



CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

DOCUMENTO N°: **CRIBAV-00-02**

Fecha: **5/11/99**

Código SubProyecto: **TAP97-0607-003-02**

TÍTULO DEL DOCUMENTO

IDENTIFICACION DE MODELOS LINEALES CONTINUOS PARA LA DINAMICA VERTICAL DEL BUQUE TF-120

**(MEDIANTE ALGORITMOS GENETICOS Y MINIMOS CUADRADOS
NO LINEALES)**

Autores:

Joaquín Aranda
Jesús Manuel De La Cruz
Bonifacio De Andrés
Jose Manuel Díaz
Segundo Esteban
Jose María Girón
Luis Grau
Jose Antonio López
Pablo Ruipérez

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

DOCUMENTO N°: **CRIBAV-00-02**

Fecha: **5/11/99**

Código SubProyecto: **TAP97-0607-003-02**

TÍTULO DEL DOCUMENTO

IDENTIFICACION DE MODELOS LINEALES CONTINUOS PARA LA DINAMICA VERTICAL DEL BUQUE TF-120

**(MEDIANTE ALGORITMOS GENETICOS Y MINIMOS CUADRADOS
NO LINEALES)**

Autores:

Joaquín Aranda
Jesús Manuel De La Cruz
Bonifacio De Andrés
Jose Manuel Díaz
Segundo Esteban
Jose María Girón
Luis Grau
Jose Antonio López
Pablo Ruipérez

Grupos: UCM y UNED

Responsables de los Grupos: Jesús Manuel De la Cruz (UCM) y Joaquín Aranda (UNED)

Responsable del Informe: Jesús Manuel De la Cruz (UCM) y Joaquín Aranda (UNED)

SubProyecto: TAP97-0607-003-02

Version: 1

Lista y Filiación de Autores:

Joaquín Aranda (2)
Jesús Manuel De La Cruz (1)
Bonifacio De Andrés (1)
Jose Manuel Díaz (2)
Segundo Esteban (1)
Jose María Girón (1)
Luis Grau (2)
Jose Antonio López (1)
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 presentan los modelos lineales continuos identificados para la dinámica vertical del buque de alta velocidad TF-120, a las velocidades de 20, 30 y 40 nudos. Se han obtenido modelos de fuerza heave, momento pitch, movimiento heave y movimiento pitch. Se presentan también los intervalos de confianza en los parámetros de las funciones de transferencia que representan a cada modelo.

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

CONTENIDO

1. INTRODUCCION	1
2. IDENTIFICACION DE MODELOS : METODOLOGÍA	1
2.1 DATOS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE IDENTIFICACION	3
2.2 IDENTIFICACION DE MODELOS LINEALES	4
2.2.1 RESTRICCIONES EN LA BUSQUEDA DE MODELOS.	5
2.2.2 FUNCION DE COSTE UTILIZADA.	6
2.2.3 ESQUEMAS DE OPTIMIZACIÓN EMPLEADOS.	7
2.2.4 OPTIMIZACION CON ALGORITMOS GENETICOS.	9
2.2.5 OPTIMIZACION CON MINIMOS CUADRADOS NO LINEALES.	13
2.3 VALIDACION DE LOS MODELOS IDENTIFICADOS.	14
2.4 GENERACION DE INTERVALOS	15
2.4.1 SELECCIÓN DE PESOS W.	15
2.4.2 CALCULO DE LOS INTERVALOS DEL SISTEMA	16
3. MODELOS CONTINUOS IDENTIFICADOS PARA EL PRIMER FILTRO	18
3.1 MODELOS G_{1H}	18
3.1.1 VELOCIDAD 20 NUDOS.	18
3.1.2 VELOCIDAD 30 NUDOS.	21
3.1.3 VELOCIDAD 40 NUDOS.	24
3.2 MODELOS G_{1P}	27
3.2.1 VELOCIDAD 20 NUDOS.	27
3.2.2 VELOCIDAD 30 NUDOS.	29
3.2.3 VELOCIDAD 40 NUDOS.	31
4. MODELOS CONTINUOS IDENTIFICADOS PARA EL SEGUNDO FILTRO Y SISTEMA COMPLETO	33
4.1 MODELOS G_{2H} Y G_H	33
4.1.1 VELOCIDAD 20 NUDOS.	33
4.1.2 VELOCIDAD 30 NUDOS.	41
4.1.3 VELOCIDAD 40 NUDOS.	49
4.2 MODELOS G_{2P} Y G_P	58
4.2.1 VELOCIDAD 20 NUDOS.	58
4.2.2 VELOCIDAD 30 NUDOS.	66
4.2.3 VELOCIDAD 40 NUDOS.	74
5. CONCLUSIONES	82

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

APENDICE A : FUNCIONES MATLAB UTILIZADAS PARA LA IDENTIFICACION DE MODELOS PARA EL PRIMER FILTRO.	87
A.1 IDENT_G1.M	87
A.2 GEN_IR.M	88
A.3 IGUAL_COEF.M	89
A.4 GEN_NUMERADOR.M	91
A.5 RES2.M	92
A.6 BUILD.M	93
A.7 OB_FT.M	93
A.8 CAL_WN_FA_ZPC.M	94
APENDICE B : FUNCIONES MATLAB UTILIZADAS PARA LA IDENTIFICACION DE MODELOS PARA EL SEGUNDO FILTRO.	96
B.1 IDENT_G2.M	96
B.2 PRIMER_FILTRO.M	97
B.3 GEN_NUMERADOR.M	98
B.4 RES2.M	99
B.5 OB_FT.M	100
APENDICE C : FUNCIONES MATLAB UTILIZADAS EN LA GENERACION DE INTERVALOS DEL PRIMER FILTRO	102
C.1 GEN_INTER.M	102
C.2 GEN_PESOS.M	103
C.3 CAL_EPSI.M	106
C.4 OBT_ABC_SYM.M	107
C.5 CAL_COEF1.M	110
APENDICE D : FUNCIONES MATLAB UTILIZADAS EN LA GENERACION DE INTERVALOS DEL SEGUNDO FILTRO	111
D.1 GEN_INTER_G2.M	111
D.2 GEN_PESOS_G2.M	112
APENDICE E : FUNCIONES MATLAB UTILIZADAS EN LAS SIMULACIONES.	115
E.1 SIMU_C.M	115
E.2 SIMU_ACE.M	118
BIBLIOGRAFIA	120

Versión: 1

Fecha: 5/11/99

SubProy.: TAP97-0607-003-02

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.). Es por esto que para conseguir el diseño de controladores robustos se deben obtener modelos de la dinámica vertical de un buque, así como modelos de actuadores y perturbaciones desarrollados por otros equipos de investigación que trabajan en el proyecto.

2. IDENTIFICACION DE MODELOS : METODOLOGÍA

En la Figura 2.1 se muestra el esquema que se siguió en el proceso de identificación de modelos lineales de la dinámica vertical de un buque de alta velocidad como es el Turbo Ferry TF-120.

En el proceso de identificación el punto de partida fue seleccionar el tipo de experimentos que se deseaba que el CEHIPAR (Canal de experiencias Hidrodinámicas del Pardo) realizase en sus instalaciones utilizando una maqueta a escala del buque real para obtener información sobre la dinámica vertical del buque. Este punto se denomina en el esquema como *diseño del experimento*.

El siguiente paso fue la realización por parte del CEHIPAR [2] de los experimentos y ensayos que le habían sido encargados. Se puede dividir los ensayos realizados en dos grandes grupos los obtenidos con oleaje regular y los obtenidos con oleaje irregular. Por otra parte también se hicieron simulaciones con el programa PRECAL [3]. Este punto del proceso se denomina en el esquema como *Adquisición de datos*

Los datos de los experimentos [2] y [7] estuvieron a disposición del grupo de investigación de la UNED el 7 de julio de 1998. Con estos datos se identificaron distintos modelos [5]. Sin embargo, algunos meses más tarde se descubrió que la series temporales de altura de la ola no estaban corregidas al centro de gravedad del buque, sino que eran los registros medidos a 96.25 metros del centro de gravedad del buque. Por este motivo se solicitó al CEHIPAR que corrigiesen los datos al centro de gravedad. En marzo de 1999 se dispuso de datos medidos en el centro de gravedad, tras algunos intentos de modelar con estos datos, se optó por utilizar para la identificación los datos en el dominio de la frecuencia proporcionados por el programa PRECAL corregidos a proa [7].

Para que los método de identificación que se han utilizado actuaran correctamente era necesario que los datos fueran *tratados matemáticamente*. En el caso de los datos en el dominio de la frecuencia obtenidos con PRECAL, para pitch y para heave, se tuvo que sumar o restar 360° a algunos puntos de fase para dar continuidad a la curva de fase. Así como trasladar las medidas de fase desde el centro de gravedad a proa. En el caso de las series temporales de altura de ola, pitch y heave, medidas con oleaje regular e irregular, que se utilizaron en las validaciones de los modelos se eliminaron medias y tendencias y se seleccionaron rangos de muestras adecuadas.

Con los datos en el dominio de la frecuencia obtenidos con PRECAL corregidos a proa [7], se identificaron modelos lineales continuos siso, para momento pitch, fuerza heave, movimiento pitch y movimiento heave.

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Los modelos identificados para ser considerados como válidos debían pasar un proceso de validación. Así dado un modelo se simulaba su respuesta temporal tomando como entradas oleaje irregular u oleaje regular y se comparaba con la respuesta obtenida experimentalmente [7]. Así mismo también se obtenían las aceleraciones verticales de pitch o de heave proporcionadas por el modelo y se comparaban con las aceleraciones¹ verticales [7] de pitch o de heave calculadas a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuernas del barco.

Una vez pasado el proceso de validación se tienen modelos SISO continuos. Estos modelos continuos fueron utilizados como modelos nominales en la obtención de intervalos de incertidumbre en los parámetros de las funciones de transferencia. Si los modelos no hubieran pasado el test de validación se tendría que haber vuelto atrás en el esquema y analizar las causas del desajuste.

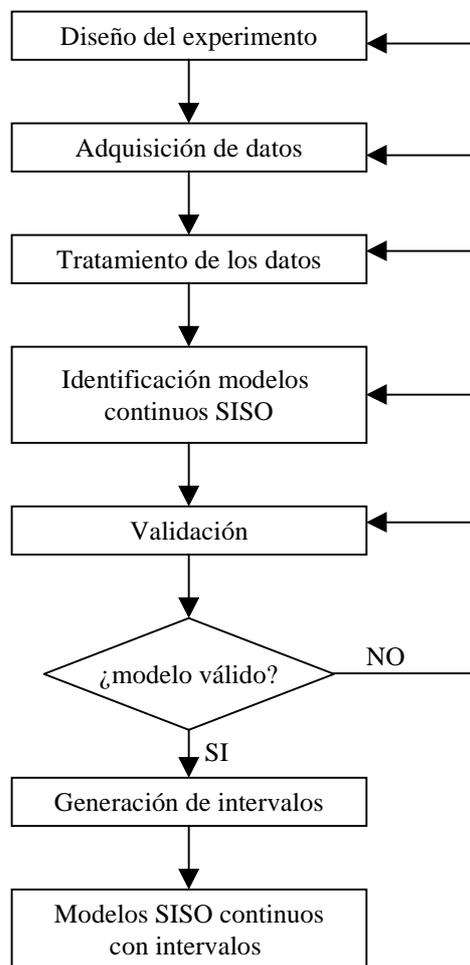


Figura 2.1: Esquema seguido en la identificación de sistemas lineales

¹ La aceleración vertical de heave, o aceleración vertical del centro de gravedad es el promedio entre las aceleraciones medidas en las cuernas 5 y 10, que es entre las cuales se encuentra el centro de giro. La aceleración vertical de pitch se obtiene a partir de la aceleración en la cuerna 20.

2.1 DATOS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE IDENTIFICACION

Las olas que influyen en el comportamiento de los buques en la mar son generalmente irregulares y más o menos aleatorias por naturaleza. Si se comparan dos olas entre si se puede observar que no tienen exactamente la misma altura, viajan a diferentes velocidades y en distintas direcciones.

Las olas regulares nunca se producen en la naturaleza, aunque pueden ser generadas en estanques de ensayo en un laboratorio y forman la base de muchos de los experimentos sobre control marítimo. De igual importancia es el hecho de que la teoría de olas irregulares está basada en la suposición de que pueden ser generadas olas irregulares como una superposición adecuada de olas regulares. Por lo tanto, está claro que las características de las olas regulares tienen una profunda influencia en el comportamiento de los barcos, aunque nunca se presenten en la naturaleza. La realización de ensayos con oleaje regular puede aportar mucha información acerca de la dinámica de un buque.

El CEHIPAR realizó ensayos [2] con oleaje regular y oleaje irregular sobre una maqueta a escala del Turbo Ferry TF-120. Se tomaron medidas de la altura de las olas, movimiento de pitch, movimiento de heave, y aceleraciones verticales en distintas secciones del buque. Se trata de series temporales muestreadas a una frecuencia de 4 Hz.

Se disponía de series temporales medidas de la altura de olas, movimiento de pitch y de heave, obtenido con oleaje irregular del tipo JONSWAP que dependía del estado de la mar (SSN), de acuerdo con STANAG 4194 (Standardized Wave and Wind Environments and Shipboard Reporting of Sea Conditions), que podía ser 4, 5 o 6. También se disponía ensayos realizados con oleaje regular. La velocidad de la maqueta del buque podía ser 20, 30 o 40 nudos. El mar incidía frontalmente sobre la proa del barco, lo que en términos náuticos se denomina mar de proa. Además para cada ensayo se realizaron dos carreras a) y b), con el fin de obtener una mayor validez estadística. Hay que indicar que las series temporales de altura de olas fueron corregidas de 96.25 m del centro de gravedad a la proa del buque, que esta situada a 68.75 m del buque. Una información más detallada acerca de los datos utilizados en la identificación aparece en la referencia [7]. Estas series temporales se utilizaron en la validación de los modelos.

Para la identificación de modelos continuos de momento pitch, fuerza heave, movimiento pitch y movimiento heave se utilizaron los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa [7]. Se tratan de datos de amplitud y de fase a distintas frecuencias de encuentro para las velocidades de 20, 30 y 40 nudos.

El tratamiento de las series temporales se realizó utilizando el entorno gráfico de la herramienta IDENT[®] 4.0.3 perteneciente al programa MATLAB[®] 5.1, debido a su gran comodidad y fácil manejo.

En la Figura 2.2 se muestra un esquema del proceso seguido en el tratamiento matemático de los datos obtenidos con oleaje regular. Se distinguen las siguientes acciones:

-En primer lugar se seleccionó dentro de cada ensayo un conjunto adecuado de muestras

-En segundo lugar se procedió a la eliminación de tendencias y medias estadísticas, en aquellos ensayos que no las tenían eliminadas.

Ambas acciones se realizaron teniendo en cuenta el conocimiento a priori de la forma que debían tener las series temporales. En algunos ensayos aparecían muestras que correspondían al proceso de aceleración para alcanzar la velocidad deseada o al proceso de desaceleración para frenar al buque. Sólo son de interés aquellas muestras tomadas en el momento en el cual, el buque se mantiene a la velocidad deseada.

Una vez terminado este proceso ya se tienen las series temporales listas para ser utilizadas por cualquier método de identificación. O para su uso en validación de modelos.

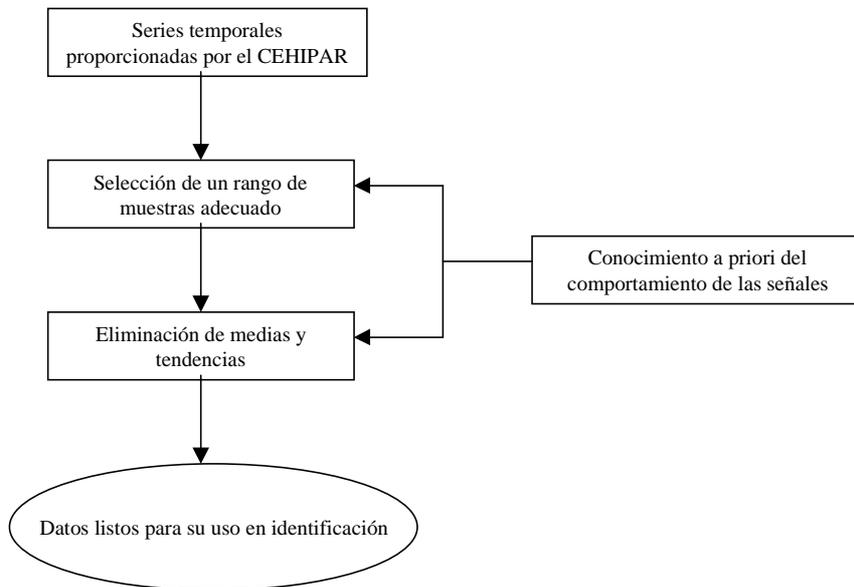


Figura 2.2: Esquema del tratamiento matemático aplicado a las series temporales proporcionadas por el CEHIPAR.

2.2 IDENTIFICACION DE MODELOS LINEALES

Se identificaron modelos lineales continuos siso para el momento pitch, fuerza heave, movimiento de pitch y movimiento heave utilizando los datos de PRECAL corregidos a proa [7], a las velocidades de 20, 30 y 40 nudos. En la Figura 2.3 se muestra el diagrama de bloques del sistema identificado.

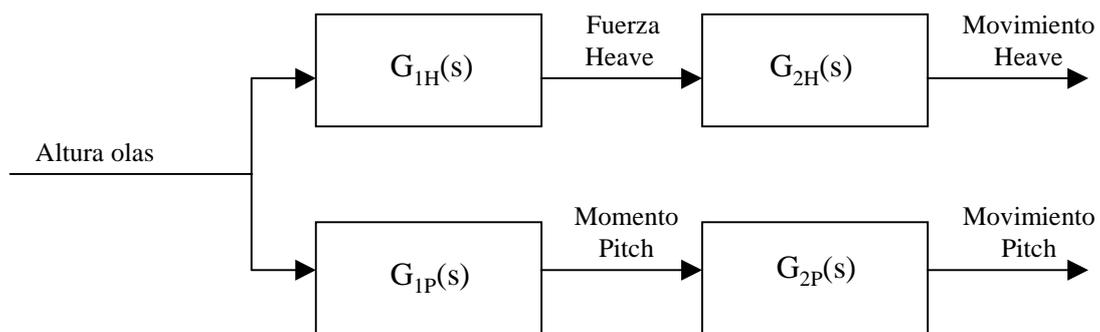


Figura 2.3 : Diagrama de bloques del sistema identificado.

El diagrama de bloques de la Figura 2.3 es equivalente al mostrado en la Figura 2.4.

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

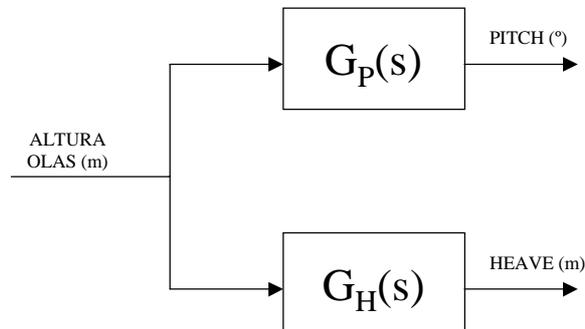


Figura 2.4 : Diagrama de bloques equivalente del sistema identificado.

Se utiliza la siguiente nomenclatura :

$G_{1H}(s)$ es la función de transferencia que tiene como entrada a la altura de olas (m) y como salida a la fuerza heave (kN).

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

$G_H(s)$ es la función de transferencia que tiene como entrada a la altura de olas (m) y como salida al movimiento vertical de heave (m).

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

$G_{2P}(s)$ es la función de transferencia que tiene como entrada al momento pitch (kN·m) y como salida al movimiento pitch (grados)

$G_P(s)$ es la función de transferencia que tiene como entrada a la altura de ola (m) y como salida al movimiento de pitch (grados).

2.2.1 RESTRICCIONES EN LA BUSQUEDA DE MODELOS.

El conocimiento a priori del comportamiento físico de un determinado sistema a identificar es de gran ayuda a la hora de buscar un modelo que se ajuste adecuadamente a las características de dicho sistema. En el caso de la dinámica vertical de un buque de alta velocidad tres son las características físicas deseables en los modelos que habían que identificar :

1. Los modelos deben ser estables.
2. La ganancia del modelo $G_P(s)$ debe tender a ceros a frecuencias bajas.
3. La ganancia del modelo $G_H(s)$ debe tender a la unidad a frecuencias bajas.

Luego estas tres características han sido restricciones que se han impuesto en el proceso de identificación de modelos. Llegado el momento se explicará según el tipo de modelo como se impusieron tales restricciones.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

2.2.2 FUNCION DE COSTE UTILIZADA.

Sean un conjunto N de puntos experimentales de amplitud $|G(j\omega_{ei})|$ y de fase $\arg(G(j\omega_{ei}))$ para distintas frecuencias de encuentro ω_{ei} con $i=1,\dots,N$. La parte real e imaginaria de estos puntos experimentales en el dominio de la frecuencia vendrá dada por :

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(G(j\omega_{ei})) &= |G(j\omega_{ei})| \cos(\arg(G(j\omega_{ei}))) \\ \operatorname{Im}(G(j\omega_{ei})) &= |G(j\omega_{ei})| \operatorname{sen}(\arg(G(j\omega_{ei}))) \end{aligned}$$

Sea la función de transferencia estimada $\hat{G}(j\omega_{ei})$, de expresión genérica :

$$\hat{G}(s) = \frac{b_{m+1}s^m + \dots + b_1}{s^n + a_n s^{n-1} + \dots + a_1} \quad (1)$$

La función de transferencia estimada presenta una estructura (m,n,nps) donde :

- m es el número de ceros.
- n es el número de polos.
- nps es el número de polos simples.

Se desea identificar la estructura y los coeficientes de la función de transferencia estimada $\hat{G}(j\omega_{ei})$ que maximice ([4] y [10]) la función de coste J :

$$J = \frac{100}{J_1} \quad (2)$$

donde

$$\begin{aligned} J_1 &= J_{real} + J_{imag} \\ J_{real} &= \sum_{i=1}^N \left(\operatorname{Re}(G(j\omega_{ei})) - \operatorname{Re}(\hat{G}(j\omega_{ei})) \right)^2 \\ J_{imag} &= \sum_{i=1}^N \left(\operatorname{Im}(G(j\omega_{ei})) - \operatorname{Im}(\hat{G}(j\omega_{ei})) \right)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

La función de coste J debe estar sometida a las restricciones expuestas en la sección 2.2.1, y que se concretan de la siguiente forma :

- G_{1P} debe cumplir que cuando $\omega_{ei} \rightarrow 0$ entonces $|G_{1P}(j\omega_{ei})|=0$, esto implica que si la función de transferencia está expresada en la forma (1) se debe cumplir que $b_1=0$.
- G_{1H} y G_{2H} deben cumplir que cuando $\omega_{ei} \rightarrow 0$ entonces $|G_{1H}(j\omega_{ei})|=1$ y $|G_{2H}(j\omega_{ei})|=1$, esto implica que si estas funciones de transferencia están expresada en la forma (1), se debe cumplir que $|b_1|=|a_1|$.

2.2.3 ESQUEMAS DE OPTIMIZACIÓN EMPLEADOS.

A) Método mixto de optimización con algoritmos genéticos y mínimos cuadrados no lineales con restricciones:

En la Figura 2.5 se muestra el esquema del método mixto de optimización con algoritmos genéticos y mínimos cuadrados no lineales con restricciones empleado para la identificación de los modelos $G_{1H}(s)$ y $G_{2H}(s)$.

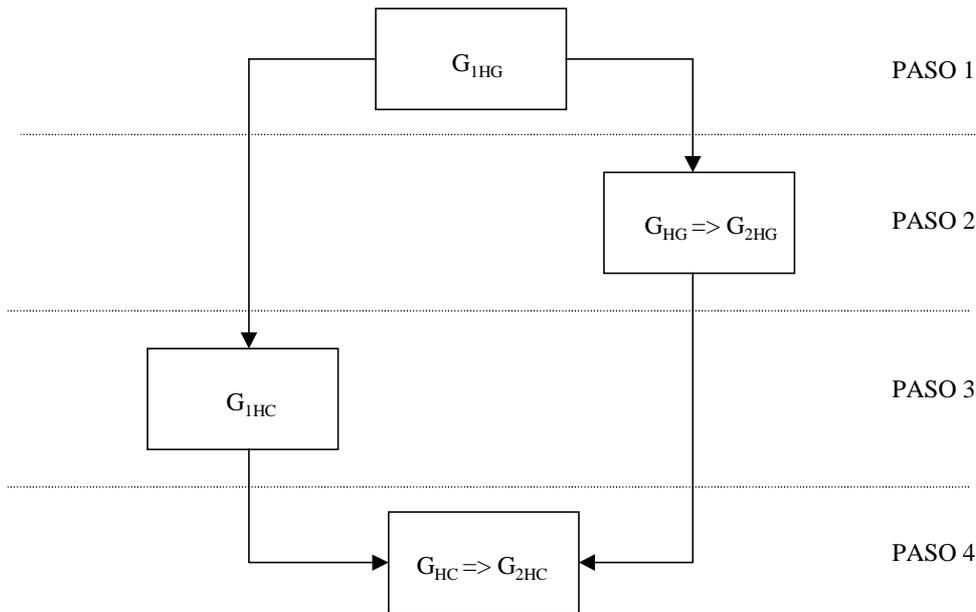


Figura 2.5 : Esquema del método mixto de optimización empleado en la identificación de $G_{1H}(s)$ y $G_{2H}(s)$

El paso 1 del esquema es la obtención de un modelo G_{1HG} para el primer filtro altura de olas- fuerza heave utilizando algoritmos genéticos. Fijada una estructura $(m1,n1,nps1)$ se obtiene con algoritmos genéticos un vector de coeficientes para G_{1HG} cercanos al valor óptimo de la función de coste (2). Se utilizan los puntos de amplitud y de fase proporcionados por PRECAL corregidos a proa para altura de olas - fuerza heave.

El paso 2 del esquema es la obtención de un modelo G_{2HG} para el segundo filtro altura fuerza heave - movimiento heave utilizando algoritmos genéticos. A partir del filtro G_{1HG} identificado en el paso 1, y utilizando los puntos de amplitud y de fase proporcionados por PRECAL corregidos a proa para altura de olas - movimiento heave se identifica G_{HG} y a partir de el se deduce G_{2HG} .

Indicar que en lo que respecta a la fijación de los ordenes $(m1,n1,nps1)$ de la estructura del filtro G_{1HG} y los ordenes $(m2,n2,nps2)$ de la estructura del filtro G_{2HG} se tuvo en cuenta que el filtro total G_{HG} debía de tener un máximo de 6 o 7 polos y un máximo de 5 ceros, con el fin de mantener una coherencia con las ecuaciones teóricas de la dinámica vertical de un buque. Así si el filtro G_{1HG} se identifica con cuatro polos $n1=4$, el segundo filtro G_{2HG} se debe de identificar como mucho con tres polos $n2=3$. Se debe por tanto buscar la estructura que presente una mejor función de coste teniendo en cuenta la limitación en el número total de ceros y de polos.

El paso 3 consiste en obtener mediante mínimos cuadrados no lineales con restricciones el primer filtro G_{1HC} , utilizando como condiciones iniciales la estructura y coeficientes de la función de transferencia para el primer filtro obtenida con algoritmos genético G_{1HG} en el paso 1. Se utilizan los puntos de amplitud y de fase proporcionados por PRECAL corregidos a proa para altura de olas - fuerza heave.

El paso 4 consiste en obtener mediante mínimos cuadrados no lineales la función de transferencia del segundo filtro G_{2HC} , utilizando como condiciones iniciales la estructura y coeficientes de la función de transferencia para el segundo filtro obtenida con algoritmos genético G_{2HG} en el paso 2. Para la obtención del segundo filtro G_{2HC} se utilizan los puntos de amplitud y de fase proporcionados por PRECAL corregidos a proa para altura de olas-movimiento heave, así como el modelo obtenido G_{1HC} obtenido en el paso 3, con lo que también se obtiene G_{HC} .

B) Método puro de optimización con mínimos cuadrados no lineales con restricciones:

En la Figura 2.6 se muestra el esquema del método puro de optimización con mínimos cuadrados empleado para la identificación de los modelos $G_{1P}(s)$ y $G_{2P}(s)$

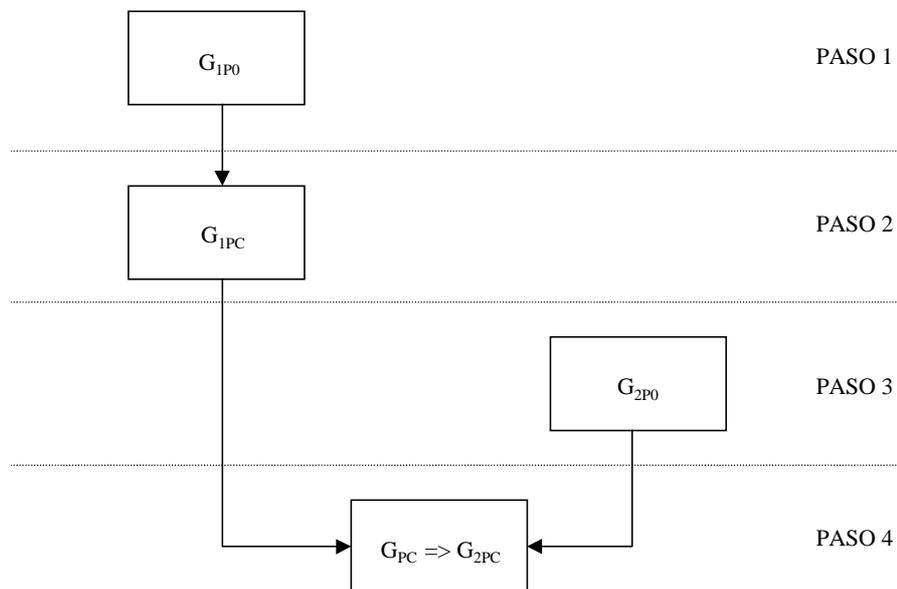


Figura 2.6 : Esquema del método simple de optimización empleado en la identificación de $G_{1PC}(s)$ y $G_{2PC}(s)$

El paso 1 del esquema de optimización es fijar una estructura $(m1,n1,nps1)$ para el modelo del primer filtro altura de olas - momento pitch así como unos valores iniciales aleatorios para los coeficientes de la función de transferencia definida por esa estructura . A tal modelo se le denota por G_{1P0} .

El paso 2 es la obtención de los coeficientes óptimos de la función de transferencia G_{1PC} utilizando mínimos cuadrados no lineales con restricciones, aplicados sobre los puntos de amplitud y de fase proporcionados por PRECAL corregidos a proa para altura de olas - momento pitch. Para obtener G_{1PC} se utilizan como valor inicial el G_{1P0} configurado en el paso 1, utilizándose como función de coste la indicada en (2).

El paso 3 del esquema de optimización es fijar una estructura $(m2,n2,nps2)$ para el modelo del segundo filtro momento pitch - movimiento pitch así como unos valores iniciales aleatorios para los coeficientes de la función de transferencia definida por esa estructura. A tal modelo se le denotará por G_{2P0} .

Indicar que en lo que respecta a la fijación de los ordenes $(m1,n1,nps1)$ de la estructura del filtro G_{1PC} y los ordenes $(m2,n2,nps2)$ de la estructura del filtro G_{2PC} se tuvo en cuenta que el filtro total G_{PC} debía de tener un máximo de 6 o 7 polos y un máximo de 5 ceros, con el fin de mantener una coherencia con las ecuaciones teóricas de la dinámica vertical de un buque. Así si el filtro G_{1PC} se identifica con cuatro polos $n1=4$, el segundo filtro G_{2PC} se debe de identificar como mucho con tres polos $n2=3$. Se debe por tanto buscar la estructura que presente una mejor función de coste teniendo en cuenta la limitación en el número total de ceros y de polos.

El paso 4 es la obtención de los coeficientes óptimos de la función de transferencia G_{2PC} utilizando mínimos cuadrados no lineales con restricciones, aplicados sobre los puntos de amplitud y de fase proporcionados por PRECAL corregidos a proa para altura de olas - movimiento pitch. Para obtener G_{2PC} se utilizan como valor inicial el G_{2P0} configurado en el paso 3, así como la expresión para el primer filtro G_{1PC} obtenida en el paso 2, con lo que también se obtiene G_{PC} . Utilizándose además como función de coste la indicada en (2).

2.2.4 OPTIMIZACION CON ALGORITMOS GENETICOS.

Los algoritmos genéticos han resultado ser en los últimos años una alternativa válida para la resolución de problemas de optimización no resolubles por métodos clásicos. La aplicabilidad de los algoritmos genéticos en diversos campos de la ciencia es un hecho indiscutible. Cuando se aplica un algoritmo genético a un determinado problema de optimización se puede asegurar que la solución que se obtendrá estará cercana al óptimo global. Es por este motivo que se ha utilizado un método mixto de optimización con algoritmos genéticos y mínimos cuadrados no lineales con restricciones para la identificación de los modelos $G_{1H}(s)$ y $G_{2H}(s)$.

La función de transferencia (1) se puede expresar como :

$$G_H = \frac{K(s+a)(s^2+bs+c)(s^2+ds+e)\dots\dots\dots}{(s+f).(s^2+gs+h).(s^2+ks+l)\dots\dots\dots} \quad (4)$$

Luego el problema de optimización que se plantea es la obtención de los parámetros [a,b,c,d,e,....,f,g,h,k,l,...] que maximicen la función de coste (2). Indicar que la función de coste (2) incluye un factor 100 que tiene como objetivo aumentar el rango de comparación de los elementos que componen cada generación en una población del algoritmo genético.

- Descripción del cromosoma -

La clave para aplicar algoritmos genéticos es encontrar una representación del problema en términos de cromosomas, y definir adecuadamente el espacio de búsqueda (acotarlo de forma apropiada repercute en el coste computacional).

Dado el conjunto de parámetros a ajustar, se define el cromosoma como un conjunto de genes correspondiendo cada uno a un parámetro del modelo, [a, b, c, d,m, n,]. Los genes son números reales dentro del rango de variabilidad de los parámetros. En el caso que se está estudiando los parámetros son números reales comprendidos en el rango de $[-\infty +\infty]$. Esto hace que el espacio de búsqueda sea muy grande y el problema de difícil solución.

Se ha visto que se mejora la eficacia del método si en lugar de hacer operar como acabamos de decir, se hace de este otro modo. Se coge cada paréntesis del modelo y se descompone en sus raíces simples, (reales o conjugadas):

$$(s^2 + b.s + c) = (s - r_1).(s - r_2) \quad (5)$$

donde

$$\begin{aligned} r_1 &= real_1 + imag_1.j \\ r_2 &= real_2 + imag_2.j \end{aligned} \quad (6)$$

y el cromosoma está constituido por las partes reales e imaginarias de los ceros y los polos del modelo

$$Cromosoma = [real_1 \ imag_1 \ real_2 \ imag_2 \ real_3 \ imag_3 \ \dots\dots\dots real_n \ imag_n] \quad (7)$$

-Especificaciones del A.G.-

Se ha investigado diversas alternativas en cuanto a las especificaciones del algoritmo genético, encontrando como mejores las siguientes:

- Población inicial de 10 individuos creados al azar
- Sustituciones por generación
- Probabilidad de cruce de 0.7
- Probabilidad de mutación de 0.007
- Selección de padres se hace mediante el método de la ruleta.
- Se corren 10000 generaciones, en 40 eras.

-Esquema del Algoritmo Genético utilizado-

El esquema del algoritmo genético utilizado se muestra en el cuadro 2.1 :

Cuadro 2.1: Esquema del algoritmo genético utilizado

```
# Conjunto de includes necesarios
<stdlib.h> <stdio.h> <math.h> <time.h> <sys/types.h>"defines.h" "funcion.h"
void main
{
  Variables del algoritmo
  Leemos los datos experimentales
  Inicializamos el archivo jotass.dat
  Generacion de la poblacion inicial
  evaluamos la población inicial
  ordenamos la población inicial
  Cálculo del máximo de la población inicial

  //----- PROGRAMA PRINCIPAL -----
  //----- Comienzo de una nueva Era -----
  Nuevas generaciones de una era
  Cruce de parejas
  Mutación de los nuevos
  Modificación de los nuevos si están repetidos
  Evaluación de los nuevos individuos producidos
  Ordenación
  Guardo el mejor de la nueva generación
  SUPERHIJO
      calculo del valor del salto
  genero el superhijo
  Si hay superhijo
  Copia de los mejores J's para este supersalto
  ordenación

  //----- Fin de una Era -----
  Copia los genes del mejor ( borra los últimos copiados )

  //----- Fin del programa principal -----
  Guarda en ficheros los resultados
```

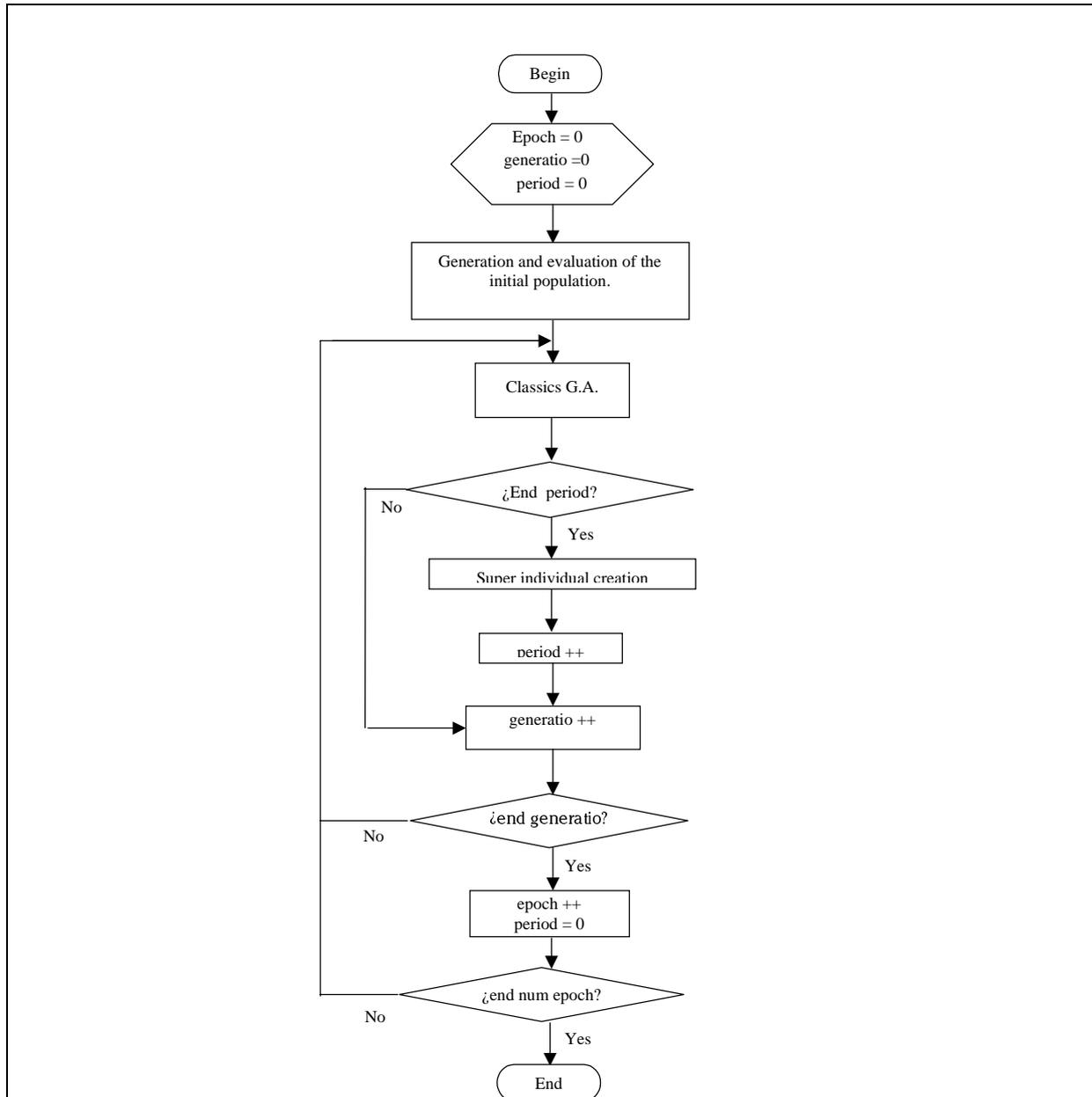
El algoritmo se ha paralelizado con un doble objetivo:

- 1º.- Ampliar el espacio de búsqueda
- 2º.- Acelerar el tiempo de obtención del máximo

Para ello se ha utilizado el Computador del centro de cálculo de la UCM, de marca Silicon Graphics, de 32 procesadores, utilizando técnicas propias elaboradas junto al grupo de paralelización del área de paralelismo.

En el Cuadro 2.2 se representa el diagrama de flujo del algoritmo genético.

Cuadro 2.2: Diagrama de Flujo del Algoritmo Genético



- Método de obtención de los parámetros de G_{IHG} -

Se siguieron los siguientes pasos :

1°.- Se fija una determinada estructura de ceros y de polos (m1,n1,nps1). Indicar que se probaron todas las estructuras que se muestran en la Tabla 2.1, recuérdese el limite de 6 polos que debe de tener el filtro total G_{HG} , lo que restringe el número máximo de polos de G_{IHG} .

Tabla 2.1: Estructuras ensayadas en la obtención de G_{IHG}

Modelo	n° ceros simples	n° ceros complejos	n° polos simples	n° polos complejos
wvm0212 (2,3,1)	0	2	1	2
wvm0204	0	2	0	4

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

(2,4,0)				
wvm1204 (3,4,0)	1	2	0	4
wvm0214 (2,5,1)	0	2	1	4
wvm1214 (2,5,1)	1	2	1	4
wvm0414 (4,5,1)	0	4	1	4

2º.- Se obtienen los parámetros del modelo de G_{1HG} empleando:

- 400 eras cada una de 10.000 generaciones
- repetiendo el experimento 5 veces al menos

3º.- Los estructura que hayan obtenido mejor J se le aplica el algoritmo de mejora:

- con SEMILLA.
- con 500 eras y 10.000 generaciones cada era.

- Método de obtención de los parámetros de G_{2HG} -

Para obtener el segundo filtro G_{2HG} se aplica un método análogo al utilizado en la obtención de G_{1HG} , pero se añade la búsqueda de ceros y polos coincidentes entre los modelos G_{HG} y G_{1HG} . Para ello se aplica el algoritmo de COMPLETAR GENES. Consiste en que conociendo los genes del modelo G_{1HG} éstos se completan hasta obtener un modelo G_{HG} satisfactorio por la validación.

2.2.5 OPTIMIZACION CON MINIMOS CUADRADOS NO LINEALES.

En el apéndice A y en el apéndice B se presentan las funciones que se han escrito en código MATLAB para realizar la identificación de las funciones de transferencia G_{1PC} , G_{1HC} , G_{2PC} y G_{2HC} . La función central en el proceso de identificación por mínimos cuadrados no lineales con restricciones es **constr.m** esta función pertenece a la toolbox de Optimización de Matlab [11]. La función **contr.m** encuentra el mínimo de una función multivariable no lineal con restricciones. Utiliza un método de Programación Cuadrática Secuencial (SQP-Sequential Quadratic Programming). En este método, un subproblema de programación cuadrática (QP) es resuelto en cada iteración. Una estima del Hessiano del Lagrangiano es adaptada en cada iteración utilizando la formula BFGS [11].

El realizar la optimización por mínimos cuadrados no lineales con restricciones utilizando la expresión para la función de transferencia dada por (1), imposibilita el asegurar que los polos que se identifiquen sean estables, es decir, tengan la parte real negativa. Ya que el imponer como restricción que todos los coeficientes del denominador de (1) sean positivos no asegura que el sistema sea estable. Por esta razón es necesario escribir (1) de la siguiente forma :

$$\hat{G}(s) = \frac{x_{n+m+1}s^m + x_{n+m}s^{m-1} + \dots + x_{n+1}}{[s^2 + 2sx_1 + (x_1^2 + x_2^2)] \cdot \dots \cdot [s^2 + 2sx_{npc-1} + (x_{npc-1}^2 + x_{npc}^2)] \cdot (s + x_{npc+1}) \cdot \dots \cdot (s + x_{npc+nps})} \quad (8)$$

El denominador se escribe factorizado en factores cuadráticos que representan los polos complejos conjugados y factores simples que representan los polos sobre el eje real. Cada uno de estos factores cuadráticos se definirá por dos parámetros : la parte real y la parte imaginaria del polo. Por lo tanto supuesto n polos, habrá npc polos complejos y nps polos simples. El numerador se escribe como un polinomio en s, con lo que es el propio algoritmo de optimización quien dado el número de ceros totales m de la función de transferencia determinará el número de ceros complejos y el número número de ceros simples, necesarios para la obtención del optimo.

Cuando la función de transferencia está escrita en la forma (4) la estabilidad se asegura forzando a que las partes reales de todos los polos sean menores que cero, es decir se encuentren en el semiplano izquierdo del plano s.

$$(x_1, x_3, \dots, x_{npc-1}, x_{npc+1}, \dots, x_{npc+nps}) < 0 \quad (9)$$

Por razones de cálculo numérico realmente la restricción de estabilidad que se utiliza es :

$$(x_1, x_3, \dots, x_{npc-1}, x_{npc+1}, \dots, x_{npc+nps}) < -0.005 \quad (10)$$

Entonces fijada una estructura (m,n,nps) para la función de transferencia, el vector de parámetros a estimar es :

$$\vec{P} = (x_1, x_2, \dots, x_{npc-1}, x_{npc}, x_{npc+1}, \dots, x_{npc+nps}) \quad (11)$$

Se desea encontrar el vector de parámetros \vec{P}_{min} que minimiza la función de coste :

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

$$\begin{aligned}
 J_1(\vec{P}) &= J_{real}(\vec{P}) + J_{imag}(\vec{P}) \\
 J_{real}(\vec{P}) &= \sum_{i=1}^N \left(\text{Re}(G(j\omega_{ei})) - \text{Re}(\hat{G}(j\omega_{ei}, \vec{P})) \right)^2 \quad (12) \\
 J_{imag}(\vec{P}) &= \sum_{i=1}^N \left(\text{Im}(G(j\omega_{ei})) - \text{Im}(\hat{G}(j\omega_{ei}, \vec{P})) \right)^2
 \end{aligned}$$

sometida a la restricciones de estabilidad dada por (10), y a la restricción de comportamiento a baja frecuencia (ver sección 2.2.1 y 2.2.2). Es evidente que el mínimo de (12), nos dará el máximo de la función de coste (2).

2.3 VALIDACION DE LOS MODELOS IDENTIFICADOS.

En la Figura 2.7 se muestra el esquema seguido en el proceso de validación de los distintos modelos obtenidos.

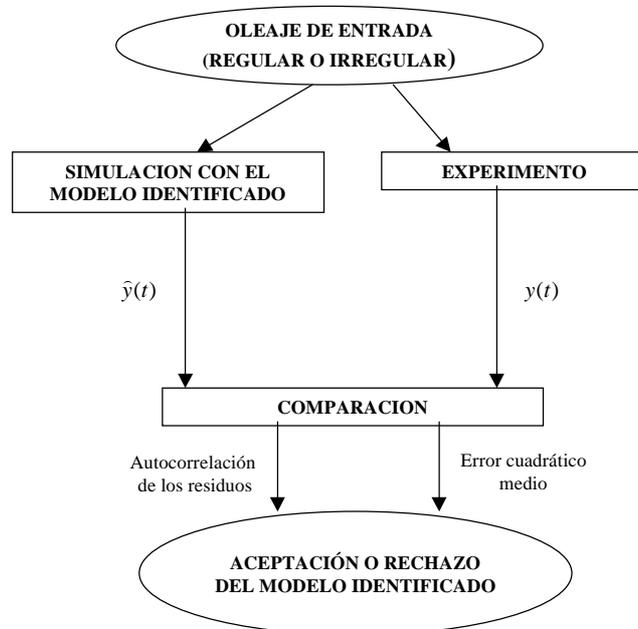


Figura 2.7: Esquema del proceso de validación

Dado un modelo el proceso de validación es el siguiente: se simula la salida que daría ese modelo frente a la entrada de altura $u(t)$ de olas medida con oleaje irregular y con oleaje irregular para las condiciones de estado de la mar y velocidad del buque en las que fue identificado. La salida que se estima con ese modelo $\hat{y}(t)$ es comparada con la medida experimentalmente $y(t)$ y se calcula el residuo es decir la diferencia entre la salida real y la estimada. También se calcula la aceleración vertical de pitch o de heave que se obtendría a partir del modelo y se compara con la que se obtiene experimentalmente

Un parámetro importante es el error cuadrático medio, que viene dado por (13) donde N es el número de muestras utilizado.:

$$e2m = \frac{1}{N} (\hat{y} - y)^T \cdot (\hat{y} - y) \quad (13)$$

Además se calcula la autocorrelación de estos residuos.

Un modelo que presente unos residuos elevados no está explicando correctamente el sistema que se pretendía identificar y debe ser rechazado.

En el apéndice E se presentan las funciones que se han escrito en código MATLAB para realizar la validación de los modelos identificados.

2.4 GENERACION DE INTERVALOS

Para generar intervalos de incertidumbre en los coeficientes de las funciones de transferencia continuas se utilizó la teoría recogida en [1]. Un resumen de dicha teoría se escribe a continuación adaptada a nuestro problema.

Supóngase que se tiene un sistema físico del que se poseen las medidas de la entrada y de la salida en el dominio de la frecuencia, para las frecuencias ω_i con $i=1,2,\dots,N$

$$y(j\omega_i) = D(j\omega_i)u(j\omega_i)$$

Sea $G^I(s)$ la función de transferencia de un sistema lineal invariante en el tiempo de tal manera que $G^I(s)$ está cercana a los $D(j\omega)$ medidos.

En general es imposible encontrar una única función racional $G^I(s)$ que cumpla que $G^I(j\omega_i)=D(j\omega_i)$ para todo $i=1,\dots,N$.

Es más real intentar identificar una familia $\mathbf{G}(s)$ de funciones de transferencia que verifique que para todo $D(j\omega_i)$ existe una $G_i(s)$ perteneciente a $\mathbf{G}(s)$ tal que $G_i(j\omega_i)=D(j\omega_i)$.

Sea la función de transferencia nominal $G^I(s)$ que tiene la siguiente forma :

$$G^I(s) = \frac{x_{n+m+1}s^m + x_{n+m}s^{m-1} + \dots + x_{n+1}}{s^n + x_n s^{n-1} + \dots + x_1} \quad (14)$$

y la función $G(s)$ que tiene la forma :

$$G(s) = \frac{\hat{x}_{n+m+1}s^m + \hat{x}_{n+m}s^{m-1} + \dots + \hat{x}_{n+1}}{s^n + \hat{x}_n s^{n-1} + \dots + \hat{x}_1} \quad (15)$$

La familia $\mathbf{G}(s)$ se define como :

$$\mathbf{G}(s) = \left\{ G(s) : \hat{x}_i \in [x_i - w_{x_i} \cdot \varepsilon_{x_i}^-, x_i + w_{x_i} \cdot \varepsilon_{x_i}^+] \quad \forall i \right\} \quad (16)$$

donde los w_{x_i} son pesos escogidos a priori. Además los ε_{x_i} son parámetros de dilatación

2.4.1 SELECCIÓN DE PESOS W.

Supongase que se tienen N puntos medidos :

$$D(j\omega) = \{D(j\omega_i) = \alpha_i + j\beta_i, i=1,2,\dots,N\}$$

Defínase el modelo l-ésimo como sigue :

$$G_l(j\omega) = \begin{cases} D(j\omega_i) & i=l \\ G^I(j\omega_i) & i=1,2,\dots,l-1,l+1,\dots,N \end{cases}$$

Es decir $G_l(j\omega)$ coincide con los valores nominales $G^l(j\omega)$ excepto para el dato l -ésimo que es el medido $D(j\omega)$.

Construyan los modelos l -ésimos que se llamen $G_l^l(s)$:

$$G_l^l(s) = \frac{x_{n+m+1}^l s^m + \dots + x_{n+1}^l}{s^n + x_n^l s^{n-1} + \dots + x_1^l}$$

Los modelos $G_l^l(s)$ deben ser identificados utilizando la misma técnica de identificación utilizada para identificar el modelo nominal $G^l(j\omega)$.

Se demuestra que el vector de pesos \vec{w} sería :

$$\vec{w} = \left[\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N |x_1 - x_1^l|, \dots, \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N |x_{n+m+1} - x_{n+m+1}^l| \right] \quad (17)$$

$$\vec{w} = [w_{x_1}, \dots, w_{x_n}, w_{x_{n+1}}, \dots, w_{x_{n+m+1}}]$$

2.4.2 CALCULO DE LOS INTERVALOS DEL SISTEMA

Sea la función de transferencia $G(j\omega_i)$ que puede ser expresada de la siguiente forma para la frecuencia ω_i :

$$G(j\omega_i) = \frac{(\hat{x}_{n+1} - \omega_i^2 \hat{x}_{n+3} + \dots) + j \cdot (\omega_i \hat{x}_{n+2} - \omega_i^3 \hat{x}_{n+4} + \dots)}{(\hat{x}_1 - \omega_i^2 \hat{x}_3 + \dots) + j \cdot (\omega_i \hat{x}_2 - \omega_i^3 \hat{x}_4 + \dots)} = \frac{n1 + j \cdot n2}{d1 + j \cdot d2}$$

Si se iguala con el punto medido $D(j\omega_i)$ a la frecuencia ω_i se obtendría :

$$D(j\omega_i) = \alpha_i + j\beta_i = \frac{n1 + j \cdot n2}{d1 + j \cdot d2}$$

que operando se llegaría al siguiente par de ecuaciones :

$$F_1(\alpha_i, \beta_i, x_1^i, \dots, x_{n+m+1}^i) = (\alpha_i d1 - \beta_i d2) - n1 = 0$$

$$F_2(\alpha_i, \beta_i, x_1^i, \dots, x_{n+m+1}^i) = (\beta_i d1 + \alpha_i d2) - n2 = 0$$

Se cumple que :

$$\hat{x}_i = x_i + w_{x_i} \epsilon_{x_i}^l \begin{cases} i = 1, \dots, n+m+1 \\ l = 1, \dots, N \end{cases} \quad (18)$$

sustituyendo las expresiones de los parámetros dados por (14) y operando se obtiene :

$$A \cdot \vec{x} + A \cdot W \cdot \vec{\epsilon}_x^l = -E$$

$$A \cdot W \cdot \vec{\epsilon}_x^l = -B - E$$

donde :

3. MODELOS CONTINUOS IDENTIFICADOS PARA EL PRIMER FILTRO

3.1 MODELOS G_{IH}

En la Tabla 3.1 se muestran el valor de la función de coste obtenido en la identificación de los modelos G_{IHG} y G_{IHC} con estructura (3,4,0) para distintas velocidades.

Tabla 3.1: Valor de la función de coste obtenido en la identificación de los modelos G_{IHG} y G_{IHC} con estructura (3,4,0) para distintas velocidades.

Velocidad (Nudos)	Valor de J para $G_{IHG}(s)$	Valor de J para $G_{IHC}(s)$
20	2681.9	2918.2
30	3728	4300.2
40	5341.9	5952.1

3.1.1 VELOCIDAD 20 NUDOS.

La función de transferencia obtenida mediante algoritmos genéticos es :

$$G_{IHG}(s) = \frac{0.1271 s^3 - 0.04003 s^2 + 0.4615 s - 0.06097}{s^4 + 1.036 s^3 + 1.35 s^2 + 0.4647 s + 0.06097}$$

En la Tabla 3.2 se muestran los polos y los ceros de $G_{IHG}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.2: Polos y ceros de $G_{IHG}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.31092 + 0.96788i	1.0166	0.30585
-0.31092 - 0.96788i	1.0166	0.30585
-0.20708 + 0.12694i	0.24289	0.85255
-0.20708 - 0.12694i	0.24289	0.85255

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.090975 + 1.897i	1.8992	-0.047903
0.090975 - 1.897i	1.8992	-0.047903
0.133	0.133	-1

La función de transferencia obtenida mediante mínimos cuadrados no lineales es :

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

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Tabla 3.3 se muestran los polos y los ceros de $G_{IHC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.3: Polos y ceros de $G_{IHC}(s)$

Polos		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.2892 +	0.97281i	1.0149	0.28496
-0.2892 -	0.97281i	1.0149	0.28496
-0.15166 +	0.21873i	0.26616	0.56981
-0.15166 -	0.21873i	0.26616	0.56981

Ceros		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.067123 +	2.0558i	2.0569	-0.032633
0.067123 -	2.0558i	2.0569	-0.032633
0.19175		0.19175	-1

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia $G_{IHC}(s)$ muestran en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4: Intervalos de los coeficientes de $G_{IHC}(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
a ₁	0.010273	0.072967	0.1797
a ₂	0.27954	0.35339	0.59848
a ₃	0.80635	1.2763	4.8032
a ₄	0.099344	0.88172	0.9116
b ₂	0.38261	0.38284	0.38492
b ₃	-0.029324	-0.029321	-0.027722
b ₄	0.084658	0.089941	0.090266

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_{IHG}(s)$ y de $G_{IHC}(s)$

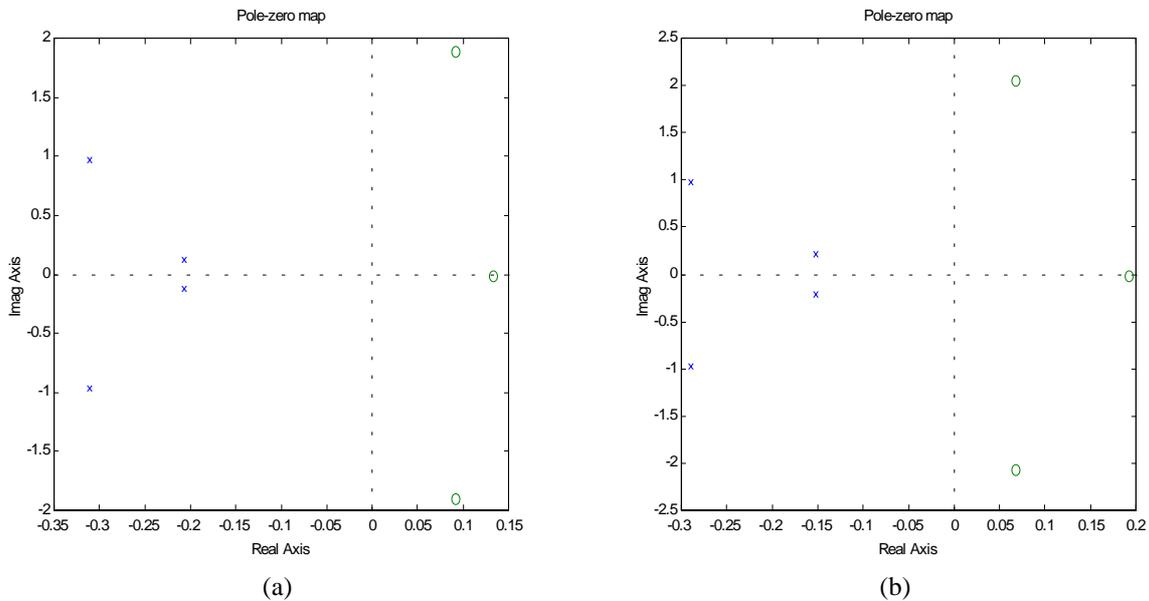


Figura 3.1: (a) Diagrama de polos y ceros de $G_{IHG}(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros de $G_{IHC}(s)$

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

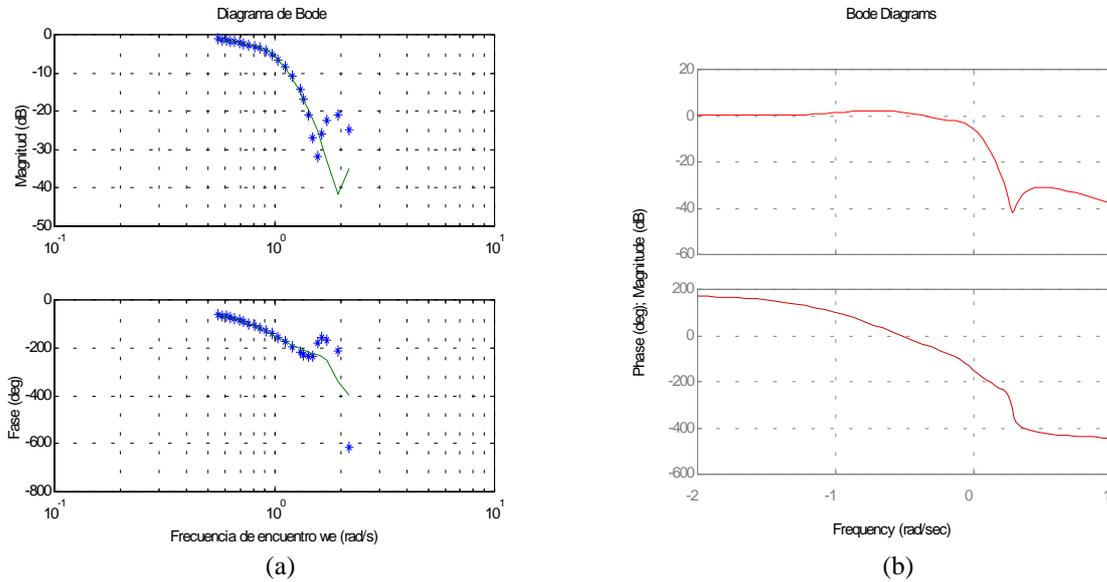


Figura 3.2 : (a) Diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$.

En la Figura 3.3 se muestra el diagrama de Bode de $G_{IHC}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

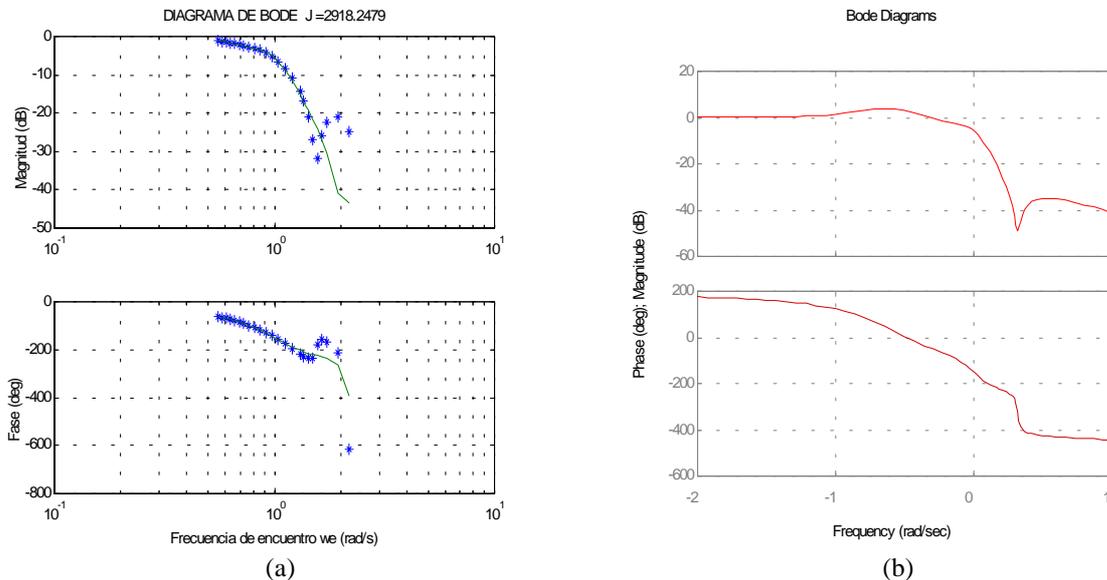


Figura 3.3 : (a) Diagrama de Bode de $G_{IHC}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{IHC}(s)$.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 3.4 se muestra el diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$ comparado con el diagrama de Bode de $G_{IHC}(s)$ y los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

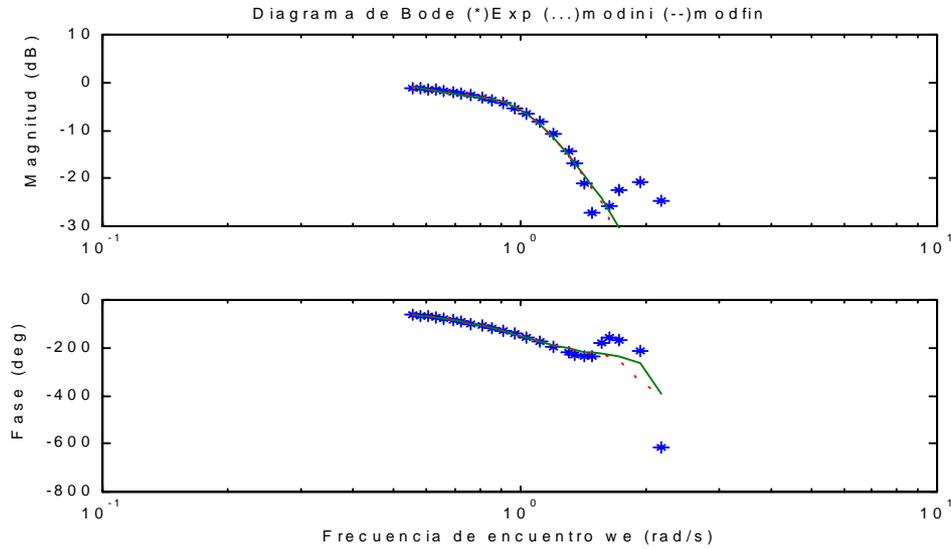


Figura 3.4: Diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$ (línea - - -), $G_{IHC}(s)$ (línea continua) y puntos obtenidos con PRECAL.

3.1.2 VELOCIDAD 30 NUDOS.

La función de transferencia obtenida mediante algoritmos genéticos es :

$$G_{IHG}(s) = \frac{0.1208 s^3 - 0.03309 s^2 + 0.806 s - 0.1158}{s^4 + 1.432 s^3 + 1.969 s^2 + 0.8736 s + 0.1158}$$

En la Tabla 3.5 se muestran los polos y los ceros de $G_{IHG}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.5: Polos y ceros de $G_{IHG}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.42792 + 1.0998i	1.1802	0.3626
-0.42792 - 1.0998i	1.1802	0.3626
-0.28808 + 0.012504i	0.28835	0.99906
-0.28808 - 0.012504i	0.28835	0.99906

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.064924 + 2.5786i	2.5794	-0.02517
0.064924 - 2.5786i	2.5794	-0.02517
0.14408	0.14408	-1

La función de transferencia obtenida mediante mínimos cuadrados no lineales es :

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

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Tabla 3.6 se muestran los polos y los ceros de $G_{IHC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.6: Polos y ceros de $G_{IHC}(s)$

Polos		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.37552 +	1.1179i	1.1793	0.31844
-0.37552 -	1.1179i	1.1793	0.31844
-0.1978 +	0.2211i	0.29666	0.66675
-0.1978 -	0.2211i	0.29666	0.66675

Ceros		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.16407 +	2.778i	2.7828	0.058957
-0.16407 -	2.778i	2.7828	0.058957
0.19042		0.19042	-1

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia $G_{IHC}(s)$ muestran en la Tabla 3.7:

Tabla 3.7: Intervalos de los coeficientes de $G_{IHC}(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
a ₁	0.043237	0.12239	0.28974
a ₂	0.4835	0.61623	0.94721
a ₃	1.0216	1.7758	7.6381
a ₄	0.097988	1.1466	1.2023
b ₂	0.63756	0.63756	0.63954
b ₃	0.011429	0.011431	0.014175
b ₄	0.07738	0.082997	0.082997

En la Figura 3.5 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_{IHG}(s)$ y de $G_{IHC}(s)$

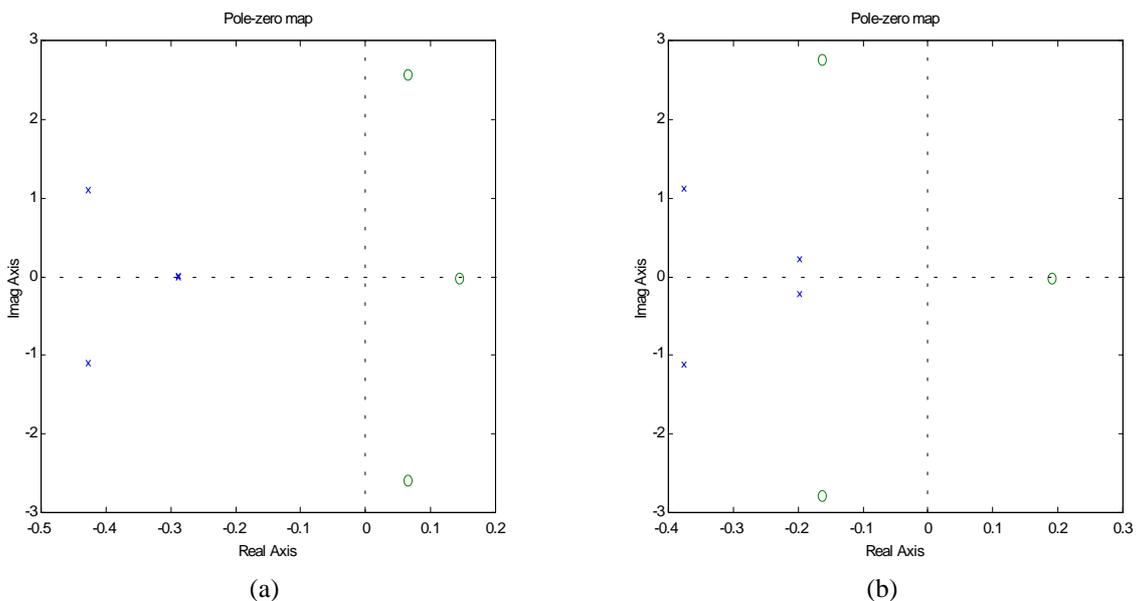


Figura 3.5: (a) Diagrama de polos y ceros de $G_{IHG}(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros de $G_{IHC}(s)$

En la Figura 3.6 se muestra el diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

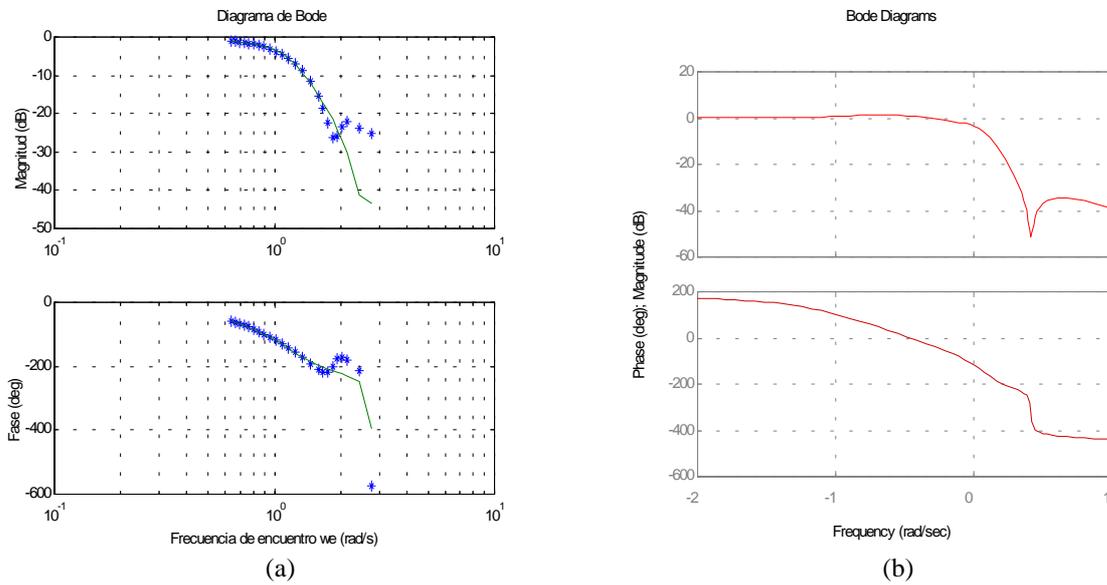


Figura 3.6 : (a) Diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$.

En la Figura 3.7 se muestra el diagrama de Bode de $G_{IHC}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

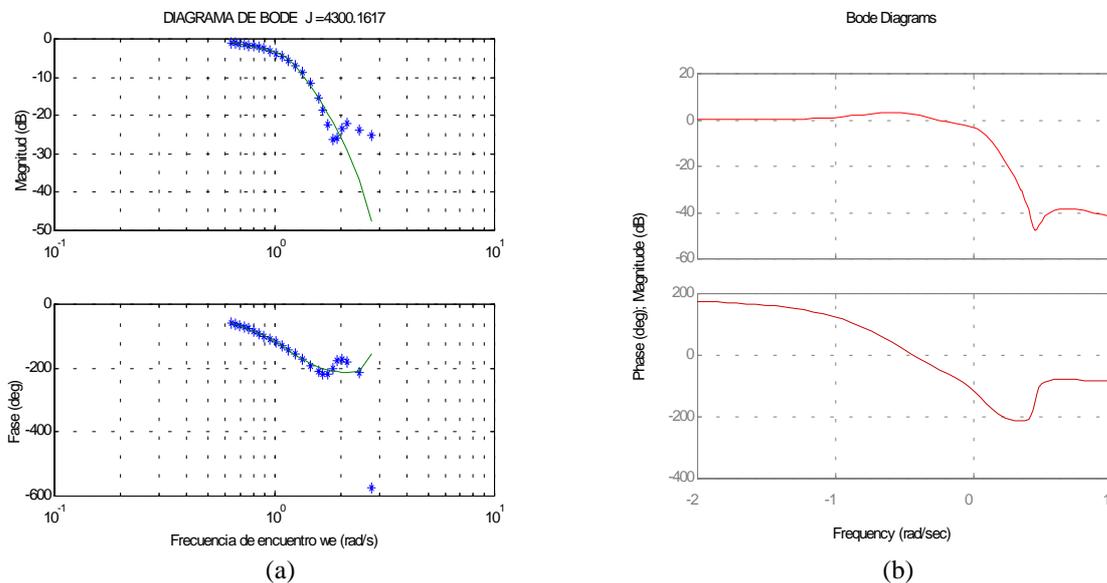


Figura 3.7 : (a) Diagrama de Bode de $G_{IHC}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{IHC}(s)$.

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 3.8 se muestra el diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$ comparado con el diagrama de Bode de $G_{IHC}(s)$ y los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

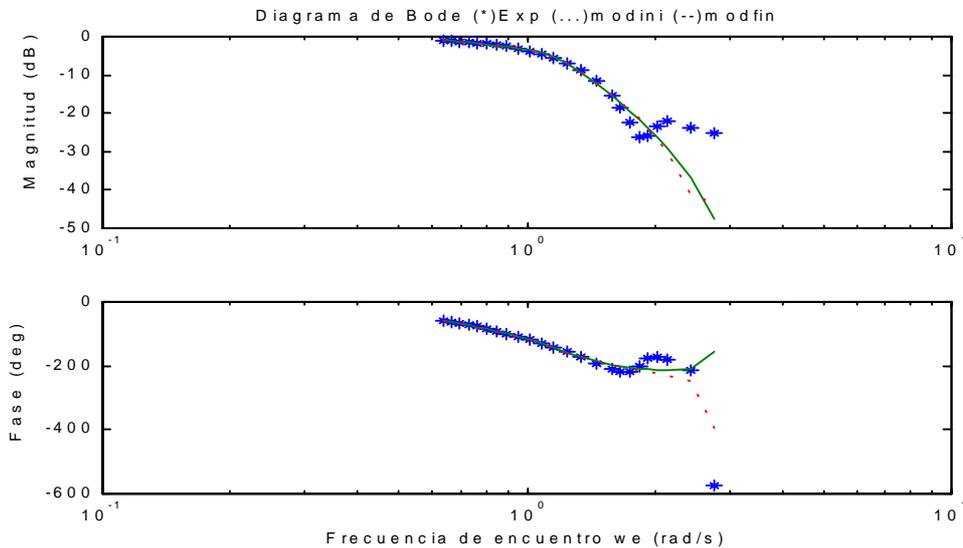


Figura 3.8: Diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$ (línea - - -), $G_{IHC}(s)$ (línea continua) y puntos obtenidos con PRECAL.

3.1.3 VELOCIDAD 40 NUDOS.

La función de transferencia obtenida mediante algoritmos genéticos es :

$$G_{IHG}(s) = \frac{0.1034 s^3 + 0.08156 s^2 + 1.106 s - 0.1601}{s^4 + 1.578 s^3 + 2.439 s^2 + 1.149 s + 0.1601}$$

En la Tabla 3.8 se muestran los polos y los ceros de $G_{IHG}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.8: Polos y ceros de $G_{IHG}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.48786 + 1.2339i	1.3268	0.36769
-0.48786 - 1.2339i	1.3268	0.36769
-0.30114 + 0.016064i	0.30157	0.99858
-0.30114 - 0.016064i	0.30157	0.99858

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.4659 + 3.2577i	3.2908	0.14158
-0.4659 - 3.2577i	3.2908	0.14158
0.14298	0.14298	-1

La función de transferencia obtenida mediante mínimos cuadrados no lineales es :

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

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Tabla 3.9 se muestran los polos y los ceros de $G_{IHC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.9: Polos y ceros de $G_{IHC}(s)$

Polos		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.45188 +	1.2489i	1.3281	0.34025
-0.45188 -	1.2489i	1.3281	0.34025
-0.21834 +	0.24383i	0.3273	0.66709
-0.21834 -	0.24383i	0.3273	0.66709

Ceros		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.86713 +	3.626i	3.7282	0.23259
-0.86713 -	3.626i	3.7282	0.23259
0.20366		0.20366	-1

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia $G_{IHC}(s)$ muestran en la Tabla 3.10:

Tabla 3.10: Intervalos de los coeficientes de $G_{IHC}(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
a ₁	0.078032	0.18895	0.4351
a ₂	0.71887	0.86705	1.2637
a ₃	1.2527	2.2656	11.124
a ₄	0.089326	1.3404	1.4081
b ₂	0.90421	0.90421	0.90731
b ₃	0.10217	0.10217	0.10652
b ₄	0.059666	0.066748	0.066748

En la Figura 3.9 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_{IHC}(s)$ y de $G_{IHC}(s)$

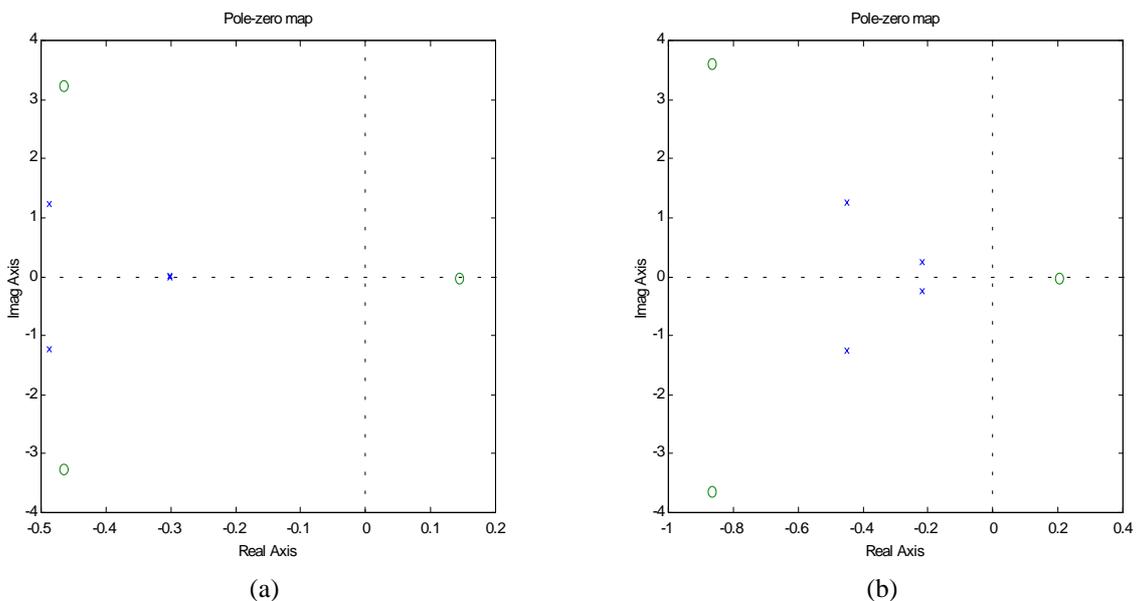


Figura 3.9: (a) Diagrama de polos y ceros de $G_{IHC}(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros de $G_{IHC}(s)$

En la Figura 3.10 se muestra el diagrama de Bode de $G_{IHC}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

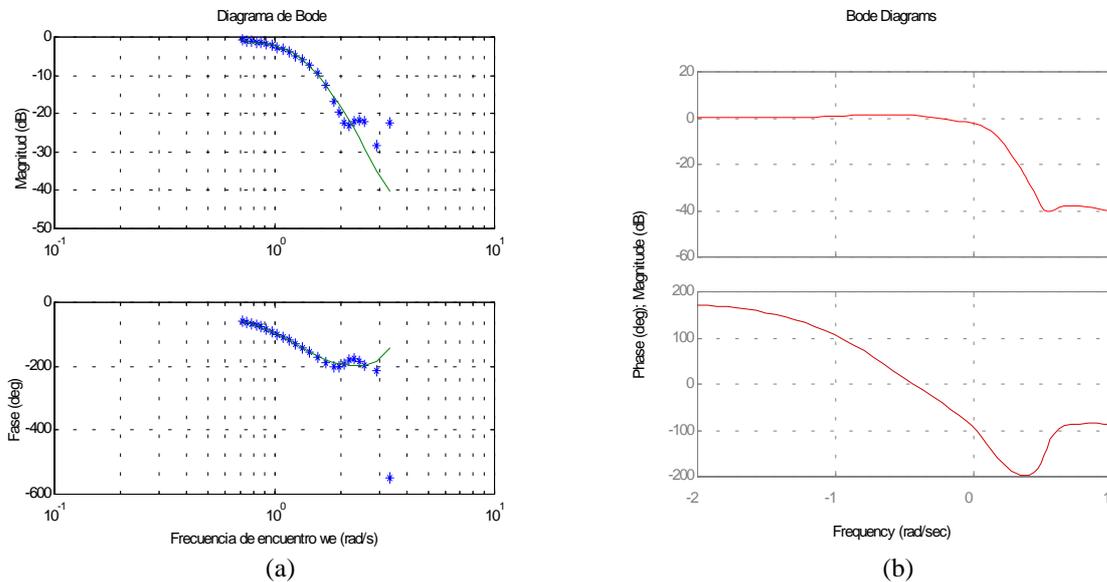


Figura 3.10: (a) Diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$.

En la Figura 3.11 se muestra el diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

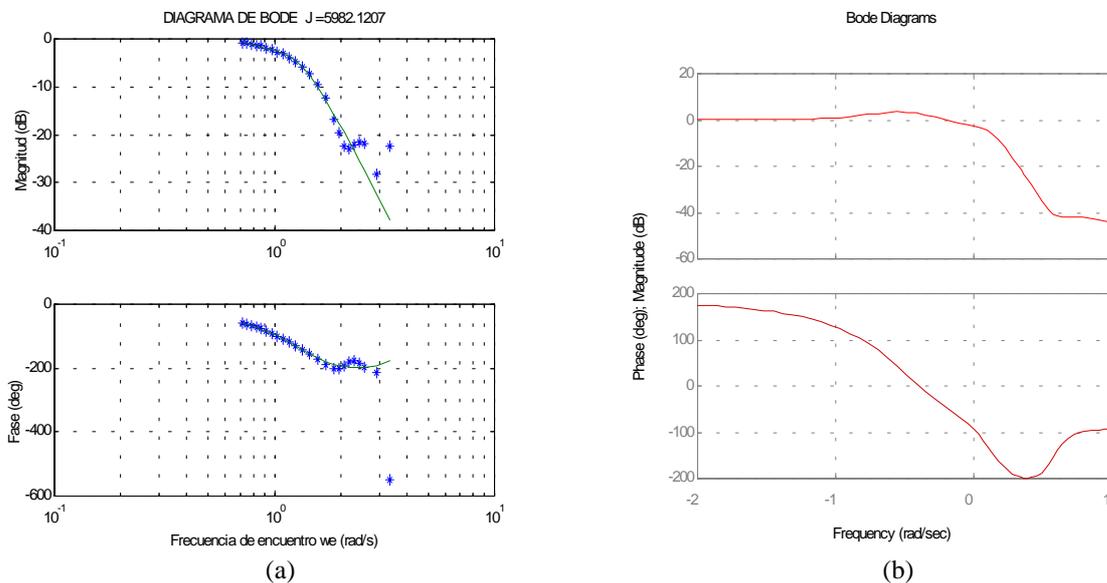


Figura 3.11: (a) Diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL corregidos a proa. (b) Diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$.

En la Figura 3.12 se muestra el diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$ comparado con el diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$ y los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

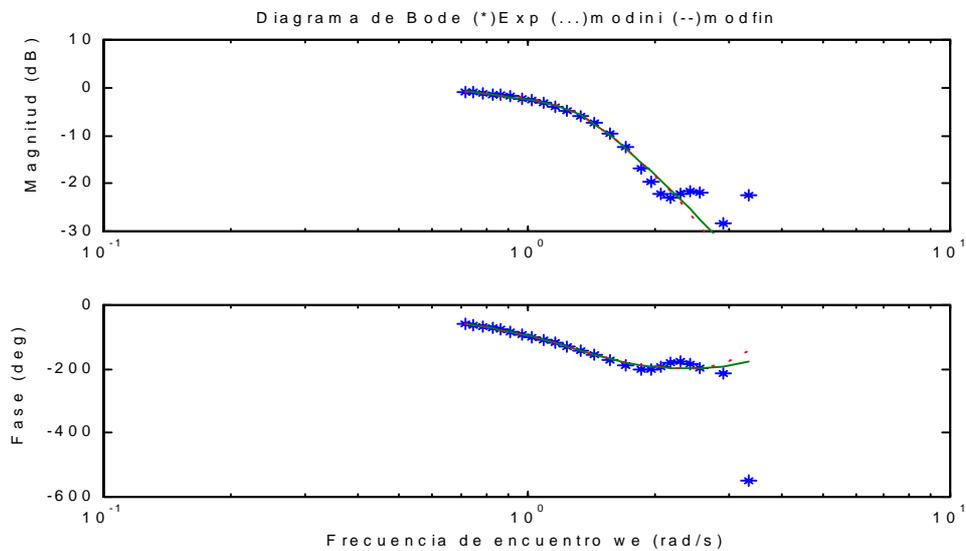


Figura 3.12: Diagrama de Bode de $G_{IHG}(s)$ (línea - - -), $G_{IHC}(s)$ (línea continua) y puntos obtenidos con PRECAL.

3.2 MODELOS G_{IP}

En la Tabla 3.11 se muestran el valor de la función de coste obtenido en la identificación de G_{IPC} con estructura (3,4,0) para distintas velocidades.

Tabla 3.11: Valor de la función de coste obtenido en la identificación del modelo (3,4,0) G_{IPC} para distintas velocidades.

Velocidad (Nudos)	Valor de J para $G_{IPC}(s)$
20	82324
30	155511
40	121278

3.2.1 VELOCIDAD 20 NUDOS.

La función de transferencia obtenida mediante mínimos cuadrados no lineales es :

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

En la Tabla 3.12 se muestran los polos y los ceros de $G_{IPC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Tabla 3.12: Polos y ceros de $G_{IPC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.4169 + 1.2389i	1.3072	0.31893
-0.4169 - 1.2389i	1.3072	0.31893
-0.85344 + 0.0015998i	0.85344	1
-0.85344 - 0.0015998i	0.85344	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0	0	NaN
0.46574 + 2.0534i	2.1056	-0.22119
0.46574 - 2.0534i	2.1056	-0.22119

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia $G_{IPC}(s)$ muestran en la Tabla 3.13

Tabla 3.13: Intervalos de los coeficientes de $G_{IPC}(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
a ₁	1.1131	1.2445	1.8062
a ₂	0.879	3.5238	4.4269
a ₃	2.6201	3.8602	5.0334
a ₄	0.91005	2.5407	2.9617
b ₂	-0.421	-0.42099	-0.42099
b ₃	0.088451	0.088451	0.088453
b ₄	-0.094956	-0.094956	-0.094944

En la Figura 3.13 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_{IPC}(s)$

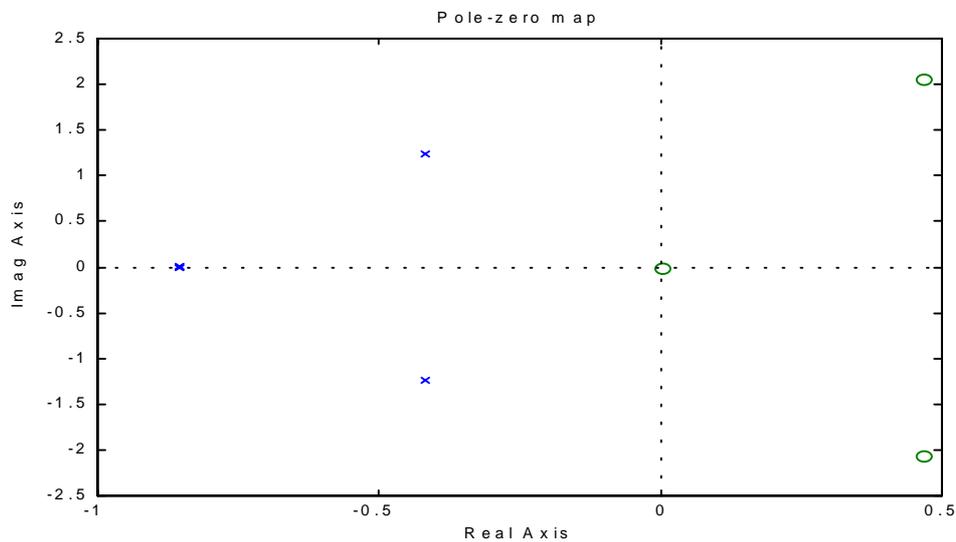


Figura 3.13: Diagrama de polos y ceros de $G_{IPC}(s)$

En la Figura 3.14 se muestra el diagrama de Bode de $G_{IPC}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

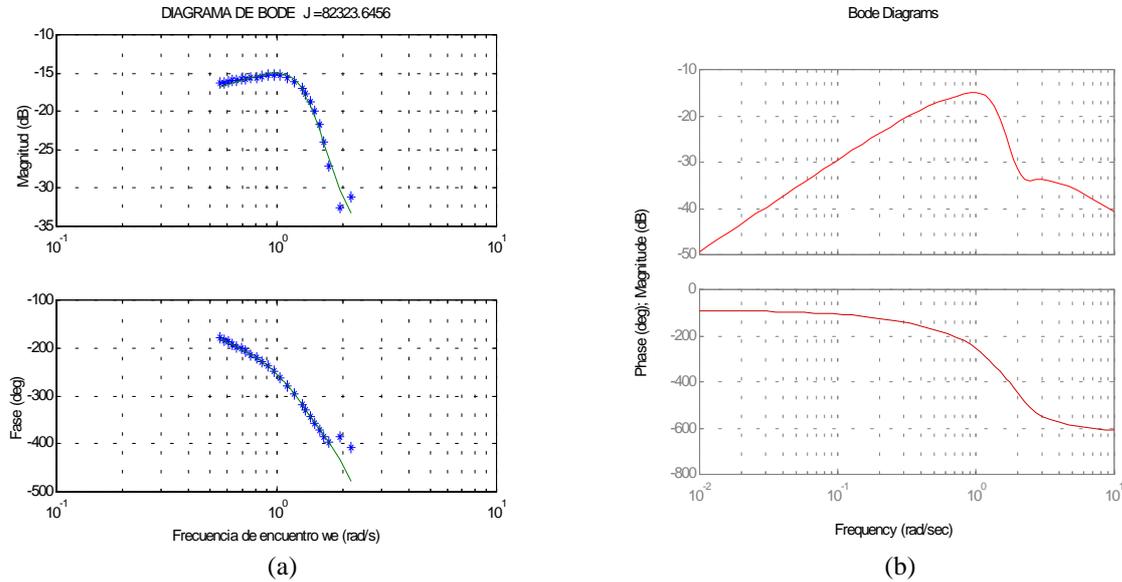


Figura 3.14 : (a) Diagrama de Bode de $G_{IPC}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{IPC}(s)$.

3.2.2 VELOCIDAD 30 NUDOS.

La función de transferencia obtenida mediante mínimos cuadrados no lineales es :

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

En la Tabla 3.14 se muestran los polos y los ceros de $G_{IPC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.14: Polos y ceros de $G_{IPC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.53182 + 1.4867i	1.5789	0.33683
-0.53182 - 1.4867i	1.5789	0.33683
-0.90844 + 0.0023418i	0.90845	1
-0.90844 - 0.0023418i	0.90845	1

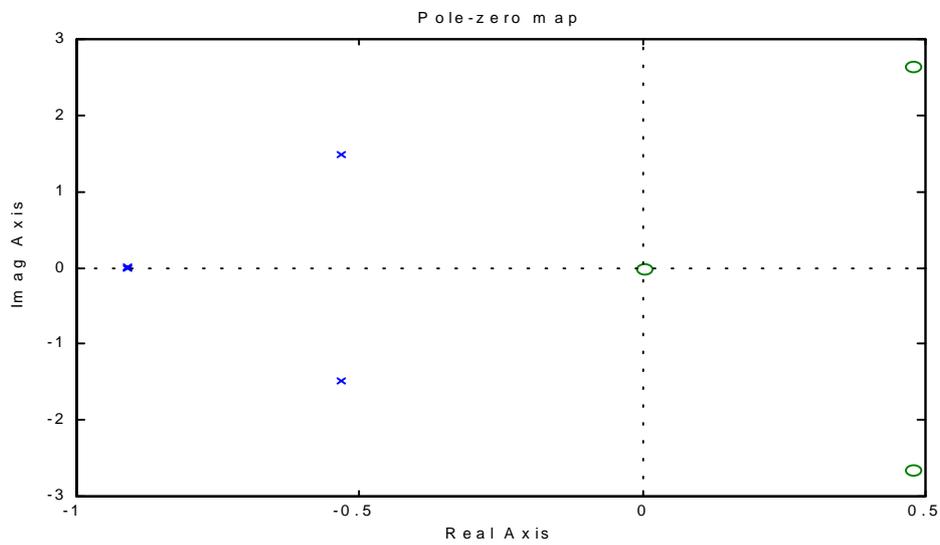
Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0	0	NaN
0.47691 + 2.6434i	2.6861	-0.17755
0.47691 - 2.6434i	2.6861	-0.17755

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia $G_{IPC}(s)$ muestran en la Tabla 3.15:

Tabla 3.15: Intervalos de los coeficientes de $G_{IPC}(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
a ₁	1.7961	2.0574	3.0291
a ₂	1.3392	5.4073	6.5575
a ₃	3.3813	5.2508	7.8678
a ₄	0.83608	2.8805	3.4608
b ₂	-0.7033	-0.70329	-0.70329
b ₃	0.09297	0.092972	0.092974
b ₄	-0.097473	-0.097473	-0.097451

En la Figura 3.15 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_{IPC}(s)$



(b)

Figura 3.15: Diagrama de polos y ceros de $G_{IPC}(s)$

En la Figura 3.16 se muestra el diagrama de Bode de $G_{IPC}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

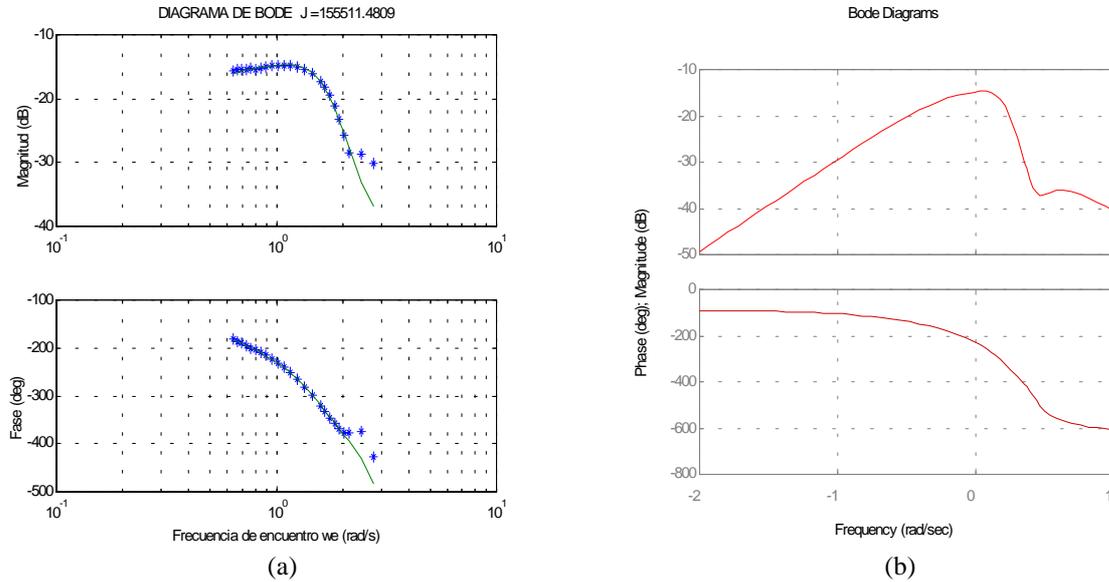


Figura 3.16 : (a)Diagrama de Bode de $G_{IPC}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b)Diagrama de Bode de $G_{IPC}(s)$.

3.2.3 VELOCIDAD 40 NUDOS.

La función de transferencia obtenida mediante mínimos cuadrados no lineales es :

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

En la Tabla 3.16 se muestran los polos y los ceros de $G_{IPC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.16: Polos y ceros de $G_{IPC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.58866 + 1.6764i	1.7767	0.33132
-0.58866 - 1.6764i	1.7767	0.33132
-0.92579 + 0.0030532i	0.9258	0.99999
-0.92579 - 0.0030532i	0.9258	0.99999

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0	0	NaN
0.19867 + 3.4759i	3.4816	-0.057065
0.19867 - 3.4759i	3.4816	-0.057065

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia $G_{IPC}(s)$ muestran en la Tabla 3.17:

Tabla 3.17: Intervalos de los coeficientes de $G_{IPC}(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
a ₁	2.2845	2.7056	3.9838
a ₂	1.813	6.854	8.2261
a ₃	3.8695	6.1937	11.323
a ₄	0.70897	3.0289	3.6773
b ₂	-0.92488	-0.92487	-0.92487
b ₃	0.030313	0.030318	0.030321
b ₄	-0.076301	-0.076301	-0.076259

En la Figura 3.17 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_{IPC}(s)$

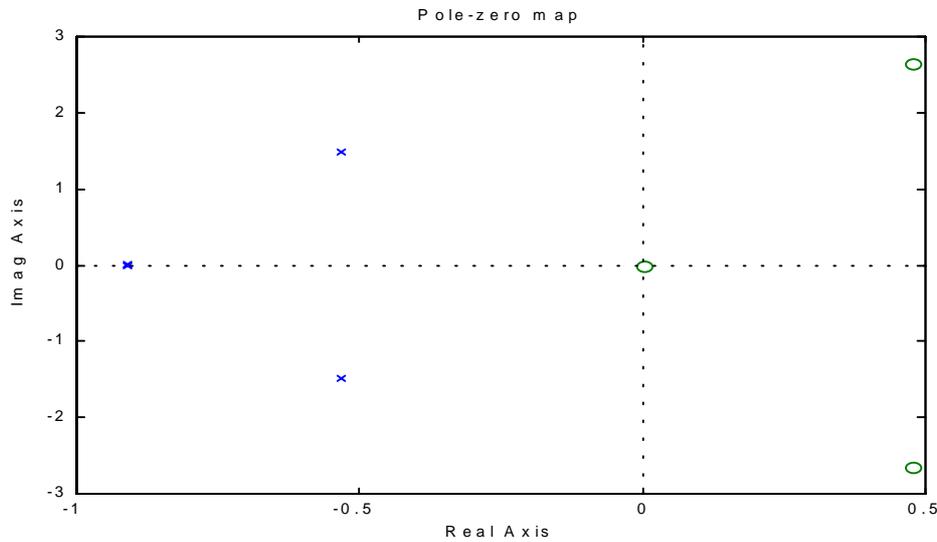


Figura 3.17: Diagrama de polos y ceros de $G_{IPC}(s)$

En la Figura 3.18 se muestra el diagrama de Bode de $G_{IPC}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

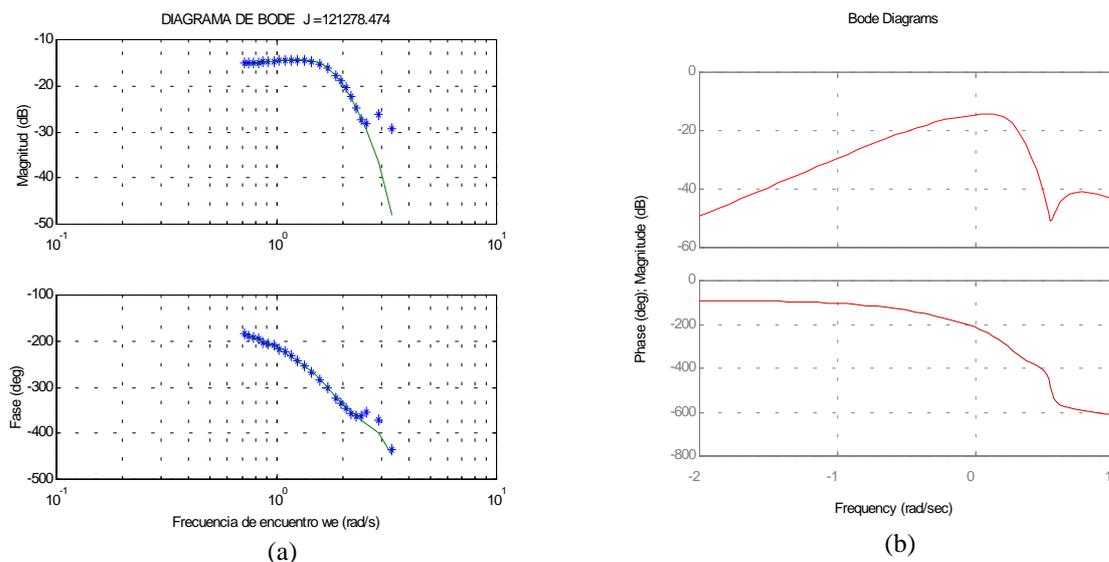


Figura 3.18: (a) Diagrama de Bode de $G_{IPC}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{IPC}(s)$.

4. MODELOS CONTINUOS IDENTIFICADOS PARA EL SEGUNDO FILTRO Y SISTEMA COMPLETO

4.1 MODELOS G_{2H} Y G_H

En la Tabla 4.1 se muestran el valor de la función de coste obtenido en la identificación de los modelos G_{HG} y G_{HC} con estructuras (5,6,0) para distintas velocidades.

Tabla 4.1: Valor de la función de coste obtenido en la identificación de los modelos G_{HG} y G_{HC} con estructuras (5,6,0) para distintas velocidades.

Velocidad (Nudos)	Valor de J para $G_{HG}(s)$	Valor de J para $G_{HC}(s)$
20	2113.6	2444.7
30	2870.9	2949.6
40	4659.8	4787.2

4.1.1 VELOCIDAD 20 NUDOS.

La función de transferencia obtenida para el segundo filtro obtenida mediante algoritmos genéticos es :

$$G_{2HG}(s) = \frac{0.4976 s^2 - 0.7923 s + 3.024}{s^2 + 0.456 s + 3.024}$$

En la Tabla 4.2 se muestran los polos y los ceros de $G_{2HG}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.2: Polos y ceros de $G_{2HG}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.228 + 1.724i	1.739	0.13111
-0.228 - 1.724i	1.739	0.13111

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.79612 + 2.3332i	2.4653	-0.32293
0.79612 - 2.3332i	2.4653	-0.32293

La función de transferencia para el sistema completo G_{HG} es el producto de $G_{1HG} \cdot G_{2HG}$

$$G_{HG}(s) = \frac{0.06324 s^5 - 0.1206 s^4 + 0.6457 s^3 - 0.517 s^2 + 1.444 s - 0.1844}{s^6 + 1.492 s^5 + 4.846 s^4 + 4.213 s^3 + 4.355 s^2 + 1.433 s + 0.1844}$$

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Tabla 4.3 se muestran los polos y los ceros de $G_{HG}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.3: Polos y ceros de $G_{HG}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.228 + 1.724i	1.739	0.13111
-0.228 - 1.724i	1.739	0.13111
-0.31092 + 0.96788i	1.0166	0.30585
-0.31092 - 0.96788i	1.0166	0.30585
-0.20708 + 0.12694i	0.24289	0.85255
-0.20708 - 0.12694i	0.24289	0.85255

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.79612 + 2.3332i	2.4653	-0.32293
0.79612 - 2.3332i	2.4653	-0.32293
0.090975 + 1.897i	1.8992	-0.047903
0.090975 - 1.897i	1.8992	-0.047903
0.133	0.133	-1

La función de transferencia obtenida para el segundo filtro obtenida mediante mínimos cuadrados no lineales es :

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

En la Tabla 4.4 se muestran los polos y los ceros de $G_{2HC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.4: Polos y ceros de $G_{2HC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.2565 + 1.7444i	1.7631	0.1455
-0.2565 - 1.7444i	1.7631	0.1455

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.8910 + 2.5048i	2.6585	-0.3351
0.8910 - 2.5048i	2.6585	-0.3351

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia $G_{2HC}(s)$ muestran en la Tabla 4.5:

Tabla 4.5: Intervalos de los coeficientes de $G_{2HC}(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
a ₁	1.3478	3.1086	3.1357
a ₂	0.32384	0.51297	1.2183
b ₂	-1.4148	-0.78376	0.17699
b ₃	0.43982	0.43982	1.6314

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

La función de transferencia para el sistema completo G_{HC} es el producto de $G_{IHC} \cdot G_{2HC}$

$$G_{HC}(s) = \frac{0.03956 s^5 - 0.08339 s^4 + 0.4709 s^3 - 0.4233 s^2 + 1.247 s - 0.2268}{s^6 + 1.395 s^5 + 4.837 s^4 + 3.749 s^3 + 4.222 s^2 + 1.136 s + 0.2268}$$

En la Tabla 4.6 se muestran los polos y los ceros de $G_{HC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.6: Polos y ceros de $G_{HC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.25648 + 1.7444i	1.7631	0.14547
-0.25648 - 1.7444i	1.7631	0.14547
-0.2892 + 0.9728i	1.0149	0.28496
-0.2892 - 0.9728i	1.0149	0.28496
-0.15166 + 0.21873i	0.26616	0.56981
-0.15166 - 0.21873i	0.26616	0.56981

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.891 + 2.5048i	2.6585	-0.33515
0.891 - 2.5048i	2.6585	-0.33515
0.067123 + 2.0558i	2.0569	-0.032633
0.067123 - 2.0558i	2.0569	-0.032633
0.19175	0.19175	-1

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_{HG}(s)$ y de $G_{HC}(s)$

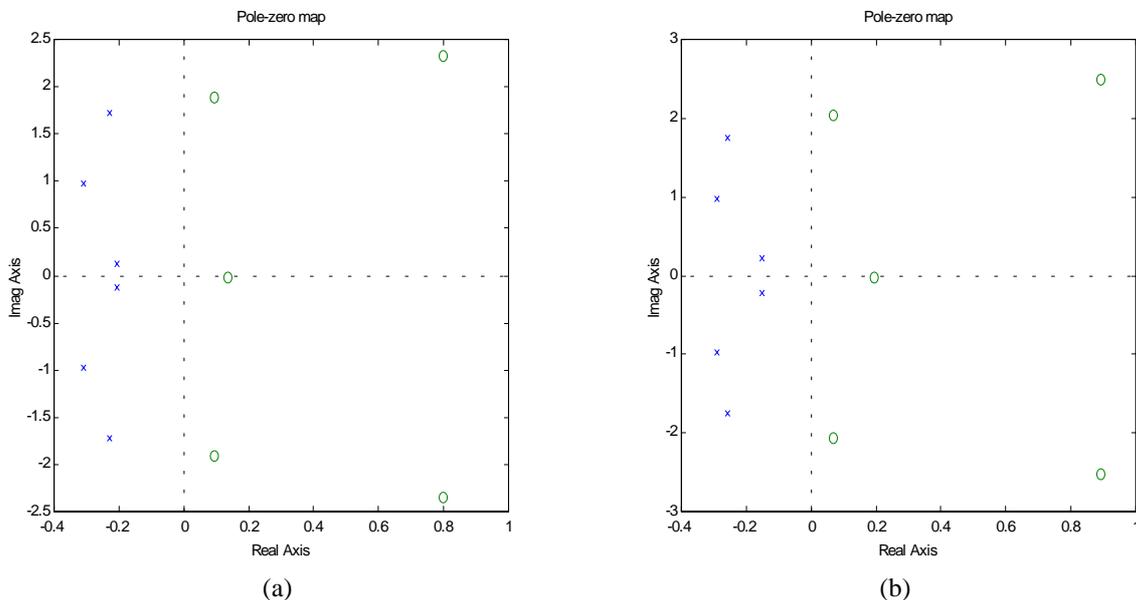


Figura 4.1: (a) Diagrama de polos y ceros de $G_{HG}(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros de $G_{HC}(s)$

En la Figura 4.2 se muestra el diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

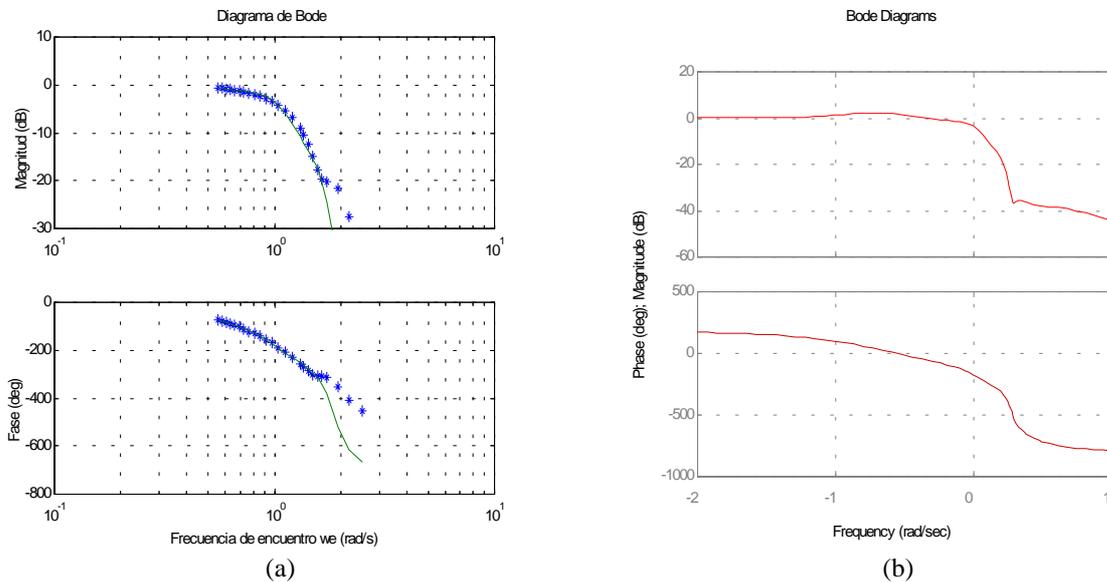


Figura 4.2: (a) Diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$.

En la Figura 4.3 se muestra el diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

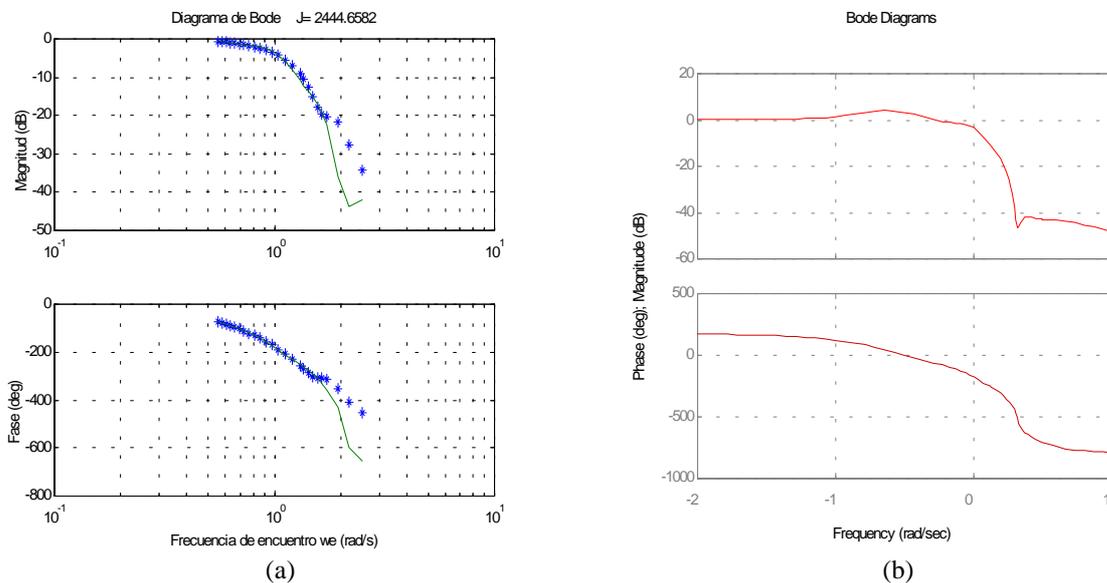


Figura 4.3: (a) Diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$.

En la Figura 4.4 se muestra el diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ comparado con el diagrama de Bode de $G_{HC}(s)$ y los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

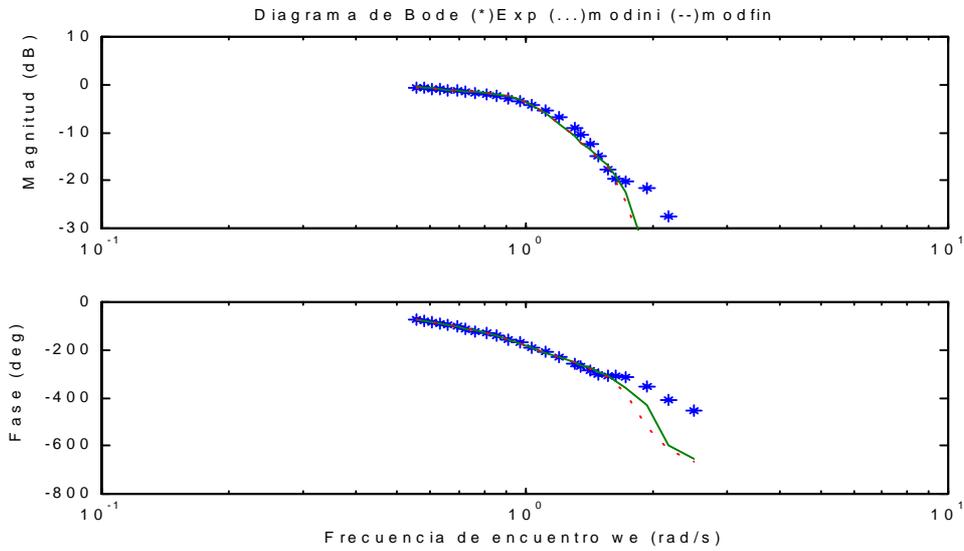


Figura 4.4: Diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ (línea - - -), $G_{HC}(s)$ (línea continua) y puntos obtenidos con PRECAL.

En la Figura 4.5 se muestra la salida de $G_{HG}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

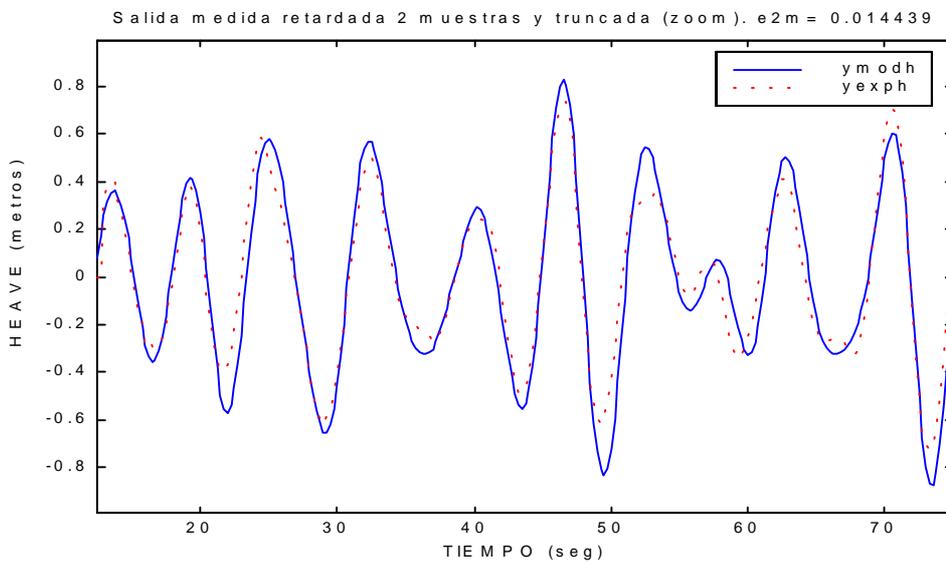


Figura 4.5: Salida (y_{modh}) de $G_{HG}(s)$ comparada con la salida (y_{exph}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.6 se muestra la salida de $G_{HC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

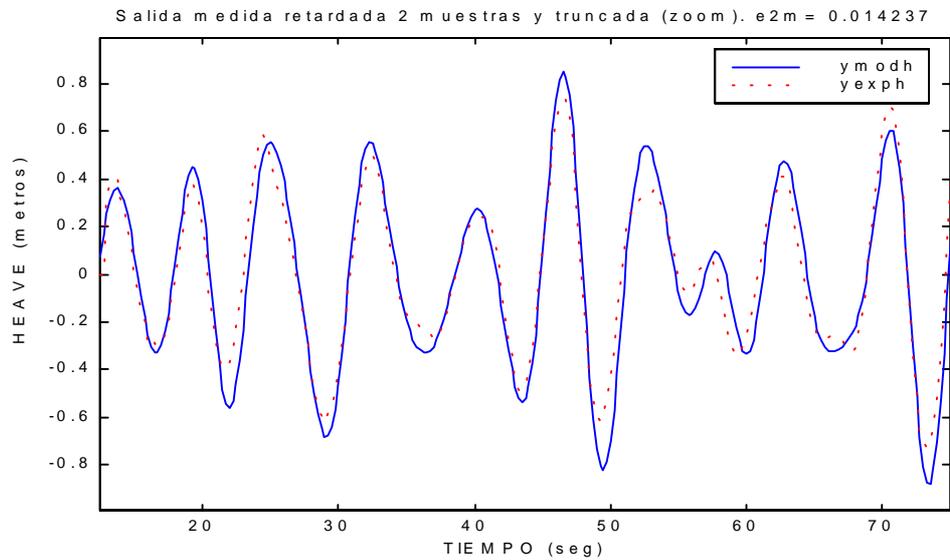


Figura 4.6: Salida (y_{modh}) de $G_{HC}(s)$ comparada con la salida (y_{exp}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.7 se muestra la salida de $G_{HG}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

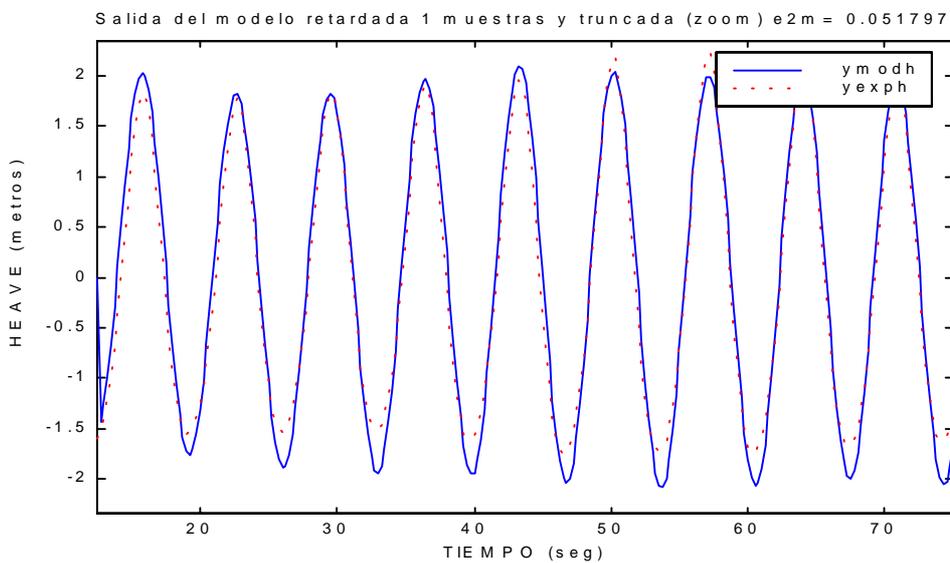


Figura 4.7: Salida (y_{modh}) de $G_{HG}(s)$ comparada con la salida (y_{exp}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

En la Figura 4.8 se muestra la salida de $G_{HC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

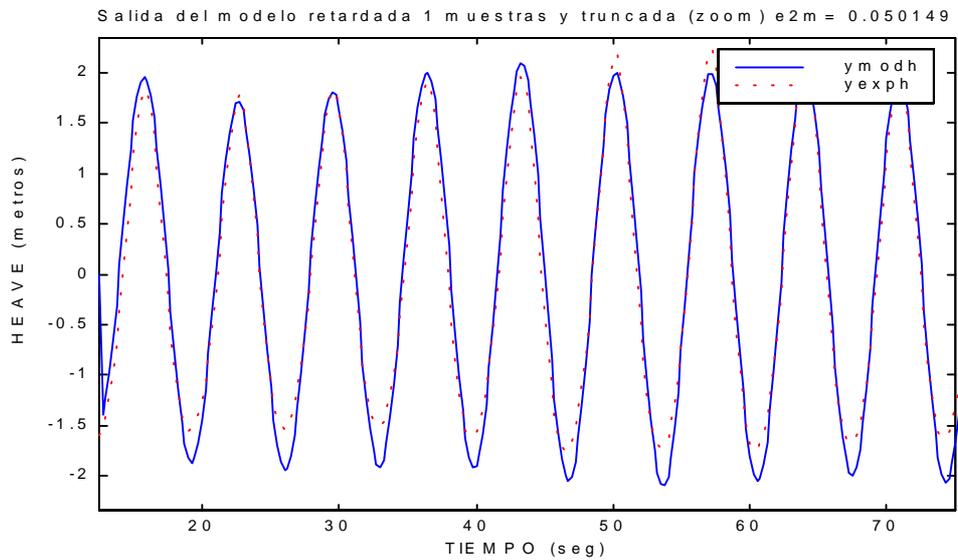


Figura 4.8: Salida (ymodh) de $G_{HG}(s)$ comparada con la salida (yexph) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

En la Figura 4.9 se muestra la aceleración vertical de heave que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de heave obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje irregular (SSN=5).

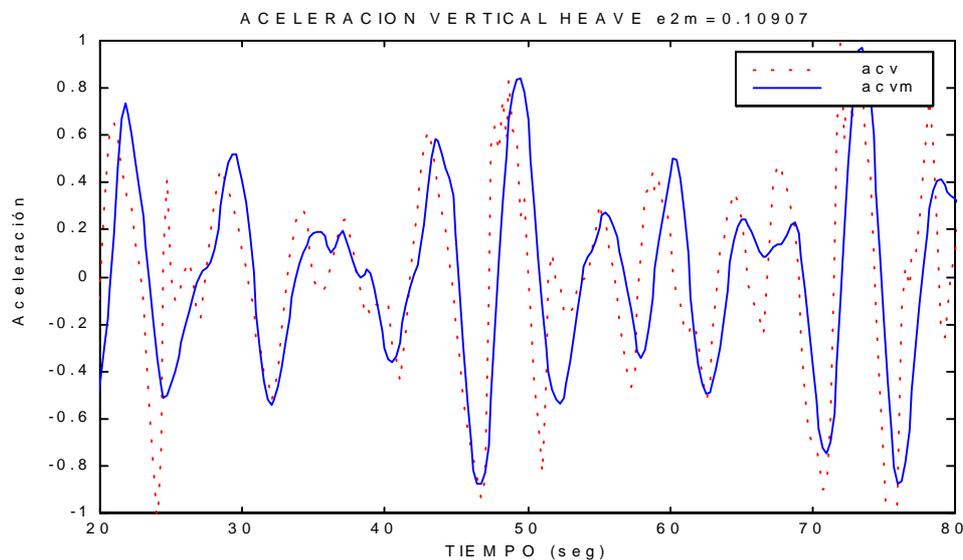


Figura 4.9: Aceleración vertical del heave (acvm) obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave experimental (acv) utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.10 se muestra la aceleración vertical de heave que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de heave obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje irregular (SSN=5).

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

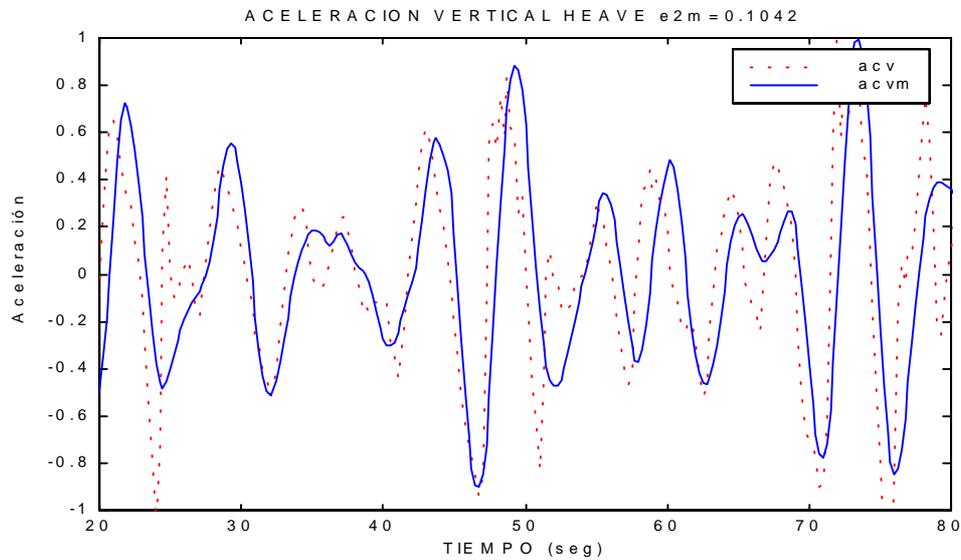


Figura 4.10: Aceleración vertical del heave ($acvm$) obtenida con $G_{HC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave experimental (acv) utilizando como excitación oleaje irregular ($SSN=5$).

En la Figura 4.11 se muestra la aceleración vertical de heave que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de heave obtenida con $G_{HC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuerdas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje regular (ensayo 25).

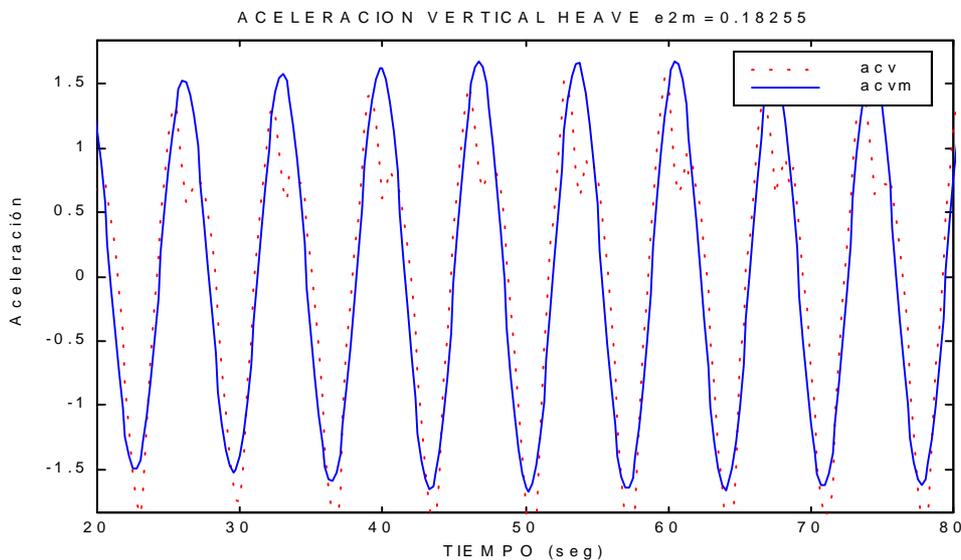


Figura 4.11: Aceleración vertical del heave ($acvm$) obtenida con $G_{HC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave experimental (acv) utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

En la Figura 4.12 se muestra la aceleración vertical de heave que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de heave obtenida con $G_{HC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuerdas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje regular (ensayo 25).

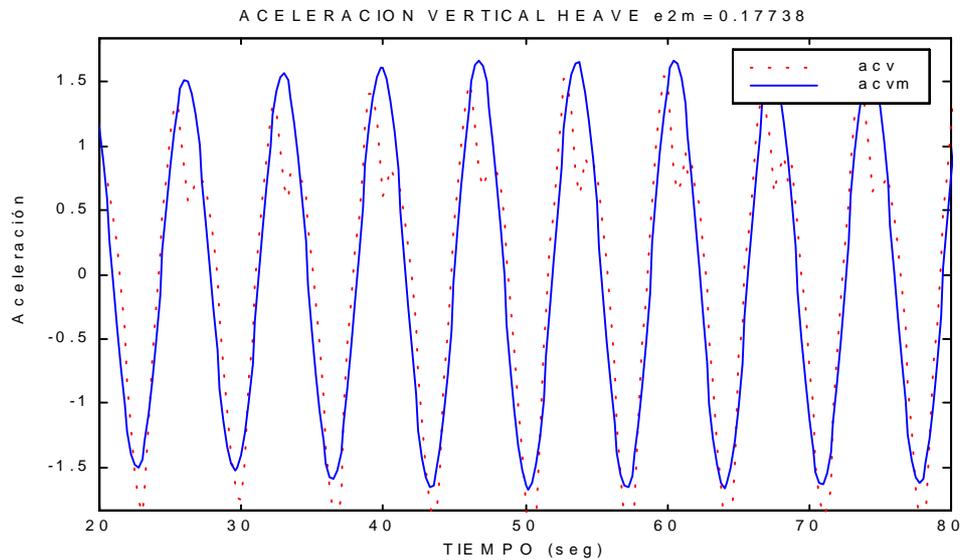


Figura 4.12 :Aceleración vertical del heave (acvm) obtenida con $G_{HC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave experimental (acv) utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

4.1.2 VELOCIDAD 30 NUDOS.

La función de transferencia obtenida para el segundo filtro obtenida mediante algoritmos genéticos es :

$$G_{2HG}(s) = \frac{0.3257 s^2 - 0.4748 s + 2.839}{s^2 + 0.478 s + 2.839}$$

En la Tabla 4.7 se muestran los polos y los ceros de $G_{2HG}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.7: Polos y ceros de $G_{2HG}(s)$

Polos		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.239 + 1.6679i		1.6849	0.14185
-0.239 - 1.6679i		1.6849	0.14185

Ceros		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.72889 + 2.8609i		2.9523	-0.24689
0.72889 - 2.8609i		2.9523	-0.24689

La función de transferencia para el sistema completo G_{HG} es el producto de $G_{IHG} \cdot G_{2HG}$

$$G_{HG}(s) = \frac{0.03934 s^5 - 0.06813 s^4 + 0.6212 s^3 - 0.5143 s^2 + 2.343 s - 0.3287}{s^6 + 1.91 s^5 + 5.492 s^4 + 5.88 s^3 + 6.123 s^2 + 2.536 s + 0.3288}$$

En la Tabla 4.8 se muestran los polos y los ceros de $G_{HG}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Tabla 4.8: Polos y ceros de $G_{HG}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.239 + 1.6679i	1.6849	0.14185
-0.239 - 1.6679i	1.6849	0.14185
-0.42792 + 1.0998i	1.1802	0.3626
-0.42792 - 1.0998i	1.1802	0.3626
-0.28808 + 0.012504i	0.28835	0.99906
-0.28808 - 0.012504i	0.28835	0.99906

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.72889 + 2.8609i	2.9523	-0.24689
0.72889 - 2.8609i	2.9523	-0.24689
0.064924 + 2.5786i	2.5794	-0.02517
0.064924 - 2.5786i	2.5794	-0.02517
0.14408	0.14408	-1

La función de transferencia obtenida para el segundo filtro obtenida mediante mínimos cuadrados no lineales es :

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

En la Tabla 4.9 se muestran los polos y los ceros de $G_{2HC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.9: Polos y ceros de $G_{2HC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.2281 + 1.6702i	1.6857	0.1353
-0.2281 - 1.6702i	1.6857	0.1353

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.7261 + 2.7901i	2.8831	-0.2519
0.7261 - 2.7901i	2.8831	-0.2519

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia $G_{2HC}(s)$ muestran en la Tabla 4.10:

Tabla 4.10: Intervalos de los coeficientes de $G_{2HC}(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
a ₁	1.7231	2.8415	2.8495
a ₂	0.27293	0.45629	1.2719
b ₂	-1.7102	-0.49643	0.1174
b ₃	0.27352	0.34185	1.9243

La función de transferencia para el sistema completo G_{HC} es el producto de $G_{1HC} \cdot G_{2HC}$

$$G_{HC}(s) = \frac{0.02837 s^5 - 0.03729 s^4 + 0.4481 s^3 - 0.3259 s^2 + 1.872 s - 0.3478}{s^6 + 1.603 s^5 + 5.14 s^4 + 4.685 s^3 + 5.449 s^2 + 1.807 s + 0.3478}$$

En la Tabla 4.11 se muestran los polos y los ceros de $G_{HC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.11: Polos y ceros de $G_{HC}(s)$

Polos	Frecuencia natural	Factor de amortiguamiento
-------	--------------------	---------------------------

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

		(rad/seg)	δ
-0.22814 +	1.6702i	1.6857	0.13534
-0.22814 -	1.6702i	1.6857	0.13534
-0.37552 +	1.1179i	1.1793	0.31844
-0.37552 -	1.1179i	1.1793	0.31844
-0.1978 +	0.2211i	0.29666	0.66675
-0.1978 -	0.2211i	0.29666	0.66675

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.7261 + 2.7901i	2.8831	-0.25185
0.7261 - 2.7901i	2.8831	-0.25185
-0.16407 + 2.778i	2.7828	0.058957
-0.16407 - 2.778i	2.7828	0.058957
0.19042	0.19042	-1

En la Figura 4.13 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_{HG}(s)$ y de $G_{HC}(s)$

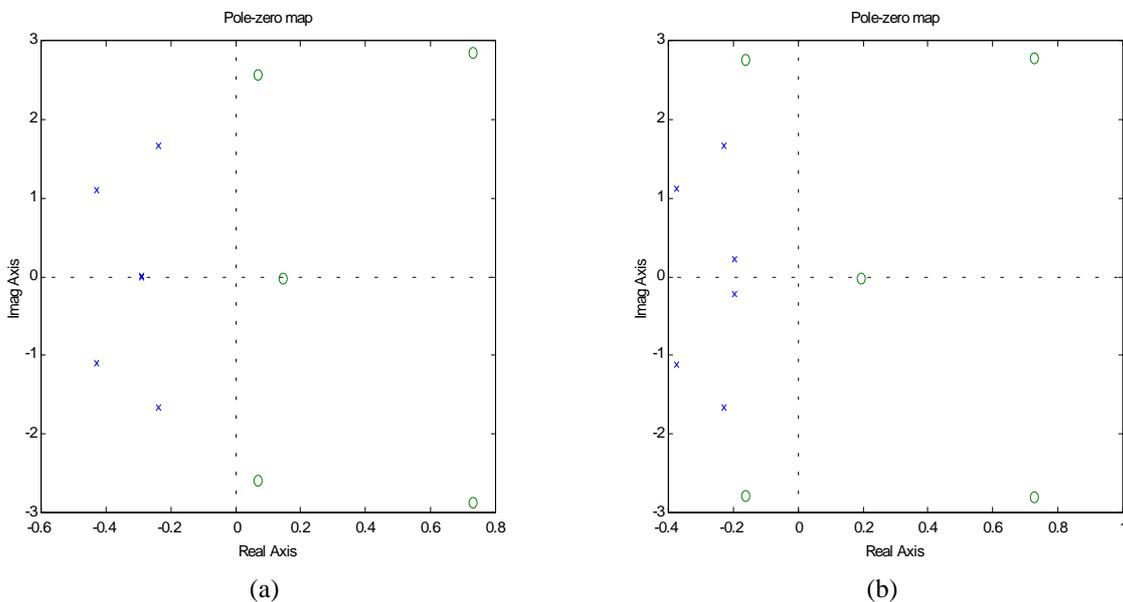


Figura 4.13: (a) Diagrama de polos y ceros de $G_{HG}(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros de $G_{HC}(s)$

En la Figura 4.14 se muestra el diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

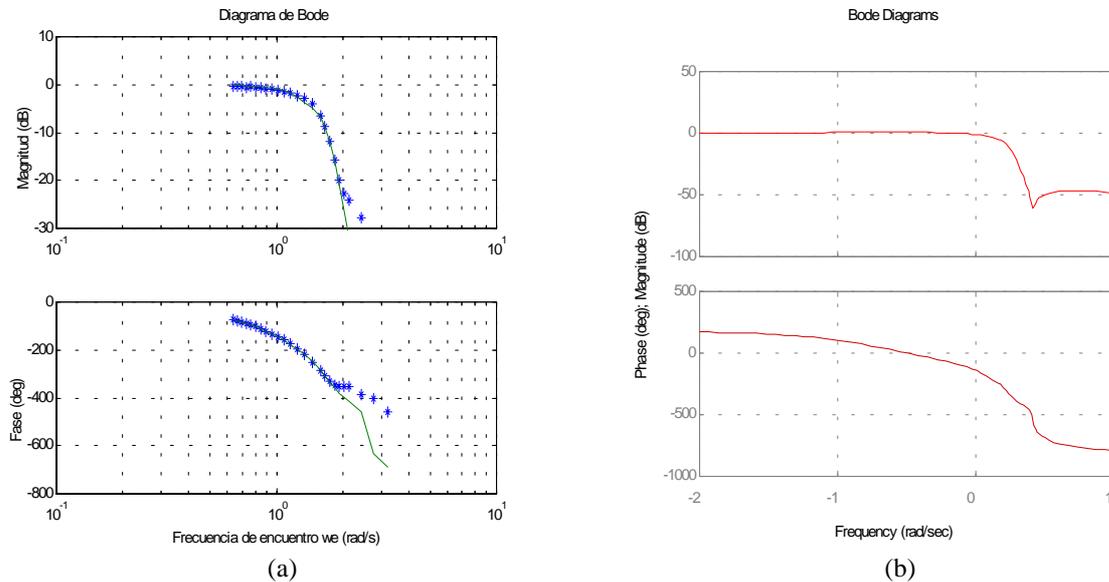


Figura 4.14: (a) Diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$.

En la Figura 4.15 se muestra el diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

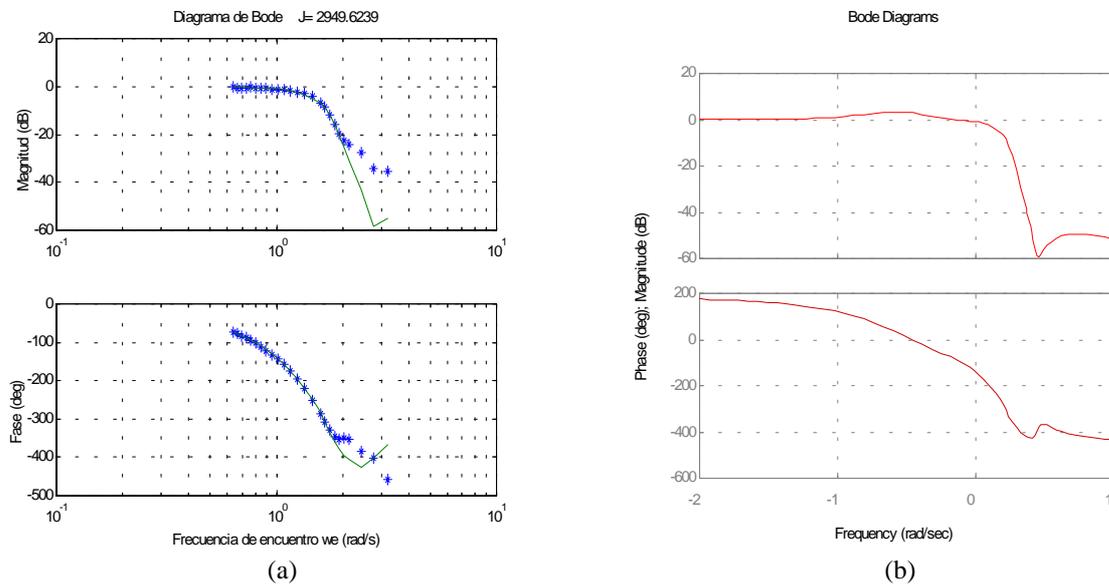


Figura 4.15: (a) Diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$.

En la Figura 4.16 se muestra el diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ comparado con el diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ y los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

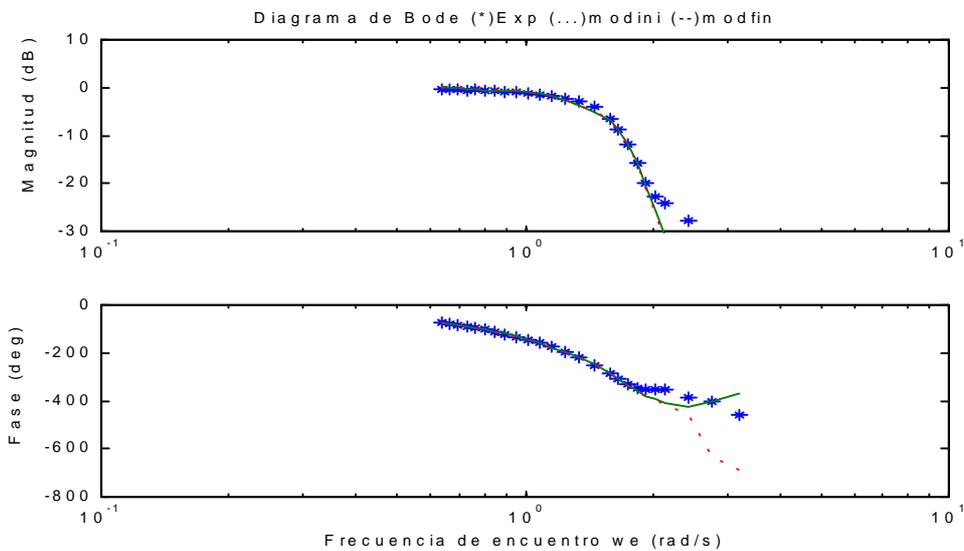


Figura 4.16: Diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ (línea - - -), $G_{HC}(s)$ (línea continua) y puntos obtenidos con PRECAL.

En la Figura 4.17 se muestra la salida de $G_{HG}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

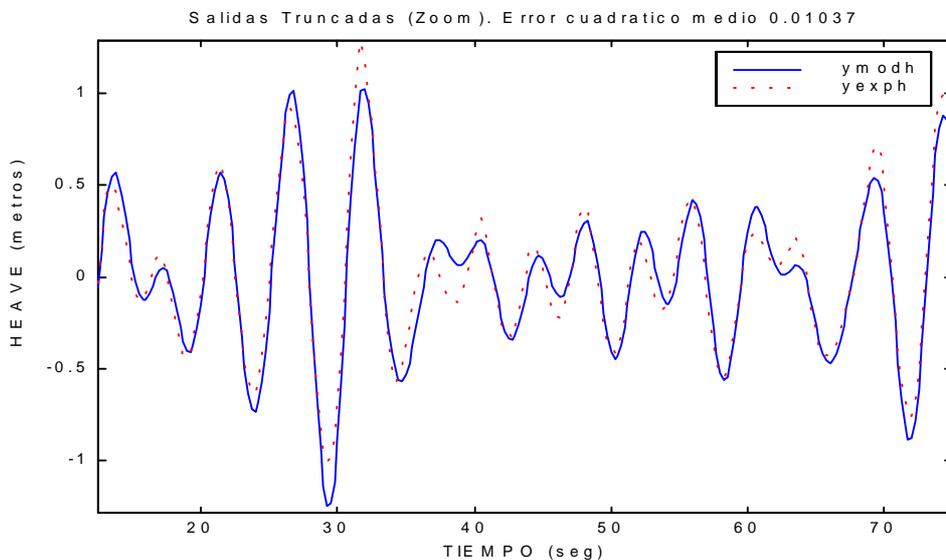


Figura 4.17: Salida (y_{modh}) de $G_{HG}(s)$ comparada con la salida (y_{exph}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.18 se muestra la salida de $G_{HC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

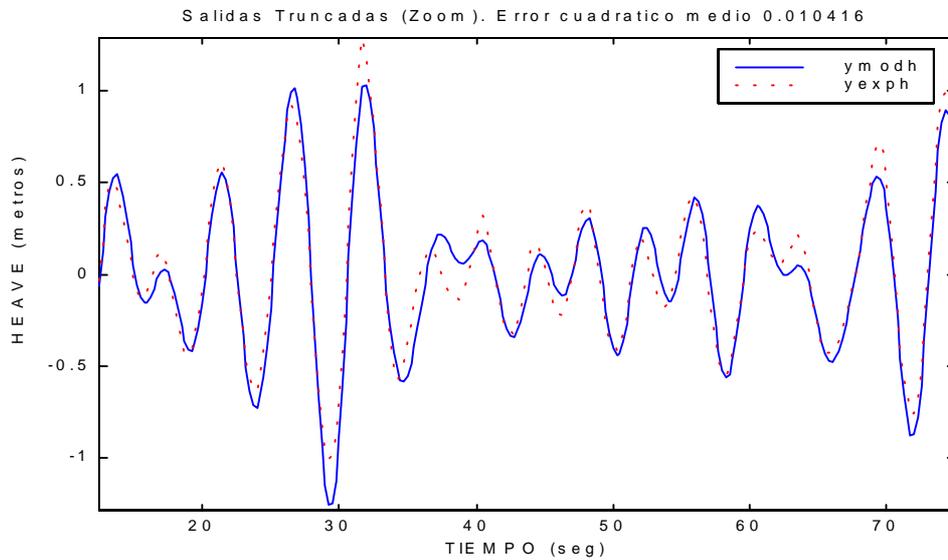


Figura 4.18: Salida (y_{modh}) de $G_{HC}(s)$ comparada con la salida (y_{exph}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular ($SSN=5$).

En la Figura 4.19 se muestra la salida de $G_{HG}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

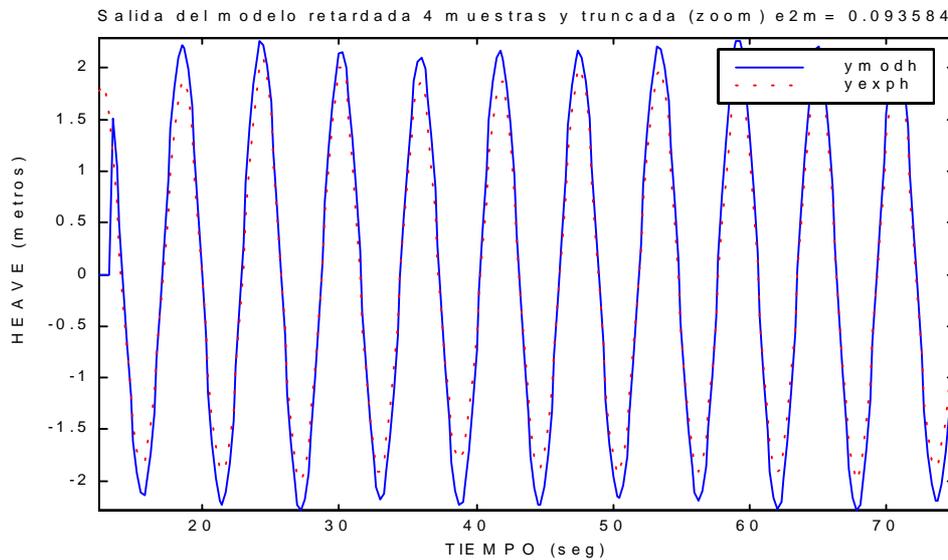


Figura 4.19: Salida (y_{modh}) de $G_{HG}(s)$ comparada con la salida (y_{exph}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

En la Figura 4.20 se muestra la salida de $G_{HC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

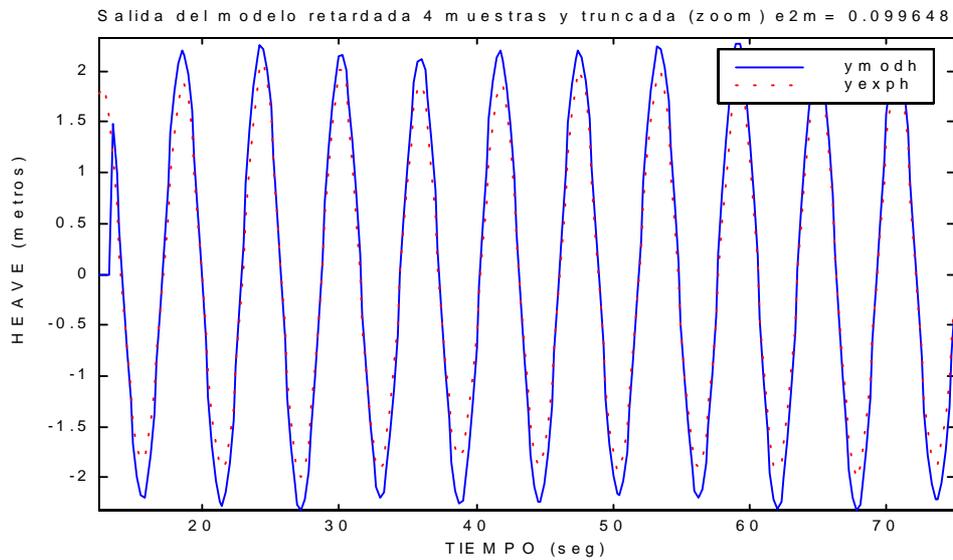


Figura 4.20: Salida (y_{modh}) de $G_{HG}(s)$ comparada con la salida (y_{exp}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

En la Figura 4.21 se muestra la aceleración vertical de heave que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de heave obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje irregular (SSN=5).

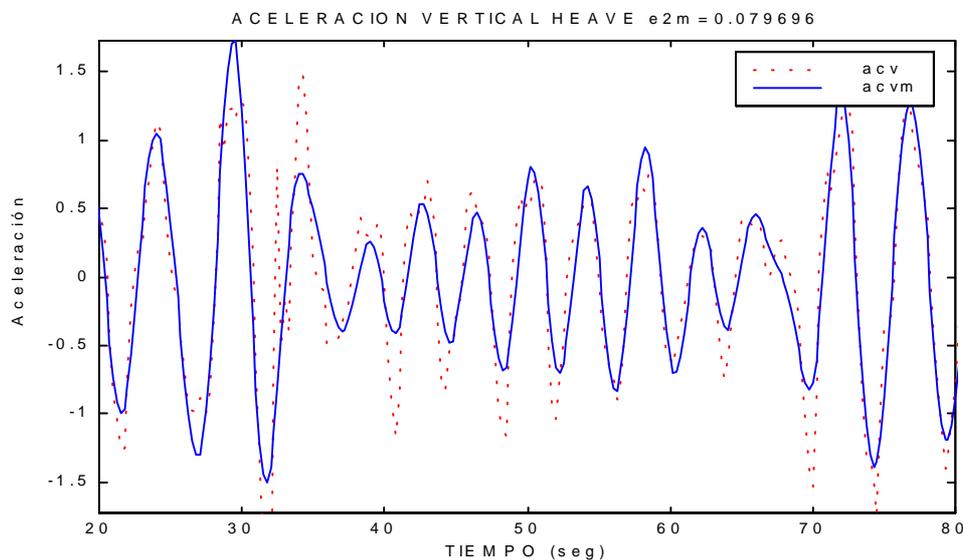


Figura 4.21: Aceleración vertical del heave ($acvm$) obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave experimental (acv) utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.22 se muestra la aceleración vertical de heave que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de heave obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje irregular (SSN=5).

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

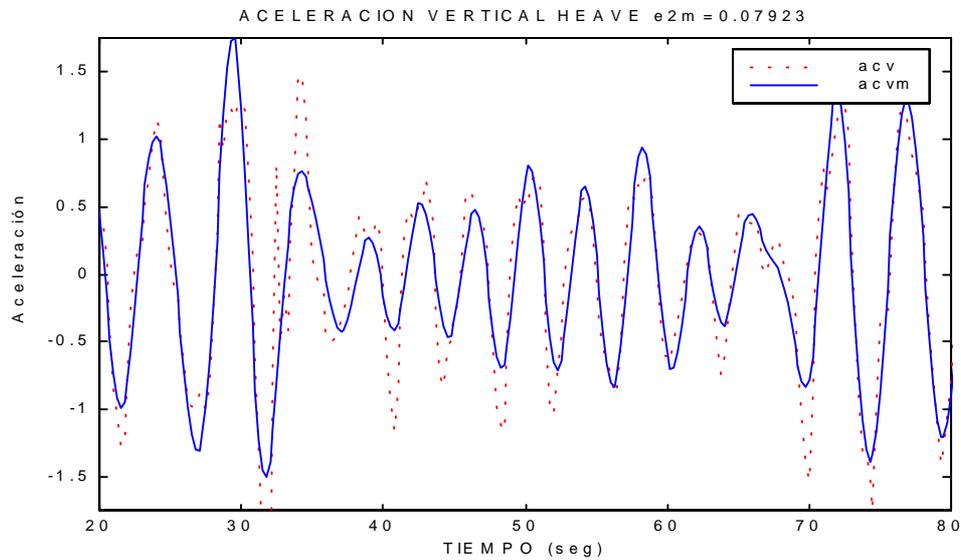


Figura 4.22: Aceleración vertical del heave ($acvm$) obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave experimental (acv) utilizando como excitación oleaje irregular ($SSN=5$).

En la Figura 4.23 se muestra la aceleración vertical de heave que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de heave obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuerdas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje regular (ensayo 25).

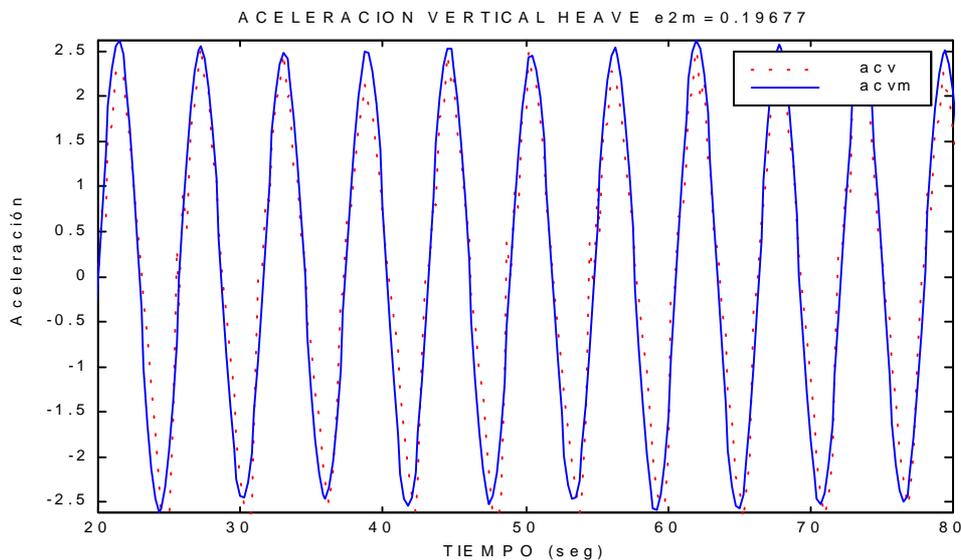


Figura 4.23: Aceleración vertical del heave ($acvm$) obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave experimental (acv) utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

En la Figura 4.24 se muestra la aceleración vertical de heave que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de heave obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuerdas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje regular (ensayo 25).

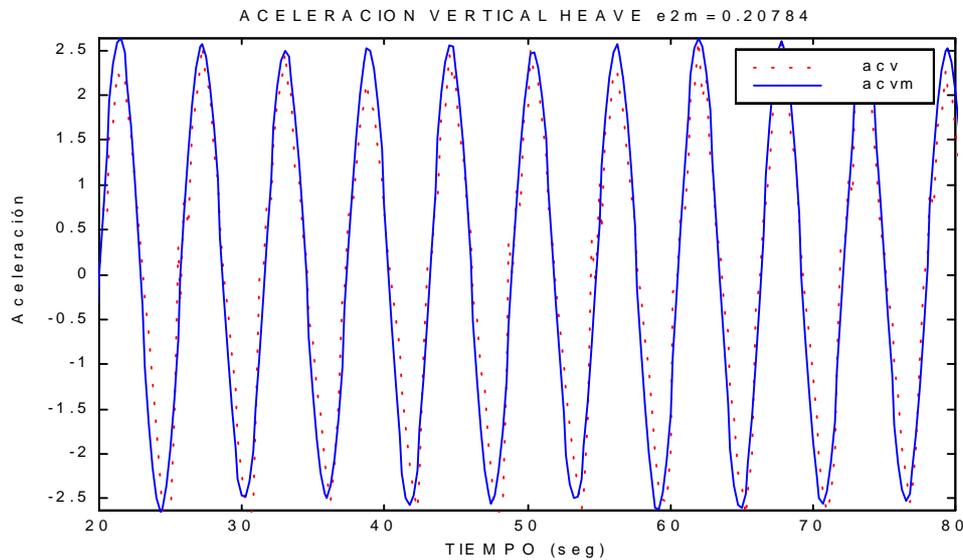


Figura 4.24: Aceleración vertical del heave (acvm) obtenida con $G_{HC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave experimental (acv) utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

4.1.3 VELOCIDAD 40 NUDOS.

La función de transferencia obtenida para el segundo filtro obtenida mediante algoritmos genéticos es :

$$G_{2HG}(s) = \frac{0.2775 s^2 - 0.5094 s + 3.041}{s^2 + 0.466 s + 3.04}$$

En la Tabla 4.12 se muestran los polos y los ceros de $G_{2HG}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.12: Polos y ceros de $G_{2HG}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.2330 + 1.7279i	1.7436	0.1336
-0.2330 - 1.7279i	1.7436	0.1336

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.9178 + 3.1806i	3.3104	-0.2773
0.9178 - 3.1806i	3.3104	-0.2773

La función de transferencia para el sistema completo G_{HG} es el producto de $G_{IHG} \cdot G_{2HG}$

$$G_{HG}(s) = \frac{0.02869 s^5 - 0.03004 s^4 + 0.5798 s^3 - 0.3598 s^2 + 3.445 s - 0.4869}{s^6 + 2.044 s^5 + 6.214 s^4 + 7.083 s^3 + 8.11 s^2 + 3.568 s + 0.4867}$$

En la Tabla 4.13 se muestran los polos y los ceros de $G_{HG}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Tabla 4.13: Polos y ceros de $G_{HG}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.233 + 1.7279i	1.7436	0.13363
-0.233 - 1.7279i	1.7436	0.13363
-0.48786 + 1.2339i	1.3268	0.36769
-0.48786 - 1.2339i	1.3268	0.36769
-0.30114 + 0.016064i	0.30157	0.99858
-0.30114 - 0.016064i	0.30157	0.99858

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.4659 + 3.2577i	3.2908	0.14158
-0.4659 - 3.2577i	3.2908	0.14158
0.91784 + 3.1806i	3.3104	-0.27726
0.91784 - 3.1806i	3.3104	-0.27726
0.14298	0.14298	-1

La función de transferencia obtenida para el segundo filtro obtenida mediante mínimos cuadrados no lineales es :

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

En la Tabla 4.14 se muestran los polos y los ceros de $G_{2HC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.14: Polos y ceros de $G_{2HC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.2346 + 1.7315i	1.7473	0.1343
-0.2346 - 1.7315i	1.7473	0.1343

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.9557 + 3.2457i	3.3835	-0.2825
0.9557 - 3.2457i	3.3835	-0.2825

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia $G_{2HC}(s)$ muestran en la Tabla 4.15:

Tabla 4.15: Intervalos de los coeficientes de $G_{2HC}(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
a ₁	1.823	3.0532	3.0677
a ₂	0.24836	0.46921	1.2052
b ₂	-1.5706	-0.50981	0.063957
b ₃	0.22401	0.26671	1.7047

La función de transferencia para el sistema completo G_{HC} es el producto de $G_{1HC} \cdot G_{2HC}$

$$G_{HC}(s) = \frac{0.0178 s^5 - 0.006781 s^4 + 0.3929 s^3 - 0.1994 s^2 + 2.857 s - 0.5769}{s^6 + 1.81 s^5 + 5.948 s^4 + 6.023 s^3 + 7.513 s^2 + 2.736 s + 0.5769}$$

En la Tabla 4.16 se muestran los polos y los ceros de $G_{HC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.16: Polos y ceros de $G_{HC}(s)$

Polos	Frecuencia natural	Factor de amortiguamiento
-------	--------------------	---------------------------

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

	(rad/seg)	δ
-0.2346 + 1.7315i	1.7473	0.13426
-0.2346 - 1.7315i	1.7473	0.13426
-0.45188 + 1.2489i	1.3281	0.34025
-0.45188 - 1.2489i	1.3281	0.34025
-0.21834 + 0.24383i	0.3273	0.66709
-0.21834 - 0.24383i	0.3273	0.66709

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.86713 + 3.626i	3.7282	0.23259
-0.86713 - 3.626i	3.7282	0.23259
0.95575 + 3.2457i	3.3835	-0.28247
0.95575 - 3.2457i	3.3835	-0.28247
0.20366	0.20366	-1

En la Figura 4.25 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_{HG}(s)$ y de $G_{HC}(s)$

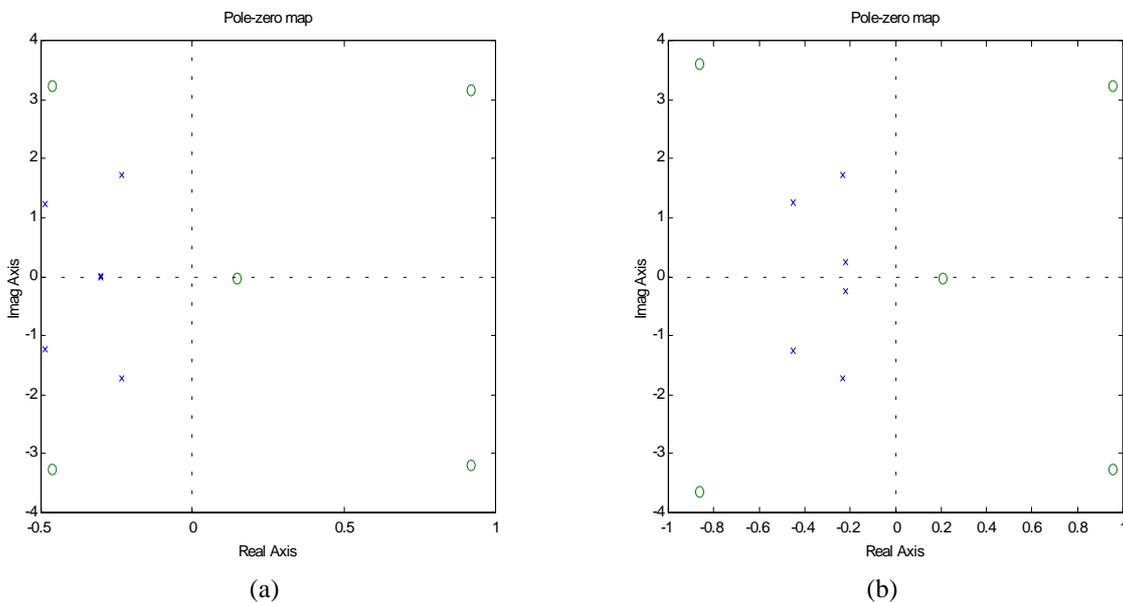


Figura 4.25: (a) Diagrama de polos y ceros de $G_{HG}(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros de $G_{HC}(s)$

En la Figura 4.26 se muestra el diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

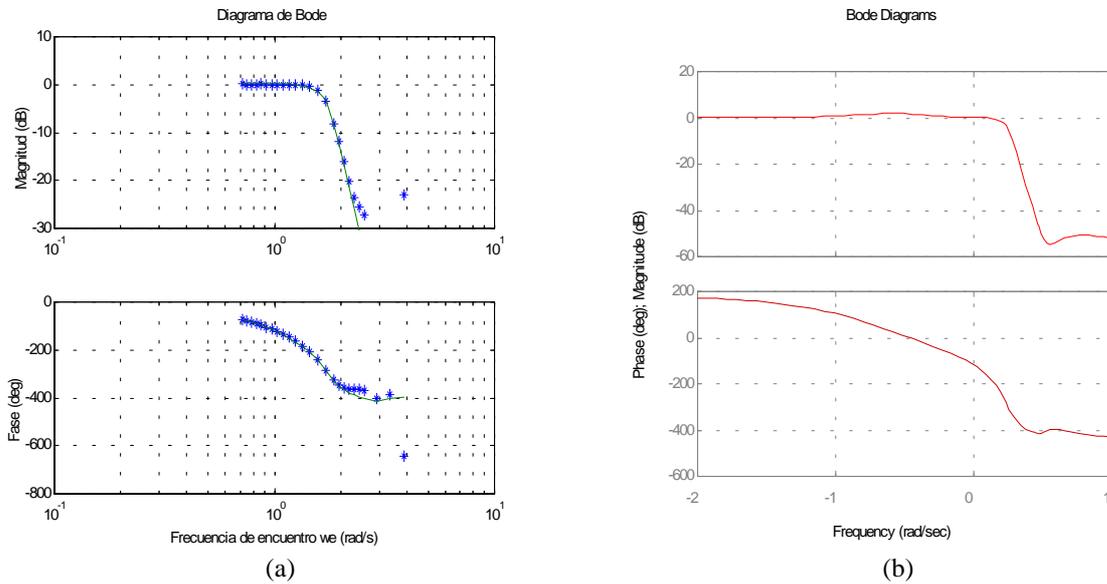


Figura 4.26: (a) Diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$.

En la Figura 4.27 se muestra el diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

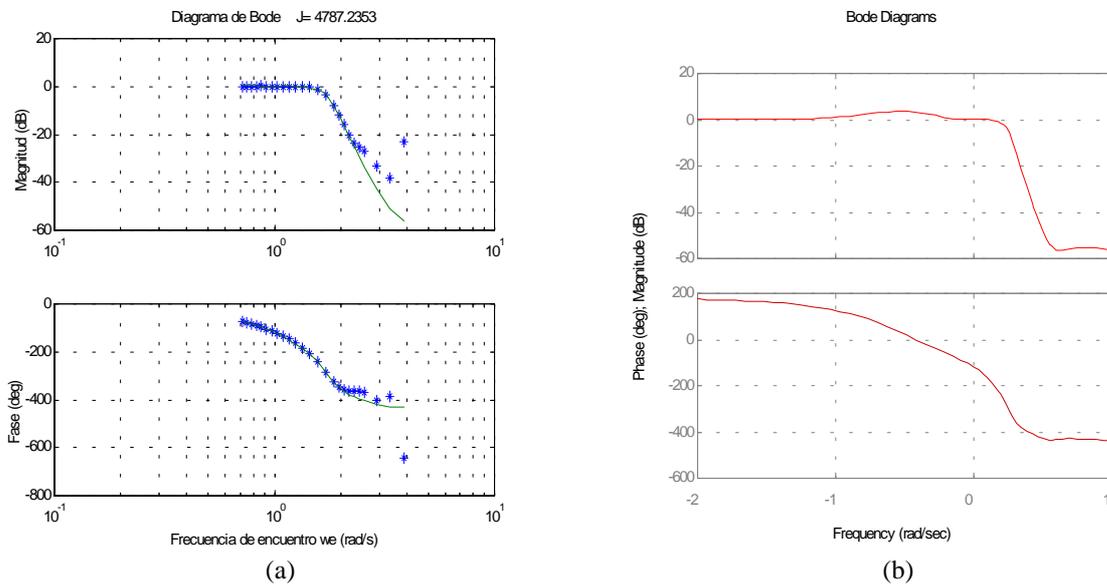


Figura 4.27: (a) Diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.28 se muestra el diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ comparado con el diagrama de Bode de $G_{HC}(s)$ y los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

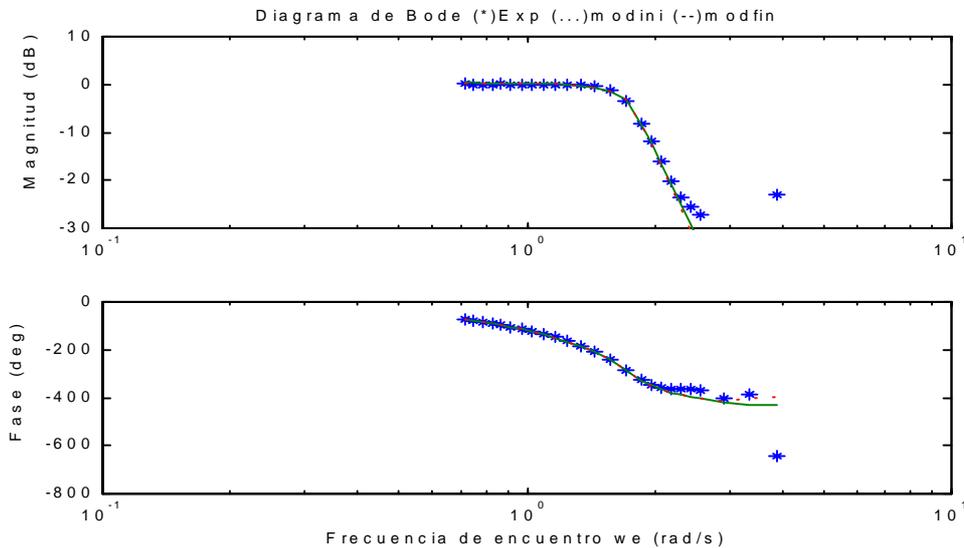


Figura 4.28: Diagrama de Bode de $G_{HG}(s)$ (línea - - -), $G_{HC}(s)$ (línea continua) y puntos obtenidos con PRECAL.

En la Figura 4.29 se muestra la salida de $G_{HG}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

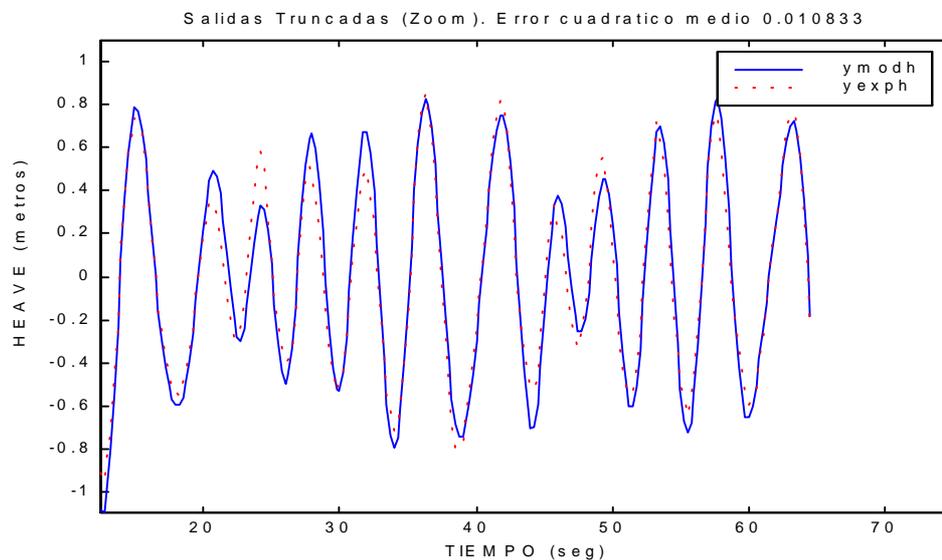


Figura 4.29: Salida (y_{modh}) de $G_{HG}(s)$ comparada con la salida (y_{exph}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.30 se muestra la salida de $G_{HC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

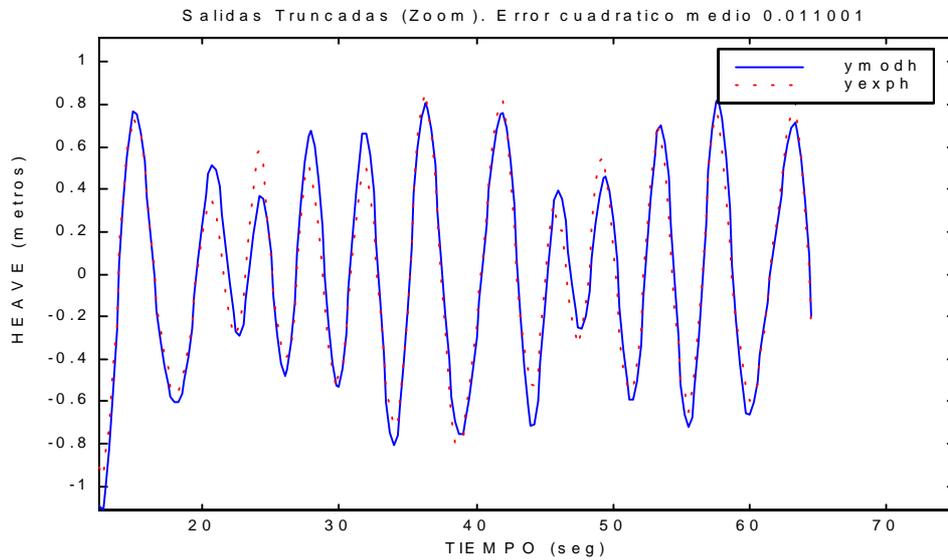


Figura 4.30: Salida (y_{modh}) de $G_{HC}(s)$ comparada con la salida (y_{exph}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.31 se muestra la salida de $G_{HG}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

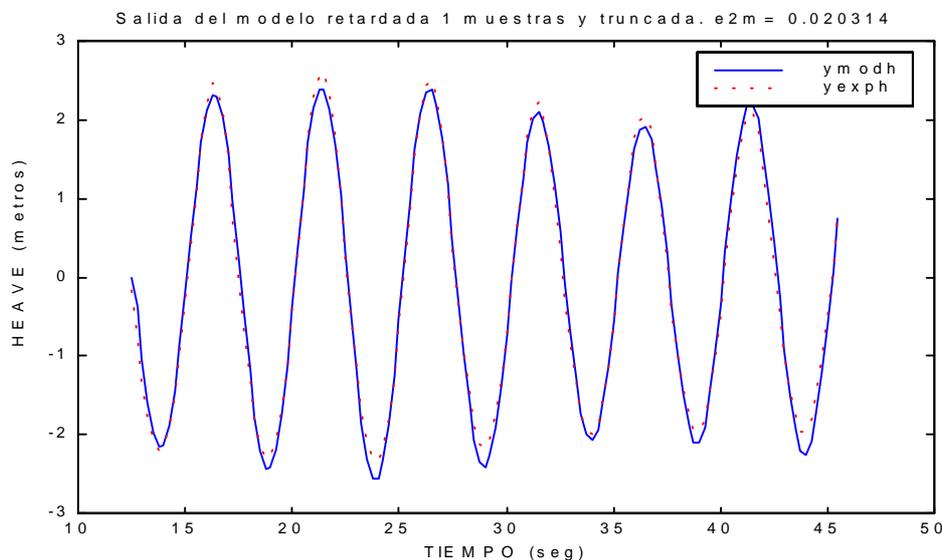


Figura 4.31: Salida (y_{modh}) de $G_{HG}(s)$ comparada con la salida (y_{exph}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

En la Figura 4.32 se muestra la salida de $G_{HC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

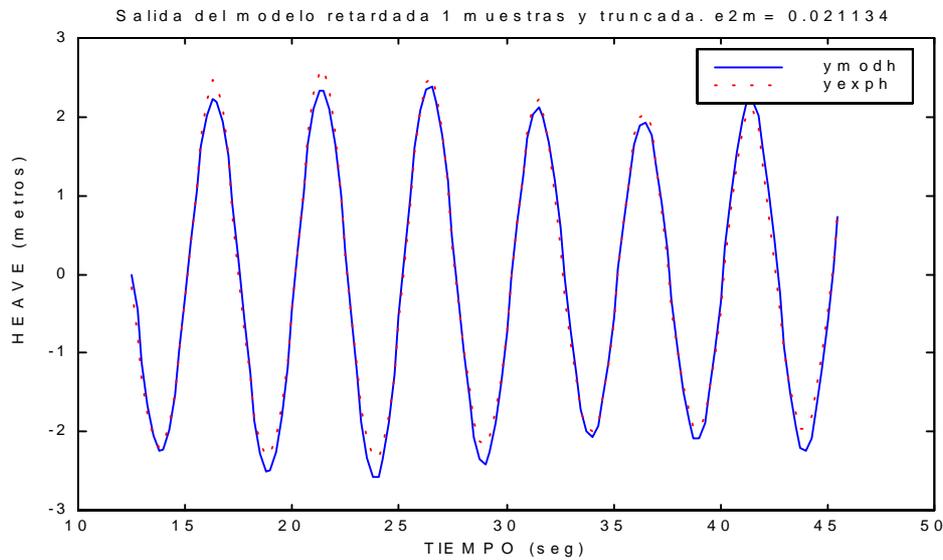


Figura 4.32: Salida (y_{modh}) de $G_{HG}(s)$ comparada con la salida ($y_{exp h}$) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

En la Figura 4.33 se muestra la aceleración vertical de heave que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de heave obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje irregular (SSN=5).

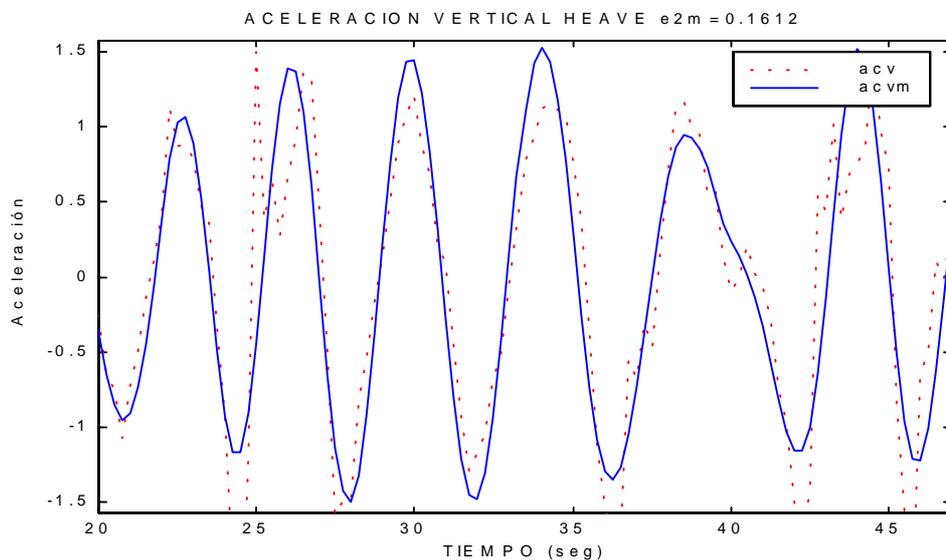


Figura 4.33: Aceleración vertical del heave ($acvm$) obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave experimental (acv) utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.34 se muestra la aceleración vertical de heave que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de heave obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje irregular (SSN=5).

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

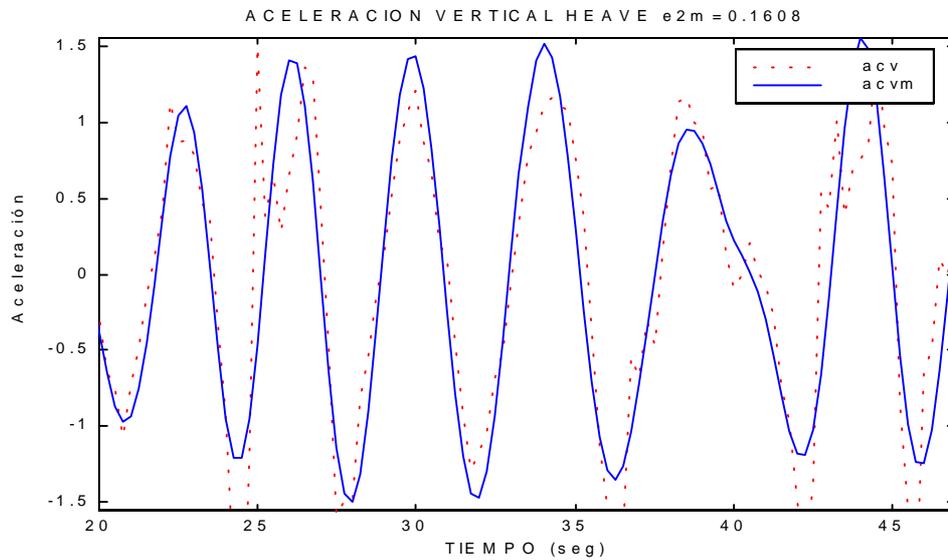


Figura 4.34: Aceleración vertical del heave ($acvm$) obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave experimental (acv) utilizando como excitación oleaje irregular ($SSN=5$).

En la Figura 4.35 se muestra la aceleración vertical de heave que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de heave obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje regular (ensayo 25).

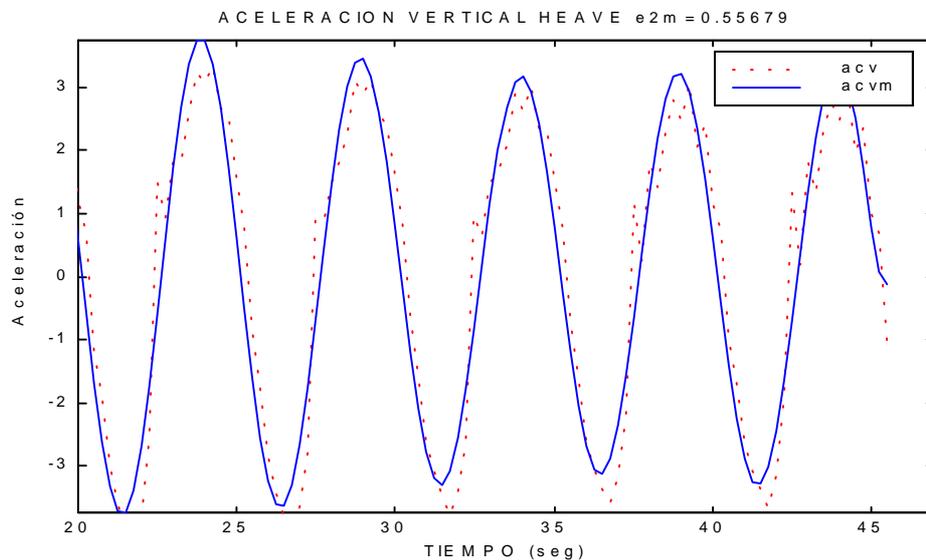


Figura 4.35: Aceleración vertical del heave ($acvm$) obtenida con $G_{HG}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave experimental (acv) utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.36 se muestra la aceleración vertical de heave que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de heave obtenida con $G_{HC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje regular (ensayo 25).

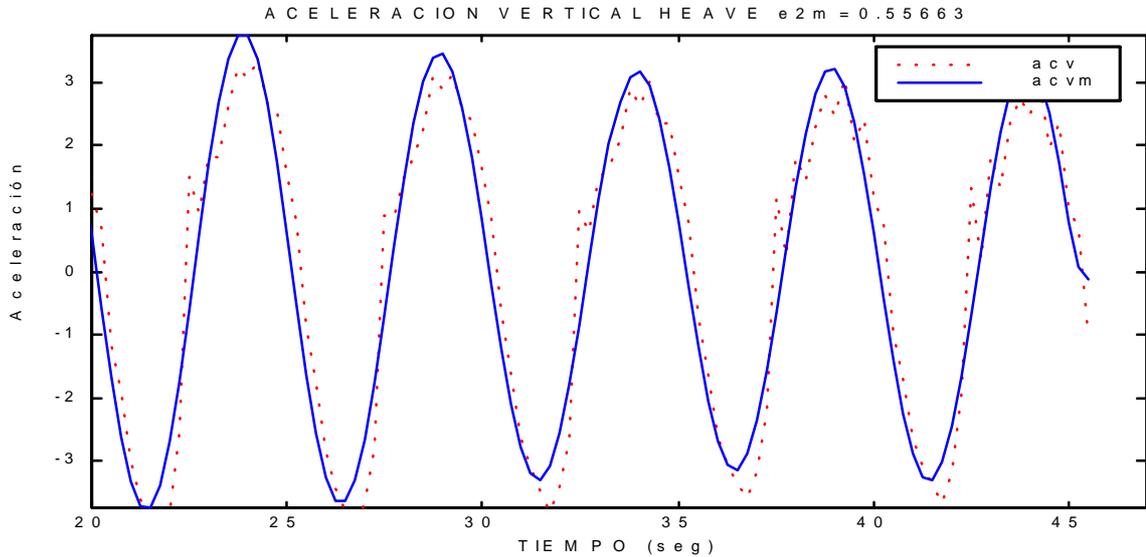


Figura 4.36: Aceleración vertical del heave ($acvm$) obtenida con $G_{HC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de heave experimental (acv) utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

4.2 MODELOS G_{2P} Y G_P

En la Tabla 4.17 se muestran el valor de la función de coste obtenido en la identificación de los modelos (4,6,0) y (5,7,1) para G_{PC} a distintas velocidades.

Tabla 4.17: valor de la función de coste obtenido en la identificación de los modelos (4,6,0) y (5,7,1) para G_{PC} a distintas velocidades.

Velocidad (Nudos)	Valor de J para (4,6,0) $G_{PC}(s)$	Valor de J para (5,7,1) $G_{PC}(s)$
20	94.456	539.19
30	120.406	1109
40	131.93	11334

4.2.1 VELOCIDAD 20 NUDOS.

- Modelos (1,2,0) para G_{2PC} y (4,6,0) para G_{PC}

La función de transferencia obtenida para el segundo filtro obtenida mediante mínimos cuadrados no lineales es :

$$G_{2PC}(s) = \frac{4.833 s + 9.502}{s^2 + 0.699 s + 1.637}$$

En la Tabla 4.18 se muestran los polos y los ceros de $G_{2PC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.18: Polos y ceros de $G_{2PC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.3495 + 1.2309i	1.2795	0.27315
-0.3495 - 1.2309i	1.2795	0.27315

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-1.9658	1.9658	1

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia $G_{2PC}(s)$ muestran en la Tabla 4.19:

Tabla 4.19: Intervalos de los coeficientes de $G_{2PC}(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
a ₁	0.27153	1.6372	3.1421
a ₂	0.10089	0.69901	1.2825
b ₂	-0.96616	9.5014	9.5014
b ₃	-0.45414	4.8333	4.8333

La función de transferencia para el sistema completo G_{PC} es el producto de $G_{1PC} \cdot G_{2PC}$

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

$$G_{PC}(s) = \frac{-0.4589 s^4 - 0.4747 s^3 - 1.194 s^2 - 4 s}{s^6 + 3.24 s^5 + 7.273 s^4 + 10.38 s^3 + 10.03 s^2 + 6.639 s + 2.038}$$

En la Tabla 4.20 se muestran los polos y los ceros de $G_{PC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.20: Polos y ceros de $G_{PC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.4169 + 1.2389i	1.3072	0.31893
-0.4169 - 1.2389i	1.3072	0.31893
-0.3495 + 1.2309i	1.2795	0.27315
-0.3495 - 1.2309i	1.2795	0.27315
-0.85344 + 0.0015998i	0.85344	1
-0.85344 - 0.0015998i	0.85344	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0	0	NaN
0.46574 + 2.0534i	2.1056	-0.22119
0.46574 - 2.0534i	2.1056	-0.22119
-1.9659	1.9659	1

En la Figura 4.37 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_{PC}(s)$

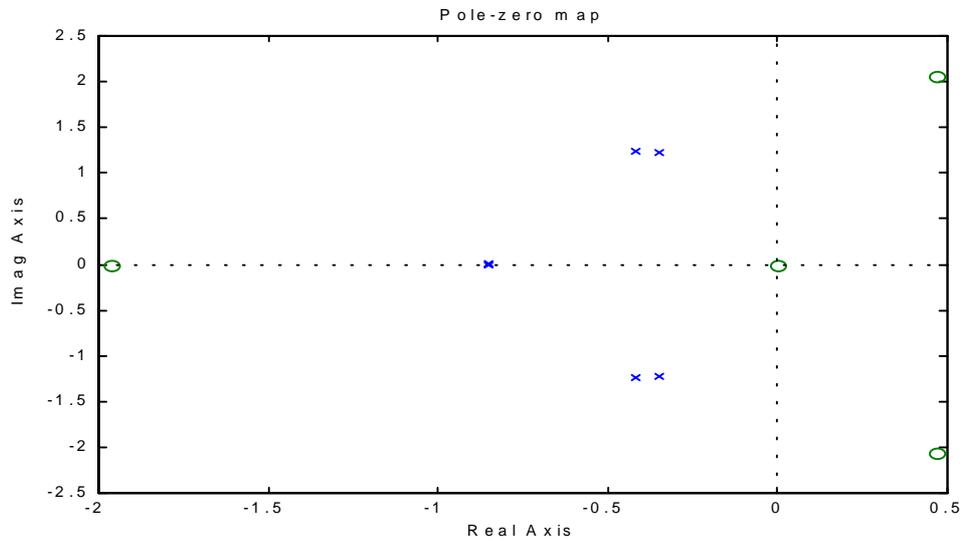


Figura 4.37: Diagrama de polos y ceros de $G_{PC}(s)$

En la Figura 4.38 se muestra el diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

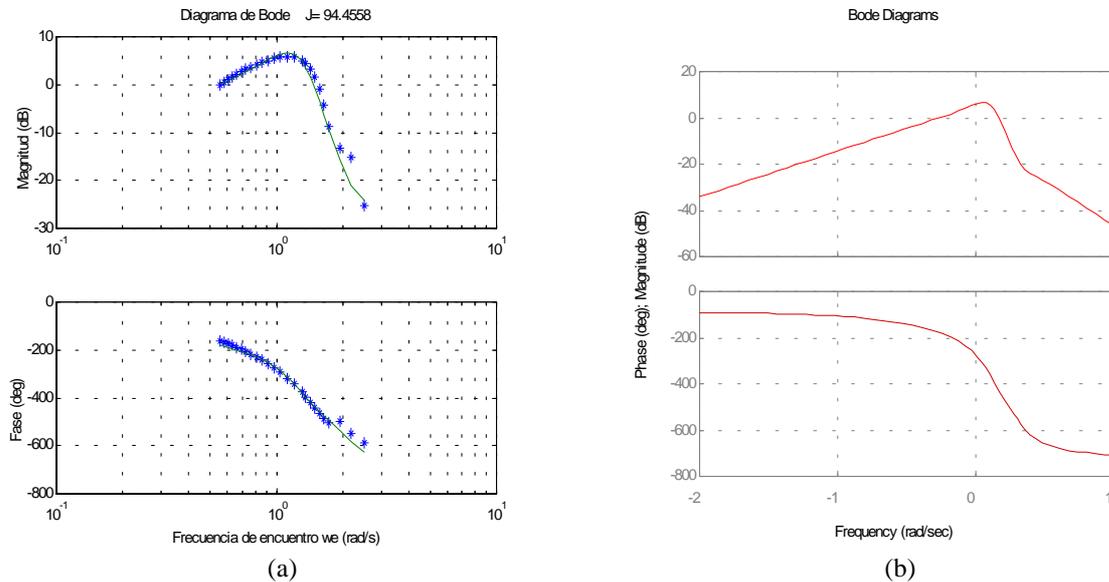


Figura 4.38: (a) Diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$.

En la Figura 4.39 se muestra la salida de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

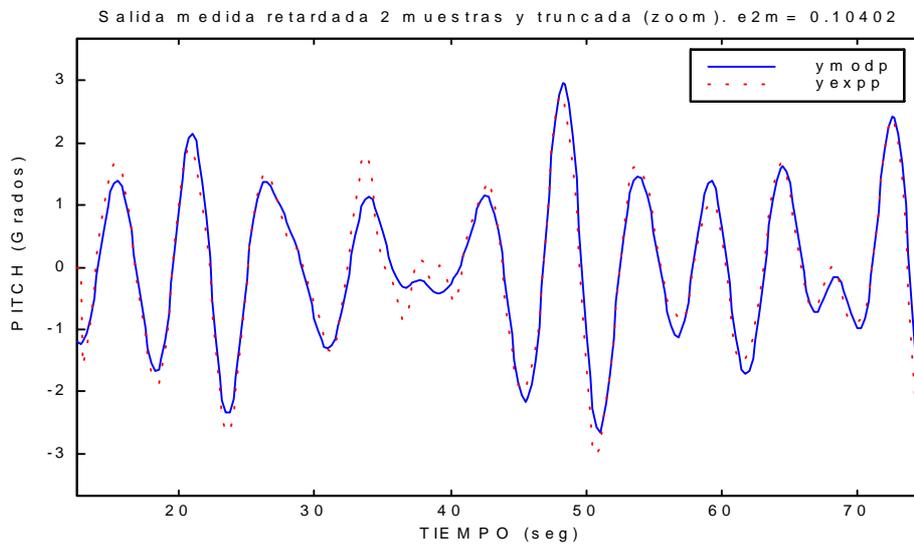


Figura 4.39: Salida (y_{modp}) de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida (y_{exp}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.40 se muestra la salida de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

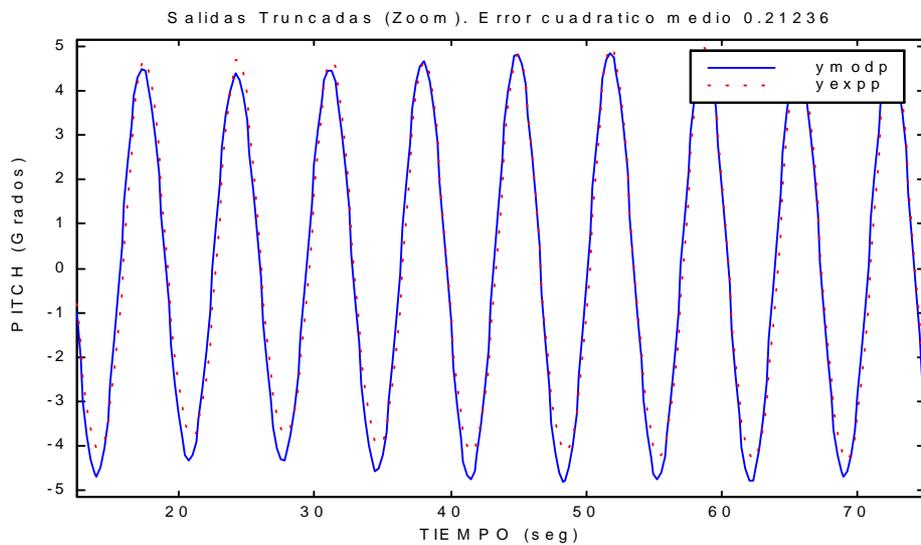


Figura 4.40: Salida (y_{modp}) de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida (y_{exp}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

En la Figura 4.41 se muestra la aceleración vertical de pitch que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de pitch obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje irregular (SSN=5).

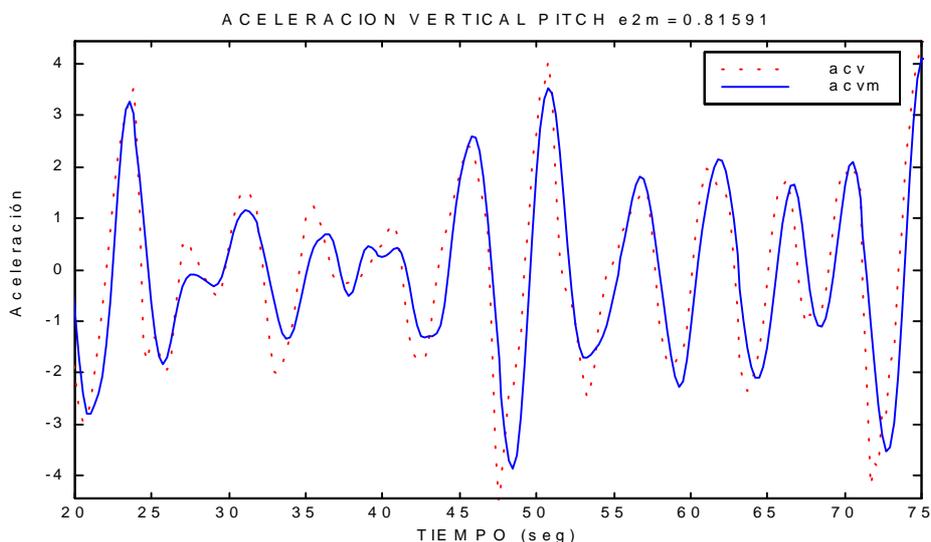


Figura 4.41: Aceleración vertical del pitch ($acvm$) obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch experimental (acv) utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.42 se muestra la aceleración vertical de pitch que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de pitch obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje regular (ensayo 25).

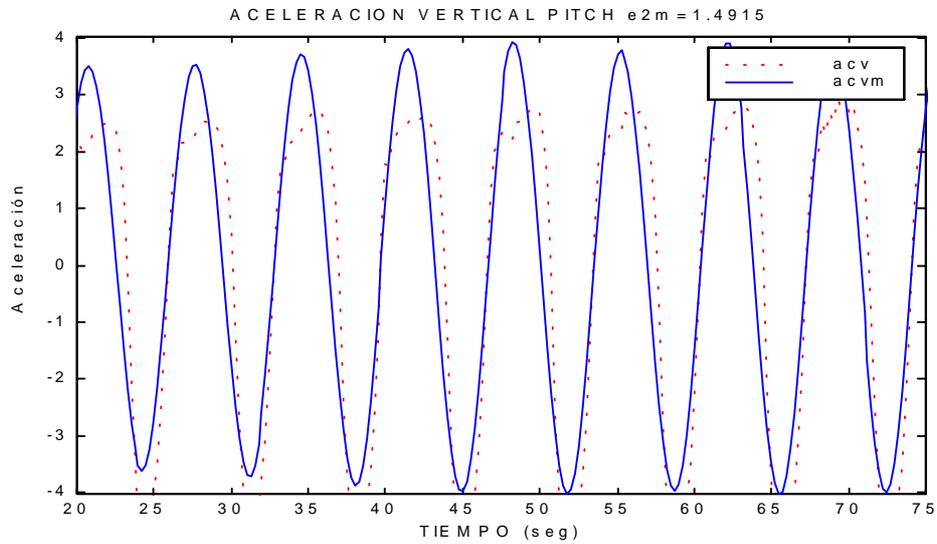


Figura 4.42: Aceleración vertical del pitch ($acvm$) obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch experimental (acv) utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

- Modelos (2,3,1) para G_{2PC} y (5,7,1) para G_{PC}

La función de transferencia obtenida para el segundo filtro obtenida mediante mínimos cuadrados no lineales es :

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

En la Tabla 4.21 se muestran los polos y los ceros de $G_{2PC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.21: Polos y ceros de $G_{2PC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.53808 + 1.4095i	1.5087	0.35666
-0.53808 - 1.4095i	1.5087	0.35666
-0.48146	0.48146	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
5.7975	5.7975	-1
-0.015919	0.015919	1

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia $G_{2PC}(s)$ muestran en la Tabla 4.22:

Tabla 4.22: Intervalos de los coeficientes de $G_{2PC}(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
a ₁	-0.10826	1.0958	3.616
a ₂	-0.16612	2.7942	5.4676
a ₃	-0.42739	1.5576	3.5177
b ₁	-2.6867	0.31343	0.31343
b ₂	0.019784	19.635	19.635
b ₃	-3.3962	-3.3962	0.37758

La función de transferencia para el sistema completo G_{PC} es el producto de $G_{1PC} \cdot G_{2PC}$

$$G_{PC}(s) = \frac{0.3225 s^5 - 2.165 s^4 + 3.137 s^3 - 8.239 s^2 - 0.132 s}{s^7 + 4.098 s^6 + 10.61 s^5 + 17.73 s^4 + 20.3 s^3 + 16.02 s^2 + 7.339 s + 1.364}$$

En la Tabla 4.23 se muestran los polos y los ceros de $G_{PC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.23: Polos y ceros de $G_{PC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.53808 + 1.4095i	1.5087	0.35666
-0.53808 - 1.4095i	1.5087	0.35666
-0.4169 + 1.2389i	1.3072	0.31893
-0.4169 - 1.2389i	1.3072	0.31893
0.85344 + 0.0015998i	0.85344	1
-0.85344 - 0.0015998i	0.85344	1
-0.48146	0.48146	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0	0	NaN
5.7975	5.7975	-1
0.46574 + 2.0534i	2.1056	-0.22119
0.46574 - 2.0534i	2.1056	-0.22119
-0.015919	0.015919	1

En la Figura 4.43 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_{PC}(s)$

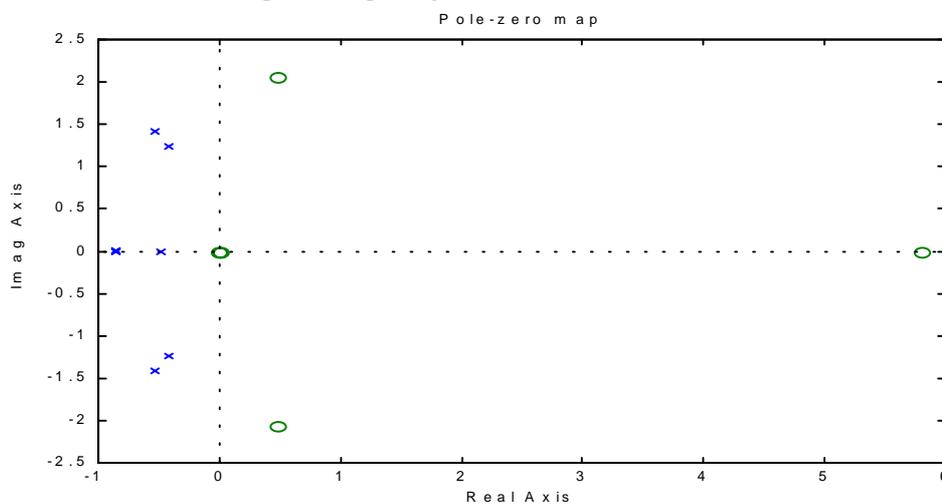


Figura 4.43: Diagrama de polos y ceros de $G_{PC}(s)$

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.44 se muestra el diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

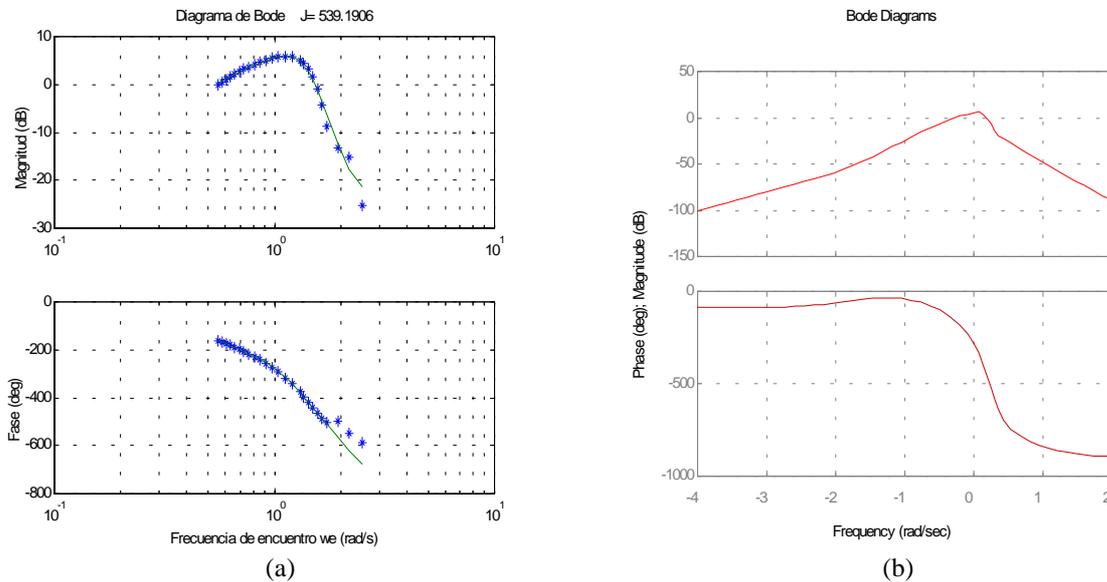


Figura 4.44: (a) Diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$.

En la Figura 4.45 se muestra la salida de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

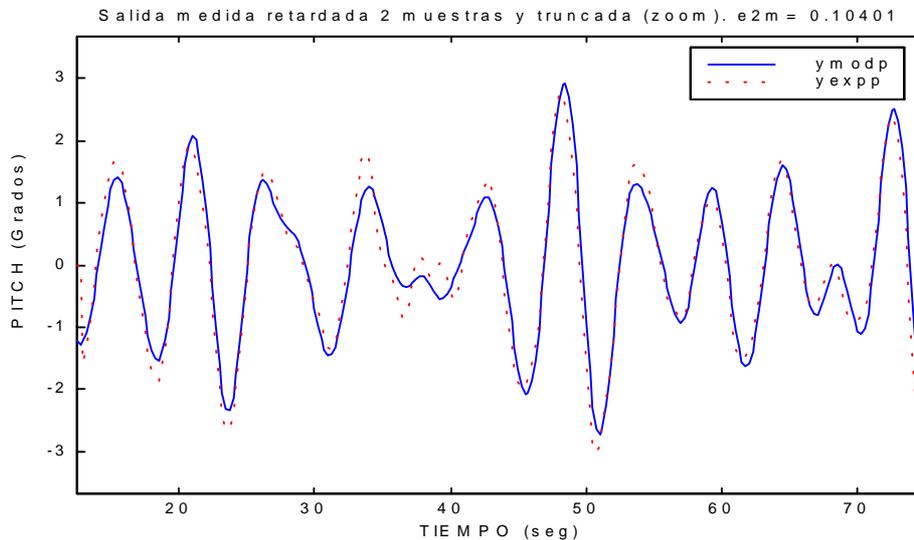


Figura 4.45: Salida (y_{modp}) de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida (y_{exp}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.46 se muestra la salida de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

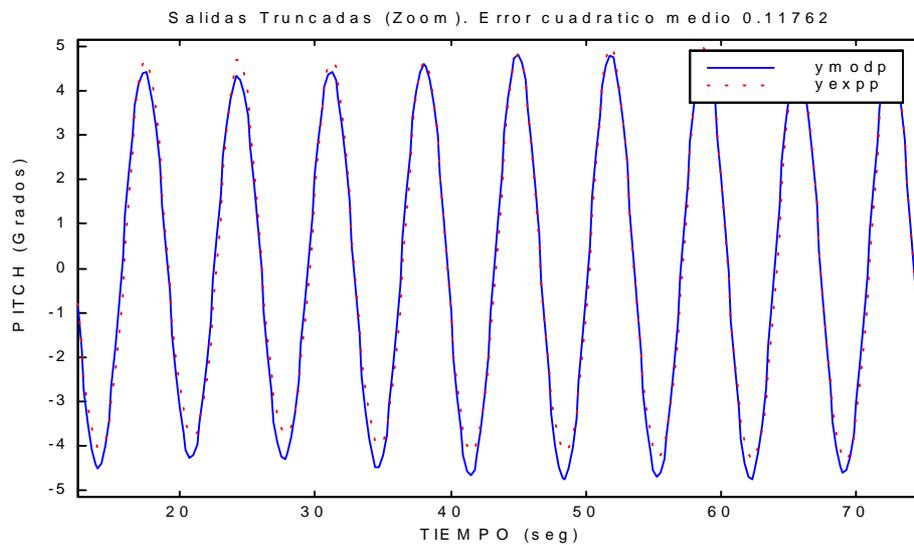


Figura 4.46: Salida (y_{modp}) de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida (y_{exp}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

En la Figura 4.47 se muestra la aceleración vertical de pitch que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de pitch obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje irregular (SSN=5).

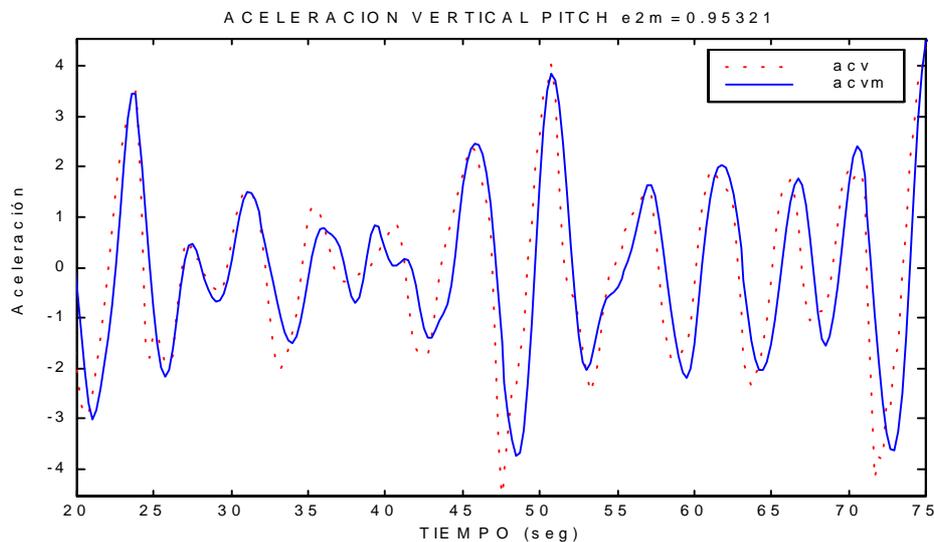


Figura 4.47: Aceleración vertical del pitch ($acvm$) obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch experimental (acv) utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.48 se muestra la aceleración vertical de pitch que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de pitch obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje regular (ensayo 25).

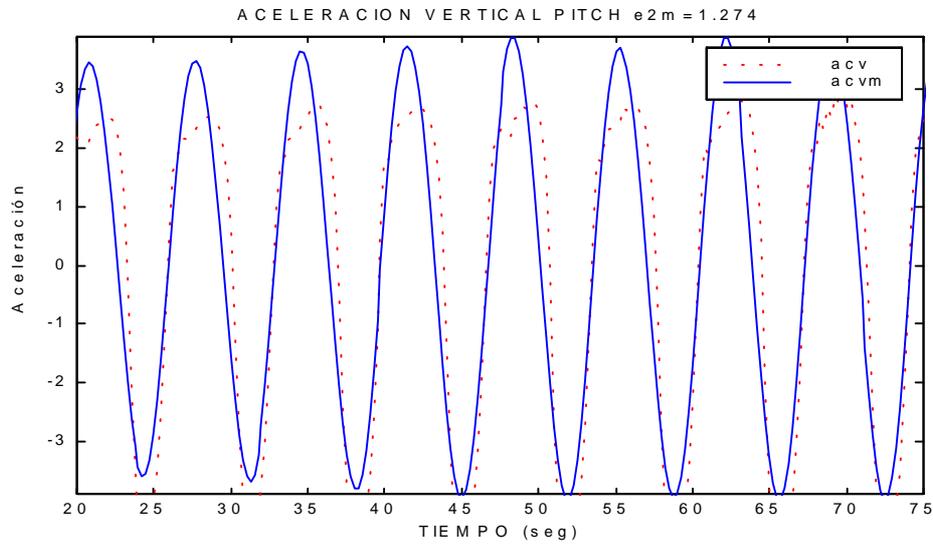


Figura 4.48: Aceleración vertical del pitch ($acvm$) obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch experimental (acv) utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

4.2.2 VELOCIDAD 30 NUDOS.

- Modelos (1,2,0) para G_{2PC} y (4,6,0) para G_{PC}

La función de transferencia obtenida para el segundo filtro obtenida mediante mínimos cuadrados no lineales es :

$$G_{2PC}(s) = \frac{2.493 s + 12.34}{s^2 + 0.6421 s + 2.263}$$

En la Tabla 4.24 se muestran los polos y los ceros de $G_{2PC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.24: Polos y ceros de $G_{2PC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.32104 + 1.46961i	1.5042	0.21343
-0.32104 - 1.46961i	1.5042	0.21343

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-4.951	4.951	1

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia $G_{2PC}(s)$ muestran en la Tabla 4.25:

Tabla 4.25: Intervalos de los coeficientes de $G_{2PC}(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
a_1	0.70901	2.2627	4.0928
a_2	-0.29137	0.64208	1.4842
b_2	-0.4158	12.343	12.343
b_3	-0.64496	2.4931	2.4931

La función de transferencia para el sistema completo G_{PC} es el producto de $G_{1PC} \cdot G_{2PC}$

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

$$G_{PC}(s) = \frac{-0.243 s^4 - 0.9714 s^3 - 0.6058 s^2 - 8.681 s}{s^6 + 3.523 s^5 + 9.363 s^4 + 15.3 s^3 + 17.41 s^2 + 13.56 s + 4.655}$$

En la Tabla 4.26 se muestran los polos y los ceros de $G_{PC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.26: Polos y ceros de $G_{PC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.53182 + 1.48671i	1.5789	0.33683
-0.53182 - 1.48671i	1.5789	0.33683
-0.32104 + 1.46961i	1.5042	0.21343
-0.32104 - 1.46961i	1.5042	0.21343
-0.90844 + 0.0023418i	0.90845	1
-0.90844 - 0.0023418i	0.90845	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0	0	NaN
-4.951	4.951	1
0.47691 + 2.6434i	2.6861	-0.17755
0.47691 - 2.6434i	2.6861	-0.17755

En la Figura 4.49 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_{PC}(s)$

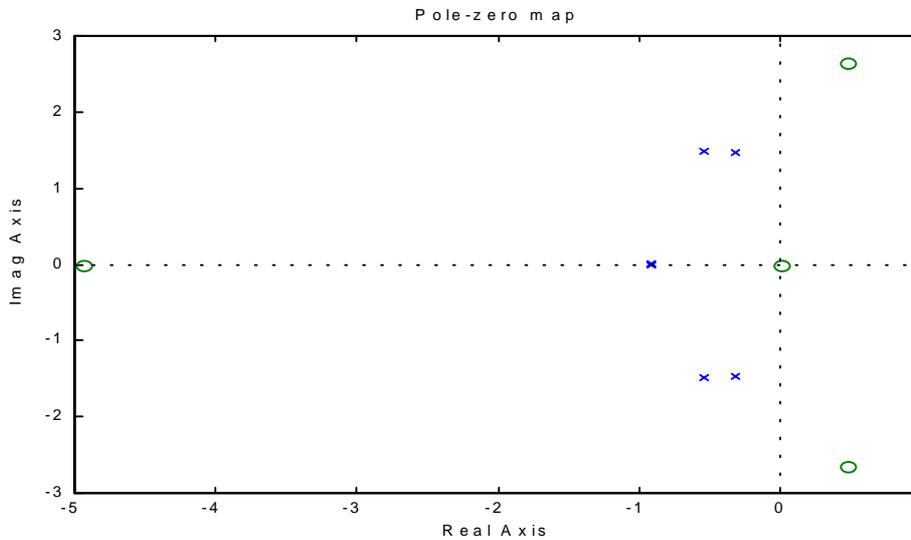


Figura 4.49: Diagrama de polos y ceros de $G_{PC}(s)$

En la Figura 4.50 se muestra el diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

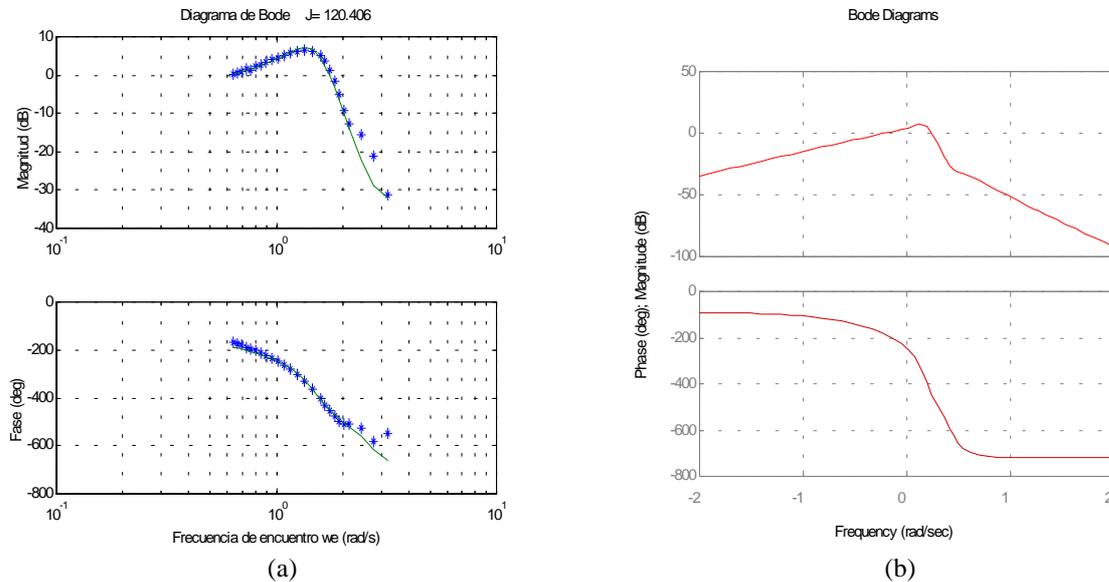


Figura 4.50: (a) Diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$.

En la Figura 4.51 se muestra la salida de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

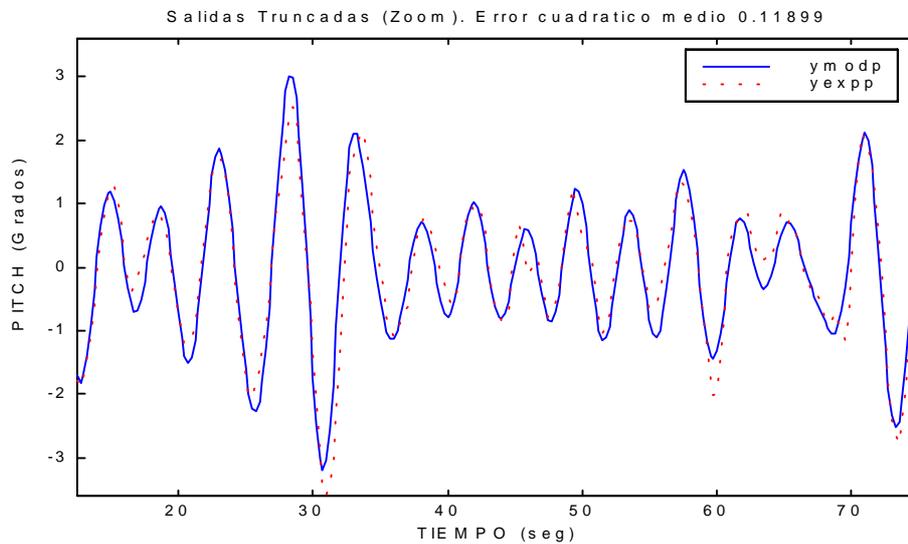


Figura 4.51: Salida (ymodp) de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida (yexpp) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.52 se muestra la salida de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

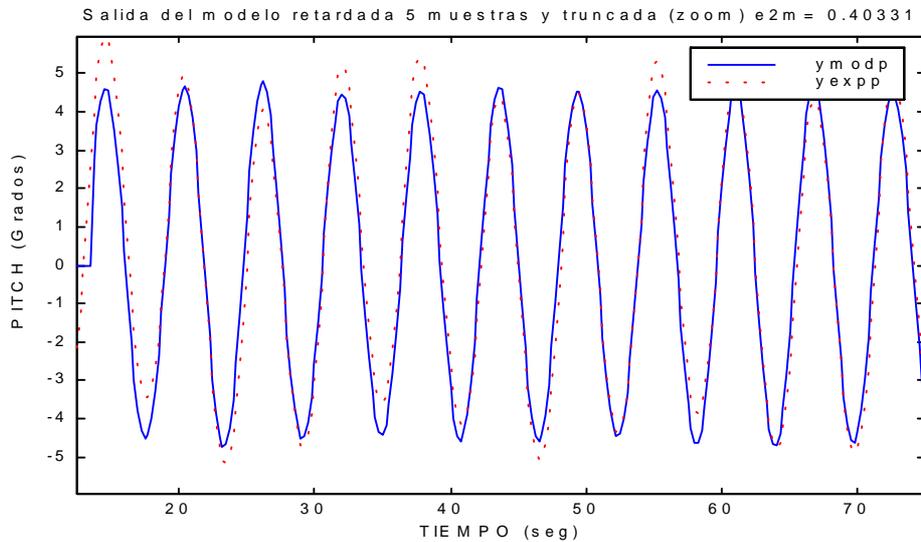


Figura 4.52: Salida (y_{modp}) de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida (y_{exp}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

En la Figura 4.53 se muestra la aceleración vertical de pitch que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de pitch obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje irregular (SSN=5).

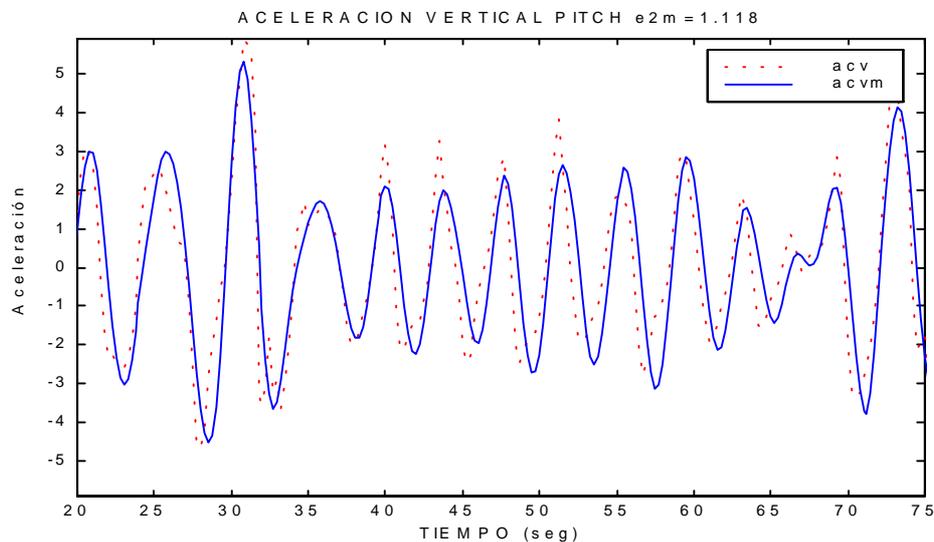


Figura 4.53: Aceleración vertical del pitch ($acvm$) obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch experimental (acv) utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.54 se muestra la aceleración vertical de pitch que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de pitch obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

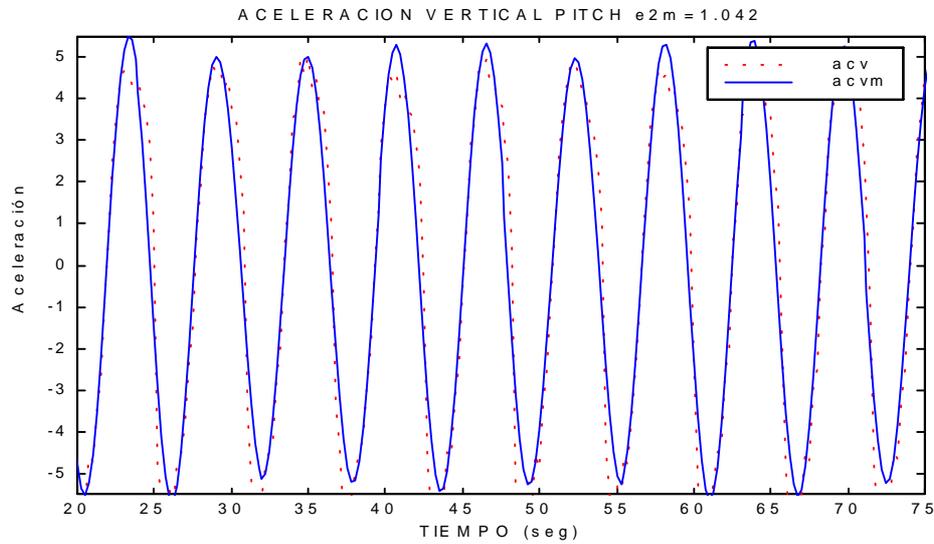


Figura 4.54: Aceleración vertical del pitch ($acvm$) obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch experimental (acv) utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

- Modelos (2,3,1) para G_{2PC} y (5,7,1) para G_{PC}

La función de transferencia obtenida para el segundo filtro obtenida mediante mínimos cuadrados no lineales es :

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

En la Tabla 4.27 se muestran los polos y los ceros de $G_{2PC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.27: Polos y ceros de $G_{2PC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.43277 + 1.5503i	1.6096	0.26887
-0.43277 - 1.5503i	1.6096	0.26887
-0.43167	0.43167	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
6.6771	6.6771	-1
-0.025816	0.025816	1

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia $G_{2PC}(s)$ muestran en la Tabla 4.28:

Tabla 4.28: Intervalos de los coeficientes de $G_{2PC}(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
a ₁	-0.26112	1.1184	4.2199
a ₂	0.029339	2.9644	5.9083
a ₃	-1.0299	1.2972	3.7971
b ₁	-3.3087	0.45747	0.45747
b ₂	0.17961	17.652	17.652
b ₃	-2.6539	-2.6539	1.394

La función de transferencia para el sistema completo G_{PC} es el producto de $G_{1PC} \cdot G_{2PC}$

$$G_{PC}(s) = \frac{0.2587 s^5 - 1.967 s^4 + 3.463 s^3 - 12.37 s^2 - 0.3217 s}{s^7 + 4.178 s^6 + 11.95 s^5 + 21.88 s^4 + 27.86 s^3 + 24.57 s^2 + 12.15 s + 2.301}$$

En la Tabla 4.29 se muestran los polos y los ceros de $G_{PC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.29: Polos y ceros de $G_{PC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.43277 + 1.5503i	1.6096	0.26887
-0.43277 - 1.5503i	1.6096	0.26887
-0.53182 + 1.4867i	1.5789	0.33683
-0.53182 - 1.4867i	1.5789	0.33683
-0.90844 + 0.0023418i	0.90845	1
-0.90844 - 0.0023418i	0.90845	1
-0.43167	0.43167	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0	0	NaN
6.6771	6.6771	-1
0.47691 + 2.6434i	2.6861	-0.17755
0.47691 - 2.6434i	2.6861	-0.17755
-0.025816	0.025816	1

En la Figura 4.55 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_{PC}(s)$

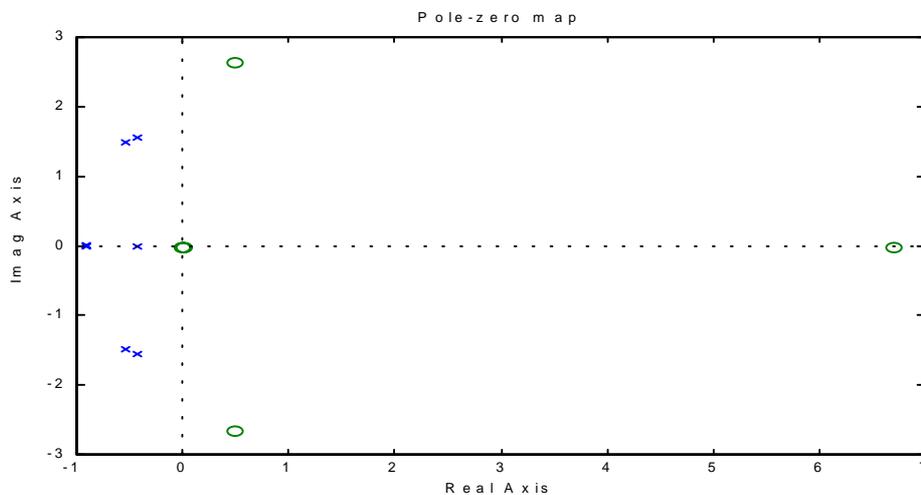


Figura 4.55: Diagrama de polos y ceros de $G_{PC}(s)$

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.56 se muestra el diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

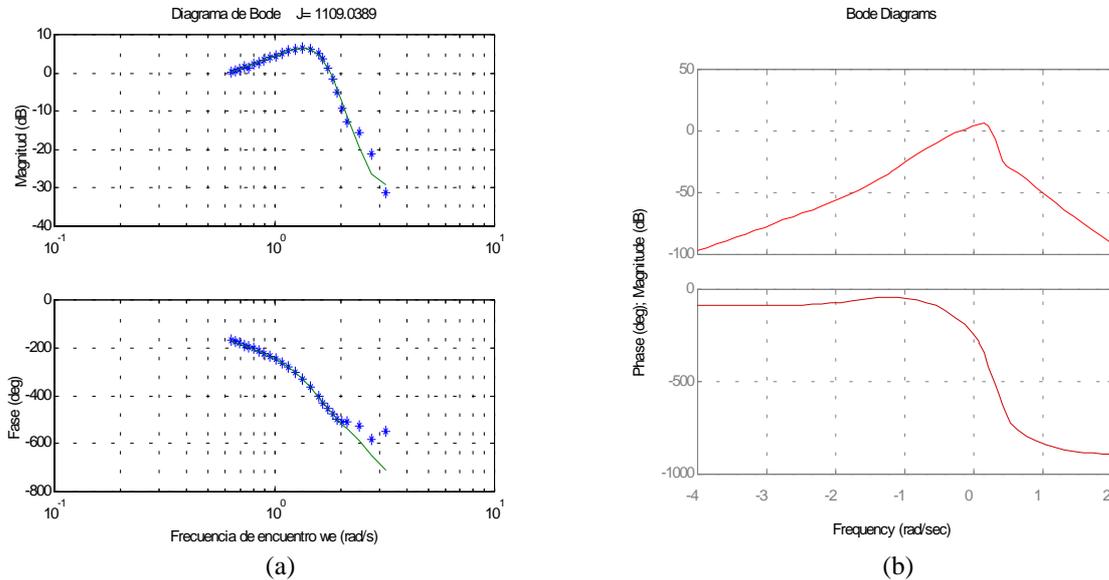


Figura 4.56: (a) Diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$.

En la Figura 4.57 se muestra la salida de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

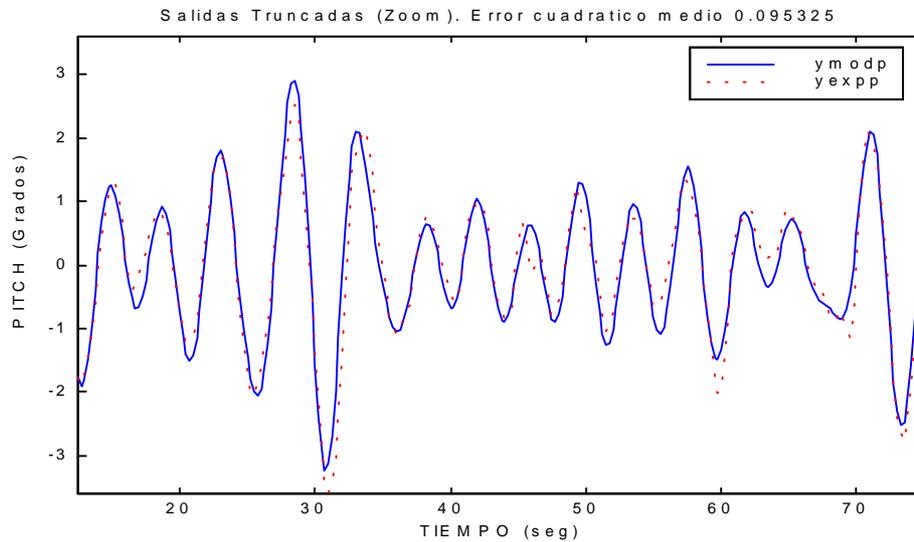


Figura 4.57: Salida (ymodp) de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida (yexp) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.58 se muestra la salida de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

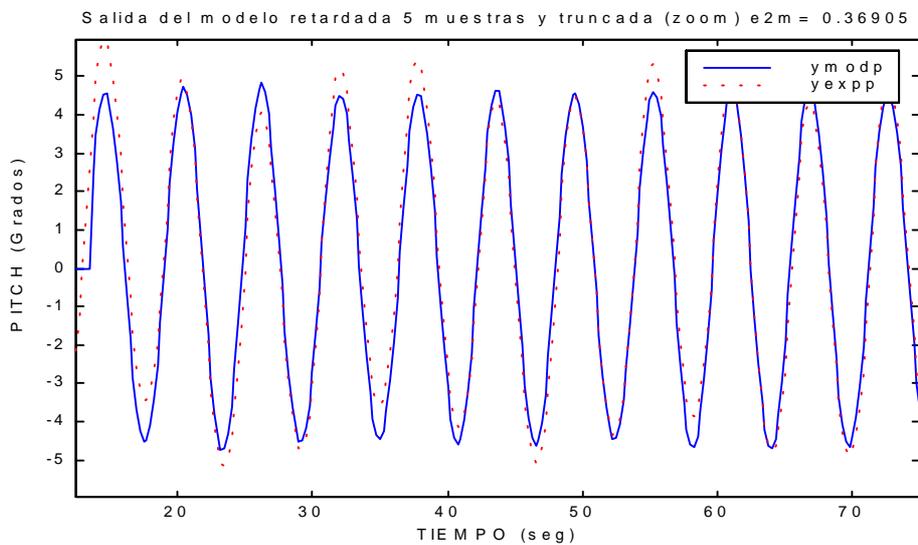


Figura 4.58: Salida (y_{modp}) de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida (y_{exp}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

En la Figura 4.59 se muestra la aceleración vertical de pitch que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de pitch obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje irregular (SSN=5).

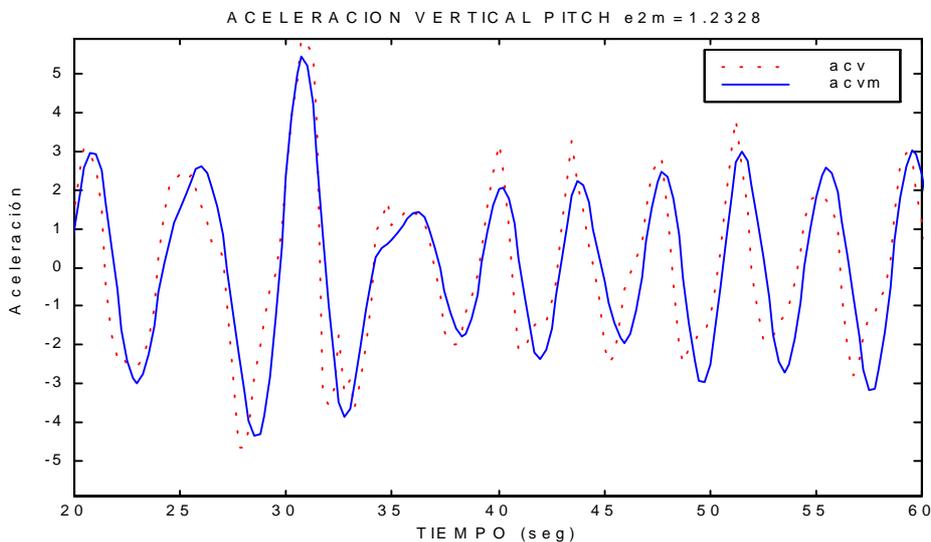


Figura 4.59: Aceleración vertical del pitch ($acvm$) obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch experimental (acv) utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.60 se muestra la aceleración vertical de pitch que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de pitch obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

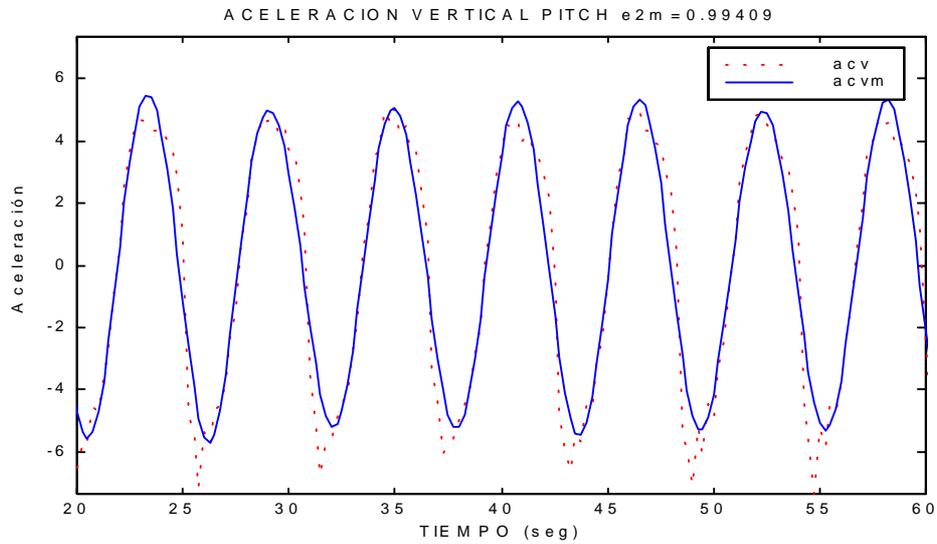


Figura 4.60: Aceleración vertical del pitch ($acvm$) obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch experimental (acv) utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

4.2.3 VELOCIDAD 40 NUDOS.

- Modelos (1,2,0) para G_{2PC} y (4,6,0) para G_{PC}

La función de transferencia obtenida para el segundo filtro obtenida mediante mínimos cuadrados no lineales es :

$$G_{2PC}(s) = \frac{1.868 s + 12.61}{s^2 + 0.5738 s + 2.606}$$

En la Tabla 4.30 se muestran los polos y los ceros de $G_{2PC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.30: Polos y ceros de $G_{2PC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.28691 + 1.5885i	1.6142	0.17774
-0.28691 - 1.5885i	1.6142	0.17774

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-6.7512	6.7512	1

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia $G_{2PC}(s)$ muestran en la Tabla 4.31:

Tabla 4.31: Intervalos de los coeficientes de $G_{2PC}(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
a_1	0.94413	2.6056	4.728
a_2	-0.54521	0.57382	1.5049
b_2	-1.7776	12.612	12.612
b_3	-0.54784	1.8681	2.0668

La función de transferencia para el sistema completo G_{PC} es el producto de $G_{1PC} \cdot G_{2PC}$

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

$$G_{PC}(s) = \frac{-0.1425 s^4 - 0.9057 s^3 - 1.345 s^2 - 11.66 s}{s^6 + 3.603 s^5 + 10.54 s^4 + 18.3 s^3 + 22.78 s^2 + 19.41 s + 7.05}$$

En la Tabla 4.32 se muestran los polos y los ceros de $G_{PC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.32: Polos y ceros de $G_{PC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.58866 + 1.6764i	1.7767	0.33132
-0.58866 - 1.6764i	1.7767	0.33132
-0.28691 + 1.5885i	1.6142	0.17774
-0.28691 - 1.5885i	1.6142	0.17774
-0.92579 + 0.0030532i	0.9258	0.99999
-0.92579 - 0.0030532i	0.9258	0.99999

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0	0	NaN
-6.7512	6.7512	1
0.19867 + 3.4759i	3.4816	-0.057065
0.19867 - 3.4759i	3.4816	-0.057065

En la Figura 4.61 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_{PC}(s)$

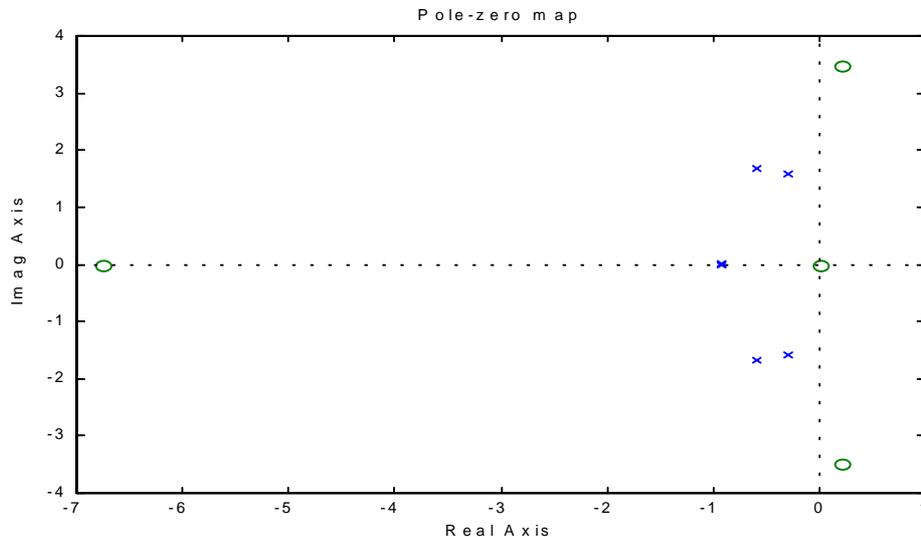


Figura 4.61: Diagrama de polos y ceros de $G_{PC}(s)$

En la Figura 4.62 se muestra el diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

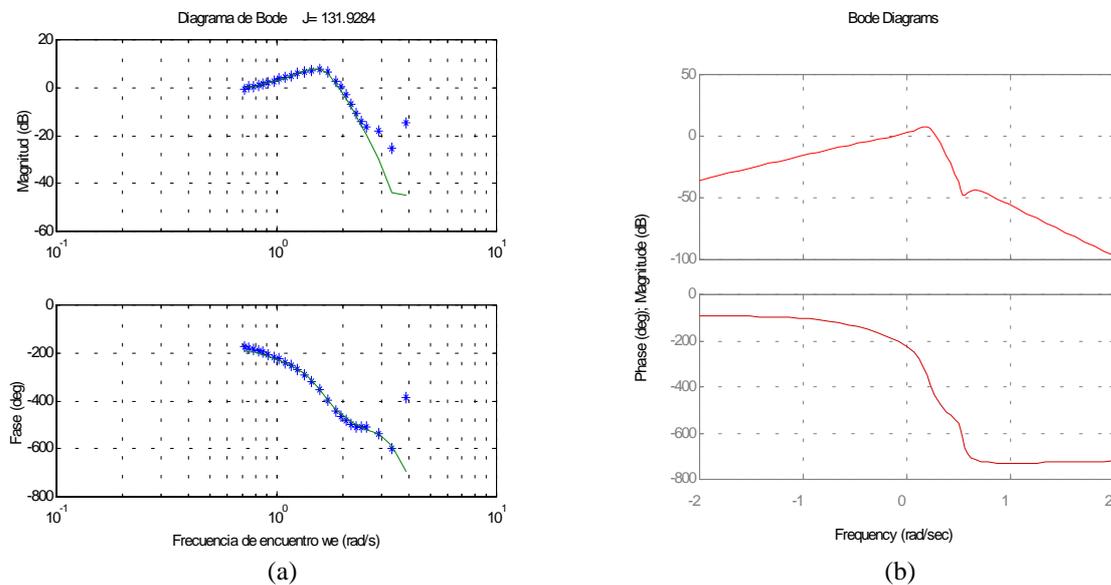


Figura 4.62: (a) Diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$.

En la Figura 4.63 se muestra la salida de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

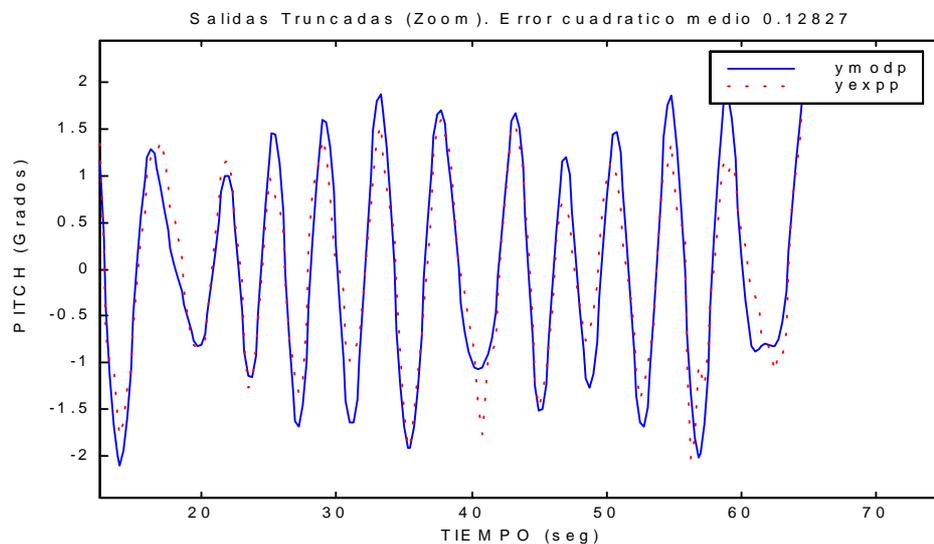


Figura 4.63: Salida (ymodp) de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida (yexp) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.64 se muestra la salida de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

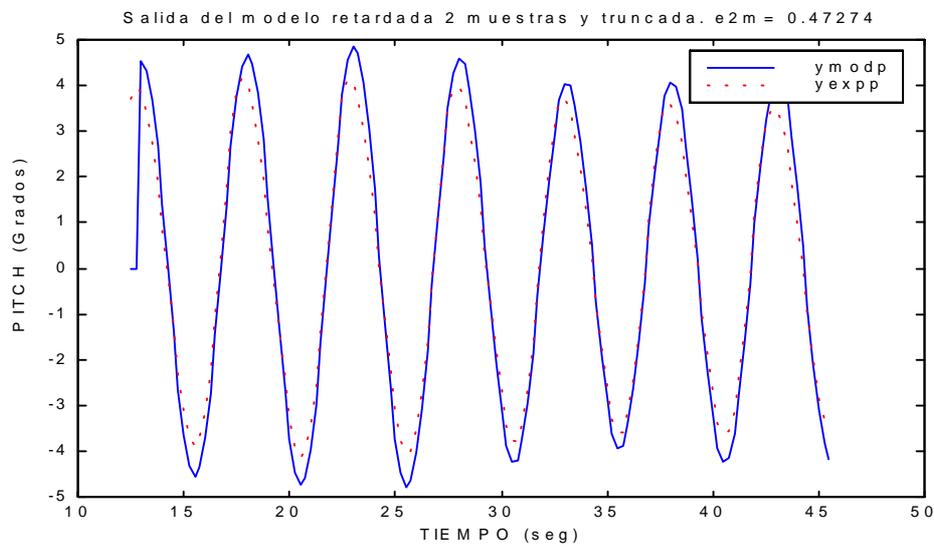


Figura 4.64: Salida (y_{modp}) de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida (y_{exp}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

En la Figura 4.65 se muestra la aceleración vertical de pitch que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de pitch obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje irregular (SSN=5).

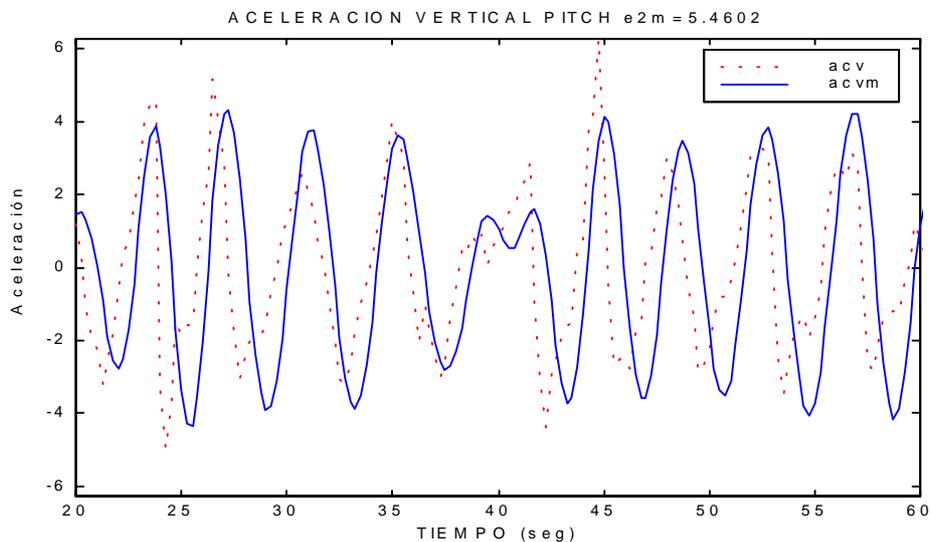


Figura 4.65: Aceleración vertical del pitch ($acvm$) obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch experimental (acv) utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.66 se muestra la aceleración vertical de pitch que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de pitch obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

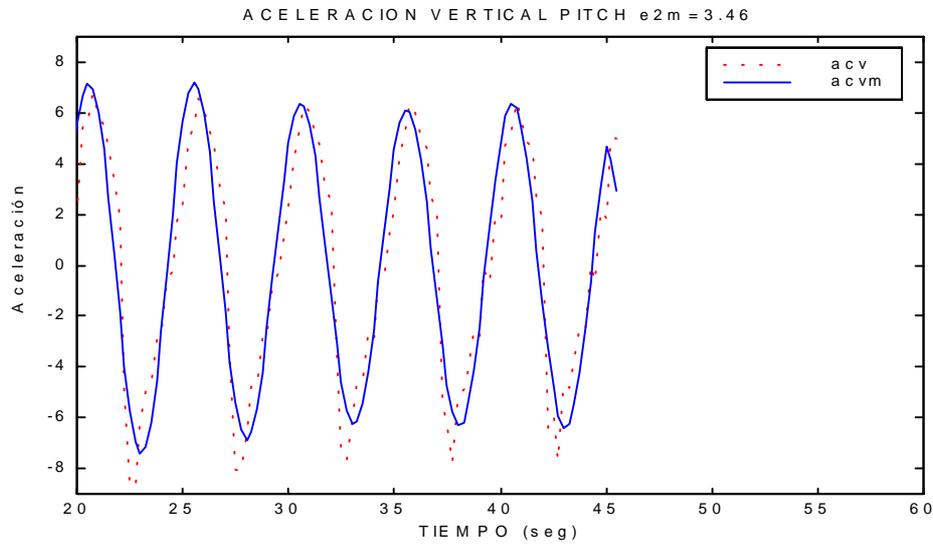


Figura 4.66: Aceleración vertical del pitch (acvm) obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch experimental (acv) utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

• Modelos (2,3,1) para G_{2PC} y (5,7,1) para G_{PC}

La función de transferencia obtenida para el segundo filtro obtenida mediante mínimos cuadrados no lineales es :

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

En la Tabla 4.33 se muestran los polos y los ceros de $G_{2PC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.33: Polos y ceros de $G_{2PC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.36409 + 1.6361i	1.6761	0.21722
-0.36409 - 1.6361i	1.6761	0.21722
-0.47485	0.47485	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
7.8549	7.8549	-1
-0.041785	0.041785	1

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia $G_{2PC}(s)$ muestran en la Tabla 4.34:

Tabla 4.34: Intervalos de los coeficientes de $G_{2PC}(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
a ₁	-0.59032	1.334	5.417
a ₂	0.4988	3.1552	5.8741
a ₃	-1.4797	1.203	4.423
b ₁	-5.7566	0.6906	0.96542
b ₂	-1.2117	16.44	16.44
b ₃	-2.3169	-2.1041	1.6102

La función de transferencia para el sistema completo G_{PC} es el producto de $G_{1PC} \cdot G_{2PC}$

$$G_{PC}(s) = \frac{0.1605 s^5 - 1.318 s^4 + 2.392 s^3 - 15.18 s^2 - 0.6387 s}{s^7 + 4.232 s^6 + 12.99 s^5 + 25.2 s^4 + 34.53 s^3 + 33.14 s^2 + 17.68 s + 3.609}$$

En la Tabla 4.35 se muestran los polos y los ceros de $G_{PC}(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 4.35: Polos y ceros de $G_{PC}(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.58866 + 1.6764i	1.7767	0.33132
-0.58866 - 1.6764i	1.7767	0.33132
-0.36409 + 1.6361i	1.6761	0.21722
-0.36409 - 1.6361i	1.6761	0.21722
-0.92579 + 0.0030532i	0.9258	0.99999
-0.92579 - 0.0030532i	0.9258	0.99999
-0.47485	0.47485	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0	0	NaN
7.8549	7.8549	-1
0.19867 + 3.4759i	3.4816	-0.057065
0.19867 - 3.4759i	3.4816	-0.057065
-0.041785	0.041785	1

En la Figura 4.67 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_{PC}(s)$

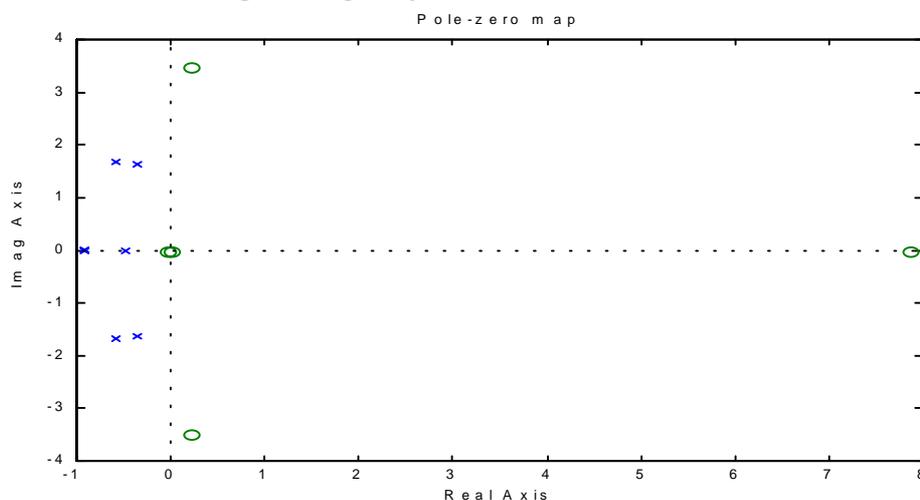


Figura 4.67: Diagrama de polos y ceros de $G_{PC}(s)$

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.68 se muestra el diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

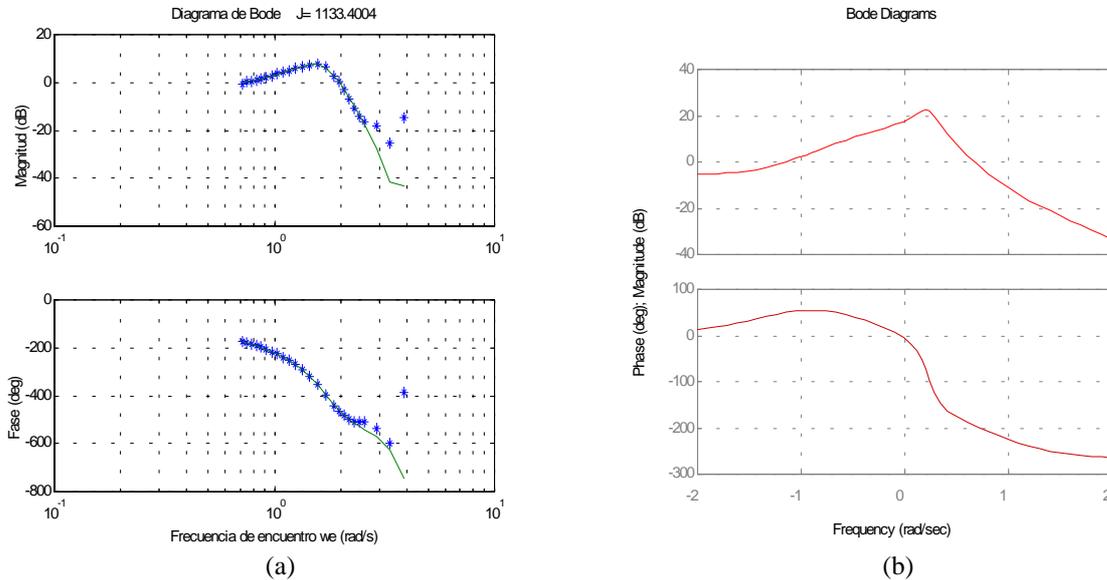


Figura 4.68: (a) Diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_{PC}(s)$.

En la Figura 4.69 se muestra la salida de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

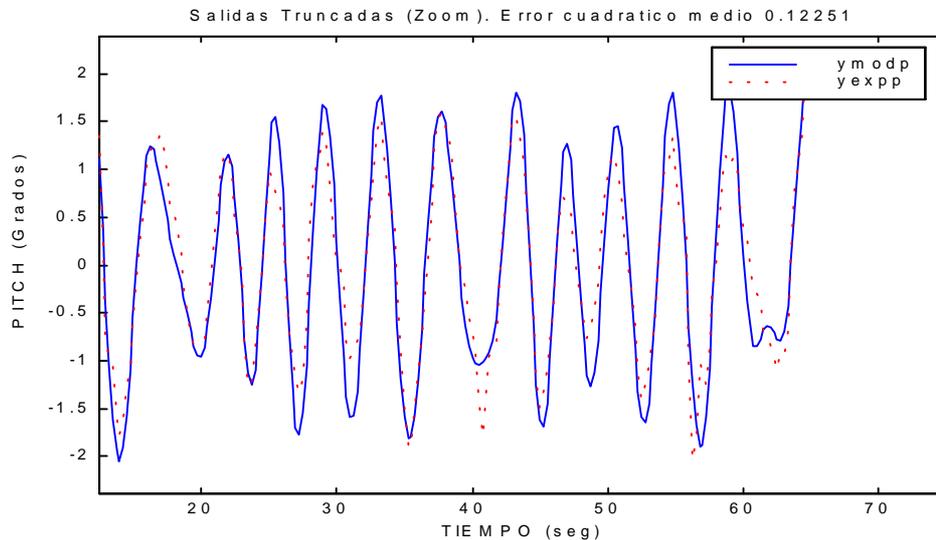


Figura 4.69: Salida (y_{modp}) de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida (y_{exp}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.70 se muestra la salida de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

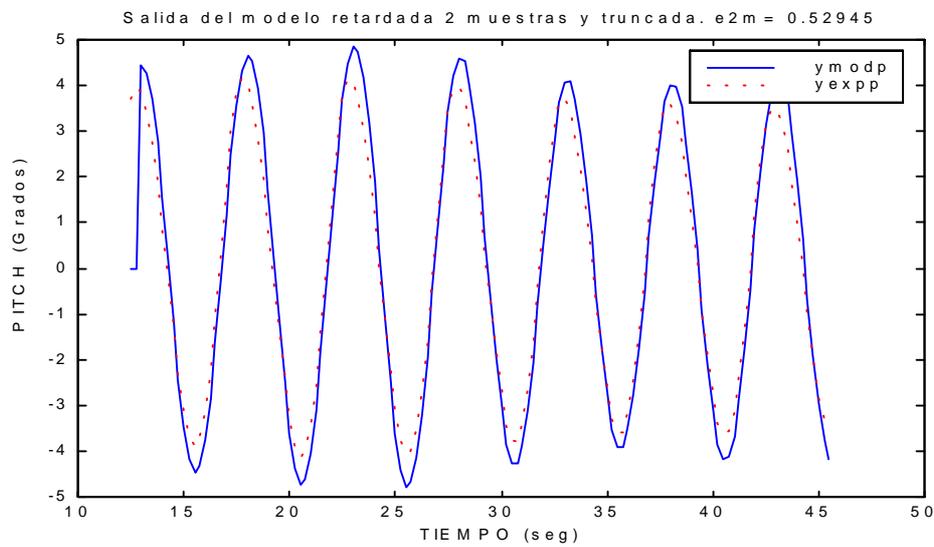


Figura 4.70: Salida (y_{modp}) de $G_{PC}(s)$ comparada con la salida (y_{exp}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

En la Figura 4.71 se muestra la aceleración vertical de pitch que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de pitch obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje irregular (SSN=5).

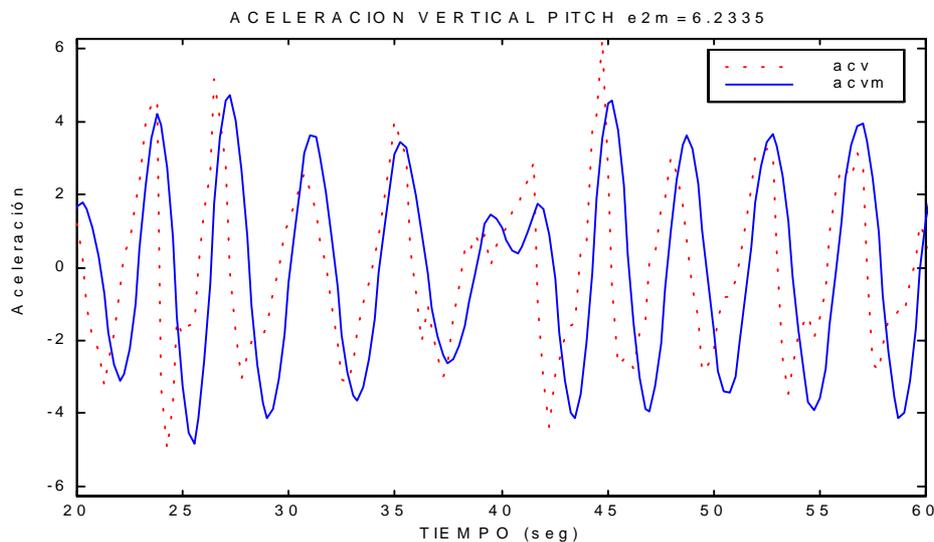


Figura 4.71: Aceleración vertical del pitch ($acvm$) obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch experimental (acv) utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 4.72 se muestra la aceleración vertical de pitch que se obtiene tras derivar dos veces la serie temporal de movimiento de pitch obtenida con $G_{PC}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch calculada a partir de las aceleraciones medidas en las distintas cuadernas del buque, tomando como entrada de excitación oleaje regular (ensayo 25).

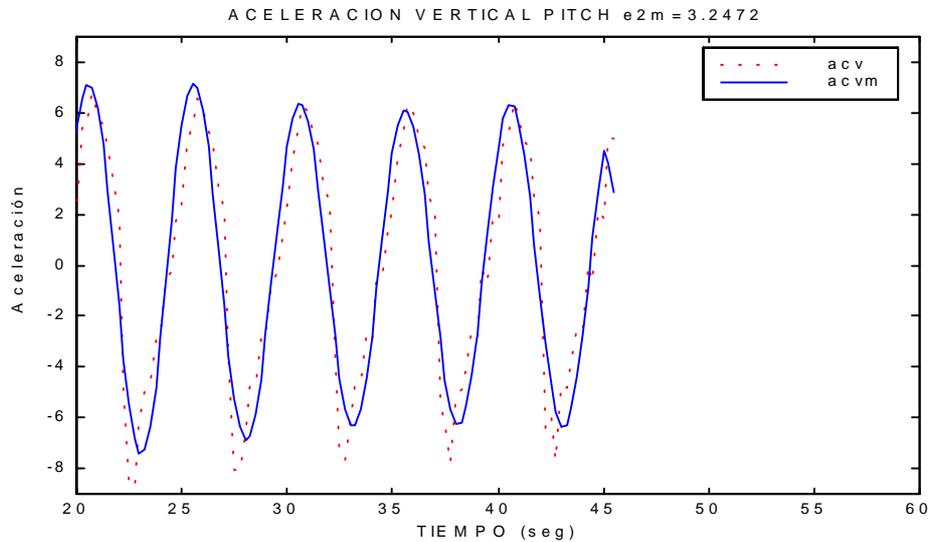


Figura 4.72: Aceleración vertical del pitch ($acvm$) obtenida con $G_{pc}(s)$ comparada con la aceleración vertical de pitch experimental (acv) utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

5. CONCLUSIONES

En este informe se han presentado los modelos lineales continuos siso que se han identificado utilizando los datos en el dominio de la frecuencia obtenidos con el programa PRECAL, para la dinámica vertical del buque de alta velocidad TF-120 a las velocidades de 20, 30 y 40 nudos. Se ha descompuesto el sistema en dos filtros. El primer filtro G_{1H} y G_{1P} , tienen como entrada la altura de ola y como salida la fuerza heave y el movimiento de pitch respectivamente. El segundo filtro G_{2H} y G_{2P} tienen como entrada la fuerza heave y el momento pitch respectivamente, y como salida el movimiento de heave y de pitch.

En el proceso de identificación de los filtros de la dinámica de heave se ha utilizado un método mixto de optimización con algoritmos genéticos y mínimos cuadrados no lineales con restricciones. Mientras que en la identificación de los filtros de la dinámica de pitch se ha utilizado un método puro de optimización de mínimos cuadrados no lineales con restricciones utilizado.

La diferencia entre el método puro y el método mixto radica en la selección de los valores iniciales de los parámetros a identificar en la estructura de función de transferencia elegida como modelo. En el método mixto, al utilizar previamente al algoritmo de mínimos cuadrados un algoritmo genético se consigue, tras un determinado tiempo de cálculo, unos valores iniciales excelentes cercanos al óptimo global, con lo que en muy pocas iteraciones el algoritmo de mínimos cuadrados consigue llegar al óptimo global. En el método puro, los valores iniciales se eligen aleatoriamente sin necesidad de un tiempo de cálculo previo, con lo cual el algoritmo de mínimos cuadrados requiere de un mayor número de iteraciones para converger al óptimo global, incluso puede darse el caso de que converja a un óptimo local.

La experiencia indica que en modelos de pocos parámetros es recomendable utilizar el método puro, pues aunque utilice unos valores iniciales aleatorios tarda poco en converger al óptimo global, con lo que no compensa gastar un tiempo de cálculo previo en obtener valores iniciales mediante algoritmos genéticos. Mientras que en modelos de muchos parámetros, es altamente recomendable utilizar el método mixto, para que el algoritmo genético genere unos valores iniciales adecuados.

Los modelos que se han identificado se pueden considerar como buenos al presentar un error cuadrático medio aceptable en las validaciones que se han efectuado sobre ellos. En la Tabla 5.1 se muestran los errores cuadráticos medios de las distintas simulaciones realizadas sobre el filtro total G_{HC} y sobre el filtro total G_{HG} , ambos tienen una estructura (5,6,0), es decir, cinco ceros y seis polos, todos ellos complejos conjugados.

Tabla 5.1: Errores cuadráticos medios de los modelos (5,6,0) para G_{HG} y G_{HC} en las distintas simulaciones.

Velocidad	Modelo	Error cuadrático medio e2m			
		SHI	SHR	ACVHI	ACVHR
20	G_{HG}	0.0144	0.1091	0.0518	0.1826
20	G_{HC}	0.0142	0.1042	0.0501	0.1778
30	G_{HG}	0.0104	0.0936	0.0797	0.1968
30	G_{HC}	0.0104	0.0996	0.0792	0.2078
40	G_{HG}	0.0108	0.0203	0.1612	0.5568
40	G_{HC}	0.0110	0.0211	0.1602	0.5566

SHI- Simulación del movimiento de Heave utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

SHR- Simulación del movimiento de Heave utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

ACVHI- Simulación de la aceleración vertical de Heave utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

ACVHR- Simulación de la aceleración vertical de Heave utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

En la Tabla 5.2 se muestran los errores cuadráticos medios de las distintas simulaciones realizadas sobre el filtro total G_{PC} , para dos estructuras la (4,6,0) y la (5,7,1)

Tabla 5.2: Errores cuadráticos medios de los modelos (4,6,0) y (5,7,1) para G_{PC} en las distintas simulaciones.

Velocidad	Modelo G_{PC}	Error cuadrático medio e2m			
		SPI	SPR	ACVPI	ACVPR
20	(4,6,0)	0.1040	0.2124	0.8159	1.4915
20	(5,7,1)	0.1041	0.1176	0.9532	1.2740
30	(4,6,0)	0.1190	0.4033	1.880	1.042
30	(5,7,1)	0.0953	0.3690	1.2328	0.9941
40	(4,6,0)	0.1282	0.4727	5.46	3.46
40	(5,7,1)	0.1225	0.5294	6.2335	3.24

SPI- Simulación del movimiento de Pitch utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

SPR- Simulación del movimiento de Pitch utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

ACVPI- Simulación de la aceleración vertical de Pitch utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

ACVPR- Simulación de la aceleración vertical de Pitch utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

De las Tablas 5.1 y 5.2 que presentan los errores cuadráticos de los modelos frente a distintas simulaciones, y de las Tablas 4.1 y 4.17 que presentan los valores de la función de coste J, se pueden sacar las siguientes conclusiones :

- 1.- El modelo G_{HC} presenta una mejor función de coste que el modelo G_{HG} , como no podía ser de otra forma, ya que el algoritmo de mínimos cuadrados toma el modelo obtenido con genéticos como valor inicial y por tanto tiene que mejorar la función de coste J.
- 2.- La estructura (5,7,1) para G_{PC} , presenta una función de coste J mucho mayor que la estructura (4,6,0). Ya que se ajusta mejor a todos los puntos de magnitud y fase, en el rango de frecuencias en el que trabaja PRECAL.
- 3.- Los errores cuadráticos medios en las simulaciones realizadas con G_{HC} y con G_{HG} son muy parecidos, esto da idea de lo bueno que son los modelos obtenidos con algoritmos genéticos.
- 4.- Los errores cuadráticos medios en las simulaciones realizadas con las estructuras (4,6,0) y (5,7,1), para G_{PC} son muy parecidos.

La razón de este buen comportamiento en las simulaciones hay que buscarla en el espectro del oleaje irregular que excita al sistema. En la Figura 5.1 se muestra el modulo de la función de transferencia para el pitch y para el heave trazados con los puntos obtenidos con PRECAL junto con los espectros del oleaje irregular para SSN=4, 5 y 6 a la velocidad de 40 nudos.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

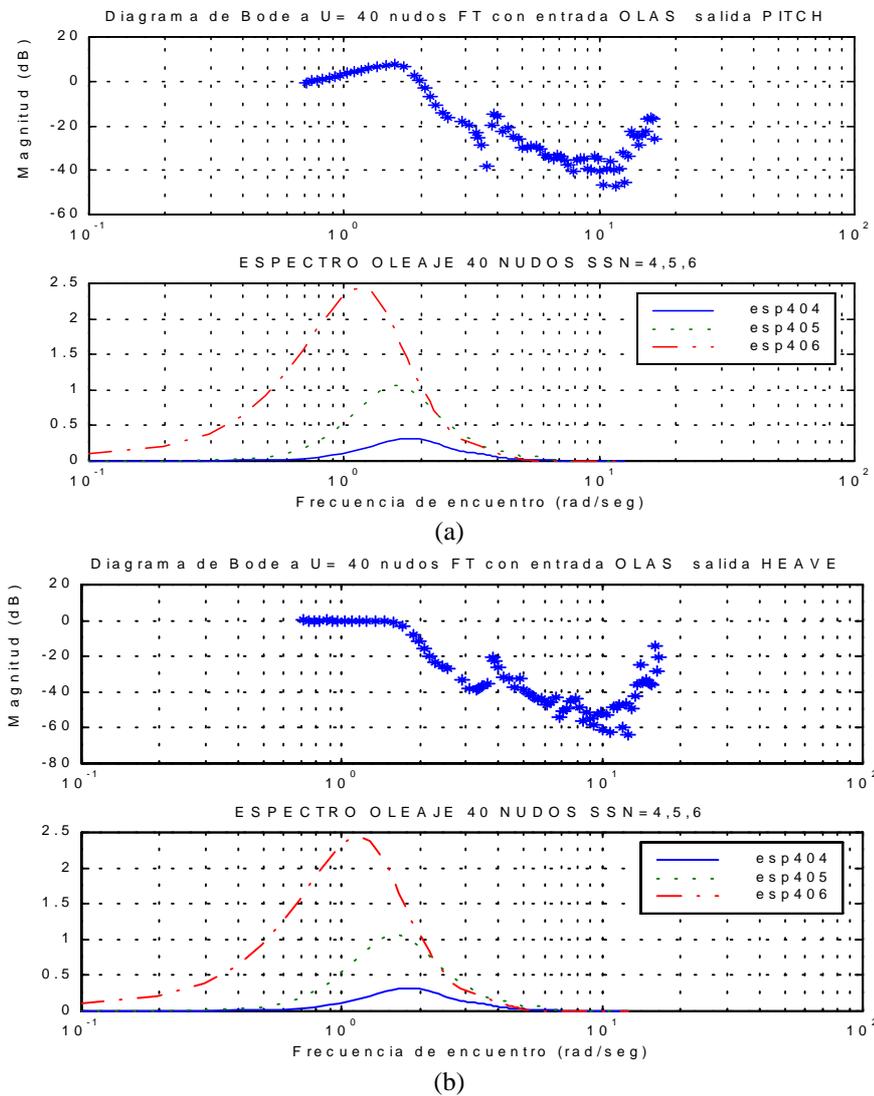


Figura 5.1 : Modulo de la función de transferencia para (a) pitch y (b) heave trazados con los puntos PRECAL junto con los espectros del oleaje irregular para SSN=4, 5 y 6 . Velocidad 40 nudos

En la Tabla 5.3 se muestra el porcentaje de área encerrada por el espectro de oleaje irregular en distintas bandas de frecuencia y en distintos SSN.

Tabla 5.3: Porcentaje de Area encerrada por el espectro de oleaje irregular en distintas bandas de frecuencia de encuentro y en distintos SSN. Velocidad 40 nudos

Rango en ω_e (rad/seg) hasta :	Area(%)		
	SSN=4	SSN=5	SSN=6
3	74.05	79.28	92.81
4	87.69	89.83	97.72
5	93.68	94.95	99.39
6	96.87	98.01	99.66
12.5	100	100	100

A la vista de la Figura 5.1 y de la Tabla 5.3 se puede concluir que el área encerrada en el rango de frecuencias de encuentro $[0,3]$ rad/seg, en el peor de los casos SSN=4 es del 74 %, es decir, casi toda la energía de la señal de

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

oleaje irregular se encuentra en esa banda. Por lo tanto todo aquel modelo que presente un buen ajuste en esta banda de frecuencia de encuentro tendrá unos buenos errores cuadráticos medios en las simulaciones. De aquí que modelos con una función de coste pequeña al no ajustarse correctamente a puntos en alta frecuencia, presenten unos errores cuadráticos medios semejantes a modelos con una mejor función de coste.

En la Tabla 5.4 se muestran la evolución de algunos de los polos y los ceros de G_{IHC} con estructura (3,4,0) a distintas velocidades

Tabla 5.4: Evolución de algunos de los polos y los ceros de G_{IHC} con estructura (3,4,0) a distintas velocidades

Velocidad (nudos)	Polos Semejantes		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
20	-0.2892 ±	0.97281i	1.0149	0.28496
	-0.15166 ±	0.21873i	0.26616	0.56981
30	-0.37552 ±	1.1179i	1.1793	0.31844
	-0.1978 ±	0.2211i	0.29666	0.66675
40	-0.45188 ±	1.2489i	1.3281	0.34025
	-0.21834 ±	0.24383i	0.3273	0.66709

Velocidad (nudos)	Ceros Semejantes		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
20	0.19175		0.19175	-1
30	0.19042		0.19042	-1
40	0.20366		0.20366	-1

En la Tabla 5.5 se muestra la evolución de algunos de los polos y los ceros de G_{IPC} con estructura (3,4,0) a distintas velocidades

Tabla 5.5: Evolución de algunos de los polos y los ceros de G_{IPC} con estructura (3,4,0) a distintas velocidades

Velocidad (nudos)	Polos Semejantes		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
20	-0.4169 ±	1.2389i	1.3072	0.31893
	-0.85344 ±	0.0015998i	0.85344	1
30	-0.53182 ±	1.4867i	1.5789	0.33683
	-0.90844 ±	0.0023418i	0.90845	1
40	-0.58866 ±	1.6764i	1.7767	0.33132
	-0.92579 ±	0.0030532i	0.9258	0.99999

Velocidad (nudos)	Ceros Semejantes		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
20	0.46574 ±	2.0534i	2.1056	-0.22119
30	0.47691 ±	2.6434i	2.6861	-0.17755
40	0.19867 ±	3.4759i	3.4816	-0.057065

En la Tabla 5.6 se muestran la evolución de algunos de los polos y los ceros de G_{2HC} con estructura (2,2,0) a distintas velocidades

Tabla 5.6: Evolución de algunos de los polos y los ceros de G_{2HC} con estructura (2,2,0) a distintas velocidades

Velocidad (nudos)	Polos Semejantes	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
20	$-0.2565 \pm 1.7444i$	1.7631	0.1455
30	$-0.2281 \pm 1.6702i$	1.6857	0.1353
40	$-0.2346 \pm 1.7315i$	1.7473	0.1343

Velocidad (nudos)	Ceros Semejantes	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
20	$0.8910 \pm 2.5048i$	2.6585	-0.3351
30	$0.7261 \pm 2.7901i$	2.8831	-0.2519
40	$0.9557 \pm 3.2457i$	3.3835	-0.2825

En la Tabla 5.7 se muestran la evolución de algunos de los polos y los ceros de G_{2PC} con estructura (2,3,1) a distintas velocidades

Tabla 5.7: Evolución de algunos de los polos y los ceros de G_{2PC} con estructura (2,3,1) a distintas velocidades.

Velocidad (nudos)	Polos Semejantes	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
20	$-0.53808 \pm 1.4095i$ -0.48146	1.5087 0.48146	0.35666 1
30	$-0.43277 \pm 1.5503i$ -0.43167	1.6096 0.43167	0.26887 1
40	$-0.36409 \pm 1.6361i$ -0.47485	1.6761 0.47485	0.21722 1

Velocidad (nudos)	Ceros Semejantes	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
20	5.7975 -0.015919	5.7975 0.015919	-1 1
30	6.6771 -0.025816	6.6771 0.025816	-1 1
40	7.8549 -0.041785	7.8549 0.041785	-1 1

APENDICE A : FUNCIONES MATLAB UTILIZADAS PARA LA IDENTIFICACION DE MODELOS PARA EL PRIMER FILTRO.

La función que estima los parámetros de G_{1CH} o G_{1CP} , es *ident_G1.m*. La función de coste a optimizar se encuentra en *res2.m*, que requiere de *gen_IR.m*, *igual_coef.m*, *gen_numerador.m* y *build.m* para ser configurada. La función que realiza la estima de mínimos cuadrados con restricciones es *constr.m*¹.

La función *OB_FT.m* convierte el vector de parámetros estimado a formato de función de transferencia y dibuja el diagrama de Bode comparado con los puntos experimentales.

La función *cal_wn_fa_zpc.m* permite obtener los polos y los ceros de la función de transferencia con su frecuencia natural y factor de amortiguamiento.

En los siguientes subapartados se presenta el código de estas funciones.

A.1 IDENT_G1.M

```

%ident_G1 (J.M. Díaz 9-99)
%Esta función realiza un ajuste por mínimos cuadrados no lineales a puntos de amplitud y fase
%se va utilizar para la obtención del primer filtro olas-fuerzas y momentos.
%La función de transferencia a identificar será de la forma
%
%      m
%      x s +.....+x
%      m+1+n                               n+1
%
%-----
%      2      2 2      2      2      2
%      ( s +2 x s + x +x )... ( s +2 x s + x + x ) ( s + x )... (s+ x )
%      1      1 2      npc-1 npc-1 npc      npc+1      npc+nps
%
%      donde      n=npc+nps
%
% Sintaxis [x,J,FT]=ident_G1(m,n,nps,id,x0,datos)
%
% PARAMETROS DE SALIDA
% x      vector de parámetros estimados
% J      función de coste
% FT     funcion de transferencia
%
% PARAMETROS DE ENTRADA
% m      orden del numerador
% n      orden del denominador
% nps    numero de polos simples
% id     indicador sobre las restricciones
%      si id='n' no se apliza ninguna restricción
%      si id='h' se plica la restricción b0=a0.
%      si id='p' se aplica la restricción b0=0.
% x0     condiciones iniciales.
% datos  nombre del fichero de datos
%
% Ejemplo: [x,J,FT]=restr(2,3,1,'p',x0,'crrpgo2mp20')

function [x,J,FT]=ident_G1(m,n,nps,id,x0,datos)
close all
% Fichero donde se encuentran la frecuencia (rad/seg),la fase medida(grados) y el modulo
medido
ins=['load ' datos];
eval(ins);

if datos(1,9)=='h'
    MODU=MODU/10000
else
    MODU=MODU/1000000
end
  
```

¹ Esta función pertenece al toolbox OPTIM de MATLAB.

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
% Generacion de las parte real e imaginaria RH e IH de la función de transferencia G a la que
% se quieren ajustar los datos
[RH,IH]=gen_RI(n,m);%Nos devuelve las ecuaciones en forma de strings

% Paso a forma de parte real y parte imaginaria.
prpi=MODU.*exp(j*(FASE*pi/180));
k1=real(prpi);%parte real
k2=imag(prpi);%parte imaginaria
N=length(FREQ);

igual_coef(n,nps);

nume=gen_numerador(n,m,id,1)
save temporal RH IH k1 k2 N n m nps nume FREQ MODU FASE id

% Opciones de trabajo de la función LEASTSQ
options=foptions;
options(1)=1;% Visualización de las iteraciones
options(14)=5000;%Número máximo de iteraciones
options(13)=0;
x=constr('res2',x0,options);%Llamada a la función que nos calcula el ajuste
% por mínimos cuadrados no lineales.

[J1]=res2(x);
J=100/J1;
save temporal J -append
[FT,tabla]=OB_FT(x,0);
beep
```

A.2 GEN_IR.M

```
function [RH,IH]=gen_RI(n,m)

% seleccion de ordenes:

% Orden del numerador
% Orden del denominador

syms w k1 k2 %k1 se refiere a la parte real medida
             %k2 se refiere a la parte imaginaria medida

% Elaboración de las incognitas del denominador

for l=1:n,
    k=l;
    k=num2str(k);
    ins=['y'k '=sym('y' k '');'];
    eval(ins);

end
for x=1:n,
    l=num2str(x);
    o=',';
    ins=['as('l o 'l)=y'num2str(x)'];
    eval(ins);
end

as=[as;l];

% Elaboración de las incognitas del numerador
for l=n+1:n+1+m,
    k=l;
    k=num2str(k);
    x=l+1;
    x=num2str(x);
    ins=['y'k '=sym('y' k '');'];
    eval(ins);

end
for x=1:(m+1),
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
l=num2str(x);
o=',';
ins=['bs('l o '1)=y'num2str(x+n) ''];
eval(ins);
end

% Generacion de n1
sumal=0;
for k=0:floor(m/2),
    ter=(-1)^k*bs((2*k)+1,1)*(w^(2*k));
    sumal=sumal+ter;
end
n1=sumal;

% Generacion de n2
suma2=0;
for k=0:floor((m-1)/2),
    ter=(-1)^k*bs((2*k+1)+1,1)*(w^(2*k+1));
    suma2=suma2+ter;
end
n2=suma2;

%Generacion de d1
sumal=0;
for k=0:floor(n/2),
    ter=(-1)^k*as((2*k)+1,1)*(w^(2*k));
    sumal=sumal+ter;
end
d1=sumal;

%Generacion de d2
suma2=0;
for k=0:floor((n-1)/2),
    ter=(-1)^k*as((2*k+1)+1,1)*(w^(2*k+1));
    suma2=suma2+ter;
end
d2=suma2;

% Generación de las ecuaciones de la parte real
A=(n1*d1+n2*d2);
B=(n2*d1-d2*n1);
C=(d1^2)+(d2^2);
RH=A/C;
IH=B/C;

% Paso de expresion simbolica a string
RH=char(RH);
IH=char(IH);
```

A.3 IGUAL_COEF.M

```
% IGUAL_COEF (J.M. Diaz 9-99)
% Esta función calcula de manera simbólica las expresiones de los coeficientes previamente
% factorizado en polos complejos conjugados y polos simples.
%
% Sintaxis igual_coef(n,nps)
%
%
% n grado del polinomio
% ns número de polos simples
%
% Ejemplo:igual_coef(4,2)
% Los resultados se almacenan en el archivo COEF.mat
% El polinomio inicial factorizado de que parte es:
% s^2+2*s*x1+x1^2+x2^2)*(s+x3)*(s+x4)
%
% El polinomio que cosntruye es:
%
s^4+(2*x1+x3+x4)*s^3+(x1^2+x2^2+2*x1*x3+(2*x1+x3)*x4)*s^2+((x1^2+x2^2)*x3+(x1^2+x2^2+2*x1*x3)*
x4)*s+(x1^2+x2^2)*x3*x4
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```

%
% Y los coeficientes que obtiene son:
% s^4+ys4*s^3+ys3*x4)*s^2+ys2*s+ys1
% donde:
% ys1=(x1^2+x2^2)*x3*x4
% ys2=((x1^2+x2^2)*x3+(x1^2+x2^2+2*x1*x3)*x4)
% ys3=(x1^2+x2^2+2*x1*x3+(2*x1+x3)*x4)
% ys4=(2*x1+x3*x4)
%
function igual_coef(n,nps)

syms s
% Elaboración de las incognitas del denominador
% Variables simbolicas
for k=1:nps,
    r=k;
    r=num2str(r);
    ins=['x' r '=sym(''x' r '');'];
    eval(ins);
end
for k=1:(n-nps),
    r=k+nps;
    r=num2str(r);
    ins=['x' r '=sym(''x' r '');'];
    eval(ins);
end

% Construcción del polinomio
poli1=1;
for k=1:(n-nps)/2,% Factores complejos
    r1=2*k-1;
    r1=num2str(r1);
    r2=2*k;
    r2=num2str(r2);

    ins=['poli1=poli1*(s^2+2*s*x' r1 '+x' r1 '^2+x' r2 '^2);' ];
    eval(ins);
end

for k=(n-nps+1):n,% Factores simples
    r=k;
    r=num2str(k);
    ins=['poli1=poli1*(s+x' r ');'];
    eval(ins);
end

%Generación de las ecuaciones yl=f(x1,...xn)
%
%
%                               yn=f(x1,...xn)
polifac=poli1;
poli1=collect(poli1,s);

poli2=char(poli1);
L=length(poli2);
%Localización de las posiciones de s:
cont=1;
for k=1:L,
    if poli2(k)=='s'
        pos_s(cont,1)=k;
        cont=cont+1;
    end
end
%Adquisición de los coeficientes de los polinomios de
L2=length(pos_s);
for k=1:L2-1,
    p=pos_s(k);
    ps=pos_s(k+1);
    pot=num2str(n+1-k);
    test=n+1-k;
    if test>=10
        ins=['ys' pot '=poli2(p+5:ps-2);'];
        eval(ins);
    else
        ins=['ys' pot '=poli2(p+4:ps-2);'];
    end
end
  
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
    eval(ins);
end
end
ins=['ys1=poli2(ps+2:L)'];
eval(ins);

save COEF poli2 polifac
%salida
for k=1:n,

    r=num2str(k);
    ins=['save COEF ys' r ' -append'];
    eval(ins);
end
```

A.4 GEN_NUMERADOR.M

```
% GEN_NUMERADOR (J.M. Díaz 9-99)
% Esta función genera la forma adecuada para el numerador teniendo en cuenta las restricciones
%
% sintaxis: num=gen_numerador(n,m,id,f)
%
% Parámetros de entrada
% n      grado del numerador
% m      grado del denominador
% id     indicador sobre las restricciones
%        si id='n' no se aplica ninguna restricción
%        si id='h' se aplica la restricción b0=a0.
%        si id='p' se aplica la restricción b0=0.
% f      forma en la que se muestra el numerador.
%
% Parámetros de salida:
% num    expresión del numerador.
%
% Ejemplos:
% num=gen_numerador(4,3,'n',1)  y5=x(5);y6=x(6);y7=x(7);y8=x(8);
% num=gen_numerador(4,3,'n',2)  x(8) x(7) x(6) x(5)
% num=gen_numerador(4,3,'h',1)  y5=y1;y6=x(5);y7=x(6);y8=x(7);
% num=gen_numerador(4,3,'h',2)  x(7) x(6) x(5)  y1
% num=gen_numerador(4,3,'p',1)  y5=0;y6=x(5);y7=x(6);y8=x(7);
% num=gen_numerador(4,3,'p',2)  x(7) x(6) x(5)  0

function num=gen_numerador(n,m,id,f)
if f==1 %Se utiliza en la función restr.m
sn=num2str(n+1)
if id=='h',
    num=['y' sn '=y1;'];% Restriccion de baja frecuencia del heave.
    for k=n+2:n+m+1;
        r1=num2str(k);
        r2=num2str(k-1);
        ins=['y' r1 '=x(' r2 ');'];
        num=[num ins];
    end
elseif id=='p'
    num=['y' sn '=0;'];% Restriccion de baja frecuencia de del pitch.
    for k=n+2:n+m+1;
        r1=num2str(k);
        r2=num2str(k-1);
        ins=['y' r1 '=x(' r2 ');'];
        num=[num ins];
    end
else % no hay ninguna restricción
    num='';
    for k=n+1:n+m+1;
        r1=num2str(k);
        ins=['y' r1 '=x(' r1 ');'];
        num=[num ins];
    end
end

else % se utiliza en la función OB_FT

if id~='n'
    num='';
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
for k=n+1:n+m;
    r2=num2str(n+m+n+1-k);
    ins=['x(' r2 ') '];
    num=[num ins];
end
if id=='h',
    ins=[' y1'];% Restriccion de baja frecuenciade del heave.
else
    ins=[' 0'];% Restriccion de baja frecuenciade del pitch.
end
num=[num ins];
else % Si no hay restricciones
num='';
for k=n+1:n+m+1;
    r2=num2str(n+m+n+2-k);
    ins=['x(' r2 ') '];
    num=[num ins];
end
end
end
```

A.5 RES2.M

```
% RES2 (J.M. Díaz 9/99)
% Esta función implementa la función de coste a optimizar con las restricciones de estabilidad
% que se deben cumplir.
```

```
function [f,g]=res2(x)
%f=tets2(x)
%

load temporal
load COEF
% Generacion de los parametros a identificar del denominador
for s=1:n,
    pos=num2str(s);
    ins=['x' pos '=x(' pos ')'];
    eval(ins);

end
for s=1:n,
    pos=num2str(s);
    ins=['y' pos '=eval(ys' pos ')'];
    eval(ins);
end

ins=[nume];
eval(ins);

N=24;
% Nombramiento de los parámetros a optimizar:
for k=1:N,
    w=FREQ(k,1);
    RHm=k1(k,1);
    IHm=k2(k,1);

    ins1=['RHF='RH ''];
    eval(ins1);
    ins2=['IHF='IH ''];
    eval(ins2);

    ter1=(RHm-RHf);
    ter2=(IHm-IHf);

    J1(k,1)=ter1^2;
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
J2(k,1)=ter2^2;  
end  
f=sum(J1)+sum(J2);  
g=build(n,nps,x);
```

A.6 BUILD.M

```
% BUILD (J.M. Díaz 9/99)  
% Esta función construye las restricciones de estabilidad para que sean utilizadas  
% por la función res2.m  
function g=build(n,nps,x)  
if (n-nps)~=0  
for k=1:(n-nps)/2,% Para la parte real de los polos complejos  
r1=num2str(k);  
r2=num2str(2*k-1);  
ins=['g(' r1 ',1)=-x(' r2 ')+0.005;'];  
eval(ins);  
cont=2*k;  
end  
else  
k=0;  
cont=0;  
end  
  
if nps~=0  
for h=k+1:k+nps,  
cont=cont+1;  
r1=num2str(h);  
r2=num2str(cont);  
ins=['g(' r1 ',1)=-x(' r2 ')+0.005;'];  
eval(ins);  
end  
end
```

A.7 OB_FT.M

```
%Esta función nos representa el diagrama de Bode de la FT identificada sola y comparada con  
%los puntos medidos  
%ADVERTENCIA se debe ejecutar detras de restr.m o min_fun.m  
%Parámetros de entrada:  
% x vector de parametros identificado  
% s si s=1 se le resta 360° a la fase, si s=2 se le suma 360° , si s=0 no setoca la fase  
  
function [FT,tabla]=OB_FT(x,s)  
close all  
load COEF  
load temporal  
  
% Generacion de los parametros a identificar del denominador  
% Generacion de los parametros a identificar del denominador  
for k=1:n,  
pos=num2str(k);  
ins=['x' pos '=x(' pos ');'];  
eval(ins);  
  
end  
for k=1:n,  
pos=num2str(k);  
ins=['y' pos '=eval(ys' pos ');'];  
eval(ins);  
end  
  
for t=2:n+1,  
r1=num2str(t);  
r2=num2str(n+2-t);  
ins=['den(1,' r1 ')=y' r2 ');'];  
eval(ins)  
end  
den(1,1)=1;
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
snum=gen_numerador(n,m,id,2)
ins=['num=[' snum '];'];
eval(ins)

%Funcion de transferencia
FT=tf(num,den);

% Tabla
[mag,fase,w]=bode(FT,FREQ);

for i=1:N,
    cont(i,1)=i;
    modulo(i,1)=mag(:,i);
    if s==-1
        phi(i,1)=fase(:,i)-360;
    elseif s==1
        phi(i,1)=fase(:,i)+360;
    elseif s==2
        phi(i,1)=fase(:,i)+2*360;
    elseif s==-2
        phi(i,1)=fase(:,i)-2*360;
    else
        phi(i,1)=fase(:,i);
    end
end

end
tabla=[cont w modulo phi];

%Diagrama de Bode
figure(2)
subplot(1,1,1)
bode(FT);

% Diagrama de Bode comparado
figure(1)
subplot(2,1,1)
semilogx(FREQ,20*log10(MODU),'*',FREQ,20*log10(tabla(:,3)))
JS=num2str(J)
ins=['DIAGRAMA DE BODE J = ' JS];
title(ins)

ylabel('Magnitud (dB)')
grid

subplot(2,1,2)
semilogx(FREQ,FASE,'*',FREQ,tabla(:,4))

ylabel('Fase (deg)')
xlabel('Frecuencia de encuentro we (rad/s)')
grid

cal_wn_fa_zpc(FT)
```

A.8 CAL_WN_FA_ZPC.M

```
function cal_wn_fa_zpc(G)
[num,den]=tfdata(G,'v');

%Ceros
z=roots(num);
for k=1:length(z),
    sigmz(k,1)=real(z(k,1));
    wdz(k,1)=imag(z(k,1));
    wnz(k,1)=sqrt(sigmz(k,1)^2+wdz(k,1)^2);
    deltaz(k,1)=-sigmz(k,1)/wnz(k,1);
end

%POLOS
p=roots(den);
for k=1:length(p),
    sigmp(k,1)=real(p(k,1));
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
wdp(k,1)=imag(p(k,1));  
wnp(k,1)=sqrt(sigmp(k,1)^2+wdp(k,1)^2);  
deltap(k,1)=-sigmp(k,1)/wnp(k,1);  
end  
[z,wnz,deltaz]  
[p,wnp,deltap]
```


CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
k1=real(prpi);%parte real
k2=imag(prpi);%parte imaginaria
N=length(FREQ);

%Generacion de la parte real e imaginaria de G1, que es conocida:
[RG1,IG1,peso]=primer_filtro(G1,FREQ);

% Generacion de las parte real e imaginaria de la función de transferencia G2 a la que
% se quieren ajustar los datos
[RG2,IG2]=gen_RI(n,m);%Nos devuelve las ecuaciones en forma de strings
igual_coef(n,nps);
nume=gen_numerador(n,m,id,1)
save temporal RG1 IG1 RG2 IG2 peso k1 k2 N n m nps nume FREQ MODU FASE id

% Opciones de trabajo de la función LEASTSQ
options=foptions;
options(1)=1;% Visualización de las iteraciones
options(14)=5000;%Número máximo de iteraciones
options(13)=0;
x=constr('res2',x0,options);%Llamada a la función que nos calcula el ajuste
% por mínimos cuadrados no lineales.

[J1]=res2(x);
J=100/J1;
save temporal J -append

[G2,G]=OB_FT(x,G1,0);
```

B.2 PRIMER_FILTRO.M

```
% PRIMER_FILTRO (J.M. Diaz 9/99)
% Esta función recibe como entradas la función de transferencia G1, así como un vector
% de frecuencias.Devuelve la parte real e imaginaria de esta función de transferencia evaluada
% en estos puntos de frecuencia, así como un coeficiente numérico de nombre peso necesario
% para
% que se cumplan las restricciones a baja frecuencia.

function [RG1,IG1,peso]=primer_filtro(G1,FREQ)
[numc,denc]=tfdata(G1,'v');
% eliminación de los ceros iniciales del numerador.
cont=0;
L=length(numc)
for k=1:length(L),
    if numc(1,k)==0
        cont=cont+1;
    else
        break
    end
end
numc=numc(1,cont+1:L)

%Obtención del peso:
m1=length(numc)-1;
n1=length(denc)-1;
cn11=numc(1,m1+1);
cl=denc(1,n1+1);
peso=cl/cn11;
peso=1;
%Obtención de los vectores de parte real e imaginaria para el vector de frecuencias FREQ
N=length(FREQ);
for h=1:N
    w=FREQ(h,1);
    num=0;
    for k=0:m1,
        ter=numc(1,k+1)*(i*w)^(m1-k);
        num=ter+num;
    end
    den=0;
    for k=0:n1,
        ter=denc(1,k+1)*(i*w)^(n1-k);
        den=ter+den;
    end
end
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
end

G1=num/den;
RG1(h,1)=real(G1);
IG1(h,1)=imag(G1);

end
```

B.3 GEN_NUMERADOR.M

```
% GEN_NUMERADOR (J.M. Díaz 9-99)
% Esta función genera la forma adecuada para el numerador teniendo en cuenta las restricciones
%
% sintaxis: num=gen_numerador(n,m,id,f)
%
% Parámetros de entrada
% n      grado del numerador
% m      grado del denominador
% id     indicador sobre las restricciones
%        si id='n' no se aplica ninguna restricción
%        si id='h' se aplica la restricción b0=a0.
%        si id='p' se aplica la restricción b0=0.
% f      forma en la que se muestra el numerador.
%
% Parámetros de salida:
% num    expresión del numerador.
%
% Ejemplos:
% num=gen_numerador(4,3,'n',1)  y5=x(5);y6=x(6);y7=x(7);y8=x(8);
% num=gen_numerador(4,3,'n',2)  x(8) x(7) x(6) x(5)
% num=gen_numerador(4,3,'h',1)  y5=y1*peso;y6=x(5);y7=x(6);y8=x(7);
% num=gen_numerador(4,3,'h',2)  x(7) x(6) x(5)  y1*peso
% num=gen_numerador(4,3,'p',1)  y5=0;y6=x(5);y7=x(6);y8=x(7);
% num=gen_numerador(4,3,'p',2)  x(7) x(6) x(5)  0

function num=gen_numerador(n,m,id,f)
if f==1
    sn=num2str(n+1)
    if id=='h',

        num=['y' sn '=y1*peso;'];% Restriccion de baja frecuencia del heave.
        for k=n+2:n+m+1;
            r1=num2str(k);
            r2=num2str(k-1);
            ins=['y' r1 '=x(' r2 ');'];
            num=[num ins];
        end

    elseif id=='p'
        num=['y' sn '=0;'];% Restriccion de baja frecuencia del pitch.
        for k=n+2:n+m+1;
            r1=num2str(k);
            r2=num2str(k-1);
            ins=['y' r1 '=x(' r2 ');'];
            num=[num ins];
        end

    else % no hay ninguna restricción en la estructura.
        num='';
        for k=n+1:n+m+1;
            r1=num2str(k);
            ins=['y' r1 '=x(' r1 ');'];
            num=[num ins];
        end
    end

end

else % Segunda forma

    sn=num2str(n+1)
    num='';
    for k=n+1:n+m;
        r2=num2str(n+m+n+1-k);
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
        ins=['x(' r2 ') ' ] ;
        num=[num ins];
    end
    if id=='h',
        ins=[' y1*peso'];% Restriccion de baja frecuencia del heave.
    else
        ins=[' 0'];% Restriccion de baja frecuencia del pitch.
    end
    num=[num ins];
    if id=='n'
        num='';
        for k=n+1:n+m+1;
            r2=num2str(n+m+n+2-k);
            ins=['x(' r2 ') ' ] ;
            num=[num ins];
        end
    end
end
end
```

B.4 RES2.M

```
% RES2 (J.M. Díaz 9/99)
% Esta función implementa la función de coste a optimizar con las restricciones de estabilidad
% que se deben cumplir.
function [f,g]=res2(x)
%f=tets2(x)
%

load temporal
load COEF
% Generacion de los parametros a identificar del denominador
for s=1:n,
    pos=num2str(s);
    ins=['x' pos '=x(' pos ')'];
    eval(ins);

    end
for s=1:n,
    pos=num2str(s);
    ins=['y' pos '=eval(ys' pos ')'];
    eval(ins);
end

    ins=[nume];
    eval(ins);

% Nombramiento de los parámetros a optimizar:
for k=1:22,
    w=FREQ(k,1);
    %datos experimentales
    RHm=k1(k,1);
    IHm=k2(k,1);

    %Filtro conocido G1:
    RG1c=RG1(k,1);
    IG1c=IG1(k,1);

    % Filtro desconocido G2
    ins1=['RG2d='RG2 ''];
    eval(ins1);
    ins2=['IG2d='IG2 ''];
    eval(ins2);

    %Parte real e imaginaria de G1*G2:
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
RG=(RG1c*RG2d)-(IG1c*IG2d);
IG=(RG1c*IG2d)+(IG1c*RG2d);

ter1=(RHm-RG);
ter2=(IHm-IG);

J1(k,1)=ter1^2;
J2(k,1)=ter2^2;

end
f=sum(J1)+sum(J2);
g=build(n,nps,x);
```

B.5 OB_FT.M

%Esta función nos representa el diagrama de Bode de la FT identificada sola y comparada con los puntos medidos
%ADVERTENCIA se debe ejecutar detras de restr.m o min_fun.m
%Parámetros de entrada:
% x vector de parametros identificado
% s si s=1 se le resta 360° a la fase, si s=2 se le suma 360°, si s=0 no setoca la fase

```
function [G2,G]=OB_FT(x,G1,s)
close all
load COEF
load temporal
% Generacion de los parametros a identificar del denominador
% Generacion de los parametros a identificar del denominador
for k=1:n,
    pos=num2str(k);
    ins=['x' pos '=x(' pos ');'];
    eval(ins);

end
for k=1:n,
    pos=num2str(k);
    ins=['y' pos '=eval(ys' pos ');'];
    eval(ins);
end

for t=2:n+1,
    r1=num2str(t);
    r2=num2str(n+2-t);
    ins=['den(1,' r1 ')=y' r2 ');'];
    eval(ins)
end
den(1,1)=1;

snum=gen_numerador(n,m,id,2)
ins=['num=[' snum ');'];
eval(ins)

%Funcion de transferencia
G2=tf(num,den);

% Sistema completo:
G=series(G1,G2)

% Tabla
[mag,fase,w]=bode(G,FREQ);

for i=1:N,
    cont(i,1)=i;
    modulo(i,1)=mag(:,i);
    if s==1
        phi(i,1)=fase(:,i)-360;
    elseif s==2
        phi(i,1)=fase(:,i)+360;
    else
        phi(i,1)=fase(:,i);
    end
end
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
end

end
tabla=[cont w modulo phi];

% Diagrama de Bode comparado
figure(1)
subplot(2,1,1)
semilogx(FREQ,20*log10(MODU),'*',FREQ,20*log10(tabla(:,3)))
JS=num2str(J);
ins=['Diagrama de Bode    J= ' JS];
title(ins)

ylabel('Magnitud (dB)')
grid

subplot(2,1,2)
semilogx(FREQ,FASE,'*',FREQ,tabla(:,4))

ylabel('Fase (deg)')
xlabel('Frecuencia de encuentro  $\omega_e$  (rad/s)')
grid

%Diagrama de Bode
figure(2)
subplot(1,1,1)
bode(G2);

figure(3)
subplot(1,1,1)
bode(G);
```

APENDICE C : FUNCIONES MATLAB UTILIZADAS EN LA GENERACION DE INTERVALOS DEL PRIMER FILTRO

La función *gen_inter.m* calcula los intervalos de los coeficientes de las funciones de transferencia G_{ICP} o G_{ICH} . Esta función utiliza a su vez a las funciones *gen_pesos.m* para generar los vectores de peso de los parámetros y *cal_epsi.m* para calcular los parámetros de dilatación de los coeficientes. Esta última función utiliza *Obt_ABC_sym.m* y *cal_coefl.m*.

C.1 GEN_INTER.M

```
% GEN_INTER          (J.M.Diaz  9-9-99)
%
% Esta función genera los intervalos de los coeficientes del numerador y del denominador
% de una función de transferencia
%
% Sintaxis          [intinf,xn,intsup]=gen_inter(m,n,nps,x0,G0,datos)
%
% Parámetros de entrada:
% m                orden del numerador
% n                orden del denominador
% nps              numero de polos simples
% x0               vector de parámetros del modelo nominal (polos y coeficientes del numerador)
% G0              funcion de transferencia nominal.
% id               'h' restricción a baja frecuencia del heave a0=b0
%                  'p' restricción a baja frecuencia del pitch b0=0
% datos            string con el nombre del fichero .mat donde se encuentran los datos FREQ,MODU,FASE
%                  con los que se calcularon la función de transferencia nominal
%
% Parámetros de salida:
% intinf           extremo inferior del intervalo para cada coeficiente.
% xn               valor nominal de los coeficientes.
% intsup           extremo superior del intervalo para cada coeficiente.
%
%
% Ejemplo:
% load modp_p202 se carga el fichero donde se encuentra G0 y x0
% [intinf,xn,intsup]=gen_inter(3,5,1,x,G1,'h','crrpgo2fh20');
%
% Atención: x0 es el resultado de aplicar la función restr a un conjunto de datos en
% un diagrama de BODE experimental. Y por tanto x0 son la parte real e imaginaria de los polos
% y los coeficientes del numerador.

function [intinf,xn,intsup]=gen_inter(m,n,nps,x0,G0,id,datos);

% PASO 1: Generación del vector de pesos
[xn,px,N,id]=gen_pesos(m,n,nps,x0,G0,id,datos);

% PASO 2: Calculo de los vectores epsilon para cada una de las frecuencias.
for k=1:N,
    eps=cal_epsi(m,n,datos,k,px,xn);
    epsilon(:,k)=eps;
end
epsilon=epsilon'

% PASO 3:Generacion del epsilon_inf y del epsilon_sup de cada parametros
% Para el parametro j,todos los epsilon del parametro j para cada frecuencia estan en
% la columna j de epsilon
% eps_inf(j)=min{0,epsilon(j)}
% eps_sup(j)=max{0,epsilon(j)}
%
tamano=size(epsilon);
filas=tamano(1,1);
columnas=tamano(1,2);
epsmod=[zeros(1,columnas);epsilon];

for j=1:columnas,
    eps_inf(j,1)=min(epsmod(:,j));
    eps_sup(j,1)=max(epsmod(:,j));
end
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```

%PASO 4: Generacion del extremo inferior y el extremo superior de cada parametro
intinf=xn-abs(px.*eps_inf);
intsup=xn+abs(px.*eps_sup);

save modeloL intinf intsup -append
beep
  
```

C.2 GEN_PESOS.M

```

% GEN_PESOS          (J.M.Diaz 9-9-99)
%
%Esta funcion calcula el vector de parámetros nominal y el vector de pesos.
%
% Sintaxis:          [xn,pesosg,N,id]=gen_pesos(m,n,nps,x0,G0,datos)
%
% Salida:
%xn =[x0 ,.....,x0 , x0,.....,x0      ]
%      1          n      n+1          n+m+1
%pesosg=[ w ,.....w ,w ,....., w      ]
%      x      x      x      x
%      1          n      n+1          n+m+1
%
%N      número de puntos utilizados.
%Entrada:
%
%m      orden del numerador
%n      orden del denominador
%nps    numero de polos simples
%x0     vector de parámetros del modelo nominal (polos y coeficientes del numerador)
%G0     funcion de transferencia nominal.
%id     identificador 'p' para el pitch o 'h' para el heave
%datos  string con el nombre del fichero .mat donde se encuentran los datos FREQ,MODU,FASE
%      con los que se calcularon la función de transferencia nominal
%
%
% Ejemplo:
% load modp_h202 se carga el fichero donde se encuentra G0 y x0
% [xn,pesosg,N,id]=gen_pesos(3,5,nps,x0,G0,'h','crrp____h20');

function [xn,pesosg,N,id]=gen_pesos(m,n,nps,x0,G0,id,datos)
T0=clock;
ins=['load ' datos];
eval(ins);
N=length(FREQ);

if datos(1,9)=='h'
  MODU=MODU/10000
else
  MODU=MODU/1000000
end

%Paso de forma modulo-fase(en grados) a forma de número complejo D(jw):
%dat_med=(MODU).*exp(j*(FASE*pi/180));

%Obtención de los puntos en el dominio de la frecuencia para el modelo nominal G0.
%Funcion de transferencia nominal G0 evaluada en las frecuencias de medida.

[mag,fas,w]=bode(G0,FREQ);

for i=1:N,
  modulo(i,1)=mag(:,i);
  phi(i,1)=fas(:,i);
end
%dat_G0=modulo.*exp(j*(phi.*pi/180));

% Generación de los N paquetes de puntos en el dominio de la frecuencia para la obtención
% de las N funciones de transferencia G1.
  
```

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```

for l=1:N,
    for i=1:N,
        if i==1,
            paq_mod(i,l)=MODU(i,1);
            paq_fase(i,l)=FASE(i,1);

            else
                paq_mod(i,l)=modulo(i,1);
                paq_fase(i,l)=phi(i,1);
            end
        end
    end

end

% Generación de ficheros de datos en formato entendible para la función de optimización.

for l=1:N,
    FREQ=FREQ;
    MODU=paq_mod(:,l);
    FASE=paq_fase(:,l);
    [FREQ,MODU,FASE]

    nombre=['fic_____' id ]
    ins=['save ' nombre ' FREQ MODU FASE'];
    eval(ins);
    [x1L(:,l),J1L(l,1),G1L(l,1)]=ident_G1(m,n,nps,id,x0,nombre)
end
save modeloL x1L J1L G1L

T1=clock;
T=etime(T1,T0)/60

% Obtención de los parámetros del numerador y del denominador a partir de la función
% de transferencia.

%          bm s +b      s      +.....+ b
%          m-1                                  o
%  G=-----
%          n      n-1
%          s +a s      +.....+ a
%          n-1                                  o

% funcion de transferencia nominal:
[numG0,denG0]=tfdata(G0,'v');
L=length(denG0)
OK=1
cont=0;
while (OK==1)
    cont=cont+1;

    if numG0(1,cont)==0
        OK=1;
    else
        OK=0;
    end
end

par_num0=numG0(1,cont:L);
par_den0(1,:)=denG0(1,2:L);

% Calculo de xn
for k=1:n,
    xnd(1,k)=par_den0(1,n+1-k);
end

for k=1:m+1,
    xnn(1,k)=par_num0(1,m+2-k);
end
    
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```

xn=[xnd,xnn]';

% funciones de transferencia GL
for l=1:N
[numGL(l,:),denGL(l,:)]=tfdata(G1L(l,1),'v');
par_numL(l,:)=numGL(l,cont:L);
par_denL(l,:)=denGL(l,2:L);

end

save modeloL par_numL par_denL -append

% Calculo del vector de pesos:

% Parte del numerador:
for k=1:(m+1)
suma=0;
for l=1:N
suma=suma+abs(par_numL(l,k)-par_num0(l,k));
end
pesos_num(l,k)=suma/N;
end
%Parte del denominador
for k=1:n
suma=0;
for l=1:N
suma=suma+abs(par_denL(l,k)-par_den0(l,k));
end
pesos_den(l,k)=suma/N;
end
pesos=[pesos_den,pesos_num];
%pesos=[ w.....w ,w ,....., w ]
%      a          a  b          b
%      n-1          0  m          0
%
%Si se renombra la función de transferencia se tendría que:
%      x s +x  s  +.....+ x
%      n+m+1 n+m      n+1
%      G=-----
%      n      n-1
%      s +x  s  +.....+ x
%      n          1
% Con lo que el vector de pesos representaría ahora a:
%pesos=[ w.....w ,w ,....., w ]
%      x          x  x          x
%      n          1  n+m+1      n+1
%
% Pero nos interesa que venga expresado como:
%pesos=[ w.....w ,w ,....., w ]
%      x          x  x          x
%      1          n  n+1      n+m+1

for k=1:n,
pesosg_den(l,k)=pesos_den(l,n+1-k);
end

for k=1:m+1,
pesosg_num(l,k)=pesos_num(l,m+2-k);
end

pesosg=[pesosg_den,pesosg_num]';

save modeloL pesos_num pesos_den pesos pesosg N id xn -append
  
```

C.3 CAL_EPSI.M

```
% CAL_EPSI (J.M.Diaz 21-5-99)
%
% Esta función calcula el vector de coeficientes de dilatación eps para los coeficientes de
% la función de trnsferencia nominal, para la frecuencia wi.
%
% Sintásix: eps=cal_epsi(m,n,datos,k,px,xn)
%
% SALIDA:
%eps vector de coeficientes de dilatación para los coeficinetes de la función de
% transferencia a la frecuencia wi
%
%
%ENTRADA:
%
% m orden del numerador
% n orden del denominador
% datos string con el nombre del fichero .mat donde se encuentran los datos FREQ,MODU,FASE
% con los que se calcularon la función de transferencia nominal
% k indice i de la frecuencia wi para el que se desea realizar el cálculo.
% px vector de pesos de dimensión (m+n+1)x 1
% xn coeficientes de la función de transferencia nominal.

function eps=cal_epsi(m,n,datos,k,px,xn)
%Nos genera una matriz de epsilons de dimension (n+m+1)*(N), las filas de esta matriz
% seran el valor del epsilon ex1 asociado al parámetro x1 para las distintas frecuencias wi

ins=['load ' datos];
eval(ins);

N=length(FREQ);
D=MODU.*exp(j*(FASE*pi/180));%Punto medido a la frecuencia w tomando

[Af,Ef]=Obt_ABC_sym(m,n);
u=n+m+1;
pr=real(D);
pimag=imag(D);

k1=pr(k,1);
k2=pimag(k,1);
w=FREQ(k,1);

% Calculo de la matriz A y de E en funcion de la frecuencia.
for i=1:2,
    is=num2str(i);
    val=char(Ef(i,1));
    ins=['E(' is ',1)=' val ';'];
    eval(ins);

    for j=1:u,
        js=num2str(j);
        valor=char(Af(i,j));
        ins=['A(' is ',' js ')=' valor ';'];
        eval(ins);
    end
end

% MATRIZ B
B=A*xn;

%matriz W
W=diag(px);

%Hay que resolver el sistema de ecuaciones lineales:
%
% t t
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```

% (A *A)*W*eps = -A *[E+B]
%
% P1*eps = P2
%
P1=(A'*A)*W;
P2=-A'*(E+B);

%eps=pcg(P1,P2,10^-6,10000);%Función que nos resuelve el sistema lineal.
eps= bicg(P1,P2,10^-9,10000);
  
```

C.4 OBT_ABC_SYM.M

```

%OBT_ABC_SYM (J.M.Diaz 21-5-99)
%
%
% Obtención de la matrices A, B,E en el método para obtener intervalos sobre los parámetros de
% una función de transferencia nominal de la forma:
%
%          m          m-1
%      bm s  +b      s      +.....+ b
%          m-1          o
% G=-----
%          n          n-1
%      s  +a s      +.....+ a
%          n-1          o
%
%
%Sea el vector de parametros de la forma:
%P=[a0,...,a(n-1),b0,.....,bm] hay un total de u=n+m+1 parámetros.
%Renombrando como:
%P=[x1,...,xn,xn+1,.....,x(n+m+1)]
%Las matrices que se obtengan serán función de:
%la frecuencia medida wi,
%la parte real del punto medido D(jwi) k1
%la parte real del punto medido D(jwi) k2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                                MATRIZ A
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%La matriz A será de la forma:
%
%      A= | a11 a12.....a1n | a1(n+1).....a1u |
%          |-----|-----|
%          | a21 a22.....a2n | a2(n+1).....a2u |
%
%Valores de los ordenes del numerador y del denominador:
%n y m
function [A,E]=Obt_ABC_sym(m,n)
%Variables simbólicas:
syms w k1 k2
%Existen cuatros zonas que corresponden a distintas formas de de elaborar los coeficientes
% de la matriz A:
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%ZONA 1: a11.....a1n %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Es un término alk con k=1:n
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for k=1:n,
c=rem(k-1,4);
if ((k-1)==0)
factor=k1;
elseif ((k-1)==1)
factor=-k2;
elseif ((k-1)==2)
factor=-k1;
elseif ((k-1)==3)
factor=k2;
else
if c==0
factor=k1;
elseif c==1
factor=-k2;
elseif c==2
factor=-k1;
else
factor=k2;
  
```

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
end

end

A(1,k)=factor*w^(k-1);

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ZONA 2: a21.....a2n %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

for k=1:n,
c=rem(k-1,4);
if ((k-1)==0)
factor=k2;
elseif ((k-1)==1)
factor=k1;
elseif ((k-1)==2)
factor=-k2;
elseif ((k-1)==3)
factor=-k1;
else
if c==0
factor=k2;
elseif c==1
factor=k1;
elseif c==2
factor=-k2;
else
factor=-k1;
end
end

end

A(2,k)=factor*w^(k-1);

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ZONA 3: a1(n+1).....a1(n+m+1) %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for k=n+1:n+m+1,
r=rem(k-(n+1),2);

%Solo interesan las potencias pares 0,2,4,6,8,...
if (r==0)%par
factor=cal_coef1(k-(n+1));

else %impar
factor=0;
end

A(1,k)=-factor*w^(k-(n+1));

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ZONA 4: a2(n+1).....a2(n+m+1) %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for k=n+1:n+m+1,
r=rem(k-(n+1),2);

%Solo interesan las potencias impares 1,3,5,7,9,...
if (r==0)%par
factor=0;
else %impar
factor=cal_coef1(k-(n+1));
end

end
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
A(2,k)=-factor*w^(k-(n+1));

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                                MATRIZ E
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%La matriz E contendrá la potencia w^n, es de la forma:
%
%                                |factor1*w^n|
%                                |           |
%                                |factor2*w^n|
%
%Término de E11:
c=rem(n,4);
if (n==0)
    factor1=k1;
elseif (n==1)
    factor1=-k2;
elseif (n==2)
    factor1=-k1;
elseif (n==3)
    factor1=k2;
else
    if c==0
        factor1=k1;
    elseif c==1
        factor1=-k2;
    elseif c==2
        factor1=-k1;
    else
        factor1=k2;
    end
end

end

E(1,1)=factor1*w^n;

%Término de E21:

if (n==0)
    factor2=k2;
elseif (n==1)
    factor2=k1;
elseif (n==2)
    factor2=-k2;
elseif (n==3)
    factor2=-k1;
else
    if c==0
        factor2=k2;
    elseif c==1
        factor2=k1;
    elseif c==2
        factor2=-k2;
    else
        factor2=-k1;
    end
end

end

E(2,1)=factor2*w^n;

Ae=A;
Be=E;
```

C.5 CAL_COEF1.M

```
% FUNCION CAL_COEF1
%
%factor=cal_coef1(x)
%
%Esta función da el signo de calcular:
%
%                               [(j)^x]
%
% PARAMETROS DE ENTRADA
%x potencia a la que se eleva el numero imaginario j.

function factor=cal_coef1(x)
c=rem(x,4);

    if (x==0|x==1)
        factor=1;
    elseif (x==2|x==3)
        factor=-1;
    else
        if (c==0|c==1)
            factor=1;
        else
            factor=-1;
        end
    end
end
```

APENDICE D : FUNCIONES MATLAB UTILIZADAS EN LA GENERACION DE INTERVALOS DEL SEGUNDO FILTRO

La función *gen_inter_G2.m* calcula los intervalos de los coeficientes de las funciones de transferencia G_{1CP} o G_{1CH} . Esta función utiliza a su vez a las funciones *gen_pesos_G2.m* para generar los vectores de peso de los parámetros y *cal_epsi.m*³ para calcular los parámetros de dilatación de los coeficientes. Esta última función utiliza *Obt_ABC_sym.m* y *cal_coef1.m*.

D.1 GEN_INTER_G2.M

```
% GEN_INTER_G2          (J.M.Diaz  4-10-99)
%
% Esta función genera los intervalos de los coeficientes del numerador y del denominador
% de una función de transferencia G2, conocido G1
%
% Sintaxis      [intinf,xn,intsup]=gen_inter_G2(m,n,nps,x20,G20,G1,id,datos);
%
% Parámetros de entrada:
% m            orden del numerador
% n            orden del denominador
% nps          numero de polos simples
% x20          vector de parámetros del modelo nominal de G2 (polos y coeficientes del
numerador)
% G20         funcion de transferencia nominal de G2
% G1
% id          'p' restricción del pitch b0=0
%            'h' restricción del heave a0=b0 en G=G1*G2
%            'n' ninguna restricción
% datos      string con el nombre del fichero .mat donde se encuentran los datos FREQ,MODU,FASE
%            con los que se calcularon la función de transferencia nominal
%
% Parámetros de salida:
% intinf      extremo inferior del intervalo para cada coeficiente.
% xn          valor nominal de los coeficientes.
% intsup      extremo superior del intervalo para cada coeficiente.
%
%
% Ejemplo:
% load modp_p202 se carga el fichero donde se encuentra G0 y x0
% [intinf,xn,intsup]=gen_inter_g2(2,4,2,x20,G20,G1,'h','crrp____h20');
%
% Atención: x20 es el resultado de aplicar la función restr a un conjunto de datos en
% un diagrama de BODE experimental. Y por tanto x20 son la parte real e imaginaria de los
% polos
% y los coeficientes del numerador.

function [intinf,xn,intsup]=gen_inter_g2(m,n,nps,x20,G20,G1,id,datos);

% PASO 1: Generación del vector de pesos
[xn,px,N,id]=gen_pesos_g2(m,n,nps,x20,G20,G1,id,datos);

% PASO 2: Calculo de los vectores epsilon para cada una de las frecuencias.
for k=1:N,
    eps=cal_epsi(m,n,datos,k,px,xn);
    epsilon(:,k)=eps;
end
epsilon=epsilon'

% PASO 3:Generacion del epsilon_inf y del epsilon_sup de cada parametros
% Para el parametro j,todos los epsilon del parametro j para cada frecuencia estan en
% la columna j de epsilon
% eps_inf(j)=min{0,epsilon(j)}
% eps_sup(j)=max{0,epsilon(j)}
%
tamano=size(epsilon);
filas=tamano(1,1);
```

³ El código de las funciones *cal_epsi.m*, *Obt_ABC_sym.m* y *cal_coef1.m*. aparece en el Apéndice C

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```

columnas=tamano(1,2);
epsmod=zeros(1,columnas);epsilon];

for j=1:columnas,
    eps_inf(j,1)=min(epsmod(:,j));
    eps_sup(j,1)=max(epsmod(:,j));
end

%PASO 4: Generacion del extremo inferior y el extremo superior de cada parametro
intinf=xn-abs(px.*eps_inf);
intsup=xn+abs(px.*eps_sup);

save modeloL intinf intsup -append
beep
  
```

D.2 GEN_PESOS_G2.M

```

% GEN_PESOS_G2          (J.M.Diaz 4-10-99)
%
%Esta funcion calcula el vector de parámetros nominal y el vector de pesos.
%
% Sintaxis:          [xn,px,N,id]=gen_pesos_g2(m,n,nps,x20,G20,G1,id,datos);
%
%
% Salida:
% xn =[x0 ,.....,x0 , x0,.....,x0      ]
%      1          n      n+1          n+m+1
% pesosg=[ w ,.....,w ,w ,....., w      ]
%          x          x      x          x
%          1          n      n+1          n+m+1
%
% N          número de puntos utilizados.
% id         identificador 'p' para el pitch o 'h' para el heave
% Entrada:
%
% m          orden del numerador
% n          orden del denominador
% nps        numero de polos simples
% x20        vector de parámetros del modelo nominal G2 (polos y coeficientes del numerador)
% G20        funcion de transferencia nominal de G2
% G1         función de transferencia de G1
% id         %id          'p' restricción del pitch b0=0
%           'h' restricción del heave a0=b0 en G=G1*G2
%           'n' ninguna restricción
%
% datos      string con el nombre del fichero .mat donde se encuentran los datos FREQ,MODU,FASE
%            con los que se calcularon la función de transferencia nominal
%
%
function [xn,pesosg,N,id]=gen_pesos_g2(m,n,nps,x20,G20,G1,id,datos);
T0=clock;
ins=['load ' datos];
eval(ins);
N=length(FREQ);
[numc,denc]=tfdata(G1,'v');
FT=series(G1,G20);
%Paso de forma modulo-fase(en grados) a forma de número complejo D(jw):
%dat_med=(MODU).*exp(j*(FASE*pi/180));

%Obtención de los puntos en el dominio de la frecuencia para el modelo nominal G0.
%Funcion de transferencia nominal G0 evaluada en las frecuencias de medida.

[mag,fas,w]=bode(FT,FREQ);

for i=1:N,
    modulo(i,1)=mag(:,i);
    phi(i,1)=fas(:,i);
end
%dat_G0=modulo.*exp(j*(phi.*pi/180));
  
```

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

% Generación de los N paquetes de puntos en el dominio de la frecuencia para la obtención
 % de las N funciones de transferencia G1.

```
for l=1:N,
    for i=1:N,
        if i==1,
            paq_mod(i,l)=MODU(i,1);
            paq_fase(i,l)=FASE(i,1);

            else
                paq_mod(i,l)=modulo(i,1);
                paq_fase(i,l)=phi(i,1);
            end
        end
    end
end
```

% Generación de ficheros de datos en formato entendible para la función de optimización.

```
for l=1:N,
    l
    FREQ=FREQ;
    MODU=paq_mod(:,l);
    FASE=paq_fase(:,l);
    [FREQ,MODU,FASE]

    nombre=['fic_' id ]
    ins=['save ' nombre ' FREQ MODU FASE'];
    eval(ins);
    [xL(:,l),JL(l,1),G2L(l,1),GL(l,1)]=ident_G2(m,n,nps,id,x20,nombre,G1);
end
save modeloL xL G2L GL JL
```

```
T1=clock;
T=etime(T1,T0)/60
```

% Obtención de los parámetros del numerador y del denominador a partir de la función
 % de transferencia.

$$G = \frac{b_m s^{m-1} + \dots + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0}$$

% funcion de transferencia nominal:

```
[numG20,denG20]=tfdata(G20,'v');
L=length(denG20)
OK=1
cont=0;
while (OK==1)
    cont=cont+1;

    if numG20(1,cont)==0
        OK=1;
    else
        OK=0;
    end
end
```

```
par_num0=numG20(1,cont:L);
par_den0(1,:)=denG20(1,2:L);
```

% Calculo de xn

```
for k=1:n,
    xnd(1,k)=par_den0(1,n+1-k);
end
```

```
for k=1:m+1,
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```

    xnn(1,k)=par_num0(1,m+2-k);
end

xn=[xnd,xnn]';

% funciones de transferencia GL

for l=1:N
[numG2L(1,:),denG2L(1,.)]=tfdata(G2L(1,1),'v');
par_numL(1,.)=numG2L(1,cont:L);
par_denL(1,.)=denG2L(1,2:L);

end

save modeloL par_numL par_denL -append

% Calculo del vector de pesos:

% Parte del numerador:
for k=1:(m+1)
suma=0;
for l=1:N
suma=suma+abs(par_numL(1,k)-par_num0(1,k));
end
pesos_num(1,k)=suma/N;
end
%Parte del denominador
for k=1:n
suma=0;
for l=1:N
suma=suma+abs(par_denL(1,k)-par_den0(1,k));
end
pesos_den(1,k)=suma/N;
end
pesos=[pesos_den,pesos_num];
%pesos=[ w.....w ,w ,....., w ]
%      a          a  b          b
%      n-1          0  m          0
%
% Si se renombra la función de transferencia se tendría que:
%      x s +x  s      +.....+ x
%      n+m+1 n+m      n+1
%      G=-----
%      n      n-1
%      s +x  s      +.....+ x
%      n          1
% Con lo que el vector de pesos representaría ahora a:
%pesos=[ w.....w ,w ,....., w ]
%      x          x  x          x
%      n          1  n+m+1      n+1
%
% Pero nos interesa que venga expresado como:
%pesos=[ w.....w ,w ,....., w ]
%      x          x  x          x
%      1          n  n+1      n+m+1

for k=1:n,
pesosg_den(1,k)=pesos_den(1,n+1-k);
end

for k=1:m+1,
pesosg_num(1,k)=pesos_num(1,m+2-k);
end

pesosg=[pesosg_den,pesosg_num]';

save modeloL pesos_num pesos_den pesos pesosg N id xn -append

```

APENDICE E : FUNCIONES MATLAB UTILIZADAS EN LAS SIMULACIONES.

La función *simu_c.m* dibuja la serie temporal del movimiento de pitch y del movimiento de heave del modelo total tomando como entrada para el modelo oleaje regular o oleaje irregular, compara la respuesta del modelo con las series temporales medidas experimentalmente.

La función *simu_ace.m* dibuja la aceleración vertical de pitch o la aceleración vertical de heave que se obtiene a partir de un modelo y la compara con las aceleraciones medidas experimentalmente.

E.1 SIMU_C.M

```
% SIMU_C (J.M. Diaz junio_1999)
%
% Esta función simula la respuesta temporal de una función de transferencia (OLAS--HEAVE)
% u (OLAS--PITCH), tomando como entrada oleaje irregular o regular
% Sintaxis : [ymcdc,ymcdc,yret,t]=simu_c(G,nombre,tipo,ensayo,ret,OK)
%
% PARAMETROS DE ENTRADA:
%G      funcion de transferencia continua en formato sys de CONTROL.
%nombre fichero con las series de entrada-salida experimentales
%      nombre=[movi][V][SSN] donde
%
%          [movi]={p , h}      Movimiento
%          [V]   ={20, 30, 40} Velocidad
%          [SSN] ={4, 5, 6}    Estado de la mar
%tipo   'I' para irregulares 'R' para regulares.
%ensayo en el caso de oleaje regular,puede tomar los valores {16, 17, ..., 30}
%ID     señal seleccionada para ser retrasada 'med' para la medida y 'mod' para el modelo.
%ret    número de muestras (1 muestra=0.25 segundo) a desplazar la serie temporal
seleccionada.
%OK     indicador que si configura a 1 hace ymcdc=yret o ymcdc=yret.
%
% PARAMETROS DE SALIDA:
%ymcdc  salida medida experimentalmente. Se prescinde de 50 muestras por el principio
%      y 50 por el final.
%ymcdc  salida del modelo. Se prescinde de 50 muestras por el principio
%      y 50 por el final.
%t      vector de tiempos.
%
% Ejemplo:
%[ymcdc,ymcdc,t]=simu_c(FT,'h205','I','25','med',8,0);
%
function [ymcdc,ymcdc,t]=simu_c(G,nombre,tipo,ensayo,ID,ret,OK)
close all
nom1=['ymod' nombre(1)];
nom2=['yexp' nombre(1)];
retn=num2str(ret);

% Selección de las entradas para la simulación y de las salidas de los experimentos
if tipo=='I' %oleaje irregular
    load variables_simp
    ins=['umcd=' nombre 'ad(:,2)'];
    eval(ins);
    ins=['ymcd=' nombre 'ad(:,1)'];
    eval(ins);
else %oleaje regular
load simregPROA
    ins=['umcd=o' nombre(1:3) ensayo 'ad(:,2)'];
    eval(ins);
    ins=['ymcd=o' nombre(1:3) ensayo 'ad(:,1)'];
    eval(ins);
end

% 1 GRAFICAS CON LAS SERIES TEMPORALES COMPLETAS:
% Vector de tiempo:
L=length(umcd);
L
N=L-1;
t=(0:0.25:0.25*N)';
% simulación
```

```
ymod=lsim(G,umed,t);
%Error cuadratico medio:
e=ymod-ymed;
e2m=(e'*e)/N;
e2ms=num2str(e2m);
% Dibujo;
maxi=(max(max(abs(ymod)),max(abs(ymed))));
maxi=(round(maxi*1000))/1000;

figure(1),plot(t,ymod,'b',t,ymed,'r:');
legend(nom1,nom2)
ins=['Salidas Completas.Error cuadratico medio ' e2ms];
title (ins);
xlabel('TIEMPO (seg)')
if nombre(1)=='p'
    ylabel ('PITCH (Grados)')
else
    ylabel('HEAVE (metros)')
end

figure(2),plot(t,ymod,'b',t,ymed,'r:');
axis([0,75,-maxi,maxi])
legend(nom1,nom2)
ins=['Salidas Completas (Zoom).Error cuadratico medio ' e2ms];
title(ins)
xlabel('TIEMPO (seg)')
if nombre(1)=='p'
    ylabel ('PITCH (Grados)')
else
    ylabel('HEAVE (metros)')
end

% 2 - GRAFICAS DE LAS SERIES TEMPORALES TRUNCADAS
% Se prescinde de las 50 primeras y de las 50 últimas muestras.
%Nuevo vector de tiempo:
L=length(umed);
N=L-50-1;
ymodc=ymod(51:L-50);
ymedc=ymed(51:L-50);
t=(0.25*50:0.25:0.25*N)';
N=length(ymodc);
N
%Error cuadratico medio:
e=ymodc-ymedc;
e2m=(e'*e)/N;
e2ms=num2str(e2m);
% Dibujo;
maxi=(max(max(abs(ymod)),max(abs(ymed))));
maxi=(round(maxi*1000))/1000;

figure(3),plot(t,ymodc,'b',t,ymedc,'r:');
legend(nom1,nom2)
ins=['Salidas Truncadas. Error cuadratico medio ' e2ms];
title (ins);
xlabel('TIEMPO (seg)')
if nombre(1)=='p'
    ylabel ('PITCH (Grados)')
else
    ylabel('HEAVE (metros)')
end

figure(4),plot(t,ymodc,'b',t,ymedc,'r:');
axis([t(1,1),75,-maxi,maxi])
legend(nom1,nom2)
ins=['Salidas Truncadas (Zoom). Error cuadratico medio ' e2ms];

title(ins)
xlabel('TIEMPO (seg)')
if nombre(1)=='p'
    ylabel ('PITCH (Grados)')
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
else
    ylabel('HEAVE (metros)')
end
if OK==1
% 3- GRAFICAS CON LA SEÑAL SELECCIONADA RETARDADA.
%Hay que restrarar ret muestras la señal seleccionada
if ID=='med'
    ymedc_ret=[zeros(ret,1);ymedc(1:N-ret,1)];
    ymedc=ymedc_ret;
    length(ymedc_ret)
        %Error cuadratico medio:
e=ymodc-ymedc_ret;
e2m=(e'*e)/N;
e2ms=num2str(e2m);
% Dibujo;
maxi=(max(max(abs(ymod)),max(abs(ymed)))));
maxi=(round(maxi*1000))/1000;

figure(5),plot(t,ymodc,'b',t,ymedc_ret,'r:')
legend(nom1,nom2)

ins=['Salida medida retardada 'retn ' muestras y truncada. e2m= ' e2ms];
title (ins);
    xlabel('TIEMPO (seg)')
if nombre(1)=='p'
    ylabel ('PITCH (Grados)')
else
    ylabel('HEAVE (metros)')
end

figure(6),plot(t,ymodc,'b',t,ymedc_ret,'r:')
axis([t(1,1),75,-maxi,maxi])
legend(nom1,nom2)
ins=['Salida medida retardada 'retn ' muestras y truncada (zoom). e2m= ' e2ms];
title(ins)
    xlabel('TIEMPO (seg)')
if nombre(1)=='p'
    ylabel ('PITCH (Grados)')
else
    ylabel('HEAVE (metros)')
end

else
    ymodc_ret=[zeros(ret,1);ymodc(1:N-ret,1)];
    ymodc=ymodc_ret;
    length(ymodc_ret)
        %Error cuadratico medio:
e=ymodc_ret-ymedc;
e2m=(e'*e)/N;
e2ms=num2str(e2m);
% Dibujo;
maxi=(max(max(abs(ymod)),max(abs(ymed)))));
maxi=(round(maxi*1000))/1000;

figure(5),plot(t,ymodc_ret,'b',t,ymedc,'r:')
legend(nom1,nom2)

ins=['Salida del modelo retardada 'retn ' muestras y truncada. e2m= ' e2ms];
title (ins);
    xlabel('TIEMPO (seg)')
if nombre(1)=='p'
    ylabel ('PITCH (Grados)')
else
    ylabel('HEAVE (metros)')
end

figure(6),plot(t,ymodc_ret,'b',t,ymedc,'r:')
axis([t(1,1),75,-maxi,maxi])
legend(nom1,nom2)
ins=['Salida del modelo retardada 'retn ' muestras y truncada (zoom) e2m= ' e2ms];
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
title(ins)
    xlabel('TIEMPO (seg)')
if nombre(1)=='p'
    ylabel ('PITCH (Grados)')
else
    ylabel('HEAVE (metros)')
end

end
end
```

E.2 SIMU_ACE.M

```
% SIMU_ACE (J.M. Diaz 5-10-99)
%
% Esta función dibuja las aceleraciones ACVPI o ACVH a partir de:
% 1-Series temporales de ACVPI o ACVH obtenidas por SEGUNDO.
% 2-La derivada segunda de la serie temporal de pitch o la serie temporal de heave
%   experimentales.
% 3-La derivada segunda de la serie temporal de pitch o la serie temporal de heave
%   obtenidas a partir de un modelo en formato de función de transferencia.
%
% Sintaxis: [acv,acv_e,acv_m,ts]=simu_ace(t,ymedc,ymodc,nombre)
%
% PARAMETROS DE ENTRADA:
%ymedc     serie temporal de pitch o de heave medida experimentalmente.
%ymodc     serie temporal de pitch o de heave obtenida a apartir de un modelo.
%nombre    fichero con las series de entrada-salida experimentales

function [acv,acve,acvm,ts]=simu_ace(t,ymedc,ymodc,nombre)
close all

% Selección de la serie temporal de ACVH o ACVPI calculada por Segundo
mov=nombre(1,1);
if mov=='H',
    mov='HEAVE';
else
    mov='PITCH';
end

V=nombre(1,2:3);
if length(nombre)==4 %oleaje irregular
    load ace_irreg
    ins=['acv= AC' nombre 'd;'];
    eval(ins);
    SSN=nombre(1,4);
    titulo=['ACELERACION VERTICAL ' mov ' V=' V ' nudos. SSN=' SSN];

else %oleaje regular
    load ace_reg
    ins=['acv= AC' nombre 'd;'];
    eval(ins);
    YY=nombre(1,4:5);
    titulo=['ACELERACION VERTICAL ' mov ' V=' V ' nudos. Ensayo=' YY];

end

L=length(acv);

if mov=='PITCH'
    acv=-acv; % Para que el criterio de signos sea el mismo que en el caso del canal
end
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
N=length(t);
ts=t(10:N);
% Señal derivada primera numerica
derle=(gradient(ymedc,0.25));
derlm=(gradient(ymodc,0.25));

% Señal derivada segunda
acve=(gradient(derle,0.25));
acvm=(gradient(derlm,0.25));
acve=acve(10:N);
acvm=acvm(10:N);
close all
figure(1)
length(ts)

if length(nombre)==4
    acv=acv(61:L-50);
else
    acv=acv(60:L-50);
end

plot(ts,acv,'r-.',ts,acve,'k:',ts,acvm,'b-')
legend('acv','acve','acvm')
xlabel('TIEMPO (seg)')
ylabel('Aceleración')
title(titulo)

figure(2)
plot(ts,acv,'r:',ts,acve,'k-')
legend('acv','acve')
xlabel('TIEMPO (seg)')
ylabel('Aceleración')
title(titulo)

figure(3)
plot(ts,acv,'r:',ts,acvm,'b-')
legend('acv','acvm')
xlabel('TIEMPO (seg)')
ylabel('Aceleración')
title(titulo)

figure(4)
plot(ts,acve,'k:',ts,acvm,'b-')
legend('acve','acvm')
xlabel('TIEMPO (seg)')
ylabel('Aceleración')
title(titulo)
```

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bhattacharyya, S. P. (1995) Robust control : the parametric approach . Prentice Hall.
- [2] CEHIPAR (1998) Informe OTI-2135-CM-1 de los ensayos de comportamiento en la mar del Ferry TF-120 para investigación sobre control.
- [3] CEHIPAR (1998) Informe OTI-2135-CM-2 de los resultados del programa de comportamiento en la mar PRECAL del Ferry TF-120 para investigación sobre control.
- [4] B. de Andrés, J.M. De la Cruz, J.M. Girón, S. Esteban, J. A. López, D. Rivera. (1999). Modelo lineal de un buque de alta velocidad obtenido mediante genéticos. Documento CRIBAV
- [5] J. Aranda, J.M. De la Cruz, J.M. Diaz., P.Ruipérez (1999) Identificación de modelos lineales para la dinámica vertical del buque TF-120. Documento CRIBAV.
- [6] J. Aranda, J.M. De la Cruz, J.M. Diaz., P.Ruipérez (1999) Identificación de modelos lineales continuos con intervalos de confianza para la dinámica vertical del buque TF-120. Documento CRIBAV.
- [7] J. Aranda, J.M. De la Cruz, B. De Andrés, 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. Documento :CRIBAV.
- [8] S. Esteban, J.M. Girón, L. Grau, J.M. De la Cruz. (1999). Modelo basado en Precal. Documento CRIBAV.
- [9] Edward V. Lewis Principles of Naval Architecture (second revision). Volume III : Motions in Waves and Controllability. The Society of Naval Architects and Marine Engineers
- [10] J.Schoukens and R.Pintelon (1991). Identification of Linear Systems. Pergamon Press.
- [11] User's Guide. Optimization Toolbox. Matlab. Version 5.