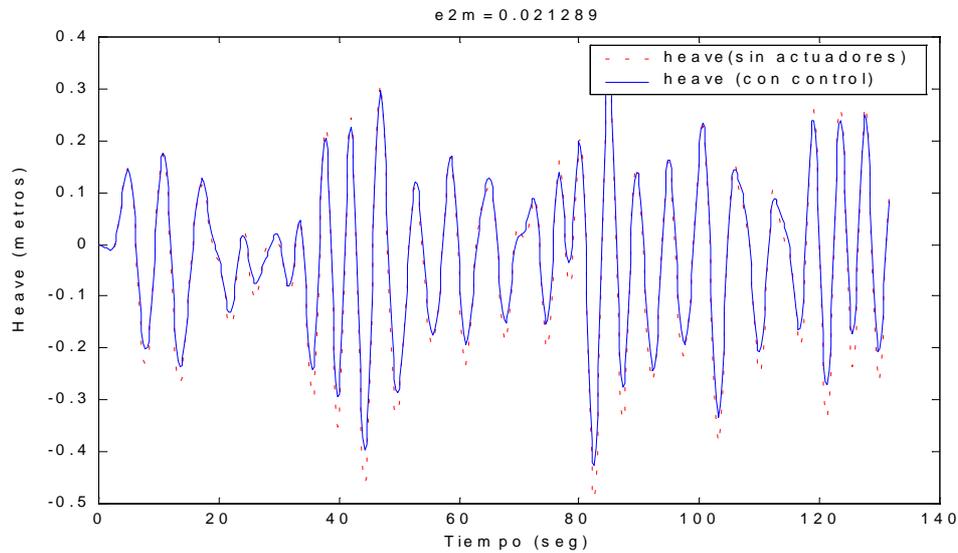


Figura 6.21: Serie temporal del heave del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del heave del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.22 se muestra la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0°)

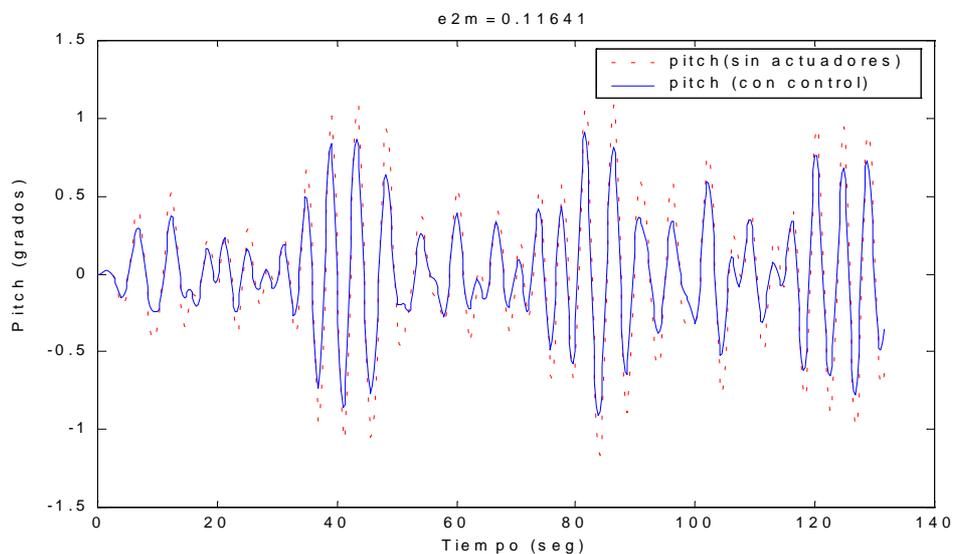


Figura 6.22: Serie temporal del pitch del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del pitch del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.23 se muestra la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

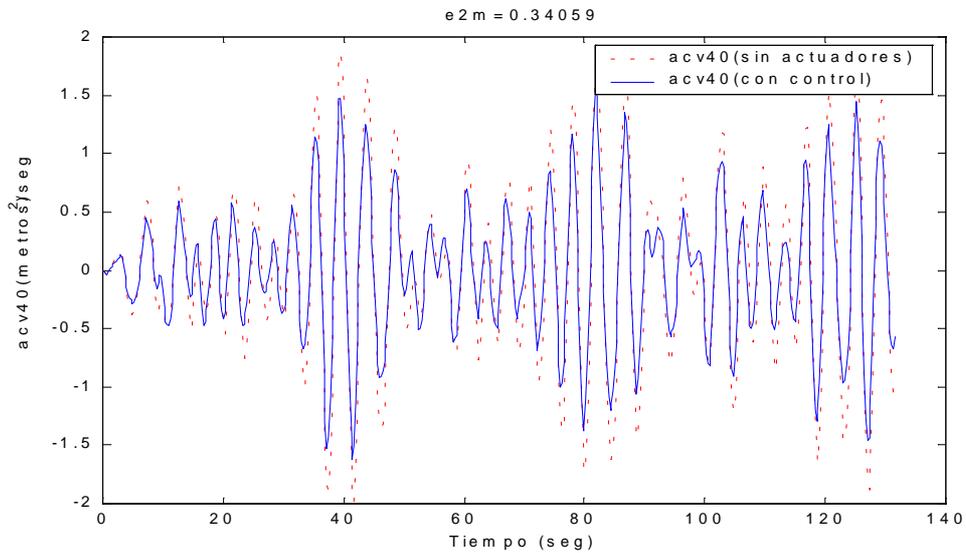


Figura 6.23: Serie temporal de la acv40 del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal de la acv40 del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.24 se muestra el MSI/100 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores, el que se obtendría al poner los actuadores en las posiciones fijas de $ref_Flap = 0^\circ$ y $ref_Tfoil = -15^\circ$ y el que se obtendría al simular el proceso controlado.

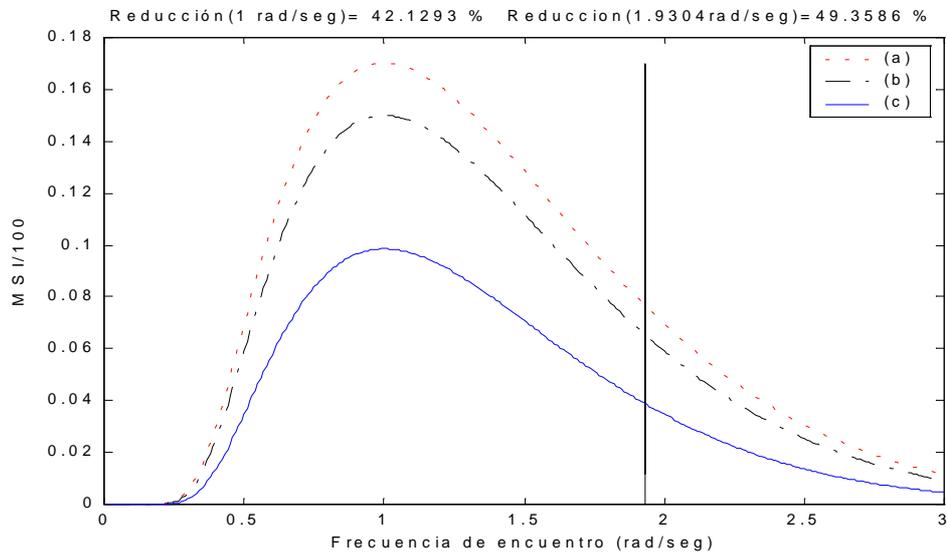


Figura 6.24: MSI/100 obtenido en : (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $ref_Flap = 0^\circ$ y $ref_Tfoil = -15^\circ$. (c) el proceso controlado

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

6.2.2 ESTADO DE LA MAR 5

Los parámetros de los controladores G_{C1} y G_{C2} , que se obtienen tras aplicar el método de sintonía son :

$$K_{P1}=1.0725 \quad T_{D1}=0.1553 \quad K_{P2}=5.3702 \quad T_{D2}=1.6734$$

Las funciones de transferencia G_{C1} y G_{C2} son :

$$G_{C1} = \frac{0.1833s + 1.072}{0.01554s + 1} \quad G_{C2} = \frac{9.885s + 5.37}{0.1673s + 1}$$

En la Tabla 6.10 se muestran los ceros y los polos de G_{C1} y de G_{C2}

Tabla 6.10 : Ceros y Polos de G_{C1} y G_{C2}

	Ceros	Polos
Gc1	-5.85	-64.352
Gc2	-0.5432	-5.9759

En la Figura 6.25 y la Figura 6.26 se muestra la señal de control generada por G_{C1} y por G_{C2} para la posición del Flap y del Tfoil respectivamente cuando se realiza la simulación del proceso controlado

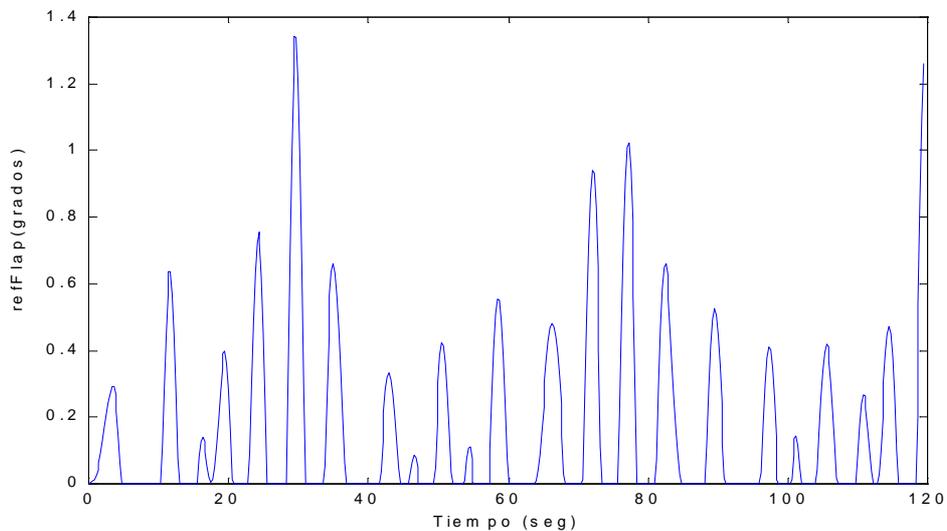


Figura 6.25: Señal de control generada por G_{C1} para la posición del Flap obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

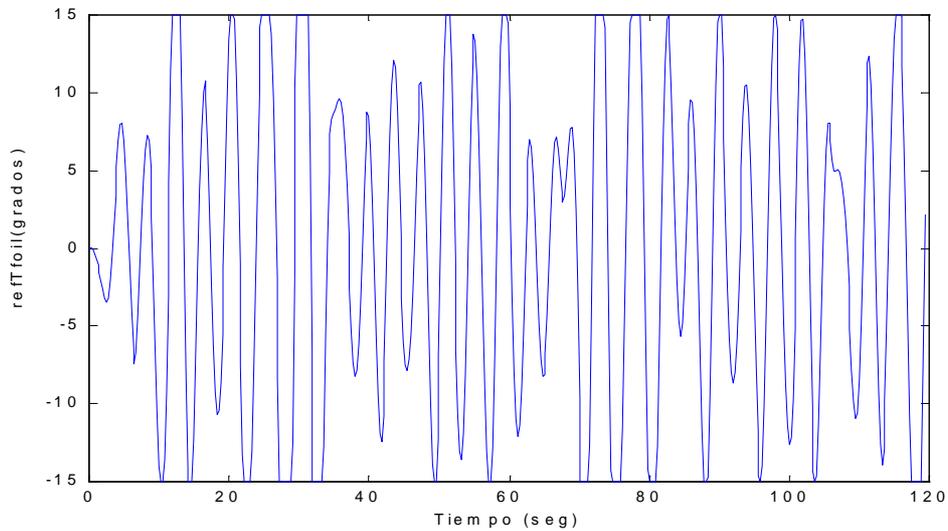


Figura 6.26: Señal de control generada por G_{C2} para la posición del T-foil obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

En la Figura 6.27 se muestra la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m)

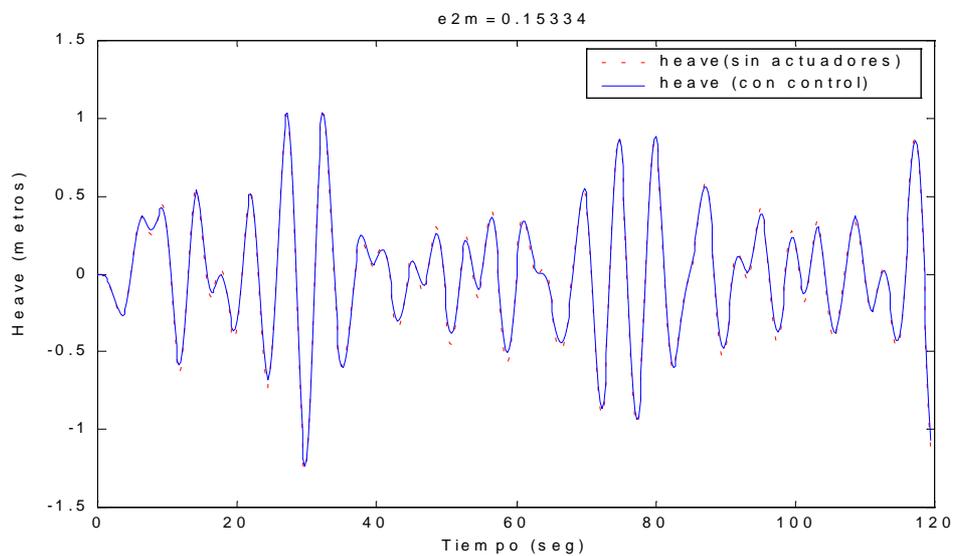


Figura 6.27: Serie temporal del heave del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del heave del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.28 se muestra la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0°)

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

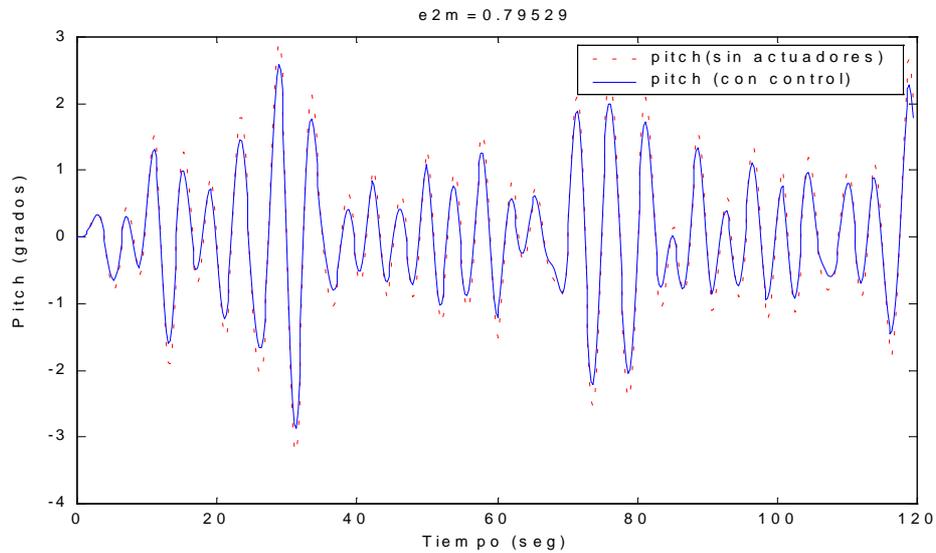


Figura 6.28: Serie temporal del pitch del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del pitch del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.29 se muestra la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m/s^2).

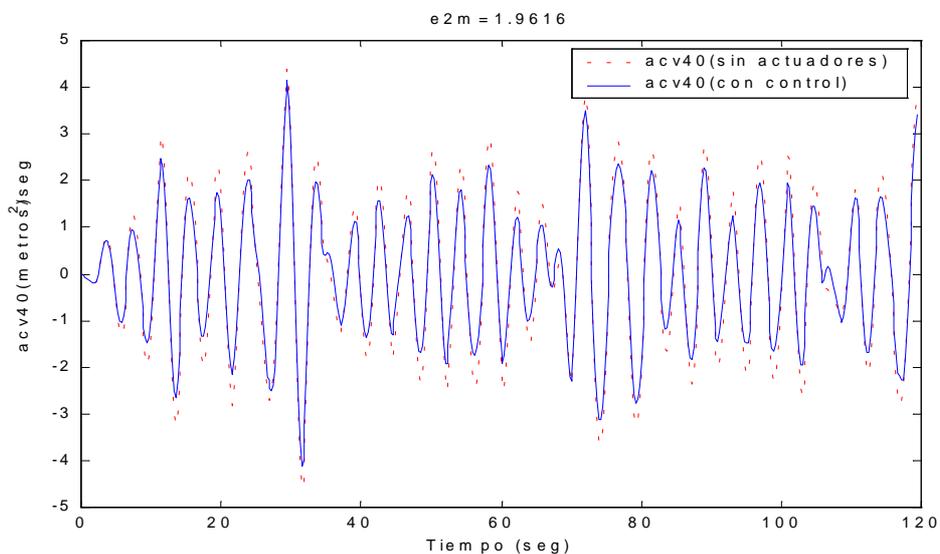


Figura 6.29: Serie temporal de la acv40 del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal de la acv40 del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.30 se muestra el MSI/100 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores, el que se obtendría al poner los actuadores en las posiciones fijas de $\text{ref_Flap} = 2^\circ$ y $\text{ref_Tfoil} = 6^\circ$ y el que se obtendría al simular el proceso controlado.

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

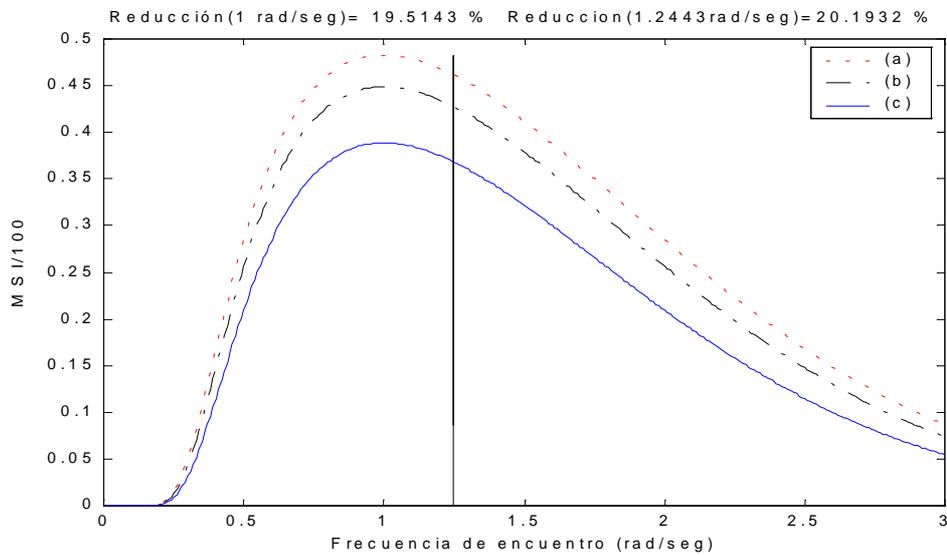


Figura 6.30: MSI/100 obtenido en : (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $ref_Flap = 2^\circ$ y $ref_Tfoil = 6^\circ$. (c) el proceso controlado

6.2.3 ESTADO DE LA MAR 6

Los parámetros de los controladores G_{C1} y G_{C2} , que se obtienen tras aplicar el método de sintonía son :

$$K_{P1}=6.3795 \quad T_{D1}=0.1 \quad K_{P2}=6.2094 \quad T_{D2}=1.3165$$

Las funciones de transferencia G_{C1} y G_{C2} son :

$$G_{C1} = \frac{0.7019s + 6.379}{0.01s + 1} \quad G_{C2} = \frac{8.992s + 6.209}{0.1316s + 1}$$

En la Tabla 6.11 se muestran los ceros y los polos de G_{C1} y de G_{C2}

Tabla 6.11 : Ceros y Polos de G_{C1} y G_{C2}

	Ceros	Polos
Gc1	-9.08886	-99.9
Gc2	-0.6905	-7.596

En la Figura 6.31 y la Figura 6.32 se muestra la señal de control generada por G_{C1} y por G_{C2} para la posición del Flap y del Tfoil respectivamente cuando se realiza la simulación del proceso controlado

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

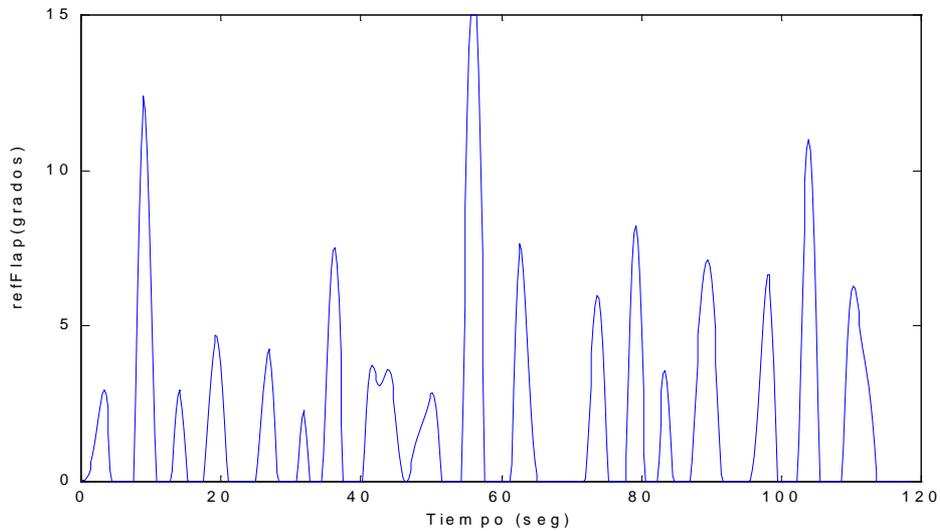


Figura 6.31: Señal de control generada por G_{C1} para la posición del Flap obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

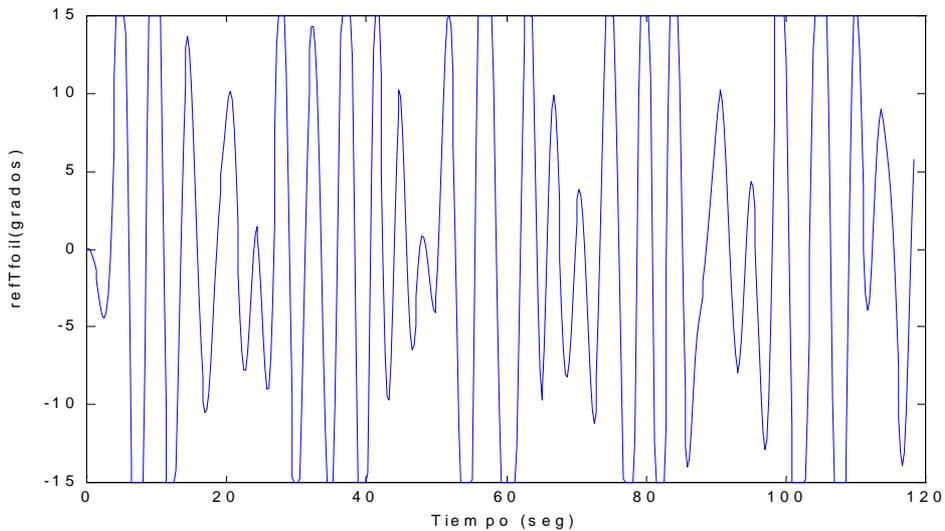


Figura 6.32: Señal de control generada por G_{C2} para la posición del T-foil obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

En la Figura 6.33 se muestra la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráficas se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m)

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

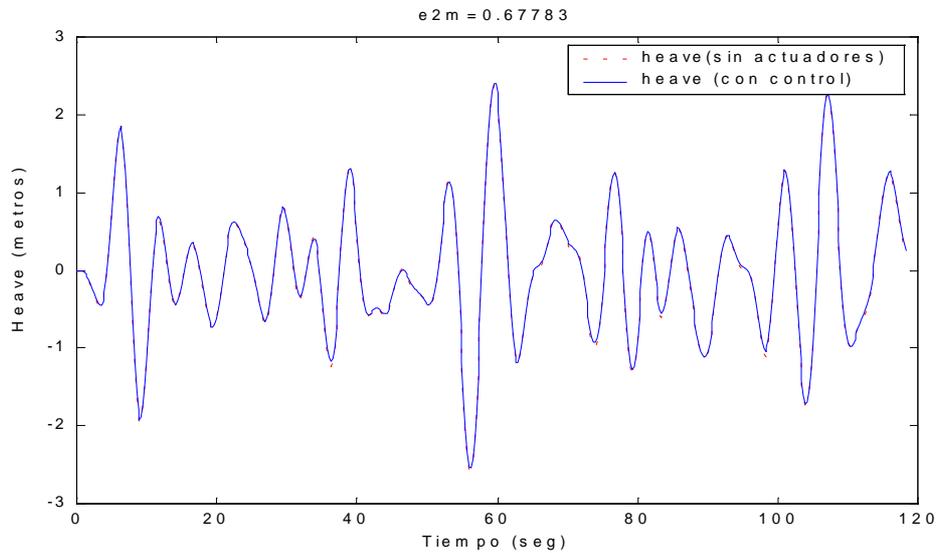


Figura 6.33: Serie temporal del heave del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del heave del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.34 se muestra la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0°)

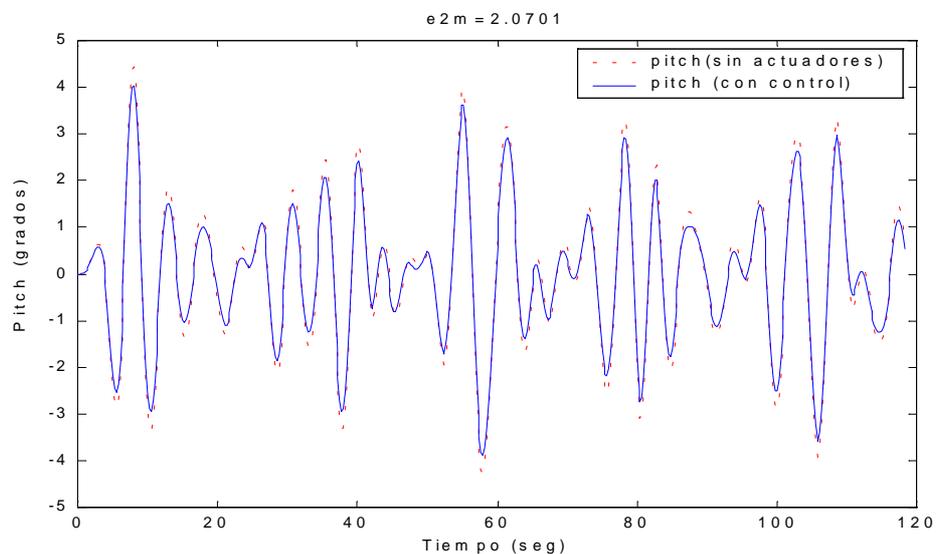


Figura 6.34: Serie temporal del pitch del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del pitch del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.35 se muestra la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m/s^2).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

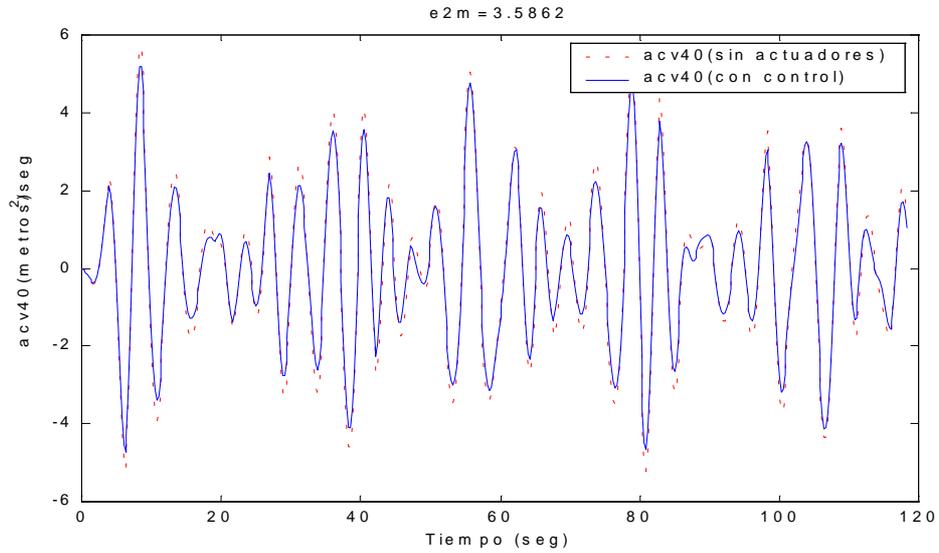


Figura 6.35: Serie temporal de la $acv40$ del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal de la $acv40$ del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.36 se muestra en el rango de frecuencias de encuentro $\omega_e \in [0,3]$ rad/seg el MSI/100 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores, el que se obtendría al poner los actuadores en las posiciones fijas de $ref_Flap = 10^\circ$ y $ref_Tfoil = 2^\circ$ y el que se obtendría al simular el proceso controlado.

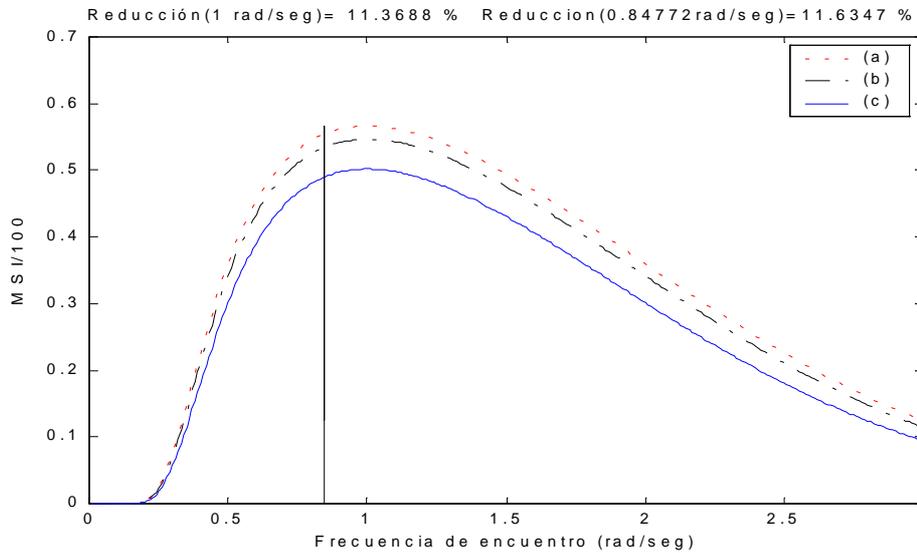


Figura 6.36: MSI/100 obtenido en : (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $ref_Flap = 10^\circ$ y $ref_Tfoil = 2^\circ$. (c) el proceso controlado

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

6.3 VELOCIDAD 40 NUDOS

6.3.1 ESTADO DE LA MAR 4

Los parámetros de los controladores G_{C1} y G_{C2} , que se obtienen tras aplicar el método de sintonía son :

$$K_{P1}=1.1323 \quad T_{D1}=0.4018 \quad K_{P2}=7.7953 \quad T_{D2}=1.2641$$

Las funciones de transferencia G_{C1} y G_{C2} son :

$$G_{C1} = \frac{0.5005s + 1}{0.04018s + 1} \quad G_{C2} = \frac{10.84s + 7.795}{0.1264s + 1}$$

En la Tabla 6.12 se muestran los ceros y los polos de G_{C1} y de G_{C2}

Tabla 6.12 : Ceros y Polos de G_{C1} y G_{C2}

	Ceros	Polos
Gc1	-2.2624	-24.886
Gc2	-0.71915	-7.9106

En la Figura 6.37 y la Figura 6.38 se muestra la señal de control generada por G_{C1} y por G_{C2} para la posición del Flap y del Tfoil respectivamente cuando se realiza la simulación del proceso controlado

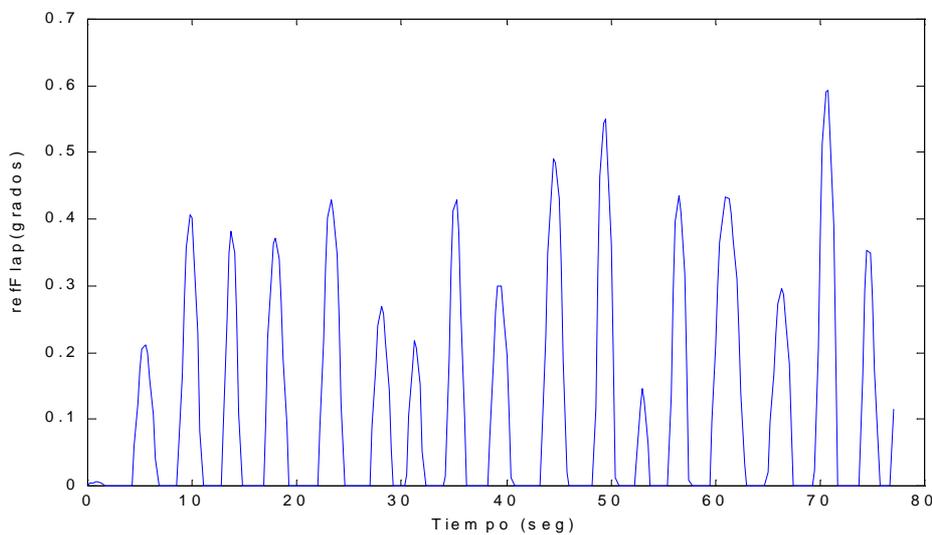


Figura 6.37: Señal de control generada por G_{C1} para la posición del Flap obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

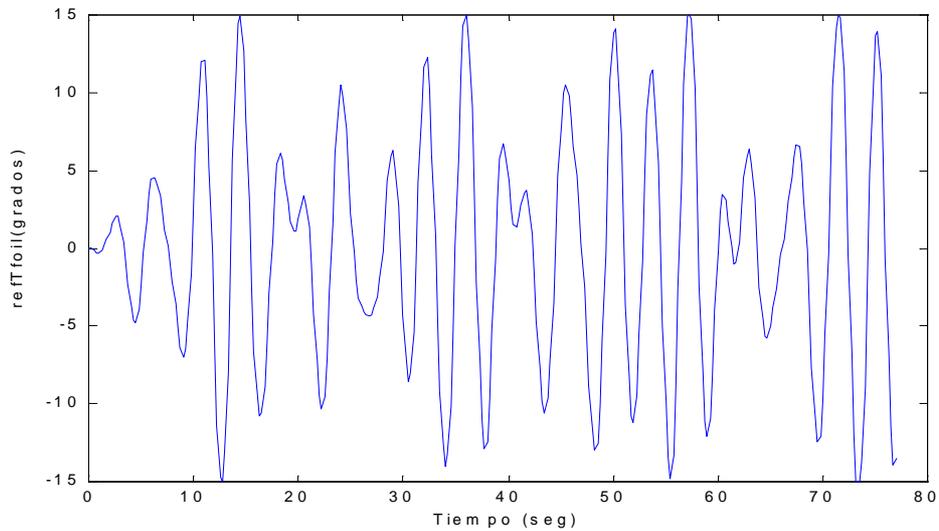


Figura 6.38: Señal de control generada por G_{C2} para la posición del T-foil obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

En la Figura 6.39 se muestra la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m)

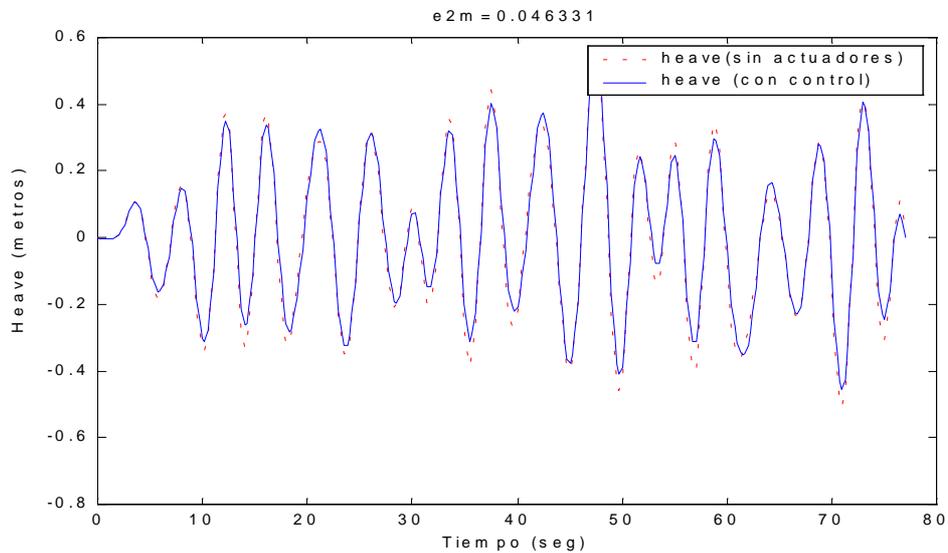


Figura 6.39: Serie temporal del heave del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del heave del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.40 se muestra la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0°)

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

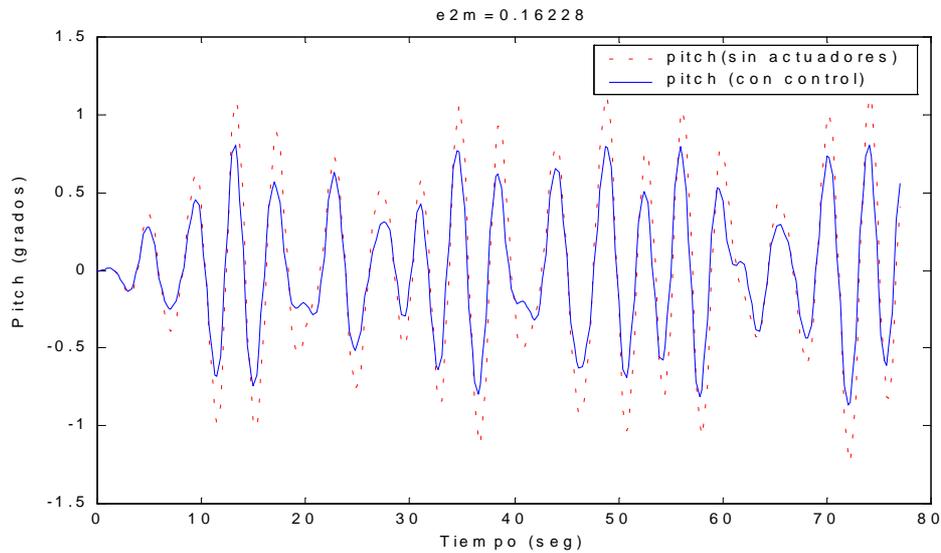


Figura 6.40: Serie temporal del pitch del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del pitch del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.41 se muestra la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de la gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m/s^2).

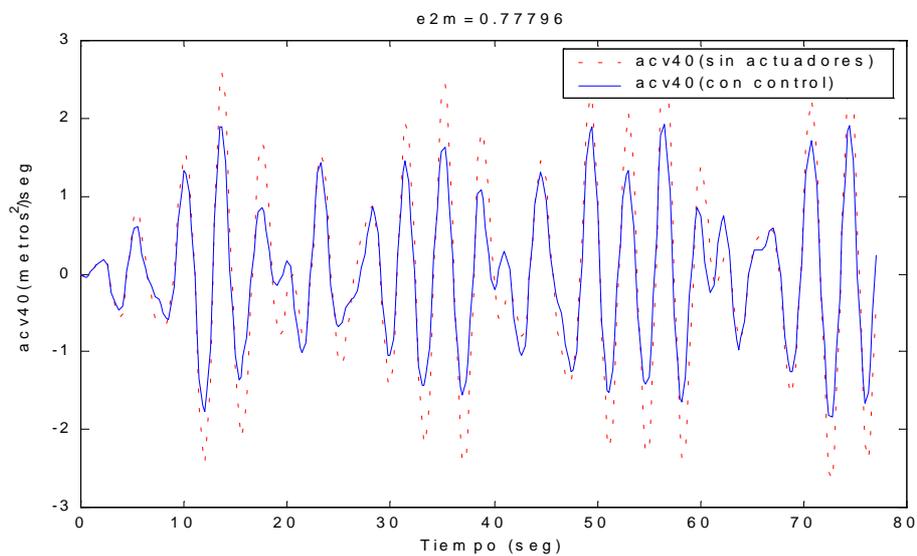


Figura 6.41: Serie temporal de la acv40 del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal de la acv40 del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.42 se muestra el MSI/100 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores, el que se obtendría al poner los actuadores en las posiciones fijas de $\text{ref_Flap} = 2^\circ$ y $\text{ref_Tfoil} = -9^\circ$ y el que se obtendría al simular el proceso controlado.

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

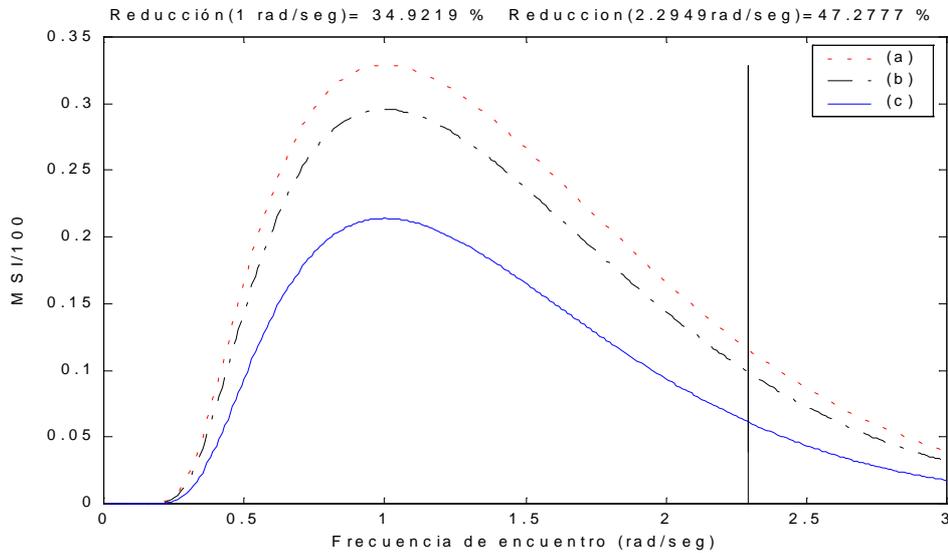


Figura 6.42: MSI/100 obtenido en : (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $ref_Flap = 2^\circ$ y $ref_Tfoil = -9^\circ$. (c) el proceso controlado

6.3.2 ESTADO DE LA MAR 5

Los parámetros de los controladores G_{C1} y G_{C2} , que se obtienen tras aplicar el método de sintonía son :

$$K_{P1}=21.185 \quad T_{D1}=0.1 \quad K_{P2}=3.4443 \quad T_{D2}=1.8075$$

Las funciones de transferencia G_{C1} y G_{C2} son :

$$G_{C1} = \frac{2.33s + 21.19}{0.01s + 1} \quad G_{C2} = \frac{6.848s + 3.444}{0.1808s + 1}$$

En la Tabla 6.13 se muestran los ceros y los polos de G_{C1} y de G_{C2}

Tabla 6.13: Ceros y Polos de G_{C1} y G_{C2}

	Ceros	Polos
Gc1	-9.09	-100
Gc2	-0.5029	-5.5324

En la Figura 6.43 y la Figura 6.44 se muestra la señal de control generada por G_{C1} y por G_{C2} para la posición del Flap y del Tfoil respectivamente cuando se realiza la simulación del proceso controlado

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

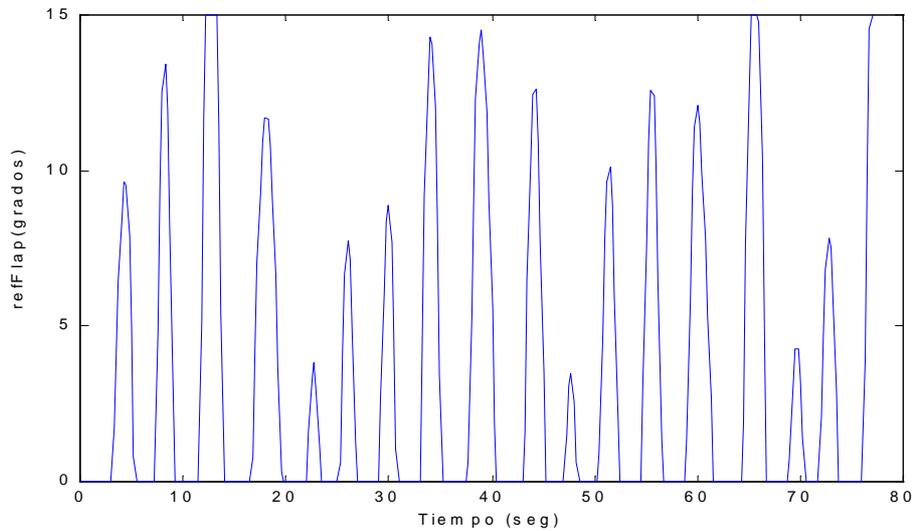


Figura 6.43: Señal de control generada por G_{C1} para la posición del Flap obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

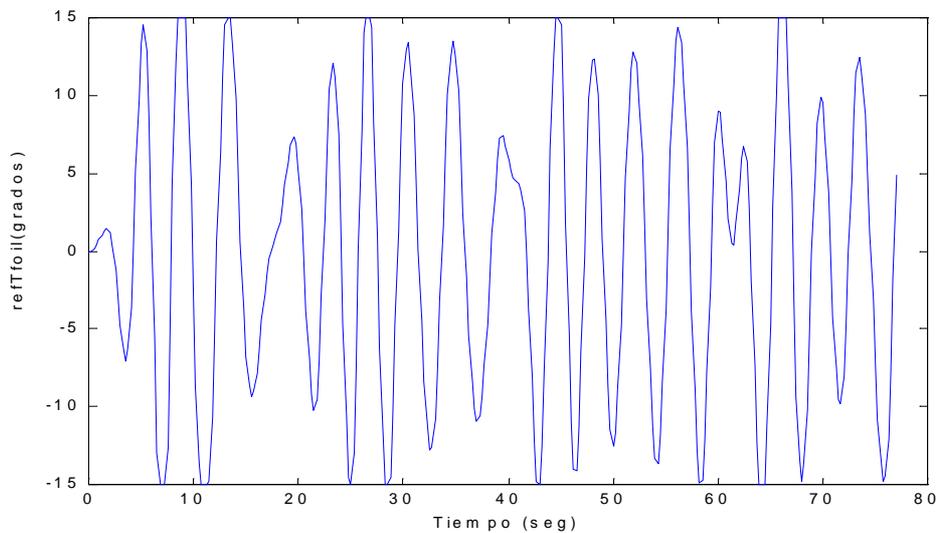


Figura 6.44: Señal de control generada por G_{C2} para la posición del T-foil obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

En la Figura 6.45 se muestra la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráficas se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m)

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

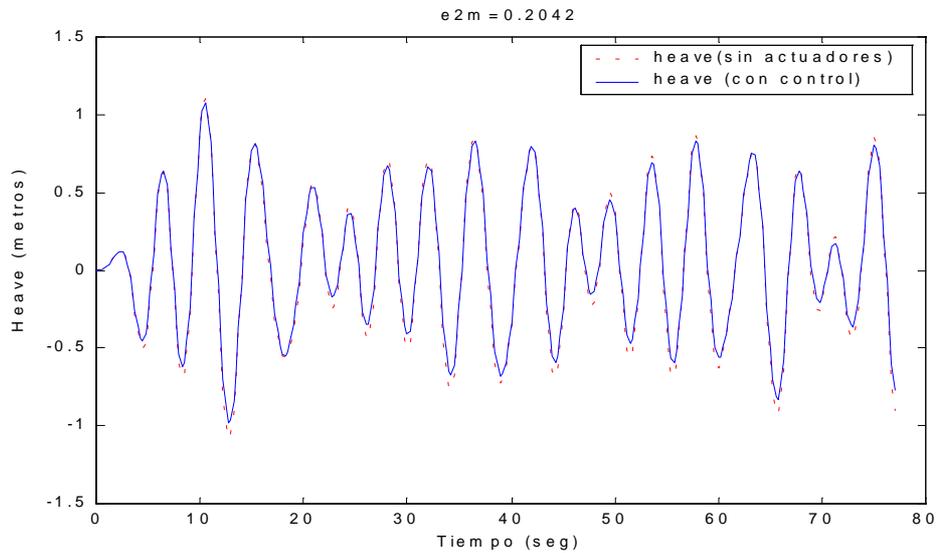


Figura 6.45: Serie temporal del heave del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del heave del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.46 se muestra la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0°)

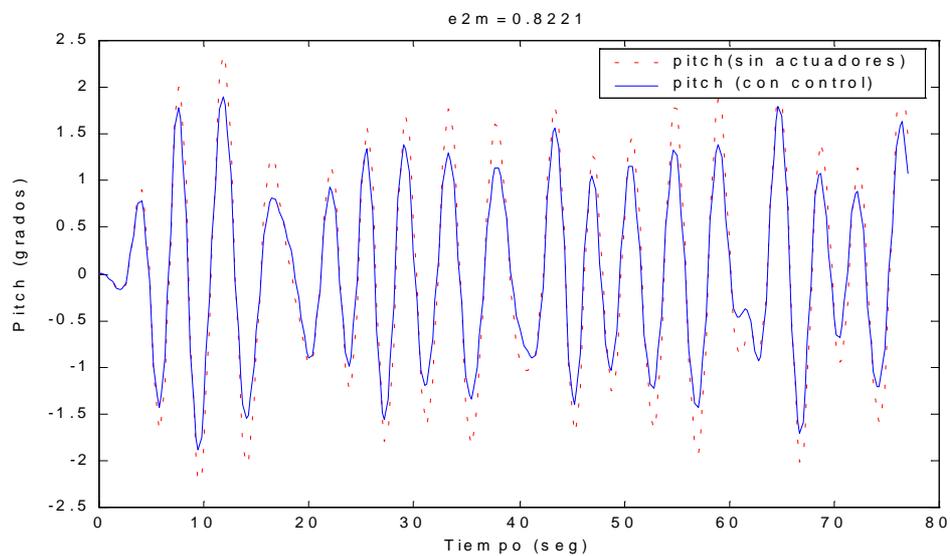


Figura 6.46: Serie temporal del pitch del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del pitch del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.47 se muestra la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m/s^2).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

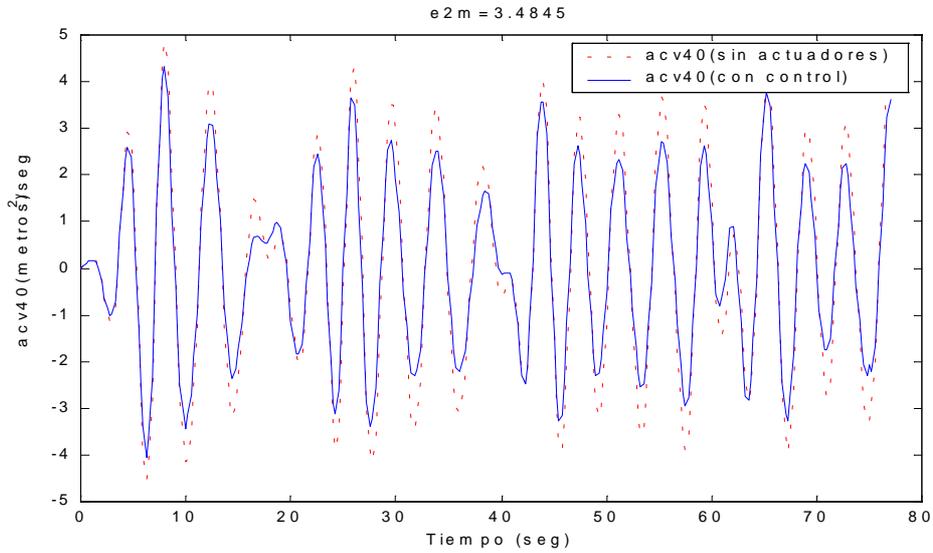


Figura 6.47: Serie temporal de la $acv40$ del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal de la $acv40$ del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.48 se muestra en el rango de frecuencias de encuentro $\omega_e \in [0,3]$ rad/seg el MSI/100 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores, el que se obtendría al poner los actuadores en las posiciones fijas de $ref_Flap = 12^\circ$ y $ref_Tfoil = 14^\circ$ y el que se obtendría al simular el proceso controlado.

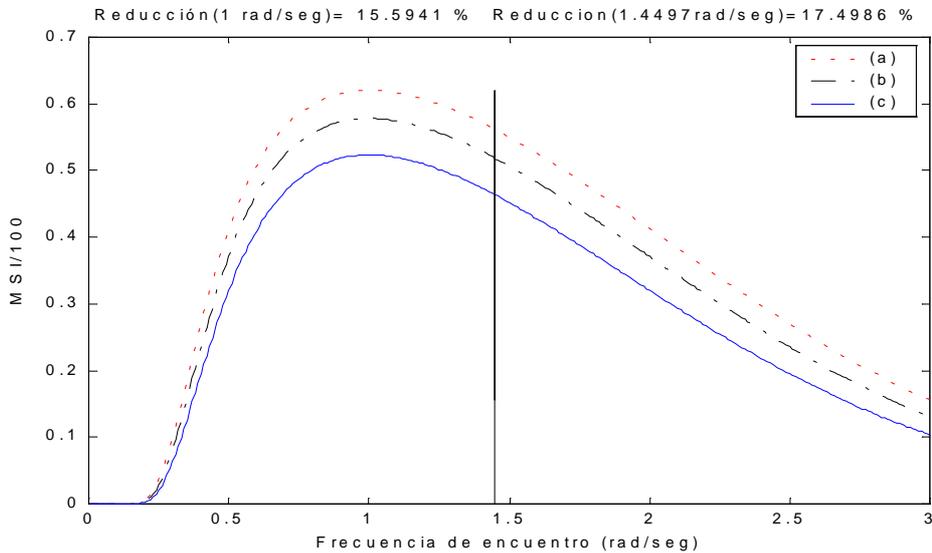


Figura 6.48: MSI/100 obtenido en : (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $ref_Flap = 12^\circ$ y $ref_Tfoil = 14^\circ$. (c) el proceso controlado

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

6.3.3 ESTADO DE LA MAR 6

Los parámetros de los controladores G_{C1} y G_{C2} , que se obtienen tras aplicar el método de sintonía son :

$$K_{P1}=13.585 \quad T_{D1}=0.3396 \quad K_{P2}=3.3321 \quad T_{D2}=1.2171$$

Las funciones de transferencia G_{C1} y G_{C2} son :

$$G_{C1} = \frac{5.076s + 13.59}{0.03396s + 1} \quad G_{C2} = \frac{4.461s + 3.332}{0.1217s + 1}$$

En la Tabla 6.14 se muestran los ceros y los polos de G_{C1} y de G_{C2}

Tabla 6.14 : Ceros y Polos de G_{C1} y G_{C2}

	Ceros	Polos
Gc1	-2.6766	-29.442
Gc2	-0.7469	-8.2159

En la Figura 6.49 y la Figura 6.50 se muestra la señal de control generada por G_{C1} y por G_{C2} para la posición del Flap y del Tfoil respectivamente cuando se realiza la simulación del proceso controlado

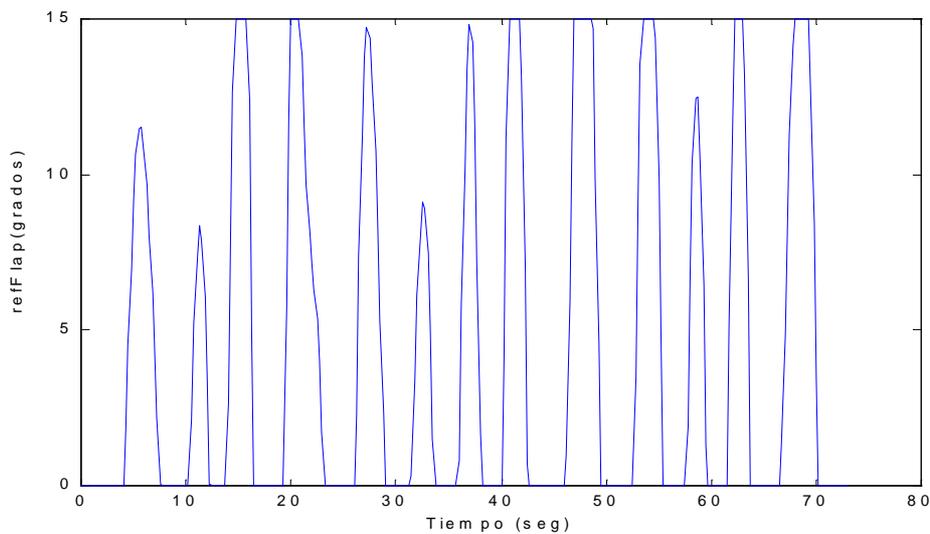


Figura 6.49: Señal de control generada por G_{C1} para la posición del Flap obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

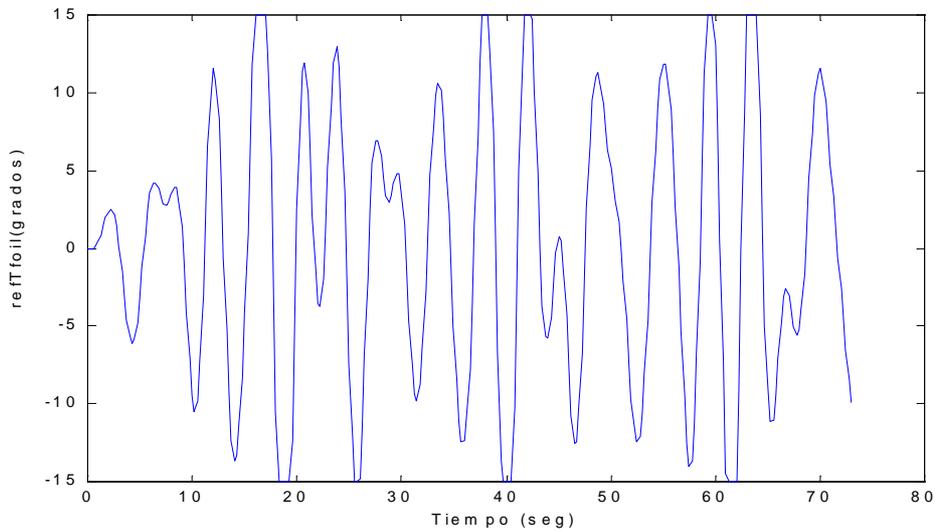


Figura 6.50: Señal de control generada por G_{C2} para la posición del T-foil obtenida cuando se realiza la simulación del proceso controlado

En la Figura 6.51 se muestra la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de heave que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m)

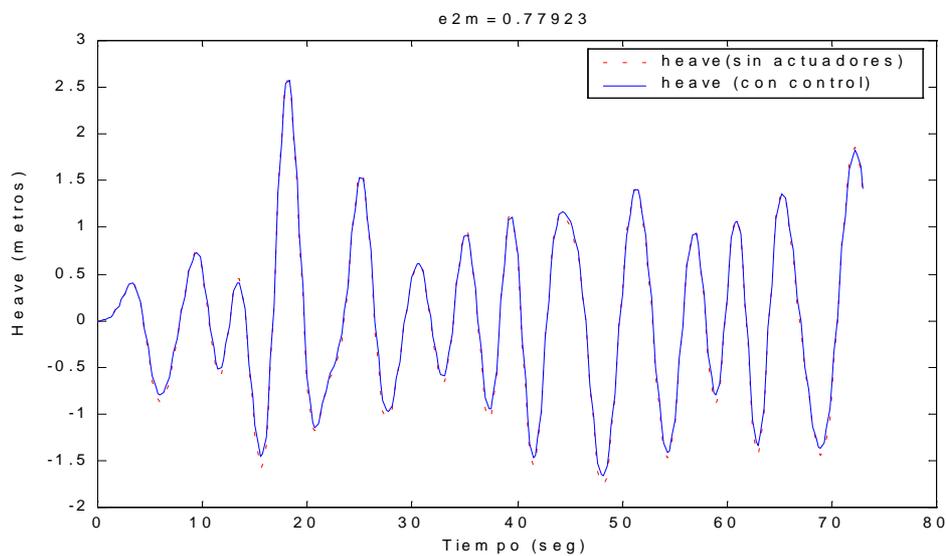


Figura 6.51: Serie temporal del heave del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del heave del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.52 se muestra la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de pitch que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0°)

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

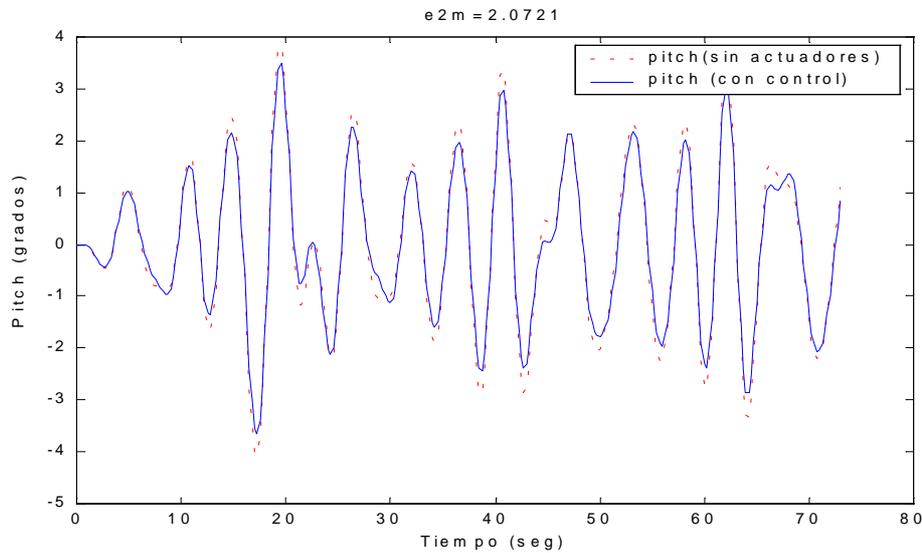


Figura 6.52: Serie temporal del pitch del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal del pitch del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.53 se muestra la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores y la serie temporal de acv40 que se obtendría al simular el proceso controlado. En la parte superior de las gráfica se muestra el error cuadrático medio de esta última señal con respecto a la señal de referencia (0 m/s^2).

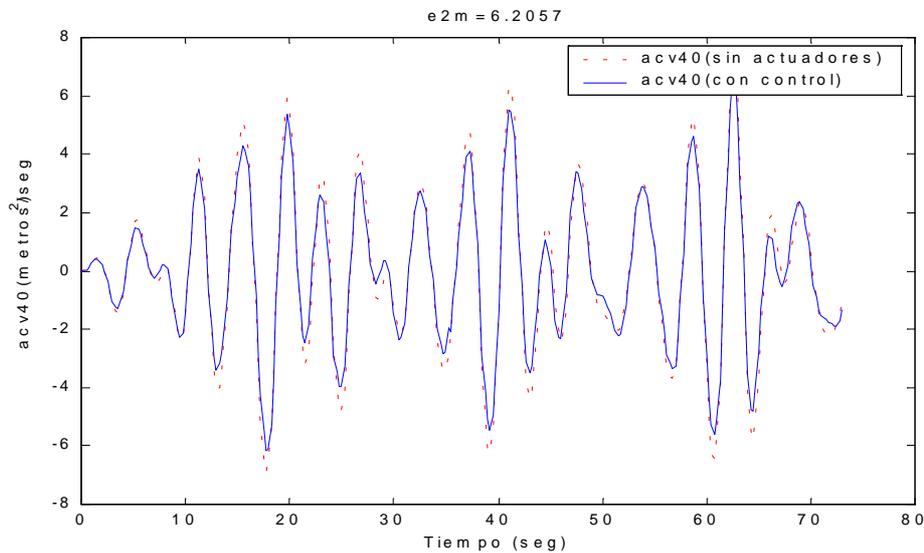


Figura 6.53: Serie temporal de la acv40 del proceso sin actuadores (línea punteada) y serie temporal de la acv40 del proceso controlado (línea continua)

En la Figura 6.54 se muestra en el rango de frecuencias de encuentro $\omega_e \in [0,3] \text{ rad/seg}$ el MSI/100 que se obtendría al simular el proceso sin actuadores, el que se obtendría al poner los actuadores en las posiciones fijas de $\text{ref_Flap} = 4^\circ$ y $\text{ref_Tfoil} = -2^\circ$ y el que se obtendría al simular el proceso controlado.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

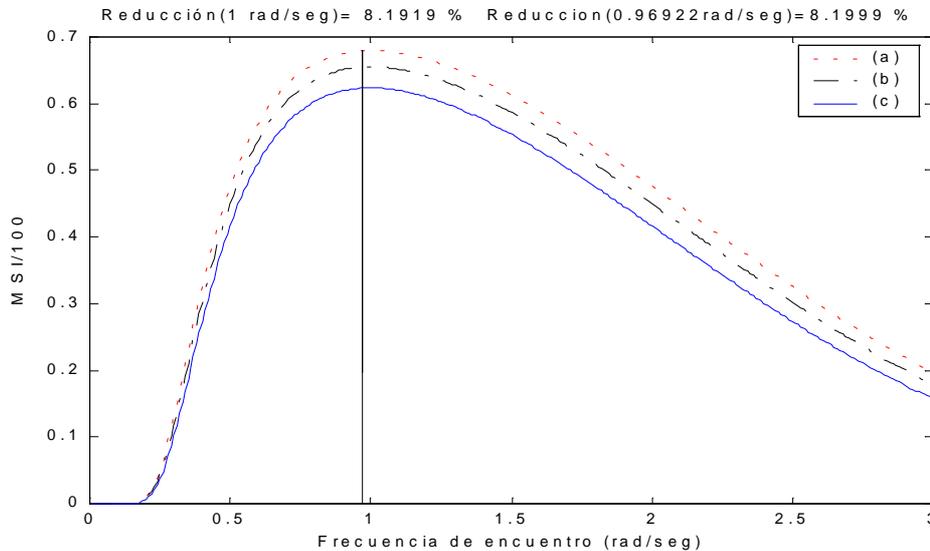


Figura 6.54: MSI/100 obtenido en : (a) el proceso sin actuadores. (b) el proceso con los actuadores en posición fija $ref_Flap = 4^\circ$ y $ref_Tfoil = -2^\circ$. (c) el proceso controlado

7. CONCLUSIONES

En este informe se ha presentado el diseño de un control PD sobre heave y pitch en un buque de alta velocidad a las velocidades de 20, 30 y 40 nudos y SSN (Sea State Number) 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 o porcentaje de personas que vomitan dentro de las dos horas).

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 (ver Tabla 6.1), de esta forma se tiene un esquema de ganancias programadas.

En la Tabla 6.2 se puede observar que el porcentaje de reducción en el valor de J al utilizar el esquema de control propuesto presenta las siguientes características :

1. Fijada una velocidad el porcentaje de reducción aumenta conforme disminuye el estado de la mar.
2. Fijado un estado de la mar el porcentaje de reducción aumenta conforme aumenta la velocidad del buque.

De acuerdo con las características descritas el mayor porcentaje de reducción en el valor de J es 27.53 % que se obtiene para $V=40$ nudos y $SSN=4$, mientras el menor porcentaje de reducción en el valor de J es 9.83 % que se obtiene para $V=20$ nudos y $SSN=6$.

Estos resultados están de acuerdo con lo esperado teóricamente [6] ya que la fuerza de sustentación de los actuadores depende cuadráticamente de la velocidad. Por lo tanto al aumentar la velocidad mayores son las fuerzas y momentos que ejercen los actuadores en el plano vertical opuestas a las ejercidas por el oleaje, que a su vez genera unas fuerzas y momentos en el plano vertical más pequeños conforme disminuye el estado de la mar.

En la Tabla 6.4, se observa que el mayor porcentaje de reducción en el valor del $MSI_{SSN}/100$ es 49.36 % que obtiene para estado de la mar 4 y velocidad 30 nudos, mientras que el menor porcentaje de reducción en el valor del $MSI_{SSN}/100$ es 8.20% y se obtiene para el estado de la mar 6 y velocidad 40 nudos. 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.

De la comparación de las Tablas 5.1 con las Tablas 6.2, 6.3 y 6.4 se observa que los porcentajes de reducción en el valor de J y del $MSI/100$ si se utiliza el esquema de control propuesto son mayores que si se dejan los actuadores en una posición fija, lo cual indica la conveniencia de aplicar una estrategia de control.

Pese a utilizar una red de desacoplo sigue existiendo un acoplo no despreciable entre las variables controladas, esto es debido a que la red se diseño a partir del sistema linealizado que es una buena aproximación siempre que los actuadores no saturen. Pese a no ser una red de desacoplo óptima con su utilización se consigue mayores reducciones en el valor de J y en el del MSI que si se prescinde de ella.

De los resultados que se muestran en la Tabla 6.5, se pone de manifiesto la viabilidad de utilizar un mismo vector de parámetros θ_{304} para todas las condiciones posibles de estado de la mar y velocidad del buque, ya que las reducciones que se consiguen en el valor del $MSI_{max}/100$ utilizando el vector θ_{304} no difieren en exceso de las conseguidas con el vector θ_{opt} correspondiente.

El esquema de control propuesto es una primera aproximación al problema de obtener una reducción en el valor de J y en el valor del MSI . En esta misma línea de diseño se puede probar a utilizar controladores basados en redes de adelanto, en filtros de segundo orden, etc.

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.

APENDICE A : MODELOS LINEALES DE LA DINAMICA VERTICAL DEL BUQUE DE ALTA VELOCIDAD TF-120.

A.1 VELOCIDAD 20 NUDOS.

MODELO G_{1H}

La ganancia es $K_1=0.91 \cdot 10^4$.

$$G_{1H}(s) = \frac{0.08994 s^3 - 0.02932 s^2 + 0.3828 s - 0.07297}{s^4 + 0.8817 s^3 + 1.276 s^2 + 0.3534 s + 0.07297}$$

MODELO G_{2H}

$$G_{2H}(s) = \frac{0.4398 s^2 - 0.7838 s + 3.109}{s^2 + 0.513 s + 3.109}$$

MODELO G_{1P}

La ganancia $K_2= 1.27 \cdot 10^6$.

$$G_{1P}(s) = \frac{-0.09496 s^3 + 0.08845 s^2 - 0.421 s}{s^4 + 2.541 s^3 + 3.86 s^2 + 3.524 s + 1.245}$$

MODELO G_{2P}

$$G_{2P}(s) = \frac{-3.396 s^2 + 19.64 s + 0.3134}{s^3 + 1.558 s^2 + 2.794 s + 1.096}$$

A.2 VELOCIDAD 30 NUDOS.

MODELO G_{1H}

La ganancia es $K_1=1.72 \cdot 10^4$.

$$G_{1H}(s) = \frac{0.083 s^3 + 0.01143 s^2 + 0.6376 s - 0.1224}{s^4 + 1.147 s^3 + 1.776 s^2 + 0.6162 s + 0.1224}$$

MODELO G_{2H}

$$G_{2H}(s) = \frac{0.3418 s^2 - 0.4964 s + 2.841}{s^2 + 0.4563 s + 2.841}$$

MODELO G_{1P}

La ganancia $K_2= 1.94 \cdot 10^6$.

$$G_{1P}(s) = \frac{-0.09747 s^3 + 0.09297 s^2 - 0.7033 s}{s^4 + 2.881 s^3 + 5.251 s^2 + 5.407 s + 2.057}$$

MODELO G_{2P}

$$G_{2P}(s) = \frac{-2.654 s^2 + 17.65 s + 0.4575}{s^3 + 1.297 s^2 + 2.964 s + 1.118}$$

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

A.3 VELOCIDAD 40 NUDOS.

MODELO G_{1H}

La ganancia es $K_1=2.2 \cdot 10^4$.

$$G_{1H}(s) = \frac{0.06675 s^3 + 0.1022 s^2 + 0.9042 s - 0.189}{s^4 + 1.34 s^3 + 2.266 s^2 + 0.8671 s + 0.189}$$

MODELO G_{2H}

$$G_{2H}(s) = \frac{0.2667 s^2 - 0.5098 s + 3.053}{s^2 + 0.4692 s + 3.053}$$

MODELO G_{1P}

La ganancia $K_2=2.33 \cdot 10^6$.

$$G_{1P}(s) = \frac{-0.0763 s^3 + 0.03032 s^2 - 0.9249 s}{s^4 + 3.029 s^3 + 6.194 s^2 + 6.854 s + 2.706}$$

MODELO G_{2P}

$$G_{2P}(s) = \frac{-2.104 s^2 + 16.44 s + 0.6906}{s^3 + 1.203 s^2 + 3.155 s + 1.334}$$

APENDICE B : MODELOS LINEALES PARA CONTROL EN POSICION DE LOS ACTUADORES.

De acuerdo con la nomenclatura utilizada en [6], en la Figura B.1 se muestra el modelo Simulink lineal para los actuadores

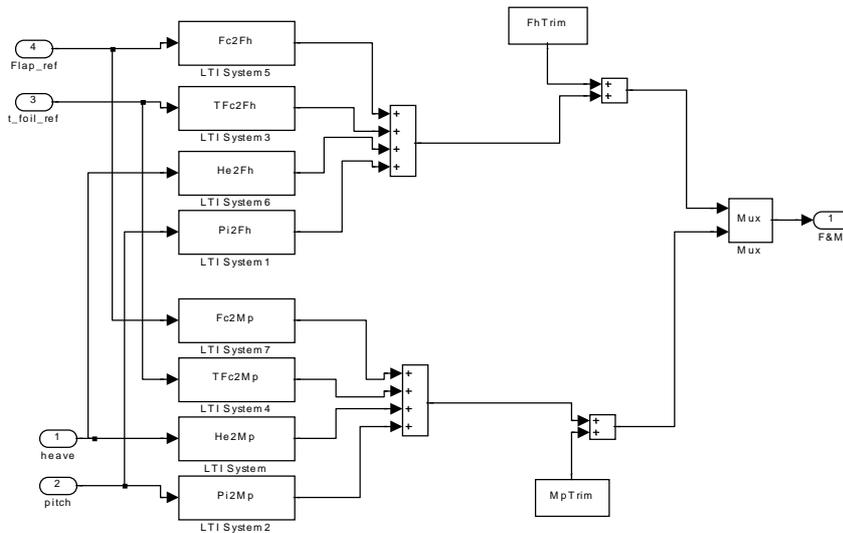


Figura B.1 :Modelo lineal de los actuadores implementado en Simulink

Se ha considerado un ángulo de trimado de 0° tanto para el Flap como para el T-Foil, por lo que no existe fuerza ni momento proveniente de la posición de trimado.

B.1 VELOCIDAD 20 NUDOS.

Las funciones de transferencia del modelo lineal de los actuadores para control en posición a la velocidad de 20 nudos son :

$$\begin{aligned}
 Fc2Fh &= \frac{34.94}{s+1.8} & TFc2Fh &= \frac{-33.53}{s+1.8} & He2Fh &= \frac{-1059s-3.439e-005}{s+10} & Pi2Fh &= \frac{1061s-186.3}{s+10} \\
 Fc2Mp &= \frac{1453}{s+1.8} & TFc2Mp &= \frac{1958}{s+1.8} & He2Mp &= \frac{-6.189e004s-0.002009}{s+10} & Pi2Mp &= \frac{-6.195e004s-1.088e004}{s+10}
 \end{aligned}$$

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

B.2 VELOCIDAD 30 NUDOS.

Las funciones de transferencia del modelo lineal de los actuadores para control en posición a la velocidad de 30 nudos son :

$$Fc2Fh = \frac{78.61}{s+1.8} \quad TFc2Fh = \frac{-75.45}{s+1.8} \quad He2Fh = \frac{-1588s}{s+10} \quad Pi2Fh = \frac{1577s - 419.2}{s+10}$$

$$Fc2Mp = \frac{3270}{s+1.8} \quad TFc2Mp = \frac{4406}{s+1.8} \quad He2Mp = \frac{9.276e004s}{s+10} \quad Pi2Mp = \frac{-9.21e004 + 2.448e004}{s+10}$$

B.3 VELOCIDAD 40 NUDOS.

Las funciones de transferencia del modelo lineal de los actuadores para control en posición a la velocidad de 40 nudos son :

$$Fc2Fh = \frac{139.7}{s+1.8} \quad TFc2Fh = \frac{-134.1}{s+1.8} \quad He2Fh = \frac{-2188s}{s+10} \quad Pi2Fh = \frac{2084s - 745.2}{s+10}$$

$$Fc2Mp = \frac{5813}{s+1.8} \quad TFc2Mp = \frac{7834}{s+1.8} \quad He2Mp = \frac{1.237e005s}{s+10} \quad Pi2Mp = \frac{-1.217e005 + 4.352e004}{s+10}$$

APENDICE C : MODELO LINEAL DEL PROCESO

Renombrando las funciones de transferencia del modelo lineal de actuadores de la siguiente forma :

$$\begin{aligned}
 G_3 &= Fc2Fh & G_4 &= TFc2Fh & G_5 &= He2Fh & G_6 &= Pi2Fh \\
 G_7 &= Fc2Mp & G_8 &= TFc2Mp & G_9 &= He2Mp & G_{10} &= Pi2Mp
 \end{aligned} \quad (C.1)$$

La dinámica del proceso (barco + actuadores lineales) viene dada por las ecuaciones siguientes :

$$\begin{aligned}
 Fh(s) &= G_{1H}(s) \cdot w(s) + G_3(s) \cdot f(s) + G_4(s) \cdot t(s) + G_5(s) \cdot h(s) + G_6(s) \cdot p(s) \\
 Mp(s) &= G_{1P}(s) \cdot w(s) + G_7(s) \cdot f(s) + G_8(s) \cdot t(s) + G_9(s) \cdot h(s) + G_{10}(s) \cdot p(s) \\
 h(s) &= G_{2H}(s) \cdot Fh(s) \\
 p(s) &= G_{2P}(s) \cdot Mp(s)
 \end{aligned} \quad (C.2)$$

donde :

Fh es la fuerza total del heave.

Mp es el momento total del picth

w es la altura de olas

f es la referencia para la posición del Flap

t es la referencia para la posición del Tfoil

h es el heave

p es el picth

Operando sobre (C.2) se llega a las ecuaciones siguientes :

$$\begin{aligned}
 h(s) &= G_{11}(s) \cdot h(s) + G_{12}(s) \cdot p(s) + G_{13}(s) \cdot w(s) \\
 p(s) &= G_{21}(s) \cdot h(s) + G_{22}(s) \cdot p(s) + G_{23}(s) \cdot w(s)
 \end{aligned} \quad (C.3)$$

donde :

$$\begin{aligned}
 G_{11} &= \frac{BG_3 - G_6G_7}{G_9G_6 - AB} & G_{12} &= \frac{BG_4 - G_6G_8}{G_9G_6 - AB} & G_{13} &= \frac{BG_{1H} - G_6G_{1P}}{G_9G_6 - AB} \\
 G_{21} &= \frac{AG_7 - G_9G_3}{G_9G_6 - AB} & G_{22} &= \frac{AG_8 - G_9G_4}{G_9G_6 - AB} & G_{23} &= \frac{AG_{1P} - G_9G_{1H}}{G_9G_6 - AB} \\
 A &= G_5 - \frac{1}{G_{2H}} & B &= G_{10} - \frac{1}{G_{2P}}
 \end{aligned} \quad (C.4)$$

En las siguientes subsecciones se muestran las expresiones de $G_{11}, G_{12}, G_{13}, G_{21}, G_{22}$ y G_{23} para las velocidades de 20, 30 y 40 nudos.

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

C.1 VELOCIDAD 20 NUDOS.

Las funciones de transferencia del proceso linealizado a la velocidad de 20 nudos son :

$$G_{11} = \frac{0.1689 s^6 + 1.603 s^5 + 1.188 s^4 + 12.28 s^3 + 17.13 s^2 + 31.05 s + 13.07}{s^8 + 118.8 s^7 + 1428 s^6 + 5133 s^5 + 1.284e004 s^4 + 2.236e004 s^3 + 2.542e004 s^2 + 2.071e004 s + 6130}$$

$$G_{12} = \frac{-0.1621 s^6 - 1.584 s^5 - 0.7848 s^4 - 12.64 s^3 - 14.43 s^2 - 30.1 s - 12.55}{s^8 + 118.8 s^7 + 1428 s^6 + 5133 s^5 + 1.284e004 s^4 + 2.236e004 s^3 + 2.542e004 s^2 + 2.071e004 s + 6130}$$

$$G_{13} = \frac{3.956 s^{13} + 48.43 s^{12} + 124.4 s^{11} + 715.1 s^{10} + 1606 s^9 + 4761 s^8 + 8806 s^7 + 1.531e004 s^6 + 1.981e004 s^5 + 1.935e004 s^4 + 1.343e004 s^3 + 4911 s^2 + 9.578 s - 309.3}{s^{15} + 120.4 s^{14} + 1626 s^{13} + 7983 s^{12} + 2.784e004 s^{11} + 7.032e004 s^{10} + 1.396e005 s^9 + 2.197e005 s^8 + 2.772e005 s^7 + 2.802e005 s^6 + 2.228e005 s^5 + 1.365e005 s^4 + 6.109e004 s^3 + 1.811e004 s^2 + 3246 s + 309.3}$$

$$G_{21} = \frac{-0.003887 s^6 - 0.4549 s^5 - 1.273 s^4 + 19.7 s^3 + 9.454 s^2 + 70.19 s + 1.115}{s^8 + 118.8 s^7 + 1428 s^6 + 5133 s^5 + 1.284e004 s^4 + 2.236e004 s^3 + 2.542e004 s^2 + 2.071e004 s + 6130}$$

$$G_{22} = \frac{-0.005237 s^6 - 0.5485 s^5 - 2.202 s^4 + 27.66 s^3 + 10.12 s^2 + 94.54 s + 1.502}{s^8 + 118.8 s^7 + 1428 s^6 + 5133 s^5 + 1.284e004 s^4 + 2.236e004 s^3 + 2.542e004 s^2 + 2.071e004 s + 6130}$$

$$G_{23} = \frac{0.3225 s^{13} + 34.76 s^{12} + 126.4 s^{11} - 1512 s^{10} + 135.3 s^9 - 1.338e004 s^8 - 7485 s^7 - 3.921e004 s^6 - 2.427e004 s^5 - 3.304e004 s^4 - 9368 s^3 - 2048 s^2 - 30.36 s}{s^{15} + 120.4 s^{14} + 1626 s^{13} + 7983 s^{12} + 2.784e004 s^{11} + 7.032e004 s^{10} + 1.396e005 s^9 + 2.197e005 s^8 + 2.772e005 s^7 + 2.802e005 s^6 + 2.228e005 s^5 + 1.365e005 s^4 + 6.109e004 s^3 + 1.811e004 s^2 + 3246 s + 309.3}$$

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

C.2 VELOCIDAD 30 NUDOS.

Las funciones de transferencia del proceso linealizado a la velocidad de 30 nudos son :

$$G_{11} = \frac{0.1562 s^6 + 1.504 s^5 + 1.507 s^4 + 15.19 s^3 + 17.48 s^2 + 36.97 s + 14.51}{s^8 + 116.6 s^7 + 1394 s^6 + 4711 s^5 + 1.173e004 s^4 + 2.022e004 s^3 + 2.267e004 s^2 + 1.984e004 s + 5717}$$

$$G_{12} = \frac{-0.15 s^6 - 1.476 s^5 - 1.176 s^4 - 15.22 s^3 - 14.84 s^2 - 35.91 s - 13.94}{s^8 + 116.6 s^7 + 1394 s^6 + 4711 s^5 + 1.173e004 s^4 + 2.022e004 s^3 + 2.267e004 s^2 + 1.984e004 s + 5717}$$

$$G_{13} = \frac{2.837 s^{13} + 36.95 s^{12} + 139.7 s^{11} + 821.9 s^{10} + 2242 s^9 + 7267 s^8 + 1.545e004 s^7 + 2.978e004 s^6 + 4.257e004 s^5 + 4.566e004 s^4 + 3.477e004 s^3 + 1.336e004 s^2 + 17.65 s - 799.8}{s^{15} + 118.8 s^{14} + 1660 s^{13} + 8557 s^{12} + 3.171e004 s^{11} + 8.523e004 s^{10} + 1.816e005 s^9 + 3.086e005 s^8 + 4.238e005 s^7 + 4.691e005 s^6 + 4.101e005 s^5 + 2.77e005 s^4 + 1.362e005 s^3 + 4.397e004 s^2 + 8460 s + 799.8}$$

$$G_{21} = \frac{-0.004473 s^6 - 0.4983 s^5 - 1.148 s^4 + 27.37 s^3 + 12.85 s^2 + 85.19 s + 2.191}{s^8 + 116.6 s^7 + 1394 s^6 + 4711 s^5 + 1.173e004 s^4 + 2.022e004 s^3 + 2.267e004 s^2 + 1.984e004 s + 5717}$$

$$G_{22} = \frac{-0.006028 s^6 - 0.6257 s^5 - 1.918 s^4 + 37.7 s^3 + 14.79 s^2 + 114.7 s + 2.952}{s^8 + 116.6 s^7 + 1394 s^6 + 4711 s^5 + 1.173e004 s^4 + 2.022e004 s^3 + 2.267e004 s^2 + 1.984e004 s + 5717}$$

$$G_{23} = \frac{0.2587 s^{18} + 40.29 s^{17} + 1712 s^{16} + 3.282e004 s^{15} + 3.027e005 s^{14} + 8.473e005 s^{13} - 7.742e006 s^{12} - 7.933e007 s^{11} - 3.329e008 s^{10} - 1.088e009 s^9 - 3.199e009 s^8 - 5.394e009 s^7 - 9.52e009 s^6 - 8.621e009 s^5 - 7.758e009 s^4 - 2.578e009 s^3 - 5.01e008 s^2 - 1.135e007 s}{s^{20} + 168.8 s^{19} + 8600 s^{18} + 2.203e005 s^{17} + 3.357e006 s^{16} + 3.286e007 s^{15} + 2.166e008 s^{14} + 1.006e009 s^{13} + 3.491e009 s^{12} + 9.579e009 s^{11} + 2.114e010 s^{10} + 3.832e010 s^9 + 5.717e010 s^8 + 7.022e010 s^7 + 7.032e010 s^6 + 5.626e010 s^5 + 3.495e010 s^4 + 1.59e010 s^3 + 4.828e009 s^2 + 8.859e008 s + 7.998e007}$$

C.3 VELOCIDAD 40 NUDOS.

Las funciones de transferencia del proceso linealizado a la velocidad de 40 nudos son :

$$G_{11} = \frac{0.1694 s^6 + 1.542 s^5 + 1.206 s^4 + 21.44 s^3 + 24.19 s^2 + 58.57 s + 25.83}{s^8 + 115.9 s^7 + 1384 s^6 + 4662 s^5 + 1.208e004 s^4 + 2.147e004 s^3 + 2.5e004 s^2 + 2.326e004 s + 7324}$$

$$G_{12} = \frac{-0.1626 s^6 - 1.511 s^5 - 0.8486 s^4 - 21.48 s^3 - 20.22 s^2 - 57.07 s - 24.83}{s^8 + 115.9 s^7 + 1384 s^6 + 4662 s^5 + 1.208e004 s^4 + 2.147e004 s^3 + 2.5e004 s^2 + 2.326e004 s + 7324}$$

$$G_{13} = \frac{1.78 s^{13} + 24.87 s^{12} + 125.5 s^{11} + 790 s^{10} + 2531 s^9 + 9595 s^8 + 2.334e004 s^7 + 5.072e004 s^6 + 7.92e004 s^5 + 9.255e004 s^4 + 7.569e004 s^3 + 3.045e004 s^2 - 57.23 s - 2080}{s^{15} + 118.5 s^{14} + 1690 s^{13} + 9142 s^{12} + 3.6e004 s^{11} + 1.028e005 s^{10} + 2.343e005 s^9 + 4.262e005 s^8 + 6.29e005 s^7 + 7.502e005 s^6 + 7.087e005 s^5 + 5.187e005 s^4 + 2.762e005 s^3 + 9.678e004 s^2 + 2.027e004 s + 2080}$$

$$G_{21} = \frac{-0.00525 s^6 - 0.5713 s^5 - 0.6887 s^4 + 38.38 s^3 + 21.69 s^2 + 126.7 s + 5.261}{s^8 + 115.9 s^7 + 1384 s^6 + 4662 s^5 + 1.208e004 s^4 + 2.147e004 s^3 + 2.5e004 s^2 + 2.326e004 s + 7324}$$

$$G_{22} = \frac{-0.007074 s^6 - 0.7262 s^5 - 1.353 s^4 + 52.85 s^3 + 25.35 s^2 + 170.6 s + 7.089}{s^8 + 115.9 s^7 + 1384 s^6 + 4662 s^5 + 1.208e004 s^4 + 2.147e004 s^3 + 2.5e004 s^2 + 2.326e004 s + 7324}$$

$$G_{23} = \frac{0.1605 s^{18} + 24.87 s^{17} + 1049 s^{16} + 1.982e004 s^{15} + 1.749e005 s^{14} + 3.161e005 s^{13} - 7.388e006 s^{12} - 7.396e007 s^{11} - 3.806e008 s^{10} - 1.508e009 s^9 - 4.567e009 s^8 - 8.843e009 s^7 - 1.537e010 s^6 - 1.556e010 s^5 - 1.401e010 s^4 - 5.119e009 s^3 - 1.086e009 s^2 - 3.742e007 s}{s^{20} + 168.5 s^{19} + 8615 s^{18} + 2.221e005 s^{17} + 3.418e006 s^{16} + 3.397e007 s^{15} + 2.291e008 s^{14} + 1.101e009 s^{13} + 3.999e009 s^{12} + 1.154e010 s^{11} + 2.693e010 s^{10} + 5.182e010 s^9 + 8.231e010 s^8 + 1.08e011 s^7 + 1.159e011 s^6 + 9.967e010 s^5 + 6.666e010 s^4 + 3.266e010 s^3 + 1.071e010 s^2 + 2.131e009 s + 2.08e008}$$

APENDICE D : DESCOMPOSICION EN VALORES SINGULARES.

La descomposición en valores singulares SVD de una matriz $K(m \times n)$ consiste en expresarla como el producto de tres matrices

$$K = U \cdot \Sigma \cdot V^T \quad (D.1)$$

donde :

- U es una matriz ortonormal ($m \times m$), cuyas columnas representan los vectores singulares por la izquierda.
- V es una matriz ortonormal ($n \times n$), cuyas columnas representan los vectores singulares por la derecha.
- Σ es una matriz diagonal ($m \times n$) de escalares, llamados los vectores singulares, que están organizados en orden descendente, tal que $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \dots \geq \sigma_m \geq 0$

Todos los vectores singulares tanto de U como de V se caracterizan por tener módulo unitario y ser ortogonales entre sí.

El número de condición γ es la razón entre el mayor y el menor valor singular de la matriz de ganancias en estado estacionario SSGM.

$$\gamma = \frac{\sigma_1}{\sigma_m} \quad (D.2)$$

Para calcular el número de condición de la frecuencia, se utiliza la función de Matlab **sigma.m** aplicada sobre la matriz del proceso linealizado P , cuyos elementos aparecen en el apéndice C.

$$P = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{21} \end{bmatrix} \quad (D.3)$$

APENDICE E: FRECUENCIA DE ENCUENTRO.

Sea un buque moviéndose con una velocidad U , expresada en metros por segundo, sobre la superficie del mar. El frente de las olas se desplaza con una velocidad c . Las olas inciden sobre el buque formando un ángulo μ con la dirección de movimiento del barco, como se muestra en la Figura A.1:

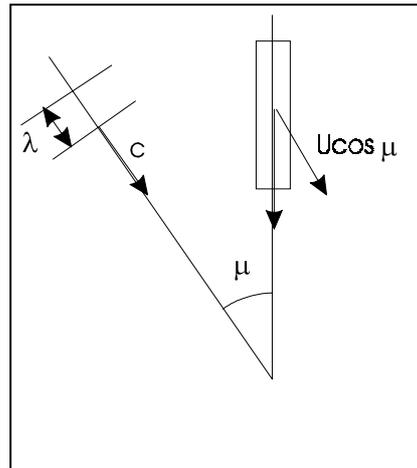


Figura E.1: Olas incidiendo sobre un buque formando un ángulo μ

El tren de olas regulares posee una frecuencia ω , es uno de sus parámetros más importantes. Esta frecuencia ω tiene influencia directa sobre el movimiento del barco. Los movimientos propios de un barco dependen críticamente de la frecuencia a la cual un barco en movimiento se encuentra con estas olas regulares, es la denominada frecuencia de encuentro ω_e .

De la Figura A.1 se puede ver que la componente de la velocidad del barco en la dirección de incidencia de la onda es $U \cos \mu$, y que las olas pasaran el barco con una velocidad relativa de $c - U \cos \mu$.

Puesto que las crestas de las olas se encuentran apartadas entre si una distancia λ , una cresta se encontrará con el barco con un periodo de encuentro T_e .

$$T_e = \frac{\lambda}{c - U \cos \mu}$$

En aguas profundas se obtiene que la frecuencia de encuentro es:

$$\omega_e = \omega - kU \cos \mu = \omega - \frac{\omega^2 U}{g} \cos \mu \quad (\text{E.1})$$

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

donde g es la aceleración de la gravedad. Para mar de proa $\mu=180^\circ$ la ecuación (E.1) toma la forma :

$$\omega_e = \omega + kU = \omega + \frac{\omega^2 U}{g} \quad (E,2)$$

Las series temporales de oleaje irregular obtenidas en el CEHIPAR [2], poseen una frecuencia absoluta dominante ω_b :

- Si SSN=4 $\omega_b = 0.8369$ rad/seg
- Si SSN=5 $\omega_b = 0.6282$ rad/seg
- Si SSN=6 $\omega_b = 0.4832$ rad/seg

En la Tabla E.1 se muestran la frecuencia de encuentro dominante para cada pareja de combinaciones de SSN y velocidad del buque.

Tabla E.1: Frecuencia de encuentro dominante en rad/seg

V(nudos)	SSN=4	SSN=5	SSN=6
20	1.5659	1.0389	0.7262
30	1.9304	1.2443	0.8477
40	2.2949	1.4497	0.9692

APENDICE F: FUNCIONES PROGRAMADAS EN MATLAB

Para la sintonía de los controladores G_{c1} y G_{c2} se utilizaron las series temporales de la altura de ola seleccionadas por la función **seleccion_ola.m** almacenadas en los ficheros de datos

experXeY.mat

Donde X hace referencia a la velocidad y puede tomar los valores 2 (20 nudos), 3(30 nudos) o 4(40 nudos) y donde Y hace referencia al estado de la mar 4, 5 o 6.

Se utilizaron los ficheros **mod_ver_20.mat**, **mod_ver_30.mat** y **mod_ver_20.mat** donde se encuentran almacenadas las funciones de transferencia de la dinámica vertical del buque G_{H1} , G_{H2} , G_{P1} y G_{P2} ; y las constantes K_1 y K_2 . Así como los ficheros **mod_act_p20.mat**, **mod_act_p30.mat** y **mod_act_p40.mat** que contienen las funciones de transferencia del modelo linealizado de los actuadores para control en posición, que se utilizaron para estudiar el índice de interacción entre las variables del proceso. Para la obtención de la matriz de ganancias relativas se programó la función **cal_rga.m** que necesita conocer los modelos lineales dados por **sistema.m**

Se programó la función **sintonizando.m** que configura los parámetros de la función de optimización **fmincon.m**. Esta última función minimiza la función de coste **coste.m**, dado un vector inicial θ_0 devolviendo el vector de parámetros óptimo θ_{opt}

Indicar que la función **sintonizando.m** utiliza a su vez la función **preparar.m** que configura los parámetros necesarios para poder correr las simulaciones del esquema Simulink **esquema2Ps.mdl** cada vez que se llama a la función **coste.m**.

Se utilizó la función **grafos.m** para la obtención de las gráficas que aparecen en la sección 6. Dentro de esta función se utilizó la función **cal_msi.m** para dibujar la gráfica del MSI, que a su vez requiere de la utilización de la función **imareo.m**

En la Figura F.1 se muestra el esquema Simulink **esquema2Ps.mdl**.

Este esquema consta de tres bloques :

1. El bloque *ship+actuators* que implementa el proceso (dinámica vertical del buque + actuadores no lineales)
2. El bloque *Red de desacoplo* que implementa la red de desacoplo.
3. El bloque *controlador* que implementa los controladores G_{c1} y G_{c2}
4. El bloque *Sensors* que implementa el calculo de la aceleración vertical J.

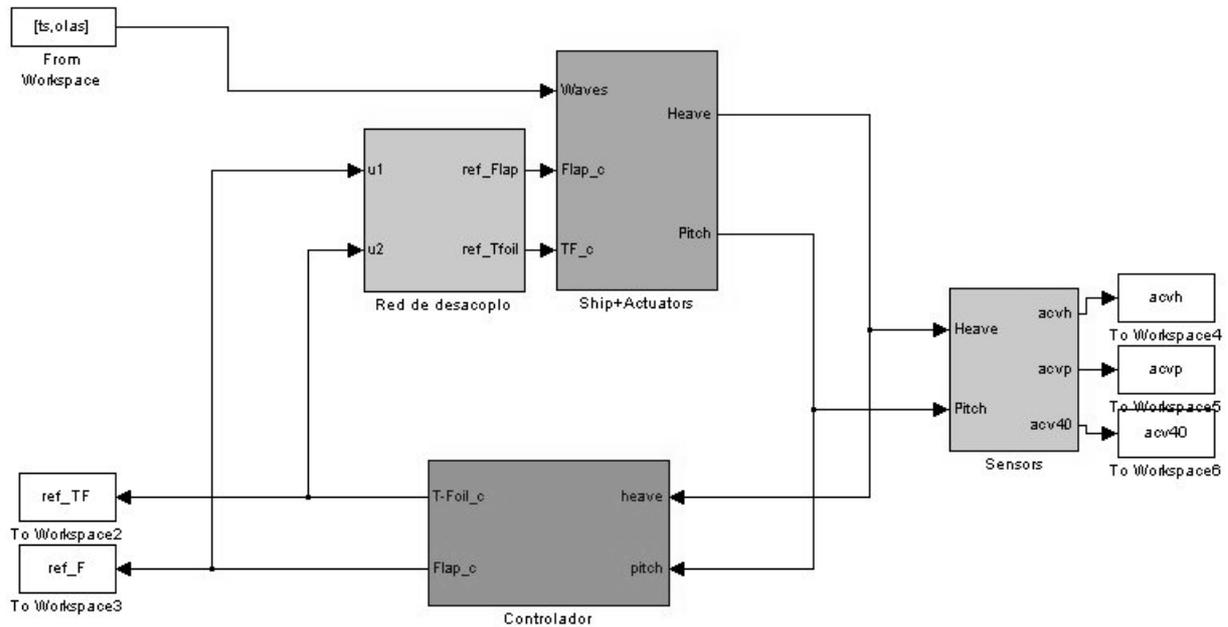


Figura F.1 :Diagrama Simulink de esquema2Ps.mdl

Con el fin de aumentar la velocidad del método de sintonía en cada iteración la simulación se realiza considerando las 240 primeras muestras de la serie temporal de altura de la olas. Además en el bloque de actuadores no lineales se prescindió de las señales de cavitación y del bloque underwater

Para la validación de los resultados obtenidos se utiliza el fichero Simulink **esquema2P.mdl** que es semejante a **esquema2PS.mdl**, salvo en aspectos prácticos de configuración de los parámetros de los controladores y tiempo de simulación ya que utiliza todas las muestras disponibles de la serie temporal de altura de la ola.

Para la realización de las simulaciones del proceso sin actuadores se utiliza **esquemaSA.mdl**.

En las siguientes subsecciones se muestra el código de las funciones utilizadas programadas en Matlab por orden alfabético.

F.1 CAL_MSI.M

```

%CAL_MSI
% Esta función dibuja la gráfica del MSI/100 en los casos: (a) sin actuadores
% (b) posición fija (c) con control.
% Calcula los valores del MSI/100 en el máximo y en la frecuencia de encuentro dominante,
% así como el porcentaje de reducción del MSI/100 obtenido.
%
% Parametros de entrada:
% J    valor de la aceleración vertical media medida a 40 m del C.G.
% V    velocidad del buque ( 20, 30 o 40 nudos)
% SSN  estado de la mar (4,5 o 6)
%
% J. M. Diaz( julio 2000)

function cal_msi(J,V,SSN)

% Rango de frecuencias
w=0.01:.01:3;
% Calculo del MSI sin actuadores
J0= sel_J0(V,SSN);
msi0=imareo(J0,w);
  
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
% Calculo del MSI con actuadores en posición
JPF= sel_JPF(V,SSN);
msipf=imareo(JPF,w);

% Calculo del MSI con actuadores
msi=imareo(J,w);

% Calculo del máximo del MSI/100 para los tres casos
[m0,pos_max0] = max(msi0);
display('Máximo del MSI/100 sin actuadores')
m0
[mpf,pos_maxpf] = max(msipf);
display('Máximo del MSI/100 con actuadores en posición fija')
mpf

[m,pos_max] = max(msi);
display('Máximo del MSI/100 con control')
m

% Calculo del porcentaje de reducción del máximo del MSI/100
display('Reducción en porcentaje del máximo MSI/100 con control')
R_MSI=((m0-m)/m0)*100
R_MSIs=num2str(R_MSI);

% Representación gráfica
figure(8)
plot(w,msi0,'r:',w,msipf,'k-.',w,msi,'b')
legend('a','b','c')
xlabel('Frecuencia de encuentro (rad/seg)')
ylabel('MSI/100')
ins=['Reduccion del máximo del MSI/100 en un ' R_MSIs '%'];
title(ins)

% Seleccion de la frecuencia natural propia del SSN
if SSN==4
    wo=0.8369;
elseif SSN==5
    wo=0.6282;
else
    wo=0.4832;
end
% Calculo de la frecuencia de encuentro
we=wo+(0.51*V*wo^2)/9.8;
wes=num2str(we);
L=length(msi0);
enco=we*ones(L,1);
% Calculo del msi sin actuadores a la frecuencia de encuentro del oleaje.
ins=['MSI/100 sin actuadores a we= ' wes ' rad/seg'];
display(ins)
msi0p=imareo(J0,we)

% Calculo del msi con actuadores en posición fija a la frecuencia de encuentro del oleaje.
ins=['MSI/100 con actuadores en posición fija a we= ' wes ' rad/seg'];
display(ins)
msipfp=imareo(JPF,we)

% Calculo del msi con control a la frecuencia de encuentro del oleaje.
ins=['MSI/100 con control a we= ' wes ' rad/seg'];
display(ins)
msip=imareo(J,we)
% Calculo del porcentaje de reducción del MSI/100
ins=['Reducción con actuadores en posiciones fijas a we= ' wes ' rad/seg'];
display(ins)
R_MSIP=((msi0p-msipfp)/msi0p)*100

% Calculo del porcentaje de reducción del MSI/100
ins=['Reducción en porcentaje del MSI/100 con control a we= ' wes ' rad/seg'];
display(ins)
R_MSIP=((msi0p-msip)/msi0p)*100
R_MSIPs=num2str(R_MSIP);

% representación gráfica
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
figure(9)
plot(w,msi0,'r:',w,msipf,'k-',w,msi,'b',enco,msi0,'k')
legend('a','b','c')
xlabel('Frecuencia de encuentro (rad/seg)')
ylabel('MSI/100')
ins=['Reducción(1 rad/seg)= ' R_MSIs ' % Reduccion('wes 'rad/seg)= ' R_MSIs ' % ' ] ;
title(ins)
```

F.2 CAL_RGA.M

```
% CAL_RGA
% Esta función calcula la matriz de ganancias relativas RGA, dadas las funciones de
% transferencia G11,G12, G21 y G22 de un proceso multivariable 2x2.
%
% J.M.Diaz
% 27-junio-2000

function [SSGM,RGA]=cal_rga(f11,f12,f21,f22)
[num11,den11]=tfdata(f11,'v');
[num12,den12]=tfdata(f12,'v');

[num21,den21]=tfdata(f21,'v');
[num22,den22]=tfdata(f22,'v');

%Calculo de la SSGM

k11=ganancia(num11,den11);
k12=ganancia(num12,den12);
k21=ganancia(num21,den21);
k22=ganancia(num22,den22);

SSGM=[k11 k12;k21 k22];

%Calculo de la RGA:
RGA=SSGM.*(inv(SSGM))';
```

F.3 COSTE.M

```
% COSTE ( para la red de primer orden)
% Esta función implementa la función de aceleración media a 40 metros del C.G
% Requiere como entrada el vector de parametros x=[Kc1,zc1,pc1,Kc2,zc2,pc2]'
% Devuelve como salida el valor f.
%
% J.M. Diaz
%
% julio-2000
function f=coste(x)
% Funciones de Transferencia de los controladores PD1 y PD2
Kc1=x(1);
zc1=x(2);
pc1=x(3);
Kc2=x(4);
zc2=x(5);
pc2=x(6);

nC1=Kc1*[1 zc1];
assignin('base','numC1',nC1)
dC1=[1 pc1];
assignin('base','denC1',dC1)
Gc1=tf(nC1,dC1);

nC2=Kc2*[1 zc2];
assignin('base','numC2',nC2)
dC2=[1 pc2];
assignin('base','denC2',dC2)
Gc2=tf(nC2,dC2);

sim('esquema2PS');%Busca variables en el espacio de trabajo

f=(sum(abs(acv40))/length(acv40));
```

F.4 GRAFOS.M

```
% Este programa MATLAB dibuja las graficas de heave, pitch, ref_FLAP, ref_T_FOIL,  
% acv40 y MSI obtenidas de simular el proceso con control y sin actuadores  
% Tambien calcula las reducciones en el valor de J y en el valor del MSI,  
% junto con otros datos de interes.  
% Una vez configurado el entorno con la función preparar.m y escrito un vector  
% de parametros x=[KP1, TD1, KP2, TD2] realiza las simulaciones y devuelve los graficas  
% y los resultados.  
%  
% J.M. Díaz (julio 2000)  
  
close all  
kp1=x(1);  
Td1=x(2);  
kp2=x(3);  
Td2=x(4);  
nC1=[kp1*1.1*Td1   kp1];  
dC1=[0.1*Td1 1];  
display('FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL CONTROLADOR GC1')  
Gc1=tf(nC1,dC1)  
cal_wn_fa_zpc(Gc1)  
  
nC2=[kp2*1.1*Td2   kp2];  
dC2=[0.1*Td2 1];  
display('FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL CONTROLADOR GC2')  
Gc2=tf(nC2,dC2)  
cal_wn_fa_zpc(Gc2)  
  
sim('esquema2P')  
%Cargar el fichero donde se encuentra los registros de las simulaciones sin actuadores.  
sim('esquemaSA')  
N1=length(ola)  
e2m1i=(heave_sa)'*(heave_sa)/N1;  
e2m2i=(pitch_sa)'*(pitch_sa)/N1;  
e2m3i=(acvh_sa)'*(acvh_sa)/N1;  
e2m4i=(acvp_sa)'*(acvp_sa)/N1;  
e2m5i=(acv40_sa)'*(acv40_sa)/N1;  
  
%Dibujar gráficas:  
figure(1)  
e2m1=(heavec)'*(heavec)/N1;  
e2m1s=num2str(e2m1);  
plot(t,heave_sa,'r',t,heavec,'b')  
xlabel('Tiempo (seg)')  
ylabel('Heave (metros)')  
legend('heave(sin actuadores)','heave (con control)')  
ins=['e2m=' e2m1s];  
title(ins)  
  
figure(2)  
e2m2=(pitchc)'*(pitchc)/N1;  
e2m2s=num2str(e2m2);  
plot(t,pitch_sa,'r',t,pitchc,'b')  
xlabel('Tiempo (seg)')  
ylabel('Pitch (grados)')  
legend('pitch(sin actuadores)','pitch (con control)')  
ins=['e2m=' e2m2s];  
title(ins)  
  
figure(3)  
plot(t,ref_F)  
xlabel('Tiempo (seg)')  
ylabel('refFlap(grados)')  
%ins=['señal de controlador del heave'];  
%title(ins)  
  
figure(4)  
plot(t,ref_TF)  
xlabel('Tiempo (seg)')
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
ylabel('refTfoil(grados)')
%ins=['señal de controlador del pitch'];
%title(ins)

%figure(5)
e2m3=(acvh) '* (acvh)/N1;
%e2m3s=num2str(e2m3);
%plot(t,acvh_sa,'r:',t,acvh,'b')
%xlabel('Tiempo (seg)')
%ylabel('(metros/seg^2)')
%legend('acvhsa','acvh')
%ins=['ACELERACION VERTICAL HEAVE e2m=' e2m3s];
%title(ins)

%figure(6)
e2m4=(acvp) '* (acvp)/N1;
%e2m4s=num2str(e2m4);

%plot(t,acvp_sa,'r:',t,acvp,'b')
%xlabel('Tiempo (seg)')
%ylabel('(grados/m^2)')
%legend('acvpsa','acvp')
%ins=['ACELERACION VERTICAL PITCH e2m=' e2m4s];
%title(ins)

R_e2h=((e2m1i-e2m1)/e2m1i)*100;
R_e2p=((e2m2i-e2m2)/e2m2i)*100;
R_e2avh=((e2m3i-e2m3)/e2m3i)*100;
R_e2avp=((e2m4i-e2m4)/e2m4i)*100;
e2m5=(acv40) '* (acv40)/N1;
e2m5s=num2str(e2m5);

R_e2acv40=((e2m5i-e2m5)/e2m5i)*100;
display('ACELERACION MEDIA A 40 m SIN ACTUADORES')
J0=sum(abs(acv40_sa))/length(acv40_sa)
display('ACELERACION MEDIA A 40 m CON CONTROL')
J=sum(abs(acv40))/length(acv40)
display('PORCENTAJE DE REDUCCION DE LA ACELERACION MEDIA A 40 m ')
Re_J=((J0-J)/J0)*100

figure(7)
e2m5=(acv40) '* (acv40)/N1;
e2m5s=num2str(e2m5);
Js=num2str(J);
plot(t,acv40_sa,'r:',t,acv40,'b')
ylabel('acv40(metros/seg^2)')

xlabel('Tiempo (seg)')
legend('acv40(sin actuadores)','acv40(con control)')
ins=['e2m=' e2m5s];
title(ins)

cal_msi(J,V,SSN)
```

F.5 IMAREO.M

```
% IMAREO
% Esta función calcula el MSI conocida la aceleración vertical a y la frecuencia de encuentro
% w.
%
% J.M. De la Cruz (abril 2000)
function msi=imareo(a,w)
m=-0.819+2.32*(log10(w)).^2;
I=(-log10(a/9.8)+m)/0.4/sqrt(2);

msi=[];
for i=1:size(I,2),
    if I(i)>=0,
        msi=[msi,0.5-0.5*abs(erf(I(i)))];
    else
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
        msi=[msi,0.5+0.5*abs(erf(I(i)))];  
    end  
end
```

F.6 PREPARAR.M

```
% PREPARAR  
%  
% Este programa en MATLAB configura los parametros necesarios para poder correr las  
% simulaciones de los archivos ESQUEMA_2P, ESQUEMA_2S, ESQUEMA_4P, ESQUEMA_4PA,  
% ESQUEMA_4PG, ESQUEMA_4PT  
% Solo es necesario introducir la velocidad del buque U=2,3 o 4  
% y el estado de la mar SSN=4,5 o 6  
%  
% Ejemplo: U=3;SSN=5; preparar  
%  
% J.M. DIAZ (junio 2000)  
  
close all  
if U==2  
    V=20  
    load mod_ver_20  
    load mod_act_p20  
end  
  
if U==3  
    V=30  
    load mod_ver_30  
    load mod_act_p30  
end  
  
if U==4  
    V=40  
    load mod_ver_40  
    load mod_act_p40  
end  
  
% Fichero que contiene los parámetros de los actuadores.  
actval  
% Carga de los series experimentales  
[t,ola,tfin,L]=seleccion_ola(U,SSN);  
  
%Ls=round(L/2)  
Ls=240;  
ts=t(1:Ls);  
olas=ola(1:Ls);  
tfins=ts(Ls);  
  
%Modelos lineales  
sistema
```

F.7 SELECCION_OLA.M

```
% SELECCION_OLA  
% Esta funcion escoge la serie temporal de altura de olas, según el estado de la mar y la  
% velocidad del buque que se le ponga.  
%  
% Ejemplo:  
% [t,ola,tfin]=seleccion_ola(2,5) selecciona V=20 nudos SSN=5  
%  
% J.M. Diaz (mayo 2000)  
  
function [t,ola,tfin,L]=seleccion_ola(U,SSN)  
V=num2str(U);  
mar=num2str(SSN);  
ins=['load exper' V 'e' mar];  
eval(ins);  
L=length(ola);  
t=(0:0.25:0.25*(L-1))';  
tfin=t(L);
```

F.8 SINTONIZANDO.M

```
% Programa en MATLAB para configurar los parametros necesarios de la funcion de
% optimización NO LINEAL FMINCON.m
%
% J.M. Diaz (junio 2000)
t0=clock;
preparar
%Intervalos de busqueda para los parámetros
LB=[1,0.1,1,0.1]';
UB=[30,3,15,3]';
%Condiciones iniciales aleatorias
%x0=[unifrnd(LB(1),UB(1),1,1);unifrnd(LB(2),UB(2),1,1);unifrnd(LB(3),UB(3),1,1);unifrnd(LB(4),
UB(4),1,1)]
%definicion de las restricciones
A1=[-1 1 0 0 0 0 0 0]';
A2=[0 0 -1 1 0 0 0 0]';
A3=[0 0 0 0 -1 1 0 0]';
A4=[0 0 0 0 0 0 -1 1]';
A=[A1,A2,A3,A4];
b=[-LB(1) UB(1) -LB(2) UB(2) -LB(3) UB(3) -LB(4) UB(4)]';
%Funcion de calculo del problema de optimización
options=optimset('Display','iter');
[x,fval,exitflag,output]=fmincon('coste',x0,A,b,[],[],LB,UB,[],options)
t1=clock;
tt=etime(t1,t0)
```

F.9 SISTEMA.M

```
% Este programa MATLAB genera las funciones de transferencia del proceso:
% Barco+Actuadores lineales.
% G11, G12, G13, G21, G22, G23
% Ademas devuelve la matriz RGA y la red de desacoplo
% Para poder ejecutarse primero se debe de ejecutar el archivo preparar.m
%
% J.M. Diaz (junio 2000)

G1He=G1H*K1;
G2He=G2H*(1/K1);
Gcorr=tf([100],[1 100]);
G2He=series(G2He,Gcorr);
G1Pe=G1P*K2;
G2Pe=G2P*(1/K2);

%Nomenclatura utilizada:
G3=Fc2Fh;G4=TFc2Fh;G5=He2Fh;G6=Pi2Fh;
G7=Fc2Mp;G8=TFc2Mp;G9=He2Mp;G10=Pi2Mp;
A=G5-(1/G2He);B=G10-(1/G2Pe);den=(G9*G6-A*B);

%Funciones de transferencia del sistema global:
%h=G11*f+G12*t+G13*w
%p=G21*f+G22*t+G23*w

G13=(B*G1He-G6*G1Pe)/den; G11=(B*G3-G6*G7)/den; G12=(B*G4-G6*G8)/den;

G23=(A*G1Pe-G9*G1He)/den; G21=(A*G7-G9*G3)/den; G22=(A*G8-G9*G4)/den;
%Cancelación de polos y ceros:
G11=minreal(G11);G12=minreal(G12);G13=minreal(G13);
G21=minreal(G21);G22=minreal(G22);G23=minreal(G23);

[SSGM,RGA]=cal_rga(G11,G12,G21,G22);

%Red de desacoplo W(s)
w11=1;
w12=minreal(-G12/G11);
w22=1;
w21=minreal(-G21/G22);
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

% SISTEMA G(s)W(s)

$GW11=G11+G12*w21$; $GW12=G11*w12+G12$;
 $GW21=G21+G22*w21$; $GW22=G21*w12+G22$;

$[SSGM,RGA]=cal_rga(GW11,GW12,GW21,GW22)$;

BIBLIOGRAFIA

- [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 Constrints*. 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] F. Morilla.(2000) "Apuntes curso de doctorado: Control Multivariable" Dpt. Inf. y Aut. UNED. fmorilla@dia.uned.es
- [13] Niederlinski, A. (1971) : "A heuristic Approach to the design of linear multivariable interacting control systems". Automática, Vol. 7, pp. 691-701