



CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

DOCUMENTO N°: *CRIBAV/ 02/ 02*

Fecha: 15/06/99

Código SubProyecto: TAP97-0607-003-02

TÍTULO DEL DOCUMENTO

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

Autores:

J. Aranda

J.M.Díaz

J.M. De la Cruz

P. Ruipérez

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

DOCUMENTO N°: *CRIBAV/ 02 /02*

Fecha: 15/06/99

Código SubProyecto: TAP97-0607-003-02

TÍTULO DEL DOCUMENTO

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

Autores:

J. Aranda

J.M.Díaz

J.M. De la Cruz

P.Ruipérez

Grupo: UNED

Responsable del Grupo: J. Aranda

Responsable del Informe: J. Aranda

SubProyecto: TAP97-0607-003-02

Version: 1

Versión: 1

Fecha: 15/06/99

SubProy.: TAP97-0607-003-02

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Lista y Filiación de Autores:

J.Aranda (2)

J.M.Diaz (2)

J.M. De la Cruz (1)

P.Ruipérez(2)

(1) Dept. de Arquitectura de ordenadores y Automática. F.C.Físicas U.Complutense de Madrid.

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

Versión: 1

Fecha: 15/06/99

SubProy.: TAP97-0607-003-02

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Resumen:

En este informe se presentan 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 presentan también los intervalos de confianza en los parámetros de las funciones de transferencia que representan cada modelo.

CONTENIDO

1. INTRODUCCION	1
2. IDENTIFICACION DE MODELOS : METODOLOGÍA	1
2.1 TRATAMIENTO DE LOS DATOS UTILIZADOS EN LA IDENTIFICACION	3
2.1.1 TRATAMIENTO MATEMÁTICO DE LAS SERIES TEMPORALES	3
2.1.2 TRATAMIENTO REALIZADO SOBRE LOS DATOS PRECAL.	4
2.2 IDENTIFICACION DE MODELOS LINEALES	7
2.2.1 RESTRICCIONES EN LA BUSQUEDA DE MODELOS.	7
2.2.2 IDENTIFICACION CON OLEAJE REGULAR DE MODELOS SISO CONTINUOS	8
2.3 VALIDACION DE LOS MODELOS IDENTIFICADOS.	9
2.4 GENERACION DE INTERVALOS	10
2.4.1 SELECCIÓN DE PESOS W.	10
2.4.2 CALCULO DE LOS INTERVALOS DEL SISTEMA	11
3. MODELOS CONTINUOS SISO IDENTIFICADOS	13
3.1 VELOCIDAD 20 NUDOS	14
3.1.1 MODELO (4,6,2)	14
3.1.2 MODELO (3,5,1)	20
3.1.3 MODELO (2,3,1)	26
3.2 VELOCIDAD 30 NUDOS	29
3.2.1 MODELO (4,6,2)	29
3.2.2 MODELO (3,5,1)	35
3.2.3 MODELO (2,3,1)	41
3.3 VELOCIDAD 40 NUDOS	44
3.3.1 MODELO (4,6,2)	44
3.3.2 MODELO (3,5,1)	50
3.3.3 MODELO (2,3,1)	56
4. ESTUDIO DE LAS ACELERACIONES.	59
4.1 INTRODUCCION TEORICA.	59
4.1.1 Componentes de la aceleracion vertical en el sistema de ejes fijos al buque.	60
4.2 ACELERACION VERTICAL OBTENIDAS CON LOS MODELOS SISOCONTINUOS IDENTIFICADOS.	61
4.2.1 aceleracion vertical obtenida con modelos (4,6,2) identificados a V=20 nudos.	61
4.2.2 aceleracion vertical obtenida con modelos (4,6,2) identificados a V=30 nudos.	62
4.2.3 aceleracion vertical obtenida con modelos (4,6,2) identificados a V=40 nudos.	62
5. CONCLUSIONES	63

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

APENDICE A : NOMENCLATURA DE LOS FICHEROS CON LOS RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS EN EL CEHIPAR Y CON LOS OBTENIDOS CON PRECAL. _____ 66

A.1 NOMENCLATURA DE LOS FICHEROS QUE CONTIENEN LOS DATOS OBTENIDOS CON OLEAJE IRREGULAR. _____ 66

A.2 NOMENCLATURA DE LOS FICHEROS QUE CONTIENEN LOS DATOS OBTENIDOS CON OLEAJE REGULAR. _____ 66

A.3 NOMENCLATURA DE LOS FICHEROS QUE CONTIENEN LOS DATOS CON LA ALTURA DE LA OLA CORREGIDA A PROA. _____ 66

A.4 NOMENCLATURA DE LOS FICHEROS QUE CONTIENEN LOS DATOS OBTENIDOS CON PRECAL _____ 67

A.5 LISTADO DE DATOS OBTENIDOS CON PRECAL UTILIZADOS EN LA IDENTIFICACIÓN _____ 67

A.5.1 DATOS PRECAL EN EL C.G VELOCIDAD 20 NUDOS _____ 67

A.5.2 DATOS PRECAL EN EL C.G VELOCIDAD 30 NUDOS _____ 69

A.5.3 DATOS PRECAL EN EL C.G VELOCIDAD 40 NUDOS _____ 70

A.5.4 DATOS PRECAL CORREGIDOS A PROA. VELOCIDAD 20 NUDOS _____ 72

A.5.5 DATOS PRECAL CORREGIDOS A PROA. VELOCIDAD 30 NUDOS _____ 73

A.5.6 DATOS PRECAL CORREGIDOS A PROA. VELOCIDAD 40 NUDOS _____ 74

APENDICE B : FUNCIONES PROGRAMADAS EN MATLAB UTILIZADAS EN LA IDENTIFICACIÓN. _____ 75

B.1 FUNCIONES UTILIZADAS EN LA OBTENCION DE MODELOS CONTINUOS SISO75

B.1.1 restr.m _____ 75

B.1.2 res2.m _____ 76

B.1.3 rh_ih.m _____ 77

B.1.4 igual_coef.m _____ 78

B.1.5 gen_numerador.m _____ 79

B.1.6 ob_ft.m _____ 80

B.1.7 cal_wn_fa_zpc.m _____ 81

B.1.8 pol_bod.m _____ 81

B.2 FUNCIONES UTILIZADAS EN LA SIMULACIONES _____ 82

B.2.1 simu_c.m _____ 82

B.3-FUNCIONES UTILIZADAS EN LA GENERACION DE INTERVALOS. _____ 84

B.3.1 gen_inter.m _____ 84

B.3.2.gen_pesos.m _____ 85

B.3.3.CAL_EPSI.m _____ 87

B.3.4. OBT_ABC_SYM.m _____ 89

B.3.5 cal_coef1.m _____ 91

BIBLIOGRAFIA _____ 93

Versión: 1

Fecha: 15/06/99

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 1.1 se muestra el esquema que se siguió en el proceso de identificación [3] 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 [4] 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. Este punto del proceso se denomina en el esquema como *Adquisición de datos*

Los datos de los experimentos estuvieron a disposición del grupo de investigación de la UNED el 7 de julio de 1998. Con estos datos se identificaron distintos modelos [8]. 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 .

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, se identificaron modelos lineales continuos siso, para el movimiento de heave y para el de pitch.

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.

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.

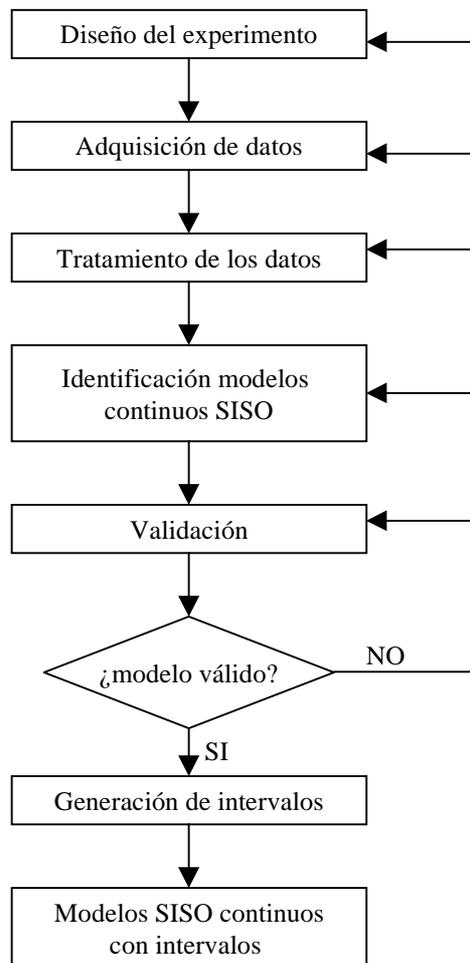


Figura 2.1: Esquema seguido en la identificación de sistemas lineales

2.1 TRATAMIENTO DE LOS DATOS UTILIZADOS EN LA 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 sí 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 [4] 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.

2.1.1 TRATAMIENTO MATEMÁTICO DE LAS SERIES TEMPORALES

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. En la Tabla 2.1, aparecen los valores de los parámetros que caracterizan los ensayos (ver apéndice A) obtenidos con olas regulares.

P pendiente.

λ/L_{pp} relación entre la longitud de onda y la eslora entre perpendiculares.

H_m altura de la ola a escala modelo.

T_m periodo de la ola a escala modelo.

H_B altura de la ola a escala real.

T_B periodo de la ola a escala real.

Tabla 2.1: Características de las olas ensayadas y su numeración en los ensayos.

ENSAYO YY	P	λ/L_{pp}	$H_m(m)$	$T_m(s)$	$H_B(m)$	$T_B(s)$
17	40	0.51	0.056	1.199	1.403	5.994
18	40	0.70	0.077	1.405	1.925	7.023
19	40	0.80	0.088	1.502	2.200	7.508
20	40	0.91	0.100	1.601	2.503	8.007
21	40	1.03	0.113	1.704	2.833	8.519
22	40	1.15	0.127	1.800	3.163	9.001
23	40	1.28	0.141	1.899	3.520	9.496
24	40	1.42	0.156	2.000	3.905	10.002
25	40	1.72	0.189	2.202	4.730	11.008
26	40	2.04	0.224	2.398	5.610	11.989
27	40	2.40	0.264	2.601	6.600	13.003
28	40	2.78	0.306	2.799	7.645	13.995
29	40	3.19	0.351	2.998	8.773	14.992
30	40	3.63	0.399	3.198	9.983	15.992

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 (ver apéndice A).

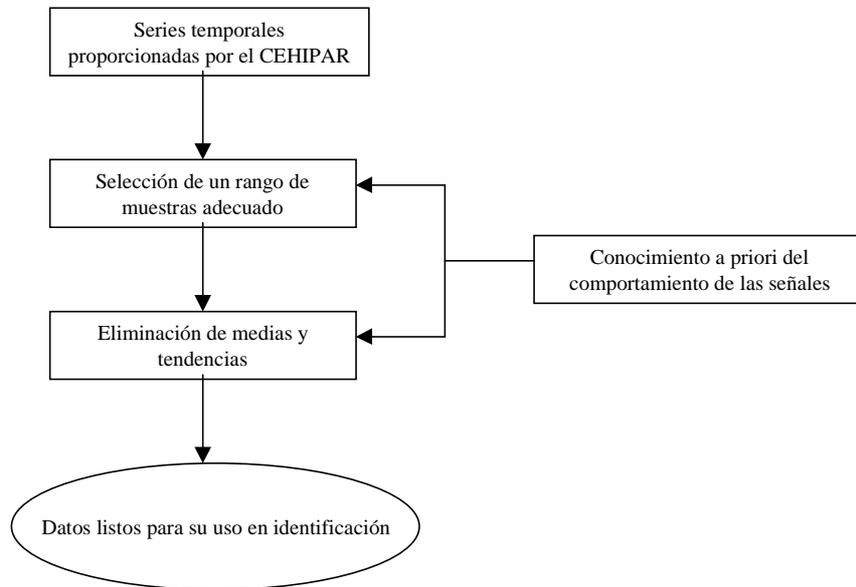


Figura 1.2: Esquema del tratamiento matemático aplicado a las series temporales proporcionadas por el CEHIPAR.

El tratamiento de las series temporales se realizó utilizando el entorno gráfico de la herramienta IDENT[®] 4.0.3 perteneciente [2] al programa MATLAB[®] 5.1, debido a su gran comodidad y fácil manejo.

En la Figura 2.1 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.

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, la nomenclatura de los ficheros que contienen estas señales se muestra en el Apéndice A.

2.1.2 TRATAMIENTO REALIZADO SOBRE LOS DATOS PRECAL.

En el apéndice A, se explica la nomenclatura de los archivos que contienen los datos PRECAL, y se lista los datos utilizados en la identificación de modelos. Se ha de indicar que estos datos están referidos al centro de gravedad del buque. En este punto del buque la identificación de modelos lineales estables se torna imposible, ya que hay que tener en cuenta que antes de que llegue la cresta de la ola al centro de gravedad se habrá empezado a producir una respuesta en pitch y en heave, por lo que hay que trasladar las medidas de altura de olas a proa, o lo que es lo mismo introducir un retardo en las medidas de fase de los datos PRECAL.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

- Corrección de las fases de la ola :

La altura de olas en el CG se puede aproximar por :

$$s(t, x) = A \cos(\omega_e t - kx_{CG}) \quad (1)$$

La distancia del CG, ver Figura 2.3, a la perpendicular de proa es :

$$d = 68.75 \text{ metros.}$$

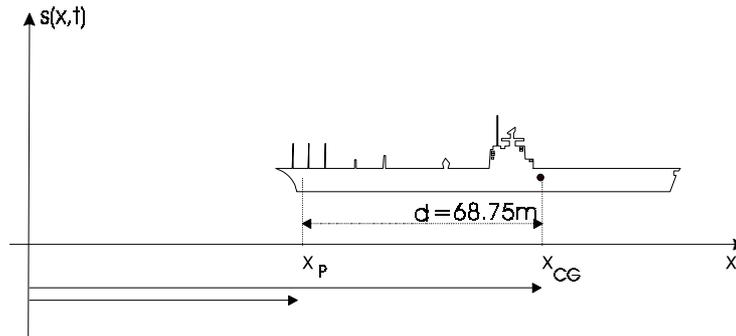


Figura 2.3 : Esquema de la distancia del centro de gravedad del buque a proa.

Luego se tendrá que :

$$s(t, x_p) = A \cos(\omega_e t - kx_p) = A \cos(\omega_e t - kx_{CG} + kd) \quad (2)$$

La corrección de fase introducida es de la forma :

$$\theta = k \cdot d \quad (\text{radianes})$$

$$\theta = k \cdot d \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (\text{grados}) \quad (3)$$

El número de ondas k en aguas profundas es :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega^2}{g} \quad (4)$$

En la Figura 2.4 se muestra la corrección de fase introducida θ , en función de la velocidad angular de la ola.

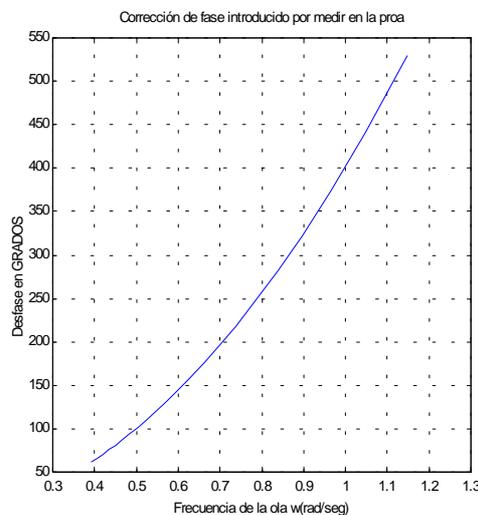


Figura 2.4 : Corrección de fase introducida θ , en función de la velocidad angular de la ola ω .

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

La fase en el centro de gravedad es :

$$FASECG = (\phi_h - \phi_{oCG}) \quad (5)$$

La fase que se tiene tras corregir a proa es :

$$FASEP = \phi_h - (\phi_{oCG} + \theta) = FASECG - \theta \quad (6)$$

En la Tabla 2.2 aparece el retardo que se introduce en función de la frecuencia absoluta.

Tabla 2.2 : Retardo $-\theta$ en función e la frecuencia absoluta ω

ω (rad/seg)	$-\theta$ (°)
0.3930	-62.0804
0.4060	-66.2554
0.4190	-70.5663
0.4340	-75.7092
0.4490	-81.0330
0.4650	-86.9111
0.4830	-93.7699
0.5030	-101.6963
0.5240	-110.3651
0.5460	-119.8270
0.5710	-131.0513
0.5980	-143.7380
0.6280	-158.5216
0.6620	-176.1511
0.6980	-195.8304
0.7380	-218.9183
0.7600	-232.1648
0.7850	-247.6901
0.8100	-263.7177
0.8370	-281.5919
0.8650	-300.7471
0.8950	-321.9699
0.9650	-374.3035
1.0480	-441.4605
1.1470	-528.8057

2.2 IDENTIFICACION DE MODELOS LINEALES

Se identificaron modelos lineales continuos siso para el movimiento de pitch y para el de heave utilizando los datos de PRECAL corregidos a proa, a las velocidades de 20, 30 y 40 nudos. En la Figura 2.5 se muestra el diagrama de bloques del sistema identificado.

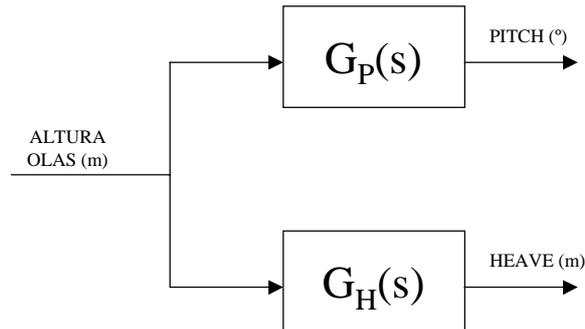


Figura 2.5 : Diagrama de bloques del sistema identificado.

No se utilizó el IDENT, se programaron en MATLAB las distintas funciones que se fueron necesitando (ver apéndice B).

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 del movimiento del pitch debe tender a cero a frecuencias bajas.
3. La ganancia del modelo del movimiento de heave 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.

2.2.2 IDENTIFICACION CON OLEAJE REGULAR DE MODELOS SIS0 CONTINUOS

La identificación se realizó en el dominio de la frecuencia. Se partió de los puntos de magnitud y de fase obtenidos con PRECAL y corregidas las fases a proa, a las frecuencias ω_{ei} con $i=1,2,\dots,25$ para la función de transferencia del pitch $G_p(j\omega_{ei})$ y para la función de transferencia del heave $G_H(j\omega_{ei})$. Luego se tenían números complejos que se pueden expresar en parte real y parte imaginaria:

$$\begin{aligned}
 G_p(j\omega_{ei}) &= \text{Re}(G_p(j\omega_{ei})) + j \text{Im}(G_p(j\omega_{ei})) \\
 G_H(j\omega_{ei}) &= \text{Re}(G_H(j\omega_{ei})) + j \text{Im}(G_H(j\omega_{ei}))
 \end{aligned}$$

Sean $\hat{G}_p(s)$ y $\hat{G}_H(s)$ las funciones de transferencia que se estimaron con la estructura (m,n,nps) donde :

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

$$\hat{H}(s) = \frac{x_{n+m+1}s^m + x_{n+m}s^{m-1} + \dots + x_{n+1}}{s^n + x_n s^{n-1} + \dots + x_1} \quad (7)$$

Los parámetros que se estiman son : $P=(x_1,\dots,x_{n+m+1})$.

Para estimar los parámetros de $\hat{G}_p(s)$ y $\hat{G}_H(s)$ se recurrió a la minimización de la siguiente función de coste [5] :

$$\begin{aligned}
 K(P) &= \sum_{k=1}^N |H(j\omega_{ek}) - \hat{H}(j\omega_{ek})|^2 \\
 K(P) &= \sum_{k=1}^N \left(\left(\text{Re}(H(j\omega_{ek})) - \text{Re}(\hat{H}(j\omega_{ek})) \right) + j \left(\text{Im}(H(j\omega_{ek})) - \text{Im}(\hat{H}(j\omega_{ek})) \right) \right)^2
 \end{aligned} \quad (8)$$

sometida a las restricciones de la sección 2.2.1 que para el caso de sistemas continuos se traducen por :

- En el caso del Pitch cuando $\omega_{ei} \rightarrow 0$ $|G_p(s)|=0$, como $s=j\omega_{ei}$ significa que $b_0=0$
- En el caso del heave cuando $\omega_{ei} \rightarrow 0$ $|G_H(s)|=1$, como $s=j\omega_{ei}$ significa que $a_0=b_0$
- Una condición necesaria pero no suficiente para la estabilidad es que los coeficientes del denominador sean positivos.

Luego el problema que se planteo fue resolver minimos cuadrados no lineales con restricciones en el apéndice B se explican las funciones programadas para su resolución

2.3 VALIDACION DE LOS MODELOS IDENTIFICADOS.

En la Figura 2.6 se muestra el esquema seguido en el proceso de validación de los distintos modelos obtenidos.

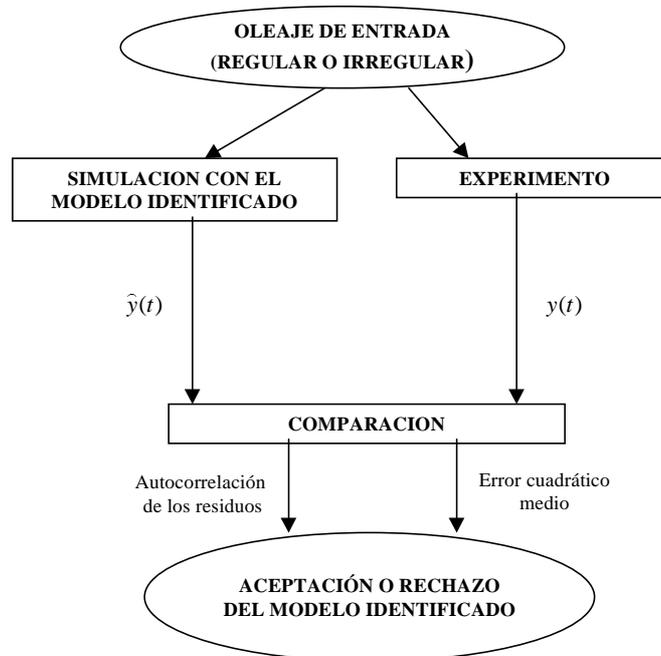


Figura 2.6: Esquema del proceso de validación

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.

Un parámetro importante es el error cuadrático medio, que viene dado por (9) donde N es el número de muestras utilizado.:

$$e2m = \frac{1}{N} (\hat{y} - y)^T \cdot (\hat{y} - y) \quad (9)$$

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.

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

En general es imposible encontrar una única función racional $G^l(s)$ que cumpla que $G^l(j\omega_i)=D(j\omega_i)$ 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 $G^l(s)$ que tiene la siguiente forma :

$$G^l(s) = \frac{x_{n+m+1}s^m + x_{n+m}s^{m-1} + \dots + x_{n+1}}{s^n + x_n s^{n-1} + \dots + x_1} \quad (10)$$

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

$$G(s) = \frac{\hat{x}_{n+m+1}s^m + \hat{x}_{n+m}s^{m-1} + \dots + \hat{x}_{n+1}}{s^n + \hat{x}_n s^{n-1} + \dots + \hat{x}_1} \quad (11)$$

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

$$\mathbf{G}(s) = \left\{ G(s) : \hat{x}_i \in [x_i - w_{x_i} \cdot \varepsilon_{x_i}^-, x_i + w_{x_i} \cdot \varepsilon_{x_i}^+] \quad \forall i \right\} \quad (12)$$

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 :

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

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 $D(j\omega)$.

Construyanse los modelos l -ésimos que se llamaran $G_l^l(s)$:

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

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 :

$$\vec{w} = \left[\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N |x_1 - x_1^l|, \dots, \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N |x_{n+m+1} - x_{n+m+1}^l| \right] \quad (13)$$

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

2.4.2 CALCULO DE LOS INTERVALOS DEL SISTEMA

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

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

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 :

$$\hat{x}_i = x_i + w_{x_i} \varepsilon_{x_i}^l \begin{cases} i = 1, \dots, n+m+1 \\ l = 1, \dots, N \end{cases} \quad (14)$$

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

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

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

donde :

3. MODELOS CONTINUOS SISO IDENTIFICADOS

En la Tabla 3.1 y en la Tabla 3.2 se presentan las estructuras de los modelos más significativos, identificados para el movimiento de heave y para el movimiento de pitch a distintas velocidades. En estas tablas también se presenta para cada modelo el valor de la función de coste (8) y el error cuadrático medio (9) al realizar la simulación¹ con oleaje regular e irregular.

V (nudos)	Estructura (m,n,nps)	Función de coste	Error cuadrático medio en simulación irregular	Error cuadrático medio en simulación regular
20	(4,6,2)	0.0383	0.014333	0.039029
	(3,5,1)	0.0692	0.014062	0.04738
	(2,3,1)	0.0696	0.013793	0.045601
30	(4,6,2)	0.0385	0.011061	0.08733
	(3,5,1)	0.1012	0.011476	0.12569
	(2,3,1)	0.2381	0.017047	0.13371
40	(4,6,2)	0.0471	0.011186	0.026172
	(3,5,1)	0.1045	0.011323	0.041331
	(2,3,1)	0.4510	0.01246	0.042359

Tabla 3.1 : Estructuras de los modelos continuos identificados para el movimiento de Heave a distintas velocidades.

V (nudos)	Estructura (m,n,nps)	Función de coste	Error cuadrático medio en simulación irregular	Error cuadrático medio en simulación regular
20	(4,6,2)	0.1213	0.10562	0.10137
	(3,5,1)	0.1228	0.10518	0.1053
30	(4,6,2)	0.0938	0.099554	0.36102
	(3,5,1)	0.0946	0.099763	0.36091
40	(4,6,2)	0.0942	0.12141	0.62963
	(3,5,1)	0.0989	0.12256	0.62942

Tabla 3.2 : Estructuras de los modelos continuos identificados para el movimiento de pitch a distintas velocidades.

En las siguientes subsecciones se presentan las características de los modelos identificados.

¹ La simulación se realizó utilizando oleaje irregular correspondiente a SSN=5, y oleaje regular del ensayo 25

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

3.1 VELOCIDAD 20 NUDOS

3.1.1 MODELO (4,6,2)

- HEAVE.

La función de transferencia del modelo es :

$$G_H(s) = \frac{115.8 s^4 - 78.38 s^3 + 831.2 s^2 - 557.7 s + 1325}{s^6 + 39.47 s^5 + 471.6 s^4 + 1688 s^3 + 2690 s^2 + 2459 s + 1325}$$

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia se muestran en la Tabla 3.3 :

Tabla 3.3 : Intervalos de los coeficientes de $G_H(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
x ₁	1309.3	1325	1388
x ₂	2411	2459	2479
x ₃	2624	2690	2832.4
x ₄	1649.3	1688	1793.6
x ₅	331.88	471.6	548.86
x ₆	33.488	39.47	42.611
x ₈	-557.88	-557.7	-556.55
x ₉	830.22	831.2	832.12
x ₁₀	-83.187	-78.38	-77.61
x ₁₁	90.822	115.8	128.37

En la Tabla 3.4 se muestran los polos y los ceros de $G_H(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

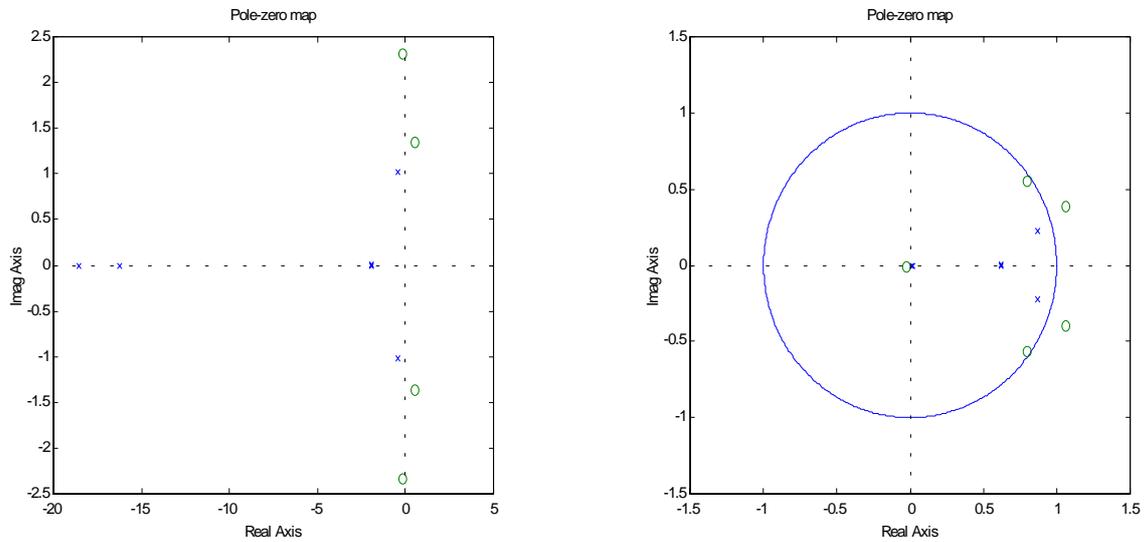
Tabla 3.4 : Polos y ceros de $G_H(s)$

Polos		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-18.577		18.577	1
-16.255		16.255	1
-1.902 +	0.002286i	1.902	1
-1.902 -	0.002286i	1.902	1
-0.41813 +	1.0187i	1.1011	0.37973
-0.41813 -	1.0187i	1.1011	0.37973

Ceros		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.17291 +	2.3222i	2.3286	0.074256
-0.17291 -	2.3222i	2.3286	0.074256
0.51134 +	1.3594i	1.4524	-0.35207
0.51134 -	1.3594i	1.4524	-0.35207

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ y su equivalente discreto.

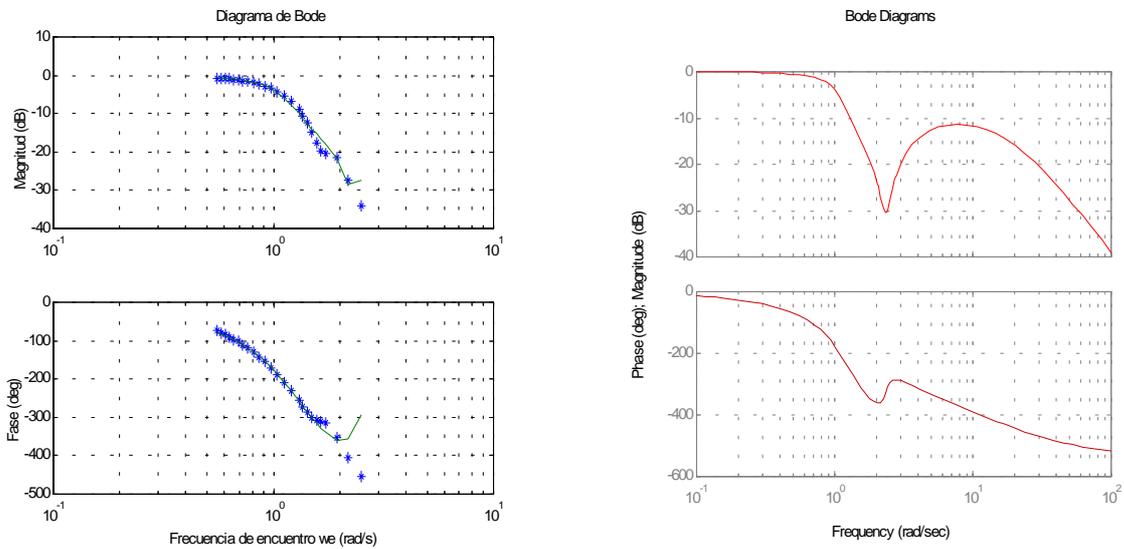
CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)

Figura 3.1 : (a) Diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros discreto.

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



(a)

(b)

Figura 3.2 : (a) Diagrama de Bode de $G_H(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_H(s)$.

En la Figura 3.3 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

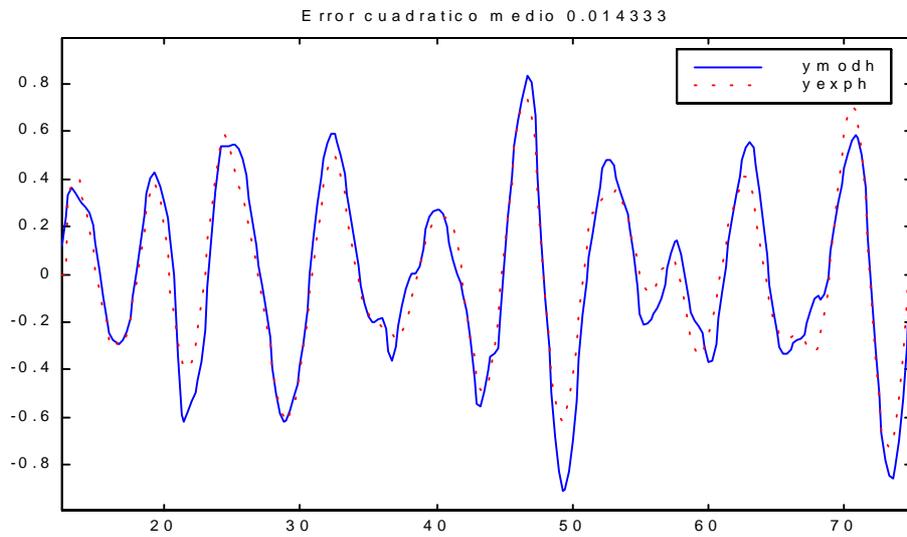


Figura 3.3 :Salida (y_{esth}) de $G_H(s)$ comparada con la salida (y_{eave}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular ($SSN=5$).

En la Figura 3.4 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

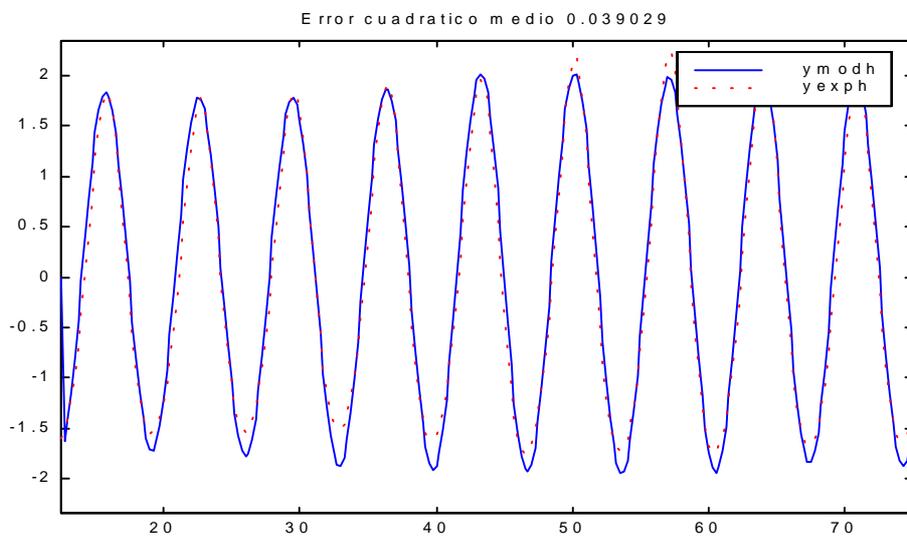


Figura 3.4 :Salida (y_{esth}) de $G_H(s)$ comparada con la salida (y_{eave}) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

• **PITCH.**

La función de transferencia del modelo es :

$$G_p(s) = \frac{-1.19 s^4 - 10.85 s^3 + 14.98 s^2 - 50.62 s}{s^6 + 19.27 s^5 + 50.86 s^4 + 87.04 s^3 + 113 s^2 + 71.95 s + 40.93}$$

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia se muestran en la Tabla 3.5 :

Tabla 3.5 : Intervalos de los coeficientes de $G_p(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
x ₁	40.6239	40.9301	42.1549
x ₂	69.8317	71.9466	72.2921
x ₃	111.9658	113.0089	113.4570
x ₄	86.6317	87.0402	88.3162
x ₅	50.1333	50.8560	52.1965
x ₆	17.4087	19.2750	19.6824
x ₈	-51.6473	-50.6223	-50.3770
x ₉	14.4200	14.9826	15.0770
x ₁₀	-11.6252	-10.8545	-8.9156
x ₁₁	-1.3675	-1.1900	0.5597

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

Tabla 3.6 : Polos y ceros de $G_p(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-16.486	16.486	1
-1.6521	1.6521	1
-0.23317 + 1.3571i	1.377	0.16933
-0.23317 - 1.3571i	1.377	0.16933
-0.3352 + 0.82473i	0.89024	0.37653
-0.3352 - 0.82473i	0.89024	0.37653

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0	0	NaN
-10.674	10.674	1
0.77643 + 1.8391i	1.9963	-0.38893
0.77643 - 1.8391i	1.9963	-0.38893

En la Figura 3.5 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_p(s)$ y su equivalente discreto.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

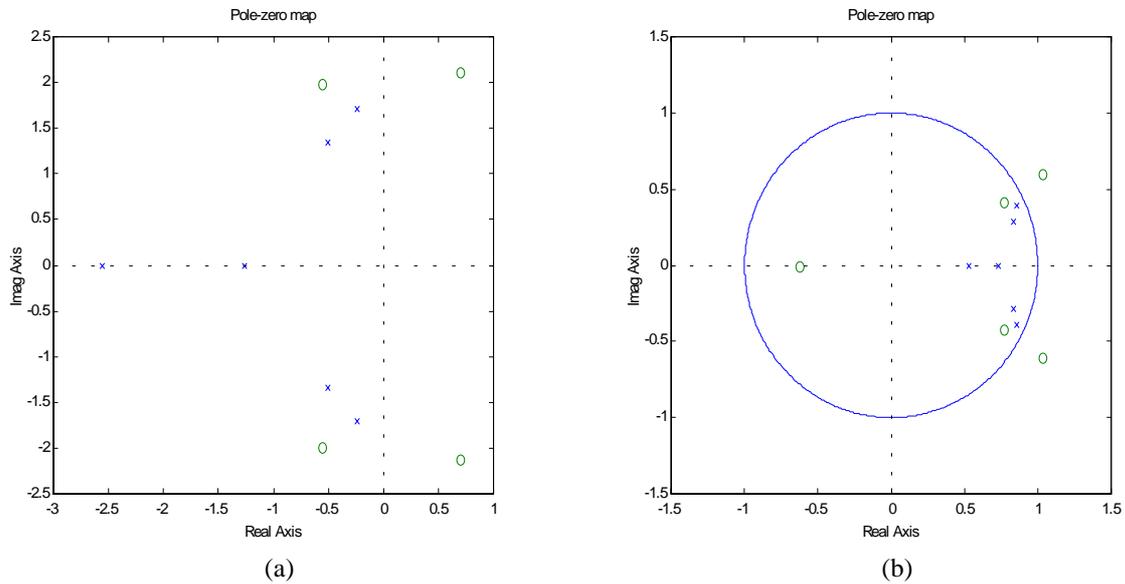


Figura 3.5 : (a) Diagrama de polos y ceros de $G_P(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros discreto.

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

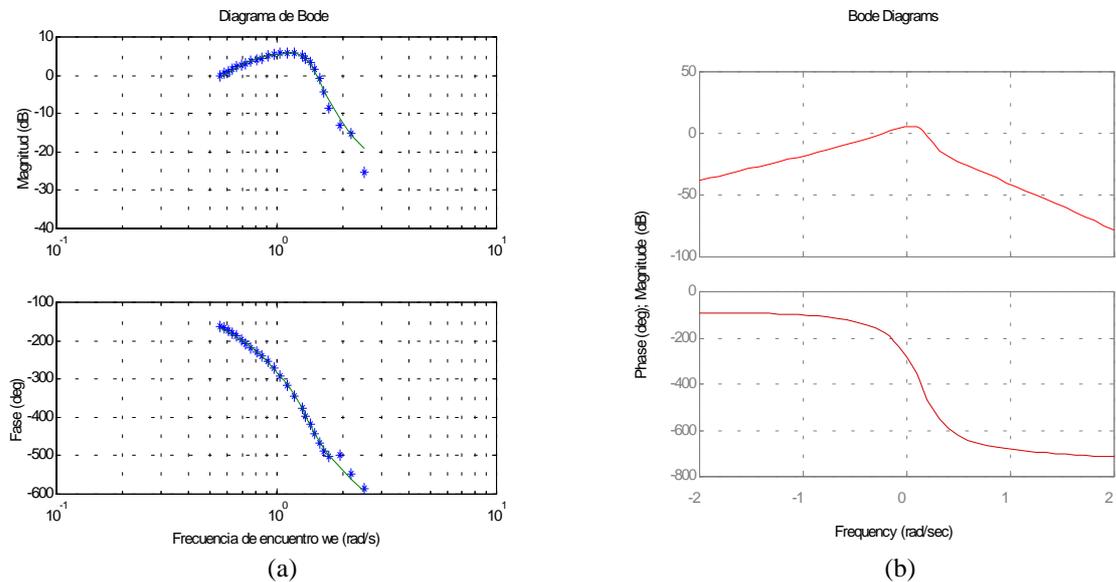


Figura 3.6 : (a) Diagrama de Bode de $G_P(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_P(s)$.

En la Figura 3.7 se muestra la salida de $G_P(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

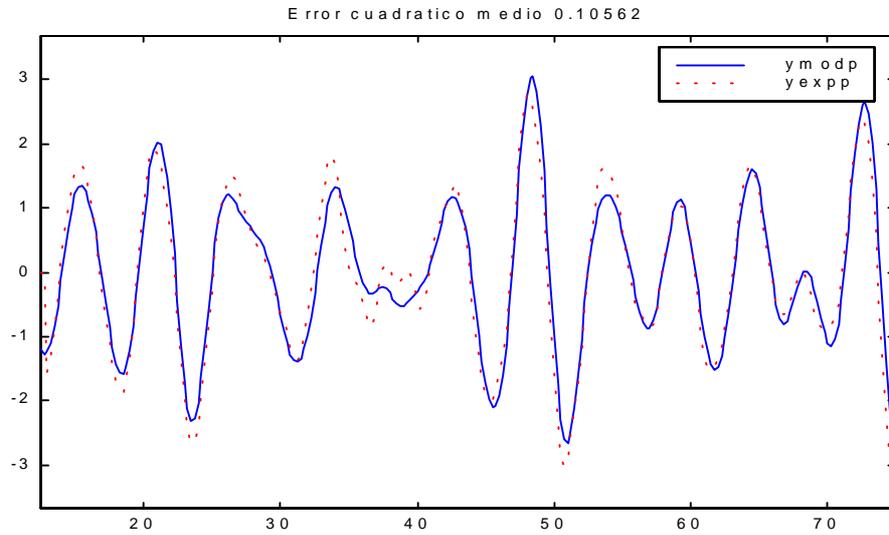


Figura 3.7 :Salida (y_{estp}) de $G_p(s)$ comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular ($SSN=5$).

En la Figura 3.8 se muestra la salida de $G_p(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

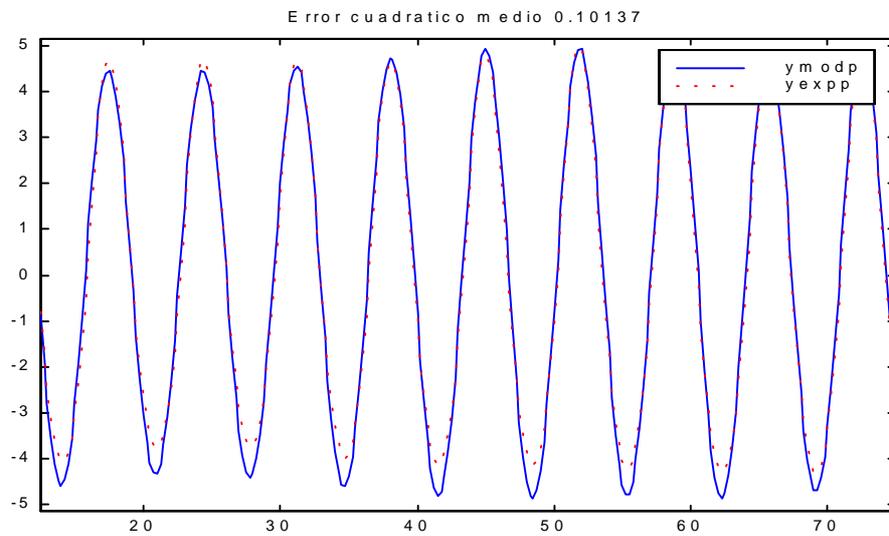


Figura 3.8 :Salida (y_{estp}) de $G_p(s)$ comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

3.1.2 MODELO (3,5,1)

• **HEAVE.**

La función de transferencia del modelo es :

$$G_H(s) = \frac{3.35 s^3 + 28.51 s^2 - 21.7 s + 76.3}{s^5 + 21.13 s^4 + 126.9 s^3 + 167.2 s^2 + 167.7 s + 76.3}$$

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia se muestran en la Tabla 3.7 :

Tabla 3.7 : Intervalos de los coeficientes de $G_H(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
x ₁	74.9398	76.2965	80.9933
x ₂	163.4860	167.6938	168.6071
x ₃	162.5287	167.2214	170.0522
x ₄	124.7000	126.8921	130.7296
x ₅	20.4306	21.1303	21.7913
x ₇	-23.0386	-21.7042	-20.4422
x ₈	17.6806	28.5051	29.3345
x ₉	-3.5667	3.3500	5.6642

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

Tabla 3.8 : Polos y ceros de $G_H(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-9.8725 + 0.71895i	9.8986	0.99736
-9.8725 - 0.71895i	9.8986	0.99736
-0.33077 + 0.98299i	1.0371	0.31892
-0.33077 - 0.98299i	1.0371	0.31892
-0.7239	0.7239	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-9.4497	9.4497	1
0.47034 + 1.4795i	1.5525	-0.30296
0.47034 - 1.4795i	1.5525	-0.30296

En la Figura 3.9 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ y su equivalente discreto.

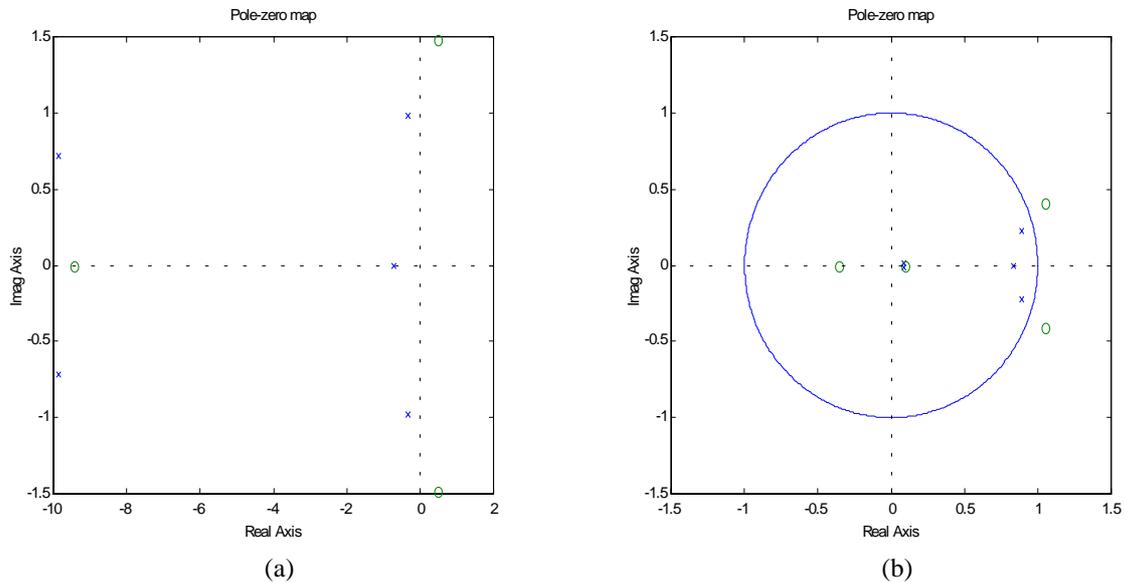


Figura 3.9 : (a) Diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros discreto.

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

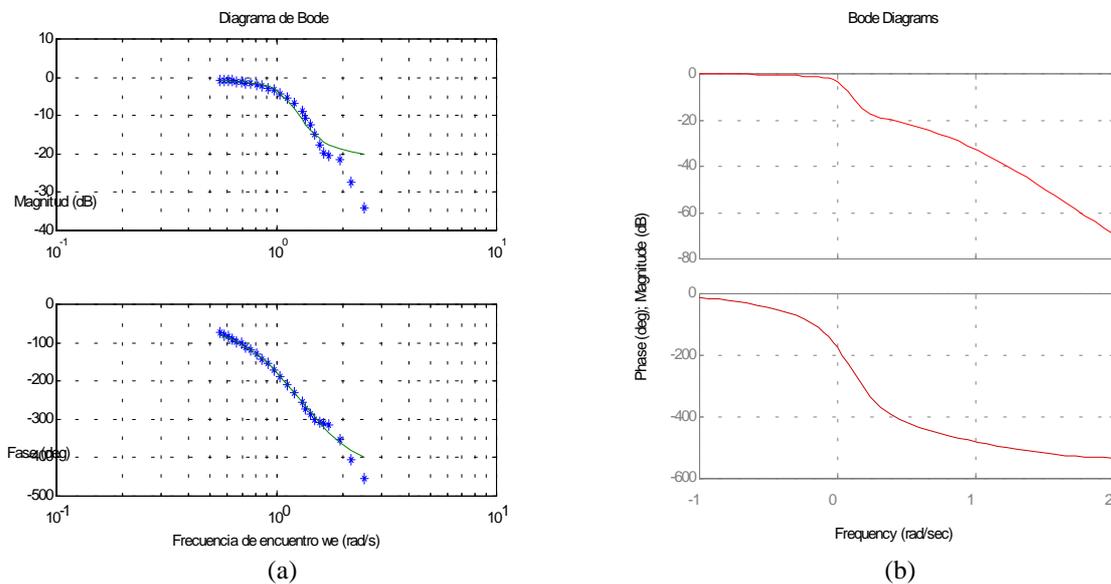


Figura 3.10 : (a) Diagrama de Bode de $G_H(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_H(s)$.

En la Figura 3.11 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

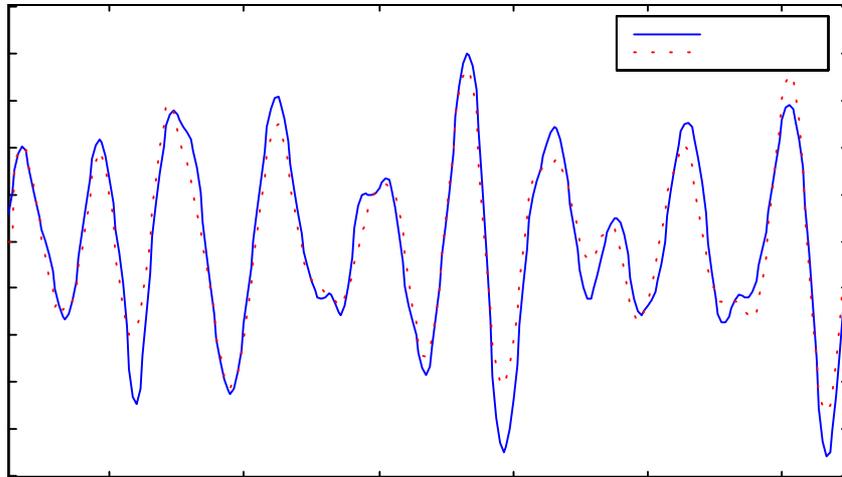


Figura 3.11 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 3.12 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

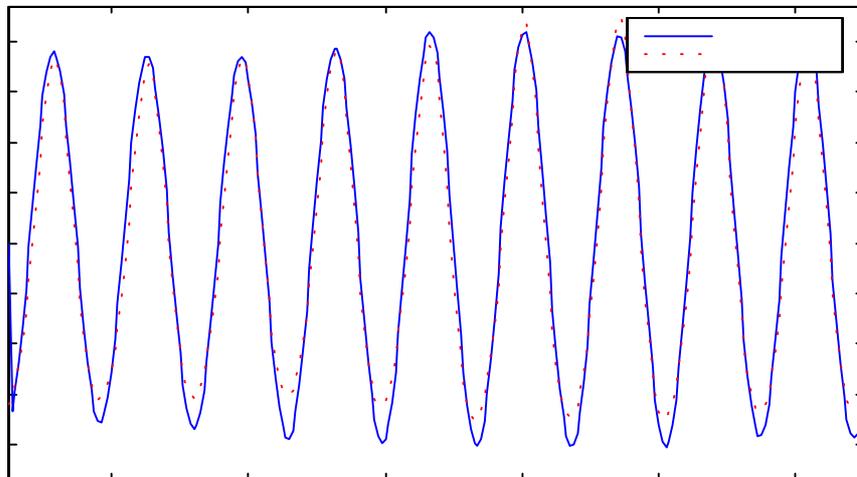


Figura 3.12 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

• **PITCH.**

La función de transferencia del modelo es :

$$G_P(s) = \frac{-0.7245 s^3 + 1.105 s^2 - 3 s}{s^5 + 2.699 s^4 + 4.808 s^3 + 6.397 s^2 + 4.136 s + 2.413}$$

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia se muestran en la Tabla 3.9 :

Tabla 3.9: Intervalos de los coeficientes de $G_P(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
x ₁	2.3936	2.4126	2.4977
x ₂	4.0124	4.1363	4.1669
x ₃	6.2999	6.3973	6.4456
x ₄	4.7601	4.8085	4.9916
x ₅	2.6115	2.6988	2.8657
x ₇	-3.1543	-3.0002	-2.9741
x ₈	0.6775	1.1052	1.1961
x ₉	-0.7531	-0.7245	-0.5039

En la Tabla 3.10 se muestran los polos y los ceros de $G_P(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

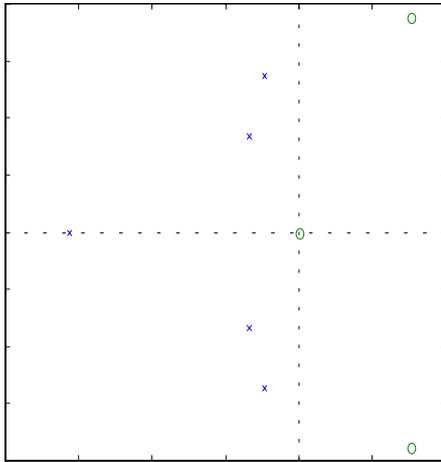
Tabla 3.10 : Polos y ceros de $G_P(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-1.5623	1.5623	1.0000
-0.2330 + 1.3634i	1.3832	0.1684
-0.2330 - 1.3634i	1.3832	0.1684
-0.3353 + 0.8335i	0.8984	0.3732
-0.3353 - 0.8335i	0.8984	0.3732

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0	0	NaN
0.7628 + 1.8866i	2.0350	-0.3748
0.7628 - 1.8866i	2.0350	-0.3748

En la Figura 3.13 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_P(s)$ y su equivalente discreto.

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

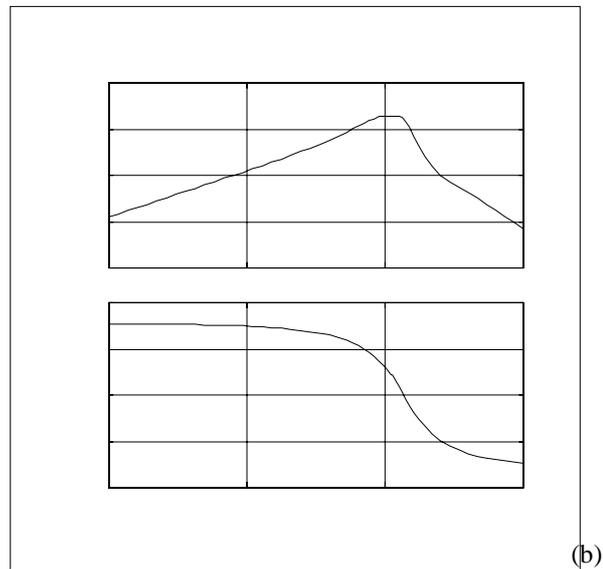


(a)

(b)

Figura 3.13 : (a)Diagrama de polos y ceros de $G_p(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros discreto.

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



(a)

(b)

Figura 3.14 : (a)Diagrama de Bode de $G_p(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b)Diagrama de Bode de $G_p(s)$.

En la Figura 3.15 se muestra la salida de $G_p(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

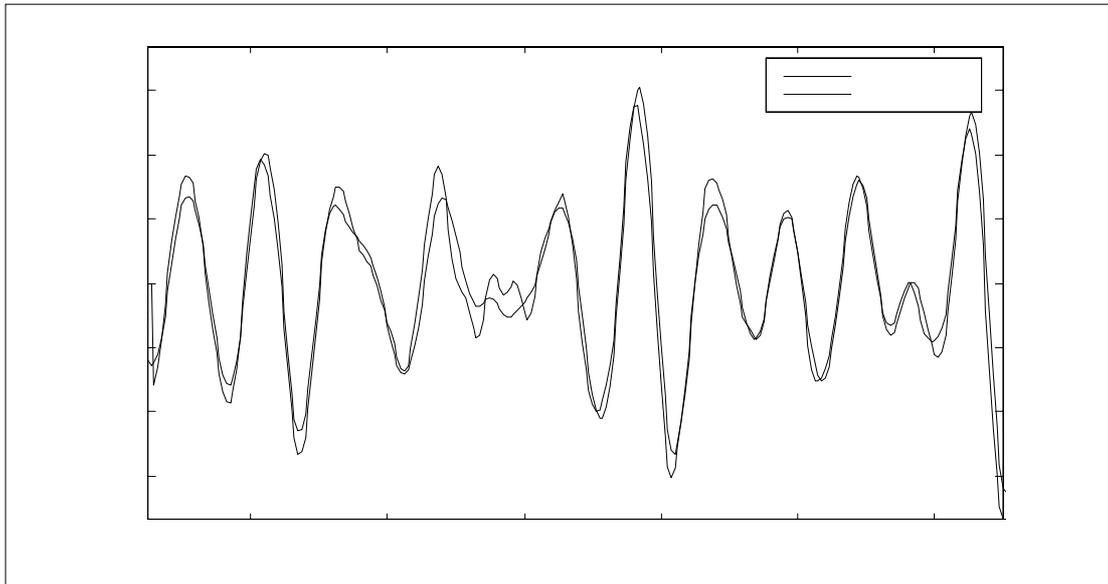


Figura 3.15 :Salida (yestp) de $G_P(s)$ comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 3.16 se muestra la salida de $G_P(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

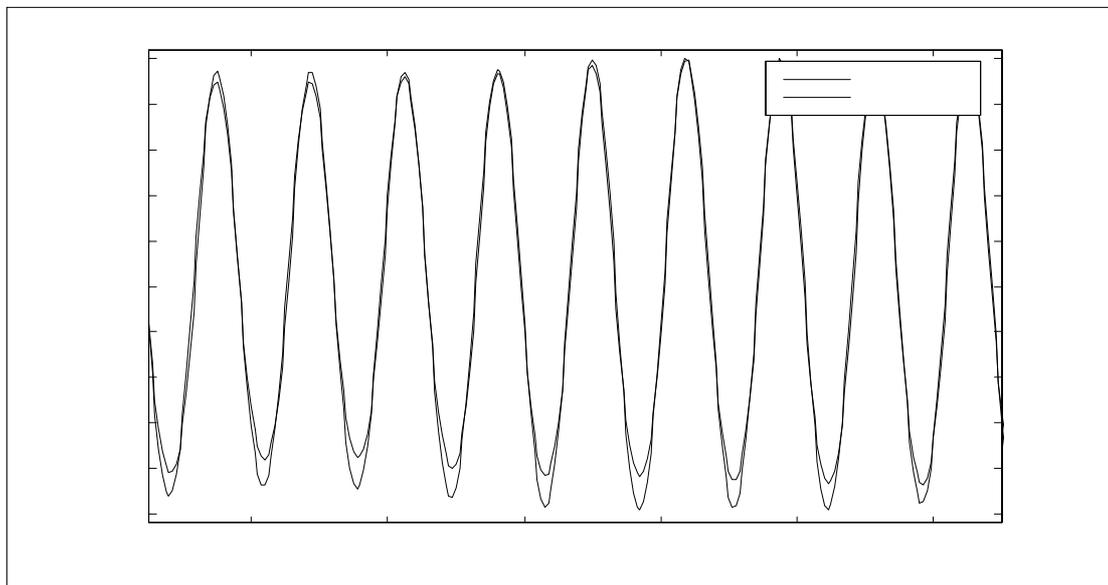


Figura 3.16 :Salida (yestp) de $G_P(s)$ comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

3.1.3 MODELO (2,3,1)

- HEAVE.

La función de transferencia del modelo es :

$$G_H(s) = \frac{0.3173 s^2 - 0.312 s + 0.7349}{s^3 + 1.351 s^2 + 1.502 s + 0.7349}$$

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia se muestran en la Tabla 3.11 :

Tabla 3.11: Intervalos de los coeficientes de $G_H(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
x ₁	0.7224	0.7349	0.7745
x ₂	1.4767	1.5015	1.5075
x ₃	1.2954	1.3506	1.3798
x ₅	-0.3653	-0.3120	0.0671
x ₆	0.1566	0.3173	0.3382

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

Tabla 3.12 : Polos y ceros de $G_H(s)$

Polos		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.32405 +	0.97017i	1.0229	0.31681
-0.32405 -	0.97017i	1.0229	0.31681
-0.70245		0.70245	1

Ceros		Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.49166 +	1.4403i	1.5219	-0.32306
0.49166 -	1.4403i	1.5219	-0.32306

En la Figura 3.17 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ y su equivalente discreto.

(a) (b)
Figura 3.17 : (a) Diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros discreto.

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

(a) (b)
Figura 3.18 : (a) Diagrama de Bode de $G_H(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_H(s)$.

En la Figura 3.19 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

Figura 3.19 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 3.20 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

Figura 3.20 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

3.2 VELOCIDAD 30 NUDOS

3.2.1 MODELO (4,6,2)

- HEAVE.

La función de transferencia del modelo es :

$$G_H(s) = \frac{102 s^4 + 52.45 s^3 + 345 s^2 + 389.9 s + 796.1}{s^6 + 686 s^5 + 1143 s^4 + 2850 s^3 + 2643 s^2 + 2256 s + 796.1}$$

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia se muestran en la Tabla 3.13 :

Tabla 3.13: Intervalos de los coeficientes de $G_H(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
x ₁	786.35	796.12	834.73
x ₂	2106.91	2255.5	2636.28
x ₃	2372.91	2642.9	2912.28
x ₄	158.25	2849.6	3321.6
x ₅	198.74	1142.8	1847.4
x ₆	684.16	685.96	708.69
x ₈	389.84	389.86	389.87
x ₉	344.958	344.96	345.22
x ₁₀	52.401	52.45	52.63
x ₁₁	93.588	102.011	102.013

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

Tabla 3.14 : Polos y ceros de $G_H(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-684.3	684.3	1
-0.22664 + 1.4826i	1.4999	0.15111
-0.22664 - 1.4826i	1.4999	0.15111
-0.34721 + 0.9387i	1.0009	0.34691
-0.34721 - 0.9387i	1.0009	0.34691
-0.51627	0.51627	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.65668 + 1.7897i	1.9064	-0.34446
0.65668 - 1.7897i	1.9064	-0.34446
-0.91376 + 1.1456i	1.4654	0.62356
-0.91376 - 1.1456i	1.4654	0.62356

En la Figura 3.21 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ y su equivalente discreto.

(a)

(b)

Figura 3.21 : (a) Diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros discreto.

En la Figura 3.22 se muestra el diagrama de Bode de $G_H(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

(a)

(b)

Figura 3.22 : (a) Diagrama de Bode de $G_H(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_H(s)$.

En la Figura 3.23 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

Figura 3.23 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 3.24 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

Figura 3.24 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

• **PITCH.**

La función de transferencia del modelo es :

$$G_p(s) = \frac{-0.1874 s^4 - 7.783 s^3 + 14.07 s^2 - 53.12 s}{s^6 + 14.03 s^5 + 36.03 s^4 + 76.12 s^3 + 99.1 s^2 + 80.41 s + 43.71}$$

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia se muestran en la Tabla 3.15 :

Tabla 3.15: Intervalos de los coeficientes de $G_P(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
x ₁	43.3167	43.7097	44.9732
x ₂	76.4909	80.4121	81.2968
x ₃	98.0999	99.1048	99.5582
x ₄	75.4898	76.1220	78.0536
x ₅	35.8425	36.0265	36.4909
x ₆	12.1459	14.0268	14.2400
x ₈	-53.6949	-53.1156	-52.9736
x ₉	13.6736	14.0725	14.1417
x ₁₀	-8.0738	-7.7832	-3.7553
x ₁₁	-0.2571	-0.1874	0.8411

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

Tabla 3.16 : Polos y ceros de $G_P(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-11.3876	11.3876	1.0000
-0.2563 + 1.5727i	1.5934	0.1608
-0.2563 - 1.5727i	1.5934	0.1608
-1.2215	1.2215	1.0000
-0.4526 + 1.0163i	1.1125	0.4068
-0.4526 - 1.0163i	1.1125	0.4068

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0	0	NaN
-43.4108	43.4108	1.0000
0.9401 + 2.3759i	2.5552	-0.3679
0.9401 - 2.3759i	2.5552	-0.3679

En la Figura 3.25 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_P(s)$ y su equivalente discreto.

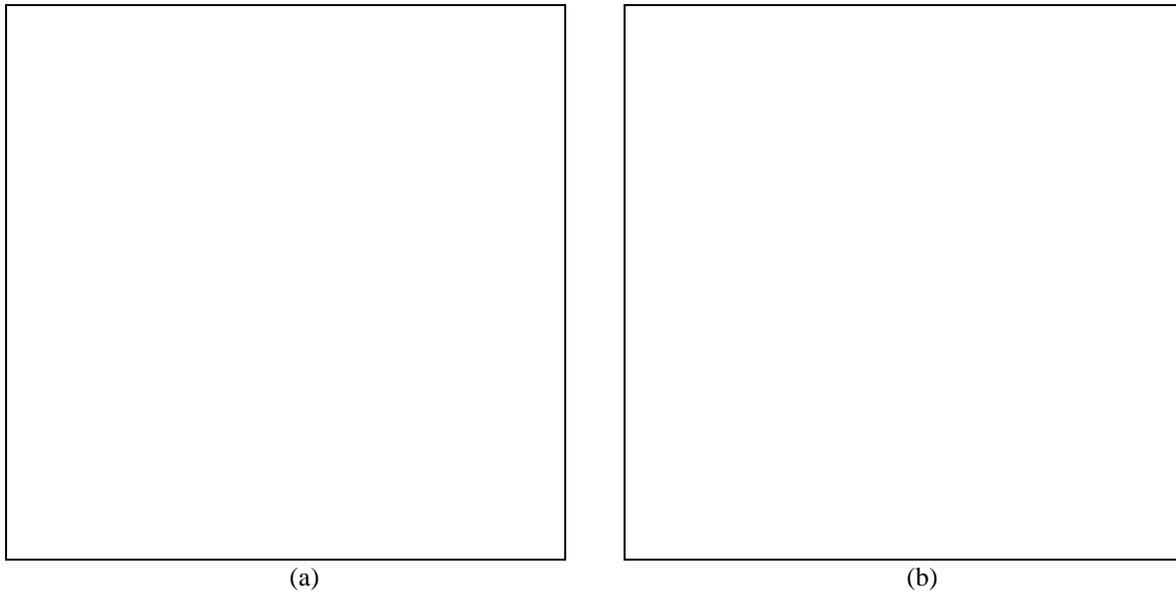


Figura 3.25 : (a) Diagrama de polos y ceros de $G_P(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros discreto.

En la Figura 3.26 se muestra el diagrama de Bode de $G_P(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

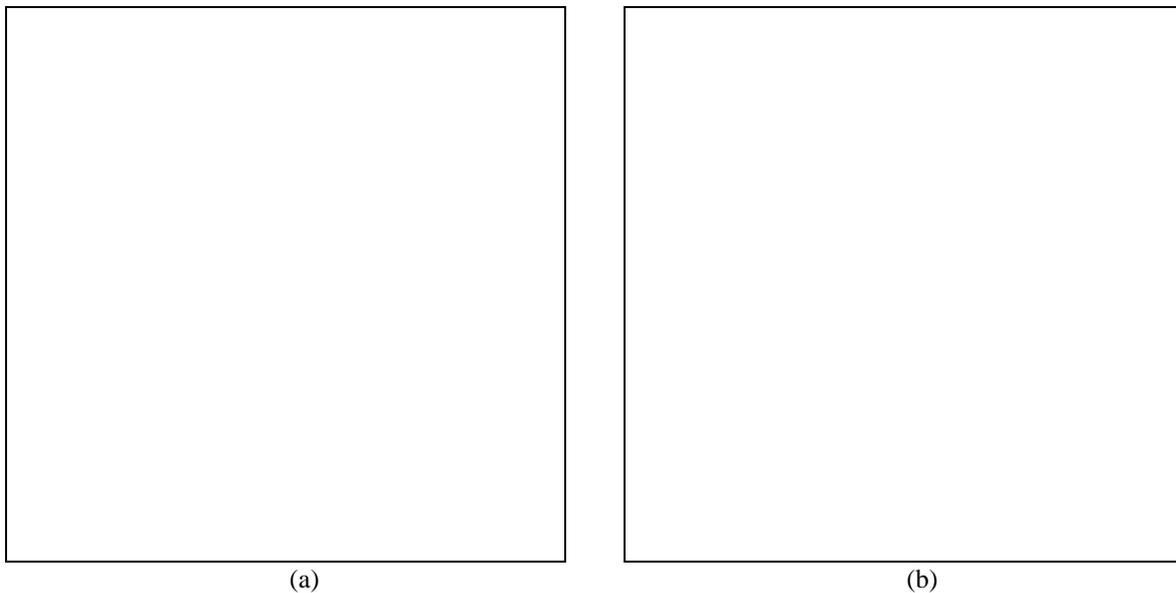


Figura 3.26 : (a) Diagrama de Bode de $G_P(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_P(s)$.

En la Figura 3.27 se muestra la salida de $G_P(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

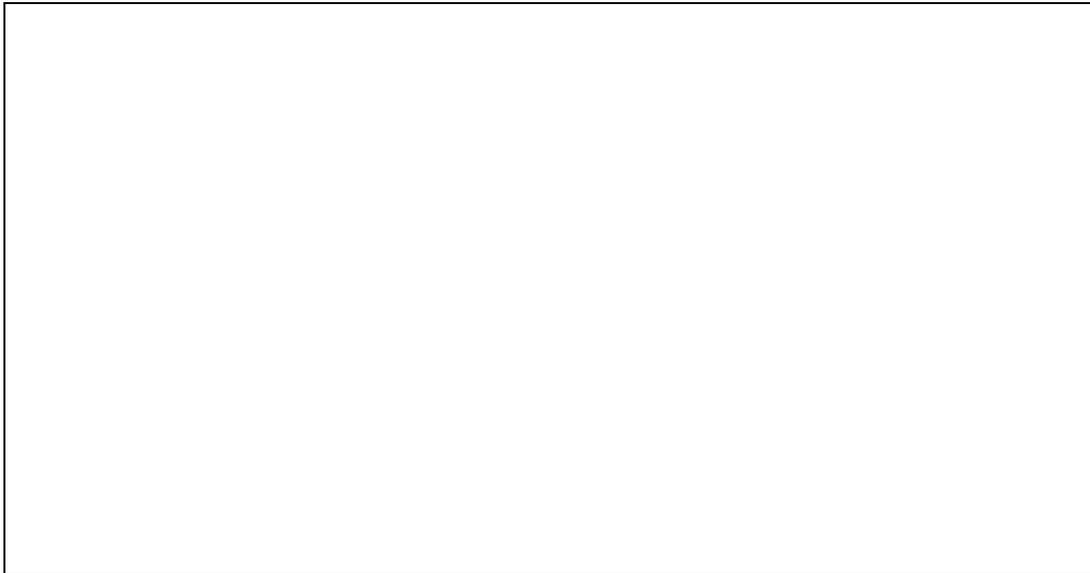


Figura 3.27 :Salida (y_{estp}) de $G_p(s)$ comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular ($SSN=5$).

En la Figura 3.28 se muestra la salida de $G_p(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

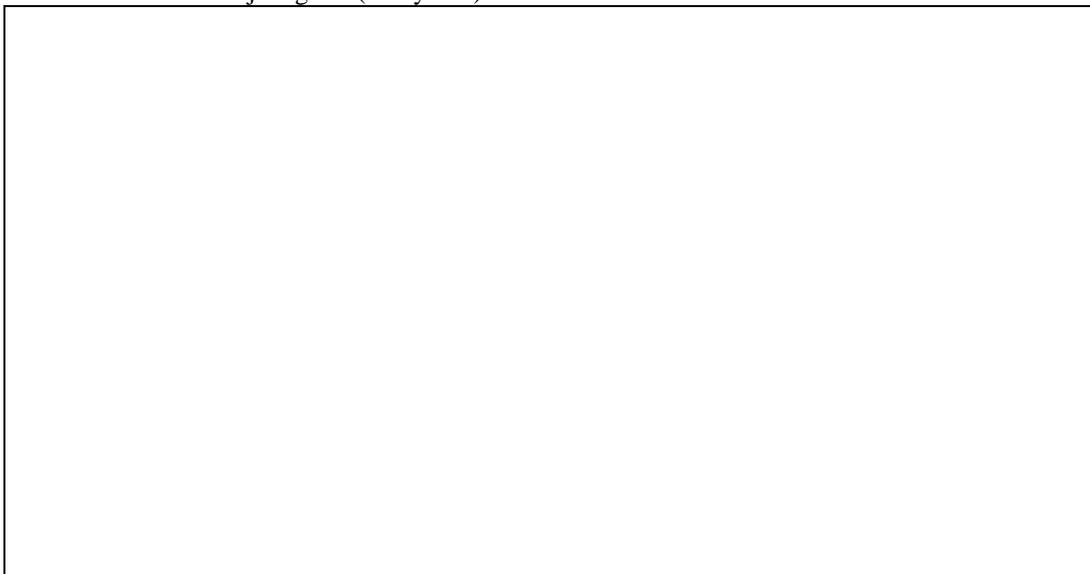


Figura 3.28 :Salida (y_{estp}) de $G_p(s)$ comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

3.2.2 MODELO (3,5,1)

• HEAVE.

La función de transferencia del modelo es :

$$G_H(s) = \frac{0.5673 s^3 + 0.4702 s^2 + s + 3.838}{s^5 + 3.625 s^4 + 7.851 s^3 + 10.54 s^2 + 8.983 s + 3.838}$$

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia se muestran en la Tabla 3.17 :

Tabla 3.17: Intervalos de los coeficientes de $G_H(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
x_1	3.7789	3.8377	4.1386
x_2	8.8746	8.9829	9.0890
x_3	10.3156	10.5421	10.6470
x_4	7.6938	7.8505	8.0491
x_5	3.5694	3.6252	3.7267
x_7	0.9782	0.9996	1.1626
x_8	0.2359	0.4702	0.5417
x_9	0.2218	0.5673	0.5856

En la Tabla 3.18 se muestran los polos y los ceros de $G_H(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.18 : Polos y ceros de $G_H(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.36025 + 1.398i	1.4437	0.24954
-0.36025 - 1.398i	1.4437	0.24954
-0.91105 + 0.93317i	1.3042	0.69857
-0.91105 - 0.93317i	1.3042	0.69857
-1.0826	1.0826	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.51116 + 1.842i	1.9116	-0.26739
0.51116 - 1.842i	1.9116	-0.26739
-1.8511	1.8511	1

En la Figura 3.29 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ y su equivalente discreto.

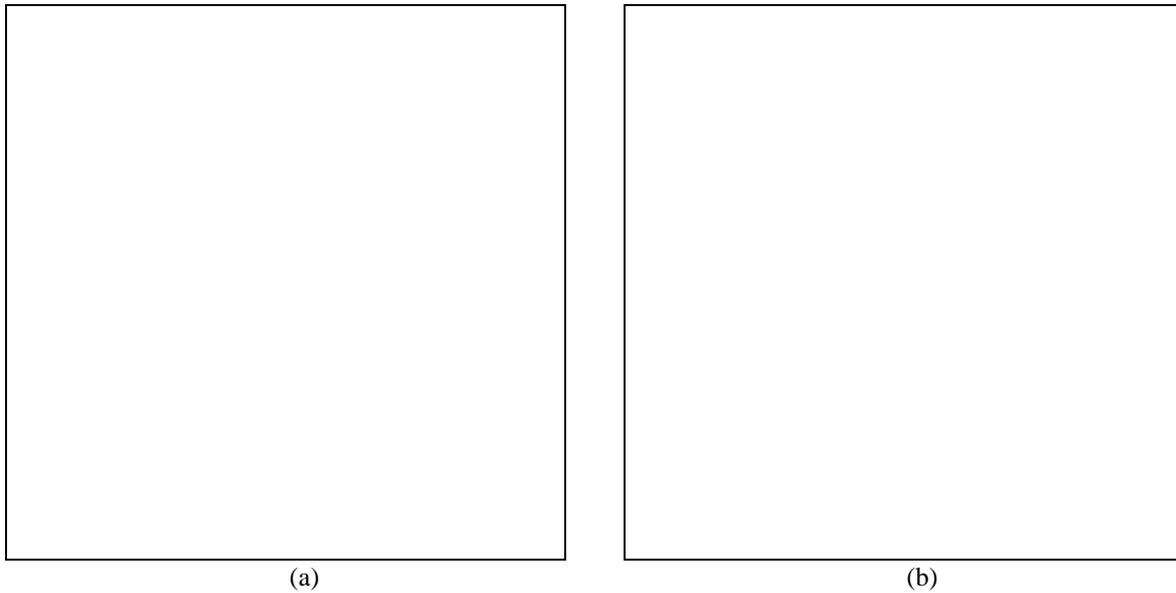


Figura 3.29 : (a) Diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros discreto.

En la Figura 3.30 se muestra el diagrama de Bode de $G_H(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

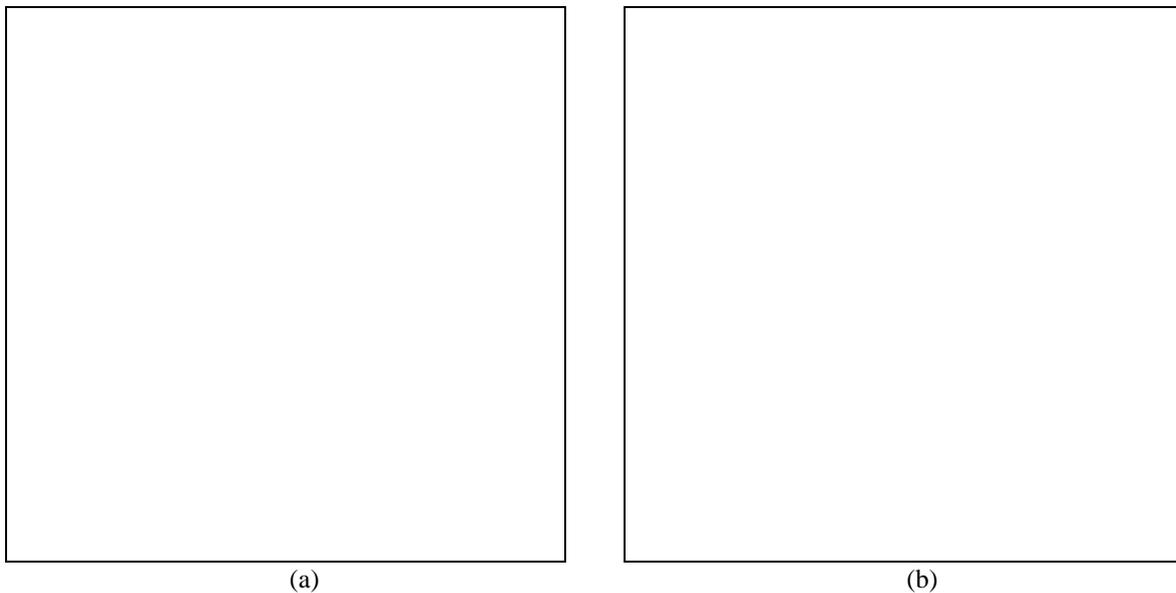


Figura 3.30 : (a) Diagrama de Bode de $G_H(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_H(s)$.

En la Figura 3.31 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

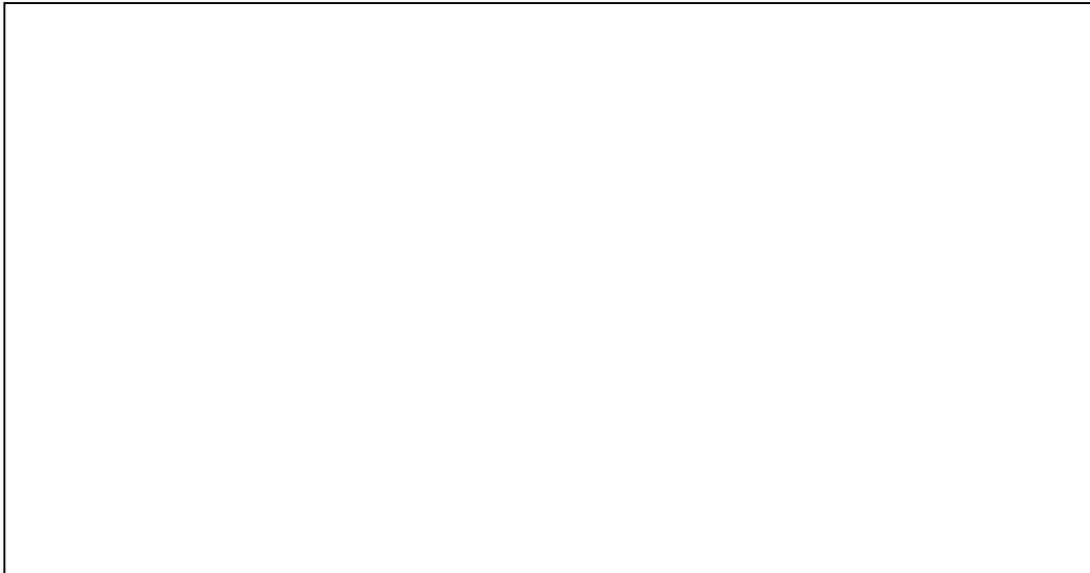


Figura 3.31 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 3.32 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

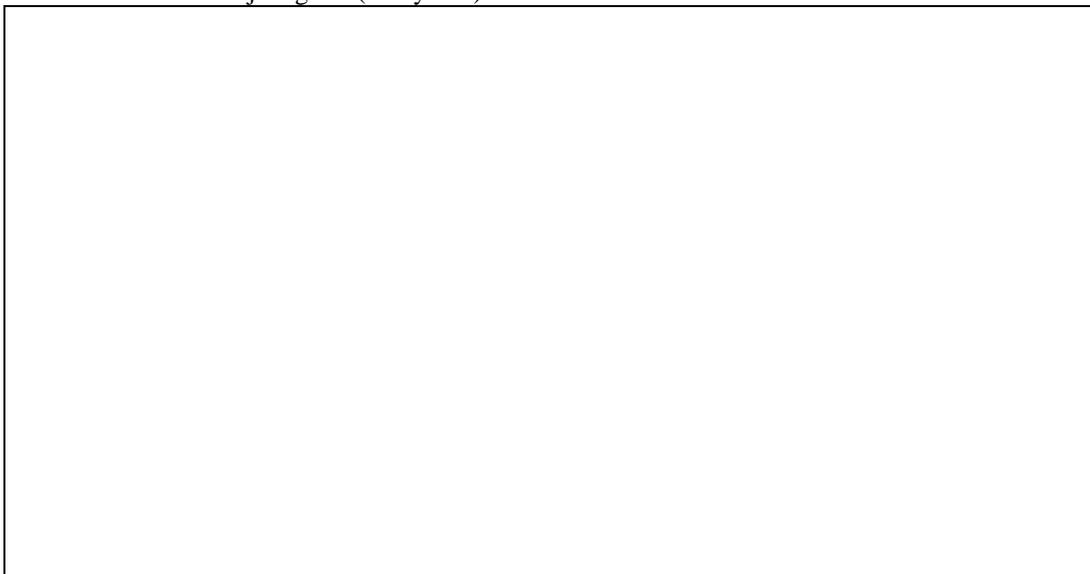


Figura 3.32 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

• **PITCH.**

La función de transferencia del modelo es :

$$G_P(s) = \frac{-0.6923 s^3 + 1.347 s^2 - 4.33 s}{s^5 + 2.51 s^4 + 5.785 s^3 + 7.596 s^2 + 6.363 s + 3.504}$$

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia se muestran en la Tabla 3.19 :

Tabla 3.19: Intervalos de los coeficientes de $G_P(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
x ₁	3.4771	3.5042	3.6231
x ₂	6.1433	6.3634	6.4247
x ₃	7.4635	7.5963	7.6293
x ₄	5.7446	5.7853	5.8718
x ₅	2.4966	2.5103	2.7144
x ₇	-4.5286	-4.3295	-4.2730
x ₈	0.6208	1.3473	1.3694
x ₉	-0.7209	-0.6923	-0.3150

En la Tabla 3.20 se muestran los polos y los ceros de $G_P(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.20 : Polos y ceros de $G_P(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.2536 + 1.5728i	1.5931	0.1592
-0.2536 - 1.5728i	1.5931	0.1592
-1.1129	1.1129	1.0000
-0.4451 + 1.0210i	1.1138	0.3996
-0.4451 - 1.0210i	1.1138	0.3996

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0	0	NaN
0.9731 + 2.3037i	2.5007	-0.3891
0.9731 - 2.3037i	2.5007	-0.3891

En la Figura 3.33 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_P(s)$ y su equivalente discreto.

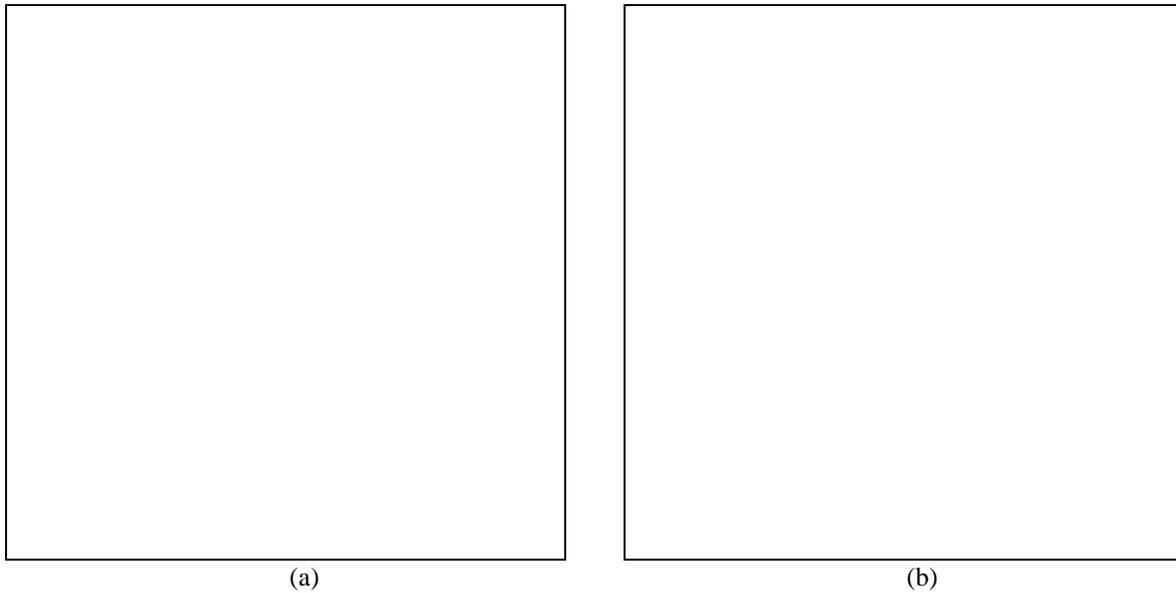


Figura 3.33 : (a) Diagrama de polos y ceros de $G_P(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros discreto.

En la Figura 3.34 se muestra el diagrama de Bode de $G_P(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

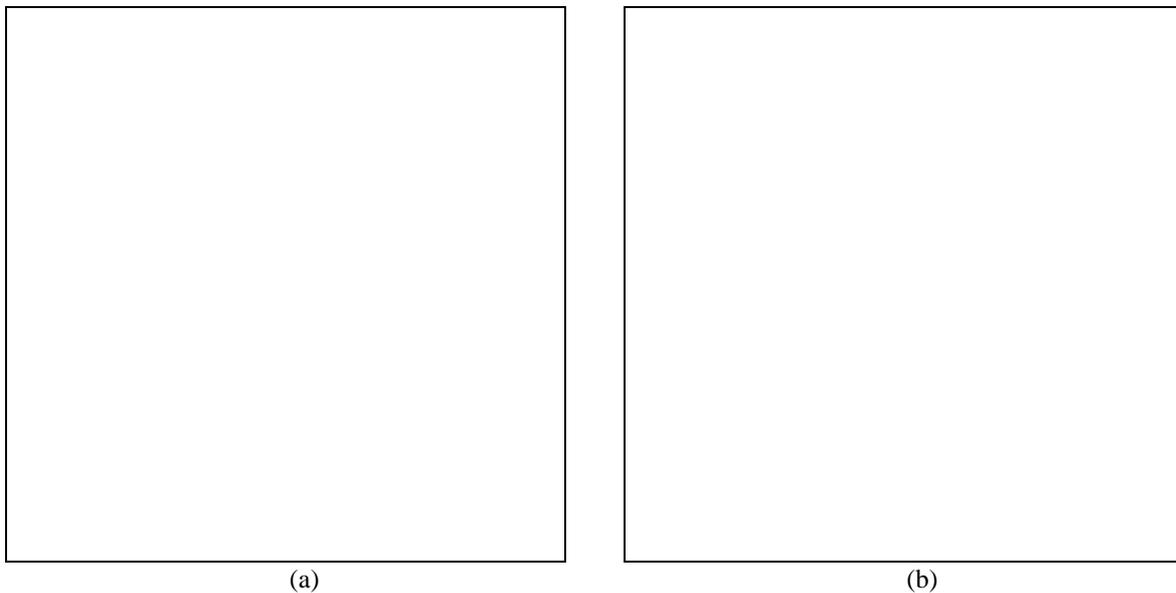


Figura 3.34 : (a) Diagrama de Bode de $G_P(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_P(s)$.

En la Figura 3.35 se muestra la salida de $G_P(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

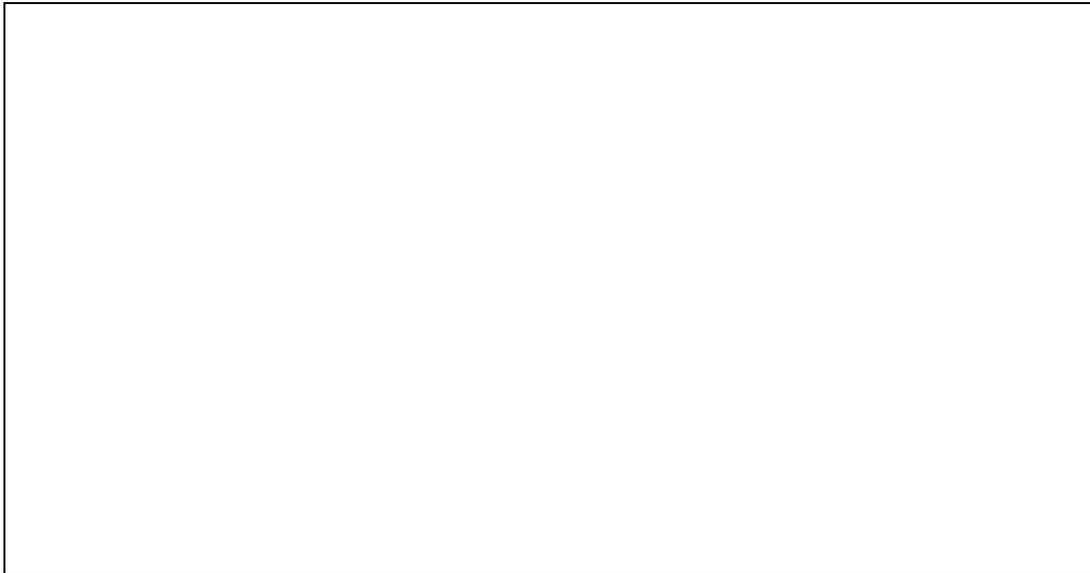


Figura 3.35 :Salida (y_{estp}) de $G_p(s)$ comparada con la salida ($pitch$) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular ($SSN=5$).

En la Figura 3.36 se muestra la salida de $G_p(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

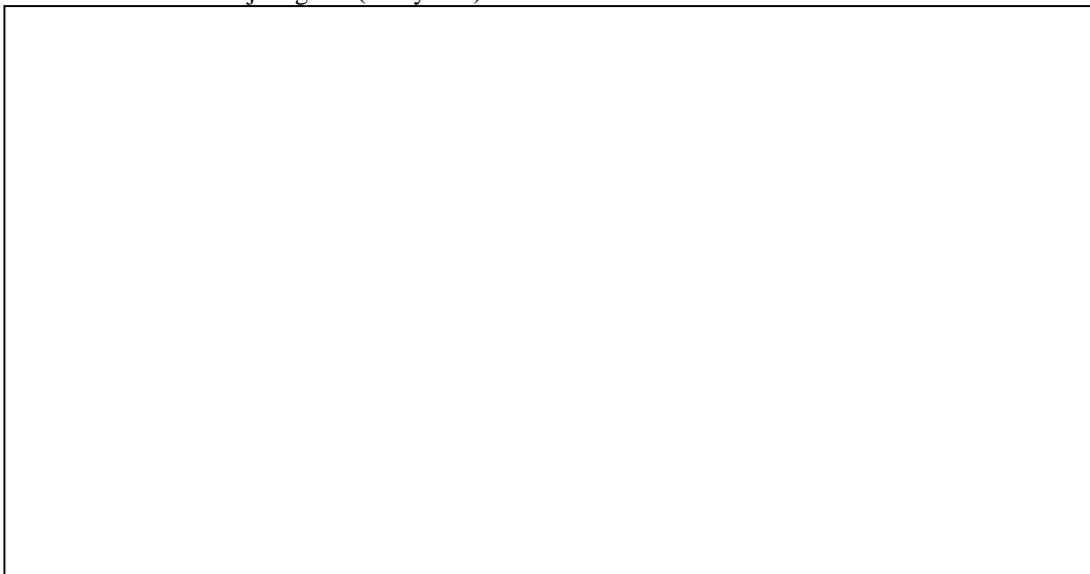


Figura 3.36 :Salida (y_{estp}) de $G_p(s)$ comparada con la salida ($pitch$) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

3.2.3 MODELO (2,3,1)

• **HEAVE.**

La función de transferencia del modelo es :

$$G_H(s) = \frac{0.3888 s^2 - 0.5355 s + 1.167}{s^3 + 1.395 s^2 + 2.001 s + 1.167}$$

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia se muestran en la Tabla 3.21 :

Tabla 3.21: Intervalos de los coeficientes de $G_H(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
x ₁	1.1382	1.1668	1.2137
x ₂	1.9482	2.0013	2.0318
x ₃	1.2806	1.3949	1.4186
x ₅	-0.6387	-0.5355	0.0878
x ₆	0.1578	0.3888	0.5006

En la Tabla 3.22 se muestran los polos y los ceros de $G_H(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.22 : Polos y ceros de $G_H(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.31356 + 1.1922i	1.2328	0.25435
-0.31356 - 1.1922i	1.2328	0.25435
-0.76778	0.76778	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.68873 + 1.5897i	1.7324	-0.39755
0.68873 - 1.5897i	1.7324	-0.39755

En la Figura 3.37 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ y su equivalente discreto.

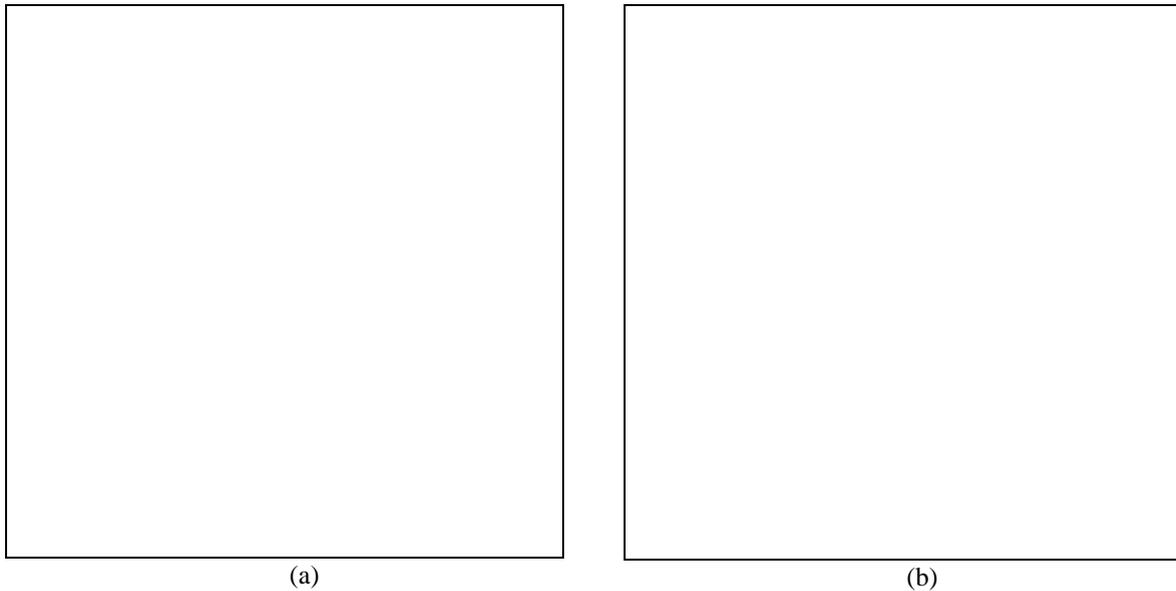


Figura 3.37 : (a) Diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros discreto.

En la Figura 3.38 se muestra el diagrama de Bode de $G_H(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

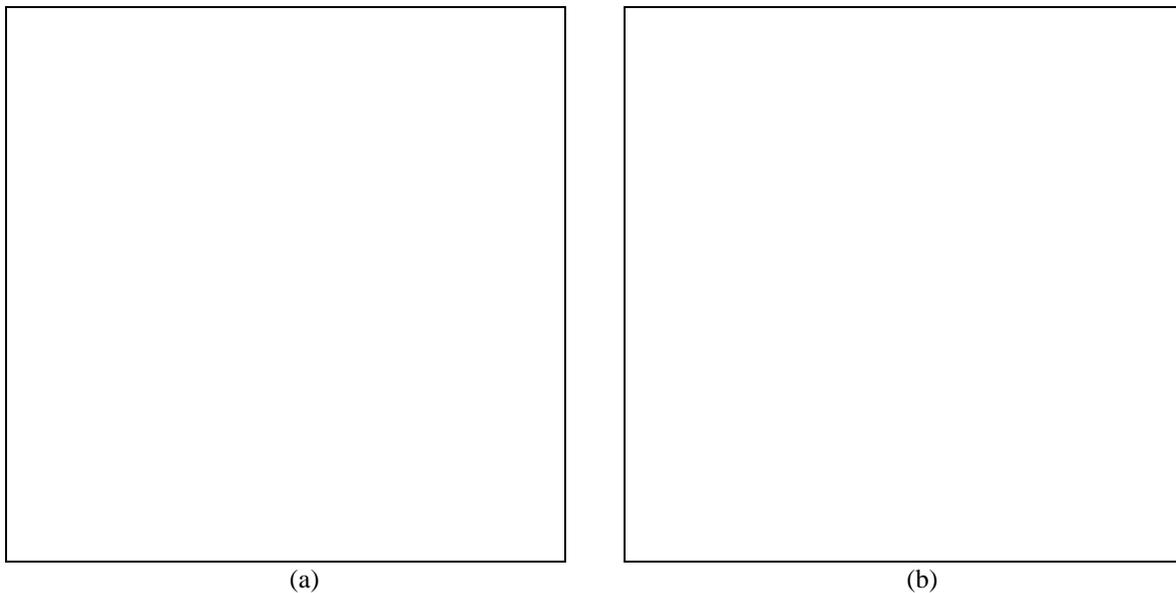


Figura 3.38 : (a) Diagrama de Bode de $G_H(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_H(s)$.

En la Figura 3.39 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

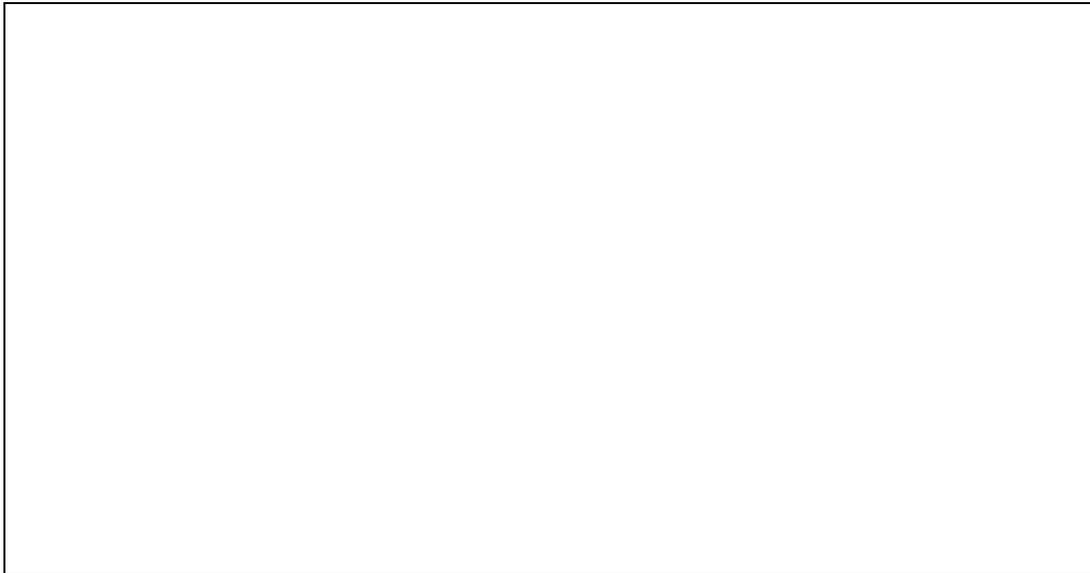


Figura 3.39 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 3.40 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

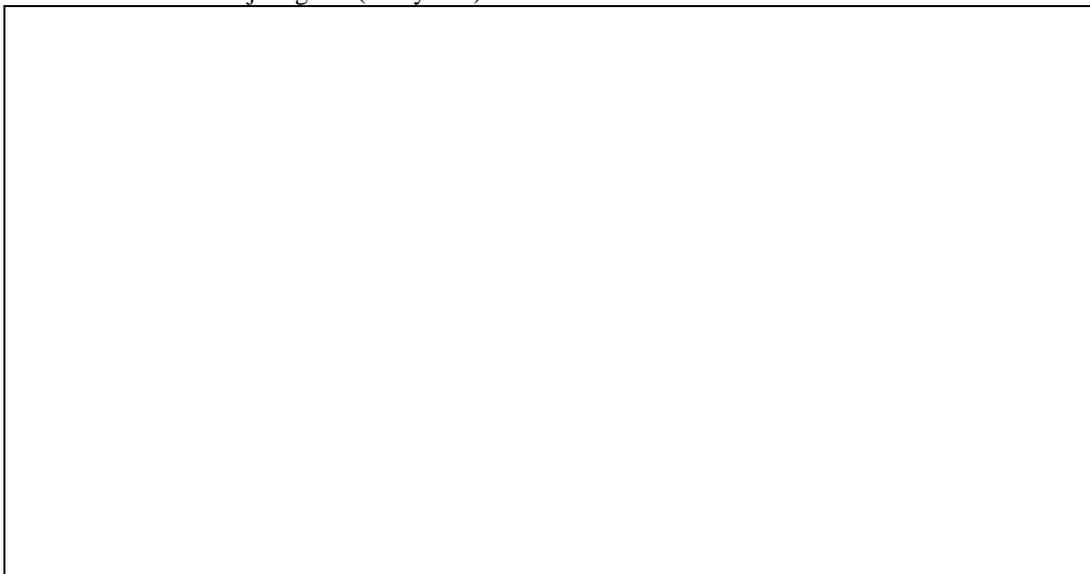


Figura 3.40 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

3.3 VELOCIDAD 40 NUDOS

3.3.1 MODELO (4,6,2)

- **HEAVE.**

La función de transferencia del modelo es :

$$G_H(s) = \frac{3.219 s^4 - 0.9423 s^3 + 26.03 s^2 - 6.78 s + 80.35}{s^6 + 16.43 s^5 + 42.62 s^4 + 106.6 s^3 + 142.9 s^2 + 142.6 s + 80.35}$$

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia se muestran en la Tabla 3.23 :

Tabla 3.23: Intervalos de los coeficientes de $G_H(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
x ₁	79.956	80.353	83.498
x ₂	139.79	142.61	143.09
x ₃	139.63	142.94	144.56
x ₄	106.31	106.59	109.02
x ₅	35.887	42.623	43.093
x ₆	12.985	16.432	16.521
x ₈	-6.8185	-6.78	-6.2867
x ₉	25.99	26.027	26.359
x ₁₀	-5.1478	-0.94233	-0.81183
x ₁₁	-0.14227	3.2191	3.281

En la Tabla 3.24 se muestran los polos y los ceros de $G_H(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.24 : Polos y ceros de $G_H(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-13.862	13.862	1
-0.24848 + 1.7059i	1.7239	0.14414
-0.24848 - 1.7059i	1.7239	0.14414
-0.52888 + 1.2811i	1.386	0.3816
-0.52888 - 1.2811i	1.386	0.3816
-1.0154	1.0154	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.62307 + 2.2009i	2.2874	0.2724
-0.62307 - 2.2009i	2.2874	0.2724
0.76944 + 2.0442i	2.1842	-0.35227
0.76944 - 2.0442i	2.1842	-0.35227

En la Figura 3.41 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ y su equivalente discreto.

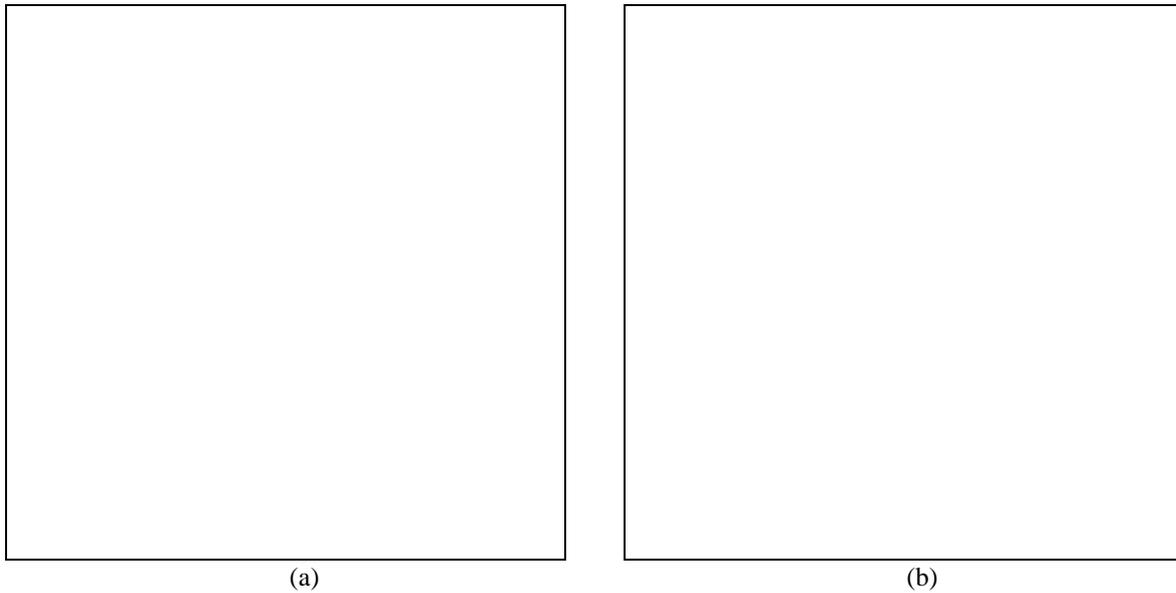


Figura 3.41 : (a) Diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros discreto.

En la Figura 3.42 se muestra el diagrama de Bode de $G_H(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

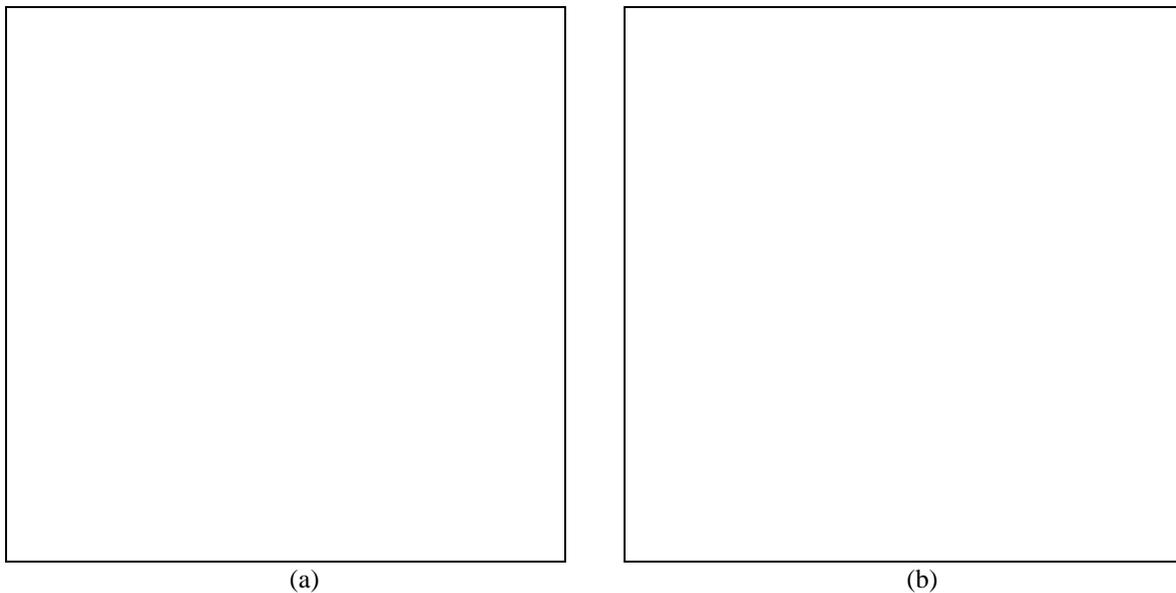


Figura 3.42 : (a) Diagrama de Bode de $G_H(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_H(s)$.

En la Figura 3.43 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

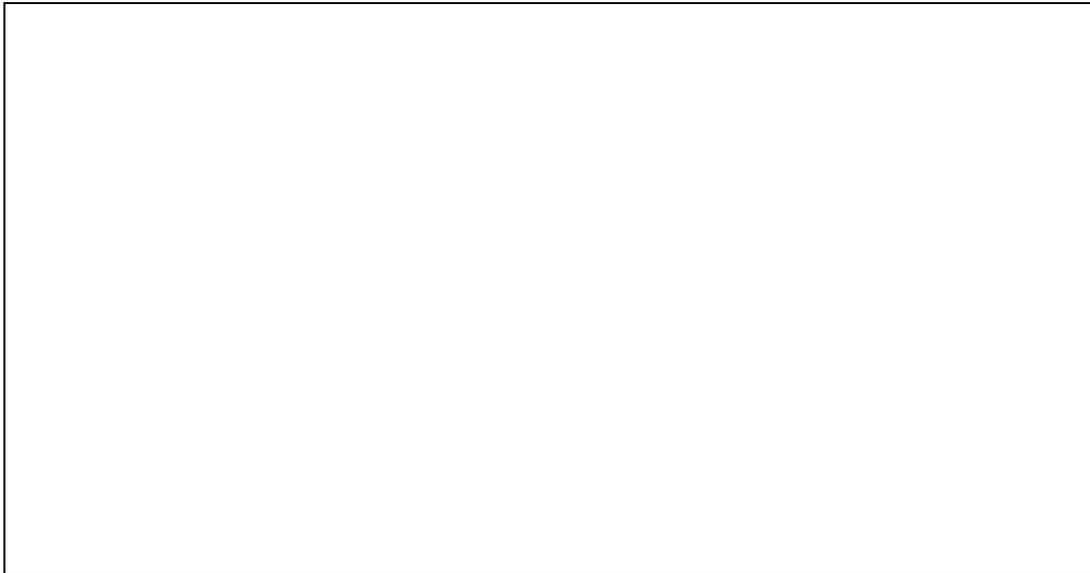


Figura 3.43 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 3.44 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

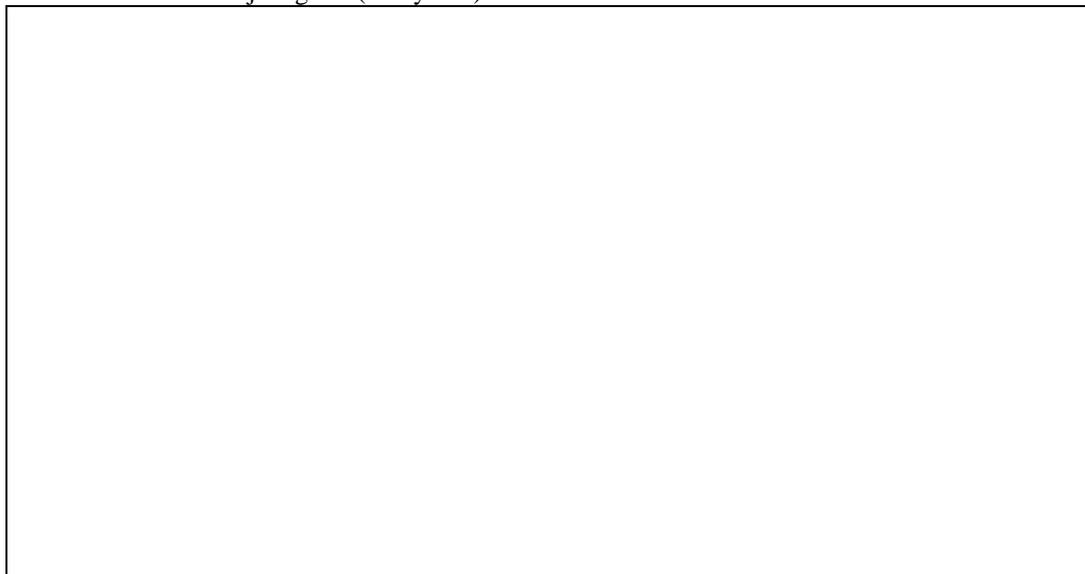


Figura 3.44 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

• **PITCH.**

La función de transferencia del modelo es :

$$G_p(s) = \frac{0.5381 s^4 - 6.051 s^3 + 13.21 s^2 - 52.58 s}{s^6 + 9.855 s^5 + 28.74 s^4 + 63.99 s^3 + 91.84 s^2 + 83.73 s + 50.08}$$

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia se muestran en la Tabla 3.25 :

Tabla 3.25: Intervalos de los coeficientes de $G_p(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
x_1	49.7092	50.0820	50.8714
x_2	80.7051	83.7317	84.3151
x_3	91.0316	91.8400	92.4220
x_4	63.4536	63.9938	66.0783
x_5	28.3122	28.7385	28.9592
x_6	6.1900	9.8546	9.9524
x_8	-53.0778	-52.5766	-52.4881
x_9	12.5582	13.2145	13.4731
x_{10}	-6.7964	-6.0509	-4.5958
x_{11}	0.2533	0.5381	2.7487

En la Tabla 3.26 se muestran los polos y los ceros de $G_p(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.26 : Polos y ceros de $G_p(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-6.7347	6.7347	1.0000
-1.4468	1.4468	1.0000
-0.2722 + 1.6956i	1.7173	0.1585
-0.2722 - 1.6956i	1.7173	0.1585
-0.5644 + 1.1935i	1.3202	0.4275
-0.5644 - 1.1935i	1.3202	0.4275

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0	0	NaN
9.7535	9.7535	-1.0000
0.7453 + 3.0760i	3.1650	-0.2355
0.7453 - 3.0760i	3.1650	-0.2355

En la Figura 3.45 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_p(s)$ y su equivalente discreto.

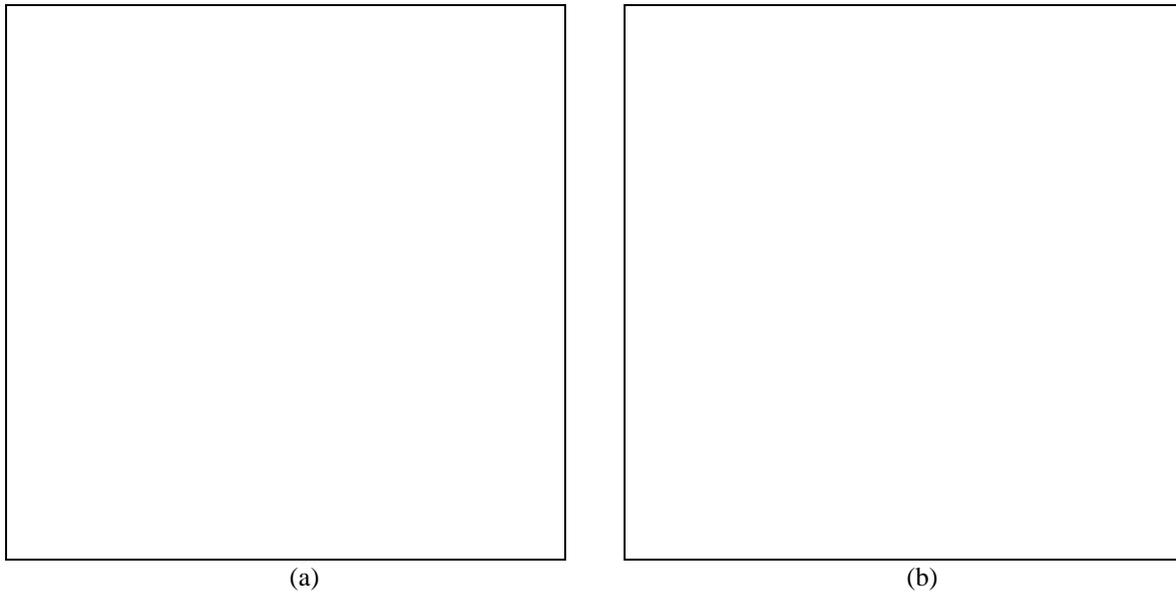


Figura 3.45 : (a) Diagrama de polos y ceros de $G_P(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros discreto.

En la Figura 3.46 se muestra el diagrama de Bode de $G_P(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

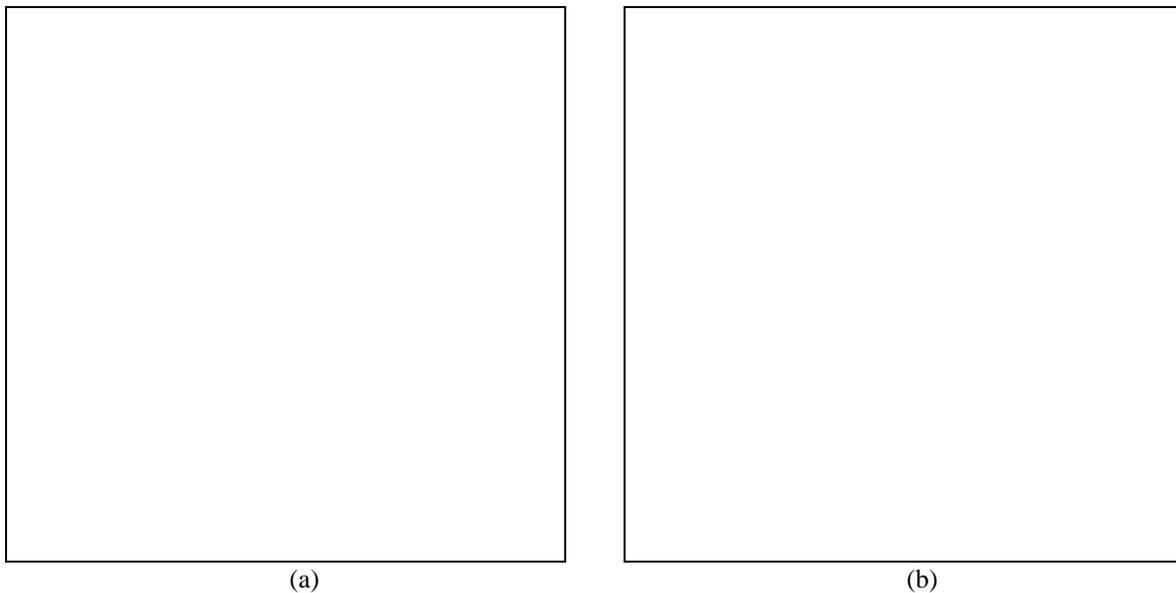


Figura 3.46 : (a) Diagrama de Bode de $G_P(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_P(s)$.

En la Figura 3.47 se muestra la salida de $G_P(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

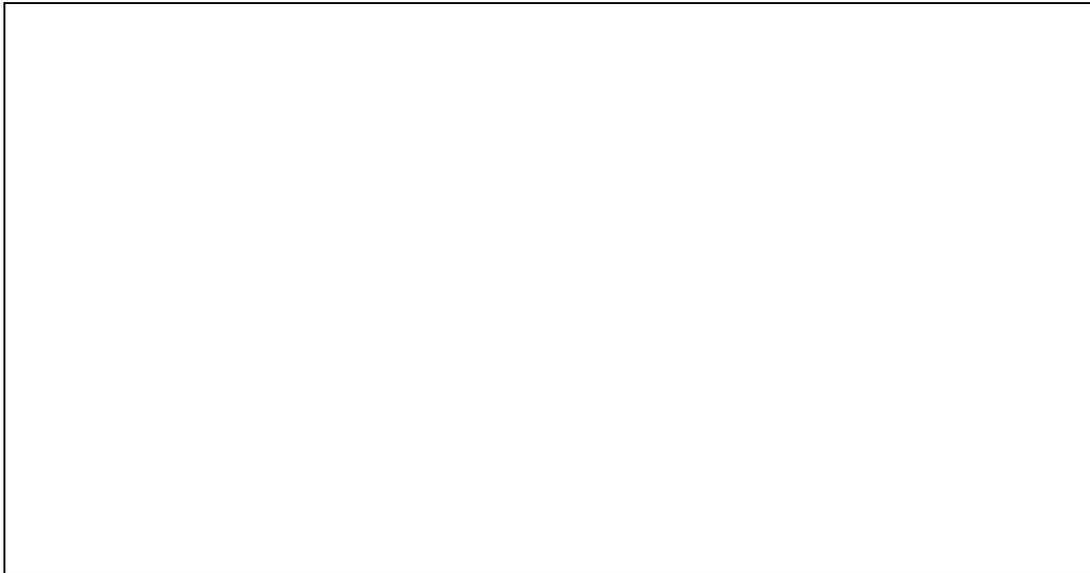


Figura 3.47 :Salida (y_{estp}) de $G_p(s)$ comparada con la salida ($pitch$) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular ($SSN=5$).

En la Figura 3.48 se muestra la salida de $G_p(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

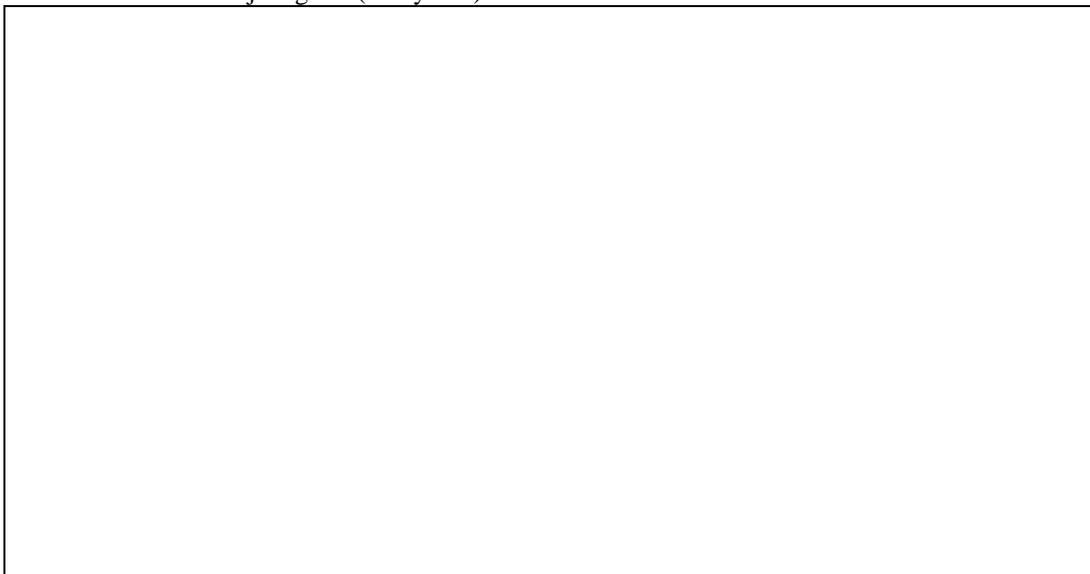


Figura 3.48 :Salida (y_{estp}) de $G_p(s)$ comparada con la salida ($pitch$) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

3.3.2 MODELO (3,5,1)

• HEAVE.

La función de transferencia del modelo es :

$$G_H(s) = \frac{0.1805 s^3 + 0.9628 s^2 - 0.2501 s + 6.226}{s^5 + 2.943 s^4 + 8.243 s^3 + 11.16 s^2 + 12.03 s + 6.226}$$

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia se muestran en la Tabla 3.27 :

Tabla 3.27: Intervalos de los coeficientes de $G_H(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
x ₁	6.1495	6.2262	6.6020
x ₂	11.7343	12.0333	12.1025
x ₃	10.9417	11.1643	11.3218
x ₄	8.1568	8.2429	8.8908
x ₅	2.5514	2.9431	2.9683
x ₇	-0.2881	-0.2501	0.0948
x ₈	0.2691	0.9628	1.8335
x ₉	-0.6048	0.1805	0.2006

En la Tabla 3.28 se muestran los polos y los ceros de $G_H(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.28 : Polos y ceros de $G_H(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.49047 + 1.592i	1.6659	0.29442
-0.49047 - 1.592i	1.6659	0.29442
-0.54863 + 1.5143i	1.6106	0.34063
-0.54863 - 1.5143i	1.6106	0.34063
-0.86487	0.86487	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-6.3949	6.3949	1
0.53014 + 2.2613i	2.3226	-0.22825
0.53014 - 2.2613i	2.3226	-0.22825

En la Figura 3.49 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ y su equivalente discreto.

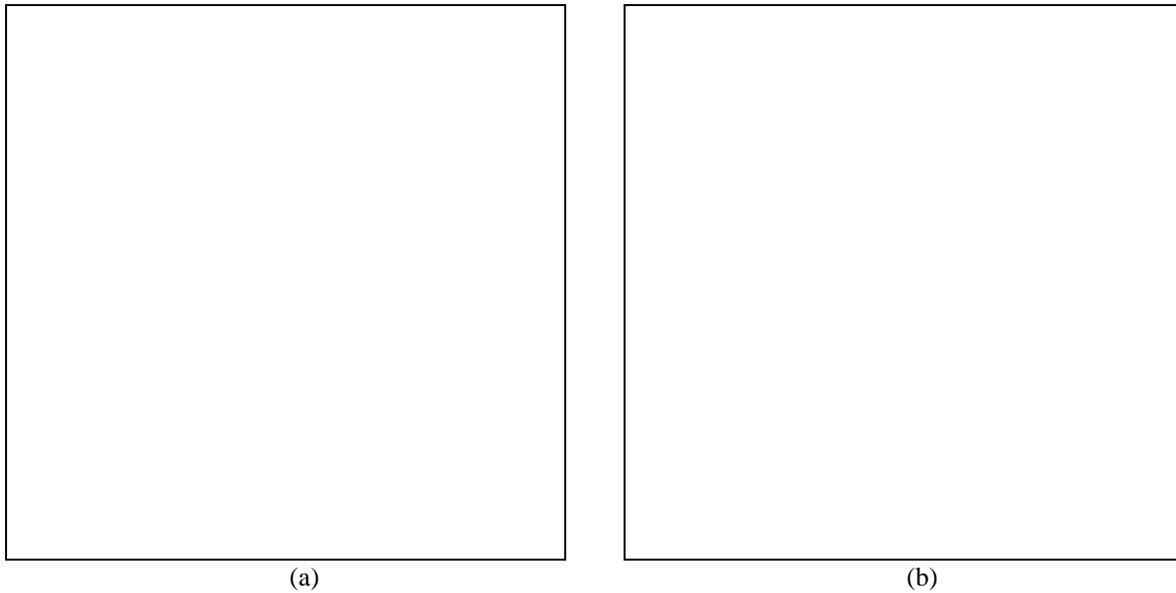


Figura 3.49 : (a) Diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros discreto.

En la Figura 3.50 se muestra el diagrama de Bode de $G_H(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

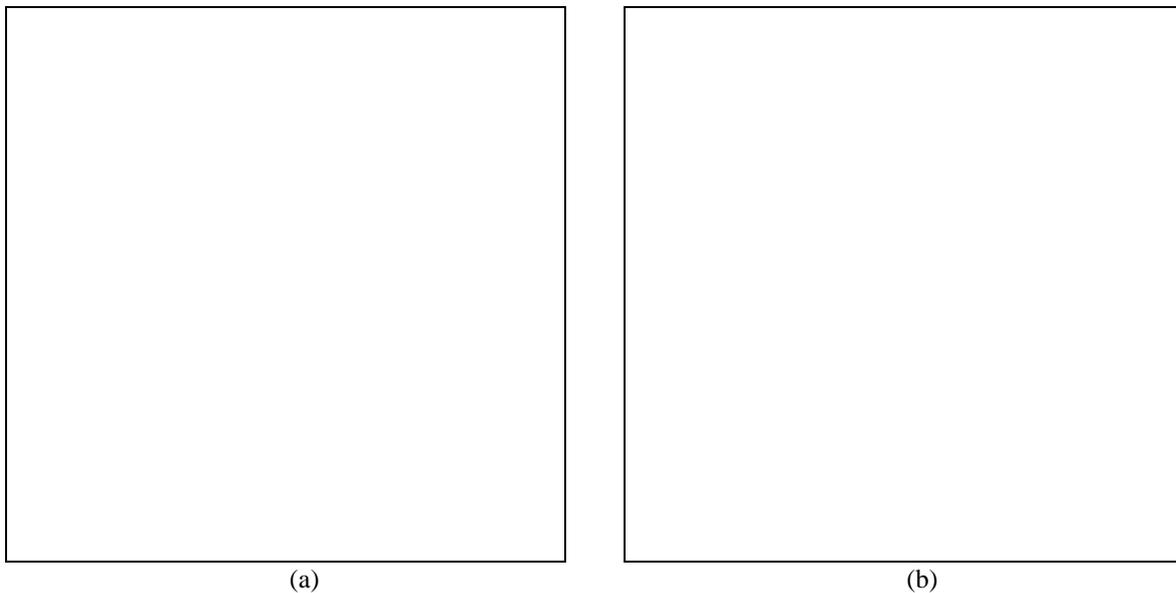


Figura 3.50 : (a) Diagrama de Bode de $G_H(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_H(s)$.

En la Figura 3.51 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

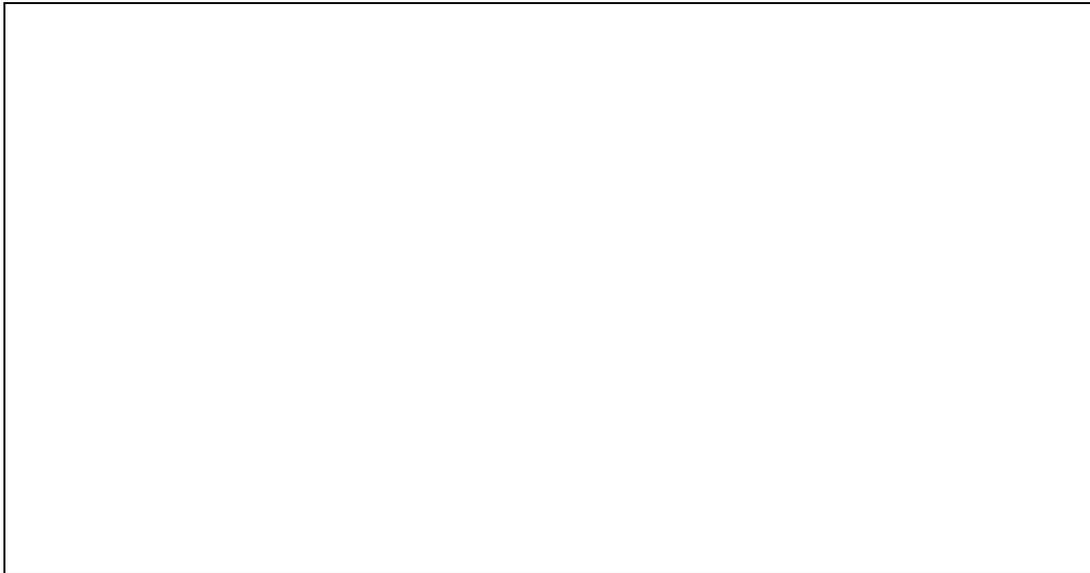


Figura 3.51 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 3.52 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

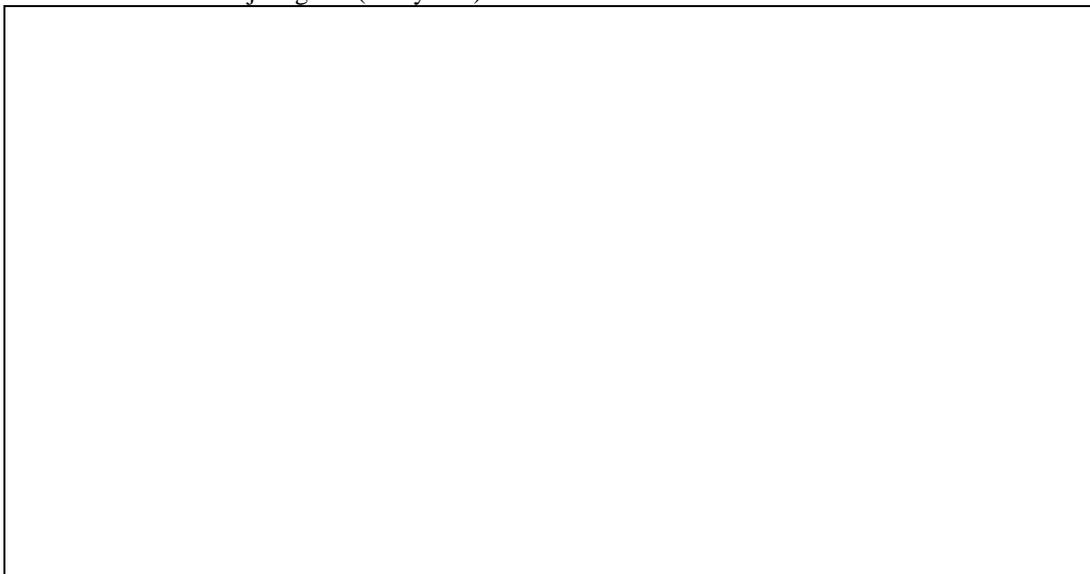


Figura 3.52 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

• **PITCH.**

La función de transferencia del modelo es :

$$G_P(s) = \frac{-0.6267 s^3 + 1.433 s^2 - 5.733 s}{s^5 + 2.545 s^4 + 6.766 s^3 + 9.149 s^2 + 9.039 s + 5.109}$$

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia se muestran en la Tabla 3.29 :

Tabla 3.29: Intervalos de los coeficientes de $G_P(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
x ₁	5.0513	5.1090	5.2387
x ₂	8.7798	9.0389	9.1053
x ₃	9.0227	9.1493	9.9176
x ₄	6.7248	6.7665	7.7823
x ₅	-0.2275	2.5446	2.7330
x ₇	-5.9603	-5.7327	-5.3750
x ₈	-0.3138	1.4332	1.5152
x ₉	-1.9293	-0.6267	-0.3257

En la Tabla 3.30 se muestran los polos y los ceros de $G_P(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.30 : Polos y ceros de $G_P(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.2616 + 1.7010i	1.7210	0.1520
-0.2616 - 1.7010i	1.7210	0.1520
-0.5109 + 1.2102i	1.3136	0.3890
-0.5109 - 1.2102i	1.3136	0.3890
-0.9996	0.9996	1.0000

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0	0	NaN
1.1434 + 2.7999i	3.0244	-0.3780
1.1434 - 2.7999i	3.0244	-0.3780

En la Figura 3.53 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_P(s)$ y su equivalente discreto.

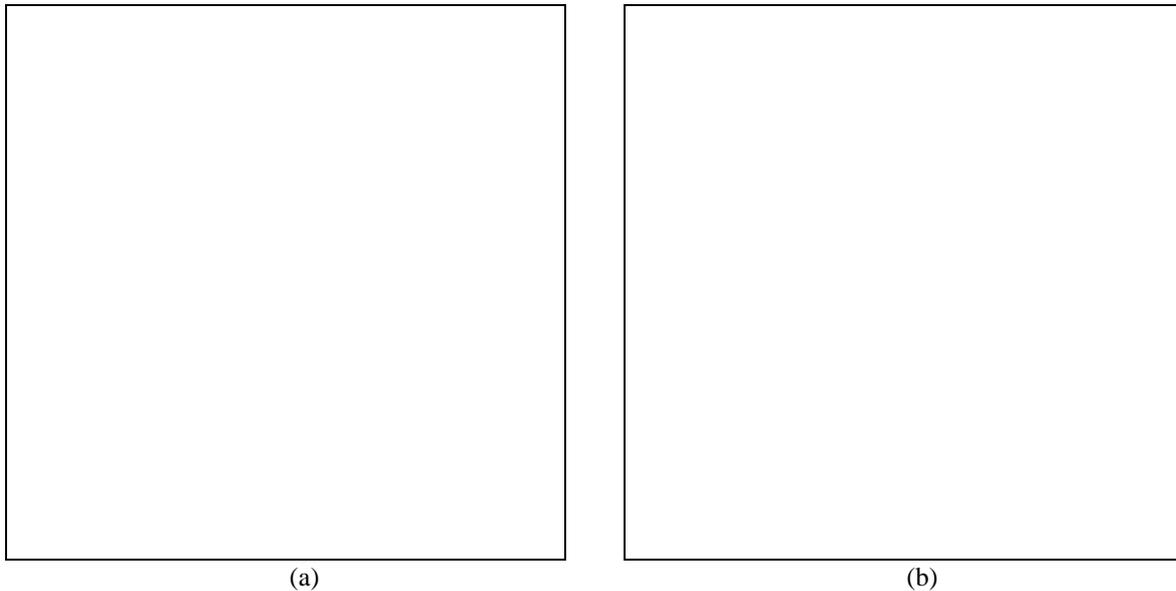


Figura 3.53 : (a) Diagrama de polos y ceros de $G_P(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros discreto.

En la Figura 3.54 se muestra el diagrama de Bode de $G_P(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

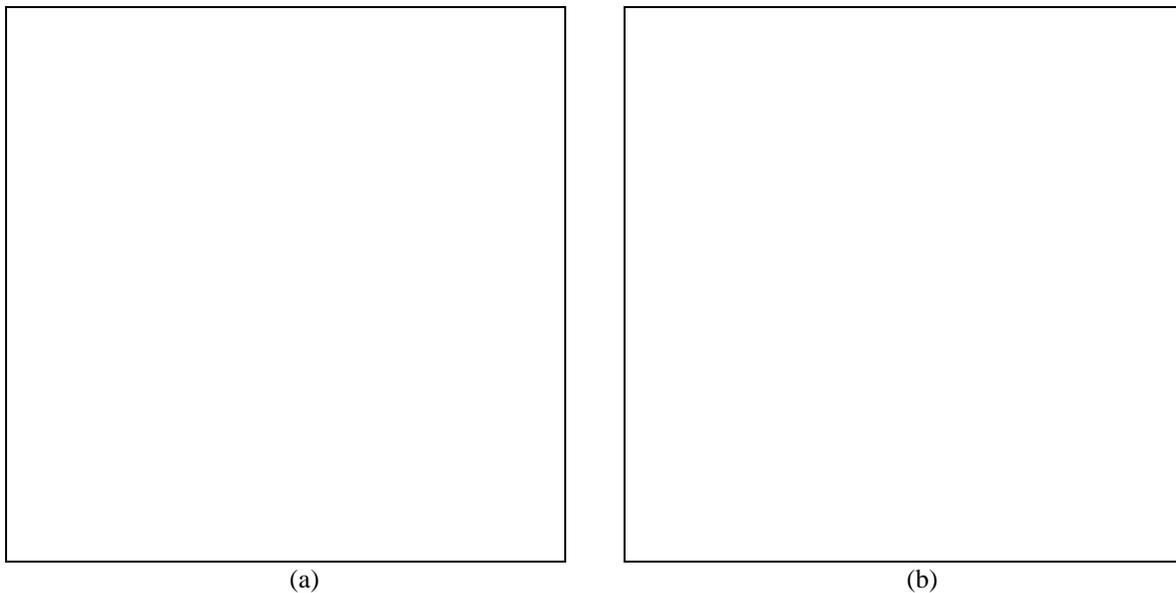


Figura 3.54 : (a) Diagrama de Bode de $G_P(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_P(s)$.

En la Figura 3.55 se muestra la salida de $G_P(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

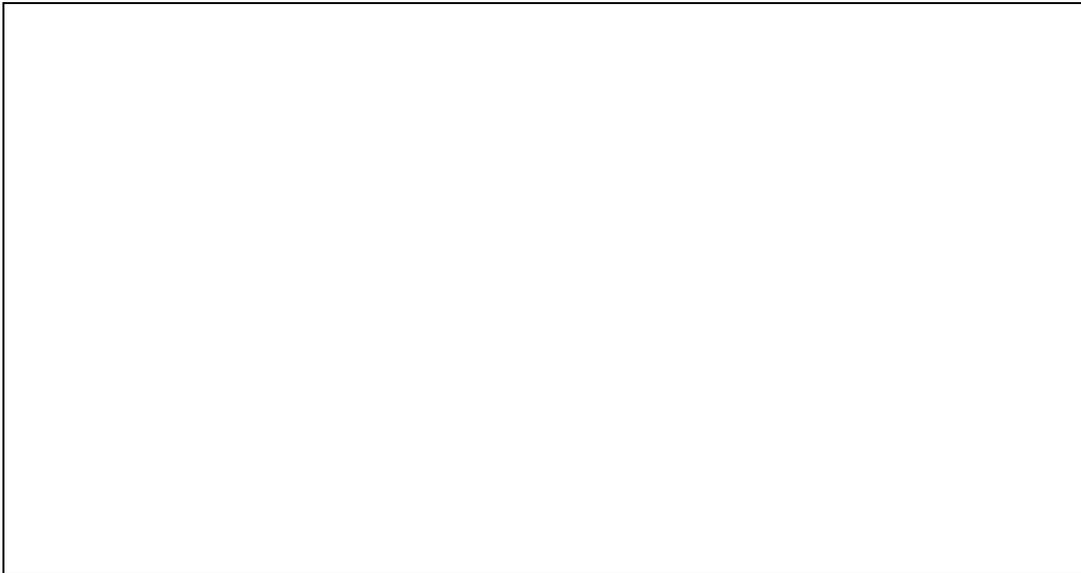


Figura 3.55 :Salida (yestp) de $G_p(s)$ comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular (SSN=5).

En la Figura 3.56 se muestra la salida de $G_p(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

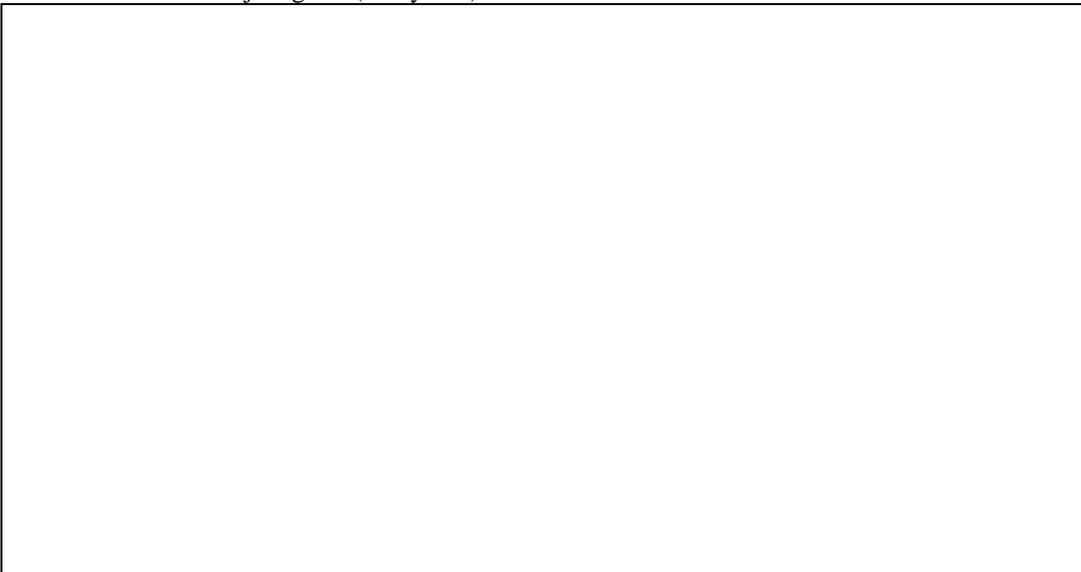


Figura 3.56 :Salida (yesth) de $G_p(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

3.3.3 MODELO (2,3,1)

- HEAVE.

La función de transferencia del modelo es :

$$G_H(s) = \frac{0.4135 s^2 - 0.7417 s + 1.596}{s^3 + 1.402 s^2 + 2.426 s + 1.596}$$

Los intervalos para los coeficientes de la función de transferencia se muestran en la Tabla 3.31 :

Tabla 3.31: Intervalos de los coeficientes de $G_H(s)$

x	Extremo Inferior	Valor nominal	Extremo Superior
x_1	1.5521	1.5963	1.6669
x_2	2.3452	2.4262	2.4728
x_3	1.2492	1.4024	1.4650
x_5	-0.8547	-0.7417	-0.0448
x_6	-0.0941	0.4135	0.5801

En la Tabla 3.32 se muestran los polos y los ceros de $G_H(s)$ junto con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento.

Tabla 3.32 : Polos y ceros de $G_H(s)$

Polos	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
-0.29158 + 1.3651i	1.3959	0.20889
-0.29158 - 1.3651i	1.3959	0.20889
-0.81928	0.81928	1

Ceros	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
0.89677 + 1.7482i	1.9648	-0.45643
0.89677 - 1.7482i	1.9648	-0.45643

En la Figura 3.57 se muestra el diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ y su equivalente discreto.

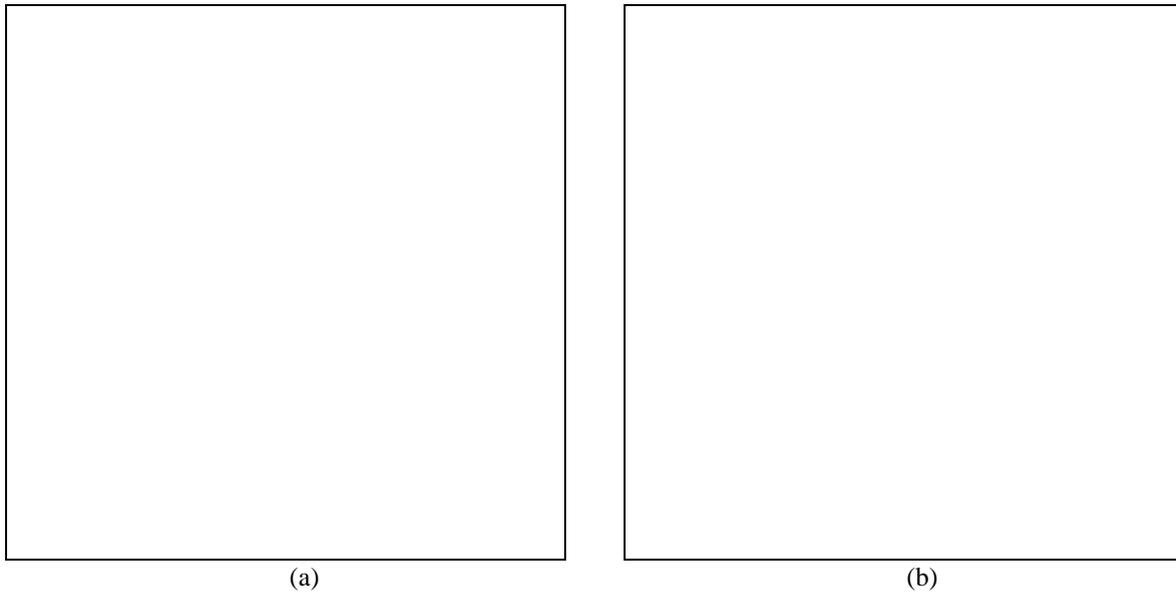


Figura 3.57 : (a) Diagrama de polos y ceros de $G_H(s)$ (b) Diagrama de polos y ceros discreto.

En la Figura 3.58 se muestra el diagrama de Bode de $G_H(s)$ comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos obtenidos con PRECAL corregidos a proa.

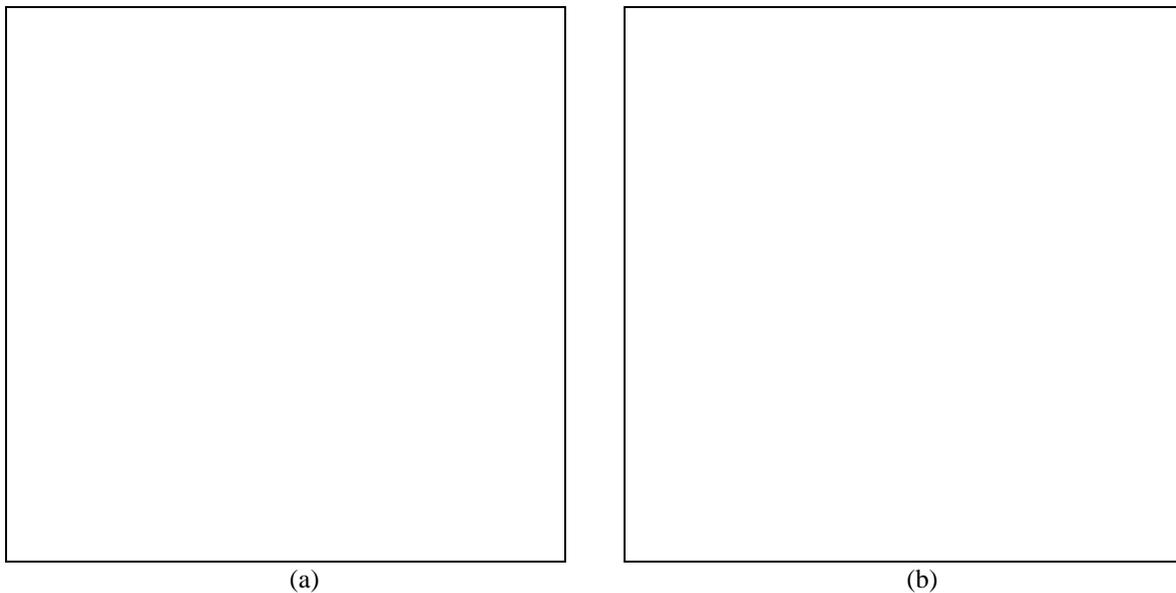


Figura 3.58 : (a) Diagrama de Bode de $G_H(s)$ comparado con los puntos obtenidos con PRECAL. (b) Diagrama de Bode de $G_H(s)$.

En la Figura 3.59 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje irregular (SSN=5).

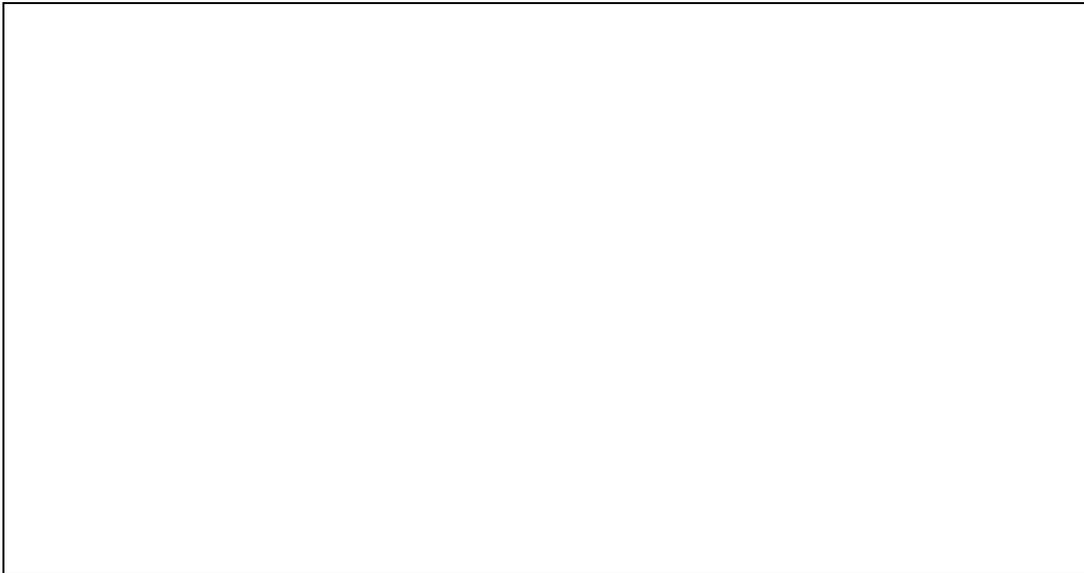


Figura 3.59 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular ($SSN=5$).

En la Figura 3.60 se muestra la salida de $G_H(s)$ comparada con la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (ensayo 25).

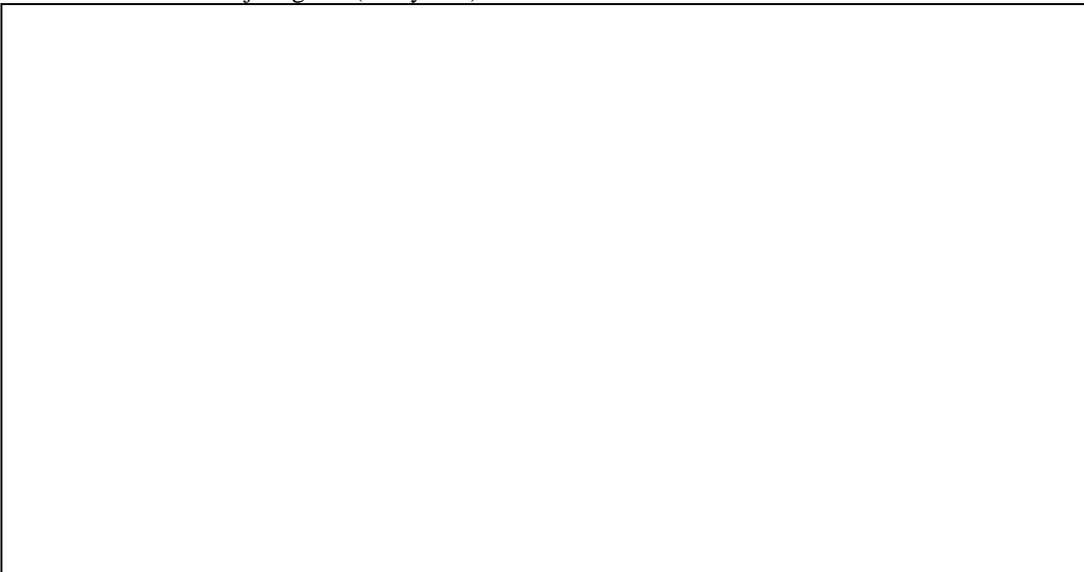


Figura 3.60 :Salida (yesth) de $G_H(s)$ comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular (ensayo 25).

4. ESTUDIO DE LAS ACELERACIONES.

4.1 INTRODUCCION TEORICA.

Se midieron las aceleraciones verticales, en los ensayos realizados con oleaje regular y en los realizados con oleaje irregular. Los acelerómetros estaban situados en las cuadernas C0, C5, C10, C15 y C20 del modelo a escala del buque TF-120, como se muestra en la Figura 7.1.

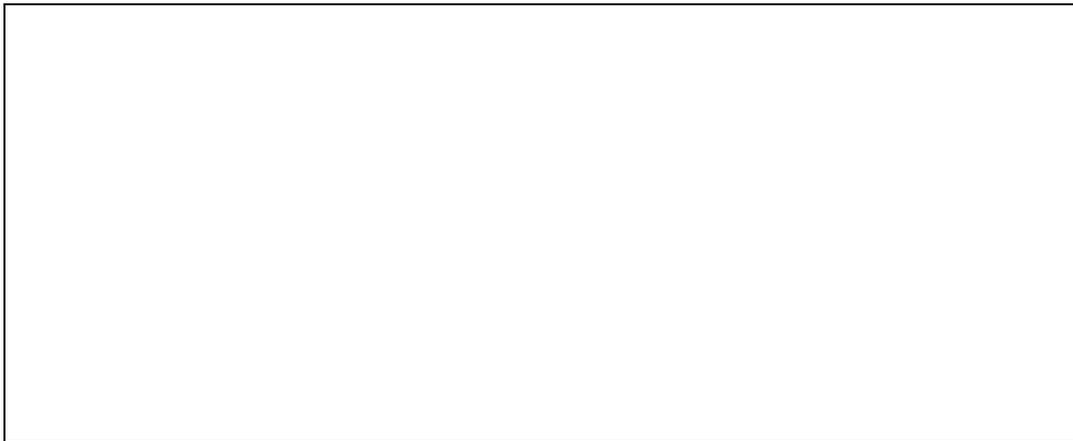


Figura 4.1 :Sección longitudinal del modelo a escala del TF-120

La distancia entre perpendiculares es $L_{pp}=110$ m a escala real. La distancia entre dos cuadernas es 27.5 m. La distancia d del centro de gravedad del buque a la cuaderna 10 es de 13.75 m.

Se supone que la aceleración vertical a_v que miden los sensores es suma de dos componentes, la correspondiente al movimiento de pitch a_{vP} y la correspondiente al movimiento de heave a_{vH}

$$\boxed{\phantom{a_v = a_{vP} + a_{vH}}}$$
 (4.1)

En la Figura 7.2 se muestra el sistema de ejes absoluto $x'-y'-z'$ y el sistema de ejes referidos al buque $x-y-z$



Figura 4.2 :Disposición de los ejes absolutos(x',y',z') y de los ejes fijos al buque (x,y,z).

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

4.1.1 COMPONENTES DE LA ACELERACION VERTICAL EN EL SISTEMA DE EJES FIJOS AL BUQUE.

Sean :

- $\mathbf{r} = (0,0, z)$ vector de posición
- $\mathbf{v} = (0,0,-v_z)$ vector velocidad
- $\boldsymbol{\omega} = (0,\omega_y,0)$ vector velocidad angular
- $\boldsymbol{\alpha} = (0,\alpha_y,0)$ vector aceleración angular
- θ desplazamiento angular de pitch (positivo cuando la proa se hunde)
- z desplazamiento de heave.

Se sabe que :

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (4.2)$$

Luego la aceleración se obtendrá derivando la ecuación (7.2)

(4.3)

Solamente interesan las componentes verticales, es decir la componente z, por lo que la contribución del movimiento de pitch a la aceleración vertical que se mide es :

(4.4)

De la expresión (4.4) se puede ver que a_{VP} es directamente proporcional a la distancia x del punto donde se coloca el acelerómetro al centro de giro.

La componente de la aceleración vertical asociada al movimiento de heave, respecto al sistema de ejes fijos al buque es :

(4.5)

La aceleración vertical total que se registra en cada uno de los sensores situados en las cuadernas C0, C5, C10, C15 y C20 es:

(4.6)

La ecuación (7.6) se particulariza a la cuaderna C10 tomando $x = d = 13.75$ m.

(4.7)

Las derivadas segundas del pitch y del heave se calculan utilizando la formula de Newton con cuatro términos :

(4.8)

4.2 ACELERACION VERTICAL OBTENIDAS CON LOS MODELOS SISO CONTINUOS IDENTIFICADOS.

Se designa por $ac10$ a la aceleración vertical que se midió en la cuaderna C10, utilizando oleaje regular con el ensayo 25 (periodo 11 seg).

Se designa por $ac10e$ a la aceleración vertical que se obtiene para la cuaderna C10 de aplicar las ecuaciones (4.7) y (4.8) a las series temporales medidas de pitch y de heave en los ensayos.

Se designa por $ac10m$ a la aceleración vertical que se obtiene para la cuaderna C10 de aplicar las ecuaciones (4.7) y (4.8) a las series temporales de pitch y de heave obtenidas a partir de los modelos siso continuos identificados.

En las gráficas la unidades de la aceleración son m/s^2 .

4.2.1 ACELERACION VERTICAL OBTENIDA CON MODELOS (4,6,2) IDENTIFICADOS A $V=20$ NUDOS.

En la Figura 4.3 se muestra las aceleraciones $ac10$, $ac10e$ y $ac10m$. Esta última está obtenida con los modelos continuos identificados para pitch y heave de estructura (4,6,2) a velocidad 20 nudos. El error cuadrático medio entre $ac10e$ y $ac10m$ es de 0.066105, y entre $ac10$ y $ac10m$ es 0.4598.

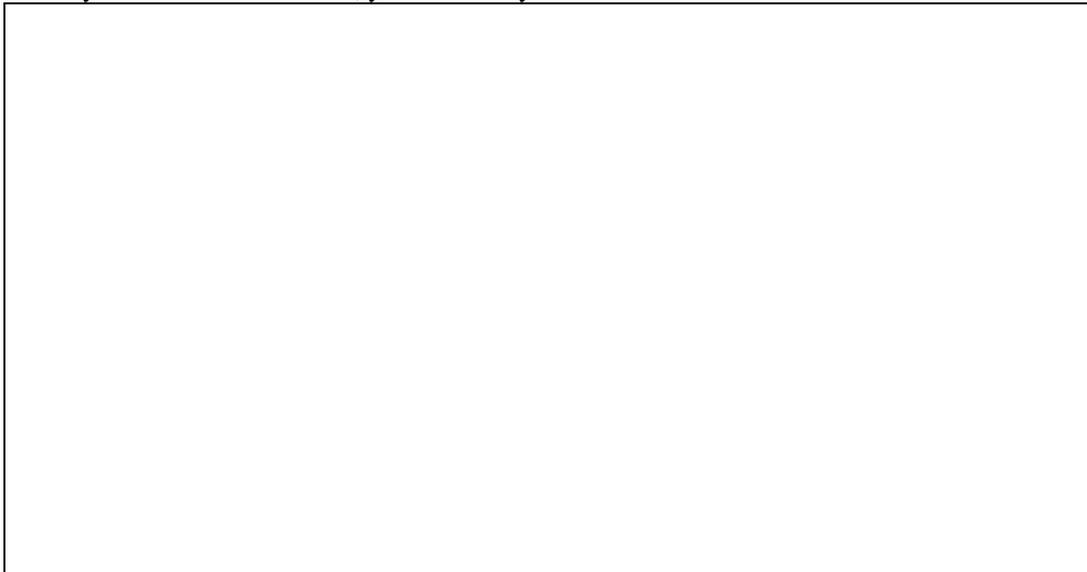


Figura 4.3 :Aceleraciones verticales $ac10$, $ac10e$ y $ac10m$ obtenida con los modelos continuos para pitch y heave de estructura (4,6,2) a velocidad 20 nudos.

4.2.2 ACELERACION VERTICAL OBTENIDA CON MODELOS (4,6,2) IDENTIFICADOS A V=30 NUDOS.

En la Figura 4.4 se muestra las aceleraciones ac_{10} , ac_{10e} y ac_{10m} . Esta última está obtenida con los modelos continuos identificados para pitch y heave de estructura (4,6,2) a velocidad 30 nudos. El error cuadrático medio entre AC_{10e} y AC_{10m} es de 0.088802 y entre AC_{10} y AC_{10m} es 0.6564.



Figura 4.4 :Aceleraciones verticales ac_{10} , ac_{10e} y ac_{10m} obtenida con los modelos continuos para pitch y heave de estructura (4,6,2) a velocidad 30 nudos.

4.2.3 ACELERACION VERTICAL OBTENIDA CON MODELOS (4,6,2) IDENTIFICADOS A V=40 NUDOS.

En la Figura 4.5 se muestra las aceleraciones ac_{10} , ac_{10e} y ac_{10m} . Esta última está obtenida con los modelos continuos identificados para pitch y heave de estructura (4,6,2) a velocidad 40 nudos. El error cuadrático medio entre AC_{10e} y AC_{10m} es de 0.066105 y entre AC_{10} y AC_{10m} es 1.4836

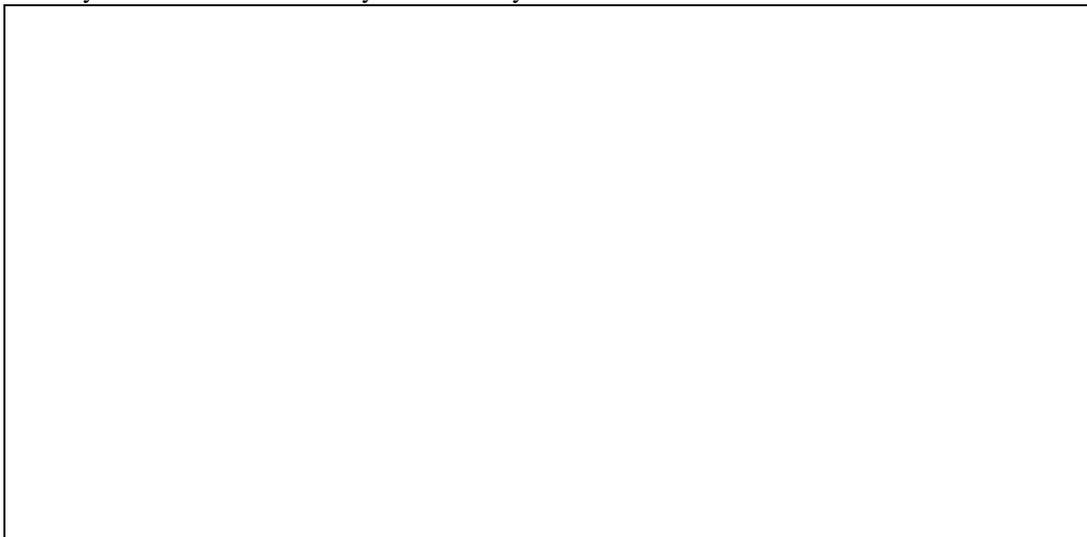


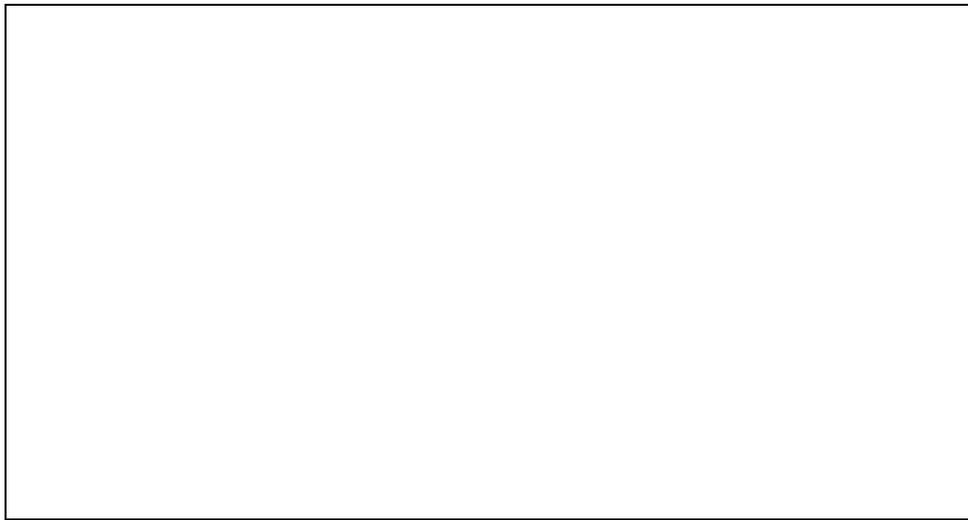
Figura 4.5 :Aceleraciones verticales ac_{10} , ac_{10e} y ac_{10m} obtenida con los modelos continuos para pitch y heave de estructura (4,6,2) a velocidad 30 nudos.

5. CONCLUSIONES

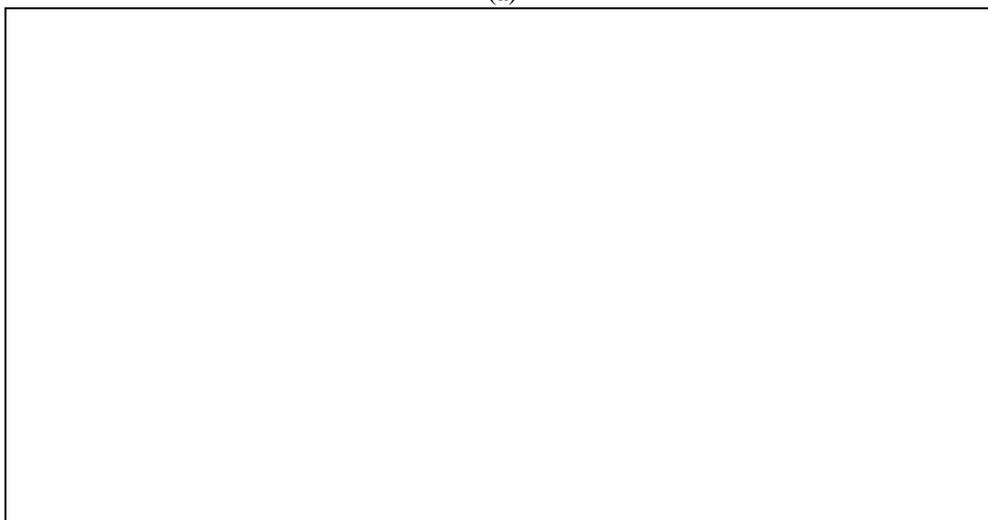
En este informe se han presentado los modelos lineales continuos siso que se han identificado utilizando los datos en el dominio de la frecuencia obtenidos con el programa PRECAL, para la dinámica vertical del buque de alta velocidad TF-120 a las velocidades de 20, 30 y 40 nudos.

Se obtuvieron modelos con estructuras (4,6,2) y (3,5,1) para el movimiento de pitch, así como (4,6,2), (3,5,1) y (2,3,1) para el movimiento de heave. Como se puede observar en la Tabla 3.1 y en la Tabla 3.2 todas las estructuras para una misma velocidad y movimiento, se caracterizan por poseer un error cuadrático medio (9) muy parecido en simulaciones con oleaje regular y oleaje irregular. Así mismo también se puede observar como según disminuye el número de parámetros de la estructura el valor de la función de coste (8) va en aumento.

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.



(a)



(b)

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

CRIBAV
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Tabla 5.1 : 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

En la Tabla 5.1 se muestra el porcentaje de área encerrada por el espectro de oleaje irregular en distintas bandas de frecuencia y en distintos SSN. A la vista de la Figura 5.1 y de la Tabla 5.1 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 oleaje irregular se encuentra en esa banda, que es la zona donde los modelos se ajustan mejor, de ahí el buen comportamiento en las simulaciones.

Hay que indicar que existen semejanzas entre las diferentes estructuras ensayadas. Esta semejanza se pone de manifiesto en las Tablas 5.2 , 5.3, 5.4 y 5.5 donde se muestran los polos y ceros semejantes en las estructuras ensayadas para el heave y para el pitch a velocidad 20 nudos.

Tabla 5.2 : Polos semejantes en las estructuras (4,6,2) (3,5,1) y (2,3,1) para el heave. Velocidad 20 nudos

Estructura	Polos Semejantes	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
(4,6,2)	$-0.41813 \pm 1.0187i$	1.1011	0.37973
(3,5,1)	$-0.33077 \pm 0.98299i$ -0.7239	1.0371 0.7239	0.31892 1
(2,3,1)	$-0.32405 \pm 0.97017i$ -0.7024	1.0229 0.7024	0.31681 1

Tabla 5.3 : Ceros semejantes en las estructuras (4,6,2) (3,5,1) y (2,3,1) para el heave. Velocidad 20 nudos

Estructura	Ceros Semejantes	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
(4,6,2)	$0.51134 \pm 1.3594i$	1.4524	-0.35207
(3,5,1)	$0.47034 \pm 1.4795i$	1.5525	-0.30296
(2,3,1)	$0.49166 \pm 1.4403i$	1.5219	-0.32306

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Tabla 5.4 : Polos semejantes en las estructuras (4,6,2) (3,5,1) para el pitch. Velocidad 20 nudos

Estructura	Polos Semejantes	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
(4,6,2)	$-0.23317 \pm 1.3571i$	1.377	0.16933
	$-0.3352 \pm 0.82473i$	0.890	0.37653
(3,5,1)	$-0.2330 \pm 1.3634i$	1.3832	0.1684
	$-0.3353 \pm 0.8335i$	0.8984	0.3732

Tabla 5.5 : Ceros semejantes en las estructuras (4,6,2) (3,5,1) para el pitch. Velocidad 20 nudos

Estructura	Ceros Semejantes	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
(4,6,2)	$0.7764 \pm 1.8391i$	1.9963	-0.3889
(3,5,1)	$0.7628 \pm 1.8866i$	2.0350	-0.3748

Por otra parte, en la Tabla 5.6 y en la Tabla 5.7 se muestran los polos semejantes en la estructura (4,6,2), para el pitch y para el heave a distintas velocidades.

Tabla 5.4 : Polos semejantes en las estructuras (4,6,2) para el heave a distintas velocidades.

Velocidad (nudos)	Polos Semejantes	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
20	$-0.41813 \pm 1.0187i$	1.1011	0.37973
30	$-0.34721 \pm 0.9387i$	1.0009	0.34691
40	$-0.52888 \pm 1.2811i$	1.386	0.3816

Tabla 5.5 : Polos semejantes en las estructuras (4,6,2) para el pitch a distintas velocidades.

Velocidad (nudos)	Polos Semejantes	Frecuencia natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento δ
20	$-0.2332 \pm 1.3571i$	1.377	0.16933
30	$-0.2563 \pm 1.5727i$	1.5934	0.1608
40	$-0.2722 \pm 1.6956i$	1.7173	0.1585

Versión: 1
Fecha: 15/06/99
SubProy.: TAP97-0607-003-02

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

APENDICE A : NOMENCLATURA DE LOS FICHEROS CON LOS RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS EN EL CEHIPAR Y CON LOS OBTENIDOS CON PRECAL.

A.1 NOMENCLATURA DE LOS FICHEROS QUE CONTIENEN LOS DATOS OBTENIDOS CON OLEAJE IRREGULAR.

Los datos para olas irregulares tal y como fueron recibidos del CEHIPAR [4] el 7/7/98 , se encuentran en archivos ASCII cuyo nombre tienen el formato V##IrrEst# #, por ejemplo el archivo V20IrrEst4a hace referencia al ensayo A para datos tomados a velocidad del buque 20 y estado de la mar 4 con olas irregulares. En cada uno de estos ficheros vienen los datos medidos bajo esas condiciones de heave, resisten, ola, acv0, acv5, acv10, acv15, acv20 y pitch en una sola columna.

Sólo interesaba trabajar con los datos de olas, pitch y heave por lo que se generaron ficheros ASCII separados para los datos de altura de las olas, pitch y heave. Dichos ficheros tienen nombres de la forma Onum#.txt ,Pnum#.txt y Hnum#.txt donde por num se entiende la velocidad y el estado de la mar; por # se entiende el ensayo A o el B Ejemplo O204A.txt contendría la serie temporal de la altura de las olas medidas en el ensayo A para velocidad de 20 nudos y estado de la mar 4.

Era necesario pasar los ficheros .txt de formato ASCII a formato MATLAB .mat para poder trabajar con ellos utilizando la toolbox IDENT. Se generaron ficheros cuyo nombre tenía la forma por ejemplo I204A.mat .Cada uno de estos ficheros .mat contienen tres variables hnum#, pnum# y onum# ,por ejemplo el fichero I204A.mat contiene las variables o204a, p204a y h204a.

En el archivo mode_cor.mat se encuentran todas las series temporales con las tendencias eliminadas.

A.2 NOMENCLATURA DE LOS FICHEROS QUE CONTIENEN LOS DATOS OBTENIDOS CON OLEAJE REGULAR.

Los archivos de datos suministrados por el CEHIPAR poseen la siguiente nomenclatura : TFXYYa, donde XX hace referencia a la velocidad del buque en nudos a escala real y YY hace referencia al número de ensayo (Tabla 2.1). Estos archivos en formato ASCII contenían los datos en una misma columna separados por un encabezamiento, era necesario separar en distintos archivos .txt los datos de altura de la ola, pitch y heave. Se les dieron los nombres de OXXYY.txt, PXXYY.txt y HXXYY.txt.

A.3 NOMENCLATURA DE LOS FICHEROS QUE CONTIENEN LOS DATOS CON LA ALTURA DE LA OLA CORREGIDA A PROA.

Los ficheros en formato Matlab para oleaje regular corregido a proa presentan la nomenclatura *experXXY.mat*, donde X es un número que indica la velocidad del buque en el ensayo :2 para 20 nudos, 3 para 30 nudos y 4 para 40 nudos. Por otro lado YY hace referencia al número de ensayo (Tabla 2.1).

Los ficheros en formato Matlab para oleaje irregular corregido a proa presentan la nomenclatura *experXeY.mat*, donde X es un número que indica la velocidad del buque en el ensayo :2 para 20 nudos, 3 para 30 nudos y 4 para 40 nudos. Por otro lado Y hace referencia al estado de la mar 4, 5 o 6.

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

Dentro de cada uno de estos archivos existen las siguientes variables :

-Fh	Serie temporal de la fuerza total sobre heave en el centro de gravedad
-Fp	Serie temporal del momento total sobre pitch.
-Nudos	Velocidad del experimento.
-acvhe	Serie temporal de la aceleración vertical del heave en el centro de gravedad
-acvpi	Serie temporal de la aceleración del pitch
-heave	Serie temporal del movimiento de heave.
-ola	Serie temporal de la altura de ola corregida a proa
-pitch	Serie temporal del movimiento angular de pitch
-t	Vector de tiempo.

A.4 NOMENCLATURA DE LOS FICHEROS QUE CONTIENEN LOS DATOS OBTENIDOS CON PRECAL

El fichero *2613ab.txt* contiene los datos obtenidos con PRECAL, se trata de un extenso archivo ASCII donde aparecen los valores de :

- Coeficientes típicos de la dinámica de un buque.
- Amplitud y fase de Fuerzas y momentos
- Amplitud y fase para los seis movimientos del buque.

Todos ellos , para distintos ángulos de incidencia y para distintas velocidades del buque (20, 30 y 40 nudos).

Los datos de amplitud y de fase, para pitch y para heave, una vez corregidos a proa están almacenados en ficheros con la nomenclatura *crpp_____XYY.mat* donde X es un identificador que toma el valor 'p' para el pitch y 'h' para el heave. Mientras que YY hace referencia a la velocidad del buque 20, 30 o 40 nudos. Cada uno de estos ficheros contiene tres variables :

-FREQ	vector de frecuencia de encuentro en radianes por segundo.
-MODU	vector de módulo para cada una de las frecuencias de encuentro.
-FASE	vector de fase, en grados, para cada una de las frecuencias de encuentro.

A.5 LISTADO DE DATOS OBTENIDOS CON PRECAL UTILIZADOS EN LA IDENTIFICACIÓN

A.5.1 DATOS PRECAL EN EL C.G VELOCIDAD 20 NUDOS

Tabla A.1 : Datos PRECAL originales en el C.G. Velocidad 20 nudos

ω	ω_e	$\ G_p\ $	$\arg(G_p)$	$\ G_H\ $	$\arg(G_H)$
0.393	0.55375	0.9808	-100.5	0.9263	-12.1
0.406	0.57756	1.054	-101.9	0.9156	-12.8
0.419	0.60173	1.124	-103.6	0.9052	-13.5
0.434	0.63004	1.204	-105.7	0.8928	-14.3
0.449	0.65883	1.282	-107.8	0.879	-15.2
0.465	0.69005	1.367	-110.2	0.86	-16.1
0.483	0.72581	1.442	-113.4	0.8427	-17.1
0.503	0.76634	1.524	-115.5	0.824	-18.7
0.524	0.80978	1.607	-118.1	0.7977	-20.4
0.546	0.85628	1.688	-121.2	0.7636	-22.1
0.571	0.91035	1.785	-124.2	0.7233	-24.3
0.598	0.9702	1.861	-127.7	0.6725	-26.6
0.628	1.0385	1.954	-133.1	0.6093	-29.5
0.662	1.1181	1.949	-140.2	0.5349	-31.9
0.698	1.2051	1.929	-147.8	0.4508	-35
0.738	1.3049	1.778	-157.9	0.3528	-37.9
0.76	1.3612	1.643	-164.2	0.2983	-39.1
0.785	1.4264	1.444	-171	0.238	-39.2
0.81	1.4929	1.197	-178.1	0.179	-35.8
0.837	1.5662	0.9073	175.6	0.1304	-26.3
0.865	1.6438	0.6174	172.9	0.1034	-9.1
0.895	1.7287	0.3694	179.5	0.09699	7.7
0.965	1.9342	0.2207	-123.9	0.08329	20.4
1.048	2.1911	0.1762	-107.8	0.04181	34.8
1.147	2.5163	0.05389	-56.4	0.01962	73.6

En la Tabla A.2 se muestran los datos PRECAL a 20 nudos, se ha modificado en $\pm 360^\circ$ a algunos puntos de la fase del PITCH para dar continuidad a la curva.

Tabla A.2 : Datos PRECAL en el C.G modificados. Velocidad 20 nudos

ω	ω_c	$\ G_p\ $	$\arg(G_p)$	$\ G_H\ $	$\arg(G_H)$
0.393	0.55375	0.9808	-100.5	0.9263	-12.1
0.406	0.57756	1.054	-101.9	0.9156	-12.8
0.419	0.60173	1.124	-103.6	0.9052	-13.5
0.434	0.63004	1.204	-105.7	0.8928	-14.3
0.449	0.65883	1.282	-107.8	0.879	-15.2
0.465	0.69005	1.367	-110.2	0.86	-16.1
0.483	0.72581	1.442	-113.4	0.8427	-17.1
0.503	0.76634	1.524	-115.5	0.824	-18.7
0.524	0.80978	1.607	-118.1	0.7977	-20.4
0.546	0.85628	1.688	-121.2	0.7636	-22.1
0.571	0.91035	1.785	-124.2	0.7233	-24.3
0.598	0.9702	1.861	-127.7	0.6725	-26.6
0.628	1.0385	1.954	-133.1	0.6093	-29.5
0.662	1.1181	1.949	-140.2	0.5349	-31.9
0.698	1.2051	1.929	-147.8	0.4508	-35
0.738	1.3049	1.778	-157.9	0.3528	-37.9
0.76	1.3612	1.643	-164.2	0.2983	-39.1
0.785	1.4264	1.444	-171.0	0.238	-39.2
0.81	1.4929	1.197	-178.1	0.179	-35.8
0.837	1.5662	0.9073	-184.4	0.1304	-26.3
0.865	1.6438	0.6174	-187.1	0.1034	-9.1
0.895	1.7287	0.3694	-180.5	0.09699	7.7
0.965	1.9342	0.2207	-123.9	0.08329	20.4
1.048	2.1911	0.1762	-107.8	0.04181	34.8
1.147	2.5163	0.05389	-56.4	0.01962	73.6

En la Figura A.1 se muestran los diagramas de Bode trazados con los puntos de la Tabla A.2

Figura A.1 : Diagrama de Bode obtenido con los datos PRECAL modificados. Velocidad 20 nudos.(a)Pitch. (b) Heave

A.5.2 DATOS PRECAL EN EL C.G VELOCIDAD 30 NUDOS

En la Tabla A.3 se muestran los datos obtenidos con PRECAL en el C.G a velocidad 30 nudos. En la Tabla A.4 se muestran los datos corrigiendo en $\pm 360^\circ$ a algunos puntos de la fase del PITCH para dar continuidad a la curva.

Tabla A.3 : Datos PRECAL originales en el C.G. Velocidad 30 nudos

ω	ω_c	$\ G_p\ $	$\arg(G_p)$	$\ G_H\ $	$\arg(G_H)$
0.393	0.63413	1.017	-107	0.954	-10.9
0.406	0.66335	1.078	-109.2	0.952	-11.6
0.419	0.69309	1.128	-111.2	0.9508	-12.3
0.434	0.72807	1.212	-114.2	0.9421	-13.3
0.449	0.76374	1.174	-116.5	0.9551	-14.4
0.465	0.80258	1.32	-116.5	0.9271	-15.8
0.483	0.84722	1.384	-118.7	0.922	-17.3
0.503	0.898	1.484	-122.2	0.9059	-19.3
0.524	0.95267	1.609	-124.1	0.8881	-21.5
0.546	1.0114	1.691	-127.3	0.8704	-23.6
0.571	1.08	1.822	-132.5	0.8433	-27.1
0.598	1.1563	1.949	-137.8	0.8155	-30.6
0.628	1.2437	2.047	-144.7	0.7707	-35.7
0.662	1.3462	2.098	-155.2	0.7133	-43.8
0.698	1.4586	2.055	-168.2	0.6222	-54.4
0.738	1.5883	1.774	173.9	0.4673	-68.9
0.76	1.6618	1.518	163.9	0.3658	-76.4
0.785	1.7471	1.178	154	0.2536	-82.1
0.81	1.8343	0.8476	147.3	0.163	-81.4
0.837	1.9307	0.5558	145.7	0.101	-69.9
0.865	2.0331	0.348	152.6	0.07289	-49.1
0.895	2.1456	0.2303	171.1	0.0628	-30.9
0.965	2.4189	0.1701	-151.6	0.04073	-9.7
1.048	2.7627	0.0886	-141.7	0.01925	38.5
1.147	3.201	0.02777	-17.8	0.01704	70

Tabla A.4 : Datos PRECAL en el C.G modificados. Velocidad 30 nudos

ω	ω_c	$\ G_p\ $	$\arg(G_p)$	$\ G_H\ $	$\arg(G_H)$
0.393	0.63413	1.017	-107	0.954	-10.9
0.406	0.66335	1.078	-109.2	0.952	-11.6
0.419	0.69309	1.128	-111.2	0.9508	-12.3
0.434	0.72807	1.212	-114.2	0.9421	-13.3
0.449	0.76374	1.174	-116.5	0.9551	-14.4
0.465	0.80258	1.32	-116.5	0.9271	-15.8
0.483	0.84722	1.384	-118.7	0.922	-17.3
0.503	0.898	1.484	-122.2	0.9059	-19.3
0.524	0.95267	1.609	-124.1	0.8881	-21.5
0.546	1.0114	1.691	-127.3	0.8704	-23.6
0.571	1.08	1.822	-132.5	0.8433	-27.1
0.598	1.1563	1.949	-137.8	0.8155	-30.6
0.628	1.2437	2.047	-144.7	0.7707	-35.7
0.662	1.3462	2.098	-155.2	0.7133	-43.8
0.698	1.4586	2.055	-168.2	0.6222	-54.4
0.738	1.5883	1.774	-186.1	0.4673	-68.9
0.76	1.6618	1.518	-196.1	0.3658	-76.4
0.785	1.7471	1.178	-206.0	0.2536	-82.1
0.81	1.8343	0.8476	-212.7	0.163	-81.4
0.837	1.9307	0.5558	-214.3	0.101	-69.9
0.865	2.0331	0.348	-207.4	0.07289	-49.1
0.895	2.1456	0.2303	-188.9	0.0628	-30.9
0.965	2.4189	0.1701	-151.6	0.04073	-9.7
1.048	2.7627	0.0886	-141.7	0.01925	38.5
1.147	3.201	0.02777	-17.8	0.01704	70

En la Figura A.2 se muestran los diagramas de Bode trazados con los puntos de la Tabla A.4

Figura A.2 : Diagrama de Bode obtenido con los datos PRECAL modificados. Velocidad 30 nudos.(a)Pitch. (b) Heave

A.5.3 DATOS PRECAL EN EL C.G VELOCIDAD 40 NUDOS

En la Tabla A.5 se muestran los datos obtenidos con PRECAL en el C.G a velocidad 40 nudos. En la Tabla A.6 se muestran los datos corrigiendo se ha modificado en $\pm 360^\circ$ a algunos puntos de la fase del PITCH para dar continuidad a la curva.

Tabla A.5 : Datos PRECAL originales en el C.G. Velocidad 40 nudos

ω	ω_s	$\ G_p\ $	$\arg(G_p)$	$\ G_H\ $	$\arg(G_H)$
0.393	0.71451	0.9389	-112.2	1.016	-11.3
0.406	0.74913	1.069	-113.6	0.9909	-12.2
0.419	0.78445	1.078	-111.6	0.9968	-13.6
0.434	0.82609	1.145	-114.8	0.9999	-14.8
0.449	0.86866	1.162	-117.2	1.017	-16.6
0.465	0.9151	1.307	-119	1.007	-17.4
0.483	0.96862	1.369	-123.2	1	-19.3
0.503	1.0297	1.536	-123.9	0.9955	-21.7
0.524	1.0956	1.657	-127.6	0.9922	-24.7
0.546	1.1666	1.794	-131.1	0.9861	-27.7
0.571	1.2497	1.975	-138.4	0.9891	-33
0.598	1.3424	2.139	-146.2	0.9848	-39.6
0.628	1.449	2.304	-157.9	0.9679	-50.1
0.662	1.5743	2.359	-175.7	0.8859	-66.5
0.698	1.7122	2.068	161.3	0.6826	-87.9
0.738	1.8717	1.392	138.7	0.3895	-107.3
0.76	1.9624	1.029	130.6	0.2606	-112.1
0.785	2.0678	0.6982	125.9	0.1586	-110.7
0.81	2.1758	0.4592	126.5	0.09799	-100.7
0.837	2.2953	0.29	134.6	0.06613	-82
0.865	2.4225	0.1948	152	0.05267	-63.3
0.895	2.5624	0.1568	174.1	0.04396	-50
0.965	2.9035	0.1288	-162.5	0.0214	-28.4
1.048	3.3343	0.05434	-159.6	0.01252	57.8
1.147	3.8856	0.1835	142.9	0.0716	-114.6

Tabla A.6 : Datos PRECAL en el C.G modificados. Velocidad 40 nudos

ω	ω_c	$\ G_p\ $	$\arg(G_p)$	$\ G_H\ $	$\arg(G_H)$
0.393	0.71451	0.9389	-112.2	1.016	-11.3
0.406	0.74913	1.069	-113.6	0.9909	-12.2
0.419	0.78445	1.078	-111.6	0.9968	-13.6
0.434	0.82609	1.145	-114.8	0.9999	-14.8
0.449	0.86866	1.162	-117.2	1.017	-16.6
0.465	0.9151	1.307	-119	1.007	-17.4
0.483	0.96862	1.369	-123.2	1	-19.3
0.503	1.0297	1.536	-123.9	0.9955	-21.7
0.524	1.0956	1.657	-127.6	0.9922	-24.7
0.546	1.1666	1.794	-131.1	0.9861	-27.7
0.571	1.2497	1.975	-138.4	0.9891	-33
0.598	1.3424	2.139	-146.2	0.9848	-39.6
0.628	1.449	2.304	-157.9	0.9679	-50.1
0.662	1.5743	2.359	-175.7	0.8859	-66.5
0.698	1.7122	2.068	-198.7	0.6826	-87.9
0.738	1.8717	1.392	-221.3	0.3895	-107.3
0.76	1.9624	1.029	-229.4	0.2606	-112.1
0.785	2.0678	0.6982	-234.1	0.1586	-110.7
0.81	2.1758	0.4592	-233.5	0.09799	-100.7
0.837	2.2953	0.29	-225.4	0.06613	-82
0.865	2.4225	0.1948	-208	0.05267	-63.3
0.895	2.5624	0.1568	-186	0.04396	-50
0.965	2.9035	0.1288	-162.5	0.0214	-28.4
1.048	3.3343	0.05434	-159.6	0.01252	57.8
1.147	3.8856	0.1835	142.9	0.0716	-114.6

En la Figura A.3 se muestran los diagramas de Bode trazados con los puntos de la Tabla A.6

Figura A.3 : Diagrama de Bode obtenido con los datos PRECAL modificados. Velocidad 40 nudos. (a) Pitch. (b) Heave

A.5.4 DATOS PRECAL CORREGIDOS A PROA. VELOCIDAD 20 NUDOS

En la Tabla A.7 se muestran los datos obtenidos con PRECAL modificados corregidos a proa.

Tabla A.7 : Datos PRECAL modificados corregidos a proa. Velocidad 20 nudos

ω	ω_c	$\ G_p\ $	$\arg(G_p)$	$\ G_H\ $	$\arg(G_H)$
0.393	0.55375	0.9808	-162.58	0.9263	-74.18
0.406	0.57756	1.054	-168.16	0.9156	-79.055
0.419	0.60173	1.124	-174.17	0.9052	-84.066
0.434	0.63004	1.204	-181.41	0.8928	-90.009
0.449	0.65883	1.282	-188.83	0.879	-96.233
0.465	0.69005	1.367	-197.11	0.86	-103.01
0.483	0.72581	1.442	-207.17	0.8427	-110.87
0.503	0.76634	1.524	-217.2	0.824	-120.4
0.524	0.80978	1.607	-228.47	0.7977	-130.77
0.546	0.85628	1.688	-241.03	0.7636	-141.93
0.571	0.91035	1.785	-255.25	0.7233	-155.35
0.598	0.9702	1.861	-271.44	0.6725	-170.34
0.628	1.0385	1.954	-291.62	0.6093	-188.02
0.662	1.1181	1.949	-316.35	0.5349	-208.05
0.698	1.2051	1.929	-343.63	0.4508	-230.83
0.738	1.3049	1.778	-376.82	0.3528	-256.82
0.76	1.3612	1.643	-396.36	0.2983	-271.26
0.785	1.4264	1.444	-418.69	0.238	-286.89
0.81	1.4929	1.197	-441.82	0.179	-299.52
0.837	1.5662	0.9073	-465.99	0.1304	-307.89
0.865	1.6438	0.6174	-487.85	0.1034	-309.85
0.895	1.7287	0.3694	-502.47	0.09699	-314.27
0.965	1.9342	0.2207	-498.2	0.08329	-353.9
1.048	2.1911	0.1762	-549.26	0.04181	-406.66
1.147	2.5163	0.05389	-585.21	0.01962	-455.21

En la Figura A.4 se muestran los diagramas de Bode trazados con los puntos de la Tabla A.7

Figura A.4 : Diagrama de Bode obtenido con los datos PRECAL modificados corregidos a PROA. Velocidad 20 nudos.(a)Pitch. (b) Heave

A.5.5 DATOS PRECAL CORREGIDOS A PROA. VELOCIDAD 30 NUDOS

En la Tabla A.8 se muestran los datos obtenidos con PRECAL modificados corregidos a proa.

Tabla A.8 : Datos PRECAL modificados corregidos a proa. Velocidad 30 nudos

ω	ω_c	$\ G_p\ $	$\arg(G_p)$	$\ G_H\ $	$\arg(G_H)$
0.393	0.63413	1.017	-169.08	0.954	-72.98
0.406	0.66335	1.078	-175.46	0.952	-77.855
0.419	0.69309	1.128	-181.77	0.9508	-82.866
0.434	0.72807	1.212	-189.91	0.9421	-89.009
0.449	0.76374	1.174	-197.53	0.9551	-95.433
0.465	0.80258	1.32	-203.41	0.9271	-102.71
0.483	0.84722	1.384	-212.47	0.922	-111.07
0.503	0.898	1.484	-223.9	0.9059	-121
0.524	0.95267	1.609	-234.47	0.8881	-131.87
0.546	1.0114	1.691	-247.13	0.8704	-143.43
0.571	1.08	1.822	-263.55	0.8433	-158.15
0.598	1.1563	1.949	-281.54	0.8155	-174.34
0.628	1.2437	2.047	-303.22	0.7707	-194.22
0.662	1.3462	2.098	-331.35	0.7133	-219.95
0.698	1.4586	2.055	-364.03	0.6222	-250.23
0.738	1.5883	1.774	-405.02	0.4673	-287.82
0.76	1.6618	1.518	-428.26	0.3658	-308.56
0.785	1.7471	1.178	-453.69	0.2536	-329.79
0.81	1.8343	0.8476	-476.42	0.163	-345.12
0.837	1.9307	0.5558	-495.89	0.101	-351.49
0.865	2.0331	0.348	-508.15	0.07289	-349.85
0.895	2.1456	0.2303	-510.87	0.0628	-352.87
0.965	2.4189	0.1701	-525.9	0.04073	-384
1.048	2.7627	0.0886	-583.16	0.01925	-402.96
1.147	3.201	0.02777	-546.61	0.01704	-458.81

En la Figura A.5 se muestran los diagramas de Bode trazados con los puntos de la Tabla A.8

Figura A.5 : Diagrama de Bode obtenido con los datos PRECAL modificados corregidos a PROA. Velocidad 30 nudos.(a)Pitch. (b) Heave

A.5.6 DATOS PRECAL CORREGIDOS A PROA. VELOCIDAD 40 NUDOS

En la Tabla A.9 se muestran los datos obtenidos con PRECAL modificados corregidos a proa.

Tabla A.9 : Datos PRECAL modificados corregidos a proa. Velocidad 40 nudos

ω	ω_c	$\ G_p\ $	$\arg(G_p)$	$\ G_H\ $	$\arg(G_H)$
0.393	0.71451	0.9389	-174.28	1.016	-73.38
0.406	0.74913	1.069	-179.86	0.9909	-78.455
0.419	0.78445	1.078	-182.17	0.9968	-84.166
0.434	0.82609	1.145	-190.51	0.9999	-90.509
0.449	0.86866	1.162	-198.23	1.017	-97.633
0.465	0.9151	1.307	-205.91	1.007	-104.31
0.483	0.96862	1.369	-216.97	1	-113.07
0.503	1.0297	1.536	-225.6	0.9955	-123.4
0.524	1.0956	1.657	-237.97	0.9922	-135.07
0.546	1.1666	1.794	-250.93	0.9861	-147.53
0.571	1.2497	1.975	-269.45	0.9891	-164.05
0.598	1.3424	2.139	-289.94	0.9848	-183.34
0.628	1.449	2.304	-316.42	0.9679	-208.62
0.662	1.5743	2.359	-351.85	0.8859	-242.65
0.698	1.7122	2.068	-394.53	0.6826	-283.73
0.738	1.8717	1.392	-440.22	0.3895	-326.22
0.76	1.9624	1.029	-461.56	0.2606	-344.26
0.785	2.0678	0.6982	-481.79	0.1586	-358.39
0.81	2.1758	0.4592	-497.22	0.09799	-364.42
0.837	2.2953	0.29	-506.99	0.06613	-363.59
0.865	2.4225	0.1948	-508.75	0.05267	-364.05
0.895	2.5624	0.1568	-507.87	0.04396	-371.97
0.965	2.9035	0.1288	-536.8	0.0214	-402.7
1.048	3.3343	0.05434	-601.06	0.01252	-383.66
1.147	3.8856	0.1835	-385.91	0.0716	-643.41

En la Figura A.6 se muestran los diagramas de Bode trazados con los puntos de la Tabla A.9

Figura A. : Diagrama de Bode obtenido con los datos PRECAL modificados corregidos a PROA. Velocidad 40 nudos.(a)Pitch. (b) Heave

APENDICE B : FUNCIONES PROGRAMADAS EN MATLAB UTILIZADAS EN LA IDENTIFICACIÓN.

B.1 FUNCIONES UTILIZADAS EN LA OBTENCION DE MODELOS CONTINUOS SISO

La función que estima los parámetros de G(s) dados el orden del numerador y el denominador de la función de transferencia es *restr.m*. La función de coste a optimizar se encuentra en *res2.m* que requiere de *RH_IH.m*, *gen_numerador.m*, *igual_coef.m* y *build.m* para ser configurada. La función que realiza la estima de minimos cuadrados no lineales con restricciones es *constr.m*¹. Los modelos obtenidos se nombraban como *modp_[I][V]#.mat*. Donde [I] puede valer P para el pitch y H para el heave, [V] es la velocidad del buque 20, 30 y 40 y # es un contador entero 1,2,...

La función que convierte el vector de parámetros estimado a formato G(s) y dibuja el diagrama de Bode para comparar con los puntos del Bode medido es *OB_FT.m*

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

Otra función muy útil es la que permite pasar la función de transferencia continua obtenida a función de transferencia discreta en formato (z⁻¹) y nos dibuja el diagrama de Bode y de polos y ceros *pol_bod.m* que utiliza a *c2d.m*².

A continuación se presenta el código de estas funciones.

B.1.1 RESTR.M

```
%RESTR Función para estimar mediante minimos cuadrados a los puntos de un
% diagrama de Bode los coeficientes de una función de transferencia.
% 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
%
% [x,V,FT]=restr(m,n,nps,x0,datos)
%
% x      parametros estimados
% V      función de coste
% FT     funcion de transferencia
%
% m      orden del numerador
% n      orden del denominador
% nps    numero de polos simples
% datos  'med_cal_P20' 'med_cal_H20'

function [x,V,FT]=restr(m,n,nps,x0,datos)
% Fichero donde se encuentran la frecuencia (rad/seg),la fase medida(grados) y el modulo
medido
ins=['load ' datos];
```

¹ Esta función pertenece a la toolbox OPTIM de MATLAB

² Esta función pertenece a la toolbox CONTROL de MATLAB

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
eval(ins);
id=datos(1,9)

% 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.

[V]=res2(x);

[FT,tabla]=OB_FT(x,0);
```

B.1.2 RES2.M

```
function [f,g]=res2(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: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);

    V(k,1)=abs(ter1+j*ter2);
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
end
f=sum(V.*V);
g=build(n,nps,x);
```

B.1.3 RH_IH.M

```
function [RH,IH]=RH_IH(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=1;
    k=num2str(k);
    ins=['x'k ']=sym('x' k '');'];
    eval(ins);

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

as=[as;l];

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

    end
for x=1:(m+1),
    l=num2str(x);
    o=',';
    ins=['bs('l o '1)=x'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
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
d1=suma1;

%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);
```

B.1.4 IGUAL_COEF.M

```
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
polil=1;
for k=1:(n-nps)/2,% Factores complejos
    r1=2*k-1;
    r1=num2str(r1);
    r2=2*k;
    r2=num2str(r2);

    ins=['polil=polil*(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=['polil=polil*(s+x' r ');'];
    eval(ins);
end

%Generación de las ecuaciones y1=f(x1,...xn)
%
%
%                               yn=f(x1,...xn)
polifac=polil;
polil=collect(polil,s);

poli2=char(polil);
L=length(poli2);
%Localización de las posiciones de s:
cont=1;
for k=1:L,
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
    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)'];  
        eval(ins);  
    end  
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
```

B.1.5 GEN_NUMERADOR.M

```
function num=gen_numerador(n,m,id,f)  
if f==1  
sn=num2str(n+1)  
if id=='h',  
    num=['y' sn '=y1'];% Restriccion de baja frecuenciade del heave.  
else  
    num=['y' sn '=0'];% Restriccion de baja frecuenciade del pitch.  
end  
  
    for k=n+2:n+m+1;  
        r1=num2str(k);  
        r2=num2str(k-1);  
        ins=['y' r1 '=x(' r2 ')'];  
        num=[num ins];  
    end  
  
else  
  
sn=num2str(n+1)  
num='';  
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];  
end
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

B.1.6 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,tabela]=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;

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==2
        phi(i,1)=fase(:,i)+360;
    else
        phi(i,1)=fase(:,i);
    end
end

end
tabela=[cont w modulo phi];

% Diagrama de Bode comparado
figure(1)
subplot(2,1,1)
semilogx(FREQ,20*log10(MODU),'*',FREQ,20*log10(tabela(:,3)))
axis([1e-1,10,-60,10])
title('Diagrama de Bode ')

ylabel('Magnitud (dB)')
grid

subplot(2,1,2)
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
semilogx(FREQ,FASE,'*',FREQ,tabla(:,4))

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

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

cal_wn_fa_zpc(FT)
```

B.1.7 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));
    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]
```

B.1.8 POL_BOD.M

```
function GD=pol_bod(G)
cal_wn_fa_zpc(G)
figure(1)
pzmap(G)
%axis([-1.7,1,-1.5,1.5])
GD=c2d(G,0.25);
set(GD,'variable','z^-1')
GD
cal_wn_fa_zp(GD,0.25)

figure(2)
pzmapcu(GD,1.5)

figure(3)
bode(G)
figure(4)
bode(GD)
```

B.2 FUNCIONES UTILIZADAS EN LA SIMULACIONES

La función que implementa la simulación es *simu_c.m*.

B.2.1 SIMU_C.M

```
% SIMU_C
%
% Esta función nos dibuja las respuestas temporales de una Funcion de transferencia continua.
% En el caso de PRECAL debido al retardo que presenta se corrige manualmente para representar
% las gráficas.
%
% Sintaxis : simu_c(G,nombre,tipo,ensayo,ret)
%
%G          funcion de transferencia continua en formato de CONTROL.
%nombre     fichero para simular
%tipo       'I' para irregulares 'R' para regulares.
%ensayo     puede tomar los valores del '17' al '30'
%ret        número de muestras a corregir el retardo, recordad que 1 muestra=0.25 segundo
%ID         señal seleccionada para ser retrasada 'med' para la medida y 'mod' para el modelo.
% Ejemplo:
%simu_c(FT,'h205','I','25',8,'med')
function simu_c(G,nombre,tipo,ensayo,ret,ID)
close all
nom1=['ymod' nombre(1)];
nom2=['yexp' nombre(1)];

% Selección de las entradas para la simulación y de las salidas de los experimentos
if tipo=='I' %oleaje irregular
    load variables_simp
    ins=['umed=' nombre 'ad(:,2)'];
    eval(ins);
    ins=['ymed=' nombre 'ad(:,1)'];
    eval(ins);
else %oleaje regular
load simregPROA
    ins=['umed=o' nombre(1:3) ensayo 'ad(:,2)'];
    eval(ins);
    ins=['ymed=o' nombre(1:3) ensayo 'ad(:,1)'];
    eval(ins);
end

% Vector de tiempo:
L=length(umed);
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(38),plot(t,ymod,'b',t,ymed,'r:');
legend(nom1,nom2)
ins=['Error cuadratico medio ' e2ms];
title (ins);

figure(39),plot(t,ymod,'b',t,ymed,'r:');
axis([0,75,-maxi,maxi])
legend(nom1,nom2)
title(ins)

% Se prescinde de las 50 primeras y de las 50 últimas muestras.
%Nuevo vector de tiempo:
L=length(umed);
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
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(40),plot(t,ymodc,'b',t,ymedc,'r:');
legend(nom1,nom2)
ins=['Error cuadratico medio ' e2ms];
title (ins);

figure(41),plot(t,ymodc,'b',t,ymedc,'r:');
axis([0,75,-maxi,maxi])
legend(nom1,nom2)
title(ins)

%Hay que restrasar manualmente a la señal elegida:
if ID=='med'
ymedc_ret=[zeros(ret,1);ymedc(1:N-ret,1)];
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(43),plot(t,ymodc,'b',t,ymedc_ret,'r:');
legend(nom1,nom2)
ins=['Error cuadratico medio ' e2ms];
title (ins);

figure(44),plot(t,ymodc,'b',t,ymedc_ret,'r:');
axis([t(1,1),75,-maxi,maxi])
legend(nom1,nom2)
title(ins)
else
    ymodc_ret=[zeros(ret,1);ymodc(1:N-ret,1)];
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(43),plot(t,ymodc_ret,'b',t,ymedc,'r:');
legend(nom1,nom2)
ins=['Error cuadratico medio ' e2ms];
title (ins);

figure(44),plot(t,ymodc_ret,'b',t,ymedc,'r:');
axis([t(1,1),75,-maxi,maxi])
legend(nom1,nom2)
title(ins)
end
```

B.3-FUNCIONES UTILIZADAS EN LA GENERACION DE INTERVALOS.

La función que dada una función de transferencia nominal calcula los intervalos de sus coeficientes es *gen_inter.m*. Esta función utiliza 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*

B.3.1 GEN_INTER.M

```
% GEN_INTER (J.M.Diaz 21-5-99)
%
% 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.
% 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_h202 se carga el fichero donde se encuentra G0 y x0
% [xn,pesosg,N,id]=gen_inter(3,5,1,x0,G0,'crrp____h20');
%
% 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,datos);

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

%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);
```

[intinf,xn,intsup]

B.3.2.GEN_PESOS.M

```

% GEN_PESOS          (J.M.Diaz  21-5-99)
%
%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.
% 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
% x0         vector de parámetros del modelo nominal (polos y coeficientes del numerador)
% G0        funcion de transferencia nominal.
% 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,'crrp____h20');

function [xn,pesosg,N,id]=gen_pesos(m,n,nps,x0,G0,datos)
T0=clock;
ins=['load ' datos];
eval(ins);
id=datos(1,9);
N=length(FREQ);

% 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.

for l=1:N,
    for i=1:N,
        if i==1,
            paq_mod(i,1)=MODU(i,1);
            paq_fase(i,1)=FASE(i,1);
        else
            paq_mod(i,1)=modulo(i,1);
            paq_fase(i,1)=phi(i,1);
        end
    end
end
  
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```

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);
    [xL(:,l),VL(1,1),FTL(1,1)]=restr(m,n,nps,x0,nombre)
end
save modeloL xL VL FTL

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

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

%          b m 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

xn=[xnd,xnn];

% funciones de transferencia GL

for l=1:N
    [numGL(1,:),denGL(1,:)]=tfdata(FTL(1,1),'v');
    par_numL(1,:)=numGL(1,cont:L);
    par_denL(1,:)=denGL(1,2:L);
end

```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```

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          l
%
% 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
  
```

B.3.3.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
  
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

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

eps=pcg(P1,P2,10^-6,5000);%Función que nos resuelve el sistema lineal.
```

B.3.4. 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:
%
%      | 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 cuatro 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;
end
end
A(1,k)=factor*w^(k-1);
end
  
```

CRIBAV
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%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

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

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                                MATRIZ E
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
  
```

```
%La matriz E contendrá la potencia w^n, es de la forma:
```

```
%  
%           E= |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;
```

B.3.5 CAL_COEF1.M

```
% FUNCION CAL_COEF1  
%  
%factor=cal_coef1(x)  
%  
%Esta función da el signo de calcular:  
%  
%           [(j)^x]  
%  
% PARAMETROS DE ENTRADA
```

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

%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
```

BIBLIOGRAFIA

- [1] Thomas Kailath
Linear Systems
Prentice Hall.1987

- [2] Lennart Ljung
System Identification Toolbox
User's Guide. The Math Works.Inc

- [3] T.Söderström and P. Stoica.
System Identification.
Prentice Hall,1989

- [4] Informe OTI-2135-CM-1 de los ensayos de comportamiento en la mar del Ferry TF-120
para investigación sobre control.
CEHIPAR .Julio-1998

- [5] J.Schoukens and R.Pintelon
Identifcation of Linear Systems
Pergamon Press.1991

- [6] Bhattacharyya, S. P. Robust control : the parametric approach / S. P.
Bhattacharyya, H. Chapellat, L.H.Keel. 1995

- [7] Edward V. Lewis
Principles of Naval Architecture (second revision)
Volume III : Motions in Waves and Controllability
The Society of Naval Architects and Marine Engineers

- [8] J.Aranda, J.M De la Cruz, J.M Díaz, P.Ruipérez
Identificación de modelos lineales para la dinámica vertical del buque TF-120.
Versión 2. (1999)
Documento nº : CRIBAV/ 02 / 01