



# CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

DOCUMENTO N°: *CRIBAV/ 02/ 01*

*Fecha: 15/03/99*

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

TÍTULO DEL DOCUMENTO

## **IDENTIFICACION DE MODELOS LINEALES 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 /01*

*Fecha: 15/03/99*

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

TÍTULO DEL DOCUMENTO

## **IDENTIFICACION DE MODELOS LINEALES 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:* 2

*Versión: 2*

*Fecha: 15/03/99*

*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 (1)

J.M.Diaz (1)

J.M. De la Cruz (2)

P.Ruipérez(1)

(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: 2*

*Fecha: 15/03/99*

*SubProy.: TAP97-0607-003-02*

**CRIBAV**

---

*CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD*

## **Resumen:**

En este documento se explica la metodología seguida en la identificación de modelos lineales para la dinámica vertical del buque TF-120. Así se presentan los resultados obtenidos, que incluyen, modelos ARX siso, modelos ARX simo y modelos continuos siso. Además se incluyen un modelo para el que se han obtenido intervalos en el valor de sus parámetros.

En esta versión 2, se presentan también las aceleraciones verticales que se obtienen con los modelos siso discretos identificados. También se incluyen modelos simo discretos identificados para estado de la mar 6.

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>2. IDENTIFICACION DE MODELOS : METODOLOGÍA</b>	<b>1</b>
<b>2.1 TRATAMIENTO DE LOS DATOS UTILIZADOS EN LA IDENTIFICACION</b>	<b>3</b>
2.1.1 TRATAMIENTO DE LOS DATOS OBTENIDOS CON OLEAJE IRREGULAR.	3
2.1.2 TRATAMIENTO DE LOS DATOS OBTENIDOS CON OLEAJE REGULAR.	4
<b>2.2 IDENTIFICACION DE MODELOS LINEALES</b>	<b>7</b>
2.2.1 RESTRICCIONES EN LA BUSQUEDA DE MODELOS.	7
2.2.2 IDENTIFICACION CON OLEAJE IRREGULAR DE MODELOS DISCRETOS SISO.	8
2.2.3 IDENTIFICACIÓN CON OLEAJE IRREGULAR DE MODELOS DISCRETOS SIMO	12
2.2.4 IDENTIFICACION CON OLEAJE REGULAR DE MODELOS SISO CONTINUOS	16
2.2.5 IDENTIFICACION CON OLEAJE REGULAR DE MODELOS SIMO CONTINUOS	16
<b>2.3 VALIDACION DE LOS MODELOS IDENTIFICADOS.</b>	<b>17</b>
<b>2.4 GENERACION DE INTERVALOS</b>	<b>18</b>
2.4.1 SELECCIÓN DE PESOS W.	18
2.4.2 CALCULO DE LOS INTERVALOS DEL SISTEMA	19
<b>3. MODELOS ARX SISO IDENTIFICADOS CON OLEAJE IRREGULAR.</b>	<b>21</b>
<b>3.1 ESTADO DE LA MAR 4 Y VELOCIDAD 20 NUDOS</b>	<b>22</b>
<b>3.2 ESTADO DE LA MAR 4 Y VELOCIDAD 30 NUDOS</b>	<b>30</b>
<b>3.3 ESTADO DE LA MAR 4 Y VELOCIDAD 40 NUDOS</b>	<b>38</b>
<b>3.4 ESTADO DE LA MAR 5 Y VELOCIDAD 20 NUDOS</b>	<b>46</b>
<b>3.5 ESTADO DE LA MAR 5 Y VELOCIDAD 30 NUDOS</b>	<b>54</b>
<b>3.6 ESTADO DE LA MAR 5 Y VELOCIDAD 40 NUDOS</b>	<b>62</b>
<b>3.7 ESTADO DE LA MAR 6 Y VELOCIDAD 20 NUDOS.</b>	<b>70</b>
<b>3.8 ESTADO DE LA MAR 6 Y VELOCIDAD 30 NUDOS</b>	<b>78</b>
<b>3.9 ESTADO DE LA MAR 6 Y VELOCIDAD 40 NUDOS</b>	<b>86</b>
<b>4. MODELOS ARX SIMO IDENTIFICADOS CON OLEAJE IRREGULAR.</b>	<b>94</b>
<b>4.1 ESTADO DE LA MAR 4 Y VELOCIDAD 20 NUDOS.</b>	<b>95</b>
<b>4.2 ESTADO DE LA MAR 4 Y VELOCIDAD 30 NUDOS.</b>	<b>101</b>
<b>4.3 ESTADO DE LA MAR 4 Y VELOCIDAD 40 NUDOS.</b>	<b>107</b>
<b>4.4 ESTADO DE LA MAR 5 Y VELOCIDAD 20 NUDOS.</b>	<b>113</b>
<b>4.5 ESTADO DE LA MAR 5 Y VELOCIDAD 30 NUDOS.</b>	<b>119</b>
<b>4.6 ESTADO DE LA MAR 5 Y VELOCIDAD 40 NUDOS.</b>	<b>125</b>
<b>4.7 ESTADO DE LA MAR 6 Y VELOCIDAD 20 NUDOS.</b>	<b>131</b>
<b>4.8 ESTADO DE LA MAR 6 Y VELOCIDAD 30 NUDOS.</b>	<b>137</b>
<b>4.9 ESTADO DE LA MAR 6 Y VELOCIDAD 30 NUDOS.</b>	<b>143</b>
<b>4.10 ESTADO DE LA MAR 6 Y VELOCIDAD 40 NUDOS.</b>	<b>149</b>

## **CRIBAV**

### **CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

<b>5. MODELOS CONTINUOS SISO IDENTIFICADOS CON OLEAJE REGULAR</b>	<b>155</b>
<b>5.1 VELOCIDAD DEL BUQUE 20 NUDOS</b>	<b>155</b>
5.1.1 modelo para el movimiento de pitch.	155
5.1.2 modelo para el movimiento de heave.	159
<b>5.2 VELOCIDAD DEL BUQUE 30 NUDOS</b>	<b>163</b>
5.2.1 modelo para el movimiento de pitch.	163
5.2.2 modelo para el movimiento de heave.	167
<b>5.3 VELOCIDAD DEL BUQUE 40 NUDOS</b>	<b>171</b>
5.3.1 modelo para el movimiento de pitch.	171
5.3.2 modelo para el movimiento de heave.	175
<b>6. MODELO CONTINUO IDENTIFICADO CON INTERVALOS EN SUS PARAMETROS.</b>	<b>179</b>
<b>6.1 FUNCION DE TRANSFERENCIA NOMINAL</b>	<b>179</b>
<b>6.2 SELECCIÓN DE PESOS W</b>	<b>179</b>
<b>6.3 GENERACION DE INTERVALOS</b>	<b>180</b>
<b>7. ESTUDIO DE LAS ACELERACIONES VERTICALES.</b>	<b>181</b>
<b>7.1 INTRODUCCION TEORICA.</b>	<b>181</b>
7.1.1 Componentes de la aceleracion vertical en el sistema de ejes fijos al buque.	182
<b>7.2 ACELERACION VERTICAL OBTENIDAS CON LOS MODELOS SISO DISCRETOS IDENTIFICADOS.</b>	<b>183</b>
7.2.1 aceleracion vertical obtenida con modelos identificados a V=20 nudos y estado de la mar 4.	183
7.2.2 aceleracion vertical obtenida con modelos identificados a V=20 nudos y estado de la mar 5.	184
7.2.3 aceleracion vertical obtenida con modelos identificados a V=20 nudos y estado de la mar 6.	184
7.2.4 aceleracion vertical obtenida con modelos identificados a V=30 nudos y estado de la mar 4.	185
7.2.5 aceleracion vertical obtenida con modelos identificados a V=30 nudos y estado de la mar 5.	185
7.2.6 aceleracion vertical obtenida con modelos identificados a V=30 nudos y estado de la mar 6.	186
7.2.7 aceleracion vertical obtenida con modelos identificados a V=40 nudos y estado de la mar 4.	186
7.2.8 aceleracion vertical obtenida con modelos identificados a V=40 nudos y estado de la mar 5.	187
7.2.9 aceleracion vertical obtenida con modelos identificados a V=40 nudos y estado de la mar 6.	187
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>188</b>
<b>8.1 CONCLUSIONES DERIVADAS DE LOS MODELOS ARX SISO OBTENIDOS.</b>	<b>188</b>
<b>8.2 CONCLUSIONES DERIVADAS DE LOS MODELOS ARX SIMO OBTENIDOS.</b>	<b>190</b>
<b>8.3 CONCLUSIONES DERIVADAS DE LOS MODELOS CONTINUOS OBTENIDOS.</b>	<b>190</b>
<b>8.4 CONCLUSIONES DERIVADAS DE LAS ACELERACIONES VERTICALES OBTENIDAS.</b>	<b>192</b>
<b>8.5 LINEAS DE TRABAJO EN CURSO.</b>	<b>192</b>
<b>APENDICE A : NOMENCLATURA DE LOS FICHEROS CON LOS RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS EN EL CEHIPAR.</b>	<b>193</b>
<b>A.1 NOMENCLATURA DE LOS FICHEROS QUE CONTIENEN LOS DATOS OBTENIDOS CON OLEAJE IRREGULAR.</b>	<b>193</b>
<b>A.2 NOMENCLATURA DE LOS FICHEROS QUE CONTIENEN LOS DATOS OBTENIDOS CON OLEAJE REGULAR.</b>	<b>193</b>



<b>APENDICE B : FUNCIONES PROGRAMADAS EN MATLAB UTILIZADAS EN LA IDENTIFICACIÓN.</b>	<b>194</b>
<b>B.1 FUNCIONES UTILIZADAS EN LA OBTENCION DE MODELOS ARX SISO.</b>	<b>194</b>
B.1.1 funcion arxcr_minfpe.m	194
B.1.2 funcion arxcr.m	197
B.1.3 funcion arxcr2tf.m	198
B.1.4 funcion cal_wn_fa_zp.m	199
<b>B.2 FUNCIONES UTILIZADAS EN LA OBTENCION DE MODELOS ARX SIMO</b>	<b>200</b>
B.2.1 funcion acominfpe . m	200
B.2.2 funcion acominfpe2 . m	202
B.2.3 funcion sis2_acopla	203
B.2.4 funcion funlcr.m	204
B.2.5 funcion par2ft . M	205
<b>B.3 FUNCIONES UTILIZADAS EN LA OBTENCION DE MODELOS CONTINUOS SISO</b>	<b>207</b>
B.3.1 funcion proptim . m	207
B.3.2 funcion rh_ih . m	208
B.3.3 funcion funoptim.m	210
B.3.4 funcion obt_ft_bode . m	210
B.3.5 funcion cal_wn_fa_zpc . m	211
B.3.6 funcion pol_bode . m	212
<b>B.4 FUNCIONES UTILIZADAS EN LA SIMULACIONES DISCRETAS</b>	<b>212</b>
B.4.1 funcion simu_dis2.m	212
B.4.2 Funcion sim_minqua . m	215
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>217</b>

## 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 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. Para que los métodos de identificación que se han utilizado actuaran correctamente era necesario que los datos fueran tratados matemáticamente (eliminación de tendencias, selección de rangos,..). Además hay que hacer una distinción entre el tratamiento realizado a los datos obtenidos con oleaje irregular y el tratamiento realizado a los datos obtenidos con oleaje regular.

Con los datos obtenidos con oleaje irregular se identificaron en el *dominio temporal* modelos discretos para los movimientos de pitch y de heave. La identificación se dividió en la obtención de *modelos SISO* (una entrada y una salida) y *modelos SIMO* (una entrada y dos salidas), con este último tipo de modelos se pretendía poner de manifiesto el acoplo existente entre los movimientos de pitch y de heave.

Por otra parte y de forma paralela a la identificación anterior, con los datos obtenidos con oleaje regular se identificaron en *el dominio de la frecuencia* modelos *continuos* tanto SISO como SIMO.

Los modelos identificados para ser considerados como válidos debían pasar un proceso de validación. Así dado un modelo ya fuera SISO o SIMO (discreto o continuo) era simulada su respuesta temporal tomando como entradas oleaje irregular u oleaje regular y comparada con la respuesta obtenida experimentalmente.

Por otra parte los modelos SIMO discretos eran comparados (ceros y polos, diagrama de Bode) con los modelos SISO obtenidos. Lo mismo se hizo con los modelos SIMO y SISO continuos.

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

Además los modelos continuos fueron pasados a discreto y comparados con los modelos discretos obtenidos. Una vez pasado el proceso de validación se tienen 2 modelos SISO y 1 modelo SIMO discretos, 2 modelos SISO y 1 modelo SIMO continuos. Los modelos continuos fueron utilizados como modelos nominales en la obtención de intervalos de incertidumbre en los parámetros de los modelos continuos. 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.

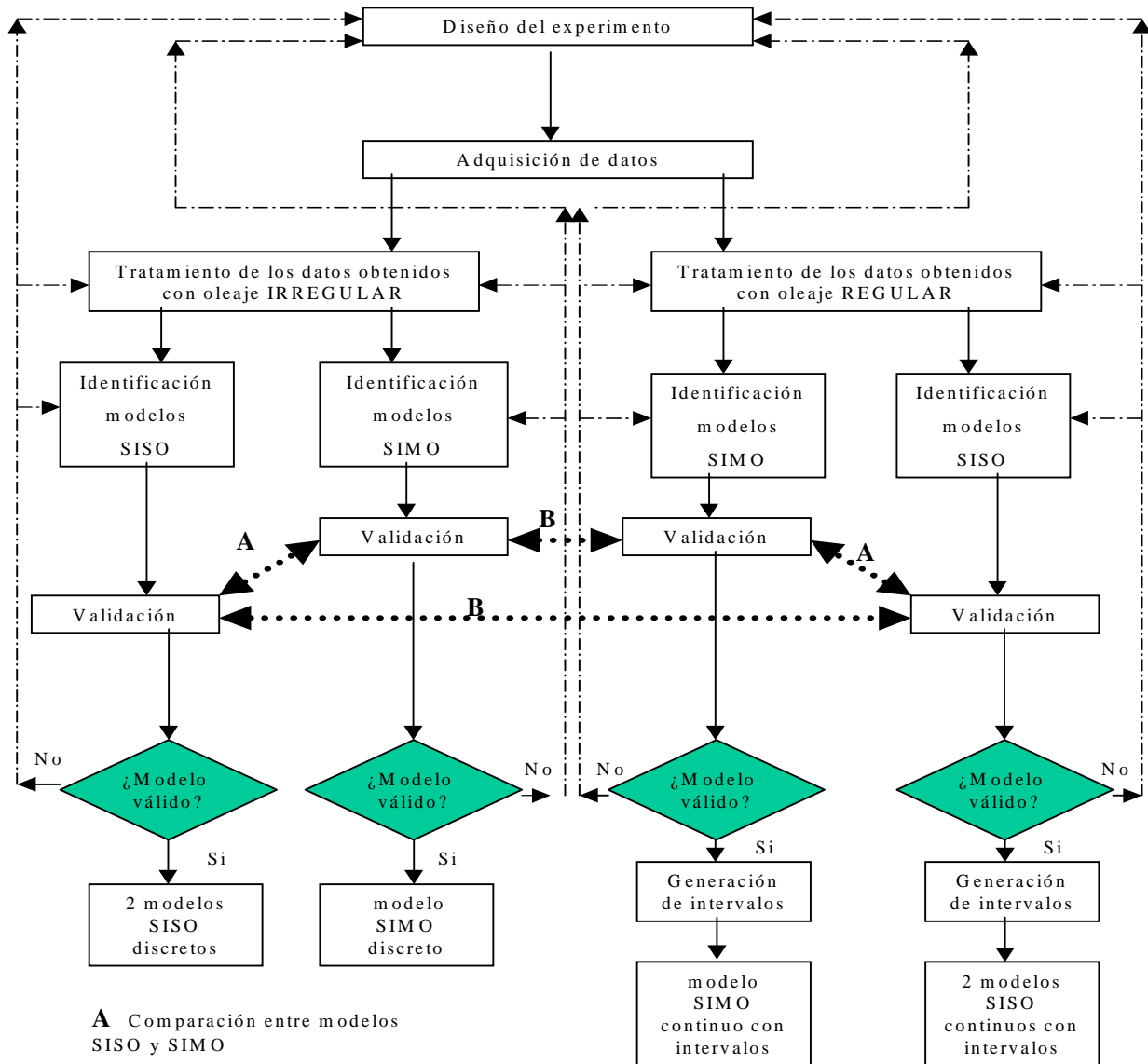


Figura 1.1: Esquema seguido en la identificación de sistemas lineales

## 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 vertical 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 DE LOS DATOS OBTENIDOS CON OLAJE IRREGULAR.

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.

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).

En la Figura 2.1 se muestra un esquema del proceso seguido en el tratamiento de los datos obtenidos con oleaje regular

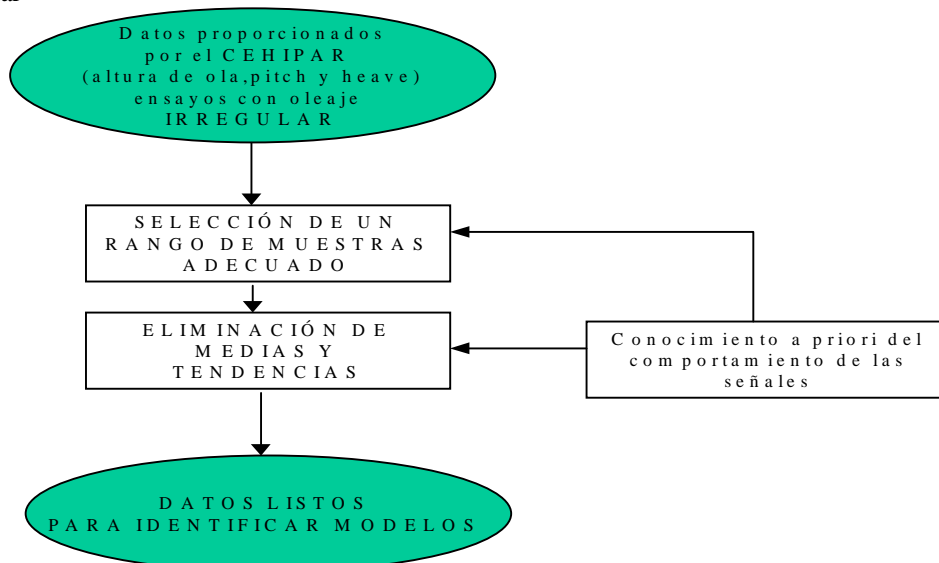


Figura 2.1: Esquema del tratamiento de los datos obtenidos con oleaje irregular

El tratamiento de las series temporales medidas con olas irregulares se realizó utilizando el entorno gráfico de la herramienta IDENT<sup>®</sup> 4.0.3 perteneciente [2] al programa MATLAB<sup>®</sup> 5.1, debido a su gran comodidad y fácil manejo. Se distinguen las siguientes acciones:

**CRIBAV**

**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

- 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.

**2.1.2 TRATAMIENTO DE LOS DATOS OBTENIDOS 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.
- $\lambda/L_{pp}$  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	$\lambda/L_{pp}$	$H_m(m)$	$T_m(s)$	$H_B(m)$	$T_B(s)$
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

En la Figura 2.2 se muestra un esquema del proceso seguido en el tratamiento de los datos obtenidos con oleaje regular.

Como en el caso de oleaje irregular se ha trabajado en el entorno gráfico de la herramienta IDENT<sup>®</sup> 4.0.3 perteneciente al programa MATLAB<sup>®</sup> 5.1. Las fases en el tratamiento de los datos fueron :

- En primer lugar se eliminaron las tendencias estadísticas de las series temporales de altura de la ola, pitch y heave.
- En segundo lugar se procedió a filtrar la serie temporal utilizando un filtro pasabanda entorno al armónico principal (frecuencia de encuentro para la que se deseaba generar el oleaje en cada ensayo). En el CEHIPAR cuando se intenta generar un oleaje regular esto no se consigue del todo, basta con observar la representación de las series temporales así como sus periodogramas, ya que junto a la frecuencia a la que se desea generar aparecen otras frecuencias. De ahí la necesidad de filtrar las series temporales y obtener sinusoides puras.

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

- En tercer lugar, una vez filtradas las series temporales es posible ajustar cada una de ellas a una senoide de amplitud  $A$  y fase  $\phi$ . En el cuadro 1 se explica el método utilizado de ajuste a una senoide.

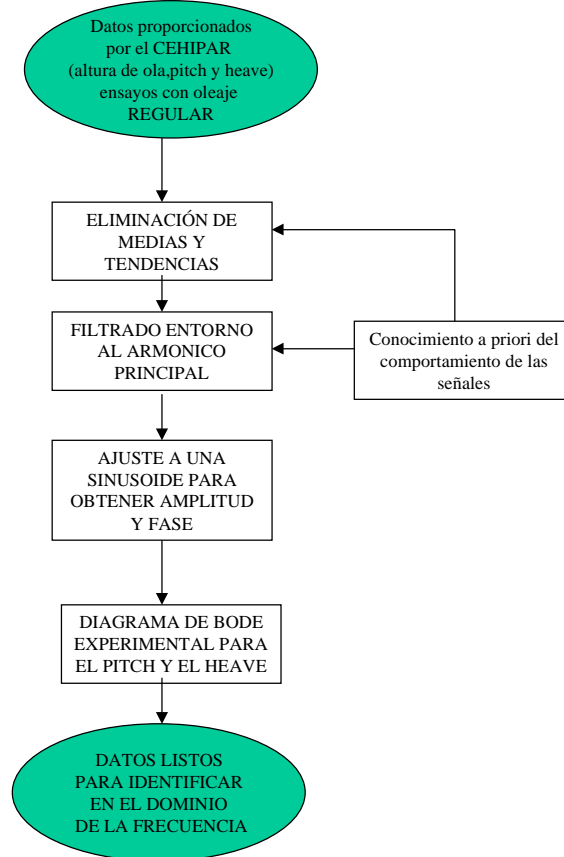


Figura 2.2: Esquema del tratamiento de datos obtenidos con oleaje regular

- En cuarto lugar se procedió a la obtención de los diagrama de Bode para la función de transferencia de Pitch  $G_p(s)$  y la función de transferencia  $G_H(s)$ . Ya que en el punto anterior se habían determinado las amplitudes y las fases de la entrada (altura de olas) y de las salidas (movimiento de Pitch y movimiento de Heave). En el cuadro 2 se recuerda como se obtenía el diagrama de Bode de un sistema lineal.

Terminado este proceso ya se tienen datos en el dominio frecuencial para poder proceder a la identificación de modelos continuos para la dinámica vertical del buque.

*Cuadro 1 : Método empleado para ajustar a una senoide*

**METODO EMPLEADO DE AJUSTE A UNA SINUSOIDE**

Las series temporales que se han medido para altura de las olas regulares, movimiento de pitch y movimiento de heave, fueron tomadas con un periodo de muestreo  $T=0.25s$ .

Llamemos  $s(kT)=s_k$  con  $k=0,1,2,\dots, N-1$ , a una serie temporal medida de  $N$  puntos de longitud a la que se le han eliminado las tendencias y ha sido filtrada, cuya principal componente de frecuencia es la frecuencia de encuentro  $\omega_{ei}$ , por lo que aproximadamente se pueden considerar como una senoide.

Llamemos  $r(kT)=r_k(A,\phi)$  con  $k=0,1,2,\dots,N-1$  a la señal con la que queremos aproximar las series temporales medidas:

$$r(kT) = A \cdot \text{sen}(\omega_{ei}(kT) + \phi) = r_k(A, \phi)$$

donde  $A$  es la amplitud y  $\phi$  es la fase de la senoide, según los valores de la amplitud y de la fase tendremos una mejor aproximación de la señal verdadera.

El error entre la señal verdadera  $s(kT)$  y la aproximación realizada  $r(kT)$  es:

$$e_k(A, \phi) = s_k - r_k(A, \phi)$$

Llamemos función de coste  $fc(A,\phi)$  a:

$$fc(A, \phi) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e_k^2(A, \phi)$$

El procedimiento de ajuste consiste en encontrar aquella pareja de valores  $(A,\phi)$  que minimicen la función de coste, es decir, nos den una aproximación con el menor error cuadrático medio.

El método de ajuste empleado es un método gráfico en el que se representan la señal medida y la aproximada, se van dando visualmente valores a la amplitud y la fase y se va observando la función de coste. Con dos o tres ensayos se pueden obtener unas funciones de coste bastante buenas. Se trata de un procedimiento sencillo de obtención de estos valores  $(A,\phi)$  que minimicen la función de coste.

Cuadro 2 :Obtención del diagrama de Bode de un sistema lineal

**OBTENCION DEL DIAGRAMA DE BODE DE UN SISTEMA LINEAL**

Sea un sistema lineal de función de transferencia  $G(s)$  desconocida que es excitado con una señal sinusoidal  $x(t)$ :

$$x(t) = A \cdot \text{sen}(\omega_i t + \phi_x)$$

la salida del sistema lineal es otra senoide :

$$y(t) = B(\omega_i) \cdot \text{sen}(\omega_i t + \phi_y(\omega_i))$$

Si se toma la transformada de Laplace, se obtiene que:

$$Y(s) = G(s)X(s) = G(s) \frac{A\omega_i}{s^2 + \omega_i^2}$$

Conocida  $x(t)$  y la salida  $y(t)$  , ambas sinusoides de frecuencia  $\omega_i$  , es posible conocer la respuesta en frecuencia del sistema  $G(j\omega_i)$  a esa frecuencia:

$$\begin{aligned} |G(j\omega_i)| &= \frac{B(\omega_i)}{A} \\ \arg[G(j\omega_i)] &= \phi_y(\omega_i) - \phi_x \end{aligned}$$

Si se representa en dos gráficas distintas el módulo en dB y el argumento en grados en función de la frecuencia representada en escala logarítmica, se obtiene el diagrama de Bode del sistema.

## 2.2 IDENTIFICACION DE MODELOS LINEALES

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 IRREGULAR DE MODELOS DISCRETOS SISO.

La identificación se realizó en el dominio temporal, ya que se disponía de las series temporales de la altura de las olas, del movimiento de pitch y del movimiento de heave.

Para obtener modelos discretos SISO del movimiento de Pitch y del movimiento de Heave, se utilizaron modelos paramétricos ARX [2].

Un modelo ARX presenta la siguiente estructura :

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - n_k) + e(t)$$

donde  $u(t)$  es la entrada,  $y(t)$  es la salida,  $e(t)$  es ruido blanco de varianza  $\lambda$ ,  $n_k$  es el retardo ,  $A(q)$  y  $B(q)$  son polinomios de la forma:

$$\begin{aligned}
 A(q) &= 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_naq^{-na} \\
 B(q) &= b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_nbq^{-nb+1}
 \end{aligned}$$

Si se pasa a función de transferencia se tendría que :

$$G(z^{-1}) = z^{-nk} \frac{b_1 + b_2z^{-1} + \dots + b_nbz^{-(nb-1)}}{1 + a_1z^{-1} + \dots + a_naz^{-na}} \quad (1)$$

Los dos sistemas SISO que se identificaron tenían como única entrada la altura de las olas y como salidas el movimiento de pitch y el de heave, como se puede ver en la Figura 2.3. Se identificaron dos funciones de transferencia  $G_P(z^{-1})$  y  $G_H(z^{-1})$  para cada par de condiciones de estado de la mar y velocidad del buque.

$$\begin{aligned}
 G_P(z^{-1}) &= z^{-nk} \frac{b_1 + b_2z^{-1} + \dots + b_nbpz^{-(nbp-1)}}{1 + a_1z^{-1} + \dots + a_napz^{-nap}} \\
 G_H(z^{-1}) &= z^{-nk} \frac{b_1 + b_2z^{-1} + \dots + b_nbh z^{-(nbh-1)}}{1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nahz^{-nah}}
 \end{aligned} \quad (2)$$

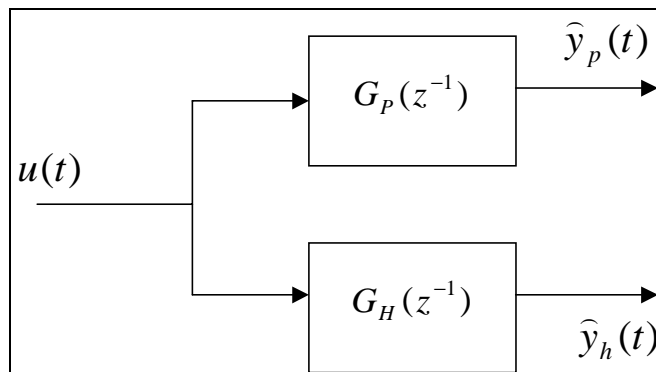


Figura 2.3: Sistemas SISO a identificar

Como se ha explicado en la sección 2.2.1 se impusieron tres restricciones. En funciones de transferencia discretas las restricciones se concretan de la siguiente manera :

1. No hizo falta forzar la estabilidad de los modelos puesto que salieron estables.
- 2 y 3. El comportamiento cuando  $\omega \rightarrow 0$  o lo que es lo mismo cuando  $z \rightarrow 1$  debe ser el siguiente :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

- PITCH :  $|G_P(z^{-1})| \rightarrow 0$  lo cual conduce a la siguiente restricción para los coeficientes del numerador de la función de transferencia del pitch  $G_P(z^{-1})$ .

$$\sum_{i=1}^{nbp} b_i = 0 \quad (R1)$$

- HEAVE :  $|G_H(z^{-1})| \rightarrow 1$  lo cual conduce a la siguiente restricción para los coeficientes del numerador y del denominador de la función de transferencia del heave  $G_H(z^{-1})$ .

$$\sum_{i=1}^{nbh} b_i - \sum_{j=1}^{nah} a_j = 1 \quad (R2)$$

De la ecuación (1) es posible obtener la siguiente ecuación en diferencias:

$$\hat{y}(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - \dots - a_{na} y_p(k-na) + b_1 u(k) + b_2 u(k-1) + \dots + b_{nb} u(k-(nb-1)) \quad (3)$$

$k = 2, 3, \dots, N$

donde N es el número de muestras que se tienen en una serie temporal,  $u(k)$  es la entrada experimental en el instante k,  $y(k-1)$  es la salida experimental en el instante (k- 1) e  $\hat{y}(k)$  es la salida estimada en el instante k.

Luego identificar un modelo SISO discreto requirió de los pasos que se presentan en la Figura 2.4 :

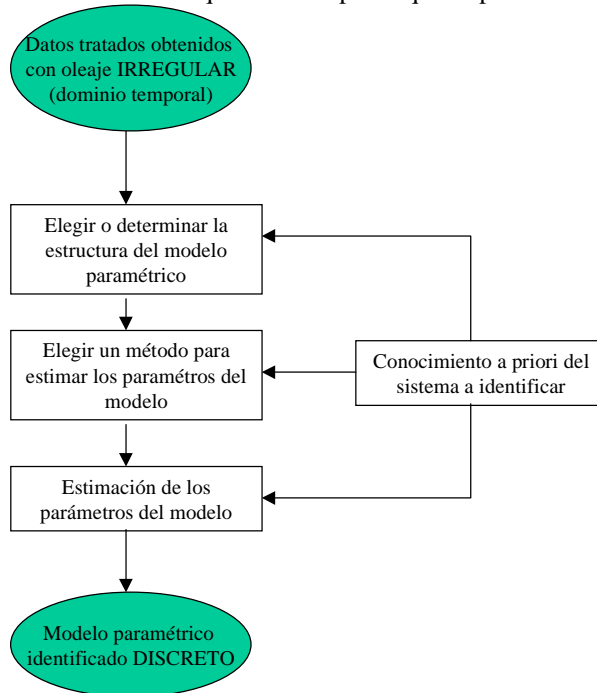


Figura 2.4: Esquema seguido en la identificación de modelos SISO discretos con oleaje irregular

El primer paso en la identificación es seleccionar la estructura del modelo ARX, es decir, establecer el valor de  $(n_{ap}, n_{bp}, n_{kp})$  y  $(n_{ah}, n_{bh}, n_{kh})$ . Se puede utilizar el conocimiento físico del sistema para imponer los valores de las estructuras. Aunque una forma lógica de búsqueda es ir probando distintos valores de manera enumerativa y seleccionar aquella estructura que al identificar sus parámetros presente una función de coste más pequeña que las otras estructuras. Se permitió una variación de  $n_a$ ,  $n_b$  y  $n_k$  entre los valores enteros 1,2,...,10. Se seleccionaron aquellas estructuras de menor FPE (ver cuadro 4)

El segundo paso es seleccionar el método de estimar los parámetros del modelo. Se utilizó un método de estima de minimos cuadrados, que se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3 : Método de estima de minimos cuadrados

**ESTIMA DE MINIMOS CUADRADOS**

La ecuación (3) se puede expresar en forma de vector :

$$\hat{y}(k) = [-y(k-1), -y(k-2), \dots, -y(k-na), u(k), u(k-1), \dots, u(k-(nb-1))] \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{na} \\ b_1 \\ \vdots \\ b_{nb} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\hat{y}(k | \theta) = \varphi(k) \theta$$

El número de parámetros a estimar sería  $d = na + nb$ , mientras que el vector de parámetros sería:

$$\theta = [a_1, a_2, \dots, a_{na}, b_1, b_2, \dots, b_{nb}]^T$$

Si se consideran todos los instantes  $k=2, 3, \dots, N$  se obtendría que la salida estimada sería :

$$\hat{Y} = \Phi \theta \quad (5)$$

El error entre la salida experimental y la salida estimada sería en el instante  $k$  :

$$e(k | \theta) = y(k) - \hat{y}(k)$$

y si se consideran todos los instantes  $k=2, 3, \dots, N$  se obtendría :

$$E = Y - \hat{Y}$$

La función de coste para el cálculo de mínimos cuadrados [3] sería :

$$V(\theta) = \frac{1}{2} E^T E = \frac{1}{2} \|E\|_2^2 \quad (6)$$

Hay que encontrar el vector de parámetros  $\hat{\theta}$  que minimice (6) sujetas a las restricciones (R.1) o (R.2) según se trate del Pitch o del Heave. Es un problema de mínimos cuadrados lineales sujeto a restricciones. En el apéndice B se recogen las funciones utilizadas para resolver este problema.

Cuadro 4 : Error Final de Predicción

**ERROR FINAL DE PREDICCIÓN**

Una estructura de un modelo ARX con valores altos de  $n_a$ ,  $n_b$  y  $n_k$  siempre dará un valor más pequeño para la función de coste (6) puesto que se obtiene minimizando sobre un mayor número de parámetros. Si se dibujaran los valores de la función de coste como función de los ordenes del modelo se obtendría una función estrictamente decreciente. El valor de  $V_N$  disminuye porque el modelo está incluyendo cada vez más propiedades relevantes del sistema. Pero aún después de que un orden correcto del modelo ha sido pasado la función de coste continua disminuyendo. La razón es que parámetros innecesarios se están utilizando para ajustar el modelo a la señales de perturbación específicas presentes en las series temporales de datos. Este fenómeno se denomina **sobreestimación** [2] y no sirve para ningún propósito puesto que el modelo será utilizado con otras perturbaciones. De hecho el modelo será peor debido a la sobreestimación.

La manera de solucionar el problema de la sobreestimación es minimizar la siguiente expresión:

$$\min_{d,\theta} \left( f(d, N) \sum_{t=1}^N \varepsilon^2(t, \theta) \right) \quad (7)$$

Recuérdese que  $N$  es el número de datos y  $d$  es el número de parámetros  $n_a+n_b$ . El valor de la función  $f(d,N)$  aumenta si aumenta  $d$ , disminuye si disminuye  $N$ . Minimizando (7) se está penalizando aquel modelo que posea un número de parámetros excesivo y no posea una buena función de coste.

Las expresiones para (7) más utilizadas son:

1. Error de predicción final de Akaike (FPE).

$$FPE = \min_{d,\theta} \left( \frac{1 + \frac{d}{N}}{1 - \frac{d}{N}} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N \varepsilon^2(t, \theta) \right) \quad (8)$$

2. Criterio teórico de información de Akaike (AIC).

$$AIC = \min_{d,\theta} \left( \left( 1 + \frac{2d}{N} \right) \cdot \sum_{t=1}^N \varepsilon^2(t, \theta) \right) \quad (9)$$

### 2.2.3 IDENTIFICACIÓN CON OLEAJE IRREGULAR DE MODELOS DISCRETOS SIMO

El sistema que se pretendía identificar es un sistema discreto multivariable SIMO con una entrada y dos salidas : movimiento de pitch y movimiento de heave. (Figura 2.5)

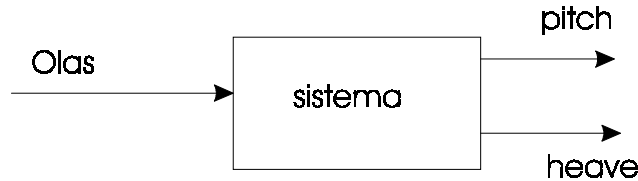


Figura 2.5 : Sistema SIMO a identificar

A la vista de las ecuaciones que se tienen para la dinámica del pitch y del heave utilizando olas regulares [7] debe existir en acoplo entre ambos movimientos, por lo que deben existir polos comunes en las funciones de transferencia que se identifiquen para el pitch y para el heave. Se ha considerado que no existe retardo.

$$\begin{aligned}
 G_p(z^{-1}) &= z^{-nkp} \frac{b_1 + b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + \dots + b_{nbp} z^{-(nbp-1)}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{nap} z^{-nap}} \\
 G_H(z^{-1}) &= z^{-nkh} \frac{e_1 + e_2 z^{-1} + e_3 z^{-2} + \dots + e_{nbh} z^{-(nbh-1)}}{1 + h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots + h_{nah} z^{-nah}}
 \end{aligned} \quad (10)$$

La forma que se desea que tengan las funciones de transferencia que se identifiquen es :

$$\begin{aligned}
 G_p(z^{-1}) &= \frac{b_1 + b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + \dots + b_{nbp} z^{-(nbp-1)}}{(1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_{nc} z^{-nc}) (1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} + \dots + f_{nf} z^{-nf})} \\
 G_H(z^{-1}) &= \frac{e_1 + e_2 z^{-1} + e_3 z^{-2} + \dots + e_{nbh} z^{-(nbh-1)}}{(1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_{nc} z^{-nc}) (1 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + \dots + g_{ng} z^{-ng})}
 \end{aligned} \quad (11)$$

donde :

$$\begin{aligned}
 nap &= nc + nf \\
 nah &= nc + ng \\
 nbp &\leq nap \\
 nbh &\leq nah
 \end{aligned}$$

Los parámetros a estimar serían :

$$\theta = [c_1, c_2, \dots, c_{nc}, f_1, f_2, \dots, f_{nf}, g_1, g_2, \dots, g_{ng}, b_1, b_2, \dots, b_{nbp}, e_1, e_2, \dots, e_{nbh}]^T \quad (12)$$

La Figura 2.6 muestra en diagramas de bloques lo expresado en las ecuaciones (2)

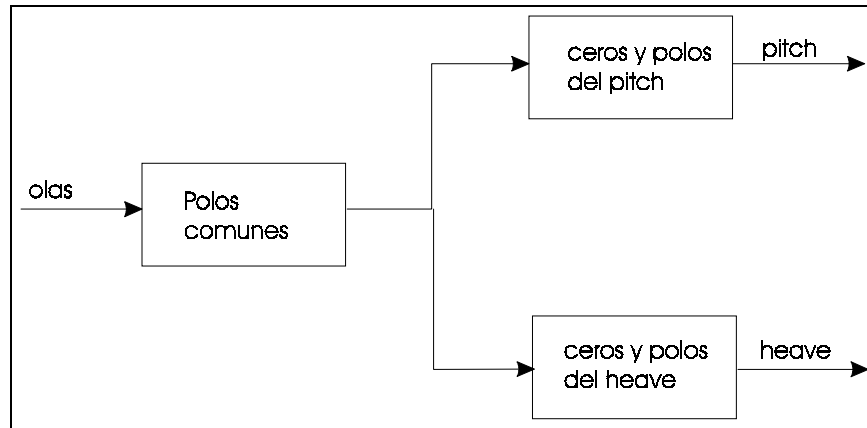


Figura 2.6 : Sistema a identificar descompuesto en diferentes bloques

Partiendo de las ecuaciones (1) y (2) es posible obtener las siguientes ecuaciones en diferencias:

$$\begin{aligned}
 \hat{y}_p(k) &= -a_1 y_p(k-1) - a_2 y_p(k-2) - \dots - a_{nap} y_p(k-nap) + b_1 \mu(k-nkp) + \dots + b_{nbp} \mu(k-(nkp+nbp-1)) \\
 \hat{y}_h(k) &= -h_1 y_h(k-1) - h_2 y_h(k-2) - \dots - h_{nah} y_h(k-nah) + e_1 \mu(k-nkh) + \dots + e_{nbh} \mu(k-(nkh+nbh-1))
 \end{aligned} \quad (13)$$

$k = 2, 3, \dots, N$

donde N es el número de muestras que se tienen para la altura de las olas, pitch y heave.

Donde se tiene que:

$$\begin{aligned}
 a_i &= F_i(c_1, c_2, \dots, c_{nc}, f_1, f_2, \dots, f_{nf}) \quad i = 1, 2, \dots, nap \\
 h_j &= G_j(c_1, c_2, \dots, c_{nc}, g_1, g_2, \dots, g_{ng}) \quad j = 1, 2, \dots, nah
 \end{aligned}$$

son funciones no lineales en los parámetros a estimar.

Sean las salidas estimadas para el instante de muestreo k las dadas por las ecuaciones (5), el error que se tendría con respecto a las salidas que se mediría experimentalmente es :

$$\begin{bmatrix} e_p(k) \\ e_h(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_p(k) \\ y_h(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{y}_p(k) \\ \hat{y}_h(k) \end{bmatrix}$$

Considerando todos los valores de k se obtendría :

$$\begin{bmatrix} e_p(2) \\ e_h(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ e_p(N) \\ e_h(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_p(2) \\ y_h(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ y_p(N) \\ y_h(N) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{y}_p(2) \\ \hat{y}_h(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{y}_p(N) \\ \hat{y}_h(N) \end{bmatrix}$$

$E = Y - \hat{Y}$

La función de coste a minimizar sería (11) sujeta a las restricciones (R1) y (R3), donde R3 tiene la forma :

$$\sum_{i=1}^{nbh} e_i - \sum_{j=1}^{nah} h_j = 1 \quad (R3)$$

Es decir ,se trata de un problema de mínimos cuadrados no lineales con restricciones. En el apéndice B se explican las funciones utilizadas para resolver este problema.

Para referirnos a los modelos ARX SIMO se utiliza la nomenclatura (nc, nap, nbp, nkp, nah, nbh, nkh) donde nc- número de polos comunes al movimiento de pitch y al movimiento de heave.

nap- número de polos del pitch

nbp- número de ceros menos uno del pitch

nkp- retardo entre la entrada y la salida de pitch

nah- número de polos del heave

nbh- número de ceros menos uno del heave

nkh- retardo entre la entrada y la salida de heave

A la hora de seleccionar la estructura se procedió en tres pasos :

1. El primer paso fue dejar fijados los valores (3, 10, 10, nkp, 10, 10, nkh ). El fijar nc=3 atiende a razones físicas, mientras que el dejar nap=nah=nbp=nbh=10 es aleatorio. Por otro lado se dejó variar nkp y nkh entre [0,1,2,...,10]. Se seleccionaba aquella estructura con menor FPE.
2. Con los valores de nkp y nkh de la estructura seleccionada en el paso anterior, a los que se denomina por nkp' y nkh' : (3, nap, nbp, nkp', nap, nbp, nkh' ) se deja variar nap, nbp, nah y nbh entre [7 ,8,9,10] y se selecciona aquella estructura con la que al identificar sus parámetros se obtuviera el menor valor de FPE.
3. En algunos casos a la vista de los diagramas de polos y ceros de las funciones de transferencia  $G_p(z)$  y  $G_H(z)$ , derivadas del modelo obtenido, podía aumentarse el número de polos de acoplo a nc=5 y hay que repetir los pasos 1 y 2 .

Es posible obtener una representación en variables de estado para el sistema SIMO identificado, el procedimiento para obtenerla se muestra en el cuadro 5.

**Cuadro 5 : Representación en variables de estado del modelo SIMO**

**REPRESENTACION EN VARIABLES DE ESTADO**

Las funciones de transferencia (20) se pueden escribir como :

$$G_p(z^{-1}) = \frac{nump(z^{-1})}{denc(z^{-1}) \cdot denp(z^{-1})} \quad G_h(z^{-1}) = \frac{numh(z^{-1})}{denc(z^{-1}) \cdot denh(z^{-1})} \quad (14)$$

donde :

nump es el numerador del Pitch, numh es el numerador del heave, denc son los polos comunes del pitch y del heave, denp son los polos exclusivos del pitch y denh son los polos exclusivos del heave

Según Kaitlat [1] un sistema multivariable se puede expresar en la forma:

$$G(z^{-1}) = \frac{1}{d(z^{-1})} \cdot [N_1 + \dots + N_r z^{r-1}] \quad (15)$$

$$d(z^{-1}) = 1 + d_1 z^{-1} + \dots + d_r z^{-r}$$

El polinomio d(z) es el resultado de obtener el mínimo común múltiplo de los denominadores de Gp(z<sup>-1</sup>) y Gh(z<sup>-1</sup>).

Luego

$$G_p(z^{-1}) = \frac{nump(z^{-1})denh(z^{-1})}{denc(z^{-1}) \cdot denp(z^{-1})denh(z^{-1})} \quad G_h(z^{-1}) = \frac{numh(z^{-1})denp(z^{-1})}{denc(z^{-1}) \cdot denh(z^{-1})denp(z^{-1})} \quad (16)$$

Con lo que :

$$d(z^{-1}) = denc(z^{-1}) \cdot denp(z^{-1}) \cdot denh(z^{-1})$$

$$\begin{bmatrix} nump \cdot denh \\ numh \cdot denp \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n11 & \dots & n1r \\ n21 & \dots & n2r \end{bmatrix} = [N1 \quad N2 \quad \dots \quad Nr]$$

La representación en variables de estado en forma controlable estará dada por:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A x(k) + B u(k) \\ y(k) &= C x(k) + D u(k) \end{aligned} \quad (17)$$

Se cumple que D=0 ya que solo hay una entrada, el vector de estados iniciales x<sub>0</sub>=0 El resto de matrices son:

$$A = \begin{bmatrix} -d_1 & -d_2 & \dots & -d_r \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}_{rxr} \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}_{rx1} \quad C = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \dots & n_{1r} \\ n_{21} & n_{22} & \dots & n_{2r} \end{bmatrix}_{2,rx} \quad (18)$$



## 2.2.4 IDENTIFICACION CON OLEAJE REGULAR DE MODELOS SISO CONTINUOS

La identificación se realizó en el dominio de la frecuencia. Se partió de los puntos experimentales de magnitud y de fase medidos a las frecuencias  $\omega_{ei}$  con  $i=1,2,\dots,14$  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 siguiente estructura :

$$\hat{H}(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (19)$$

Los parámetros que se estiman son :  $P=(a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, b_0, \dots, b_m)$

Como sucedía con el caso discreto hay que fijar el orden del numerador y el orden del denominador de  $\hat{G}_P(s)$  y  $\hat{G}_H(s)$  que se desea estimar.

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

$$\begin{aligned}
 K(P) &= \sum_{k=1}^N |H(j\omega_{ek}) - \hat{H}(j\omega_{ek})|^2 \\
 K(P) &= \sum_{k=1}^N \left( \left( \text{Re}(H(j\omega_{ek})) - \text{Re}(\hat{H}(j\omega_{ek})) \right)^2 + \left( \text{Im}(H(j\omega_{ek})) - \text{Im}(\hat{H}(j\omega_{ek})) \right)^2 \right) \quad (20)
 \end{aligned}$$

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

## 2.2.5 IDENTIFICACION CON OLEAJE REGULAR DE MODELOS SIMO CONTINUOS

(Trabajo pendiente de realizar)

### 2.3 VALIDACION DE LOS MODELOS IDENTIFICADOS.

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

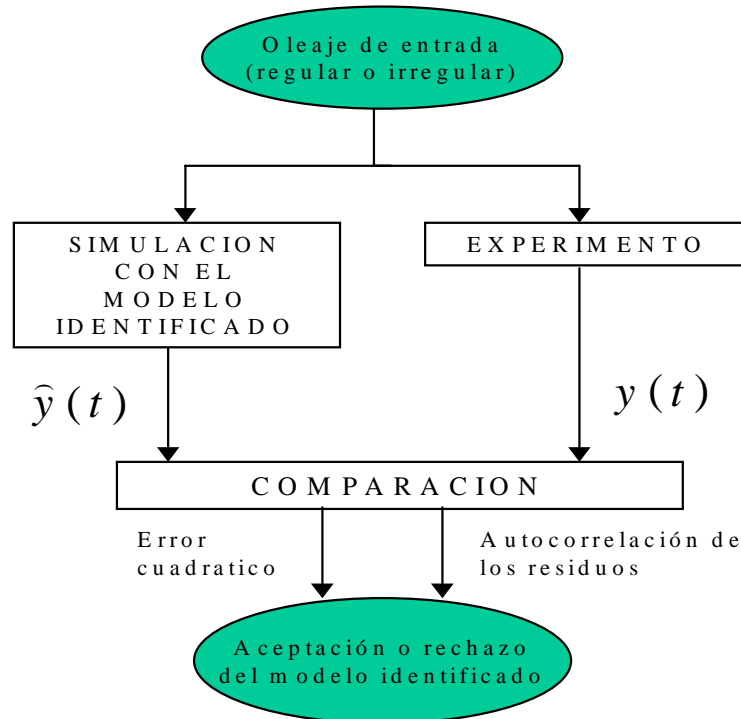


Figura 2.7: Esquema del proceso de validación

Dado un modelo ya sea discreto o continuo SISO o SIMO el proceso de validación es siempre el mismo. 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 fue identificado. Se utilizó otro registro de datos, en los casos en que fue posible, distinto al utilizado en el proceso de estima de parámetros con el objetivo de ganar en validez del modelo. 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 (21) donde  $N$  es el número de muestras utilizado.:

$$e_{2m} = \frac{1}{N} (\hat{y} - y)^T \cdot (\hat{y} - y) \quad (21)$$

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.

Por otra parte el modelo SIMO obtenido se comparó con los modelos SISO. La comparación se realizó observando su diagrama de polos y ceros y su diagrama de Bode. Para poder comprobar que la identificación del modelo SIMO había sido correcta.

Por último los modelos continuos fueron pasados a discreto para ser comparados con los modelos discretos ARX que se habían identificado y comparar sus similitudes y diferencias. Los modelos discretos ARX no podían ser pasados a continuo debido a que siempre aparecía un polo real negativo que impide su transformación.

## 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

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  $\omega_i$  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 :

$$G^l(s) = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m}{s^n + a_0 s^{n-1} + \dots + a_{n-1}} \quad (22)$$

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

$$G(s) = \frac{\hat{b}_0 s^m + \hat{b}_1 s^{m-1} + \dots + \hat{b}_m}{s^n + \hat{a}_0 s^{n-1} + \dots + \hat{a}_{n-1}} \quad (23)$$

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

$$\mathbf{G}(s) = \left\{ G(s) : b_i \in [b_i - w_{n_i} \cdot \varepsilon_{n_i}^-, b_i + w_{n_i} \cdot \varepsilon_{n_i}^+], a_i \in [a_i - w_{d_i} \cdot \varepsilon_{d_i}^-, a_i + w_{d_i} \cdot \varepsilon_{d_i}^+] \quad \forall i \right\} \quad (24)$$

donde los  $w_{n_i}$  y los  $w_{d_i}$  son pesos escogidos a priori. Además los  $\varepsilon_{n_i}$  y los  $\varepsilon_{d_i}$  son parámetros de dilatación

### 2.4.1 SELECCIÓN DE PESOS W.

Supóngase 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-esimo que es el medido  $D(j\omega)$ .

Construyanse los modelos l-esimos que se llaman  $G_l^l(s)$  :

$$G_l^l(s) = \frac{b_0^l s^m + \dots + b_m^l}{s^n + a_1^l s^{n-1} + \dots + a_{n-1}^l}$$

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 sería :

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

$$\bar{w} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N |b_0 - b_0^l|, \dots, \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N |a_{n-1} - a_{n-1}^l| \right] \quad (25)$$

$$\bar{w} = [w_{b0}, w_{b1}, \dots, w_{bm}, w_{a0}, \dots, w_{a_{n-1}}]$$

### 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  $\omega$ :

$$G(j\omega_i) = \frac{(\hat{b}_0 - \omega_i^2 \hat{b}_2 + \dots) + j \cdot (\omega_i \hat{b}_1 - \omega_i^3 \hat{b}_3 + \dots)}{(\hat{a}_0 - \omega_i^2 \hat{a}_2 + \dots) + j \cdot (\omega_i \hat{a}_1 - \omega_i^3 \hat{a}_3 + \dots)} = \frac{n1 + j \cdot n2}{d1 + j \cdot d2}$$

Dependiendo del valor de  $n$ ,  $T_i$  será real o imaginario. Si se iguala con el punto medido  $D(j\omega)$  a la frecuencia  $\omega$  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 :

$$F_1(\alpha_i, \beta_i, b_0^i, \dots, b_m^i, a_0^i, \dots, a_{n-1}^i) = (\alpha_i d1 - \beta_i d2) - n1 = 0$$

$$F_2(\alpha_i, \beta_i, b_0^i, \dots, b_m^i, a_0^i, \dots, a_{n-1}^i) = (\beta_i d1 + \alpha_i d2) - n2 = 0$$

sustituyendo las expresiones de los parámetros dados por (23) y operando se obtiene :

$$A \cdot \bar{p} + A \cdot W \cdot \bar{\epsilon}_i = -E$$

$$A \cdot W \cdot \bar{\epsilon}_i = -B - E$$

donde :

$$A(\omega_i, \alpha_i, \beta_i) = \begin{bmatrix} \alpha_i & -\beta_i \omega_i & \alpha_i \omega_i^2 & -\beta_i \omega_i^3 & \dots & -1 & 0 & \omega_i^2 & 0 & \omega_i^4 & \dots \\ \beta_i & \alpha_i \omega_i & -\beta_i \omega_i^2 & \alpha_i \omega_i^3 & \dots & 0 & \omega_i & 0 & \omega_i^3 & 0 & \dots \end{bmatrix}$$

$$E(\omega_i, \alpha_i, \beta_i) = \begin{bmatrix} k_1 \omega^n \\ k_2 \omega^n \end{bmatrix} \quad k_1 = \begin{cases} \alpha_i & \text{si } n = 0, 4, 8, \dots \\ -\beta_i & \text{si } n = 1, 5, 9, \dots \\ -\alpha_i & \text{si } n = 2, 6, 10, \dots \\ \beta_i & \text{si } n = 3, 7, 11, \dots \end{cases} \quad k_{21} = \begin{cases} \beta_i & \text{si } n = 0, 4, 8, \dots \\ \alpha_i & \text{si } n = 1, 5, 9, \dots \\ -\beta_i & \text{si } n = 2, 6, 10, \dots \\ -\alpha_i & \text{si } n = 3, 7, 11, \dots \end{cases}$$

$$W = \begin{bmatrix} w_{b0} & & & & & & & & & & 0 \\ & w_{b1} & & & & & & & & & \\ & & \cdot & & & & & & & & \\ & & & w_{b_m} & & & & & & & \\ & & & & w_{a0} & & & & & & \\ & & & & & w_{a1} & & & & & \\ & & & & & & \cdot & & & & \\ 0 & & & & & & & & & & w_{a_{n-1}} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\epsilon}_i = [\epsilon_{b0}^i \quad \dots \quad \epsilon_{b_m}^i \quad \epsilon_{a0}^i \quad \dots \quad \epsilon_{a_{n-1}}^i]^T$$

$$\bar{p} = [b_0, b_1, \dots, b_m, a_0, \dots, a_{n-1}]^T$$

$$B = A \cdot \bar{p} \quad (26)$$

El vector  $\boldsymbol{\varepsilon}_i$  hace referencia a los parámetros de dilatación que se obtendrían para la frecuencia  $\omega$ , despejando a  $\boldsymbol{\varepsilon}_i$  se obtiene :

$$\boxed{\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_i = -W^{-1} (A^T A)^{-1} A^T (B + E)} \quad (27)$$

Una vez que se calculen todos los  $\boldsymbol{\varepsilon}_i$  para  $i=1, \dots, N$  se pueden calcular los parametros de dilatación de los intervalos :

$$\boxed{\begin{matrix} \varepsilon_{b_k}^- = \min_i \{0, \varepsilon_{b_k}^i\} & \varepsilon_{b_k}^+ = \max_i \{0, \varepsilon_{b_k}^i\} \\ \varepsilon_{a_k}^- = \min_i \{0, \varepsilon_{a_k}^i\} & \varepsilon_{a_k}^+ = \max_i \{0, \varepsilon_{a_k}^i\} \end{matrix}} \quad (28)$$

### 3. MODELOS ARX SISO IDENTIFICADOS CON OLEAJE IRREGULAR.

En la Tabla 3.1 se presentan los modelos ARX para el movimiento de pitch que han sido seleccionados por tener el FPE más pequeño.

*Tabla 3.1 : Modelos seleccionados para el movimiento de Pitch*

Estado de la mar	Velocidad del buque (nudos)	Modelo ARX con menor FPE (na,nb,nk)	V (grado <sup>2</sup> )	FPE (grado <sup>2</sup> )
	20	(10,10,8)P	1.4866	0.003322
4	30	(10,8,8)P	3.4795	0.0138
	40	(9,9,9)P	2.5940	0.0183
	20	(10,10,8)P	1.4428	0.003224
5	30	(7,7,8)P	5.2156	0.02254
	40	(10,10,6)P	2.5174	0.01795
	20	(10,10,6)P	2.1633	0.004835
6	30	(10,10,6)P	2.2725	0.0102
	40	(7,6,6)P	2.8845	0.020972

En la Tabla 3.2 se presentan los modelos ARX para el movimiento de heave que han sido seleccionados por tener el FPE más pequeño.

*Tabla 3.2 : Modelos seleccionados para el movimiento de Heave*

Estado de la mar	Velocidad del buque (nudos)	Modelo ARX con menor FPE (na,nb,nk)	V (m <sup>2</sup> )	FPE (m <sup>2</sup> )
	20	(10,8,5)H	0.17735	0.0004646
4	30	(10,8,5)H	0.1169	0.000523
	40	(10,10,4)H	0.07626	0.00054406
	20	(10,10,4)H	0.23486	0.00052492
5	30	(10,10,6)H	0.20553	0.00089553
	40	(10,10,3)H	0.17913	0.0012778
	20	(10,10,1)H	0.32902	0.00073538
6	30	(10,8,4)H	0.33088	0.0014729
	40	(10,9,4)H	0.40223	0.0030447

En las siguientes subsecciones se presentan las características de los modelos identificados. Indicar que el diagrama de Bode de los datos experimentales fue obtenido con la función *spa.m* de la toolbox IDENT de MATLAB. Indicar también que en las simulaciones el coeficiente  $e_{2m}$  es el error cuadrático medio dado por (21).

### 3.1 ESTADO DE LA MAR 4 Y VELOCIDAD 20 NUDOS

#### MODELO : (10,10,8)P

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.03279 z^{-8} + 0.006498 z^{-9} - 0.02043 z^{-10} + 0.06555 z^{-11} - 0.1235 z^{-12} \\
 & + 0.1107 z^{-13} - 0.1236 z^{-14} + 0.1837 z^{-15} - 0.1985 z^{-16} \\
 & \qquad \qquad \qquad + 0.1324 z^{-17} \\
 G_p(z) = & \frac{-0.03279 z^{-8} + 0.006498 z^{-9} - 0.02043 z^{-10} + 0.06555 z^{-11} - 0.1235 z^{-12} + 0.1107 z^{-13} - 0.1236 z^{-14} + 0.1837 z^{-15} - 0.1985 z^{-16} + 0.1324 z^{-17}}{1 - 2.145 z^{-1} + 1.628 z^{-2} + 0.2332 z^{-3} - 1.27 z^{-4} + 0.5695 z^{-5} + 0.2321 z^{-6} + 0.1616 z^{-7} - 0.7593 z^{-8} + 0.6729 z^{-9}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.3 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.3 : Valor y propiedades<sup>1</sup> de los polos del modelo.*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-0.94816	0.21293	1
-0.57107 + 0.5801i	9.4294	0.087285
-0.57107 - 0.5801i	9.4294	0.087285
0.37046 + 0.8588i	4.6618	0.057397
0.37046 - 0.8588i	4.6618	0.057397
0.56992 + 0.62671i	3.3967	0.19541
0.56992 - 0.62671i	3.3967	0.19541
0.91415 + 0.26751i	1.1553	0.16854
0.91415 - 0.26751i	1.1553	0.16854
0.52649	2.5661	1

En la Tabla 3.4 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.4 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-1.0794 + 0.99694i	9.7064	-0.15859
-1.0794 - 0.99694i	9.7064	-0.15859
-0.58772 + 1.0951i	8.2991	-0.10477
-0.58772 - 1.0951i	8.2991	-0.10477
0.42099 + 0.9274i	4.5793	-0.015991
0.42099 - 0.9274i	4.5793	-0.015991
1	5.7288e-014	1
0.84525 + 0.67263i	2.7063	-0.11405
0.84525 - 0.67263i	2.7063	-0.11405

En la Figura 3.1 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

<sup>1</sup> NaN.es la representación aritmética del IEEE para cantidades que no son un número Se btiene como resultado de operaciones matematicas como 0/0 o inf/inf

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

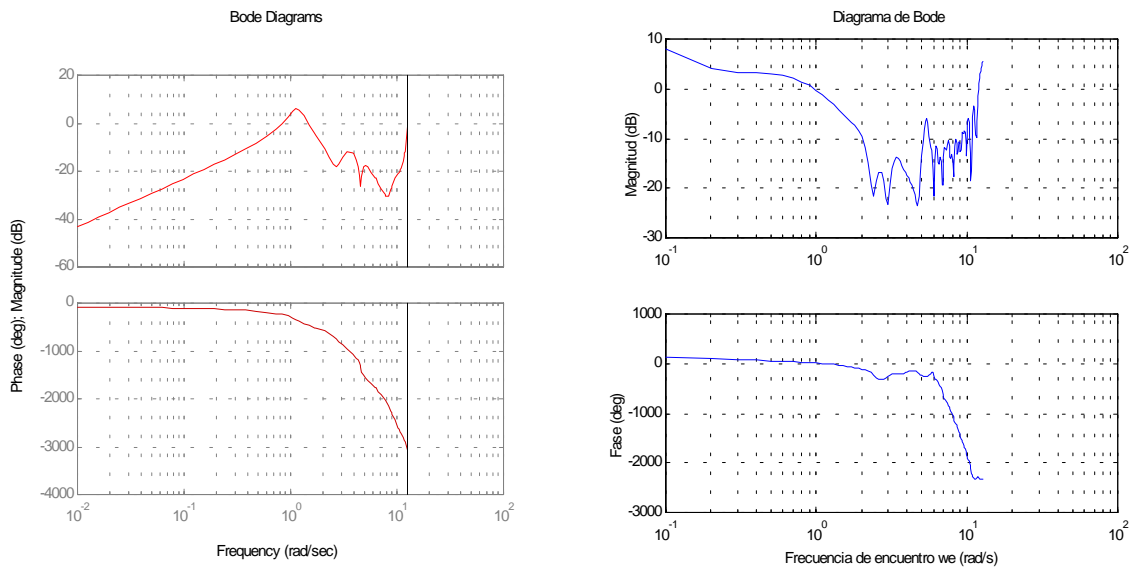


Figura 3.1 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

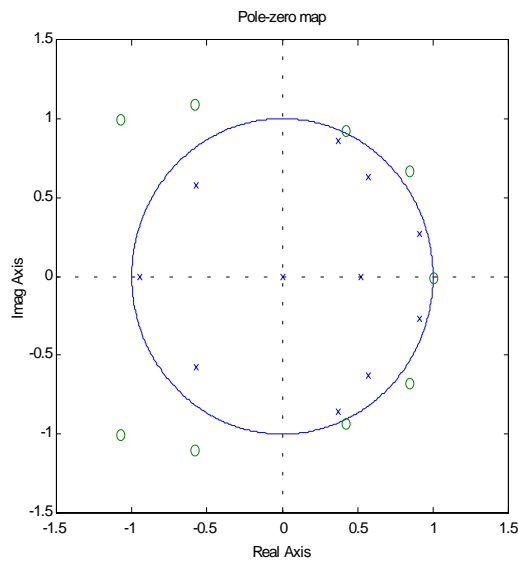
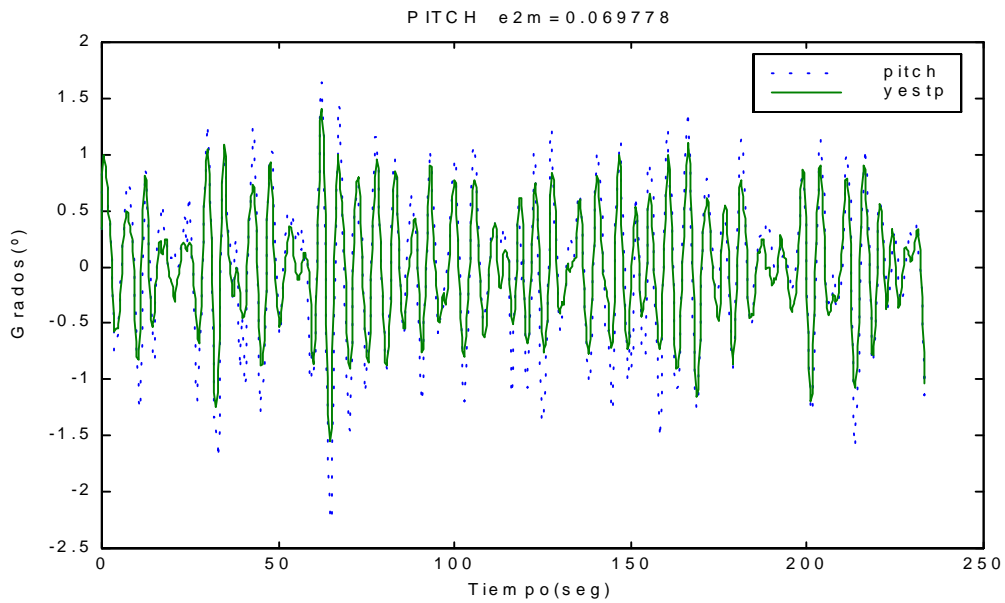


Figura 3.2 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

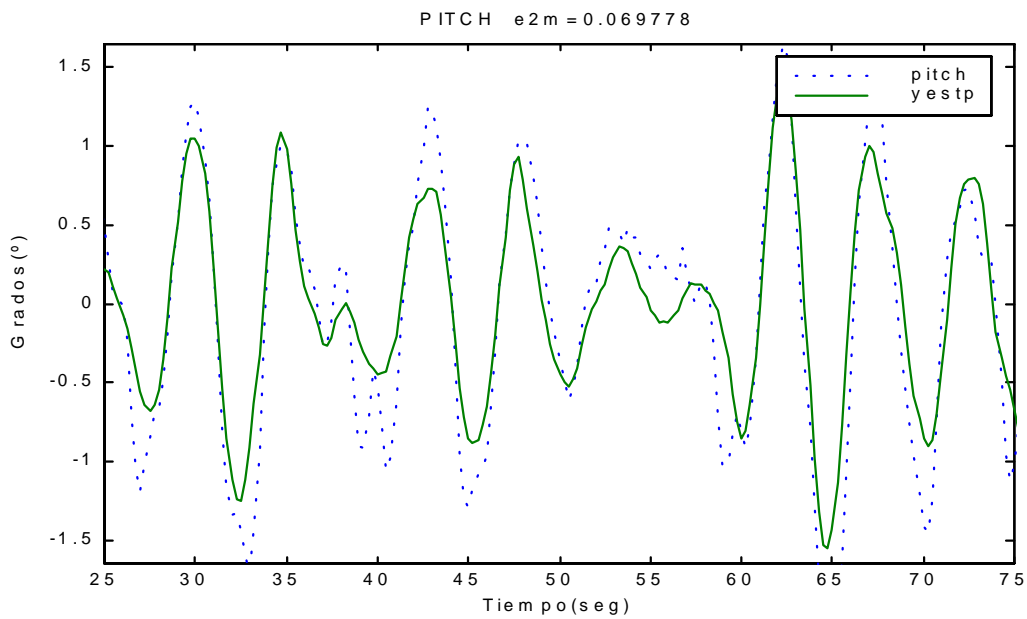
En la Figura 3.3 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)



(b)

Figura 3.3 : Salida del modelo(yestp) comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.4 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf2025).

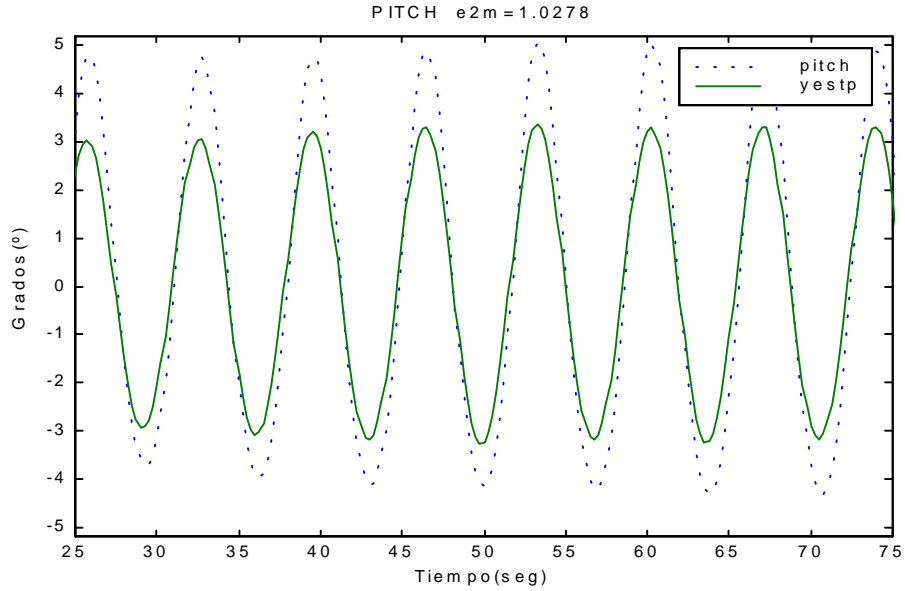


Figura 3.4 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf2025).

**MODELO : (10,8,5)H**

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 &0.03752 z^{-5} - 0.05689 z^{-6} + 0.05669 z^{-7} - 0.02449 z^{-8} + 0.01744 z^{-9} \\
 &\quad + 0.02682 z^{-10} - 0.03282 z^{-11} + 0.04166 z^{-12} \\
 G_H(z) = &\frac{\text{-----}}{1 - 0.9597 z^{-1} - 0.4083 z^{-2} + 0.2555 z^{-3} + 0.02222 z^{-4} + 0.3383 z^{-5} \\
 &- 0.1559 z^{-6} + 0.1227 z^{-7} - 0.232 z^{-8} + 0.1078 z^{-9} - 0.02481 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.5 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.5 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
-0.95977		0.16423	1
-0.51923 +	0.56678i	9.3094	0.11305
-0.51923 -	0.56678i	9.3094	0.11305
-0.028791 +	0.72361i	6.5703	0.19647
-0.028791 -	0.72361i	6.5703	0.19647
0.82105 +	0.25996i	1.3644	0.43802
0.82105 -	0.25996i	1.3644	0.43802
0.87035		0.55545	1
0.25153 +	0.25681i	5.1846	0.78934
0.25153 -	0.25681i	5.1846	0.78934

En la Tabla 3.6 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.6 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0.96916 +	0.61863i	2.34	-0.23856
0.96916 -	0.61863i	2.34	-0.23856
0.50743 +	0.84348i	4.1173	0.015324
0.50743 -	0.84348i	4.1173	0.015324
-0.86553		0.57767	1
-0.28563 +	0.95912i	7.441	-0.0004012
-0.28563 -	0.95912i	7.441	-0.0004012

En la Figura 3.5 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

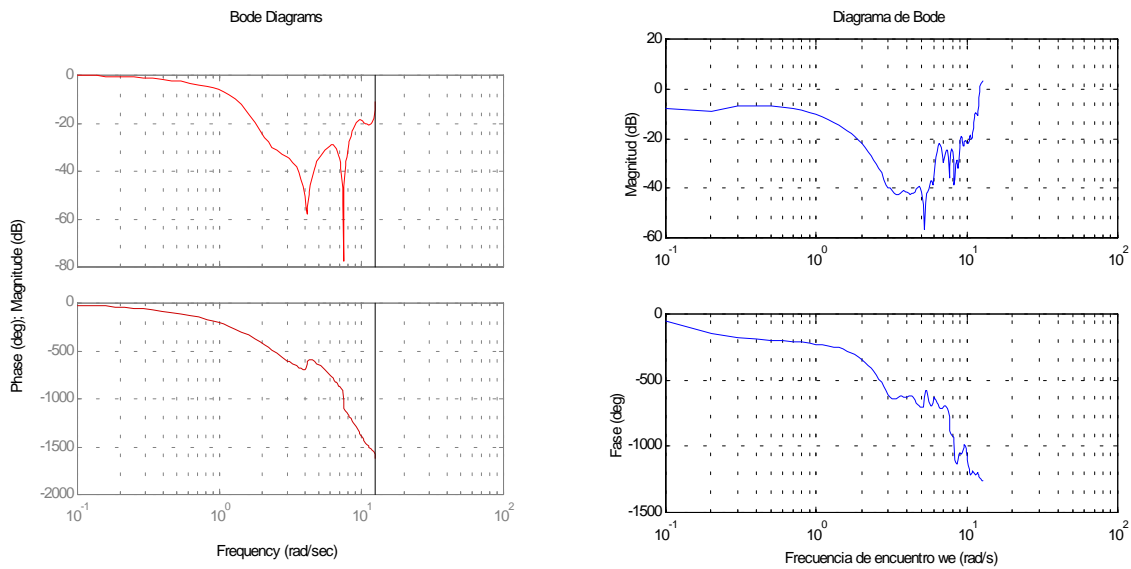


Figura 3.5 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.6 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

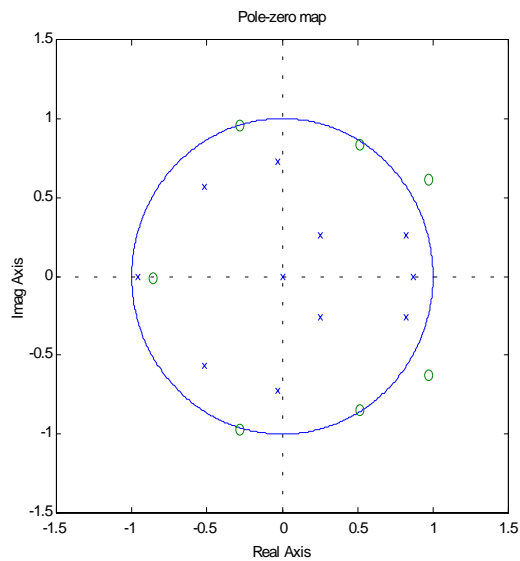
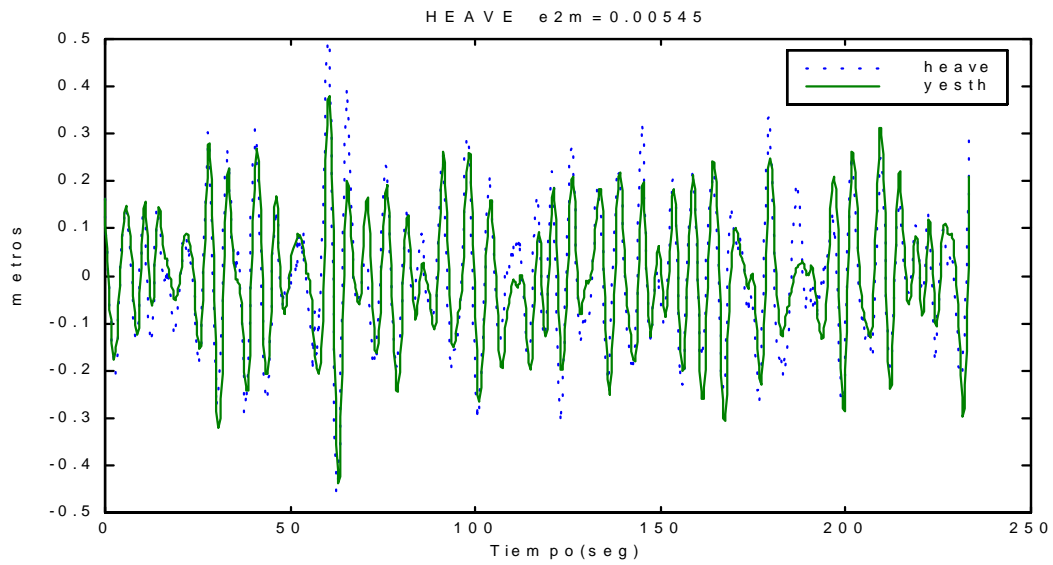


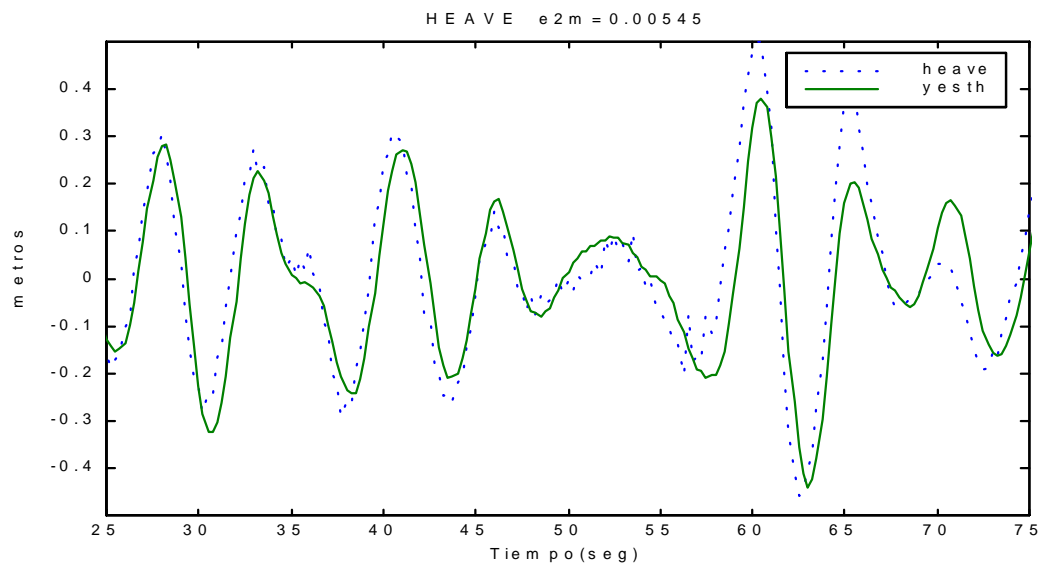
Figura 3.6 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

En la Figura 3.7 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)



(b)

Figura 3.7 : Salida del modelo(yesth) comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.8 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf2025).

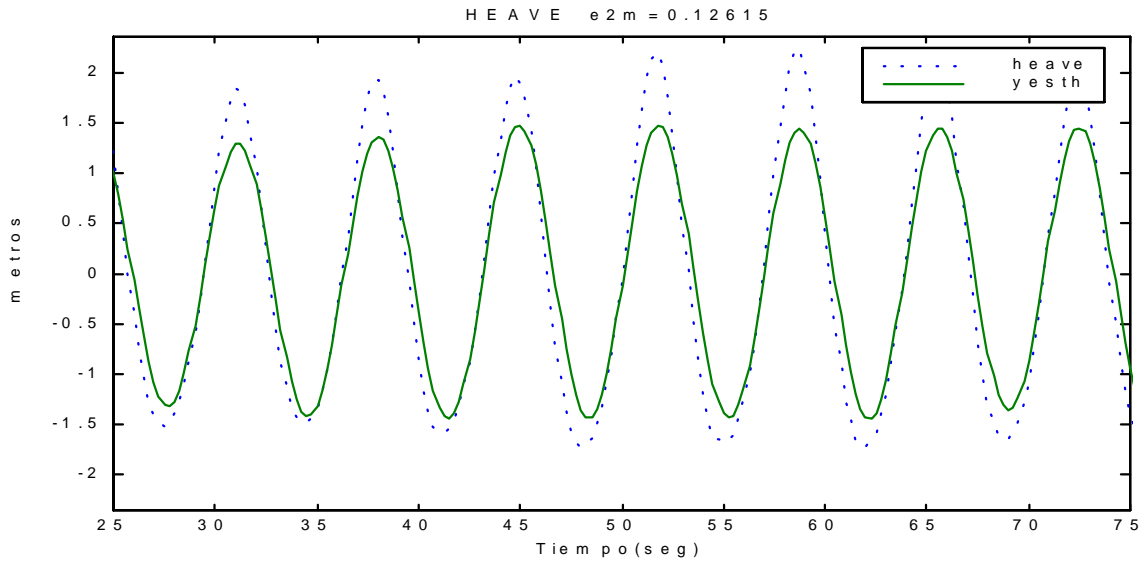


Figura 3.8 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf2025).

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

**3.2 ESTADO DE LA MAR 4 Y VELOCIDAD 30 NUDOS**  
**MODELO : (10,10,8)P**

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.1241 z^{-8} + 0.2456 z^{-9} - 0.4162 z^{-10} + 0.5084 z^{-11} - 0.6065 z^{-12} \\
 & \quad + 0.5973 z^{-13} - 0.4405 z^{-14} + 0.2361 z^{-15} \\
 G_p(z) = & \frac{-0.1241 z^{-8} + 0.2456 z^{-9} - 0.4162 z^{-10} + 0.5084 z^{-11} - 0.6065 z^{-12} + 0.5973 z^{-13} - 0.4405 z^{-14} + 0.2361 z^{-15}}{1 - 1.73 z^{-1} + 1.361 z^{-2} - 0.3451 z^{-3} - 0.5915 z^{-4} + 0.7445 z^{-5} - 0.2532 z^{-6} + 0.004972 z^{-7} - 0.08032 z^{-8} + 0.312 z^{-9} - 0.1775 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.7 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.7 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos		Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0.090444 +	0.93779i	5.9034	0.040382
0.090444 -	0.93779i	5.9034	0.040382
0.88452 +	0.3265i	1.4339	0.16416
0.88452 -	0.3265i	1.4339	0.16416
0.49204 +	0.728i	3.9399	0.13131
0.49204 -	0.728i	3.9399	0.13131
-0.86572		0.57676	1
-0.50693 +	0.49106i	9.5902	0.14534
-0.50693 -	0.49106i	9.5902	0.14534
0.6758		1.5674	1

En la Tabla 3.8 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.8 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros		Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.52631 +	1.0257i	8.1993	-0.069398
-0.52631 -	1.0257i	8.1993	-0.069398
1		4.4409e-015	-1
0.75469 +	0.83034i	3.3641	-0.13694
0.75469 -	0.83034i	3.3641	-0.13694
0.26085 +	1.0337i	5.3006	-0.048289
0.26085 -	1.0337i	5.3006	-0.048289

En la Figura 3.9 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

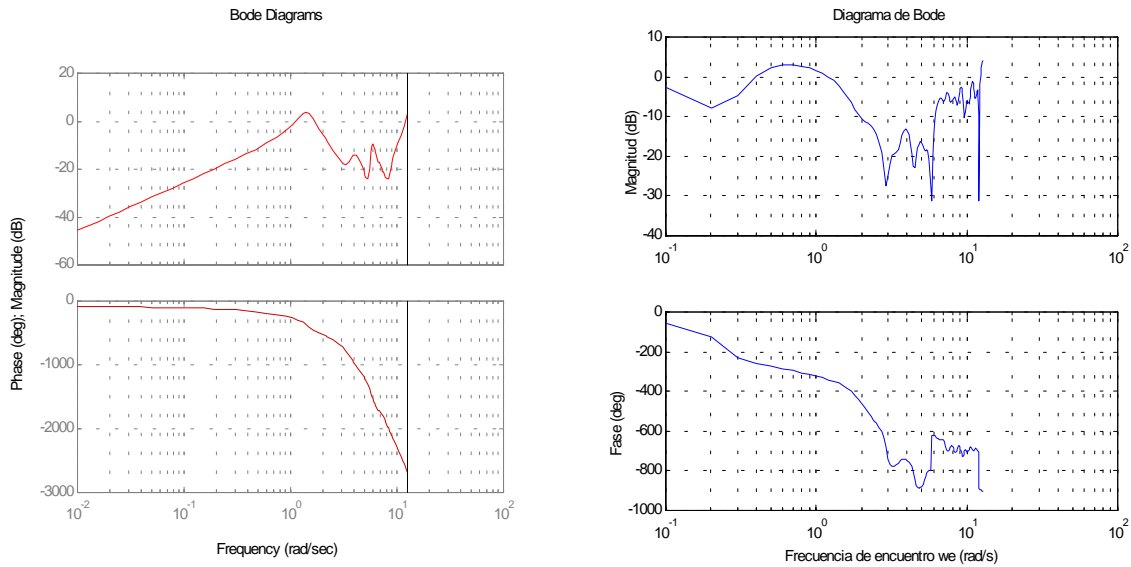


Figura 3.9 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.10 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

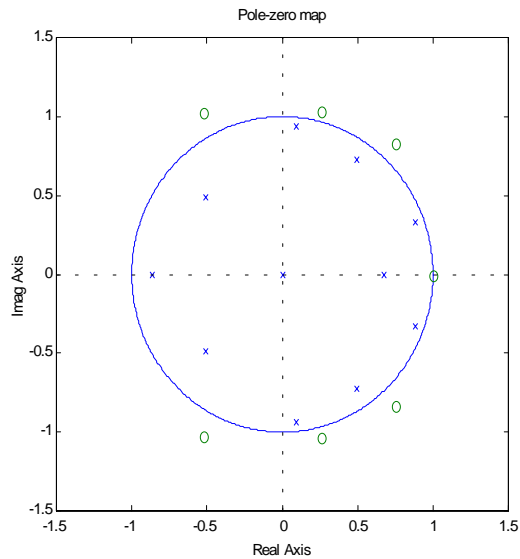
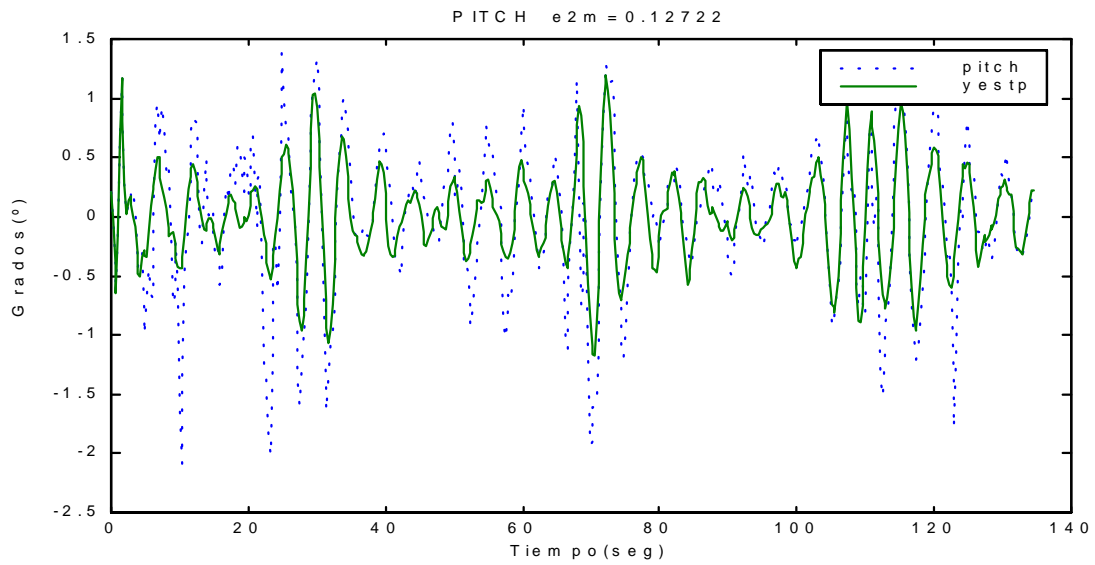


Figura 3.10 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

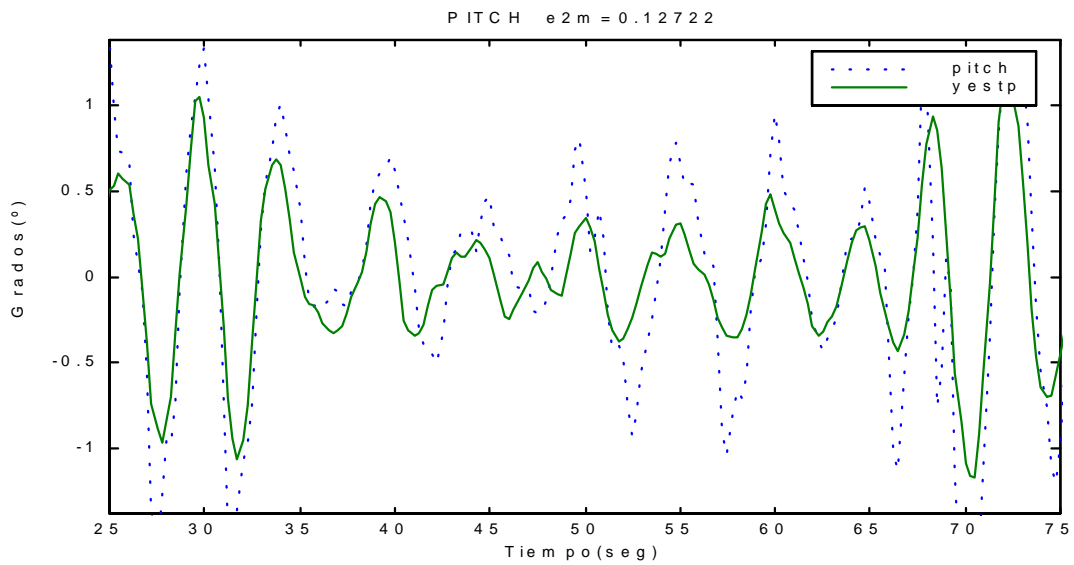
En la Figura 3.11 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)



(b)

Figura 3.11 : Salida del modelo(yestp) comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.12 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf3025).

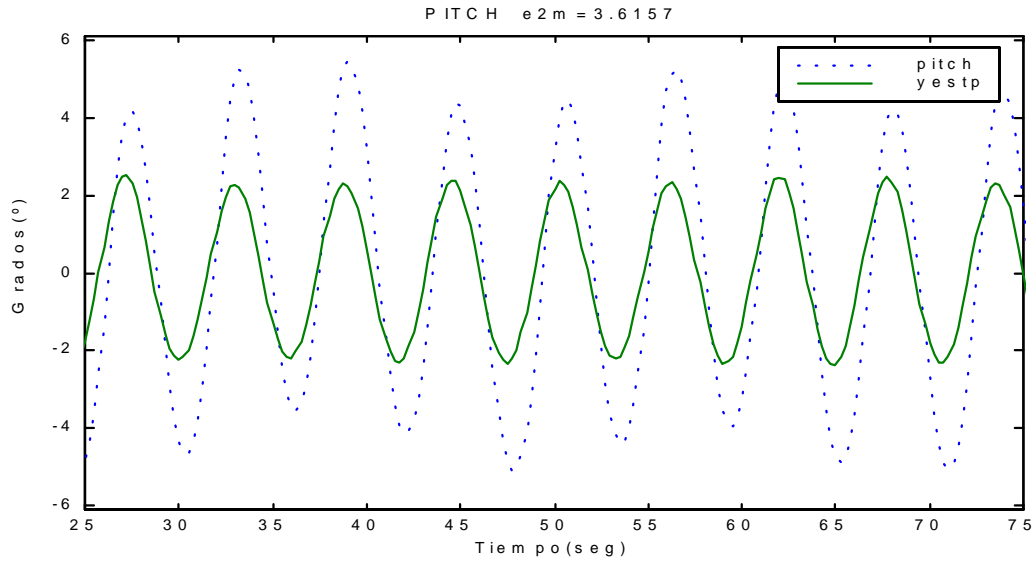


Figura 3.12 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf3025).

**MODELO : (10,8,5)H**

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 &0.04439 z^{-5} - 0.0824 z^{-6} + 0.1346 z^{-7} - 0.1144 z^{-8} + 0.1122 z^{-9} \\
 &\quad - 0.04205 z^{-10} + 0.0171 z^{-11} + 0.01636 z^{-12} \\
 G_H(z) = &\frac{\quad}{1 - 1.065 z^{-1} - 0.3397 z^{-2} + 0.4543 z^{-3} + 0.03496 z^{-4} + 0.1695 z^{-5} \\
 &\quad - 0.1643 z^{-6} + 0.05112 z^{-7} - 0.1286 z^{-8} + 0.2195 z^{-9} \\
 &\quad - 0.1458 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.9 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.9 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
-0.95377		0.18934	1
-0.61372 +	0.52387i	9.7778	0.087774
-0.61372 -	0.52387i	9.7778	0.087774
-0.12829 +	0.76546i	7.0209	0.14438
-0.12829 -	0.76546i	7.0209	0.14438
0.89357		0.45014	1
0.8661 +	0.32203i	1.4585	0.21668
0.8661 -	0.32203i	1.4585	0.21668
0.4387 +	0.56433i	3.8799	0.34616
0.4387 -	0.56433i	3.8799	0.34616

En la Tabla 3.10 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.10 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Ceros		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.18213 +	0.97225i	7.0241	0.006204
-0.18213 -	0.97225i	7.0241	0.006204
0.77021 +	0.78061i	3.1898	-0.11566
0.77021 -	0.78061i	3.1898	-0.11566
0.50547 +	0.83125i	4.0993	0.02684
0.50547 -	0.83125i	4.0993	0.02684
-0.33088		4.424	1

En la Figura 3.13 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

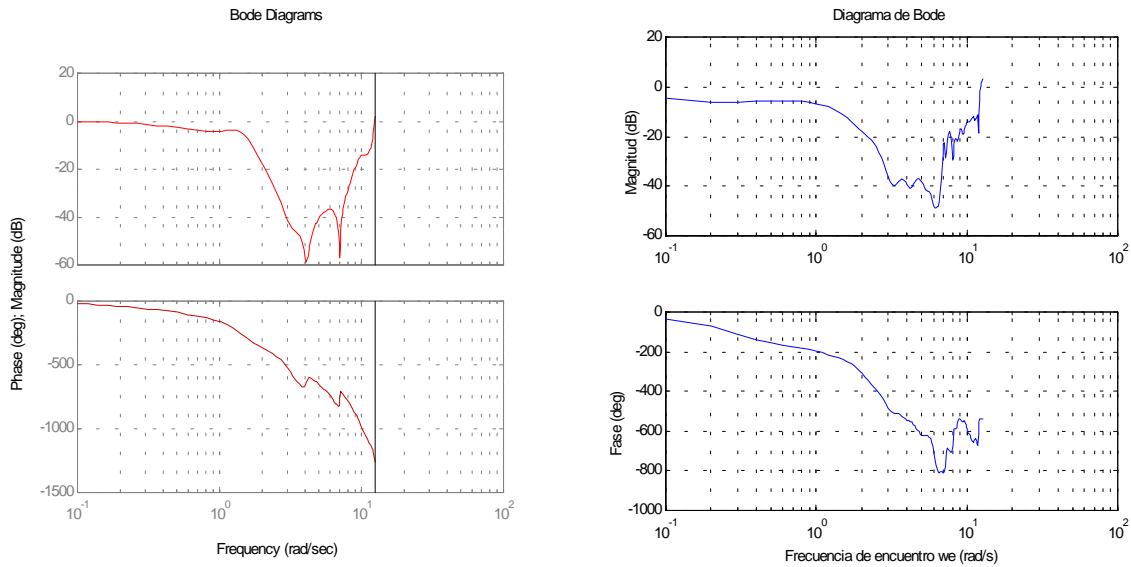


Figura 3.13 : (a) Diagrama de Bode del modelo y (b) Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.14 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

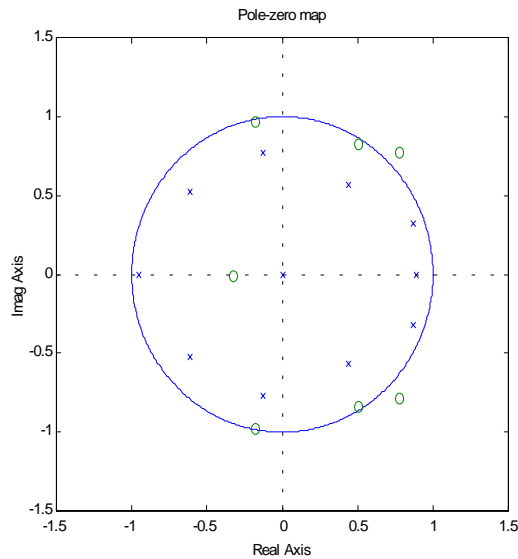
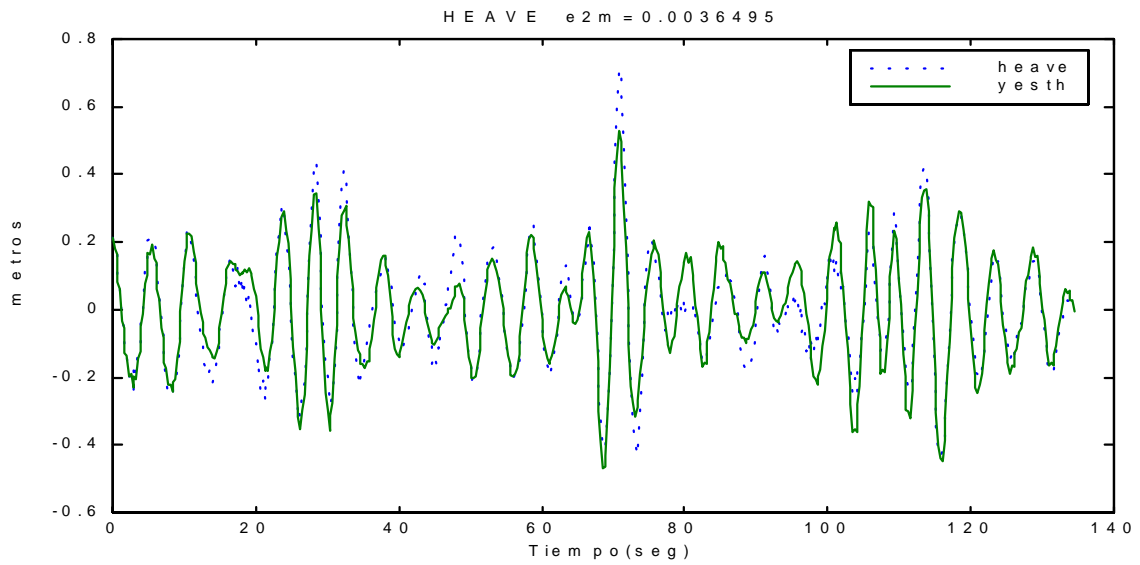


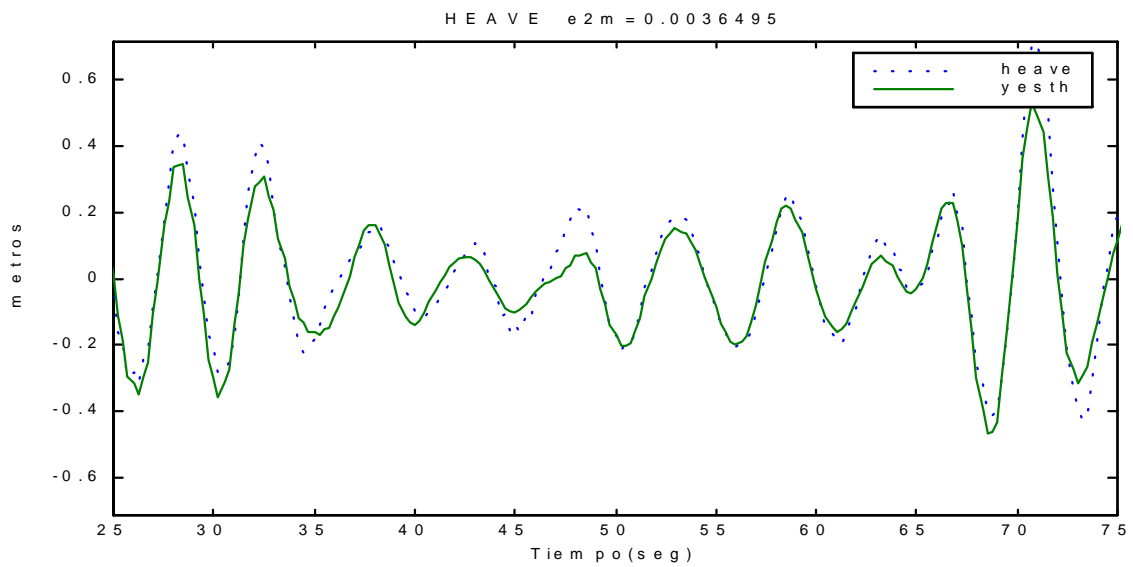
Figura 3.14 : (a) Diagrama de polos y ceros del modelo.

En la Figura 3.15 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)

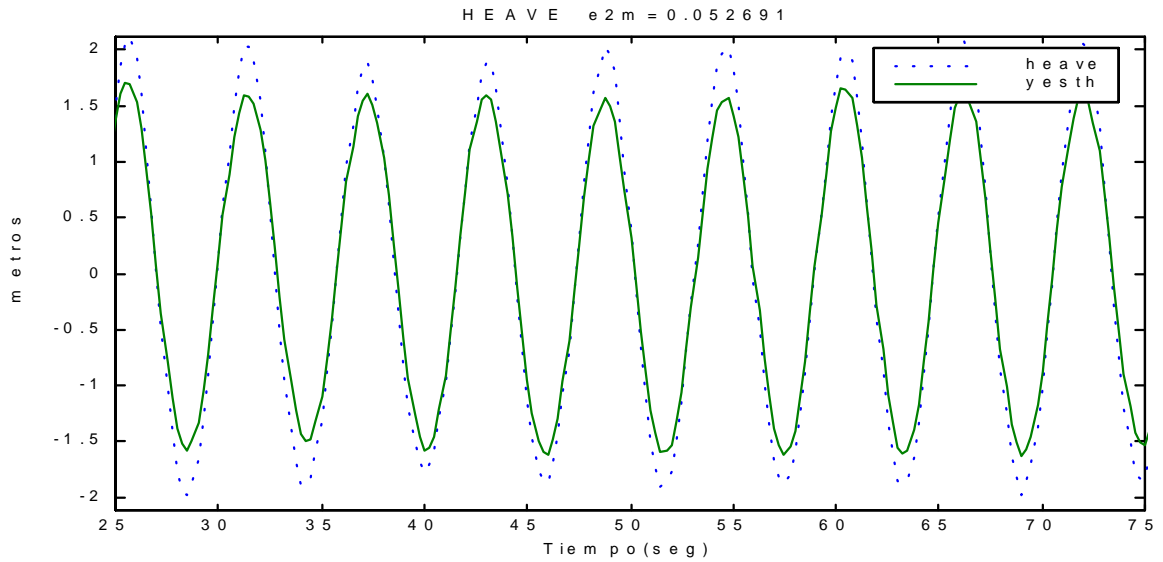


(b)

Figura 3.15 : Salida del modelo(yesth) comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.16 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf3025).



*Figura 3.16 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf3025).*

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

**3.3 ESTADO DE LA MAR 4 Y VELOCIDAD 40 NUDOS**  
**MODELO : (9,9)P**

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.2273 z^{-9} + 0.2921 z^{-10} - 0.2253 z^{-11} - 0.006627 z^{-12} + 0.2201 z^{-13} \\
 & - 0.2516 z^{-14} + 0.2332 z^{-15} - 0.1403 z^{-16} + 0.1057 z^{-17} \\
 G_p(z) = & \frac{\text{-----}}{1 - 1.704 z^{-1} + 1.806 z^{-2} - 1.151 z^{-3} + 0.004858 z^{-4} + 1.133 z^{-5} \\
 & - 1.494 z^{-6} + 1.296 z^{-7} - 0.6758 z^{-8} + 0.2641 z^{-9}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.11 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.11 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos	Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-0.96948	0.12399	1
0.86592 + 0.34056i	1.5263	0.18882
0.86592 - 0.34056i	1.5263	0.18882
-0.16124 + 0.8773i	7.0251	0.065077
-0.16124 - 0.8773i	7.0251	0.065077
0.50545 + 0.61719i	3.652	0.2475
0.50545 - 0.61719i	3.652	0.2475
0.12641 + 0.7781i	5.7187	0.16639
0.12641 - 0.7781i	5.7187	0.16639

En la Tabla 3.12 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.12 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros	Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-1.0562	0.21876	-1
1	3.5527e-015	-1
0.6557 + 0.63246i	3.092	0.12056
0.6557 - 0.63246i	3.092	0.12056
0.25702 + 0.93287i	5.2095	0.025268
0.25702 - 0.93287i	5.2095	0.025268
-0.24222 + 0.71268i	7.6782	0.14799
-0.24222 - 0.71268i	7.6782	0.14799

En la Figura 3.17 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

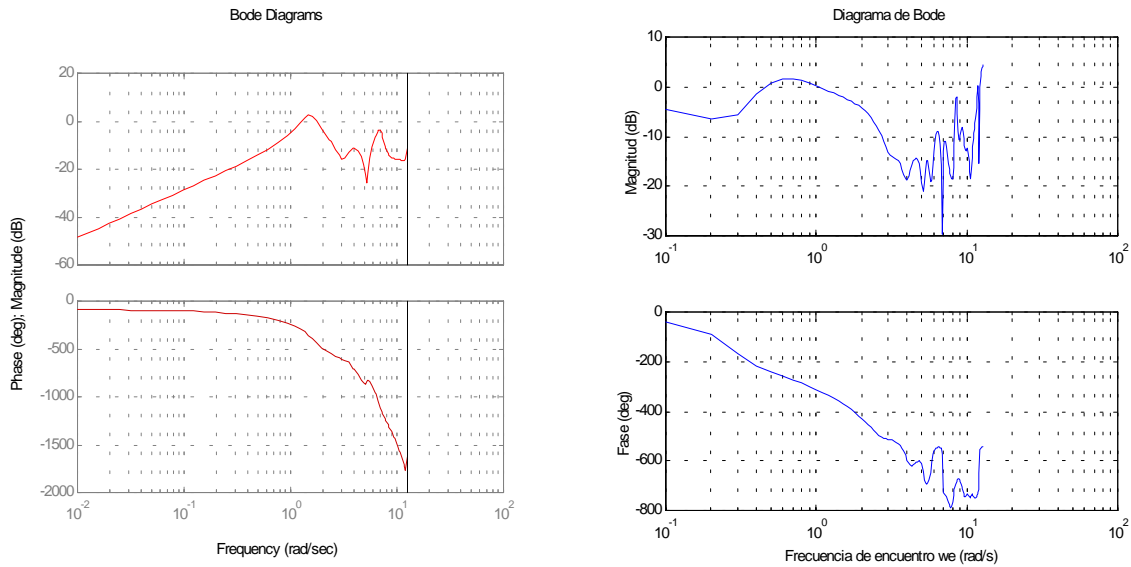


Figura 3.17 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.18 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

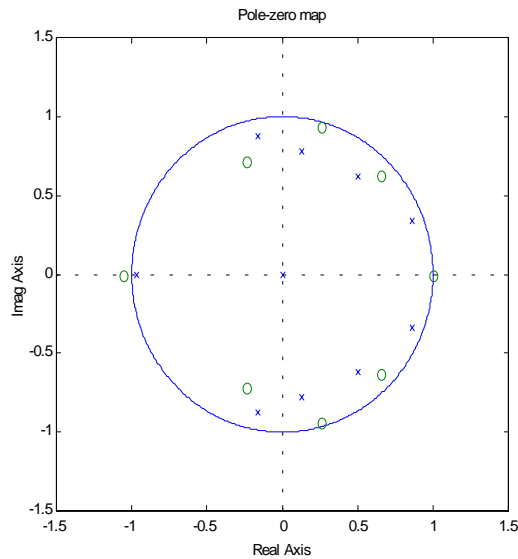
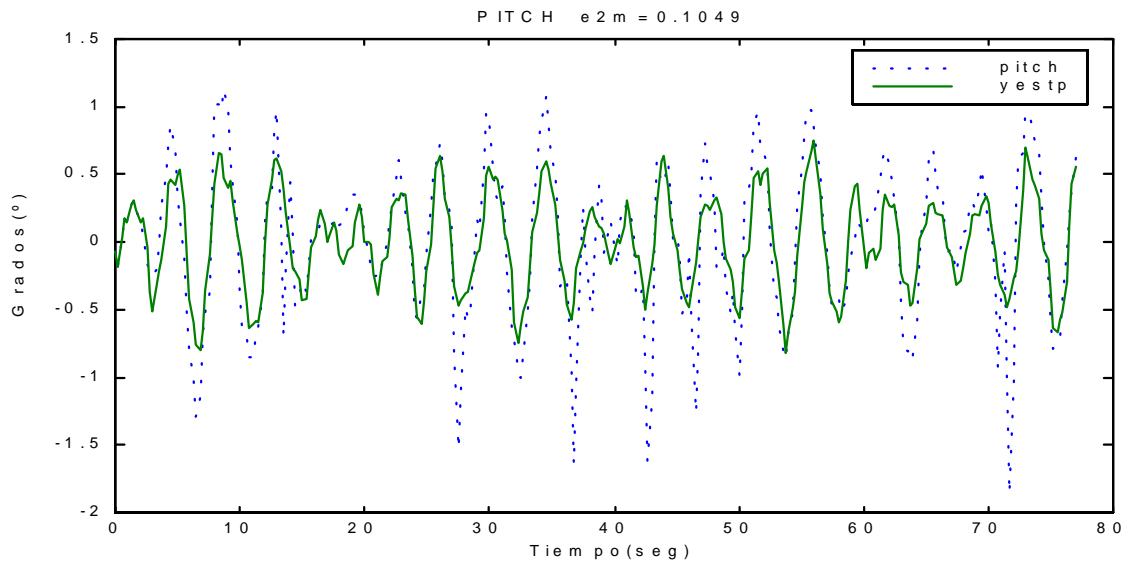


Figura 3.18 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

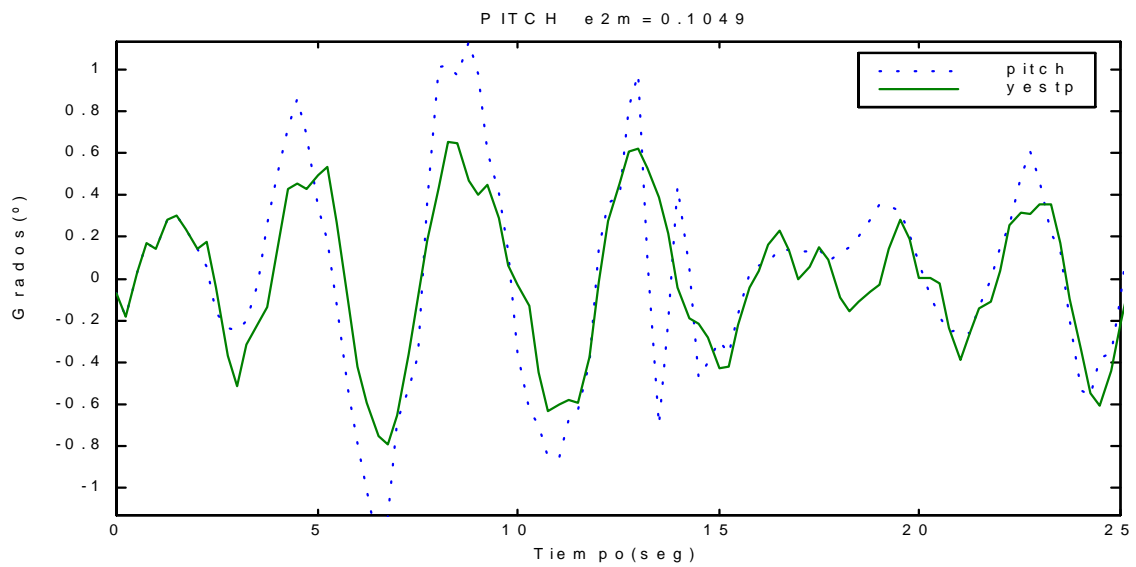
En la Figura 3.19 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)



(b)

Figura 3.19 : Salida del modelo(yestp) comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.20 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf4025).

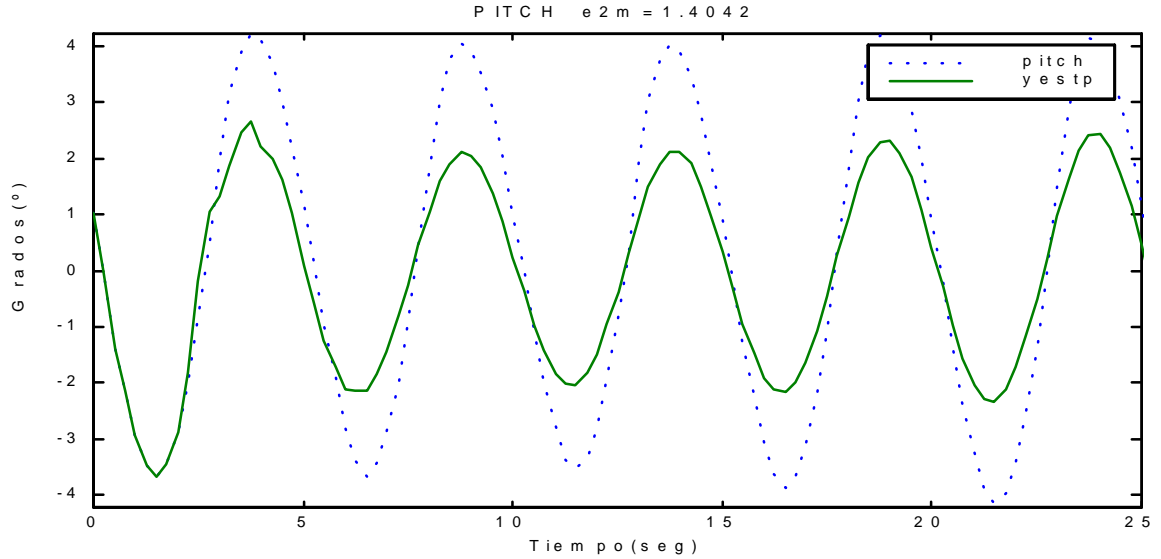


Figura 3.20 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

**MODELO : (10,10,4)H**

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 &0.005514 z^{-4} + 0.005503 z^{-5} + 0.02467 z^{-6} + 0.01315 z^{-7} + 0.02849 z^{-8} \\
 &+ 0.02175 z^{-9} - 0.002554 z^{-10} + 0.04686 z^{-11} - 0.03278 z^{-12} \\
 &+ 0.05122 z^{-13} \\
 G_H(z) = &\frac{0.005514 z^{-4} + 0.005503 z^{-5} + 0.02467 z^{-6} + 0.01315 z^{-7} + 0.02849 z^{-8} + 0.02175 z^{-9} - 0.002554 z^{-10} + 0.04686 z^{-11} - 0.03278 z^{-12} + 0.05122 z^{-13}}{1 - 0.9139 z^{-1} - 0.3664 z^{-2} + 0.3672 z^{-3} + 0.08729 z^{-4} + 0.2259 z^{-5} - 0.3229 z^{-6} + 0.1411 z^{-7} - 0.02147 z^{-8} + 0.1402 z^{-9} - 0.1753 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.13 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.13 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos	Frecuencia Natural(rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-0.97259	0.11117	1
-0.57569 + 0.50862i	9.7292	0.10842
-0.57569 - 0.50862i	9.7292	0.10842
-0.22594 + 0.76141i	7.4939	0.12298
-0.22594 - 0.76141i	7.4939	0.12298
0.43579 + 0.65072i	4.0428	0.24182
0.43579 - 0.65072i	4.0428	0.24182
0.87005 + 0.37682i	1.6487	0.12919
0.87005 - 0.37682i	1.6487	0.12919
0.87808	0.52007	1

En la Tabla 3.14 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.14 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros	Frecuencia Natural(rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-1.3374	1.1629	-1
-0.57913 + 1.4135i	8.0197	-0.21132
-0.57913 - 1.4135i	8.0197	-0.21132
-0.30514 + 1.5132i	7.289	-0.23827
-0.30514 - 1.5132i	7.289	-0.23827
0.31219 + 1.1569i	5.2786	-0.13705
0.31219 - 1.1569i	5.2786	-0.13705
0.74175 + 0.56548i	2.6203	0.10633
0.74175 - 0.56548i	2.6203	0.10633

En la Figura 3.21 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

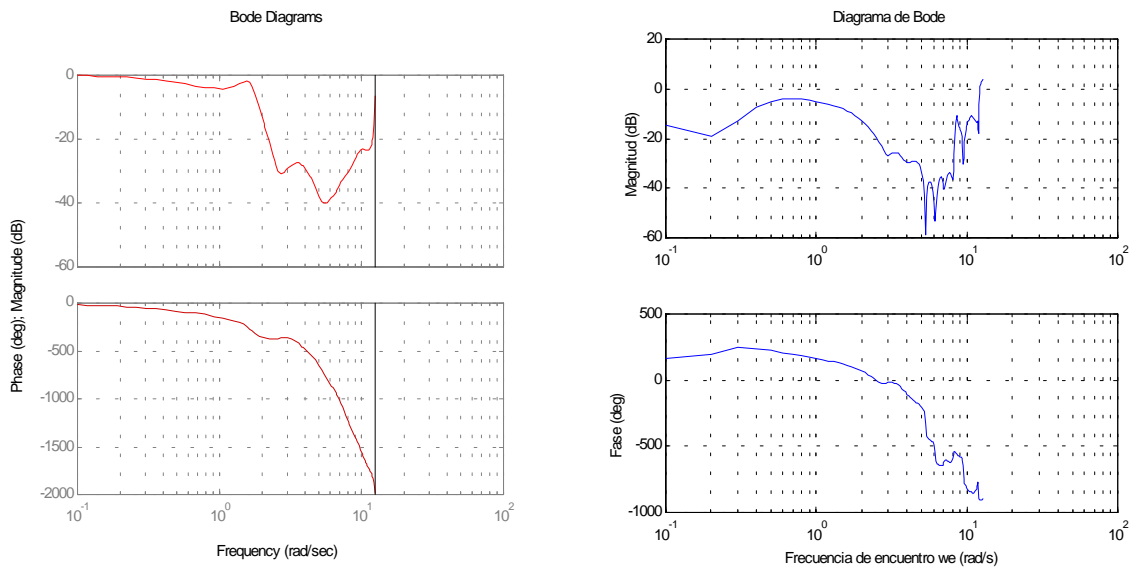


Figura 3.21 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.22 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

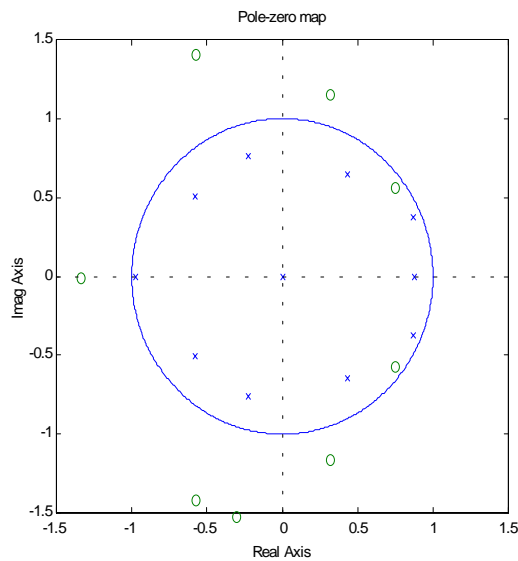
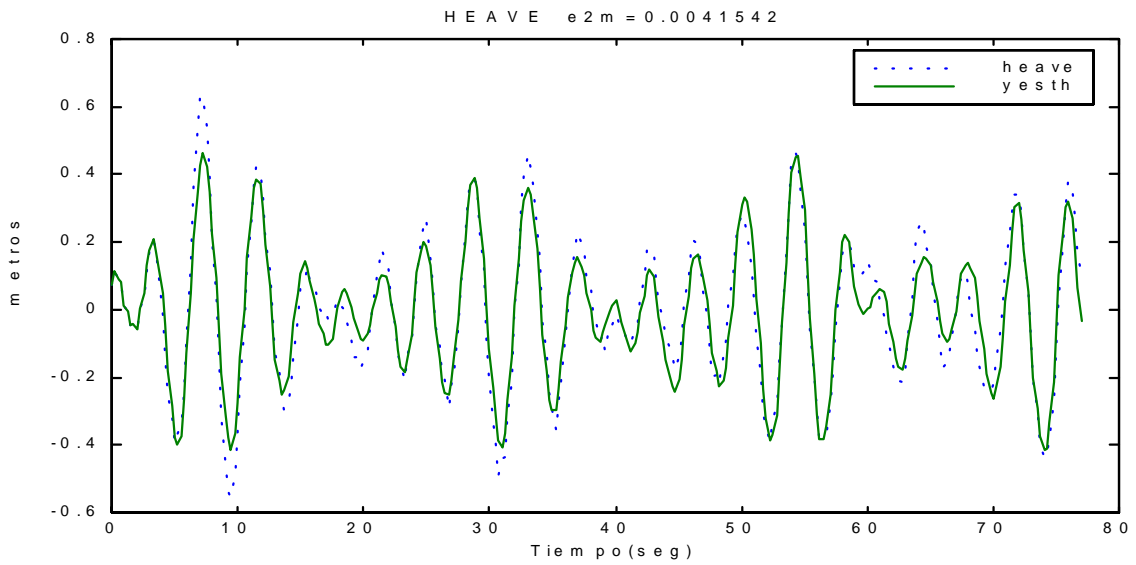


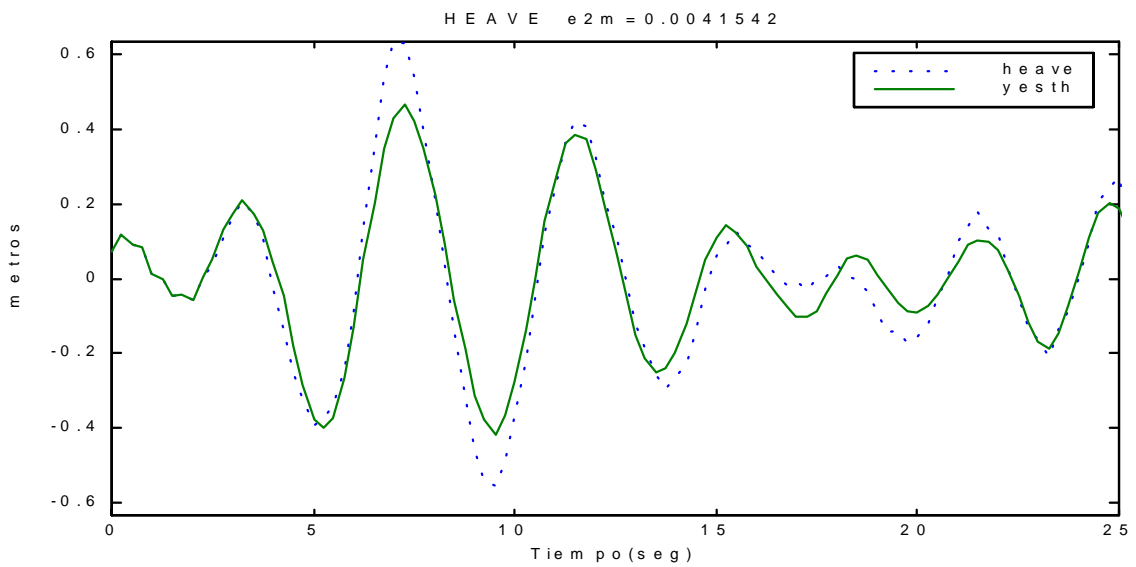
Figura 3.22 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

En la Figura 3.23 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)



(b)

Figura 3.23 : Salida del modelo(yesth) comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.24 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular (ensayo tf4025).

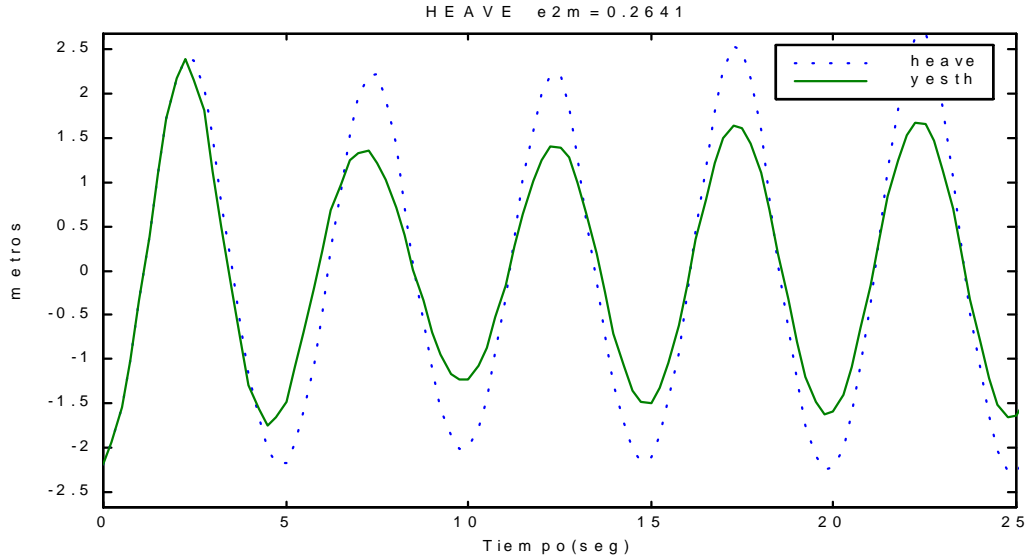


Figura 3.24 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

**3.4 ESTADO DE LA MAR 5 Y VELOCIDAD 20 NUDOS**  
**MODELO : (10,10,8)P**

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.07287 z^{-8} + 0.1124 z^{-9} - 0.09056 z^{-10} + 0.02654 z^{-11} - 0.04128 z^{-12} \\
 & + 0.06552 z^{-13} - 0.06358 z^{-14} + 0.08756 z^{-15} - 0.08619 z^{-16} \\
 & + 0.06243 z^{-17} \\
 G_p(z) = & \frac{-0.07287 z^{-8} + 0.1124 z^{-9} - 0.09056 z^{-10} + 0.02654 z^{-11} - 0.04128 z^{-12} + 0.06552 z^{-13} - 0.06358 z^{-14} + 0.08756 z^{-15} - 0.08619 z^{-16} + 0.06243 z^{-17}}{1 - 1.85 z^{-1} + 0.6698 z^{-2} + 0.6723 z^{-3} - 0.4266 z^{-4} + 0.04279 z^{-5} - 0.318 z^{-6} + 0.3818 z^{-7} - 0.1871 z^{-8} + 0.2339 z^{-9} - 0.151 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.15 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.15 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos	Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-0.92637	0.30593	1
-0.51665 + 0.54587i	9.3846	0.12171
-0.51665 - 0.54587i	9.3846	0.12171
-0.066228 + 0.67236i	6.8577	0.22872
-0.066228 - 0.67236i	6.8577	0.22872
0.64228 + 0.64897i	3.1832	0.11428
0.64228 - 0.64897i	3.1832	0.11428
0.91796 + 0.28292i	1.2067	0.13336
0.91796 - 0.28292i	1.2067	0.13336
0.82203	0.78391	1

En la Tabla 3.16 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.16 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros	Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.8455 + 0.53589i	10.307	-0.00039549
-0.8455 - 0.53589i	10.307	-0.00039549
-0.20689 + 0.88093i	7.217	0.05539
-0.20689 - 0.88093i	7.217	0.05539
1	6.7502e-014	1
0.76991 + 0.69303i	2.935	-0.048052
0.76991 - 0.69303i	2.935	-0.048052
0.55388 + 0.8163i	3.8989	0.013973
0.55388 - 0.8163i	3.8989	0.013973

En la Figura 3.25 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

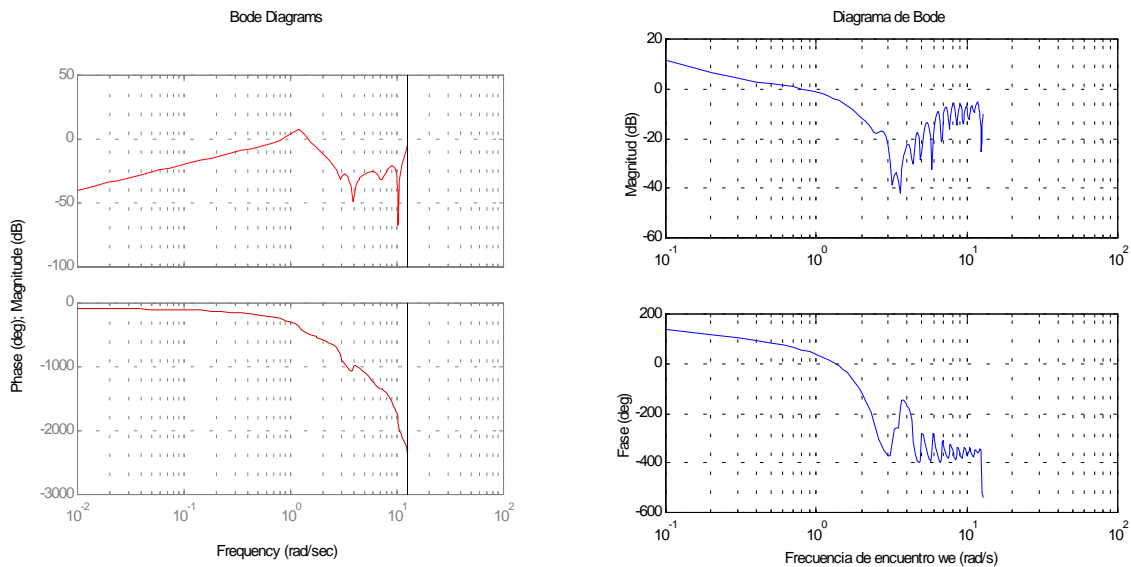


Figura 3.25 : (a) Diagrama de Bode del modelo y (b) Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.26 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

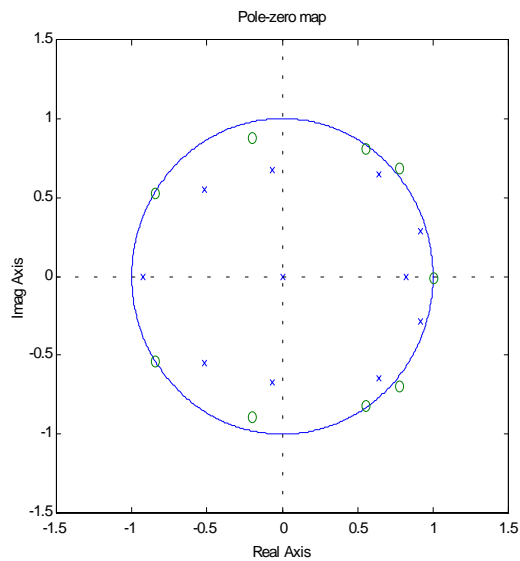
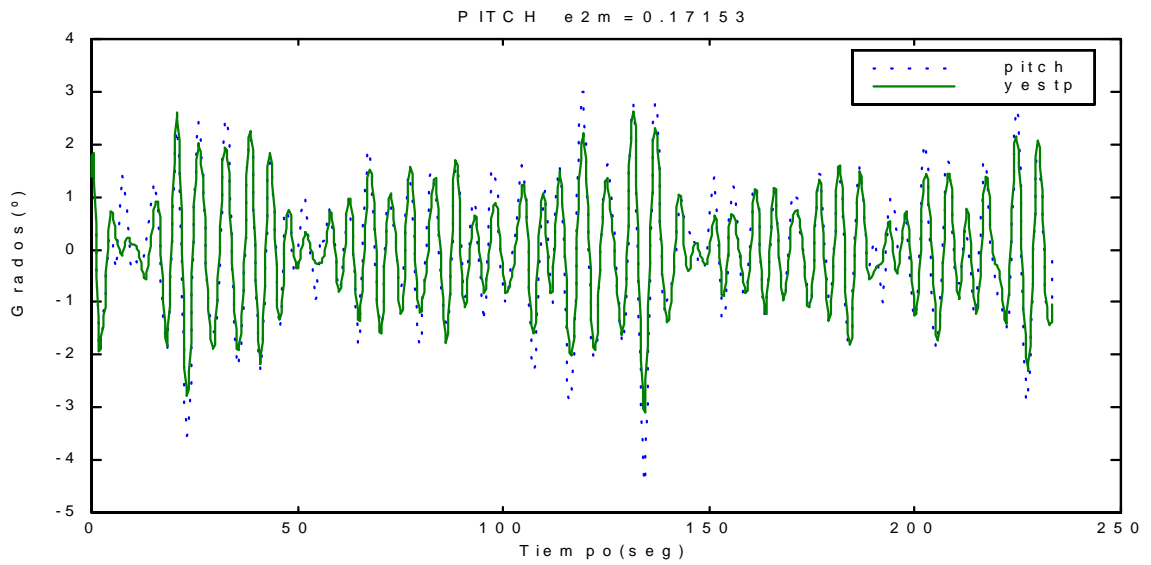


Figura 3.26 : (a) Diagrama de polos y ceros del modelo.

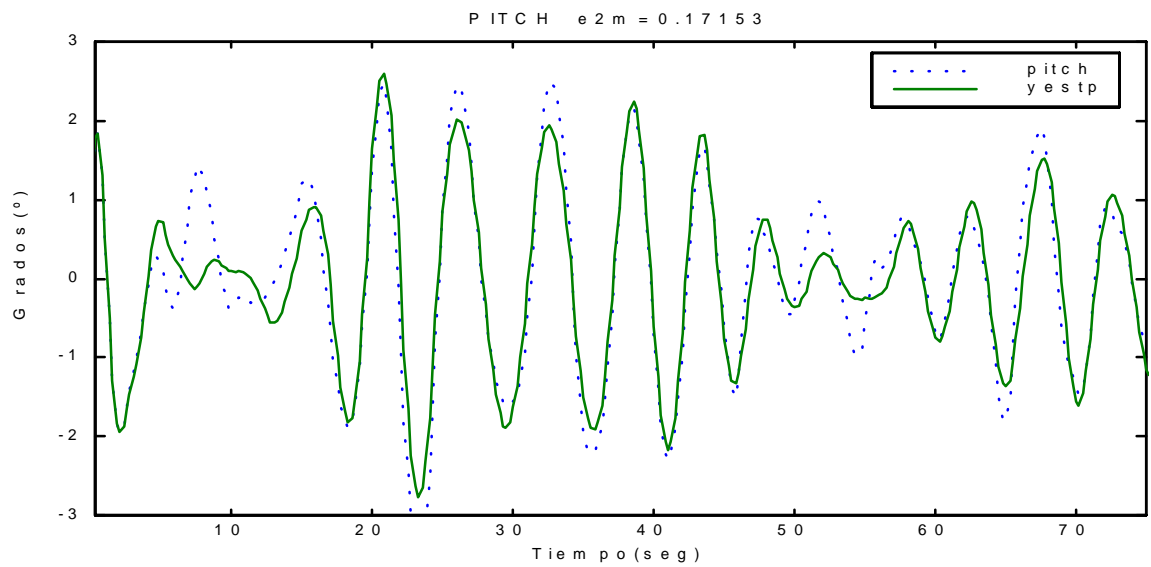
En la Figura 3.27 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)



(b)

Figura 3.27 : Salida del modelo(yestp) comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.28 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf2025).

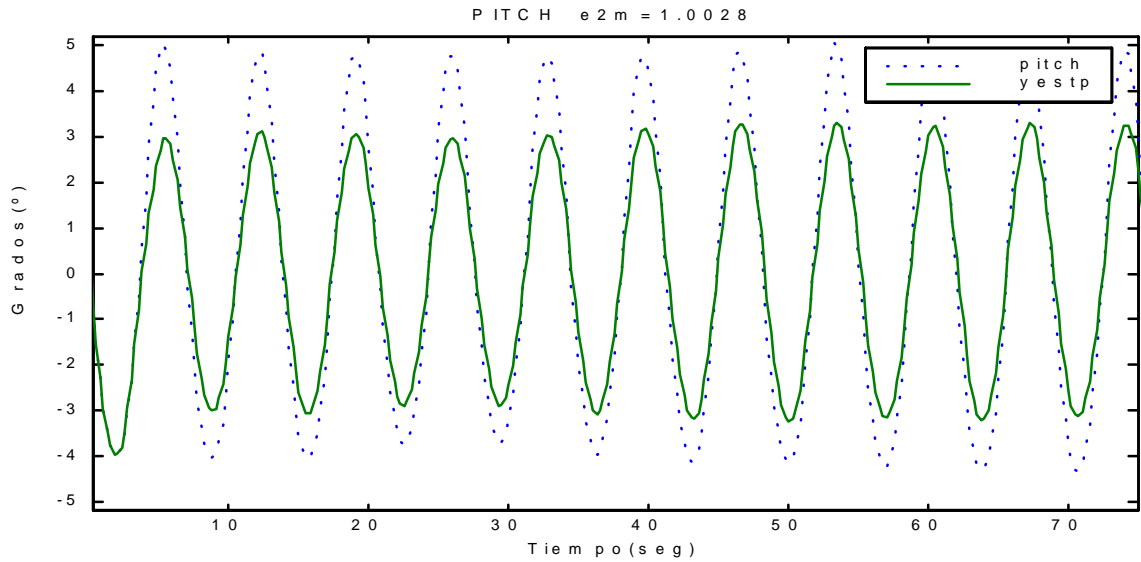


Figura 3.28 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf2025).

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

**MODELO : (10,10,4)H**

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 &0.0342 z^{-4} - 0.05054 z^{-5} + 0.04323 z^{-6} - 0.00676 z^{-7} + 0.0124 z^{-8} \\
 &- 0.002423 z^{-9} + 0.008908 z^{-10} + 0.01756 z^{-11} - 0.01687 z^{-12} \\
 &+ 0.02927 z^{-13} \\
 G_H(z) = &\frac{0.0342 z^{-4} - 0.05054 z^{-5} + 0.04323 z^{-6} - 0.00676 z^{-7} + 0.0124 z^{-8} - 0.002423 z^{-9} + 0.008908 z^{-10} + 0.01756 z^{-11} - 0.01687 z^{-12} + 0.02927 z^{-13}}{1 - 1.184 z^{-1} - 0.2343 z^{-2} + 0.4999 z^{-3} - 0.03021 z^{-4} + 0.1479 z^{-5} - 0.2163 z^{-6} + 0.2282 z^{-7} - 0.2505 z^{-8} + 0.1569 z^{-9} - 0.04856 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.17 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.17 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-0.96253	0.15275	1
-0.54373 + 0.57681i	9.353	0.099358
-0.54373 - 0.57681i	9.353	0.099358
-0.003243 + 0.66049i	6.5175	0.25455
-0.003243 - 0.66049i	6.5175	0.25455
0.82305 + 0.24068i	1.2935	0.47536
0.82305 - 0.24068i	1.2935	0.47536
0.80792	0.85318	1
0.39325 + 0.39391i	3.9221	0.59754
0.39325 - 0.39391i	3.9221	0.59754

En la Tabla 3.18 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.18 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.86566	0.57707	1
-0.58971 + 0.72166i	9.0281	0.031221
-0.58971 - 0.72166i	9.0281	0.031221
0.95679 + 0.54026i	2.0904	-0.18027
0.95679 - 0.54026i	2.0904	-0.18027
0.68428 + 0.8098i	3.4847	-0.067097
0.68428 - 0.8098i	3.4847	-0.067097
0.12028 + 0.90786i	5.767	0.061012
0.12028 - 0.90786i	5.767	0.061012

En la Figura 3.29 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

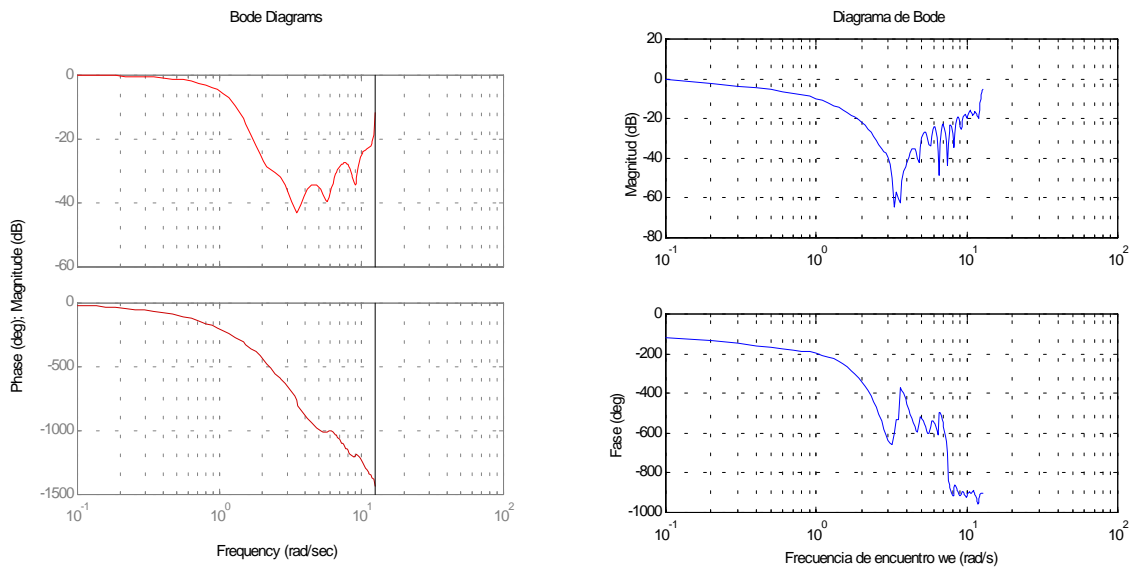


Figura 3.29 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.30 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

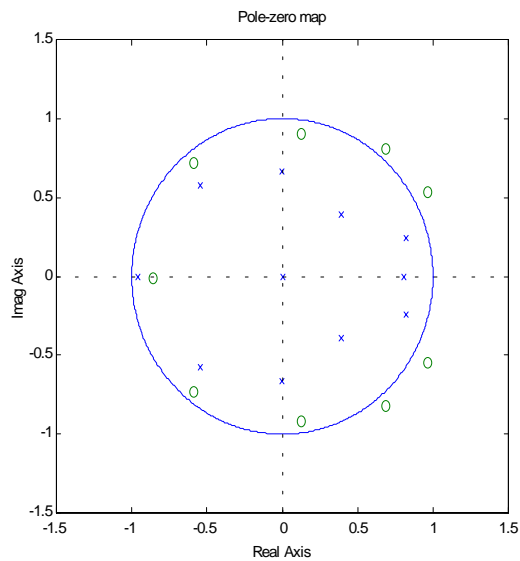
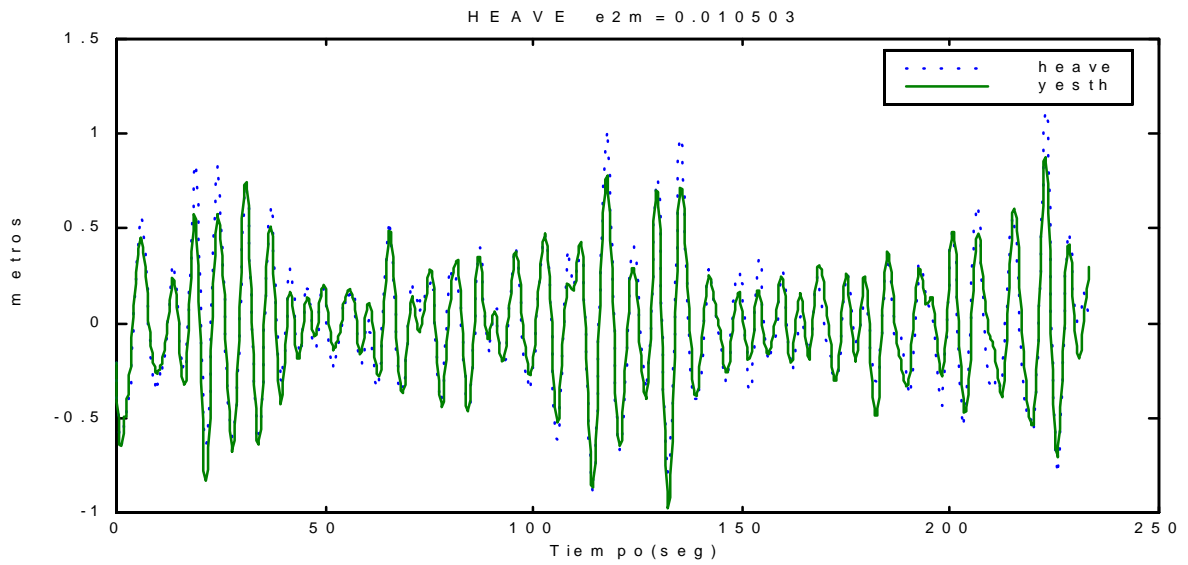


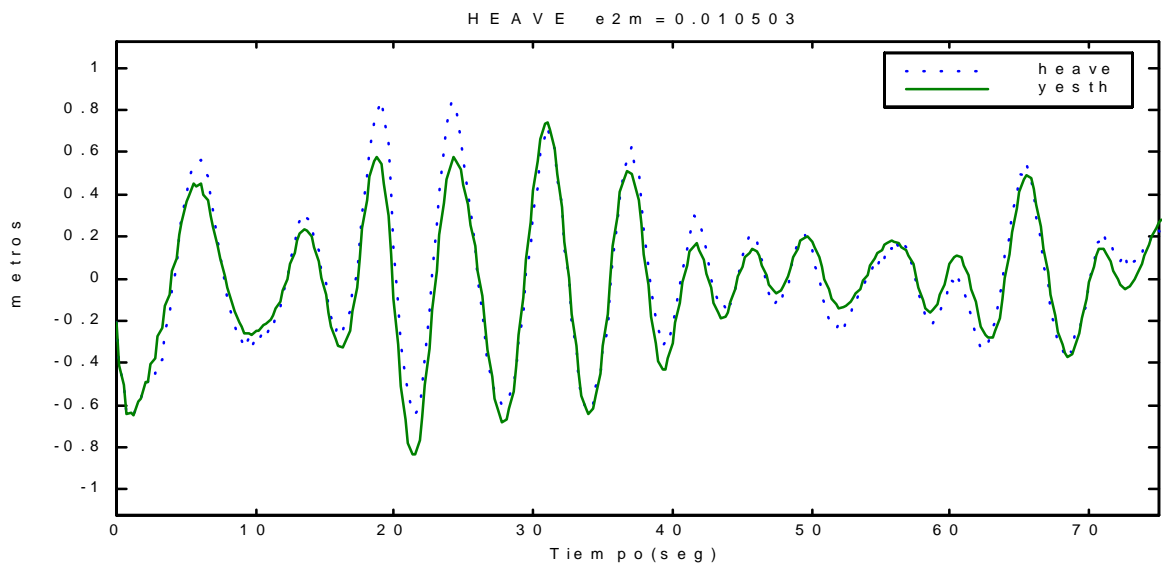
Figura 3.30 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

En la Figura 3.31 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)

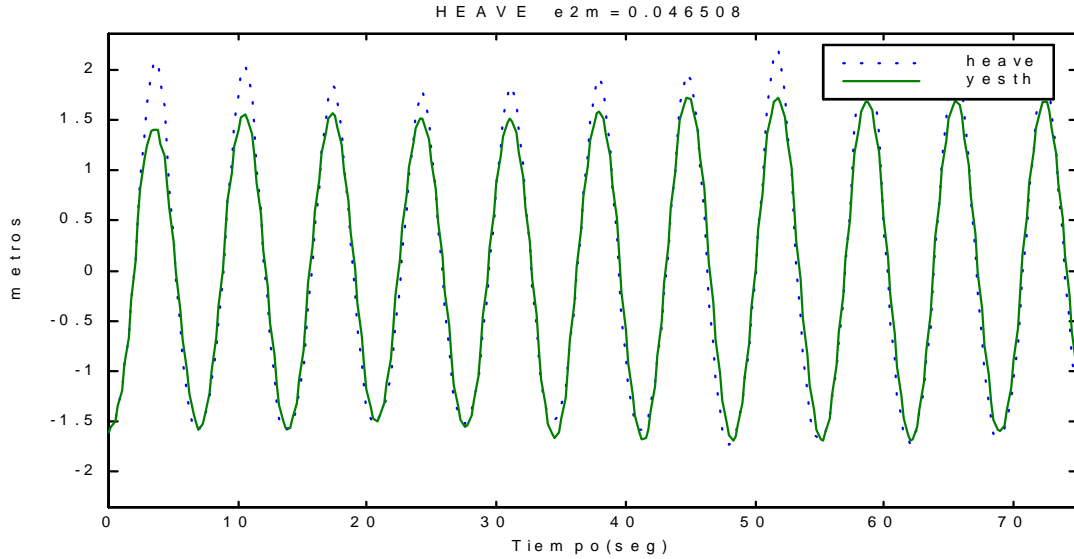


(b)

Figura 3.31 : Salida del modelo(yesth) comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.32 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf2025).



*Figura 3.32 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf2025).*

### 3.5 ESTADO DE LA MAR 5 Y VELOCIDAD 30 NUDOS

#### MODELO : (7,7,8)P

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.1324 z^{-8} + 0.1635 z^{-9} - 0.07484 z^{-10} - 0.05586 z^{-11} + 0.126 z^{-12} \\
 & \quad - 0.1796 z^{-13} + 0.1532 z^{-14} \\
 G_p(z) = & \frac{\text{-----}}{1 - 1.658 z^{-1} + 0.6805 z^{-2} + 0.6712 z^{-3} - 1.061 z^{-4} + 0.616 z^{-5} \\
 & \quad - 0.1185 z^{-6} + 0.0567 z^{-7}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.19 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.19 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos	Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-0.91752	0.34432	1
0.899 + 0.30281i	1.3166	0.16022
0.899 - 0.30281i	1.3166	0.16022
0.3908 + 0.69922i	4.3364	0.20466
0.3908 - 0.69922i	4.3364	0.20466
-0.0019687 + 0.32715i	7.7302	0.57816
-0.0019687 - 0.32715i	7.7302	0.57816

En la Tabla 3.20 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.20 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros	Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-1.086	0.33007	-1
-0.10276 + 0.95312i	6.7149	0.025162
-0.10276 - 0.95312i	6.7149	0.025162
0.76301 + 0.75974i	3.1469	-0.093994
0.76301 - 0.75974i	3.1469	-0.093994
1	2.1316e-014	1

En la Figura 3.33 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

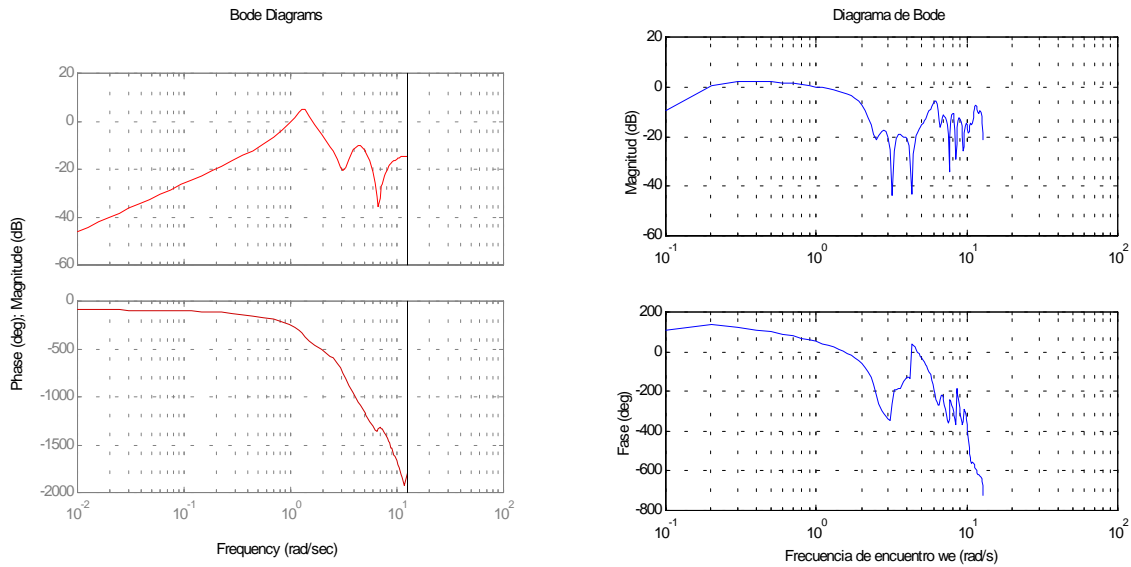


Figura 3.33 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.34 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

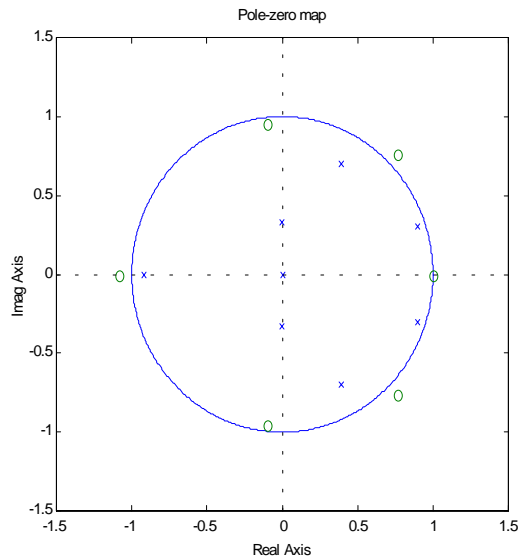


Figura 3.34 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

En la Figura 3.35 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



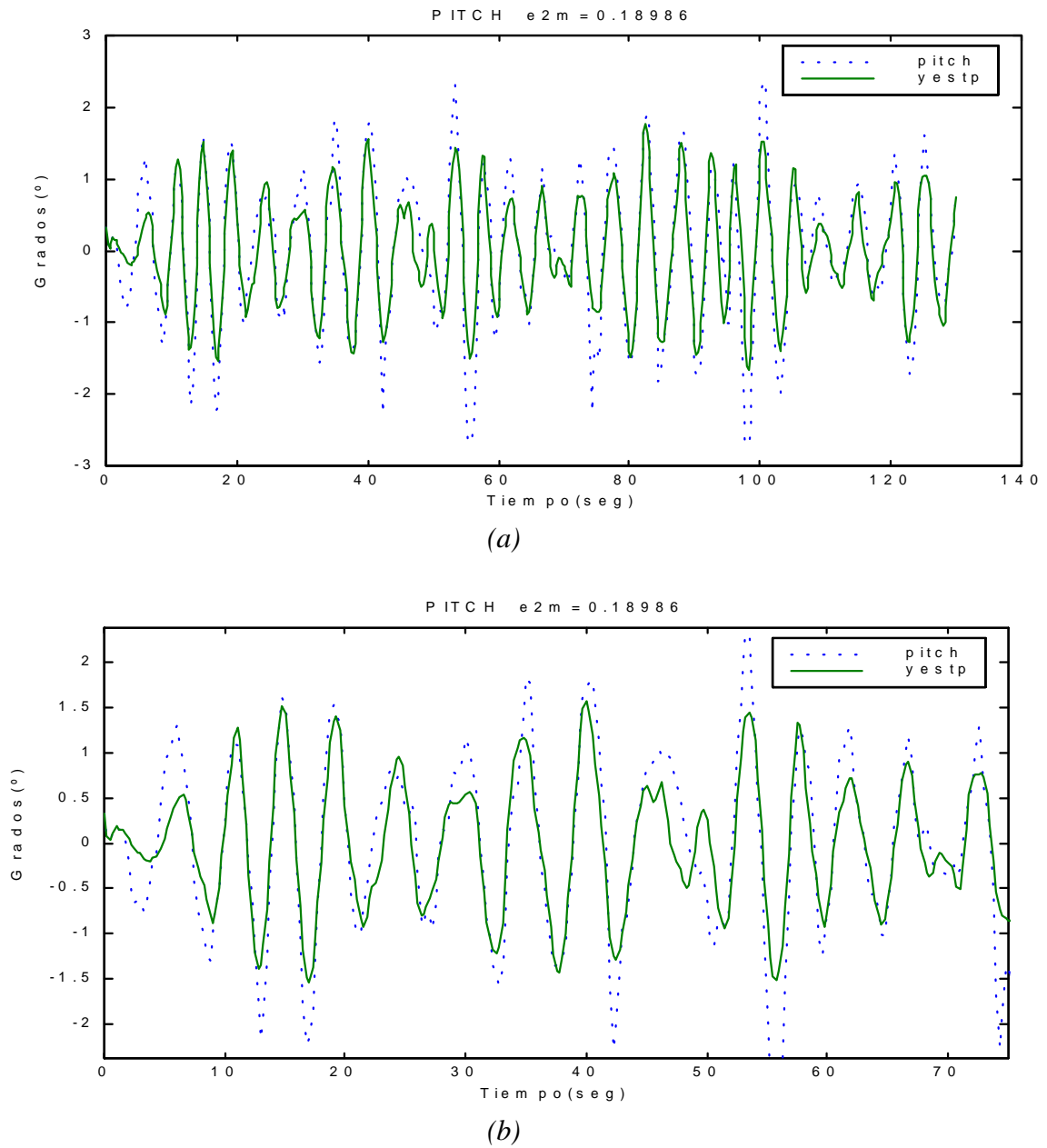


Figura 3.35 : Salida del modelo(yestp) comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.36 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf3025).

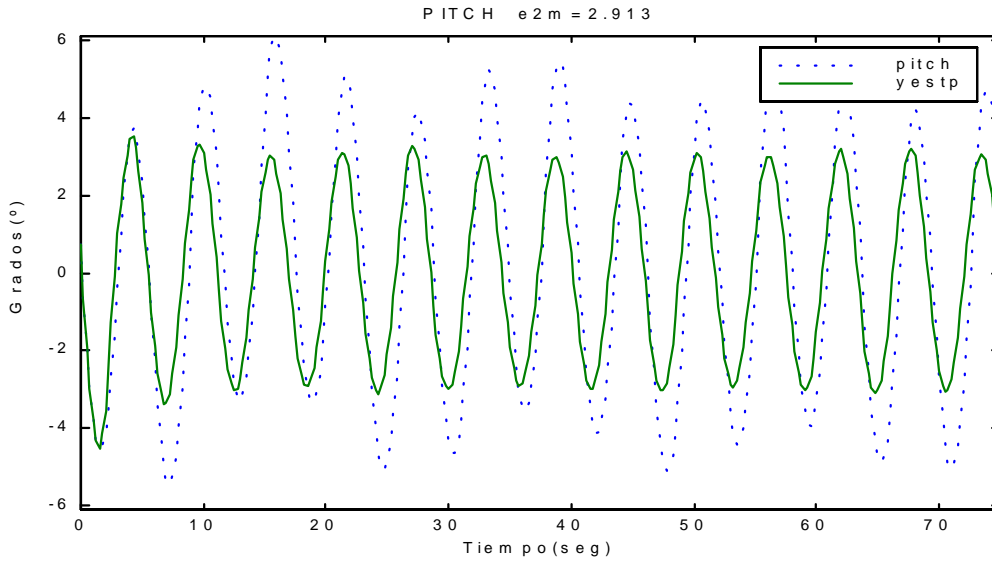


Figura 3.36 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf3025).

**MODELO : (10,6,6)H**

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 &0.03657 z^{-6} - 0.02229 z^{-7} - 0.01216 z^{-8} + 0.08254 z^{-9} - 0.07081 z^{-10} \\
 &\qquad\qquad\qquad + 0.04617 z^{-11} \\
 G_H(z) = &\frac{\qquad\qquad\qquad}{1 - 1.468 z^{-1} + 0.07612 z^{-2} + 0.7383 z^{-3} - 0.1854 z^{-4} - 0.05778 z^{-5} \\
 &- 0.2134 z^{-6} + 0.3044 z^{-7} - 0.2259 z^{-8} + 0.2739 z^{-9} - 0.1821 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.21 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.21 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
-0.962	0.15497	1
-0.59442 + 0.56256i	9.5685	0.083766
-0.59442 - 0.56256i	9.5685	0.083766
-0.077933 + 0.69746i	6.8758	0.206
-0.077933 - 0.69746i	6.8758	0.206
0.54729 + 0.64167i	3.525	0.19332
0.54729 - 0.64167i	3.525	0.19332
0.88553 + 0.32077i	1.4107	0.16993
0.88553 - 0.32077i	1.4107	0.16993
0.90924	0.38058	1

En la Tabla 3.22 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.22 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-1.4859	1.584	-1
0.72797 + 0.68735i	3.0268	-0.0015786
0.72797 - 0.68735i	3.0268	-0.0015786
0.31967 + 0.86341i	4.876	0.067789
0.31967 - 0.86341i	4.876	0.067789

En la Figura 3.37 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

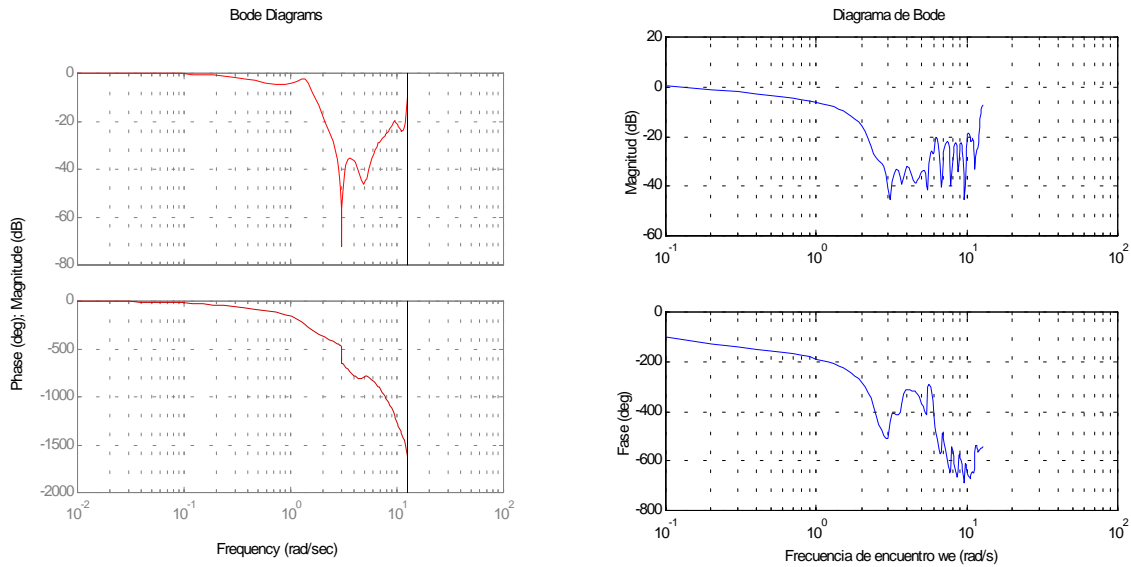


Figura 3.37 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.38 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

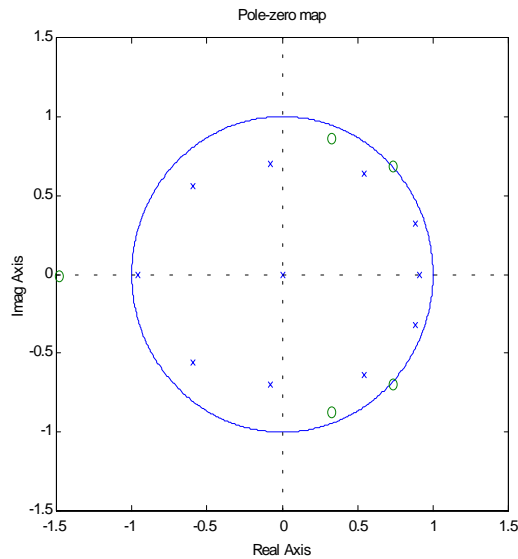
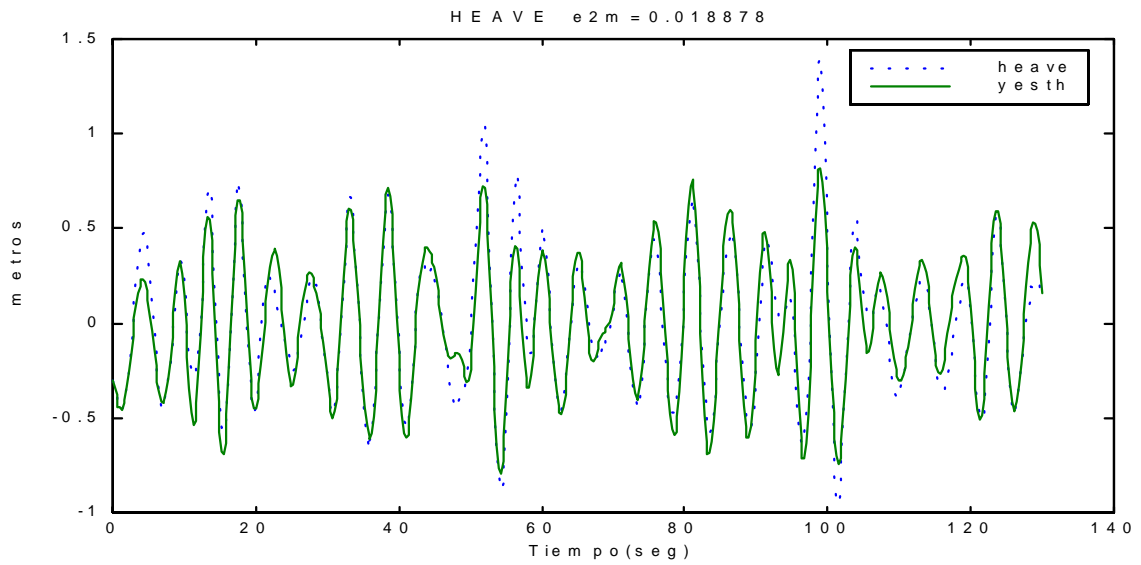


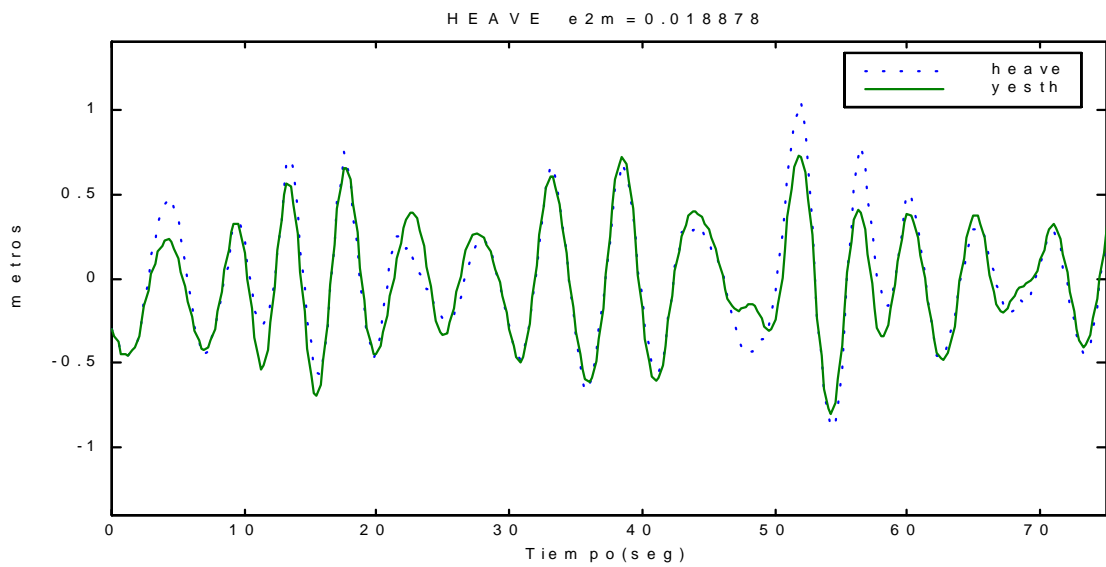
Figura 3.38 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

En la Figura 3.39 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)

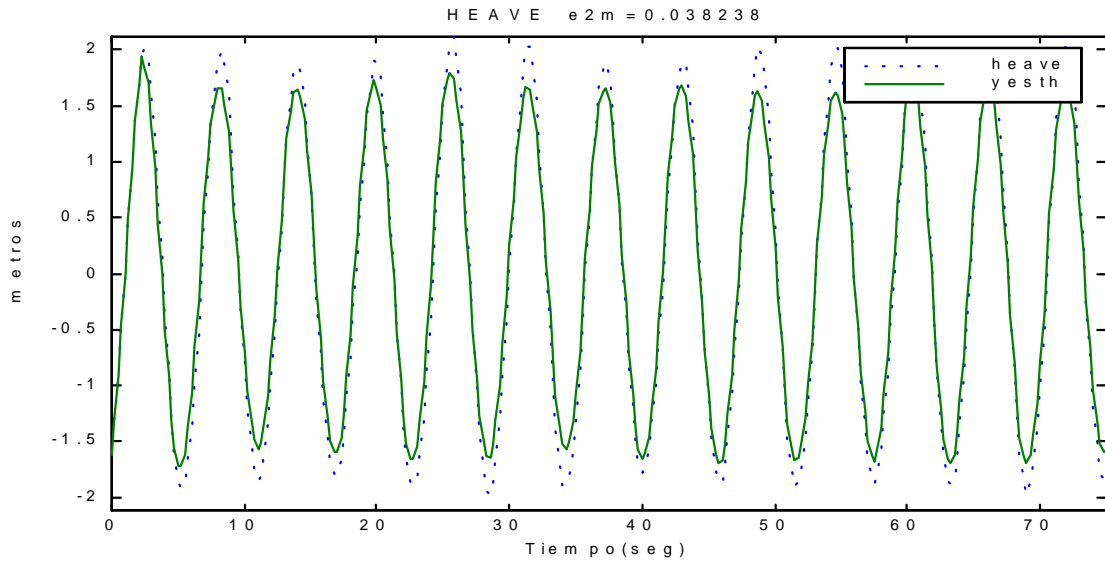


(b)

Figura 3.39 : Salida del modelo(yesth) comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.40 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf3025).



*Figura 3.40 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf3025).*

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

**3.6 ESTADO DE LA MAR 5 Y VELOCIDAD 40 NUDOS**  
**MODELO : (10,10,6)P**

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.1323 z^{-6} + 0.0884 z^{-7} - 0.1097 z^{-8} + 0.03975 z^{-9} - 0.0114 z^{-10} \\
 & - 0.02221 z^{-11} + 0.01836 z^{-12} + 0.09703 z^{-13} - 0.1009 z^{-14} \\
 & \qquad \qquad \qquad + 0.133 z^{-15} \\
 G_p(z) = & \frac{-0.1323 z^{-6} + 0.0884 z^{-7} - 0.1097 z^{-8} + 0.03975 z^{-9} - 0.0114 z^{-10} - 0.02221 z^{-11} + 0.01836 z^{-12} + 0.09703 z^{-13} - 0.1009 z^{-14} + 0.133 z^{-15}}{1 - 1.414 z^{-1} + 1.126 z^{-2} - 0.6114 z^{-3} - 0.2324 z^{-4} + 0.7778 z^{-5} - 0.6901 z^{-6} + 0.5231 z^{-7} - 0.1303 z^{-8} - 0.002662 z^{-9} + 0.01844 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.23 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.23 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos	Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-0.87828	0.51918	1
0.87509 + 0.3162i	1.4166	0.20351
0.87509 - 0.3162i	1.4166	0.20351
-0.15212 + 0.83827i	7.0305	0.091153
-0.15212 - 0.83827i	7.0305	0.091153
0.21745 + 0.75921i	5.253	0.17975
0.21745 - 0.75921i	5.253	0.17975
0.32904 + 0.32964i	4.3857	0.6969
0.32904 - 0.32964i	4.3857	0.6969
-0.2469	5.5951	1

En la Tabla 3.24 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.24 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros	Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.88864 + 0.41754i	10.81	0.0067796
-0.88864 - 0.41754i	10.81	0.0067796
-0.28199 + 1.0379i	7.3502	-0.039601
-0.28199 - 1.0379i	7.3502	-0.039601
1	1.4211e-014	1
0.70664 + 0.69343i	3.1041	0.01289
0.70664 - 0.69343i	3.1041	0.01289
0.29803 + 0.91145i	5.0219	0.033396
0.29803 - 0.91145i	5.0219	0.033396

En la Figura 3.41 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

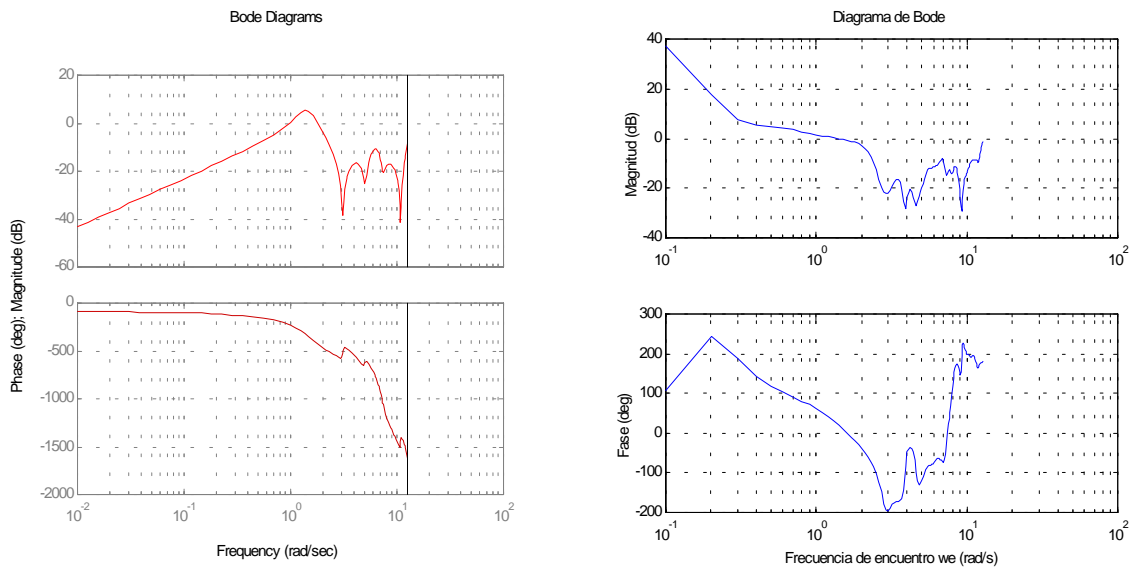


Figura 3.41 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.42 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

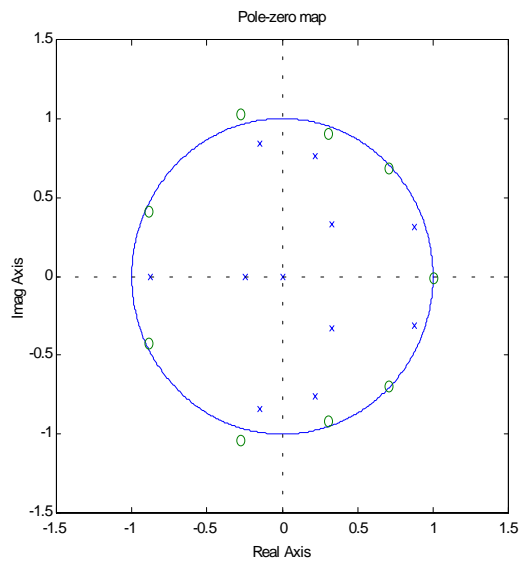
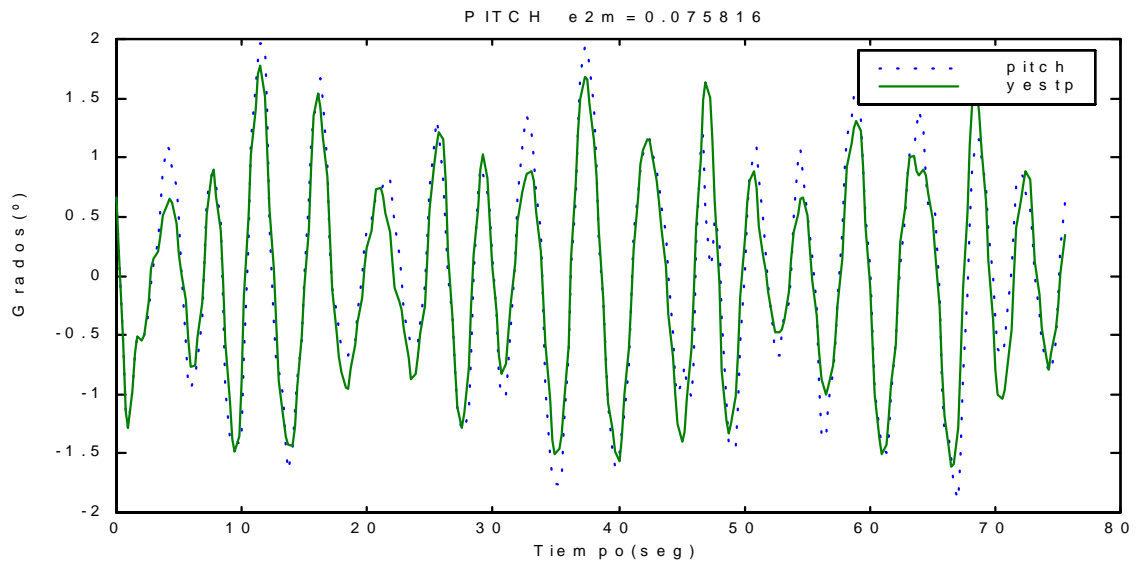


Figura 3.42 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

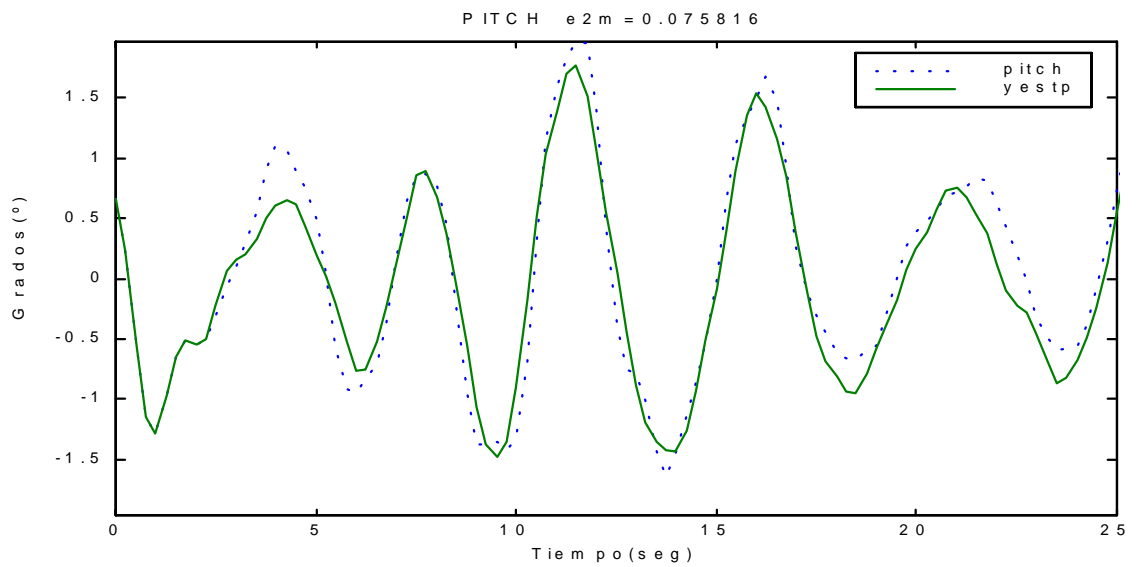
En la Figura 3.43 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)



(b)

Figura 3.43 : Salida del modelo(yestp) comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.44 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf4025).

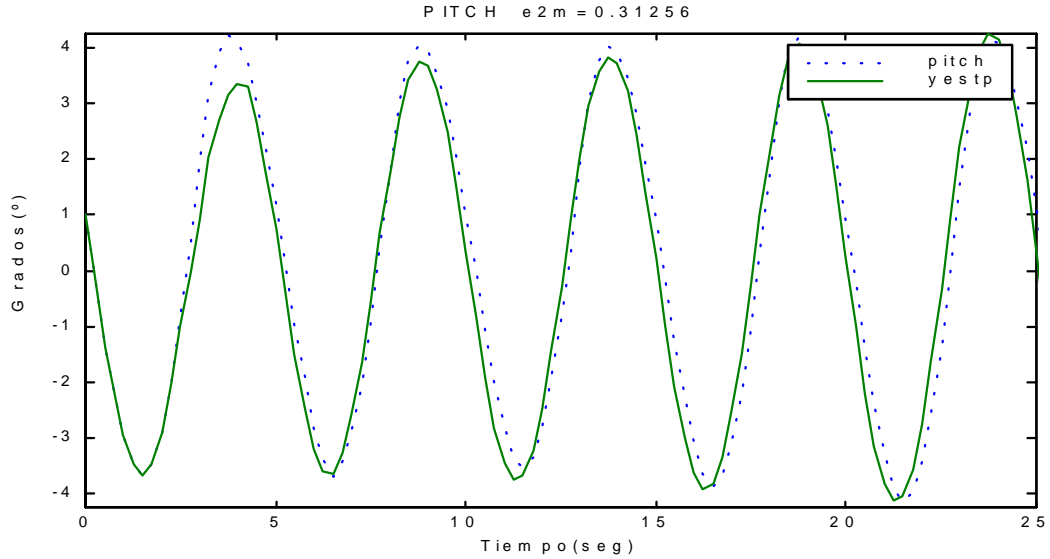


Figura 3.44 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).

**CRIBAV**

**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

**MODELO : (10,10,3)H**

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & 0.01196 z^{-3} - 0.0095 z^{-4} + 0.0234 z^{-5} + 0.01269 z^{-6} + 0.004212 z^{-7} \\
 & + 0.03232 z^{-8} - 0.009472 z^{-9} + 0.046 z^{-10} - 0.01909 z^{-11} + 0.02424 z^{-12} \\
 G_H(z) = & \frac{0.01196 z^{-3} - 0.0095 z^{-4} + 0.0234 z^{-5} + 0.01269 z^{-6} + 0.004212 z^{-7} + 0.03232 z^{-8} - 0.009472 z^{-9} + 0.046 z^{-10} - 0.01909 z^{-11} + 0.02424 z^{-12}}{1 - 1.264 z^{-1} - 0.1789 z^{-2} + 0.8841 z^{-3} - 0.2912 z^{-4} + 0.07022 z^{-5} - 0.3179 z^{-6} + 0.2077 z^{-7} + 0.1199 z^{-8} - 0.001171 z^{-9} - 0.1121 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.25 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.25 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0.53388 + 0.69231i	3.6949	0.14549
0.53388 - 0.69231i	3.6949	0.14549
0.87519 + 0.33965i	1.5022	0.16821
0.87519 - 0.33965i	1.5022	0.16821
0.86204	0.5938	1
-0.95877	0.16841	1
-0.23143 + 0.69437i	7.6723	0.16271
-0.23143 - 0.69437i	7.6723	0.16271
-0.49728 + 0.35847i	10.257	0.19085
-0.49728 - 0.35847i	10.257	0.19085

En la Tabla 3.26 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.26: Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-1.2457	0.87876	-1
-0.51121 + 0.87821i	8.3921	-0.0076438
-0.51121 - 0.87821i	8.3921	-0.0076438
0.58009 + 1.2097i	4.6457	-0.253
0.58009 - 1.2097i	4.6457	-0.253
0.69853 + 0.75026i	3.2859	-0.030182
0.69853 - 0.75026i	3.2859	-0.030182
0.25275 + 0.87726i	5.174	0.070412
0.25275 - 0.87726i	5.174	0.070412

En la Figura 3.45 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

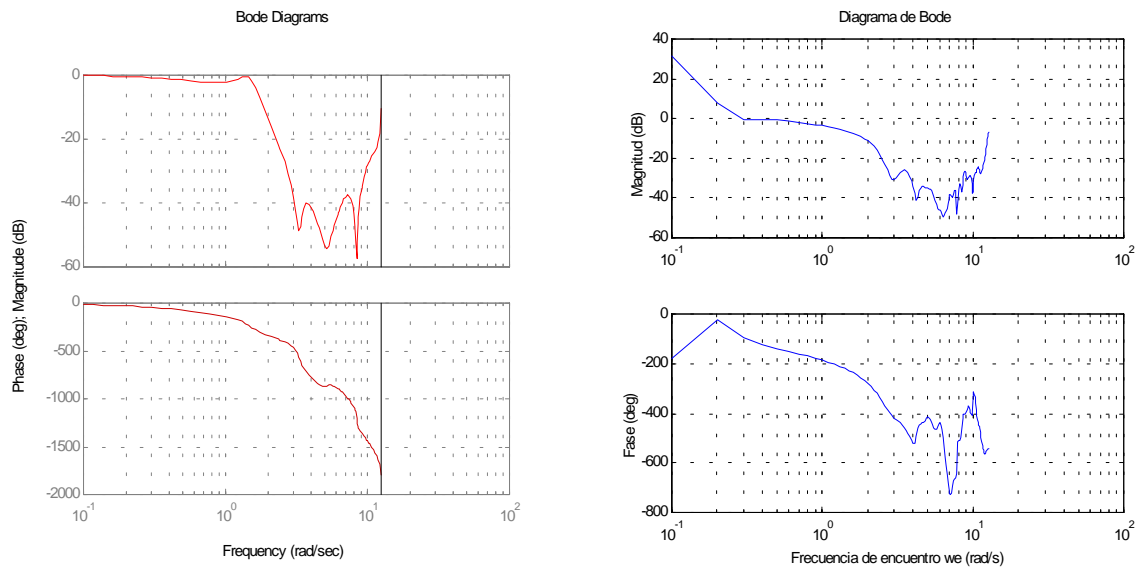


Figura 3.45 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.46 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

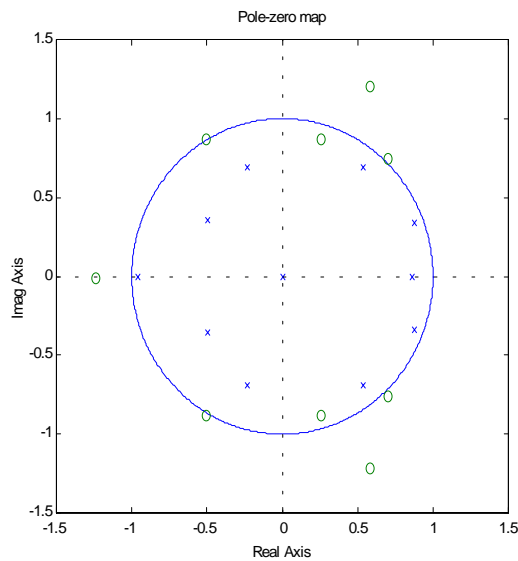
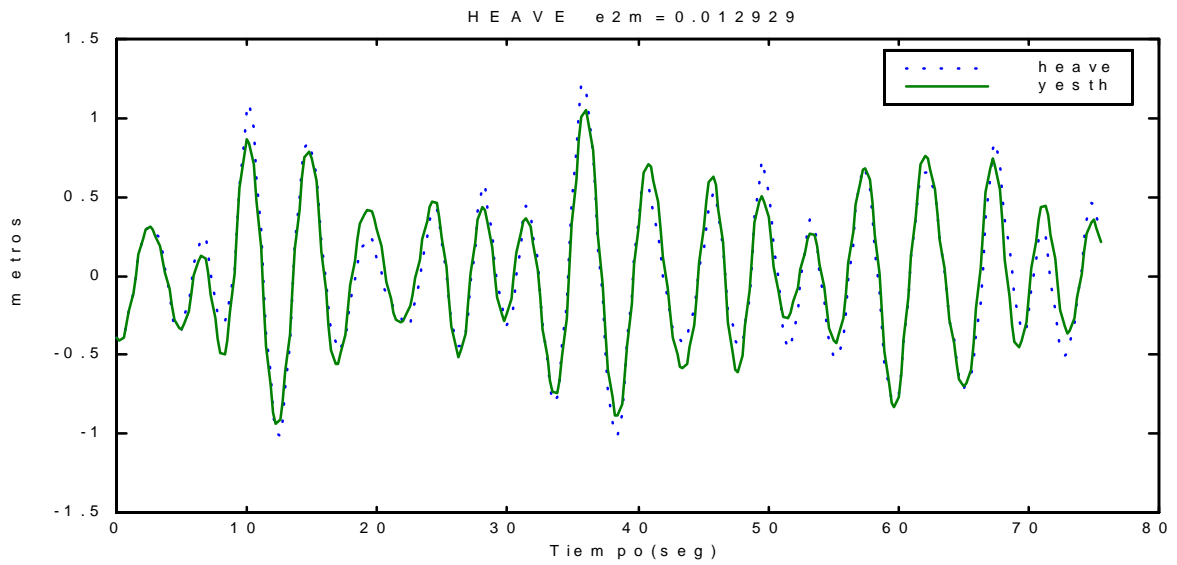


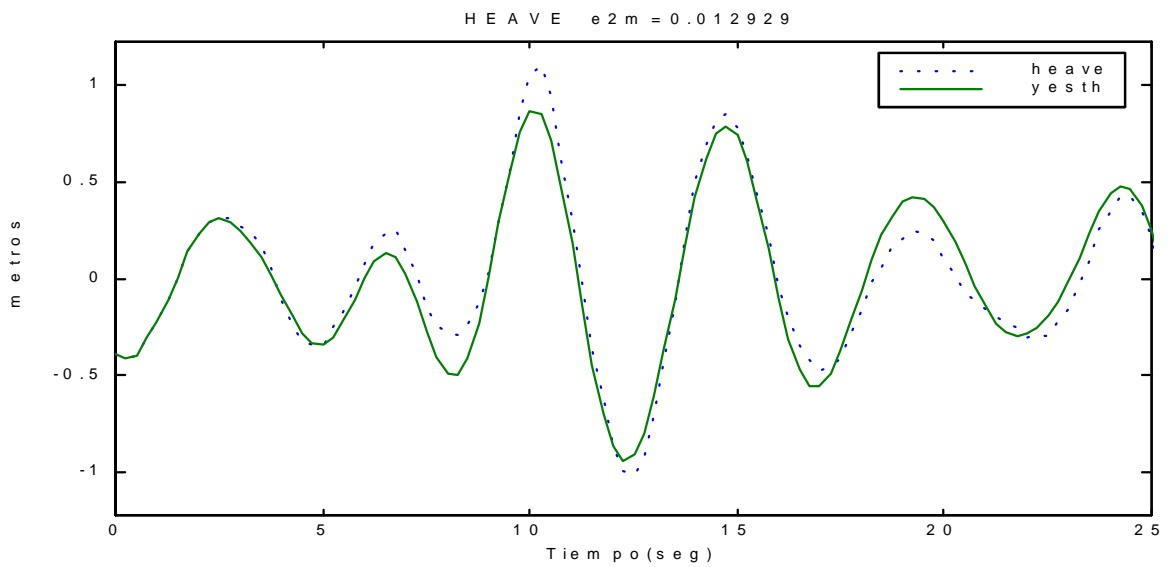
Figura 3.46 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

En la Figura 3.47 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)



(b)

Figura 3.47 : Salida del modelo(yesth) comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 3.48 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf4025).

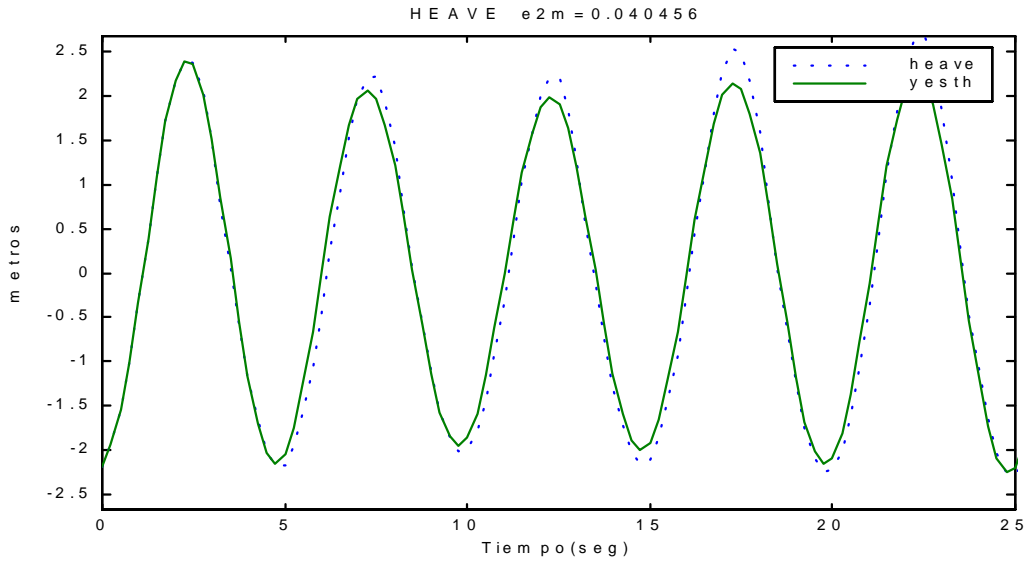


Figura 3.48 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

**3.7 ESTADO DE LA MAR 6 Y VELOCIDAD 20 NUDOS.**  
**MODELO : (10,10,6)P**

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.1692 z^{-6} + 0.3604 z^{-7} - 0.4191 z^{-8} + 0.3262 z^{-9} - 0.2661 z^{-10} \\
 & + 0.2167 z^{-11} - 0.2206 z^{-12} + 0.3566 z^{-13} - 0.49 z^{-14} \\
 & + 0.3052 z^{-15} \\
 G_p(z) = & \frac{-0.1692 z^{-6} + 0.3604 z^{-7} - 0.4191 z^{-8} + 0.3262 z^{-9} - 0.2661 z^{-10} + 0.2167 z^{-11} - 0.2206 z^{-12} + 0.3566 z^{-13} - 0.49 z^{-14} + 0.3052 z^{-15}}{1 - 1.523 z^{-1} + 0.3742 z^{-2} + 0.2681 z^{-3} - 0.003428 z^{-4} + 0.01474 z^{-5} - 0.1563 z^{-6} + 0.1334 z^{-7} - 0.04189 z^{-8} + 0.1178 z^{-9} - 0.09137 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.27 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.27 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos		Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0.91041 +	0.26403i	1.1491	0.18616
0.91041 -	0.26403i	1.1491	0.18616
0.50382 +	0.61305i	3.6507	0.25341
0.50382 -	0.61305i	3.6507	0.25341
-0.1142 +	0.69722i	7.0705	0.19655
-0.1142 -	0.69722i	7.0705	0.19655
-0.51403 +	0.51034i	9.5269	0.1354
-0.51403 -	0.51034i	9.5269	0.1354
-0.81011		0.84234	1
0.76117		1.0916	1

En la Tabla 3.28 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.28 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros		Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.82679 +	0.56551i	10.167	-0.00066359
-0.82679 -	0.56551i	10.167	-0.00066359
-0.1627 +	1.0725i	6.8931	-0.047195
-0.1627 -	1.0725i	6.8931	-0.047195
0.61339 +	0.94483i	4.0083	-0.11885
0.61339 -	0.94483i	4.0083	-0.11885
0.9414 +	0.56382i	2.1902	-0.16962
0.9414 -	0.56382i	2.1902	-0.16962
1		2.5313e-014	1

En la Figura 3.49 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

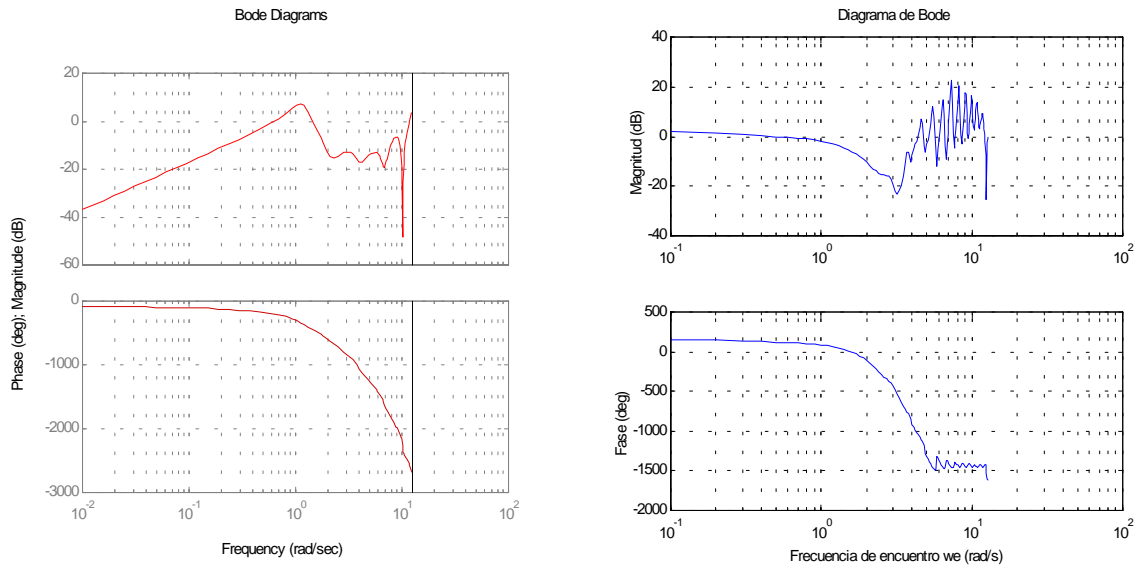


Figura 3.49 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.50 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

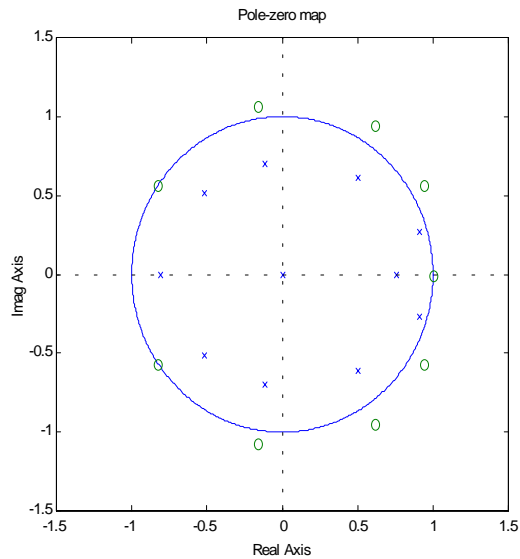
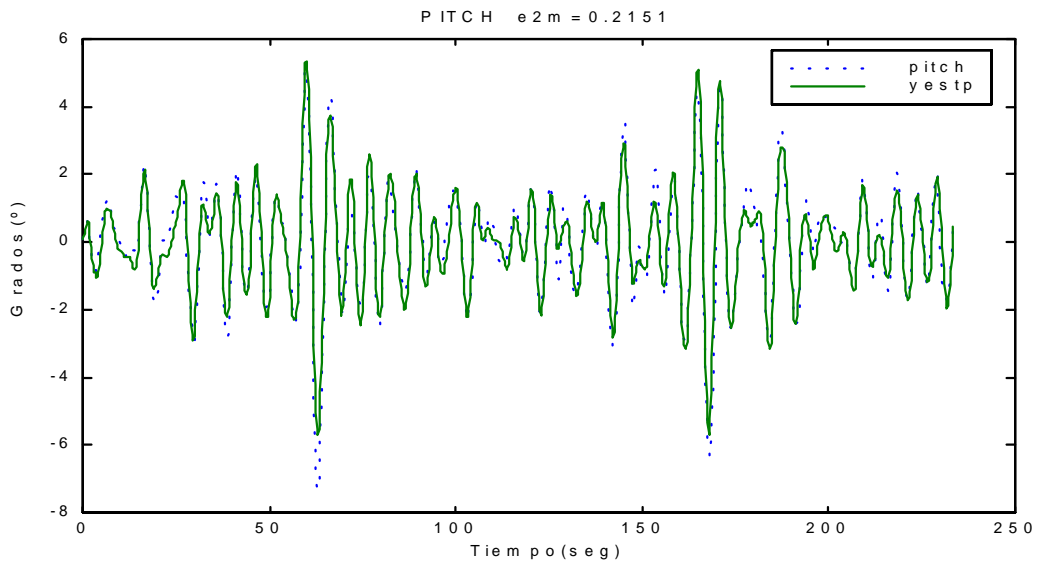


Figura 3.50 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

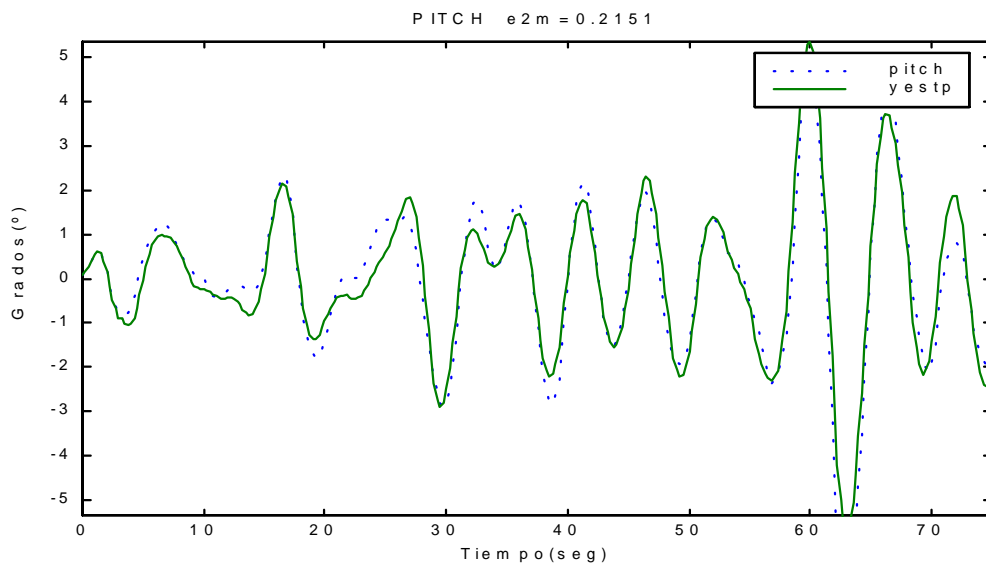
En la Figura 3.51 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)



(b)

Figura 3.51 : Salida del modelo(yestp) comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.52 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf2025).

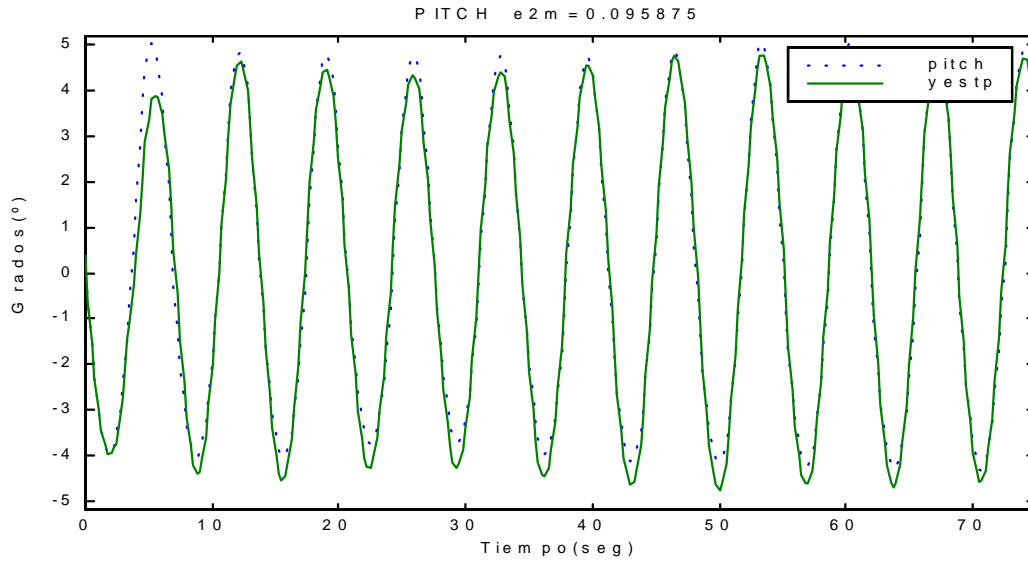


Figura 3.52 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf2025).

**MODELO : (10,10,1)H**

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 &0.04007 z^{-1} - 0.08316 z^{-2} + 0.09008 z^{-3} - 0.07165 z^{-4} + 0.05423 z^{-5} \\
 &- 0.03281 z^{-6} + 0.06664 z^{-7} - 0.06685 z^{-8} + 0.006945 z^{-9} \\
 &+ 0.03754 z^{-10}
 \end{aligned}$$

$$G_H(z) = \frac{0.04007 z^{-1} - 0.08316 z^{-2} + 0.09008 z^{-3} - 0.07165 z^{-4} + 0.05423 z^{-5} - 0.03281 z^{-6} + 0.06664 z^{-7} - 0.06685 z^{-8} + 0.006945 z^{-9} + 0.03754 z^{-10}}{1 - 1.552 z^{-1} + 0.1315 z^{-2} + 0.676 z^{-3} - 0.2765 z^{-4} + 0.2616 z^{-5} - 0.3184 z^{-6} + 0.2052 z^{-7} - 0.2014 z^{-8} + 0.1863 z^{-9} - 0.0709 z^{-10}}$$

En la Tabla 3.29 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.29 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.95896	0.16762	1
-0.5009 + 0.53016i	9.3965	0.13434
-0.5009 - 0.53016i	9.3965	0.13434
-0.033044 + 0.68828i	6.6442	0.2242
-0.033044 - 0.68828i	6.6442	0.2242
0.51621 + 0.42958i	3.2005	0.49758
0.51621 - 0.42958i	3.2005	0.49758
0.87269 + 0.21976i	1.0731	0.393
0.87269 - 0.21976i	1.0731	0.393
0.80128	0.88615	1

En la Tabla 3.30 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.30 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.6712 + 0.68933i	9.3727	0.016478
-0.6712 - 0.68933i	9.3727	0.016478
0.10138 + 1.15i	5.9592	-0.096389
0.10138 - 1.15i	5.9592	-0.096389
0.80688 + 0.69053i	2.8416	-0.084708
0.80688 - 0.69053i	2.8416	-0.084708
1.0585 + 0.43055i	1.6348	-0.32634
1.0585 - 0.43055i	1.6348	-0.32634
-0.51573	2.6487	1

En la Figura 3.53 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

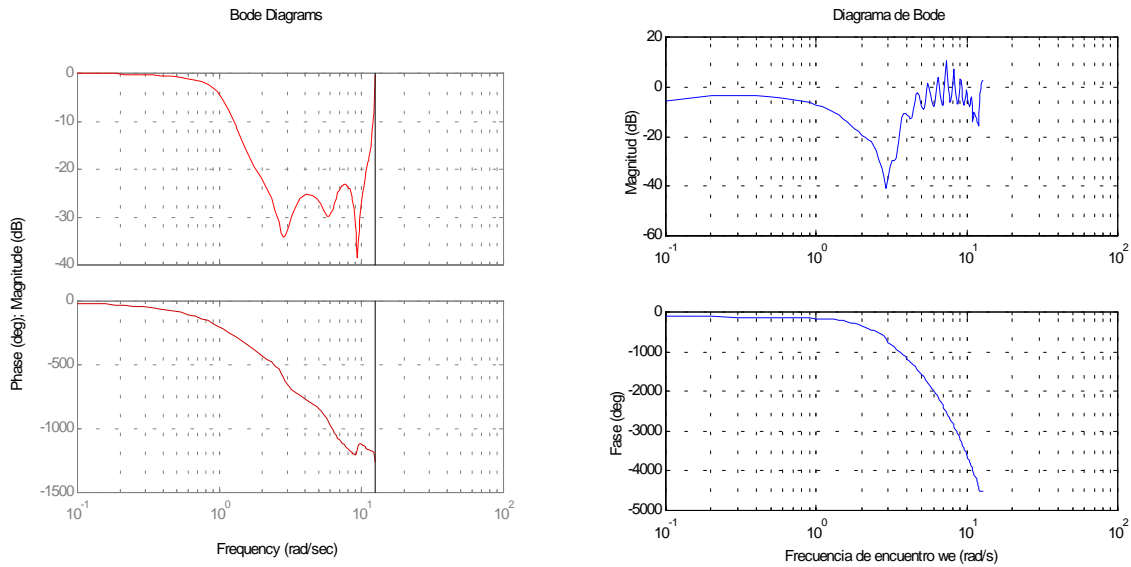


Figura 3.53 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.54 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

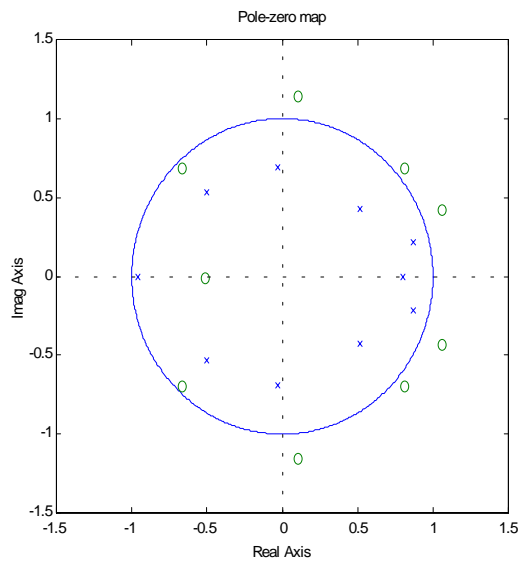
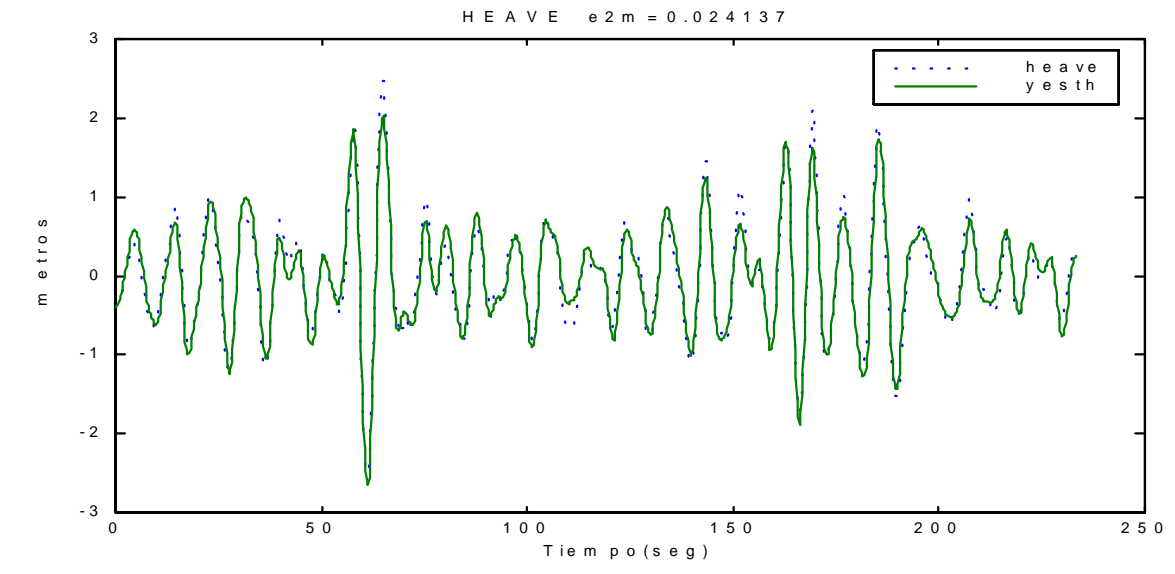


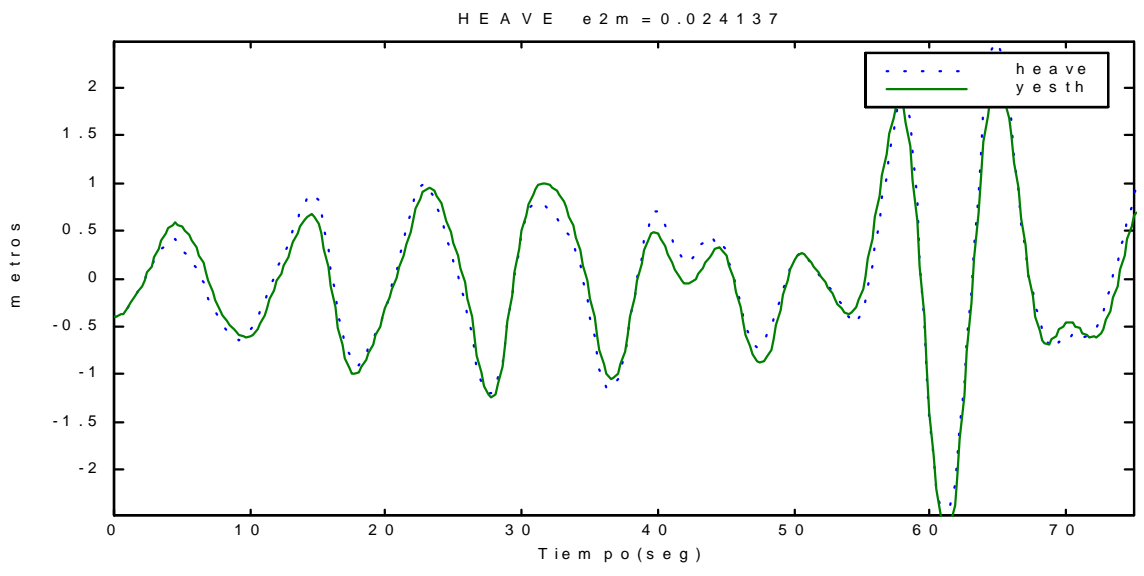
Figura 3.54 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

En la Figura 3.55 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)

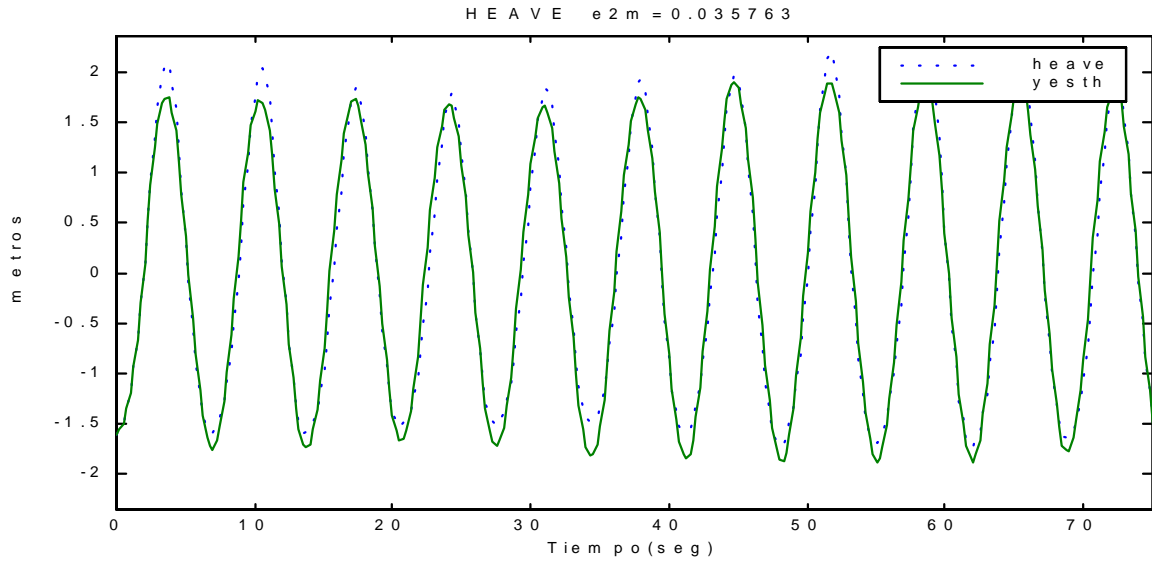


(b)

Figura 3.55 : Salida del modelo(yesth) comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.56 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf2025).



*Figura 3.56 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf2025).*

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

**3.8 ESTADO DE LA MAR 6 Y VELOCIDAD 30 NUDOS**  
**MODELO : (10,10,6)P**

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.08439 z^{-6} + 0.06342 z^{-7} + 0.04589 z^{-8} - 0.09667 z^{-9} + 0.01118 z^{-10} \\
 & + 0.03295 z^{-11} - 0.01221 z^{-12} + 0.03883 z^{-13} - 0.06106 z^{-14} \\
 & + 0.06204 z^{-15} \\
 G_p(z) = & \frac{-0.08439 z^{-6} + 0.06342 z^{-7} + 0.04589 z^{-8} - 0.09667 z^{-9} + 0.01118 z^{-10} + 0.03295 z^{-11} - 0.01221 z^{-12} + 0.03883 z^{-13} - 0.06106 z^{-14} + 0.06204 z^{-15}}{1 - 2.279 z^{-1} + 1.721 z^{-2} + 0.2857 z^{-3} - 1.414 z^{-4} + 0.8654 z^{-5} - 0.1418 z^{-6} + 0.3812 z^{-7} - 0.6138 z^{-8} + 0.3298 z^{-9} - 0.05793 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.31 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.31 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos	Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-0.95637	0.17844	1
-0.46238 + 0.55124i	9.17	0.14361
-0.46238 - 0.55124i	9.17	0.14361
0.43251 + 0.83852i	4.3845	0.053063
0.43251 - 0.83852i	4.3845	0.053063
0.88294 + 0.2945i	1.3194	0.21753
0.88294 - 0.2945i	1.3194	0.21753
0.57606 + 0.26494i	2.5089	0.72639
0.57606 - 0.26494i	2.5089	0.72639
0.37741	3.8977	1

En la Tabla 3.32 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.32 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros	Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-1.0435 + 0.33609i	11.326	-0.032472
-1.0435 - 0.33609i	11.326	-0.032472
-0.33833 + 0.77805i	7.9511	0.082689
-0.33833 - 0.77805i	7.9511	0.082689
1	7.061e-014	1
0.79901 + 0.63075i	2.674	-0.026637
0.79901 - 0.63075i	2.674	-0.026637
0.45863 + 0.78085i	4.1778	0.09496
0.45863 - 0.78085i	4.1778	0.09496

En la Figura 3.57 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

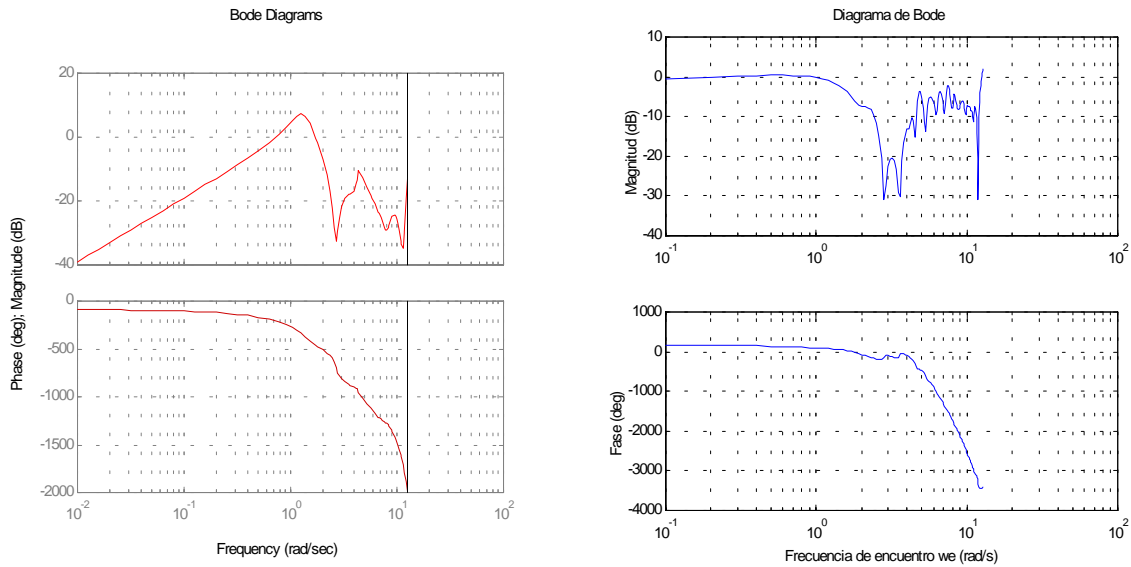


Figura 3.57 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.58 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

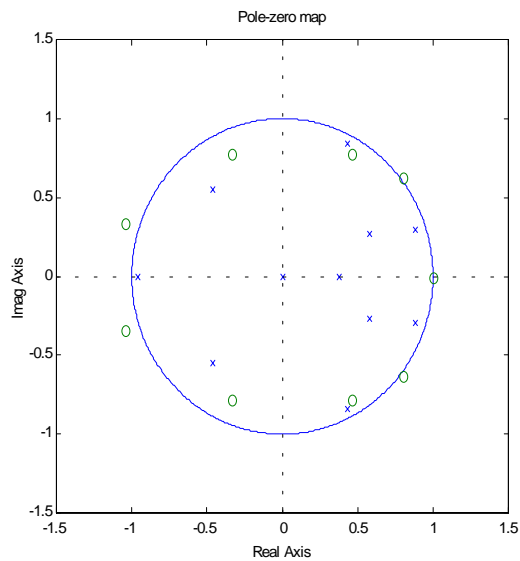
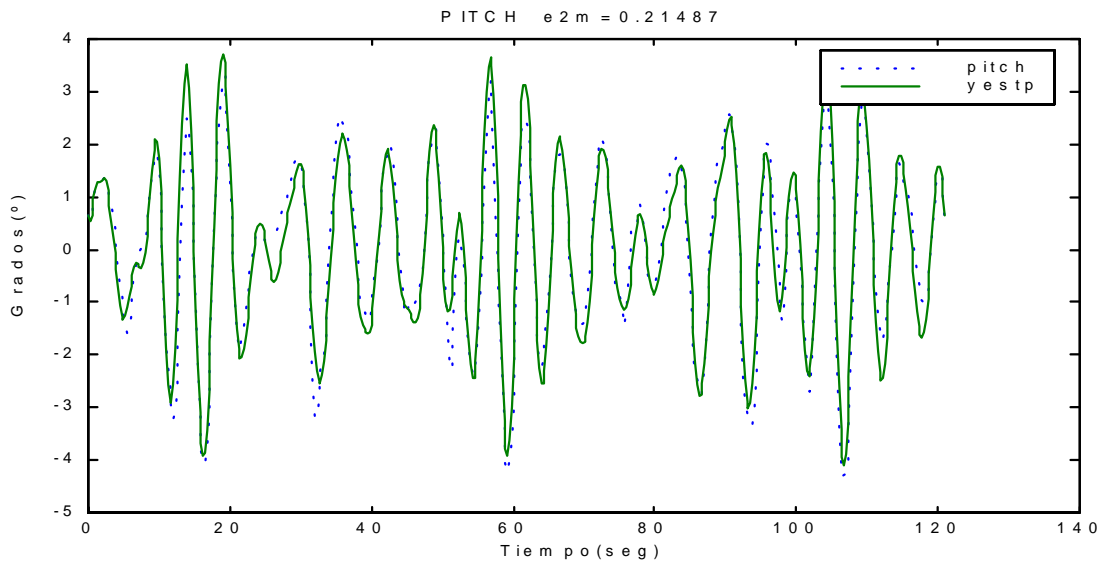


Figura 3.58 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

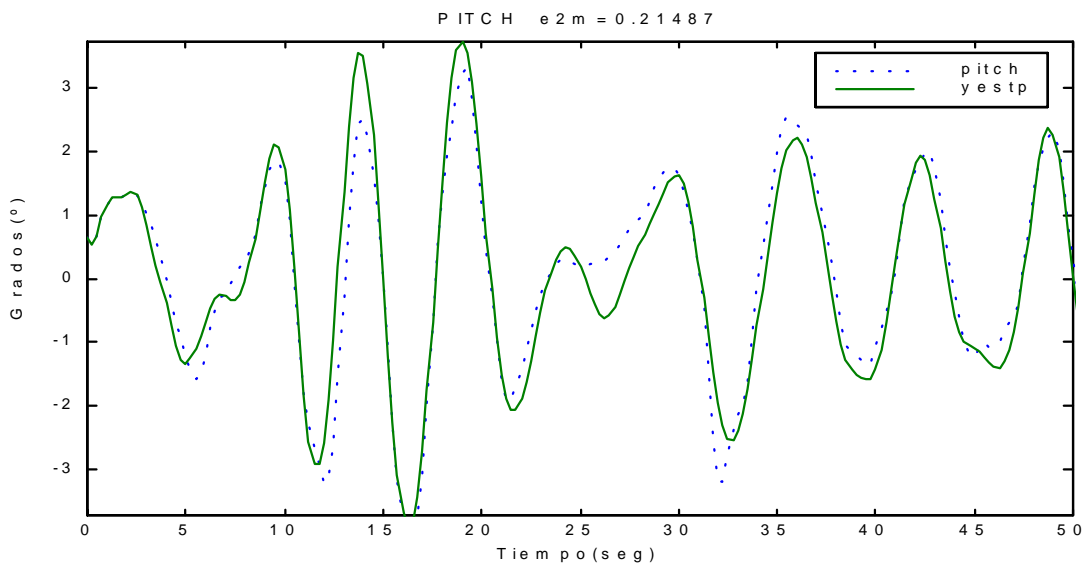
En la Figura 3.59 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)



(b)

Figura 3.59 : Salida del modelo(yestp) comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 3.60 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf3025).

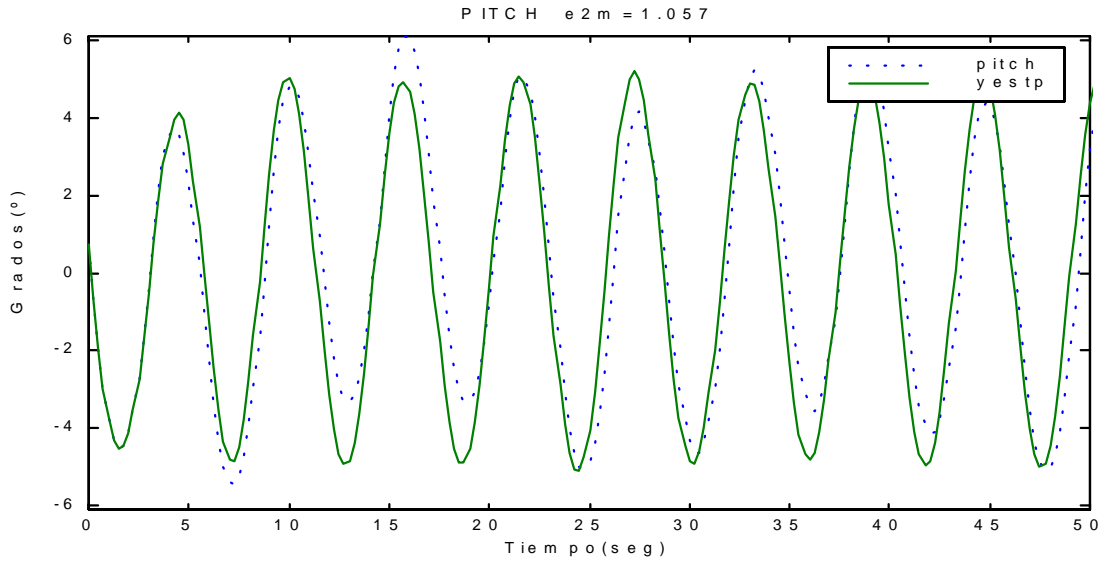


Figura 3.60 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf3025).

**MODELO : (10,8,4)H**

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 &0.04493 z^{-4} - 0.08913 z^{-5} + 0.1299 z^{-6} - 0.1064 z^{-7} + 0.1058 z^{-8} \\
 &\quad - 0.06221 z^{-9} + 0.03373 z^{-10} + 0.01484 z^{-11} \\
 G_H(z) = &\frac{\text{-----}}{\text{-----}} \\
 &1 - 1.418 z^{-1} + 0.1431 z^{-2} + 0.4293 z^{-3} - 0.1548 z^{-4} + 0.2606 z^{-5} \\
 &\quad - 0.2871 z^{-6} + 0.1988 z^{-7} - 0.1884 z^{-8} + 0.1896 z^{-9} - 0.1021 z^{-10}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.33 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.34 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
-0.93691	0.26066	1
-0.51553 + 0.54296i	9.3928	0.12324
-0.51553 - 0.54296i	9.3928	0.12324
-0.071126 + 0.72276i	6.7971	0.18824
-0.071126 - 0.72276i	6.7971	0.18824
0.4557 + 0.53828i	3.7435	0.3731
0.4557 - 0.53828i	3.7435	0.3731
0.87771 + 0.2997i	1.3502	0.22306
0.87771 - 0.2997i	1.3502	0.22306
0.86099	0.5987	1

En la Tabla 3.35 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.35 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.31972 + 0.89129i	7.664	0.028477
-0.31972 - 0.89129i	7.664	0.028477
0.57751 + 0.94251i	4.1039	-0.097643
0.57751 - 0.94251i	4.1039	-0.097643
0.86062 + 0.67099i	2.6718	-0.13078
0.86062 - 0.67099i	2.6718	-0.13078
-0.2531	5.496	1

En la Figura 3.61 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

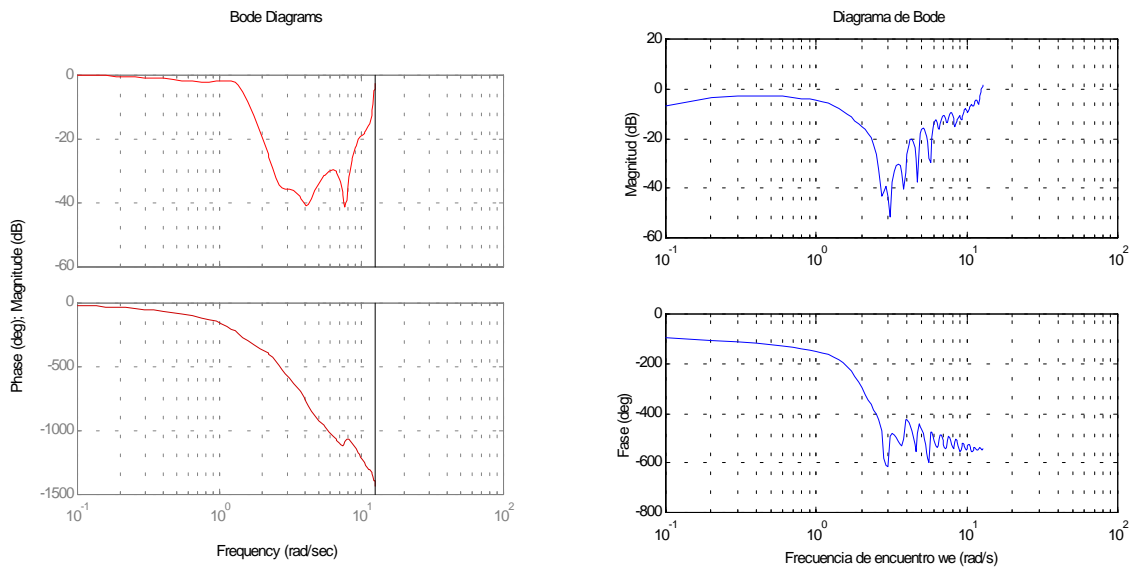


Figura 3.61 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.62 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

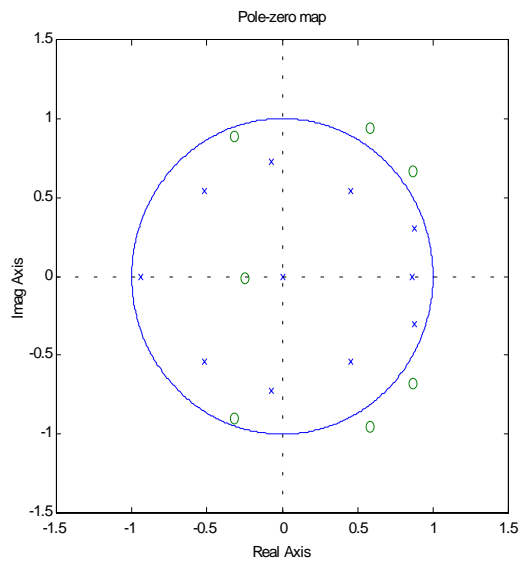
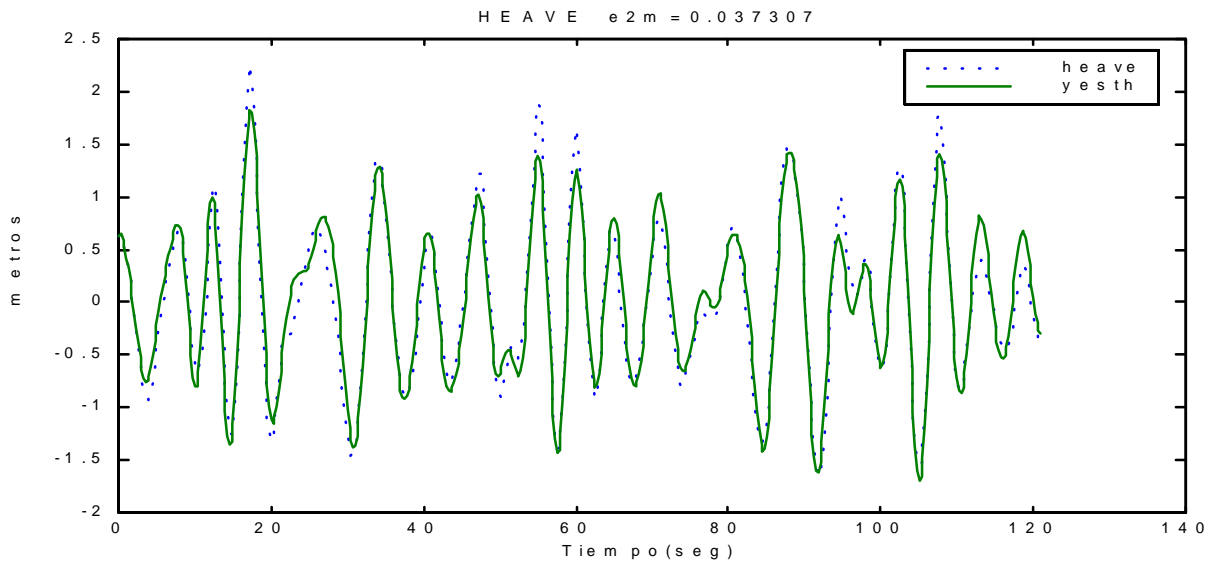


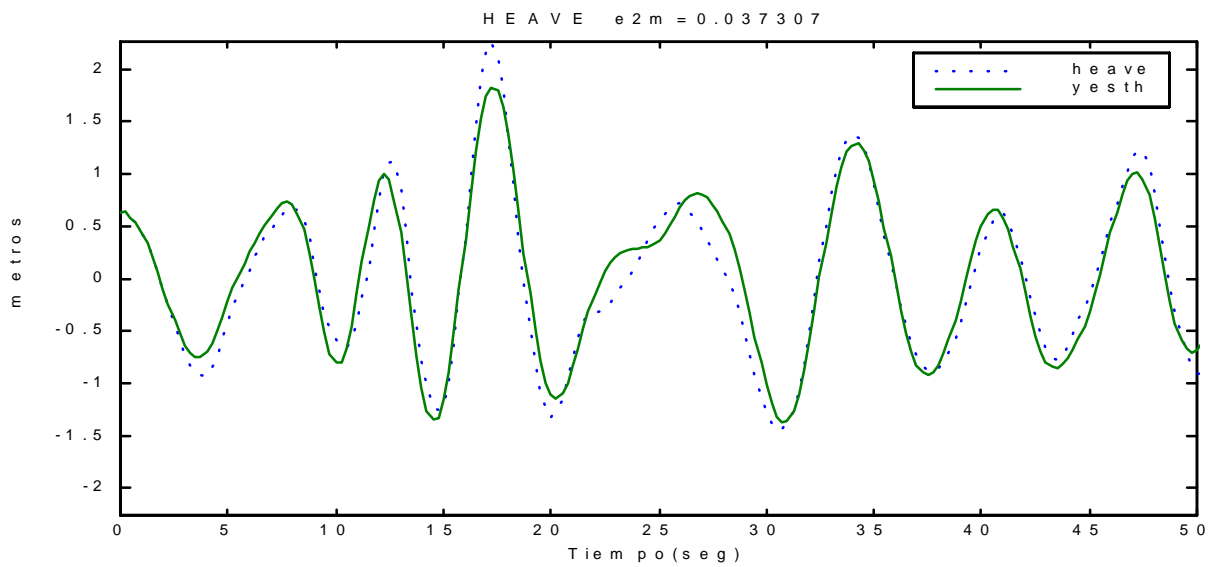
Figura 3.62 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

En la Figura 3.63 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)

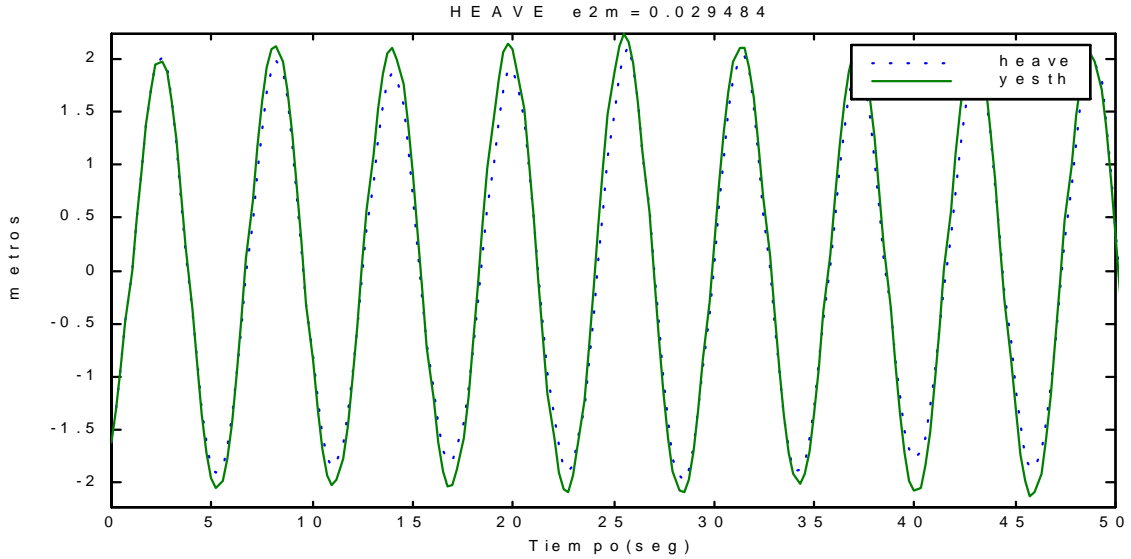


(b)

Figura 3.63 : Salida del modelo(yesth) comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.64 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf3025).



*Figura 3.64 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf3025).*

### 3.9 ESTADO DE LA MAR 6 Y VELOCIDAD 40 NUDOS

#### MODELO : (7,6,6)P

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.1326 z^{-6} + 0.09966 z^{-7} - 0.03714 z^{-8} + 0.06623 z^{-9} - 0.1595 z^{-10} \\
 & \qquad \qquad \qquad + 0.1634 z^{-11} \\
 G_p(z) = & \frac{\text{-----}}{1 - 1.55 z^{-1} + 0.6655 z^{-2} + 0.111 z^{-3} - 0.1976 z^{-4} - 0.0675 z^{-5} \\
 & \qquad \qquad \qquad + 0.3178 z^{-6} - 0.116 z^{-7}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.36 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.36 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos		Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0.89216 +	0.29447i	1.2994	0.19211
0.89216 -	0.29447i	1.2994	0.19211
0.25862 +	0.74108i	5.0342	0.19243
0.25862 -	0.74108i	5.0342	0.19243
-0.5934 +	0.37184i	10.425	0.1367
-0.5934 -	0.37184i	10.425	0.1367
0.43507		3.329	1

En la Tabla 3.37 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.37 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros		Frecuencia Natural (rad/s)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.71685 +	0.83341i	9.1324	-0.041465
-0.71685 -	0.83341i	9.1324	-0.041465
0.5926 +	0.81742i	3.7743	-0.010157
0.5926 -	0.81742i	3.7743	-0.010157
1		1.2434e-014	1

En la Figura 3.65 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

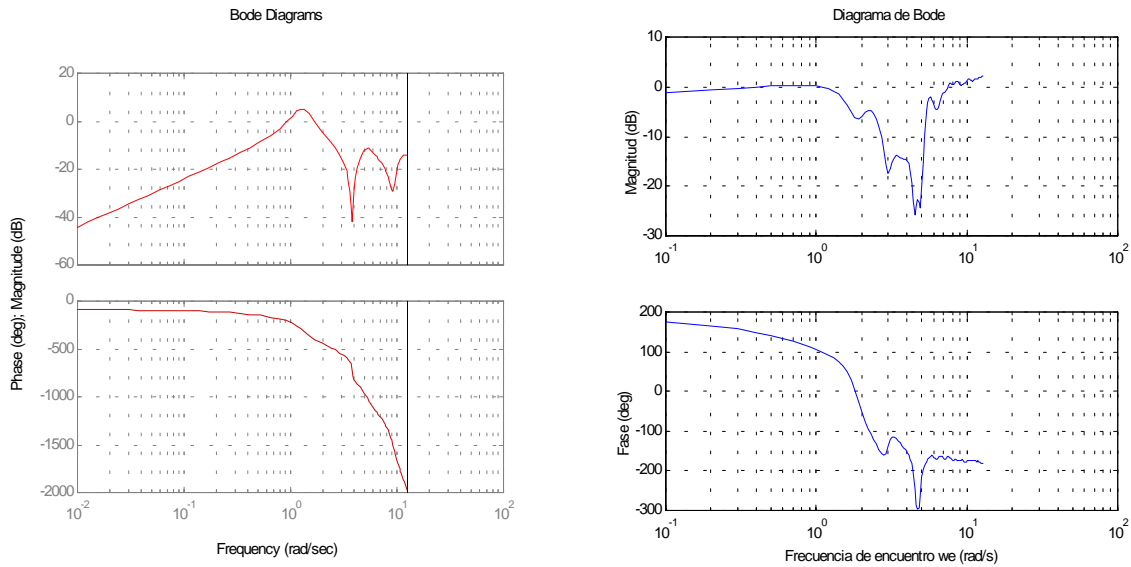


Figura 3.65 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.66 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

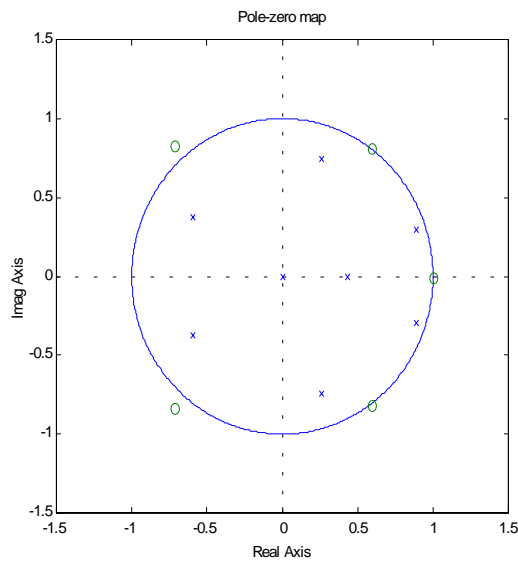
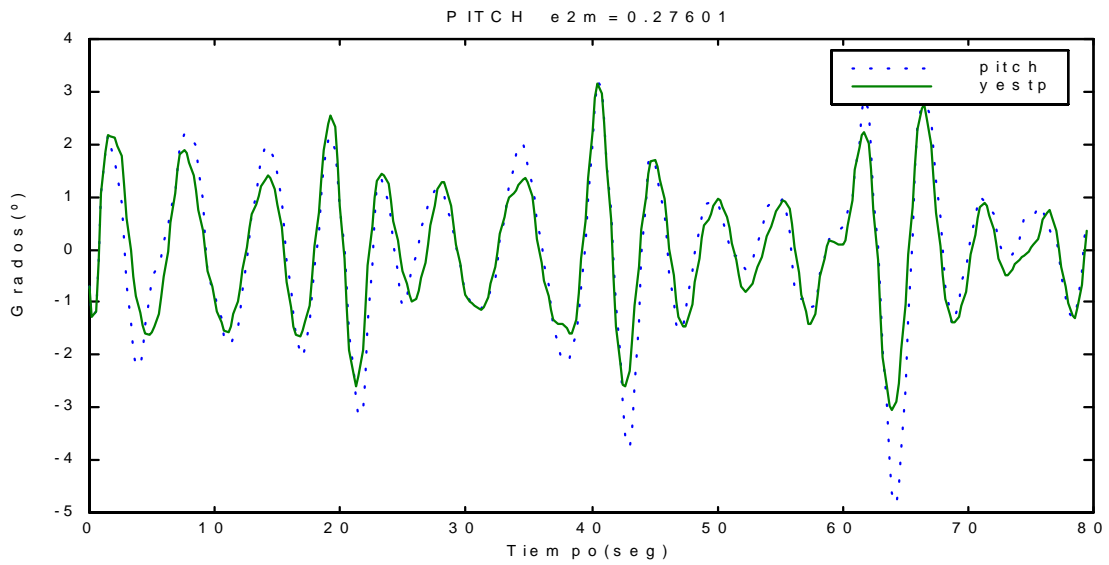


Figura 3.66 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

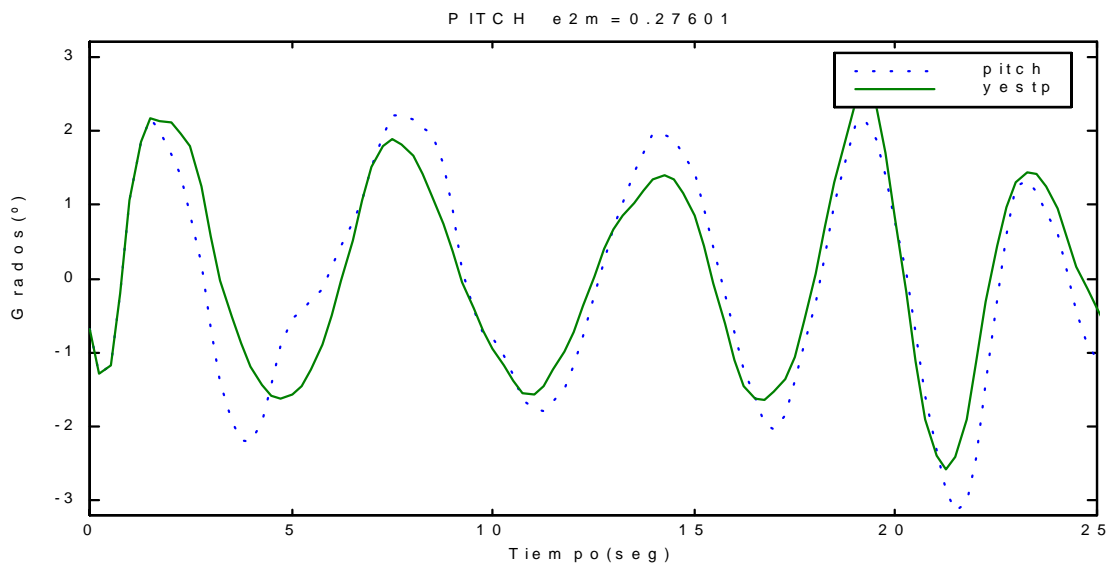
En la Figura 3.67 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)



(b)

Figura 3.67 : Salida del modelo(yestp) comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.68 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf4025).

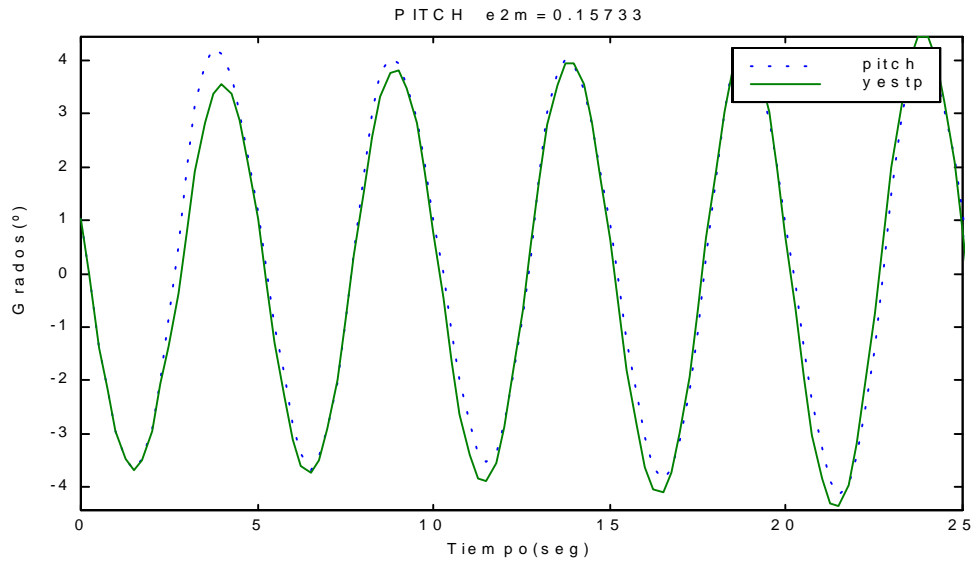


Figura 3.68 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).

**MODELO : (10,9,4)H**

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 &0.04729 z^{-4} - 0.05974 z^{-5} + 0.08629 z^{-6} - 0.056 z^{-7} + 0.08514 z^{-8} \\
 &- 0.06062 z^{-9} + 0.07078 z^{-10} - 0.03236 z^{-11} + 0.03313 z^{-12} \\
 G_H(z) = & \frac{\text{-----}}{1 - 1.526 z^{-1} + 0.4119 z^{-2} + 0.3771 z^{-3} - 0.2209 z^{-4} + 0.2602 z^{-5} \\
 &- 0.3795 z^{-6} + 0.3261 z^{-7} - 0.2499 z^{-8} + 0.2517 z^{-9} - 0.1369 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 3.38 se muestran el valor de los polos del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos polos.

*Tabla 3.38 : Valor y propiedades de los polos del modelo.*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-0.94844	0.21174	1
-0.50889 + 0.57454i	9.2435	0.11451
-0.50889 - 0.57454i	9.2435	0.11451
-0.061901 + 0.72856i	6.7396	0.18582
-0.061901 - 0.72856i	6.7396	0.18582
0.52211 + 0.60029i	3.54	0.2584
0.52211 - 0.60029i	3.54	0.2584
0.87394 + 0.3386i	1.5011	0.17273
0.87394 - 0.3386i	1.5011	0.17273
0.82405	0.77411	1

En la Tabla 3.39 se muestran el valor de los ceros del modelo, así como la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de dichos ceros.

*Tabla 3.39 : Valor y propiedades de los ceros del modelo.*

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.63892 + 0.70285i	9.2366	0.02228
-0.63892 - 0.70285i	9.2366	0.02228
0.80033 + 0.60387i	2.5856	-0.0040051
0.80033 - 0.60387i	2.5856	-0.0040051
0.53512 + 0.89531i	4.1318	-0.040797
0.53512 - 0.89531i	4.1318	-0.040797
-0.064899 + 0.84006i	6.6271	0.1034
-0.064899 - 0.84006i	6.6271	0.1034

En la Figura 3.69 se muestran el diagrama de Bode del modelo, y el diagrama de Bode de los datos experimentales medidos :

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

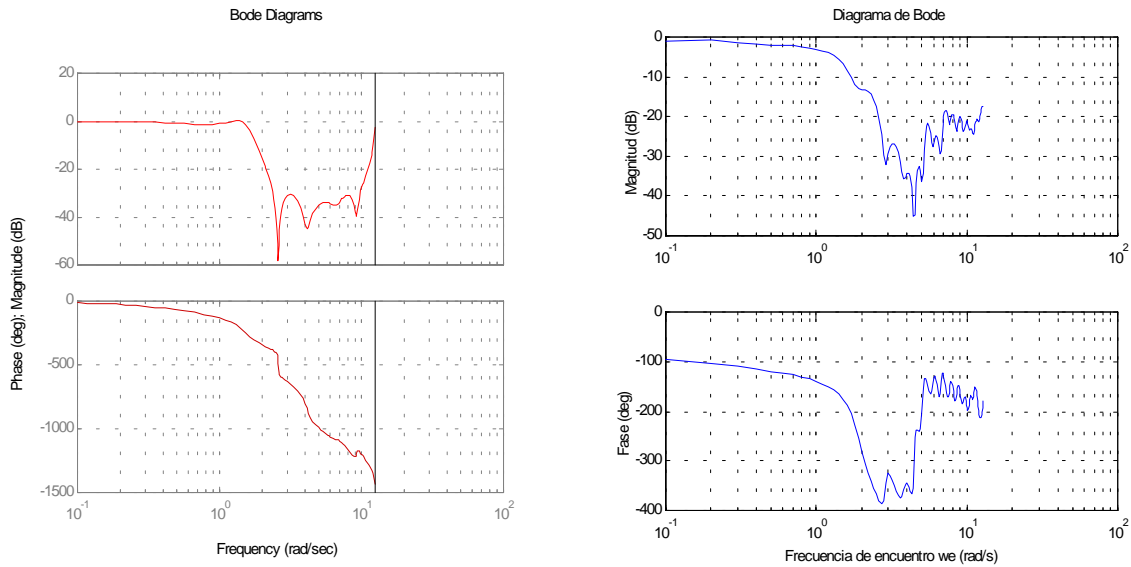


Figura 3.69 : (a)Diagrama de Bode del modelo y (b)Diagrama de Bode de los datos experimentales

En la Figura 3.70 se muestra el diagrama de polos y ceros del modelo :

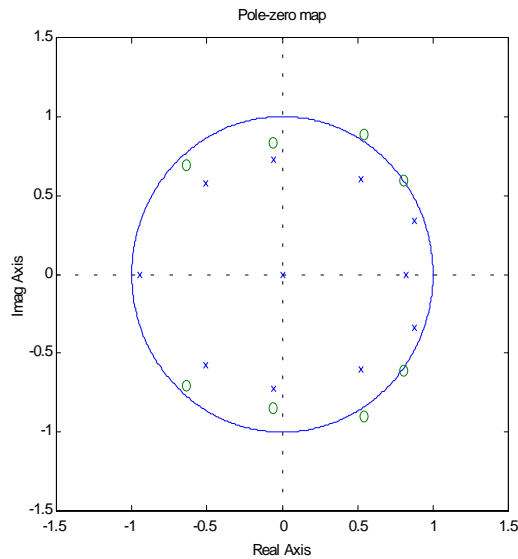


Figura 3.70 : (a)Diagrama de polos y ceros del modelo.

En la Figura 3.71 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

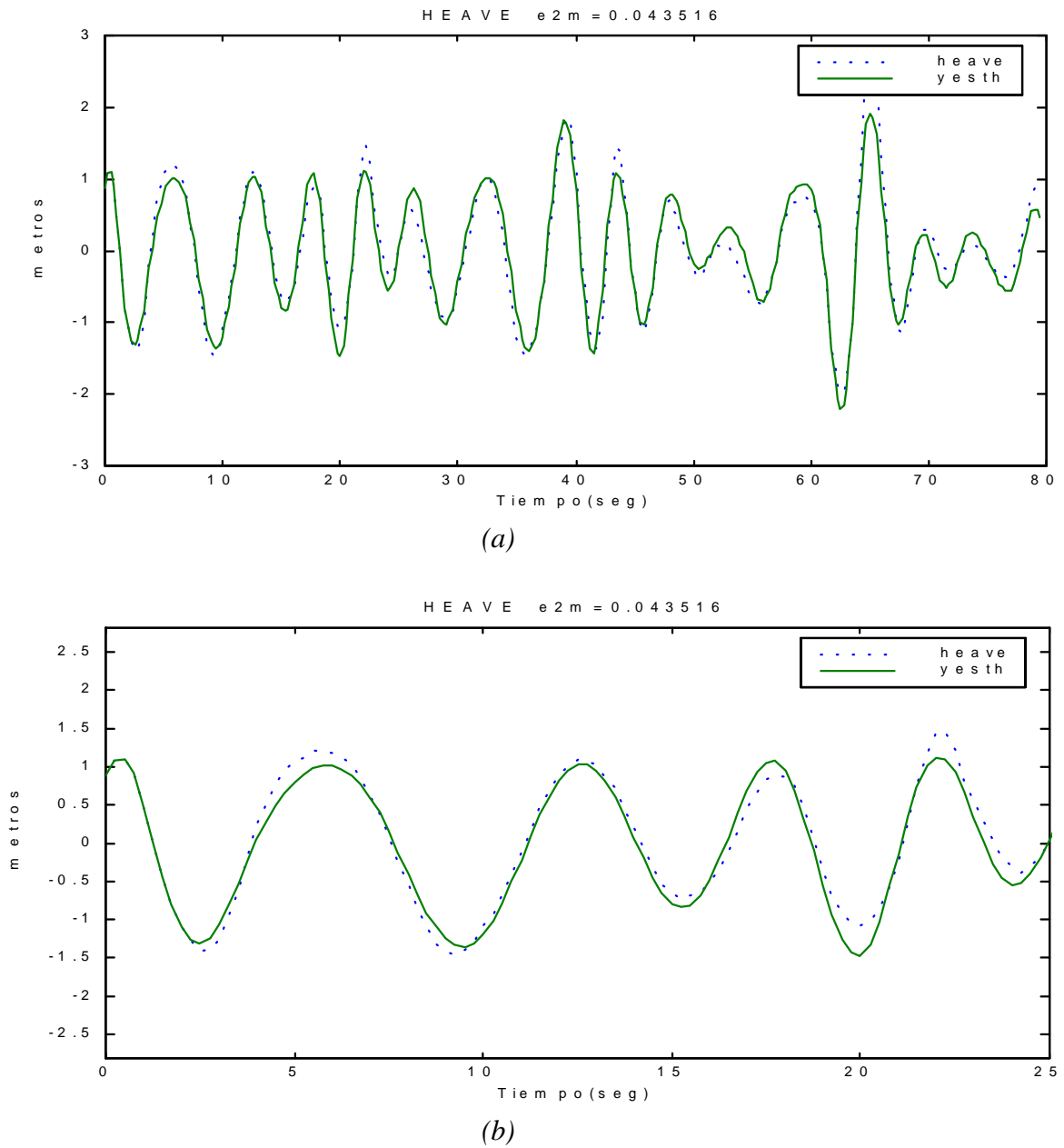


Figura 3.71 : Salida del modelo(yesth) comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 3.72 se muestra la salida generada por el modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular(ensayo tf4025).

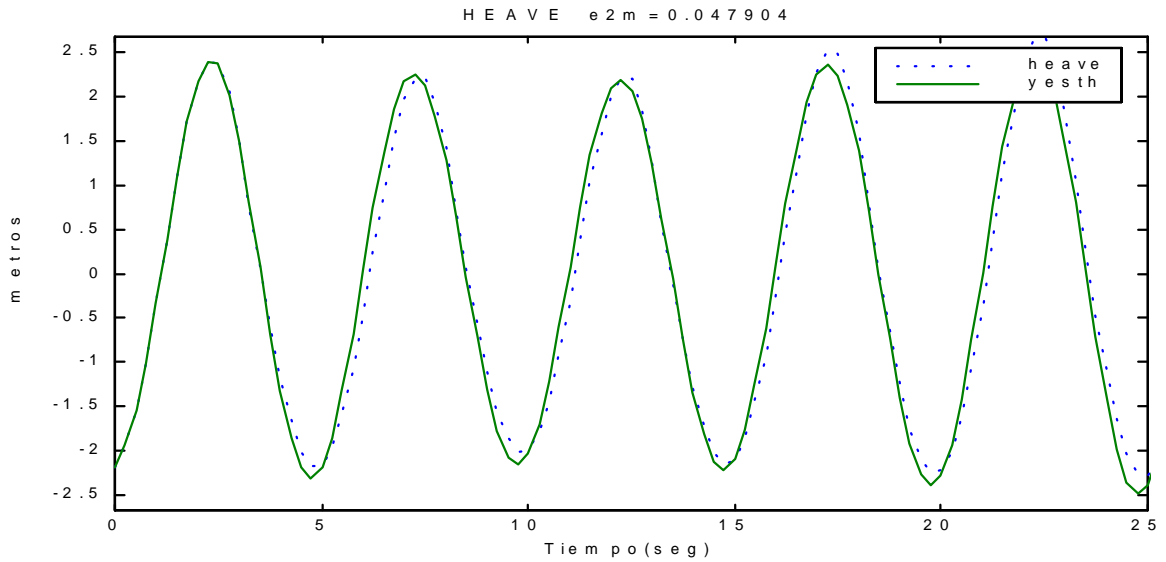


Figura 3.72 : Salida del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).

## 4. MODELOS ARX SIMO IDENTIFICADOS CON OLEAJE IRREGULAR.

En la Tabla 4.1 se presentan los modelos ARX simo que han sido seleccionados por tener el FPE más pequeño.

Tabla 4.1 : Modelos ARX SIMO seleccionados.

Estado de la mar	Velocidad del buque (nudos)	Modelo ARX SIMO con menor FPE (nc,nap,nbp,nkp,nah,nbh,nkh)	V	FPE
	20	(3,10,10,10,10,9,4)	1.6444	0.003823
4	30	(3,10,10,8,10,8,2)	2.4618	0.01052
	40	(3,10,10,7,10,9,5)	1.5581	0.01249
	20	(3,10,10,6,10,10,3)	1.3191	0.003073
5	30	(3,10,10,7,10,7,5)	2.97	0.014069
	40	(3,10,10,6,10,7,3)	4.3599	0.034508
	20	(3,10,10,6,10,7,3)	4.2418	0.009821
6	30	(3,10,10,6,10,9,2)	1.2768	0.006186
	40	(3,10,10,0,10,7,0)	2.7339	0.02301

**CRIBAV** 

---

 **CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

### 4.1 ESTADO DE LA MAR 4 Y VELOCIDAD 20 NUDOS.

#### MODELO (3,10,10,10,10,9,4)

La función de transferencia  $G_P(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 G_P(z) = & \frac{-0.1361 z^{-10} + 0.2286 z^{-11} - 0.217 z^{-12} + 0.1266 z^{-13} - 0.1107 z^{-14} \\
 & + 0.1304 z^{-15} - 0.1478 z^{-16} + 0.1785 z^{-17} - 0.1309 z^{-18} + 0.07844 z^{-19}}{1 - 2.129 z^{-1} + 1.619 z^{-2} + 0.2316 z^{-3} - 1.243 z^{-4} + 0.5525 z^{-5} \\
 & + 0.2198 z^{-6} + 0.1539 z^{-7} - 0.7025 z^{-8} + 0.6027 z^{-9} - 0.1518 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.2 se muestran los polos y ceros de  $G_P(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$  :

Tabla 4.2: Polos y ceros de la  $G_P(z)$  derivada del modelo.

Polos		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
-0.93756		0.2579	1
-0.56084 +	0.57288i	9.4239	0.093808
-0.56084 -	0.57288i	9.4239	0.093808
0.37689 +	0.85484i	4.6302	0.058769
0.37689 -	0.85484i	4.6302	0.058769
0.58852 +	0.62246i	3.312	0.18689
0.58852 -	0.62246i	3.312	0.18689
0.91115 +	0.27092i	1.1737	0.17275
0.91115 -	0.27092i	1.1737	0.17275
0.43532		3.3267	1

Ceros		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.77739 +	0.56027i	10.07	0.01694
-0.77739 -	0.56027i	10.07	0.01694
-0.10393 +	0.86995i	6.7795	0.078023
-0.10393 -	0.86995i	6.7795	0.078023
1		8.8818e-016	1
0.77136 +	0.65668i	2.8215	-0.018352
0.77136 -	0.65668i	2.8215	-0.018352
0.44981 +	0.77098i	4.1953	0.10832
0.44981 -	0.77098i	4.1953	0.10832



La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.008242 z^{-4} + 0.06195 z^{-5} - 0.09233 z^{-6} + 0.0916 z^{-7} - 0.05526 z^{-8} \\
 & + 0.04579 z^{-9} + 0.003529 z^{-10} - 0.01971 z^{-11} + 0.03801 z^{-12} \\
 G_H(z) = & \frac{-0.008242 z^{-4} + 0.06195 z^{-5} - 0.09233 z^{-6} + 0.0916 z^{-7} - 0.05526 z^{-8} + 0.04579 z^{-9} + 0.003529 z^{-10} - 0.01971 z^{-11} + 0.03801 z^{-12}}{1 - 0.946 z^{-1} - 0.4173 z^{-2} + 0.2147 z^{-3} + 0.09403 z^{-4} + 0.2673 z^{-5} - 0.09509 z^{-6} + 0.1028 z^{-7} - 0.2541 z^{-8} + 0.1322 z^{-9} - 0.03316 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.3 se muestran los polos y ceros de  $G_H(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.3 : Polos y ceros de la  $G_H(z)$  derivada del modelo .*

Polos		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
-0.93756		0.2579	1
-0.56084 +	0.57288i	9.4239	0.093808
-0.56084 -	0.57288i	9.4239	0.093808
-0.030629 +	0.74113i	6.5582	0.1822
-0.030629 -	0.74113i	6.5582	0.1822
0.8229 +	0.26181i	1.3648	0.43
0.8229 -	0.26181i	1.3648	0.43
0.87539		0.53234	1
0.27265 +	0.28083i	4.9318	0.76078
0.27265 -	0.28083i	4.9318	0.76078

Ceros		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
5.9114		7.1075	-1
0.95761 +	0.62499i	2.3744	-0.22592
0.95761 -	0.62499i	2.3744	-0.22592
0.49722 +	0.8429i	4.1523	0.02081
0.49722 -	0.8429i	4.1523	0.02081
-0.3126 +	0.90499i	7.6155	0.022832
-0.3126 -	0.90499i	7.6155	0.022832
-0.67954		1.5454	1

En la Figura 4.1 se muestran el diagrama de Bode y el diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

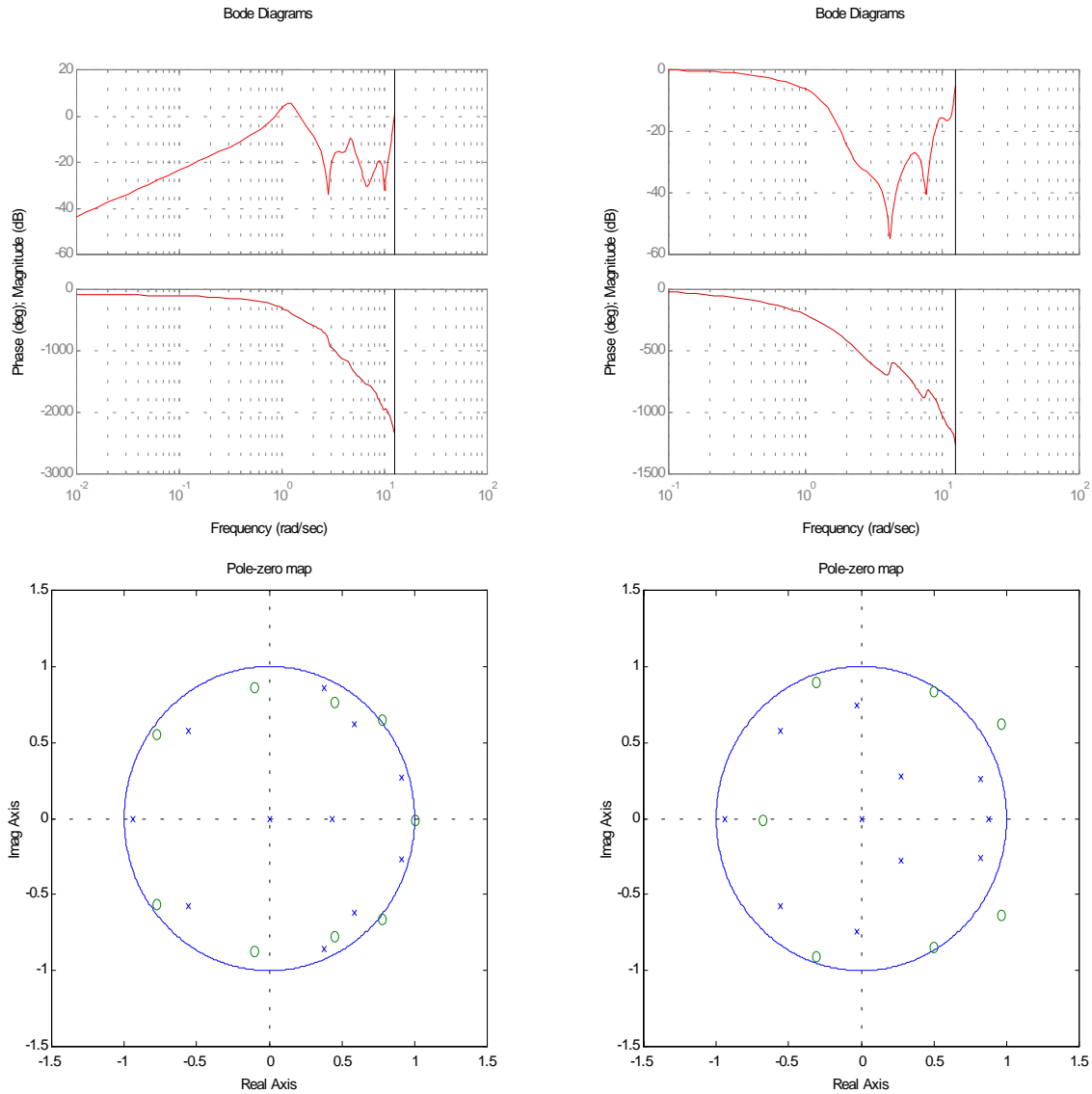
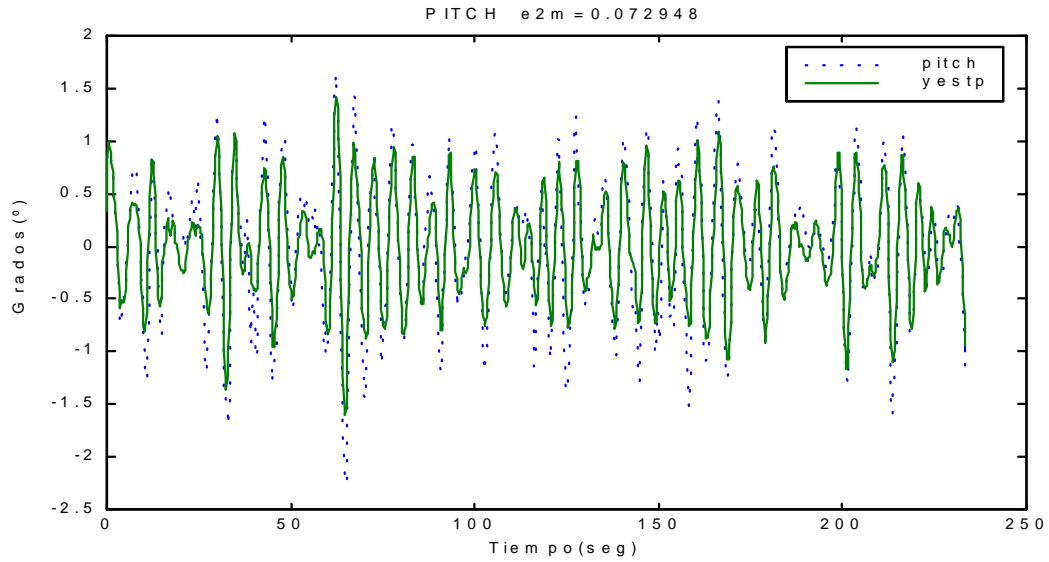


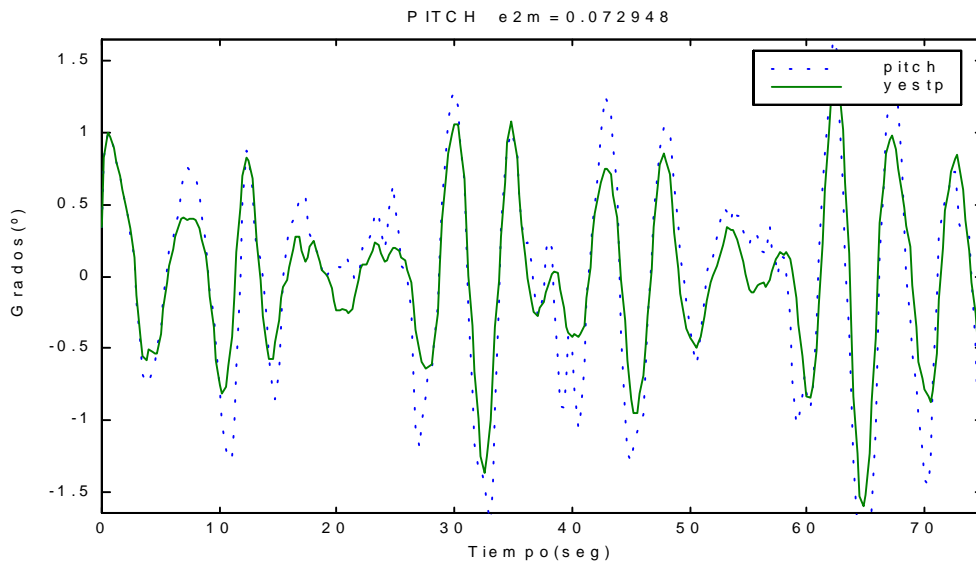
Figura 4.1 : (a) Diagrama de Bode del  $G_P(z)$  y de  $G_H(z)$  y (b) Diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

En la Figura 4.2 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD



(a)



(b)

Figura 4.2 : Salida(yestp) de  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.3 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf2025).

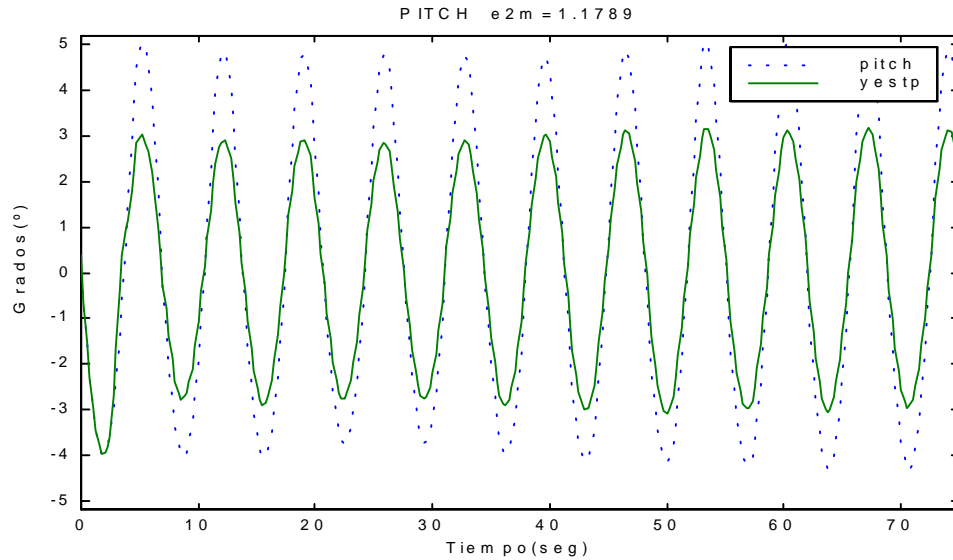


Figura 4.3 : Salida (yestp) de  $G_P(z)$  comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf2025).

En la Figura 4.4 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf2025).

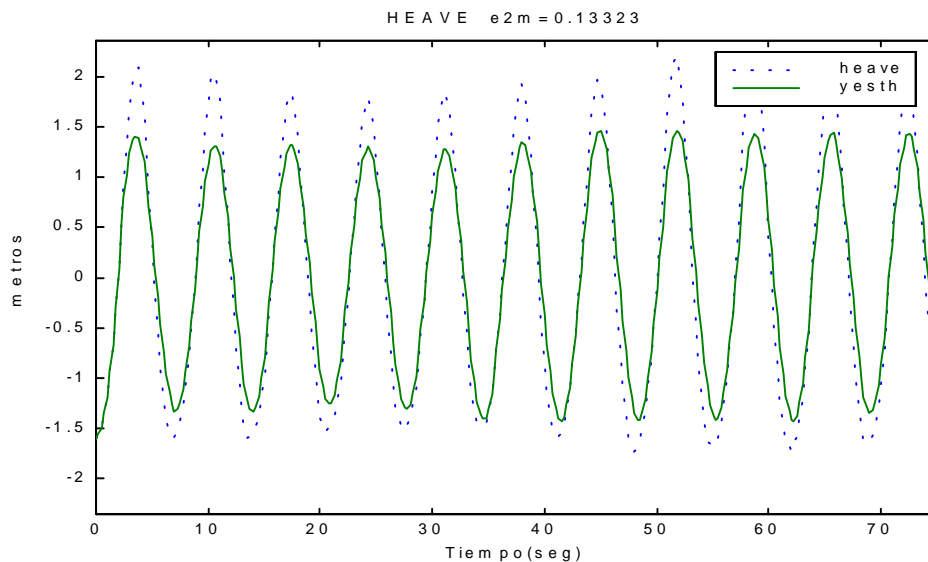
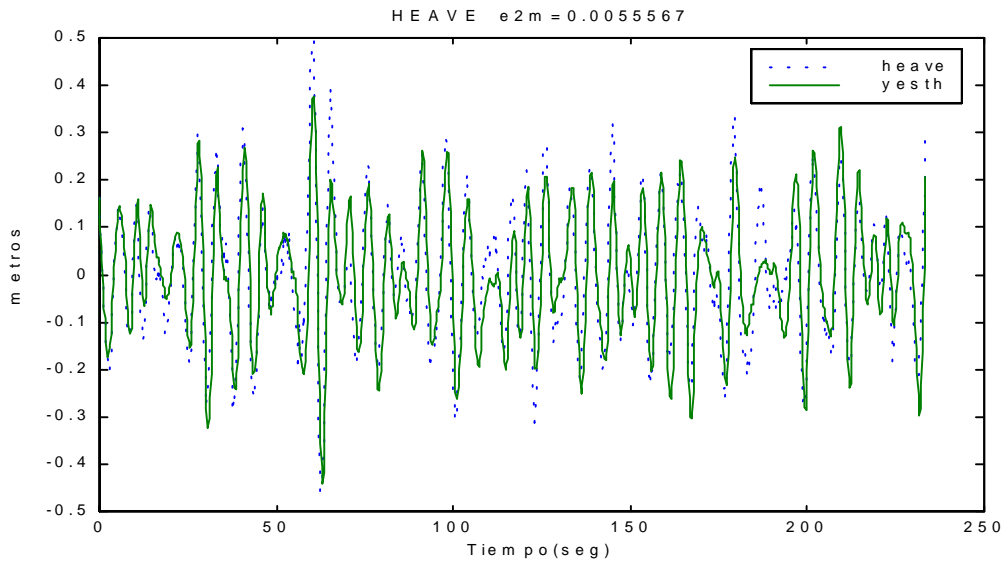


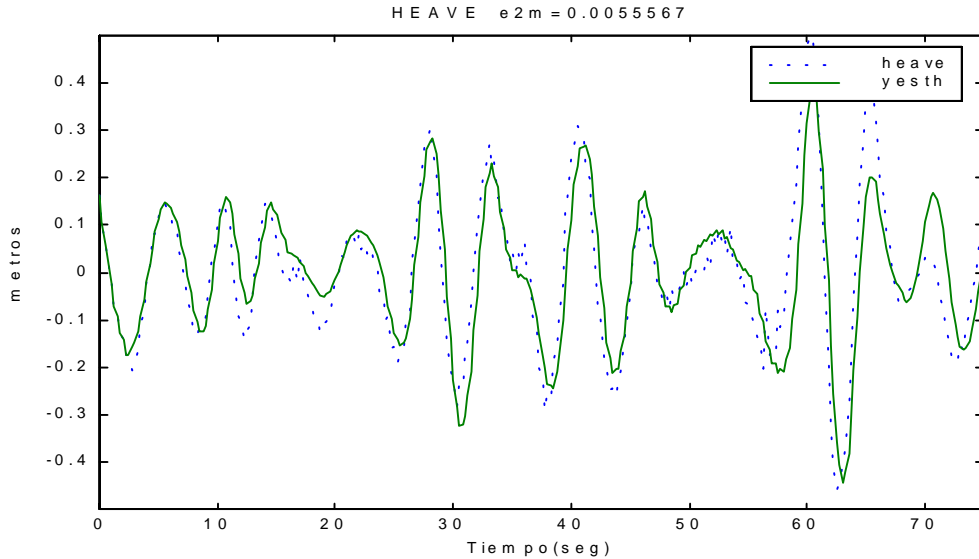
Figura 4.4 : Salida (yesth) de  $G_H(z)$  comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf2025).

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.5 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 4.5 : Salida(yesth) de  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

## 4.2 ESTADO DE LA MAR 4 Y VELOCIDAD 30 NUDOS.

### MODELO (3,10,10,8,10,8,2)

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.1898 z^{-8} + 0.3671 z^{-9} - 0.5556 z^{-10} + 0.4761 z^{-11} - 0.2998 z^{-12} \\
 & + 0.15 z^{-13} - 0.1978 z^{-14} + 0.3815 z^{-15} - 0.3956 z^{-16} + 0.2641 z^{-17} \\
 G_p(z) = & \frac{-0.1898 z^{-8} + 0.3671 z^{-9} - 0.5556 z^{-10} + 0.4761 z^{-11} - 0.2998 z^{-12} + 0.15 z^{-13} - 0.1978 z^{-14} + 0.3815 z^{-15} - 0.3956 z^{-16} + 0.2641 z^{-17}}{1 - 1.678 z^{-1} + 1.315 z^{-2} - 0.316 z^{-3} - 0.5711 z^{-4} + 0.7097 z^{-5} - 0.2437 z^{-6} + 0.006576 z^{-7} - 0.07836 z^{-8} + 0.2877 z^{-9} - 0.1521 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.4 se muestran los polos y ceros de  $G_p(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_p(z)$  y  $G_H(z)$  :

Tabla 4.4 : Polos y ceros de la  $G_p(z)$  derivada del modelo .

Polos		Frecuencia Natural (rad/seg)		Factor de amortiguamiento $\delta$	
0		NaN		NaN	
0		NaN		NaN	
0		NaN		NaN	
0		NaN		NaN	
0		NaN		NaN	
0		NaN		NaN	
0		NaN		NaN	
0.090887 +	0.93288i	5.9004		0.043898	
0.090887 -	0.93288i	5.9004		0.043898	
0.86737 +	0.32802i	1.4774		0.20429	
0.86737 -	0.32802i	1.4774		0.20429	
0.49511 +	0.71946i	3.9099		0.13853	
0.49511 -	0.71946i	3.9099		0.13853	
-0.86049		0.60104		1	
-0.49964 +	0.48656i	9.5868		0.15036	
-0.49964 -	0.48656i	9.5868		0.15036	
0.63075		1.8434		1	

Ceros		Frecuencia Natural (rad/seg)		Factor de amortiguamiento $\delta$	
-0.77179 +	0.53755i	10.136		0.024191	
-0.77179 -	0.53755i	10.136		0.024191	
0.0062996 +	1.1205i	6.2772		-0.072514	
0.0062996 -	1.1205i	6.2772		-0.072514	
1		2.6645e-015		1	
0.78451 +	0.67269i	2.8383		-0.046339	
0.78451 -	0.67269i	2.8383		-0.046339	
0.44818 +	0.98602i	4.5878		-0.069602	
0.44818 -	0.98602i	4.5878		-0.069602	

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 &0.03686 z^{-2} - 0.07173 z^{-3} + 0.08763 z^{-4} - 0.006001 z^{-5} - 0.1019 z^{-6} \\
 &+ 0.1909 z^{-7} - 0.144 z^{-8} + 0.08745 z^{-9}
 \end{aligned}$$

$$G_H(z) = \frac{0.03686 z^{-2} - 0.07173 z^{-3} + 0.08763 z^{-4} - 0.006001 z^{-5} - 0.1019 z^{-6} + 0.1909 z^{-7} - 0.144 z^{-8} + 0.08745 z^{-9}}{1 - 1.103 z^{-1} - 0.4068 z^{-2} + 0.5522 z^{-3} - 0.05515 z^{-4} + 0.3079 z^{-5} - 0.1537 z^{-6} + 0.004222 z^{-7} - 0.1588 z^{-8} + 0.1021 z^{-9} - 0.00947 z^{-10}}$$

En la Tabla 4.5 se muestran los polos y ceros de  $G_H(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.5 : Polos y ceros de la  $G_H(z)$  derivada del modelo .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.95346	0.19063	1
-0.49964 + 0.48656i	9.5868	0.15036
-0.49964 - 0.48656i	9.5868	0.15036
-0.031117 + 0.71977i	6.5879	0.19909
-0.031117 - 0.71977i	6.5879	0.19909
0.82531 + 0.28928i	1.4512	0.36951
0.82531 - 0.28928i	1.4512	0.36951
0.72414	1.2911	1
0.63075	1.8434	1
0.11263	8.7347	1

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
-1.2639	0.93669	-1
1.0058 + 0.6276i	2.333	-0.29186
1.0058 - 0.6276i	2.333	-0.29186
0.42194 + 1.0368i	4.7586	-0.094765
0.42194 - 1.0368i	4.7586	-0.094765
0.17732 + 1.0172i	5.5943	-0.022867
0.17732 - 1.0172i	5.5943	-0.022867

En la Figura 4.6 se muestran el diagrama de Bode y el diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

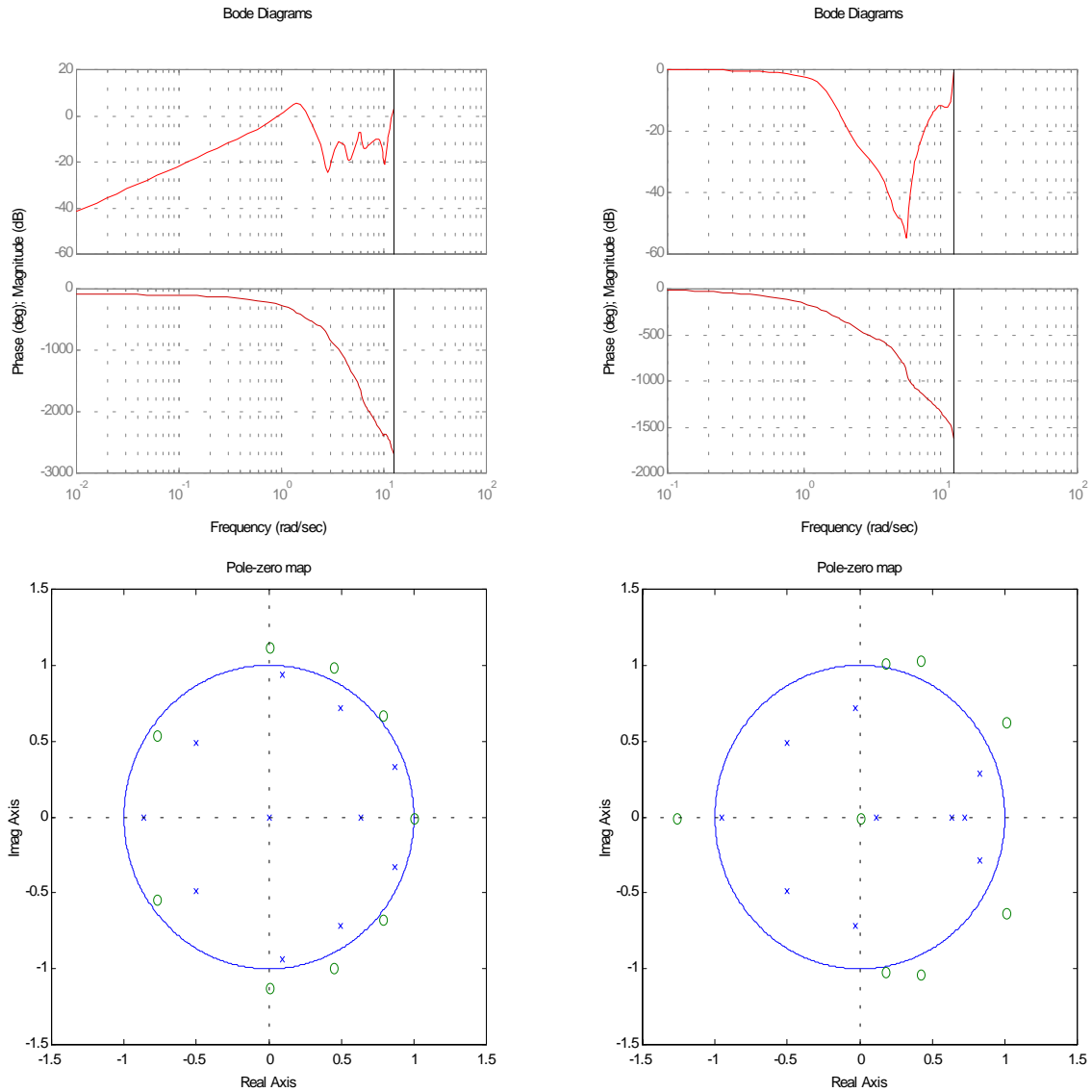
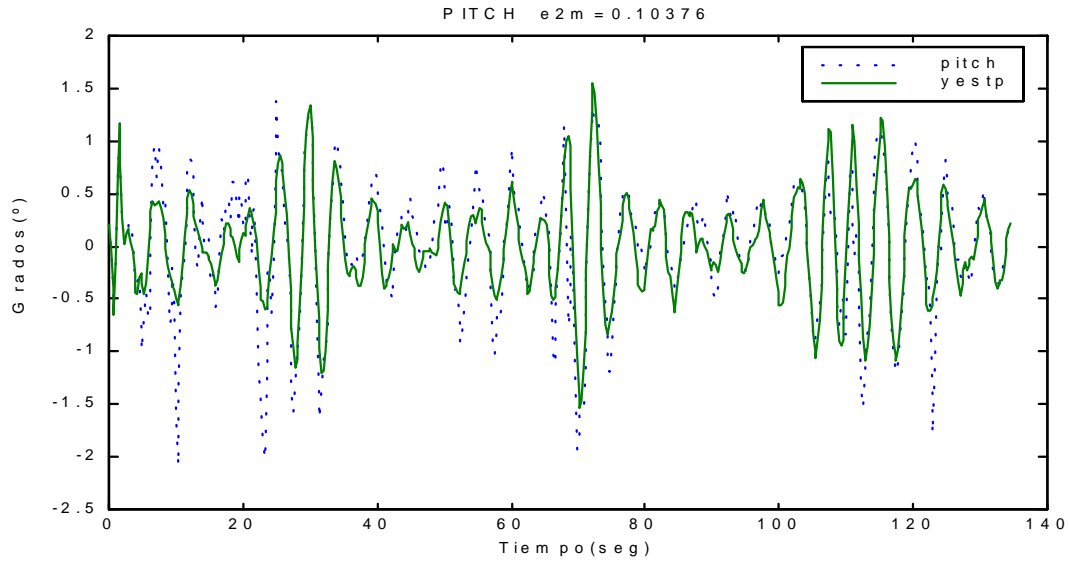


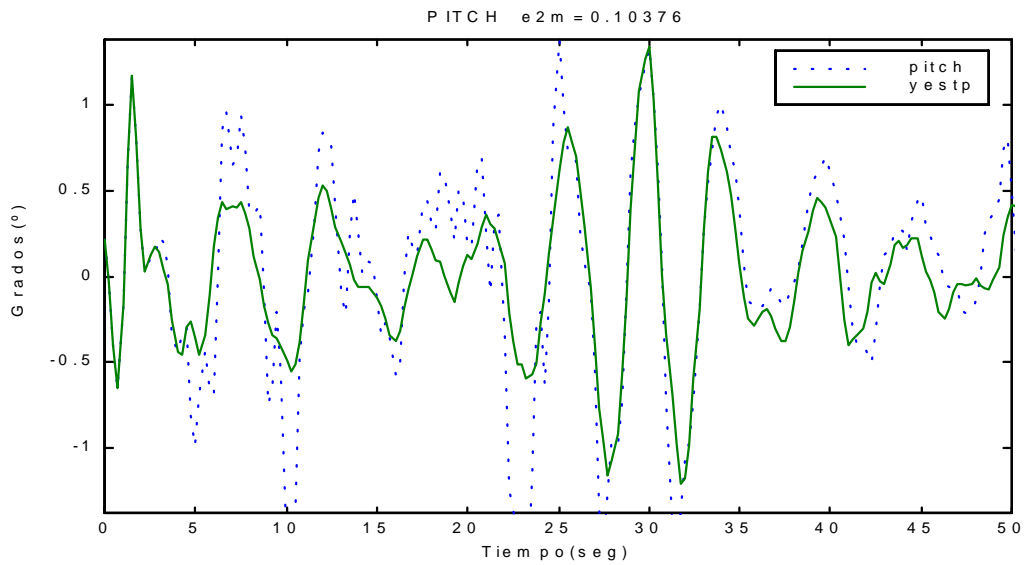
Figura 4.6 : (a) Diagrama de Bode del  $G_P(z)$  y de  $G_H(z)$  y (b) Diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

En la Figura 4.7 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.





(a)



(b)

Figura 4.7 : Salida( $y_{estp}$ ) de  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida( $pitch$ ) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular. (a) Rango completo (b) detalle

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.8 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf2025).

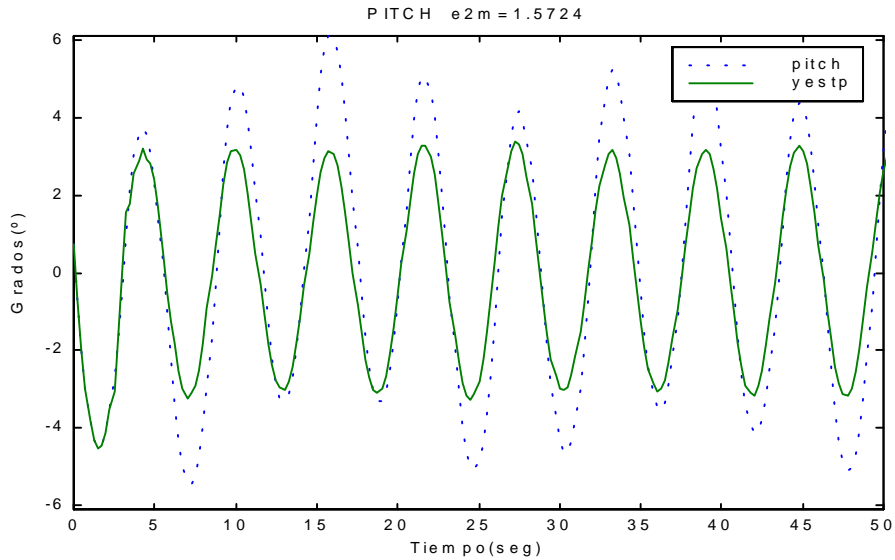


Figura 4.8 : Salida (yestp) de  $G_P(z)$  comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf2025).

En la Figura 4.9 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf2025).

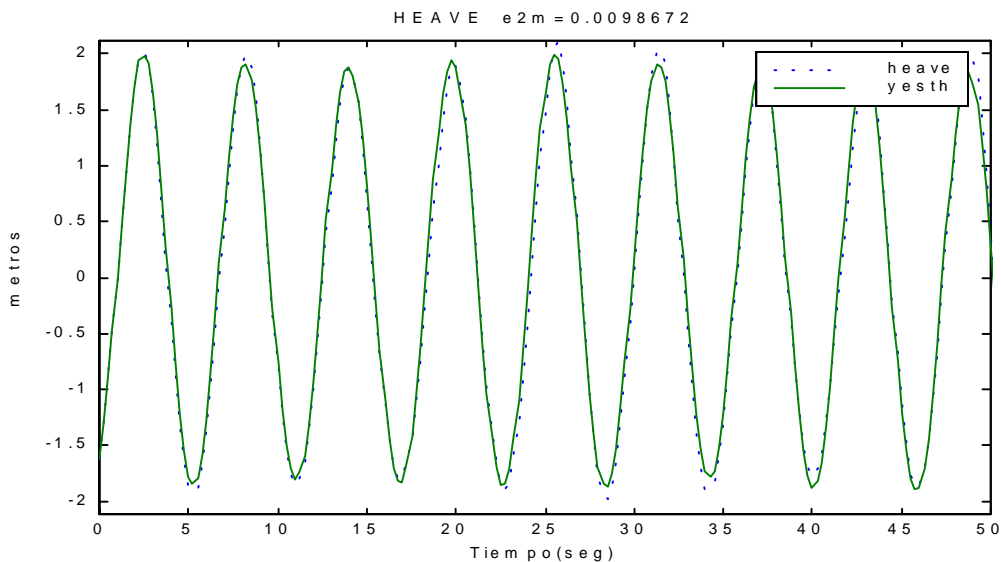
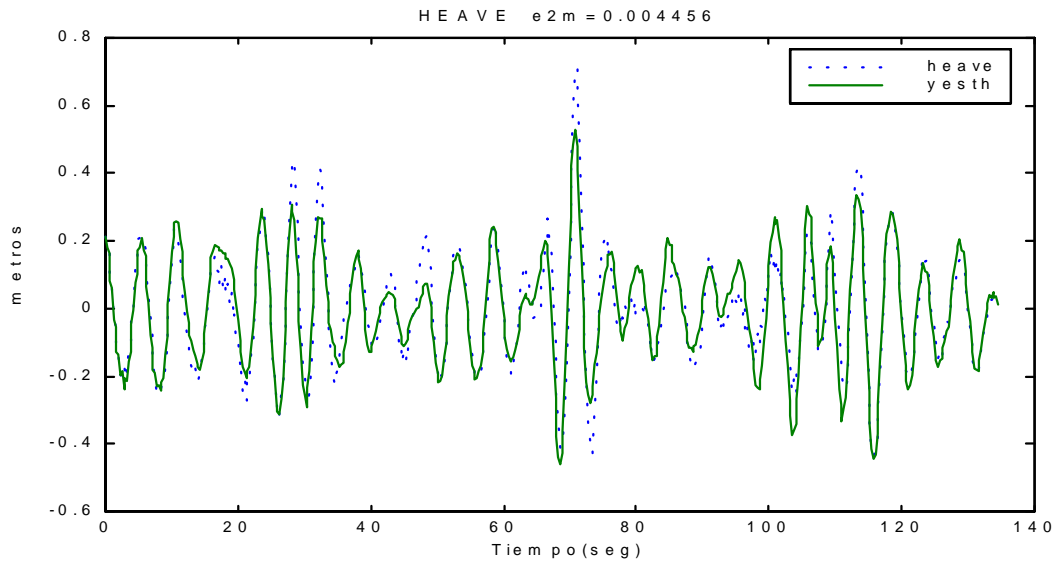


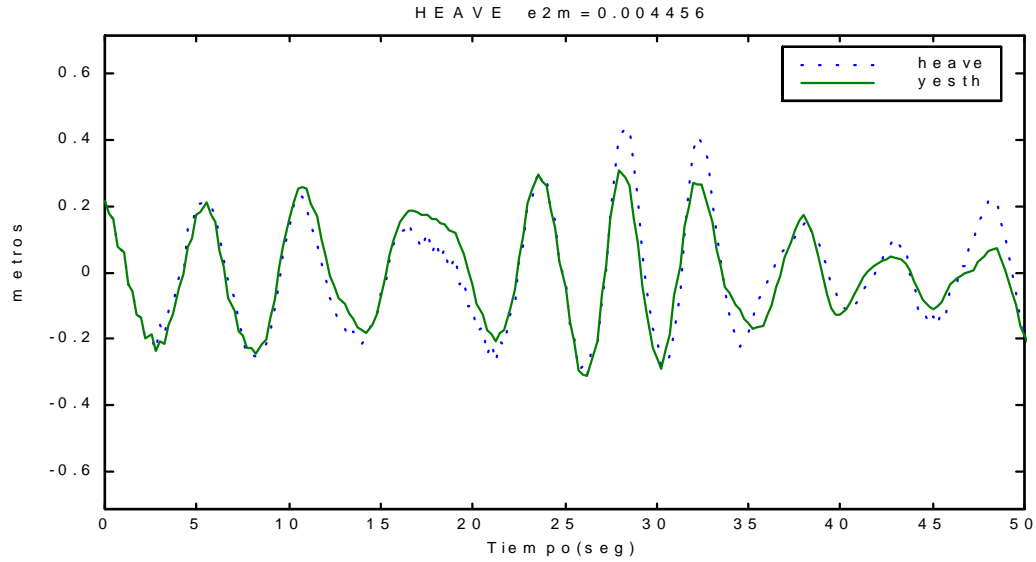
Figura 4.9 : Salida (yesth) de  $G_H(z)$  comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf2025).

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.10 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 4.10 : Salida(yesth) de  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

### 4.3 ESTADO DE LA MAR 4 Y VELOCIDAD 40 NUDOS.

#### MODELO (3,10,10,7,10,9,5)

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.1553 z^{-7} + 0.1379 z^{-8} - 0.1923 z^{-9} + 0.1107 z^{-10} + 0.03108 z^{-11} \\
 & - 0.1543 z^{-12} + 0.1616 z^{-13} + 0.02374 z^{-14} - 0.1006 z^{-15} + 0.1374 z^{-16} \\
 G_p(z) = & \frac{-0.1553 z^{-7} + 0.1379 z^{-8} - 0.1923 z^{-9} + 0.1107 z^{-10} + 0.03108 z^{-11} - 0.1543 z^{-12} + 0.1616 z^{-13} + 0.02374 z^{-14} - 0.1006 z^{-15} + 0.1374 z^{-16}}{1 - 1.63 z^{-1} + 1.633 z^{-2} - 0.9735 z^{-3} - 0.1925 z^{-4} + 1.198 z^{-5} - 1.431 z^{-6} + 1.168 z^{-7} - 0.5344 z^{-8} + 0.1708 z^{-9} + 0.01089 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.6 se muestran los polos y ceros de  $G_p(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_p(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.6 : Polos y ceros de la  $G_p(z)$  derivada del modelo .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-0.97682	0.093799	1
-0.14782 + 0.88801i	6.9557	0.060444
-0.14782 - 0.88801i	6.9557	0.060444
0.86638 + 0.32084i	1.4536	0.21787
0.86638 - 0.32084i	1.4536	0.21787
0.18122 + 0.75232i	5.4353	0.18869
0.18122 - 0.75232i	5.4353	0.18869
0.43026 + 0.56278i	3.9226	0.35153
0.43026 - 0.56278i	3.9226	0.35153
-0.053638	11.702	1

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.22294 + 1.1706i	7.0708	-0.099207
-0.22294 - 1.1706i	7.0708	-0.099207
0.30278 + 0.89713i	4.986	0.043818
0.30278 - 0.89713i	4.986	0.043818
0.69771 + 0.64695i	2.9973	0.066361
0.69771 - 0.64695i	2.9973	0.066361
-0.83348 + 0.27054i	11.323	0.046651
-0.83348 - 0.27054i	11.323	0.046651
1	8.8818e-016	1

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & 0.01753 z^{-5} + 0.01211 z^{-6} + 0.02464 z^{-7} + 0.02011 z^{-8} + 0.02754 z^{-9} \\
 & - 0.006859 z^{-10} + 0.0461 z^{-11} - 0.03631 z^{-12} + 0.05398 z^{-13} \\
 G_H(z) = & \frac{\text{-----}}{1 - 0.9373 z^{-1} - 0.2989 z^{-2} + 0.355 z^{-3} - 0.08157 z^{-4} + 0.2382 z^{-5} \\
 & - 0.1411 z^{-6} + 0.3008 z^{-7} - 0.2494 z^{-8} - 0.02622 z^{-9} - 0.0006412 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.7 se muestran los polos y ceros de  $G_H(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.7 : Polos y ceros de la  $G_H(z)$  derivada del modelo .*

Polos		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0.8662 + 0.38377i		1.6822	0.12846
0.8662 - 0.38377i		1.6822	0.12846
0.86057		0.60065	1
-0.9629		0.15123	1
-0.47941 + 0.63067i		8.9318	0.10432
-0.47941 - 0.63067i		8.9318	0.10432
0.18122 + 0.75232i		5.4353	0.18869
0.18122 - 0.75232i		5.4353	0.18869
-0.053638		11.702	1
-0.042771		12.608	1

Ceros		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-1.1921 + 0.70638i		10.508	-0.12417
-1.1921 - 0.70638i		10.508	-0.12417
-0.26139 + 1.1492i		7.2078	-0.091188
-0.26139 - 1.1492i		7.2078	-0.091188
0.36391 + 1.1089i		5.0528	-0.12235
0.36391 - 1.1089i		5.0528	-0.12235
0.74432 + 0.54179i		2.5385	0.13032
0.74432 - 0.54179i		2.5385	0.13032

En la Figura 4.11 se muestran el diagrama de Bode y el diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

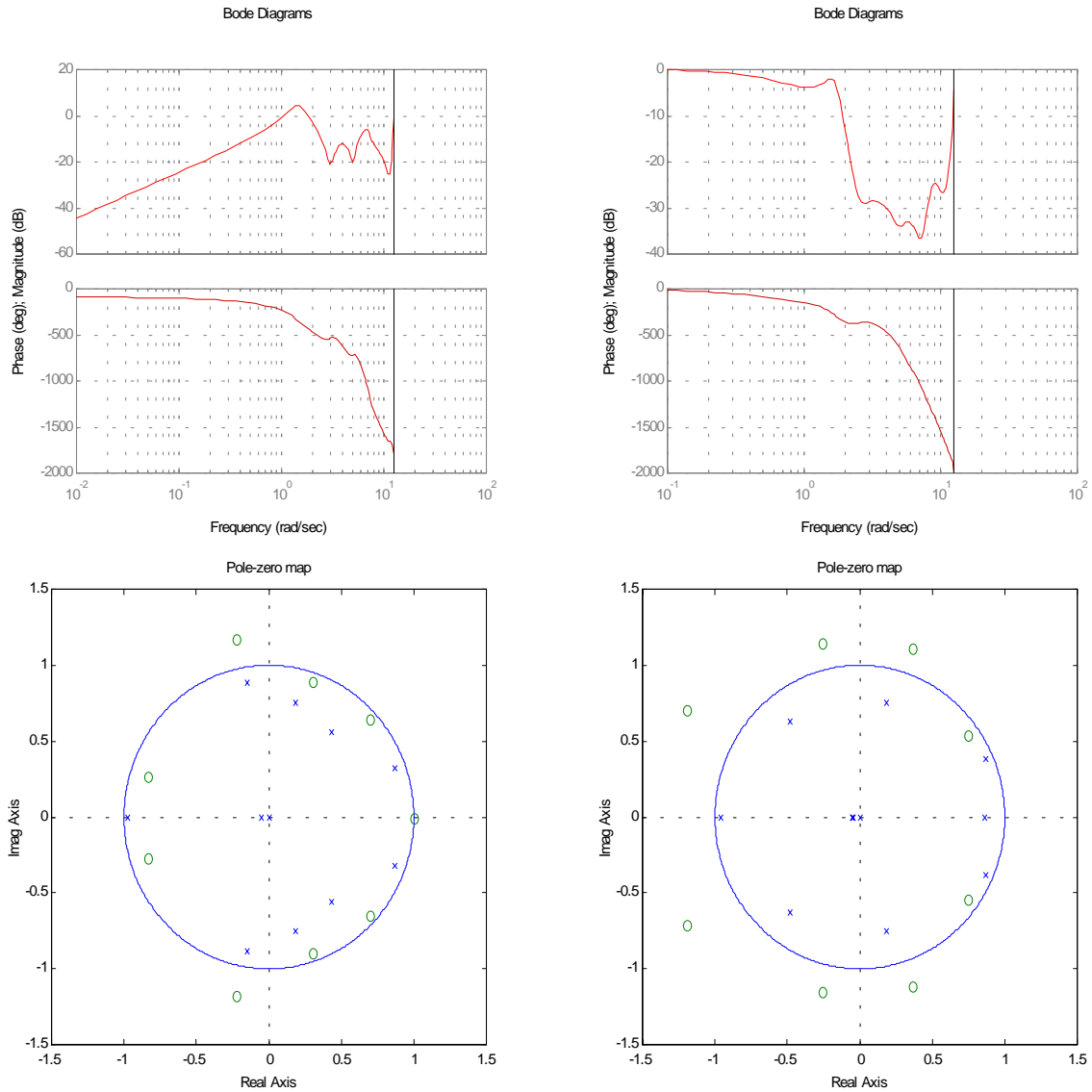
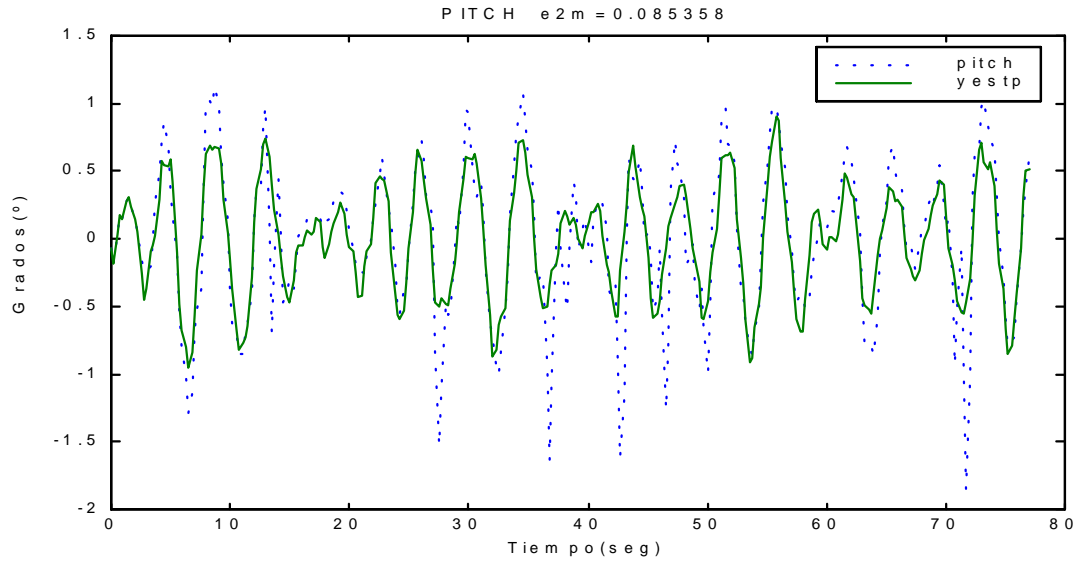
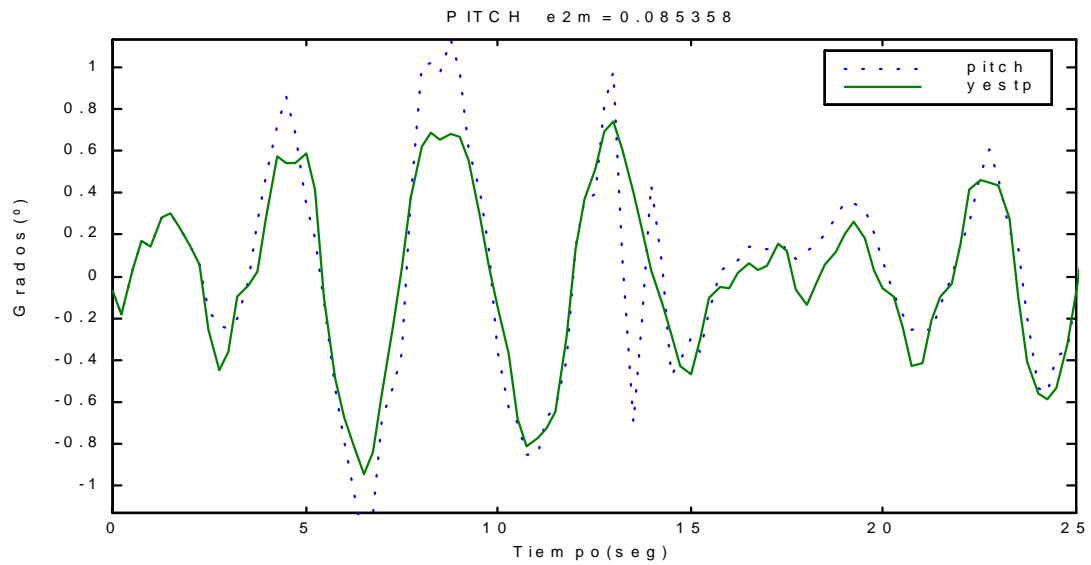


Figura 4.11 : (a)Diagrama de Bode del  $G_P(z)$  y de  $G_H(z)$  y (b)Diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

En la Figura 4.12 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 4.12 : Salida(yestp) de  $G_p(z)$  del modelo comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.13 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf2025).

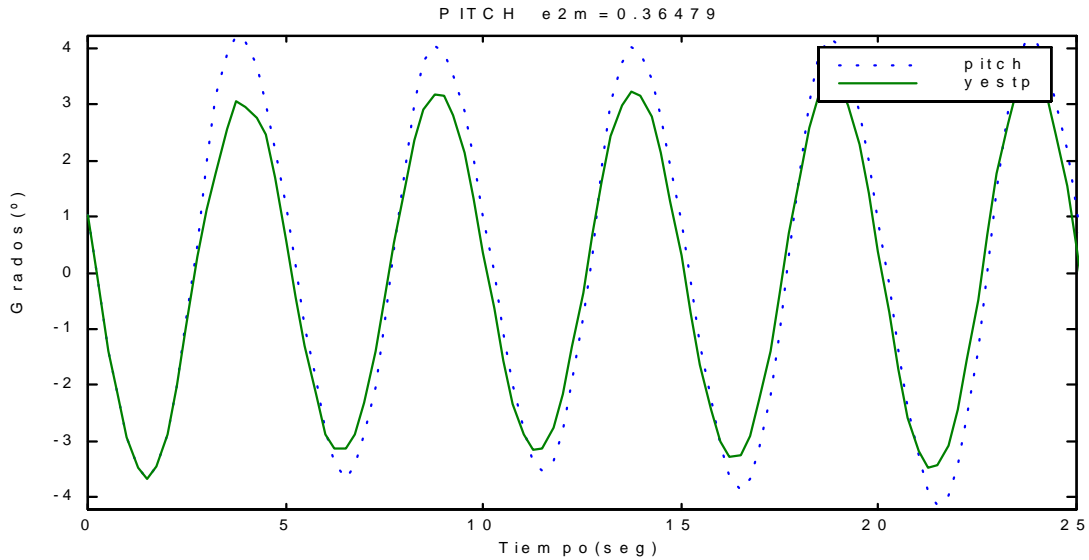


Figura 4.13 : Salida (yestp) de  $G_P(z)$  comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf2025).

En la Figura 4.14 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf2025).

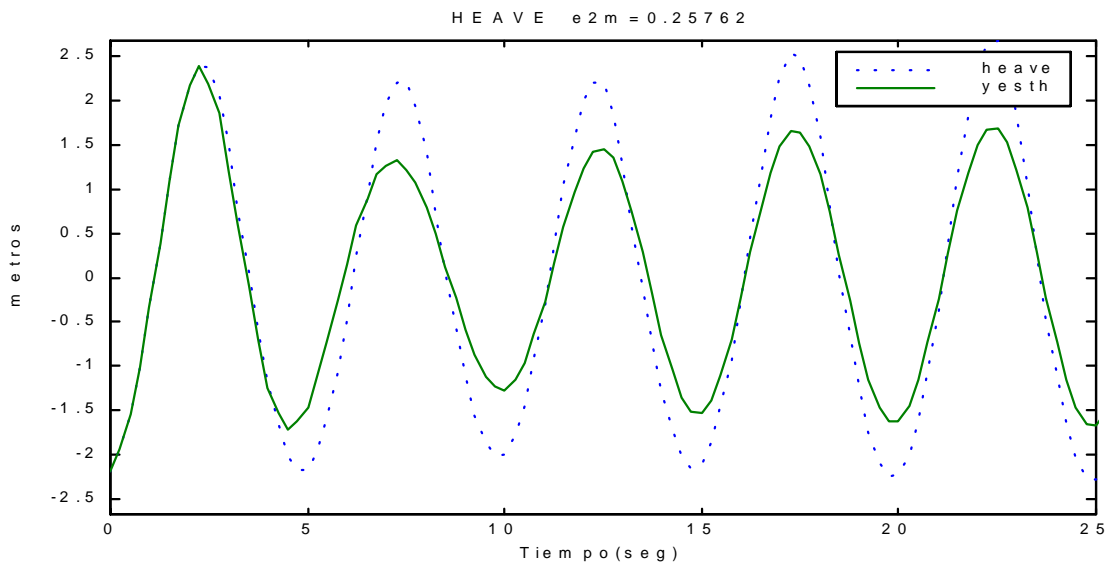
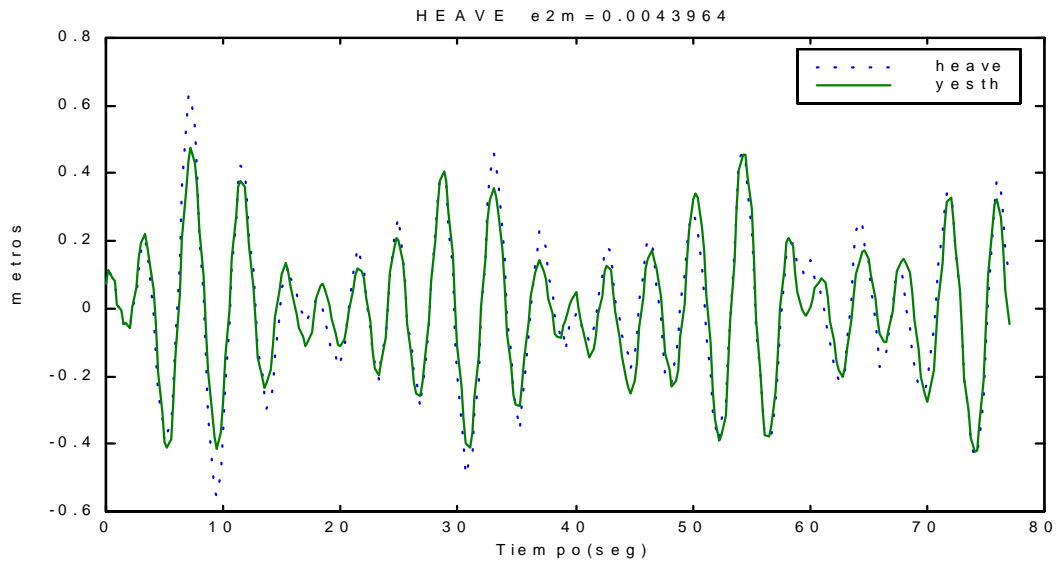


Figura 4.14 : Salida (yesth) de  $G_H(z)$  comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf2025).

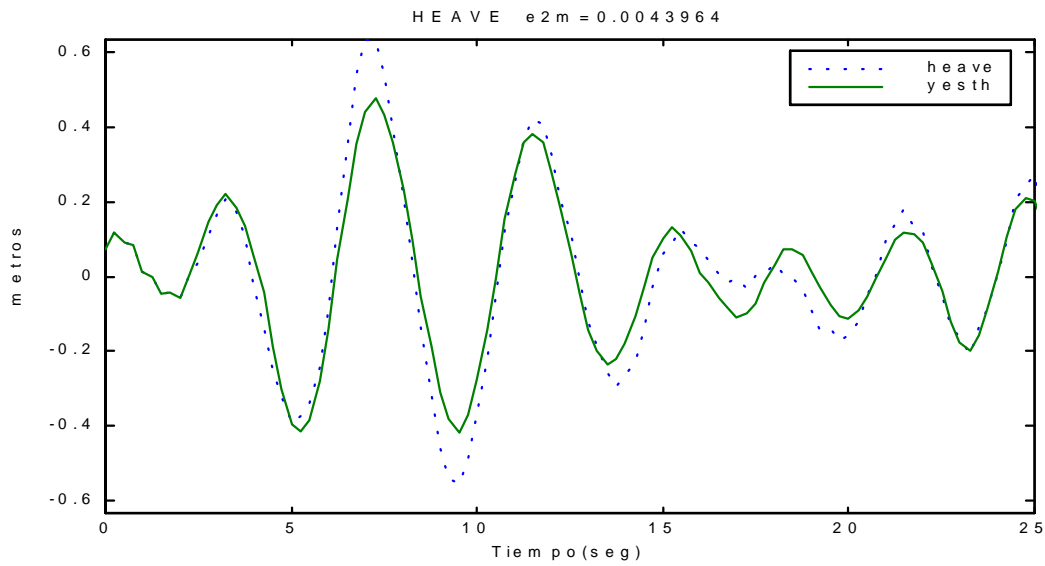


**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 4.15 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 4.15 : Salida(yesth) de  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

### 4.4 ESTADO DE LA MAR 5 Y VELOCIDAD 20 NUDOS.

#### MODELO (3,10,10,6,10,10,3)

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.07884 z^{-6} + 0.1484 z^{-7} - 0.1151 z^{-8} + 0.02315 z^{-9} - 0.01584 z^{-10} \\
 & + 0.02456 z^{-11} - 0.04432 z^{-12} + 0.08552 z^{-13} - 0.1123 z^{-14} \\
 & + 0.08476 z^{-15} \\
 G_p(z) = & \frac{-0.07884 z^{-6} + 0.1484 z^{-7} - 0.1151 z^{-8} + 0.02315 z^{-9} - 0.01584 z^{-10} + 0.02456 z^{-11} - 0.04432 z^{-12} + 0.08552 z^{-13} - 0.1123 z^{-14} + 0.08476 z^{-15}}{1 - 1.891 z^{-1} + 0.6519 z^{-2} + 0.7662 z^{-3} - 0.4255 z^{-4} + 0.002006 z^{-5} - 0.512 z^{-6} + 0.673 z^{-7} - 0.1271 z^{-8} - 0.07803 z^{-9} - 0.00598 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.8 se muestran los polos y ceros de  $G_p(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_p(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.8 : Polos y ceros de la  $G_p(z)$  derivada del modelo .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-0.9145	0.35753	1
-0.38642 + 0.69028i	8.3771	0.1119
-0.38642 - 0.69028i	8.3771	0.1119
0.59861 + 0.65748i	3.3619	0.13977
0.59861 - 0.65748i	3.3619	0.13977
0.91751 + 0.27758i	1.1873	0.14252
0.91751 - 0.27758i	1.1873	0.14252
0.81762	0.80545	1
-0.16571	7.19	1
-0.10615	8.9714	1

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.85879 + 0.4704i	10.562	0.0079684
-0.85879 - 0.4704i	10.562	0.0079684
-0.18785 + 0.91731i	7.096	0.037072
-0.18785 - 0.91731i	7.096	0.037072
0.53253 + 0.82474i	3.9905	0.018491
0.53253 - 0.82474i	3.9905	0.018491
0.95553 + 0.64341i	2.4371	-0.23219
0.95553 - 0.64341i	2.4371	-0.23219
1	4.4409e-016	1

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & 0.01591 z^{-3} - 0.002934 z^{-4} - 0.01744 z^{-5} + 0.02646 z^{-6} + 0.00309 z^{-7} \\
 & - 0.004667 z^{-8} + 0.01967 z^{-9} - 0.001411 z^{-10} - 0.009409 z^{-11} \\
 & \qquad \qquad \qquad + 0.03076 z^{-12} \\
 G_H(z) = & \frac{\text{-----}}{1 - 1.186 z^{-1} - 0.2801 z^{-2} + 0.525 z^{-3} + 0.0007672 z^{-4} + 0.119 z^{-5} \\
 & - 0.1985 z^{-6} + 0.21 z^{-7} - 0.1564 z^{-8} + 0.02238 z^{-9} + 0.004417 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.9 se muestran los polos y ceros de  $G_H(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.9 : Polos y ceros de la  $G_H(z)$  derivada del modelo .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-0.9145	0.35753	1
-0.46317 + 0.58468i	9.0394	0.12972
-0.46317 - 0.58468i	9.0394	0.12972
0.15375 + 0.59955i	5.617	0.34163
0.15375 - 0.59955i	5.617	0.34163
0.82991 + 0.24577i	1.2884	0.44834
0.82991 - 0.24577i	1.2884	0.44834
0.81762	0.80545	1
0.3485	4.2164	1
-0.10615	8.9714	1

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-1.343	1.1796	-1
-0.91347 + 0.47298i	10.656	-0.010606
-0.91347 - 0.47298i	10.656	-0.010606
0.99058 + 0.53938i	2.0517	-0.23466
0.99058 - 0.53938i	2.0517	-0.23466
0.70175 + 0.79305i	3.3933	-0.067522
0.70175 - 0.79305i	3.3933	-0.067522
-0.015182 + 0.97646i	6.3461	0.014941
-0.015182 - 0.97646i	6.3461	0.014941

En la Figura 4.16 se muestran el diagrama de Bode y el diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

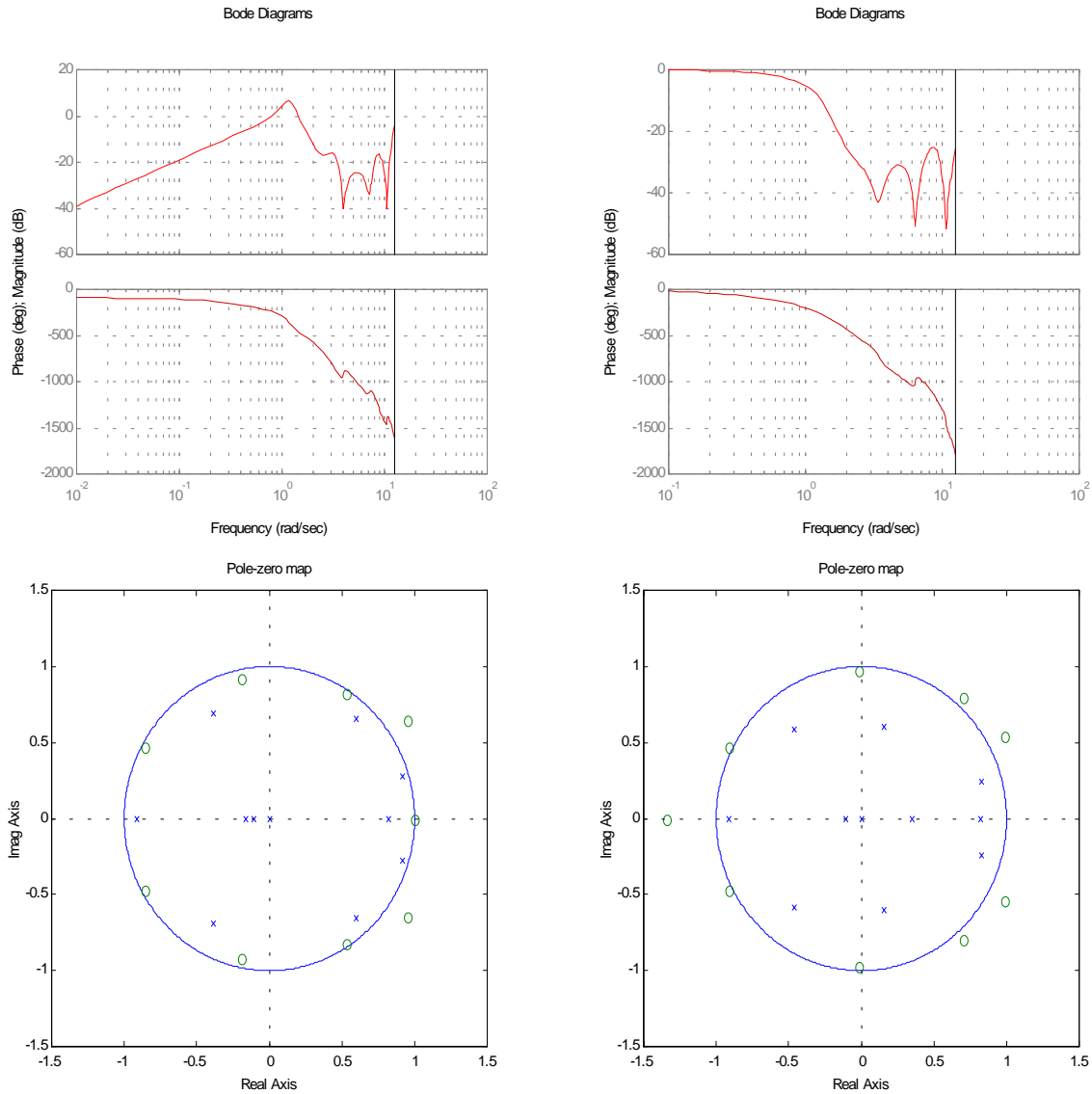
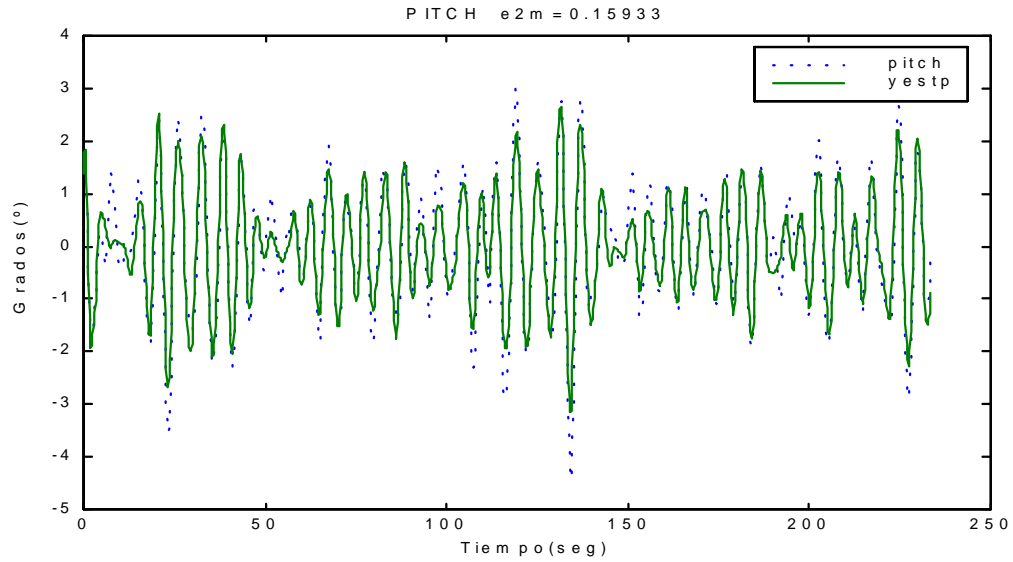
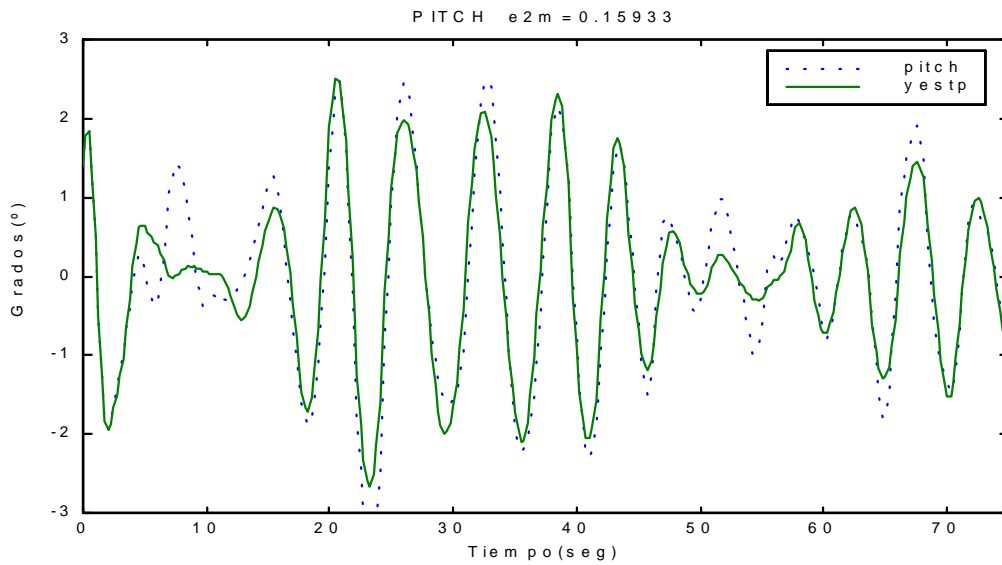


Figura 4.16 : (a)Diagrama de Bode del  $G_P(z)$  y de  $G_H(z)$  y (b)Diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

En la Figura 4.17 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 4.17 : Salida(yestp) de  $G_p(z)$  del modelo comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.18 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf2025).

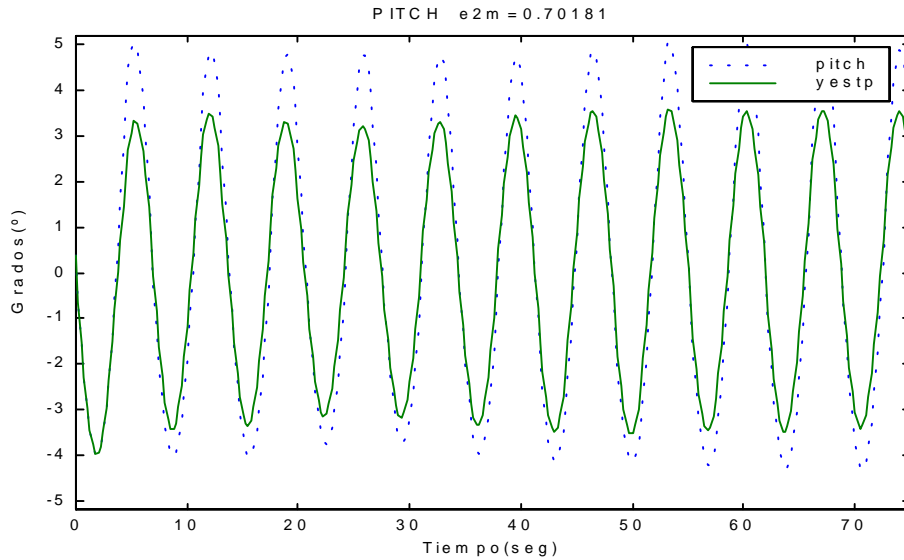


Figura 4.18 : Salida (yestp) de  $G_P(z)$  comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf2025).

En la Figura 4.19 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf2025).

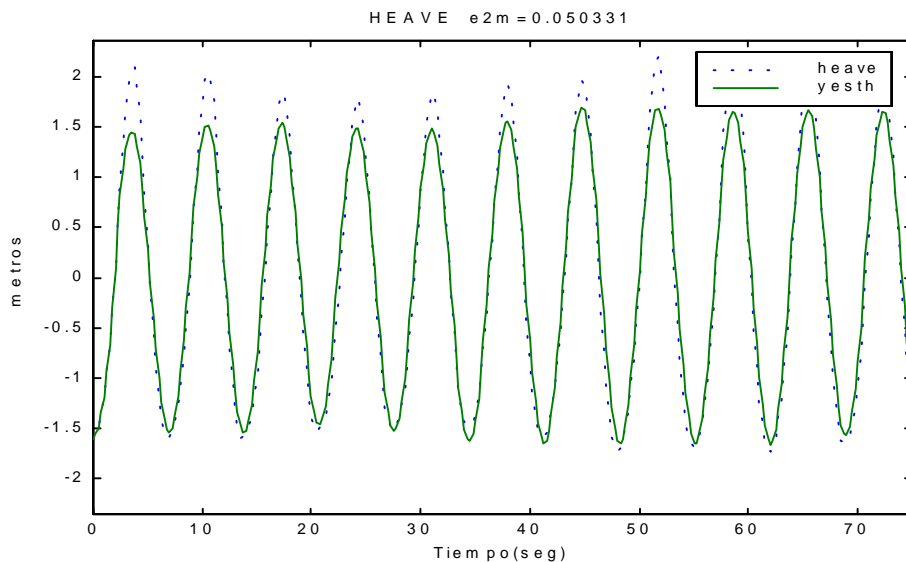
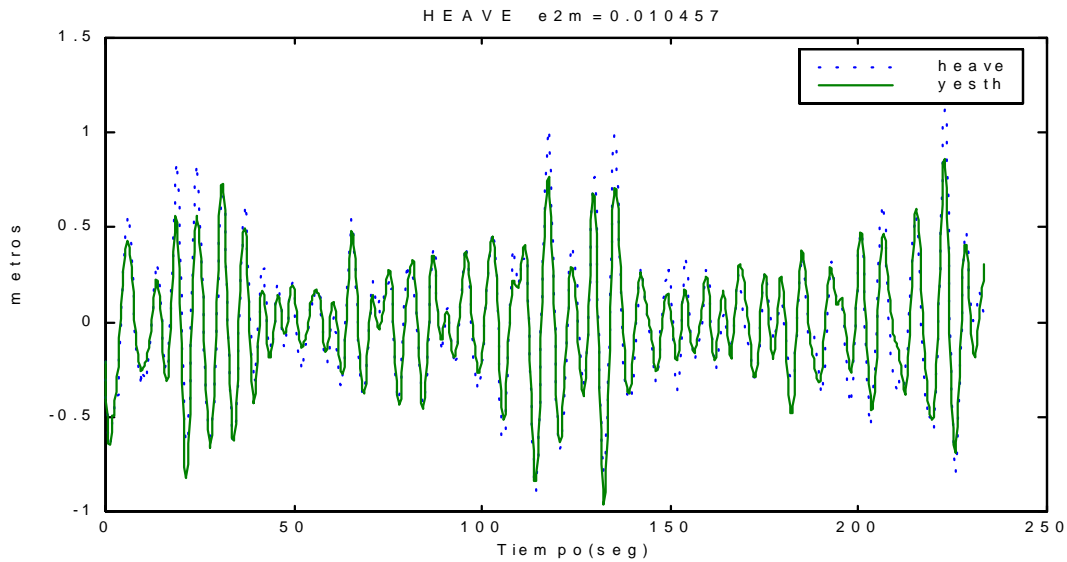


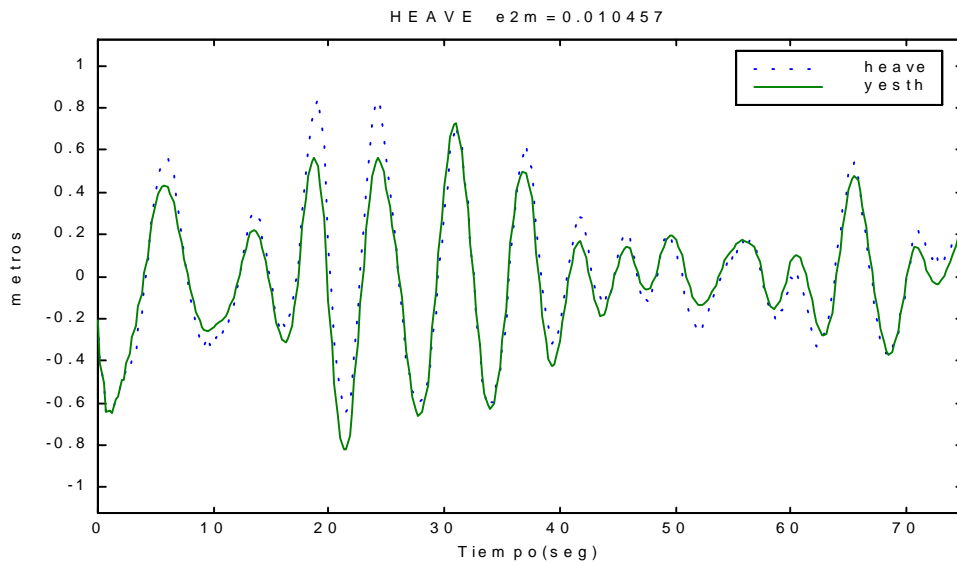
Figura 4.19 : Salida (yesth) de  $G_H(z)$  comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf2025).

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.20 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 4.20 : Salida(yesth) de  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

## 4.5 ESTADO DE LA MAR 5 Y VELOCIDAD 30 NUDOS.

### MODELO (3,10,10,7,10,7,5)

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.1801 z^{-7} + 0.2577 z^{-8} - 0.2155 z^{-9} + 0.1046 z^{-10} - 0.05742 z^{-11} \\
 & + 0.008134 z^{-12} - 0.02586 z^{-13} + 0.1202 z^{-14} - 0.1551 z^{-15} \\
 & + 0.1435 z^{-16} \\
 G_p(z) = & \frac{-0.1801 z^{-7} + 0.2577 z^{-8} - 0.2155 z^{-9} + 0.1046 z^{-10} - 0.05742 z^{-11} + 0.008134 z^{-12} - 0.02586 z^{-13} + 0.1202 z^{-14} - 0.1551 z^{-15} + 0.1435 z^{-16}}{1 - 1.66 z^{-1} + 0.788 z^{-2} + 0.4187 z^{-3} - 0.6666 z^{-4} + 0.2202 z^{-5} - 0.1421 z^{-6} + 0.6231 z^{-7} - 0.6237 z^{-8} + 0.2793 z^{-9} - 0.04944 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.10 se muestran los polos y ceros de  $G_p(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_p(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.10 : Polos y ceros de la  $G_p(z)$  derivada del modelo .*

Polos		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
-0.97473		0.10237	1
-0.51683 +	0.63824i	9.0402	0.08713
-0.51683 -	0.63824i	9.0402	0.08713
0.38327 +	0.8122i	4.54	0.094703
0.38327 -	0.8122i	4.54	0.094703
0.87435 +	0.30753i	1.3865	0.21911
0.87435 -	0.30753i	1.3865	0.21911
0.36729 +	0.35233i	4.0807	0.66203
0.36729 -	0.35233i	4.0807	0.66203
0.41901		3.4795	1

Ceros		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.81177 +	0.43516i	10.603	0.031023
-0.81177 -	0.43516i	10.603	0.031023
-0.21034 +	0.95921i	7.147	0.010168
-0.21034 -	0.95921i	7.147	0.010168
1		7.9936e-015	-1
0.83397 +	0.63098i	2.597	-0.06894
0.83397 -	0.63098i	2.597	-0.06894
0.40331 +	0.85288i	4.5223	0.051507
0.40331 -	0.85288i	4.5223	0.051507



La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 &0.0433 z^{-5} - 0.05563 z^{-6} + 0.05933 z^{-7} - 0.03373 z^{-8} + 0.0669 z^{-9} \\
 &\quad - 0.05648 z^{-10} + 0.04613 z^{-11} \\
 G_H(z) = &\frac{\quad}{1 - 1.463 z^{-1} + 0.09043 z^{-2} + 0.7048 z^{-3} - 0.1662 z^{-4} - 0.01006 z^{-5} \\
 &\quad - 0.3332 z^{-6} + 0.3936 z^{-7} - 0.2369 z^{-8} + 0.2465 z^{-9} - 0.1563 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.11 se muestran los polos y ceros de  $G_H(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.11 : Polos y ceros de la  $G_H(z)$  derivada del modelo .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
-0.97473	0.10237	1
-0.56138 + 0.57919i	9.4017	0.091438
-0.56138 - 0.57919i	9.4017	0.091438
-0.09109 + 0.66928i	7.0024	0.22414
-0.09109 - 0.66928i	7.0024	0.22414
0.55552 + 0.63541i	3.4763	0.19514
0.55552 - 0.63541i	3.4763	0.19514
0.87435 + 0.30753i	1.3865	0.21911
0.87435 - 0.30753i	1.3865	0.21911
0.88274	0.49889	1

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.62248 + 0.8067i	8.9123	-0.0084235
-0.62248 - 0.8067i	8.9123	-0.0084235
0.83114 + 0.66775i	2.7194	-0.094228
0.83114 - 0.66775i	2.7194	-0.094228
0.43372 + 0.84533i	4.3918	0.046622
0.43372 - 0.84533i	4.3918	0.046622

En la Figura 4.21 se muestran el diagrama de Bode y el diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

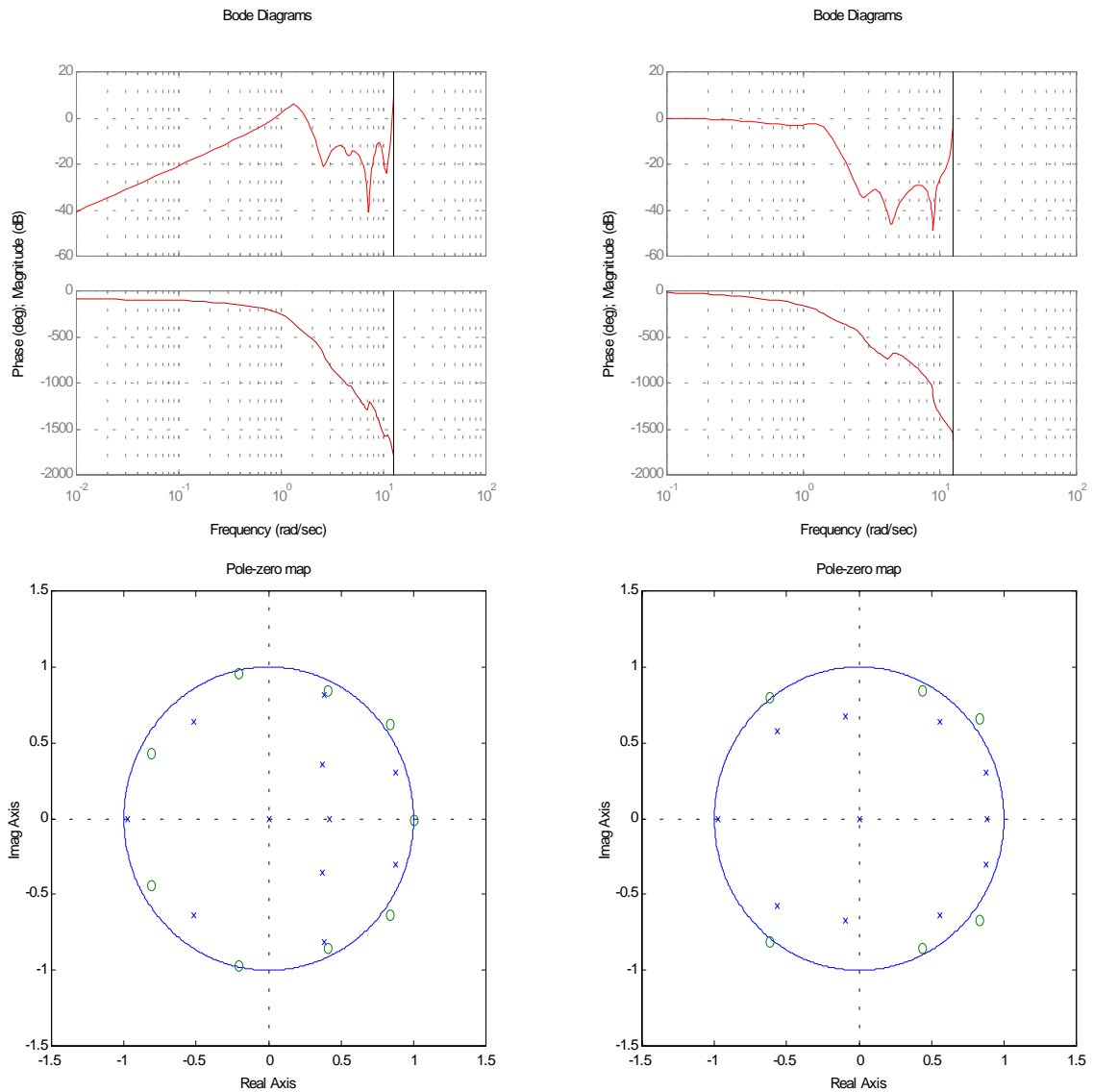
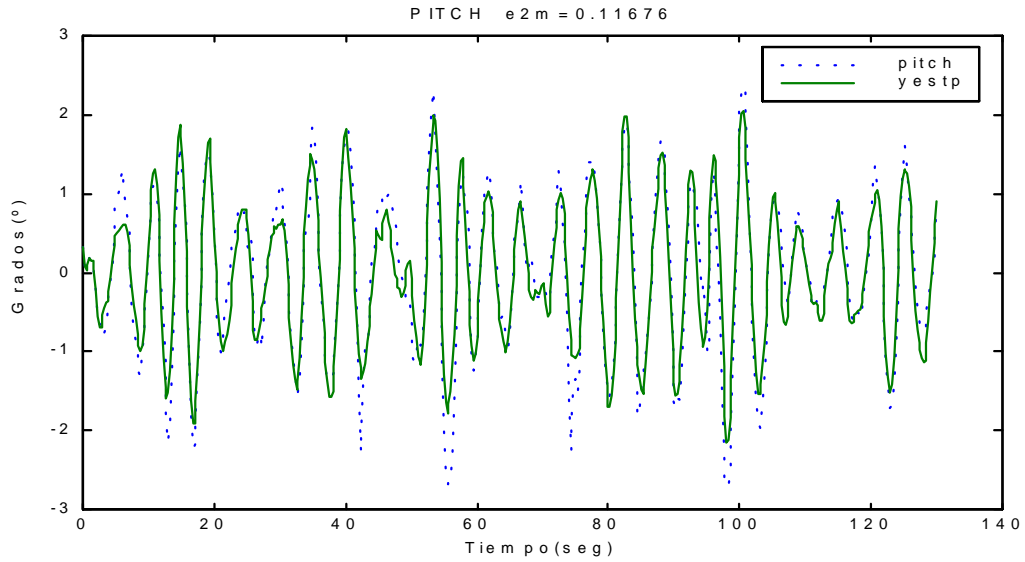
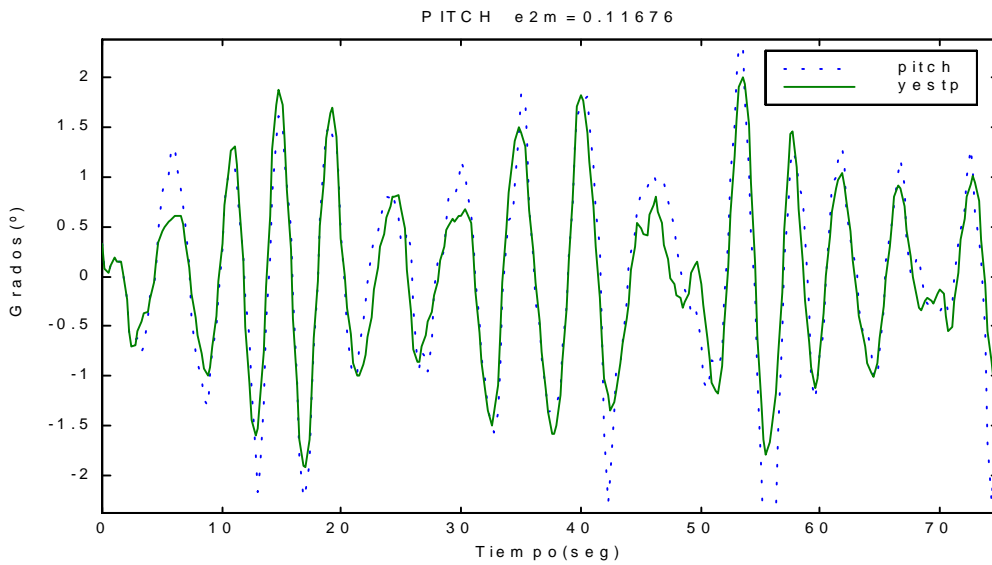


Figura 4.21 : (a)Diagrama de Bode del  $G_P(z)$  y de  $G_H(z)$  y (b)Diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

En la Figura 4.22 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 4.22 : Salida(yestp) de  $G_p(z)$  del modelo comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.23 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf3025).

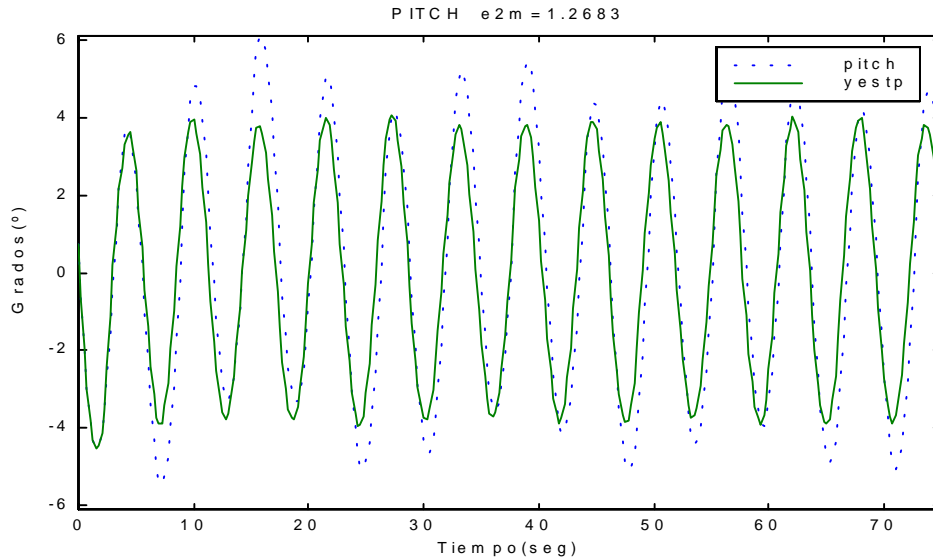


Figura 4.23 : Salida (yestp) de  $G_P(z)$  comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf3025).

En la Figura 4.24 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf2025).

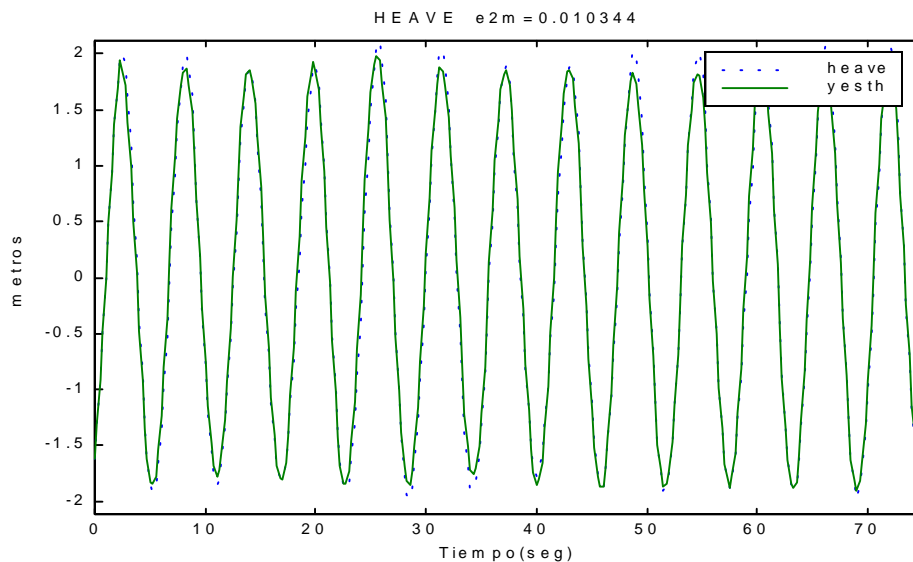
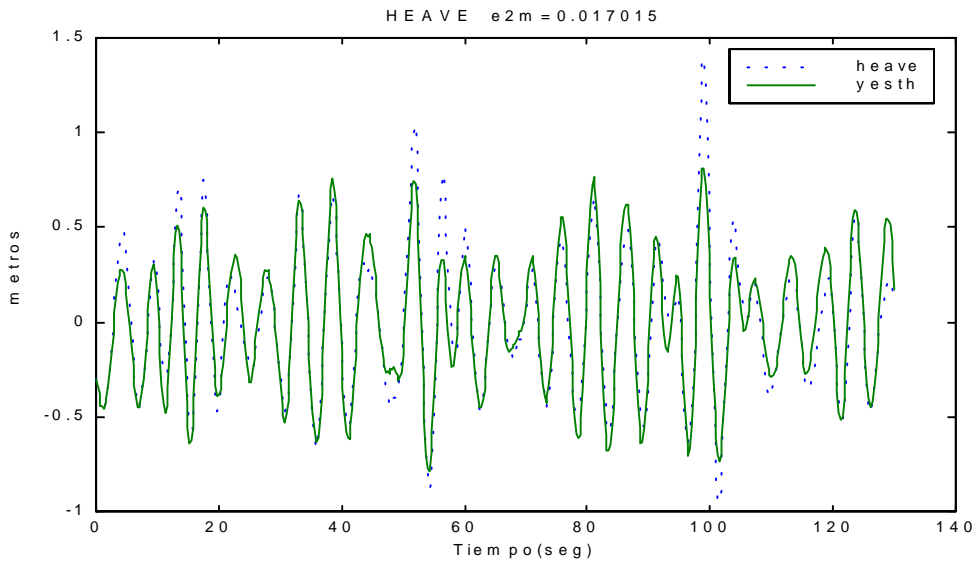


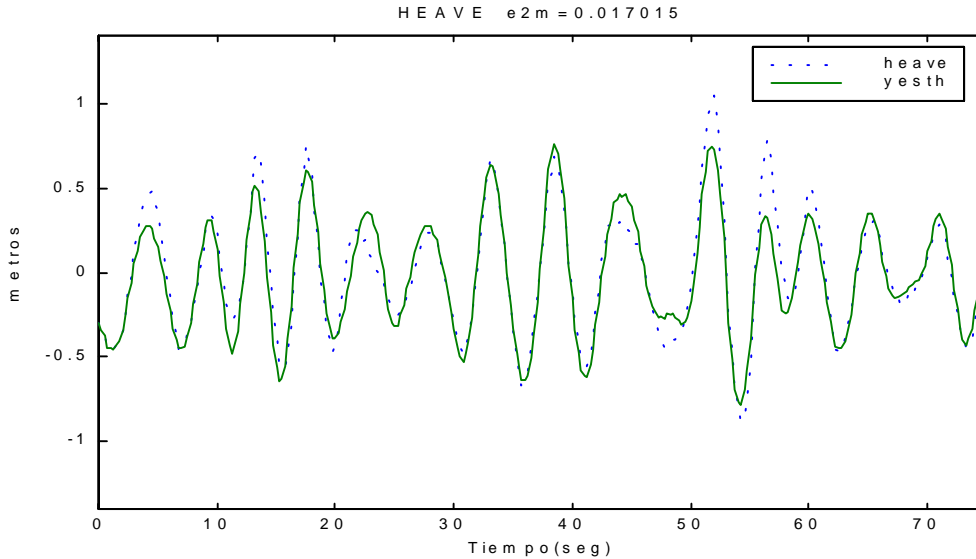
Figura 4.24 : Salida (yesth) de  $G_H(z)$  comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf3025).

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.25 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 4.25 : Salida(yesth) de  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

## 4.6 ESTADO DE LA MAR 5 Y VELOCIDAD 40 NUDOS.

### MODELO (3,10,10,6,10,7,3)

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.1226 z^{-6} + 0.06062 z^{-7} - 0.0681 z^{-8} + 0.003509 z^{-9} + 0.004414 z^{-10} \\
 & - 0.01931 z^{-11} + 0.001673 z^{-12} + 0.1173 z^{-13} - 0.1185 z^{-14} \\
 & \qquad \qquad \qquad + 0.141 z^{-15} \\
 G_p(z) = & \frac{-0.1226 z^{-6} + 0.06062 z^{-7} - 0.0681 z^{-8} + 0.003509 z^{-9} + 0.004414 z^{-10} - 0.01931 z^{-11} + 0.001673 z^{-12} + 0.1173 z^{-13} - 0.1185 z^{-14} + 0.141 z^{-15}}{1 - 1.396 z^{-1} + 1.074 z^{-2} - 0.5308 z^{-3} - 0.3018 z^{-4} + 0.7921 z^{-5} - 0.5985 z^{-6} + 0.3536 z^{-7} + 0.06389 z^{-8} - 0.1632 z^{-9} + 0.08495 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.12 se muestran los polos y ceros de  $G_p(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_p(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.12 : Polos y ceros de la  $G_p(z)$  derivada del modelo .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-0.16543 + 0.86797i	7.0539	0.07018
-0.16543 - 0.86797i	7.0539	0.07018
-0.74656	1.1691	1
-0.65443	1.696	1
0.21971 + 0.8094i	5.2701	0.13352
0.21971 - 0.8094i	5.2701	0.13352
0.87533 + 0.31443i	1.4096	0.20566
0.87533 - 0.31443i	1.4096	0.20566
0.46914 + 0.38198i	3.393	0.59247
0.46914 - 0.38198i	3.393	0.59247

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.96171 + 0.4308i	10.884	-0.019257
-0.96171 - 0.4308i	10.884	-0.019257
-0.30368 + 1.0266i	7.4386	-0.03669
-0.30368 - 1.0266i	7.4386	-0.03669
1	0	NaN
0.70992 + 0.69257i	3.0923	0.01067
0.70992 - 0.69257i	3.0923	0.01067
0.30272 + 0.90925i	5.0005	0.034055
0.30272 - 0.90925i	5.0005	0.034055

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$G_H(z) = \frac{0.01322 z^{-3} - 0.01181 z^{-4} + 0.02618 z^{-5} - 0.000585 z^{-6} + 0.02589 z^{-7} - 0.0111 z^{-8} + 0.03498 z^{-9}}{1 - 1.37 z^{-1} - 0.1663 z^{-2} + z^{-3} - 0.3714 z^{-4} + 0.07485 z^{-5} - 0.3249 z^{-6} + 0.2746 z^{-7} + 0.1342 z^{-8} - 0.1836 z^{-9} + 0.009514 z^{-10}}$$

En la Tabla 4.13 se muestran los polos y ceros de  $G_H(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$  :

Tabla 4.13 : Polos y ceros de la  $G_H(z)$  derivada del modelo .

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.91696	0.34675	1
-0.33967 + 0.68799i	8.1865	0.12944
-0.33967 - 0.68799i	8.1865	0.12944
-0.65443	1.696	1
0.4774 + 0.66266i	3.8716	0.20917
0.4774 - 0.66266i	3.8716	0.20917
0.87533 + 0.31443i	1.4096	0.20566
0.87533 - 0.31443i	1.4096	0.20566
0.86151	0.59628	1
0.054176	11.662	1

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
-0.73479 + 0.78797i	9.2899	-0.032103
-0.73479 - 0.78797i	9.2899	-0.032103
0.76786 + 0.93083i	3.6034	-0.20854
0.76786 - 0.93083i	3.6034	-0.20854
0.41361 + 1.1807i	5.0161	-0.17864
0.41361 - 1.1807i	5.0161	-0.17864

En la Figura 4.26 se muestran el diagrama de Bode y el diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

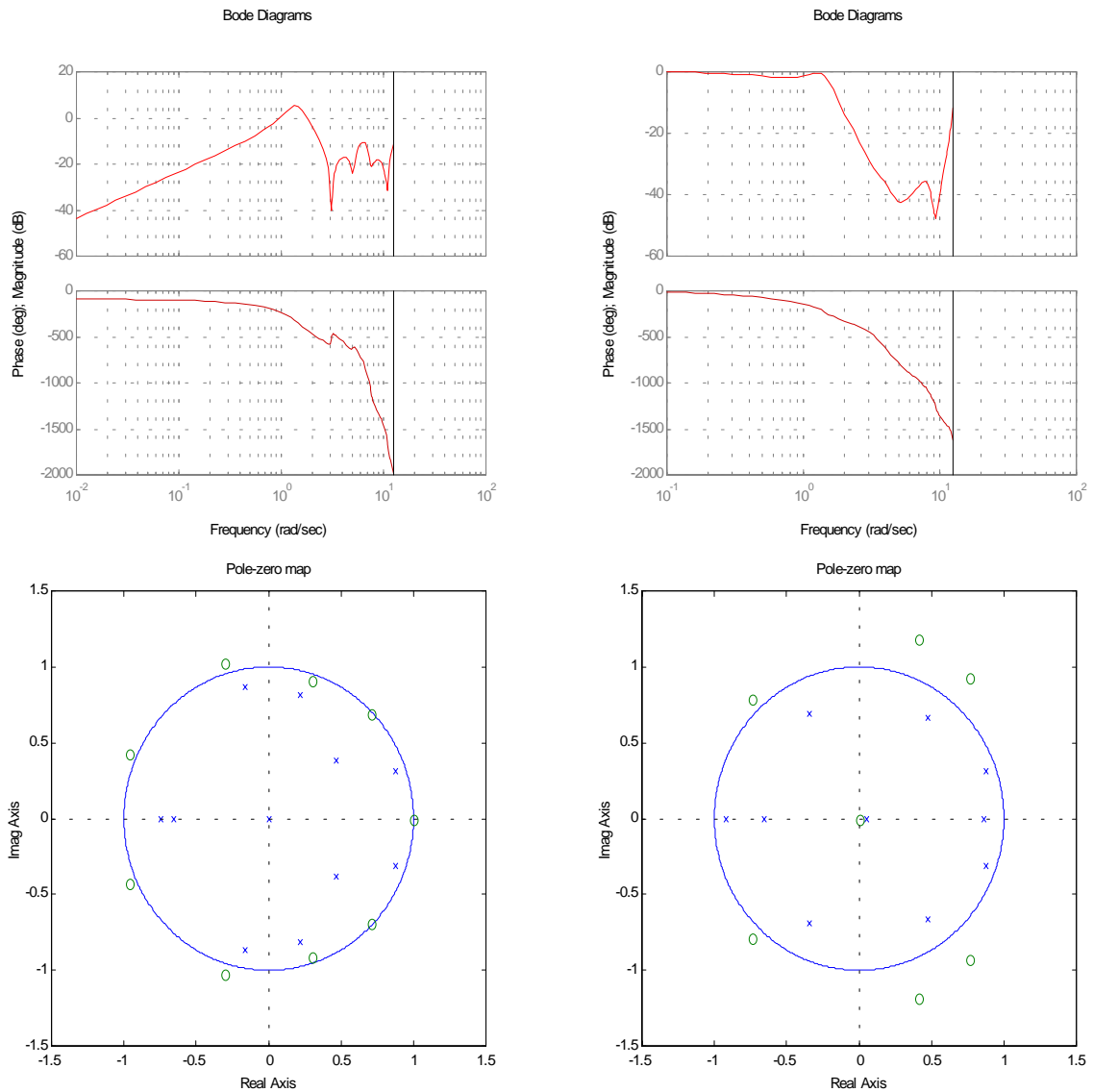
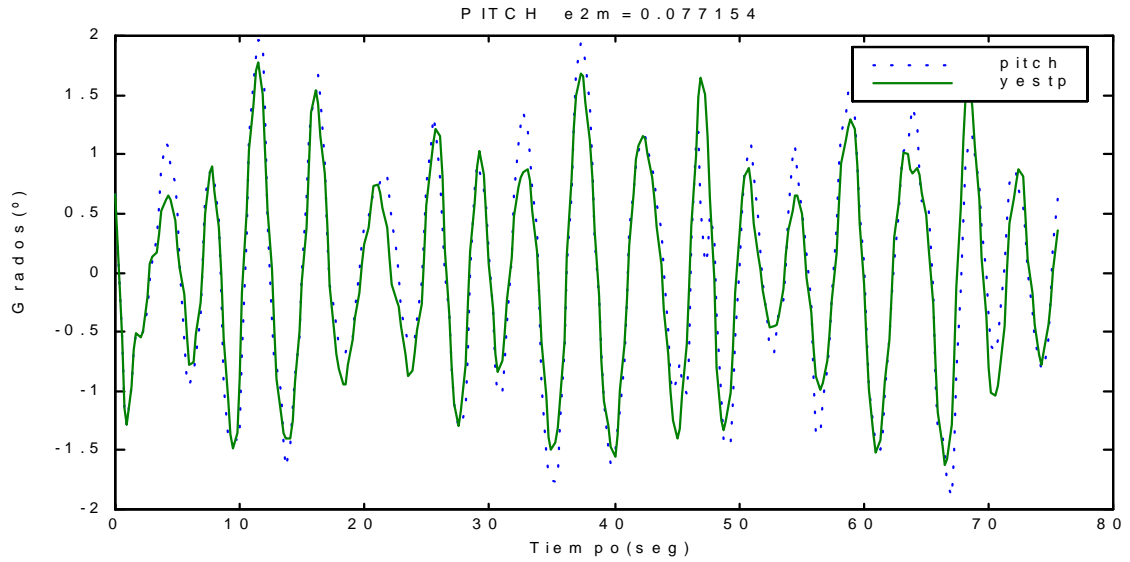


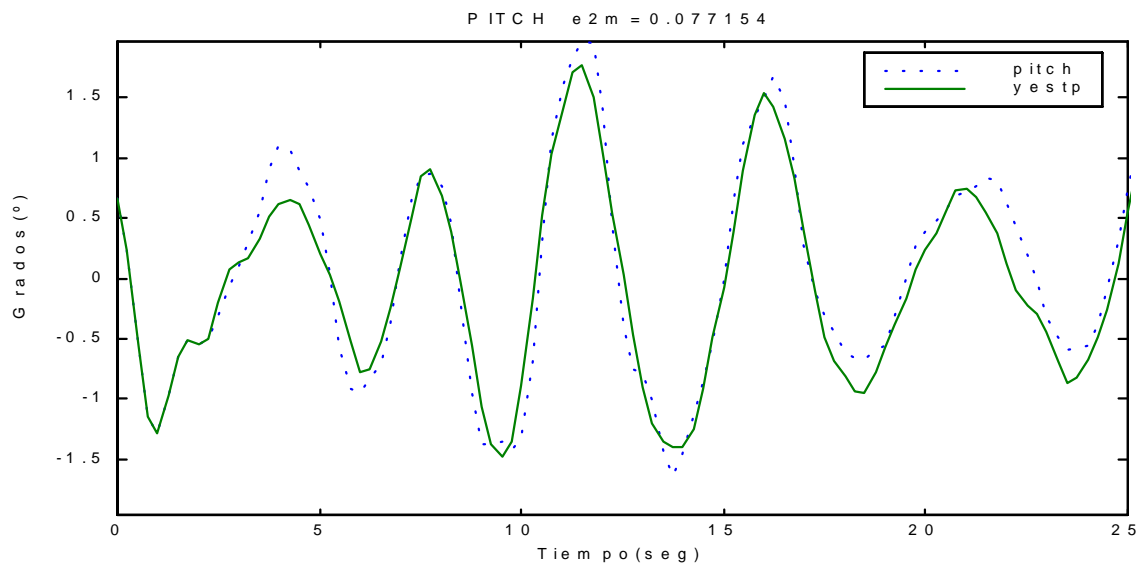
Figura 4.26 : (a)Diagrama de Bode del  $G_P(z)$  y de  $G_H(z)$  y (b)Diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

En la Figura 4.27 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.





(a)



(b)

Figura 4.27 : Salida(yestp) de  $G_p(z)$  del modelo comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.28 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf4025).

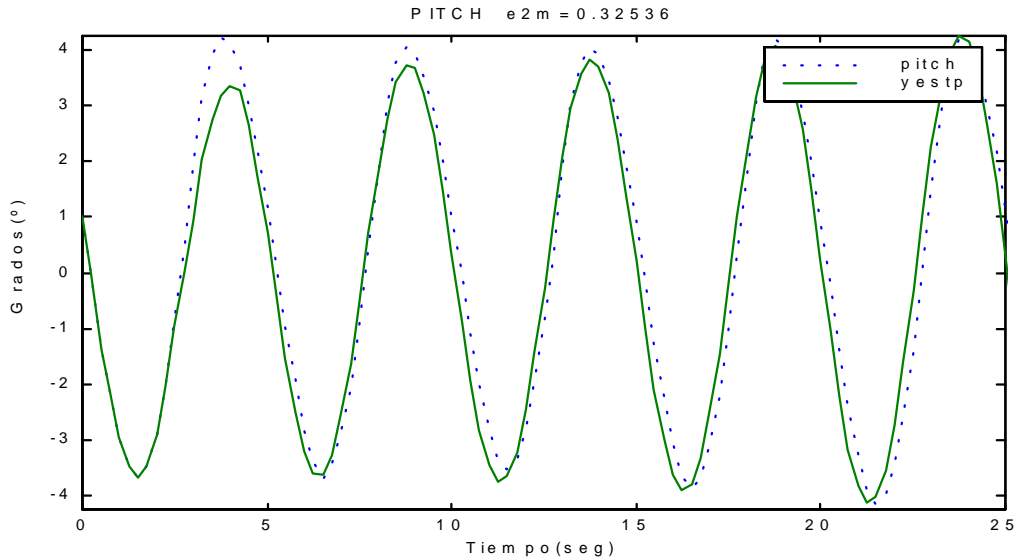


Figura 4.28 : Salida (yestp) de  $G_P(z)$  comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).

En la Figura 4.29 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf4025).

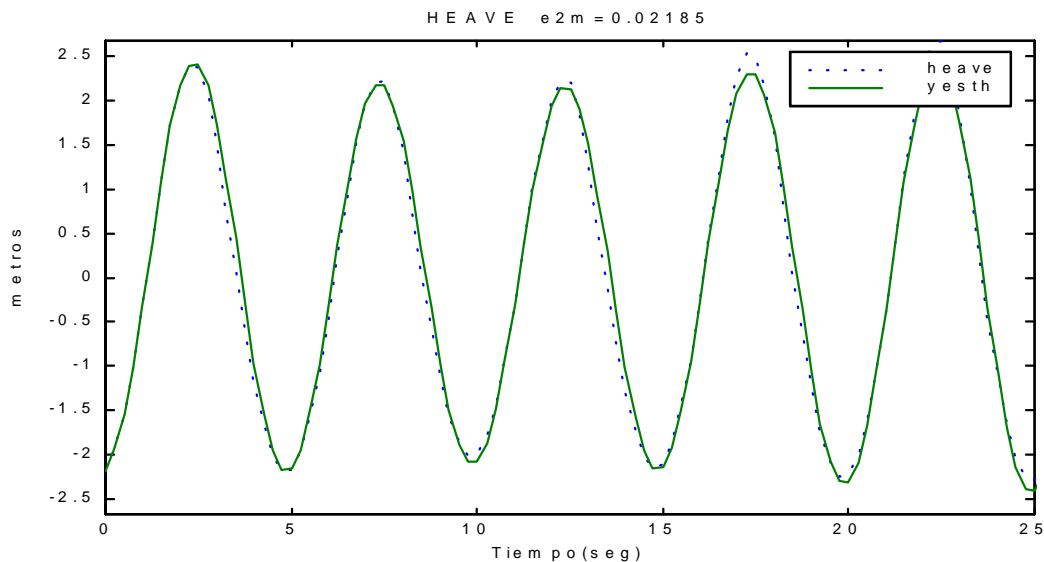


Figura 4.29 : Salida (yesth) de  $G_H(z)$  comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 4.30 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.

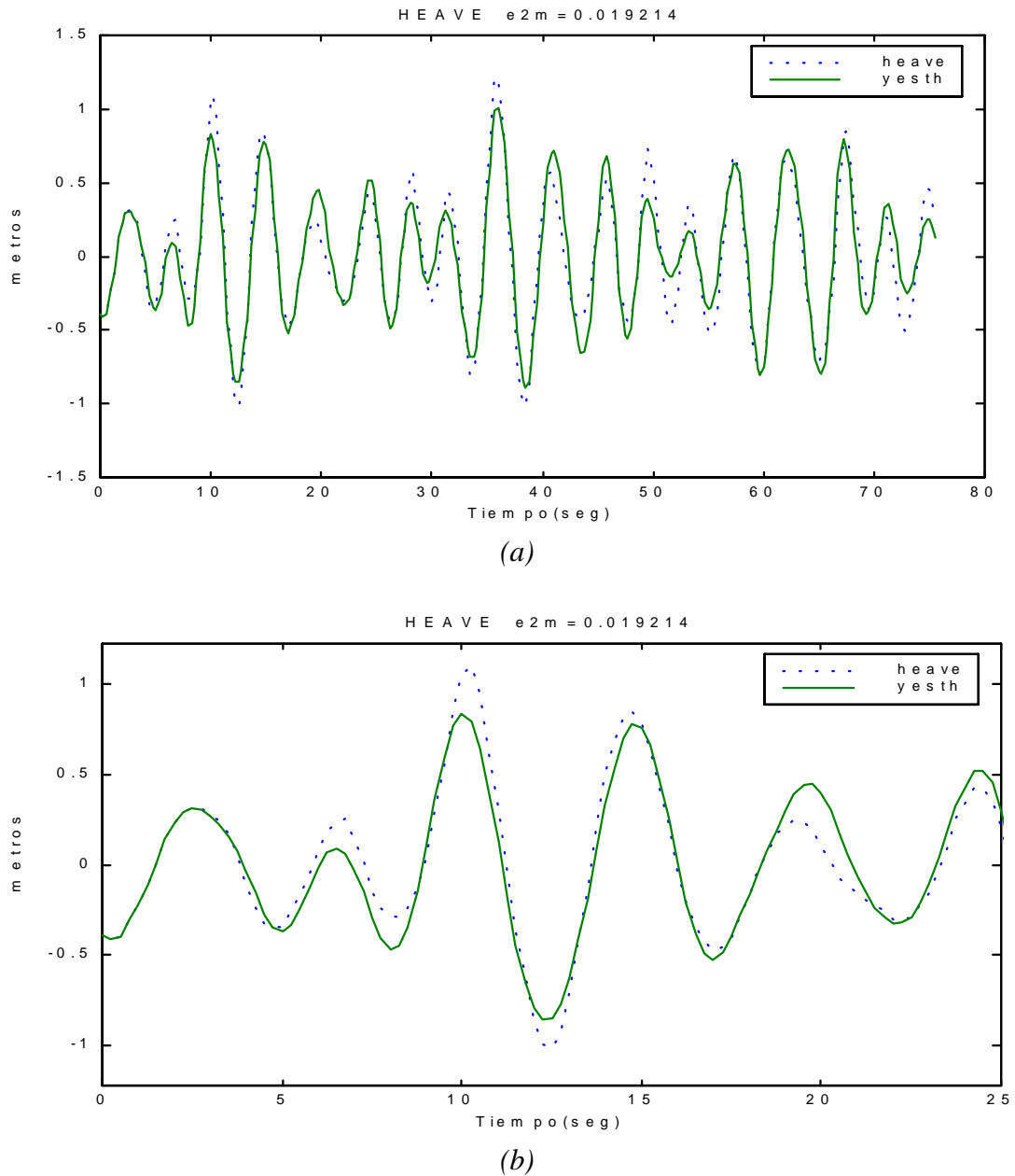


Figura 4.30 : Salida(yesth) de  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

## 4.7 ESTADO DE LA MAR 6 Y VELOCIDAD 20 NUDOS.

### MODELO (3,10,10,6,10,7,3)

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.1705 z^{-6} + 0.3652 z^{-7} - 0.4258 z^{-8} + 0.3301 z^{-9} - 0.2657 z^{-10} \\
 & + 0.2145 z^{-11} - 0.218 z^{-12} + 0.3534 z^{-13} - 0.4872 z^{-14} + 0.304 z^{-15} \\
 G_p(z) = & \frac{-0.1705 z^{-6} + 0.3652 z^{-7} - 0.4258 z^{-8} + 0.3301 z^{-9} - 0.2657 z^{-10} + 0.2145 z^{-11} - 0.218 z^{-12} + 0.3534 z^{-13} - 0.4872 z^{-14} + 0.304 z^{-15}}{1 - 1.524 z^{-1} + 0.3754 z^{-2} + 0.269 z^{-3} - 0.004472 z^{-4} + 0.0112 z^{-5} - 0.1518 z^{-6} + 0.1364 z^{-7} - 0.04874 z^{-8} + 0.1207 z^{-9} - 0.09169 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.14 se muestran los polos y ceros de  $G_p(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_p(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.14 : Polos y ceros de la  $G_p(z)$  derivada del modelo .*

Polos		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0		NaN	NaN
0.91032 +	0.26419i	1.1499	0.18617
0.91032 -	0.26419i	1.1499	0.18617
0.50246 +	0.61265i	3.6561	0.25466
0.50246 -	0.61265i	3.6561	0.25466
-0.11024 +	0.69538i	7.0531	0.19899
-0.11024 -	0.69538i	7.0531	0.19899
-0.5156 +	0.51396i	9.5163	0.13343
-0.5156 -	0.51396i	9.5163	0.13343
-0.8118		0.83403	1
0.76215		1.0864	1

Ceros		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.82435 +	0.56269i	10.171	0.00075299
-0.82435 -	0.56269i	10.171	0.00075299
-0.16018 +	1.0702i	6.8847	-0.045876
-0.16018 -	1.0702i	6.8847	-0.045876
0.61405 +	0.94472i	4.0063	-0.11915
0.61405 -	0.94472i	4.0063	-0.11915
0.94139 +	0.5636i	2.1895	-0.16948
0.94139 -	0.5636i	2.1895	-0.16948
1		7.1054e-015	-1

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 &0.05574 z^{-3} - 0.1128 z^{-4} + 0.08801 z^{-5} - 0.02742 z^{-6} + 0.0803 z^{-7} \\
 &\quad - 0.14 z^{-8} + 0.09261 z^{-9} \\
 G_H(z) = &\frac{0.05574 z^{-3} - 0.1128 z^{-4} + 0.08801 z^{-5} - 0.02742 z^{-6} + 0.0803 z^{-7} - 0.14 z^{-8} + 0.09261 z^{-9}}{1 - 1.576 z^{-1} + 0.1392 z^{-2} + 0.6725 z^{-3} - 0.2705 z^{-4} + 0.3753 z^{-5} - 0.4392 z^{-6} + 0.1429 z^{-7} - 0.07464 z^{-8} + 0.1185 z^{-9} - 0.05118 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.15 se muestran los polos y ceros de  $G_H(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.15 : Polos y ceros de la  $G_H(z)$  derivada del modelo .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.94821	0.21272	1
-0.42789 + 0.4655i	9.4364	0.19432
-0.42789 - 0.4655i	9.4364	0.19432
-0.11024 + 0.69538i	7.0531	0.19899
-0.11024 - 0.69538i	7.0531	0.19899
0.55609 + 0.38136i	2.8751	0.54827
0.55609 - 0.38136i	2.8751	0.54827
0.86329 + 0.20156i	1.0363	0.46497
0.86329 - 0.20156i	1.0363	0.46497
0.76215	1.0864	1

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
-0.70505 + 0.77812i	9.2299	-0.021158
-0.70505 - 0.77812i	9.2299	-0.021158
0.71291 + 0.83788i	3.4842	-0.10955
0.71291 - 0.83788i	3.4842	-0.10955
1.0039 + 0.48705i	1.8592	-0.23581
1.0039 - 0.48705i	1.8592	-0.23581

En la Figura 4.31 se muestran el diagrama de Bode y el diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

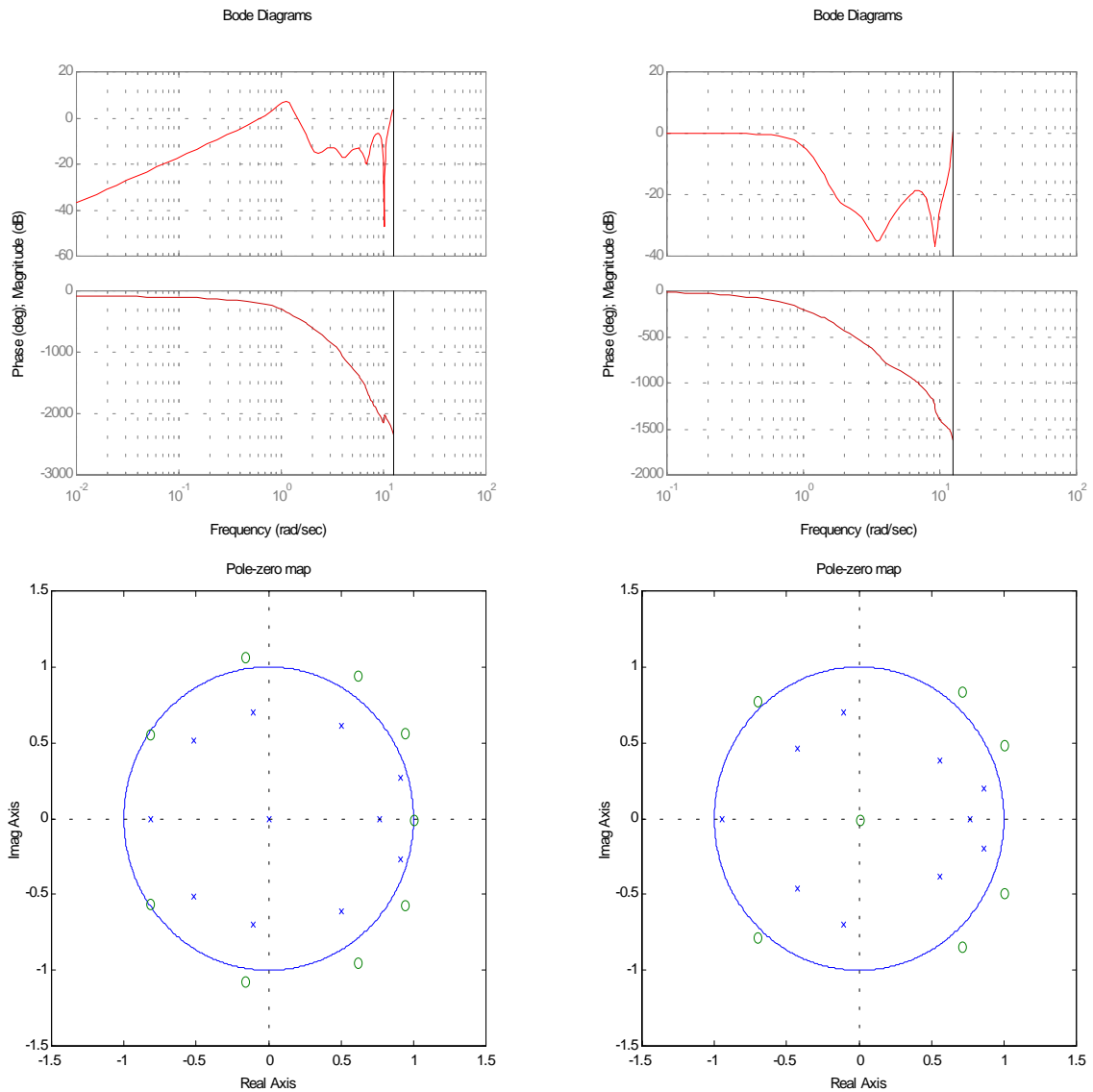
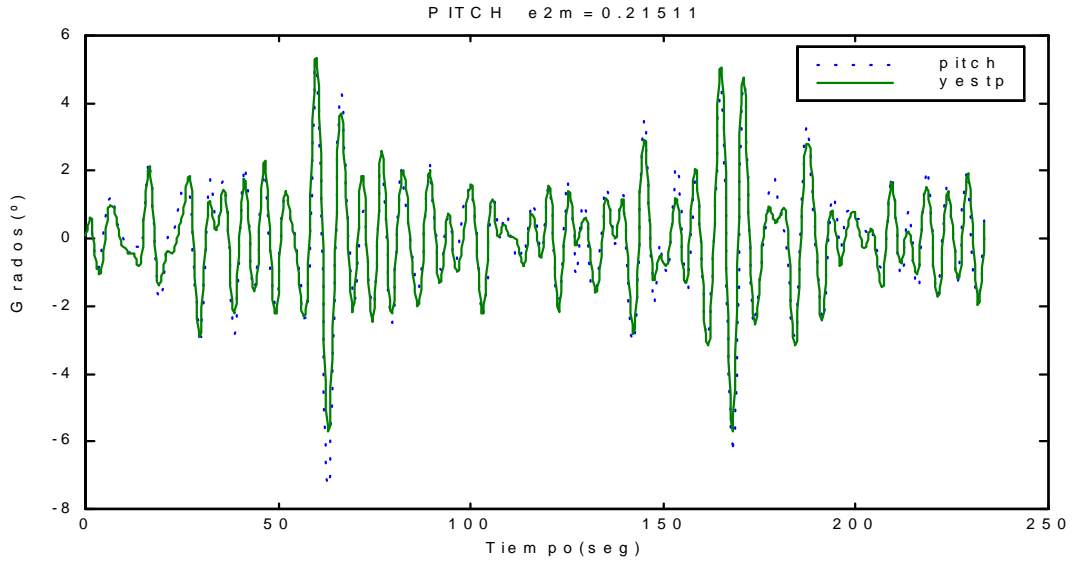


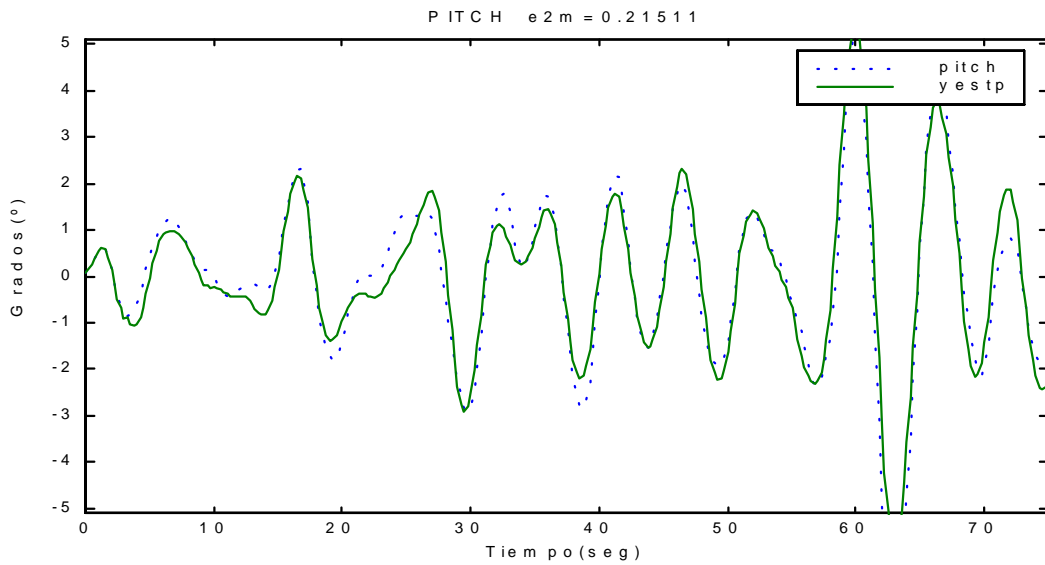
Figura 4.31 : (a)Diagrama de Bode del  $G_P(z)$  y de  $G_H(z)$  y (b)Diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.32 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 4.32 : Salida(yestp) de  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.33 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf4025).

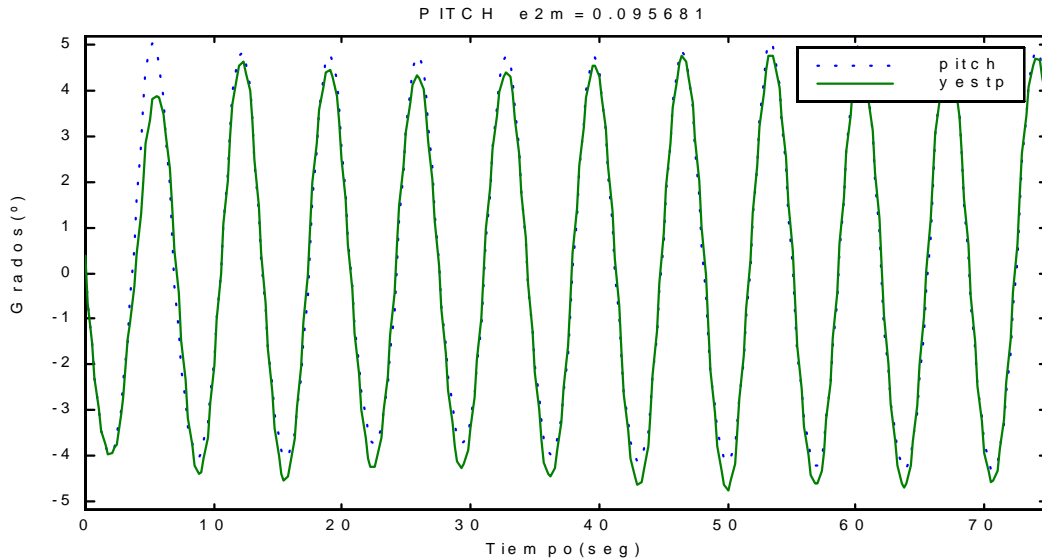


Figura 4.33 : Salida (yestp) de  $G_P(z)$  comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).

En la Figura 4.34 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf4025).

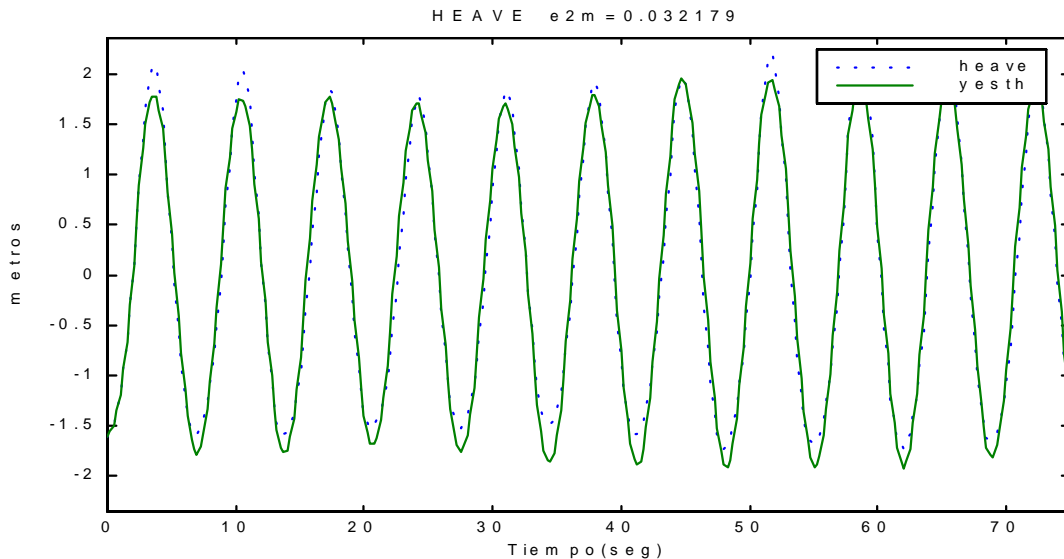


Figura 4.34 : Salida (yesth) de  $G_H(z)$  comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).



**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.35 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.

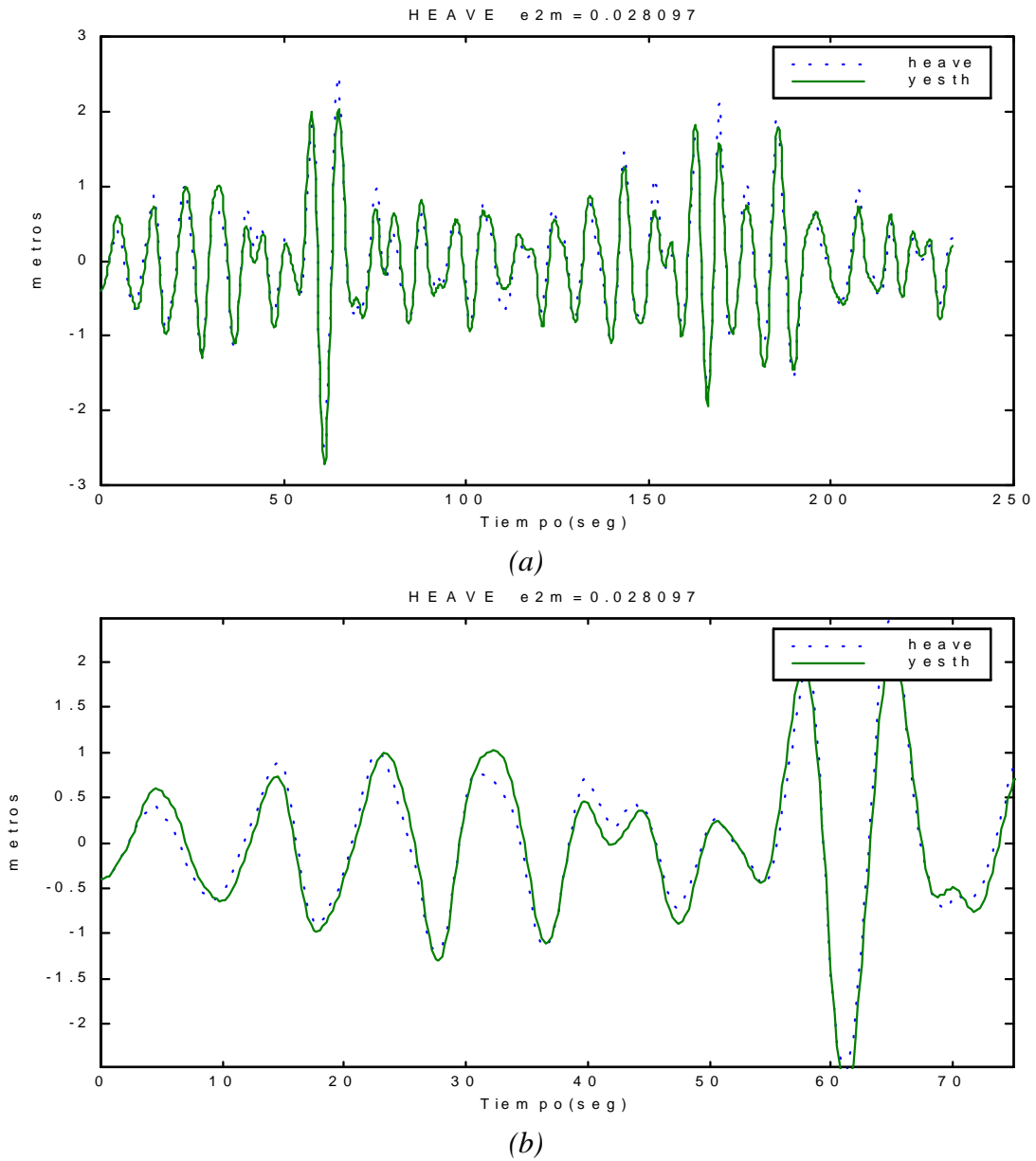


Figura 4.35 : Salida(yesth) de  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

## 4.8 ESTADO DE LA MAR 6 Y VELOCIDAD 30 NUDOS.

### MODELO (3,10,10,6,10,7,3)

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.08894 z^{-6} + 0.07357 z^{-7} + 0.03751 z^{-8} - 0.1012 z^{-9} + 0.02224 z^{-10} \\
 & + 0.02671 z^{-11} - 0.009349 z^{-12} + 0.03473 z^{-13} - 0.05692 z^{-14} + 0.06162 z^{-15} \\
 G_p(z) = & \frac{\text{-----}}{1 - 2.281 z^{-1} + 1.738 z^{-2} + 0.2715 z^{-3} - 1.426 z^{-4} + 0.8648 z^{-5} \\
 & - 0.1026 z^{-6} + 0.3408 z^{-7} - 0.637 z^{-8} + 0.4058 z^{-9} - 0.1 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.14 se muestran los polos y ceros de  $G_p(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_p(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.14 : Polos y ceros de la  $G_p(z)$  derivada del modelo .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-0.95955	0.16517	1
-0.48763 +	0.55092i	9.263
-0.48763 -	0.55092i	9.263
0.42671 +	0.82899i	4.3907
0.42671 -	0.82899i	4.3907
0.88886 +	0.29972i	1.3258
0.88886 -	0.29972i	1.3258
0.69157	1.4752	1
0.44652 +	0.40568i	3.5761
0.44652 -	0.40568i	3.5761

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-1.0165 +	0.31903i	11.353
-1.0165 -	0.31903i	11.353
-0.32729 +	0.77419i	7.9136
-0.32729 -	0.77419i	7.9136
1	3.908e-014	-1
0.79758 +	0.63395i	2.6874
0.79758 -	0.63395i	2.6874
0.45979 +	0.78804i	4.1866
0.45979 -	0.78804i	4.1866

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & 0.07812 z^{-2} - 0.1881 z^{-3} + 0.2112 z^{-4} - 0.1395 z^{-5} + 0.1216 z^{-6} \\
 & \quad - 0.1001 z^{-7} + 0.1078 z^{-8} - 0.08345 z^{-9} + 0.06392 z^{-10} \\
 G_H(z) = & \frac{\text{-----}}{1 - 1.418 z^{-1} + 0.05228 z^{-2} + 0.5903 z^{-3} - 0.2476 z^{-4} + 0.2814 z^{-5} \\
 & \quad - 0.2456 z^{-6} + 0.1683 z^{-7} - 0.2296 z^{-8} + 0.1858 z^{-9} - 0.06613 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.15 se muestran los polos y ceros de  $G_H(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$  :

Tabla 4.15 : Polos y ceros de la  $G_H(z)$  derivada del modelo .

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.95955	0.16517	1
-0.51619 + 0.5349i	9.4285	0.12583
-0.51619 - 0.5349i	9.4285	0.12583
-0.0095836 + 0.71233i	6.4806	0.20931
-0.0095836 - 0.71233i	6.4806	0.20931
0.85899 + 0.29621i	1.3824	0.27724
0.85899 - 0.29621i	1.3824	0.27724
0.81778	0.80465	1
0.44652 + 0.40568i	3.5761	0.56525
0.44652 - 0.40568i	3.5761	0.56525

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.63132 + 0.58947i	9.5798	0.061166
-0.63132 - 0.58947i	9.5798	0.061166
1.0833 + 0.56322i	2.0774	-0.3844
1.0833 - 0.56322i	2.0774	-0.3844
0.71387 + 0.69321i	3.0829	0.0064133
0.71387 - 0.69321i	3.0829	0.0064133
0.038174 + 0.86112i	6.1348	0.096852
0.038174 - 0.86112i	6.1348	0.096852

En la Figura 4.31 se muestran el diagrama de Bode y el diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

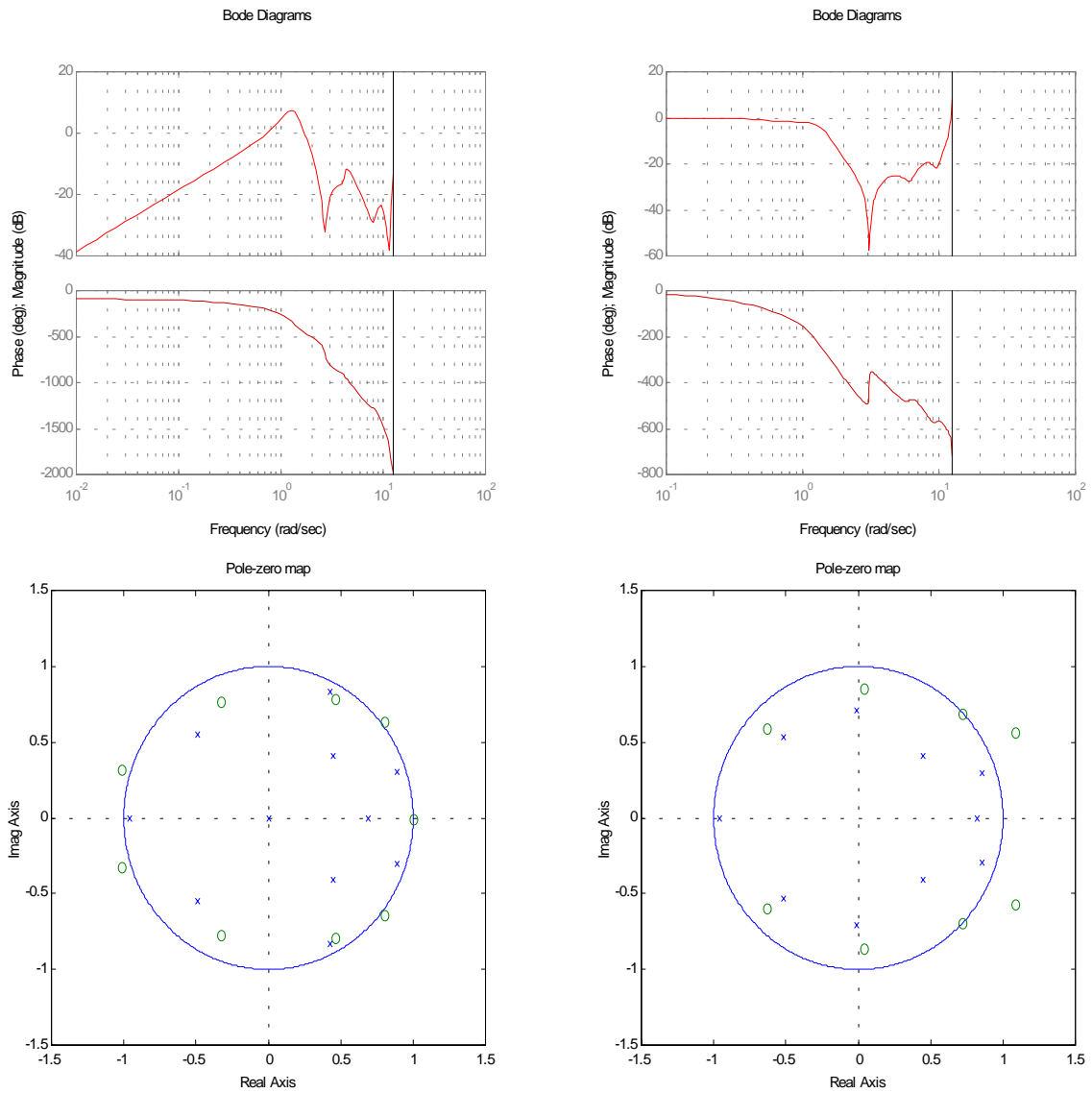
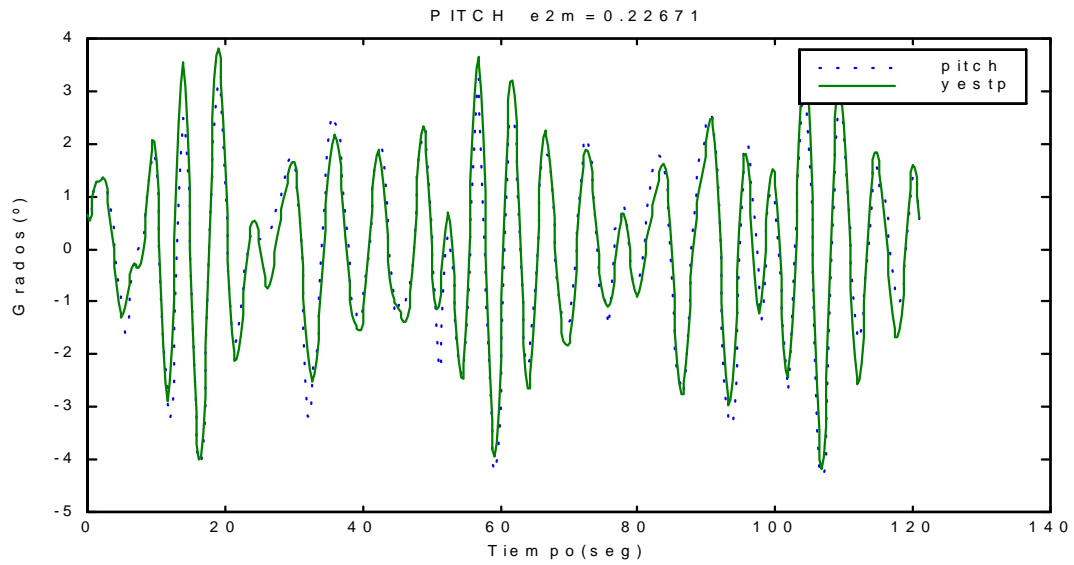


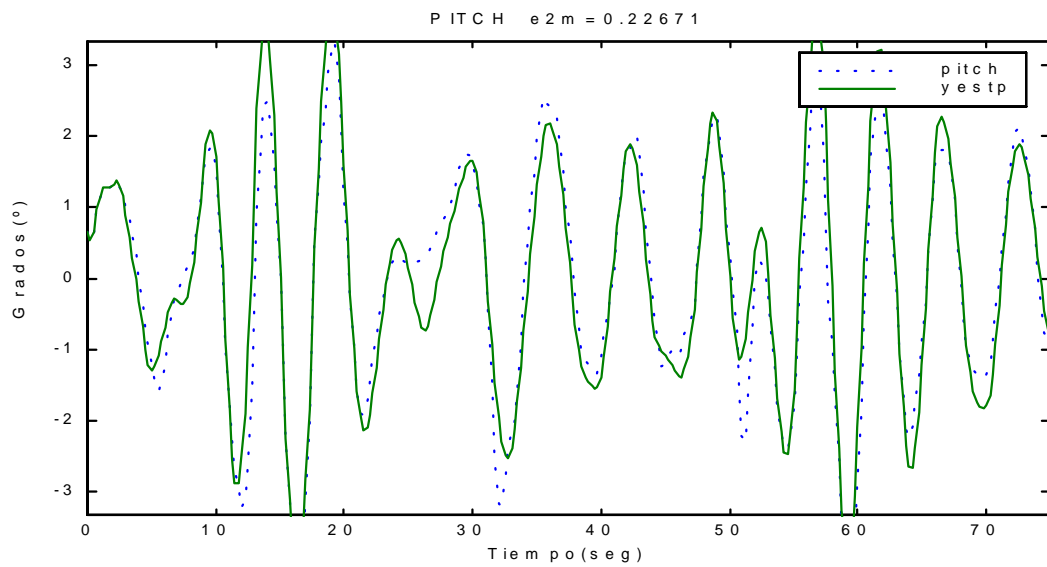
Figura 4.31 : (a) Diagrama de Bode del  $G_P(z)$  y de  $G_H(z)$  y (b) Diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.32 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 4.32 : Salida( $y_{estp}$ ) de  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida( $pitch$ ) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.33 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf4025).

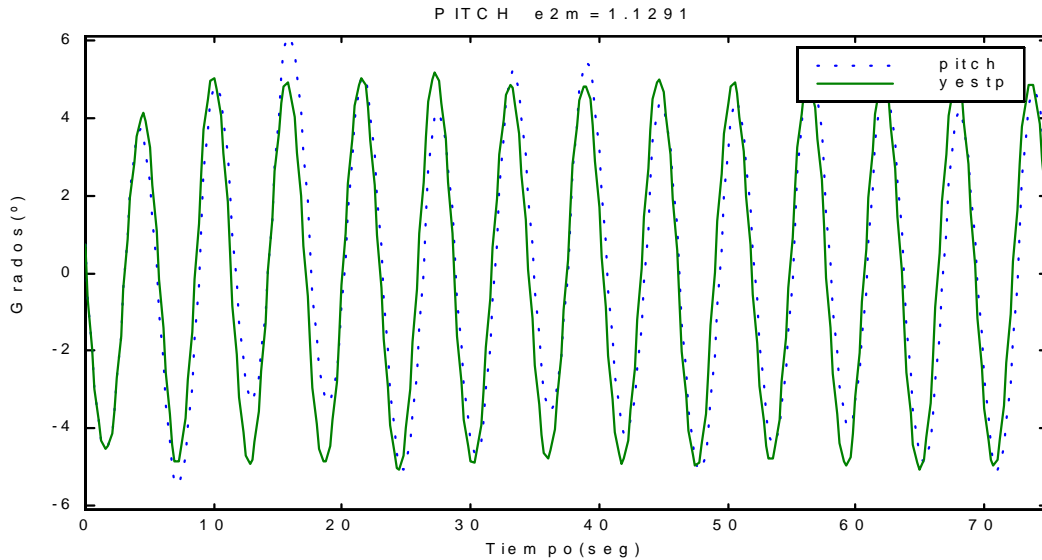


Figura 4.33 : Salida (yestp) de  $G_P(z)$  comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).

En la Figura 4.34 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf4025).

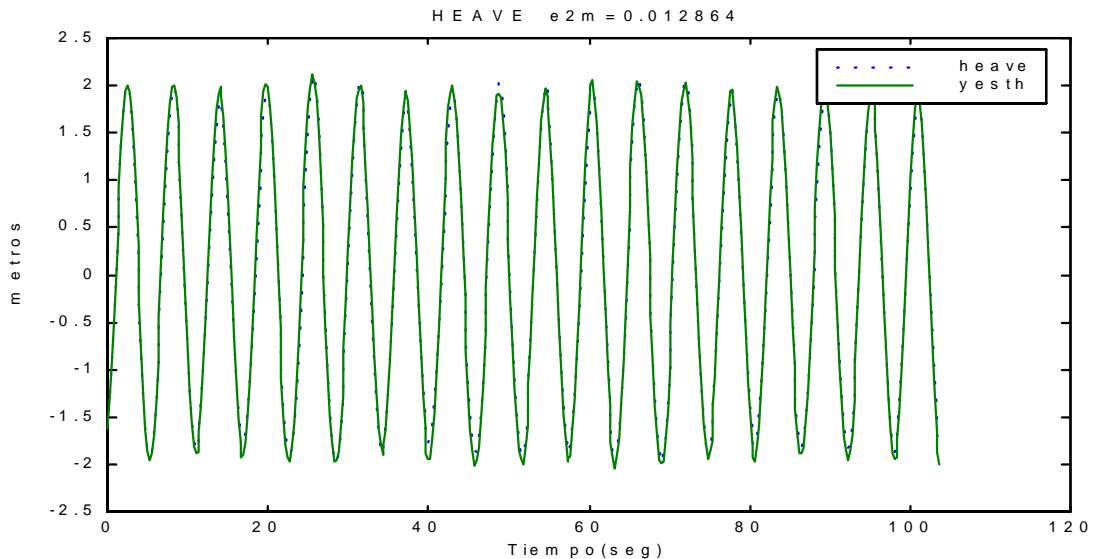
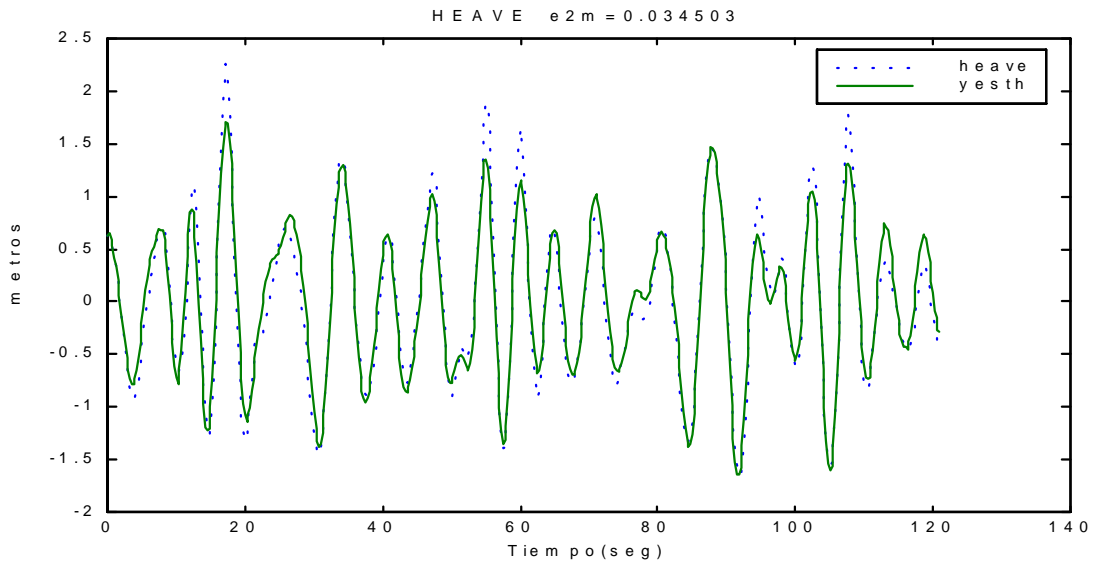


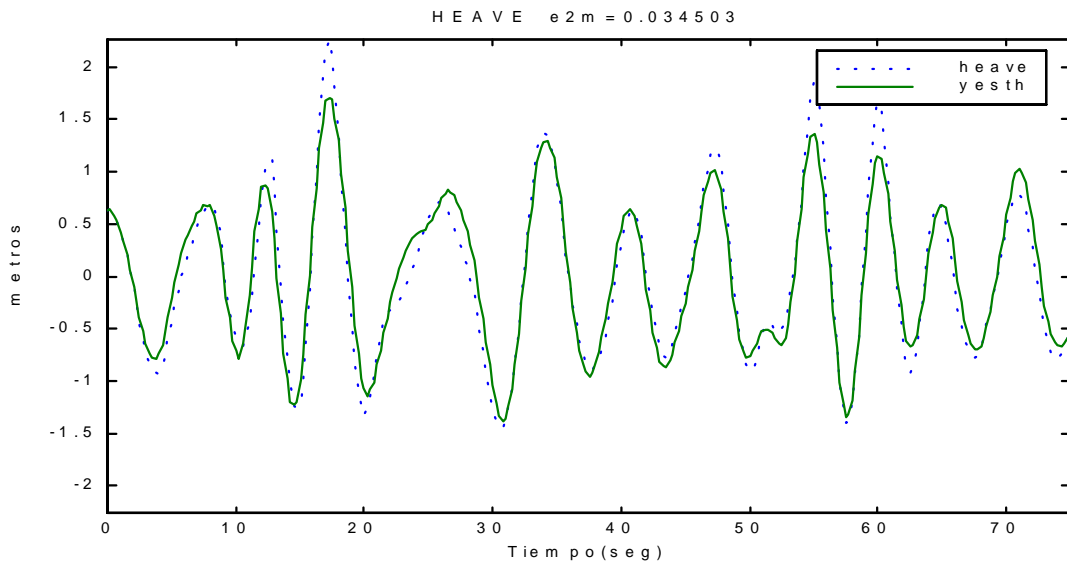
Figura 4.34 : Salida (yesth) de  $G_H(z)$  comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.35 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 4.35 : Salida(yesth) de  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

### 4.9 ESTADO DE LA MAR 6 Y VELOCIDAD 30 NUDOS.

#### MODELO (3,10,10,6,10,9,2)

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.08894 z^{-6} + 0.07357 z^{-7} + 0.03751 z^{-8} - 0.1012 z^{-9} + 0.02224 z^{-10} \\
 & + 0.02671 z^{-11} - 0.009349 z^{-12} + 0.03473 z^{-13} - 0.05692 z^{-14} \\
 & + 0.06162 z^{-15}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 G_p(z) = & \frac{-0.08894 z^{-6} + 0.07357 z^{-7} + 0.03751 z^{-8} - 0.1012 z^{-9} + 0.02224 z^{-10} + 0.02671 z^{-11} - 0.009349 z^{-12} + 0.03473 z^{-13} - 0.05692 z^{-14} + 0.06162 z^{-15}}{1 - 2.281 z^{-1} + 1.738 z^{-2} + 0.2715 z^{-3} - 1.426 z^{-4} + 0.8648 z^{-5} - 0.1026 z^{-6} + 0.3408 z^{-7} - 0.637 z^{-8} + 0.4058 z^{-9} - 0.1 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.16 se muestran los polos y ceros de  $G_p(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_p(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.16 : Polos y ceros de la  $G_p(z)$  derivada del modelo .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-0.95955	0.16517	1
-0.48763 + 0.55092i	9.263	0.13253
-0.48763 - 0.55092i	9.263	0.13253
0.42671 + 0.82899i	4.3907	0.063802
0.42671 - 0.82899i	4.3907	0.063802
0.88886 + 0.29972i	1.3258	0.19301
0.88886 - 0.29972i	1.3258	0.19301
0.69157	1.4752	1
0.44652 + 0.40568i	3.5761	0.56525
0.44652 - 0.40568i	3.5761	0.56525

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-1.0165 + 0.31903i	11.353	-0.022311
-1.0165 - 0.31903i	11.353	-0.022311
-0.32729 + 0.77419i	7.9136	0.08781
-0.32729 - 0.77419i	7.9136	0.08781
1	3.908e-014	-1
0.79758 + 0.63395i	2.6874	-0.027774
0.79758 - 0.63395i	2.6874	-0.027774
0.45979 + 0.78804i	4.1866	0.08763
0.45979 - 0.78804i	4.1866	0.08763



**CRIBAV**

**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$0.07812 z^{-2} - 0.1881 z^{-3} + 0.2112 z^{-4} - 0.1395 z^{-5} + 0.1216 z^{-6} - 0.1001 z^{-7} + 0.1078 z^{-8} - 0.08345 z^{-9} + 0.06392 z^{-10}$$

$$G_h(z) = \frac{0.07812 z^{-2} - 0.1881 z^{-3} + 0.2112 z^{-4} - 0.1395 z^{-5} + 0.1216 z^{-6} - 0.1001 z^{-7} + 0.1078 z^{-8} - 0.08345 z^{-9} + 0.06392 z^{-10}}{1 - 1.418 z^{-1} + 0.05228 z^{-2} + 0.5903 z^{-3} - 0.2476 z^{-4} + 0.2814 z^{-5} - 0.2456 z^{-6} + 0.1683 z^{-7} - 0.2296 z^{-8} + 0.1858 z^{-9} - 0.06613 z^{-10}}$$

En la Tabla 4.17 se muestran los polos y ceros de  $G_H(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.17 : Polos y ceros de la  $G_H(z)$  derivada del modelo .*

Polos		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.95955		0.16517	1
-0.51619 +	0.5349i	9.4285	0.12583
-0.51619 -	0.5349i	9.4285	0.12583
-0.0095836 +	0.71233i	6.4806	0.20931
-0.0095836 -	0.71233i	6.4806	0.20931
0.85899 +	0.29621i	1.3824	0.27724
0.85899 -	0.29621i	1.3824	0.27724
0.81778		0.80465	1
0.44652 +	0.40568i	3.5761	0.56525
0.44652 -	0.40568i	3.5761	0.56525

Ceros		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.63132 +	0.58947i	9.5798	0.061166
-0.63132 -	0.58947i	9.5798	0.061166
1.0833 +	0.56322i	2.0774	-0.3844
1.0833 -	0.56322i	2.0774	-0.3844
0.71387 +	0.69321i	3.0829	0.0064133
0.71387 -	0.69321i	3.0829	0.0064133
0.038174 +	0.86112i	6.1348	0.096852
0.038174 -	0.86112i	6.1348	0.096852

En la Figura 4.36 se muestran el diagrama de Bode y el diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

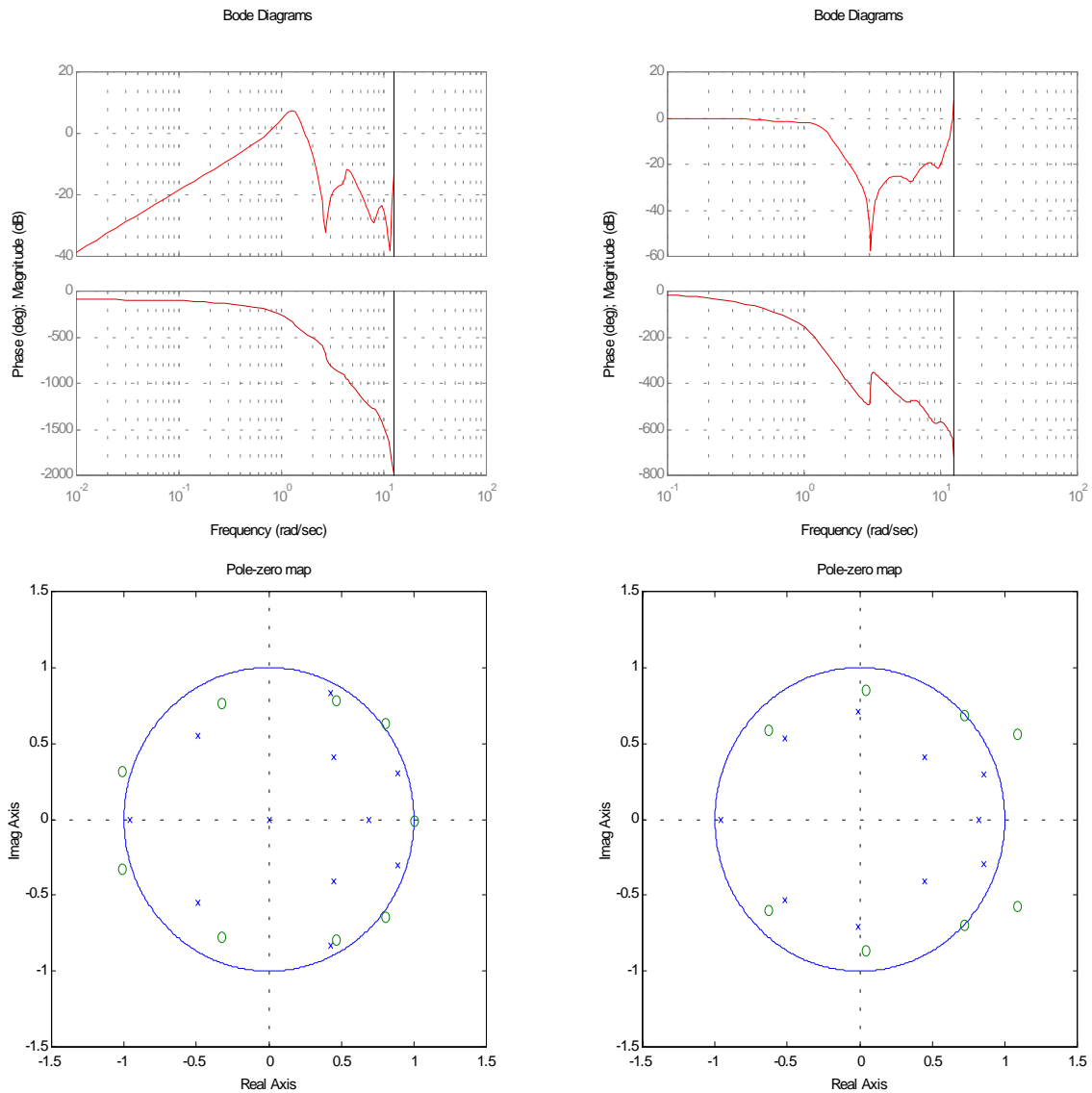
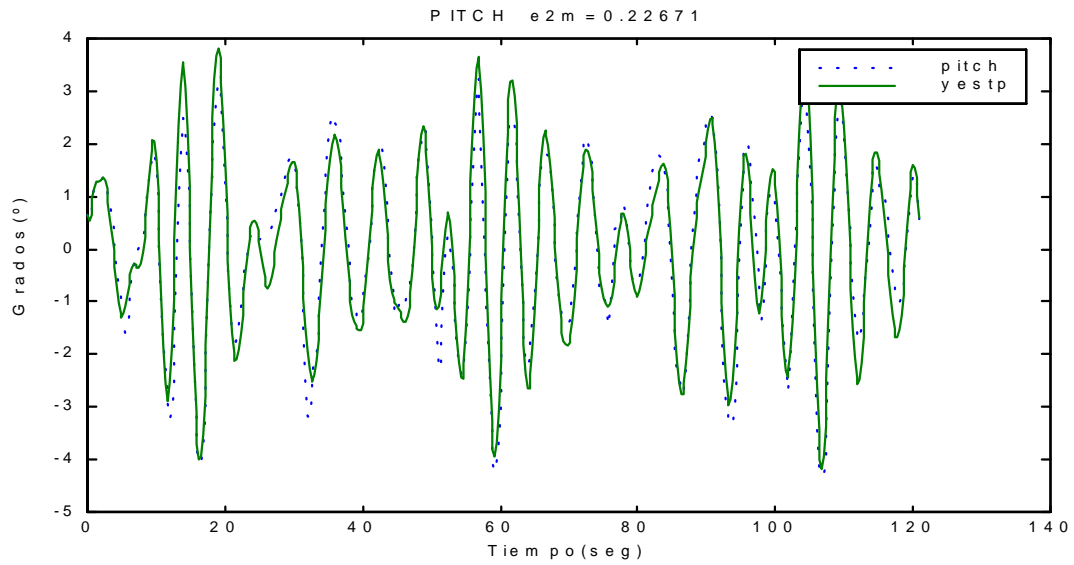


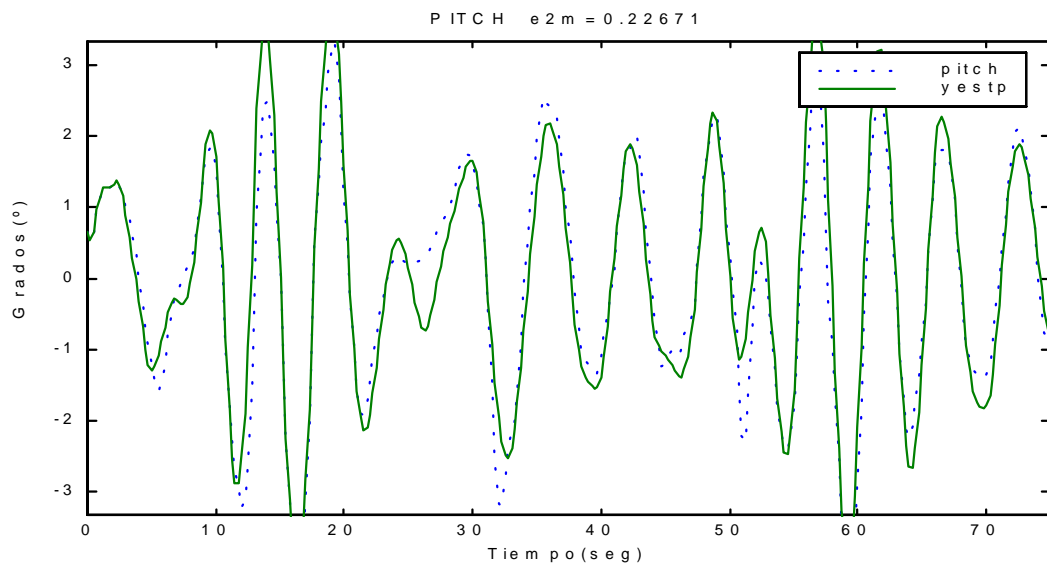
Figura 4.36 : (a) Diagrama de Bode del  $G_P(z)$  y de  $G_H(z)$  y (b) Diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.37 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 4.37 : Salida( $y_{estp}$ ) de  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida( $pitch$ ) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.38 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf4025).

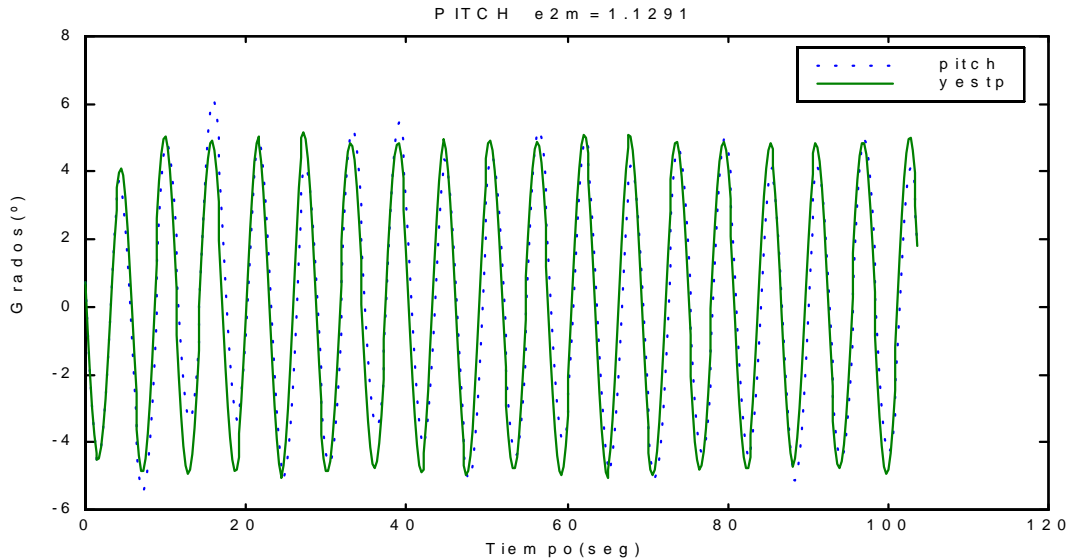


Figura 4.38 : Salida (yestp) de  $G_P(z)$  comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).

En la Figura 4.39 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf4025).

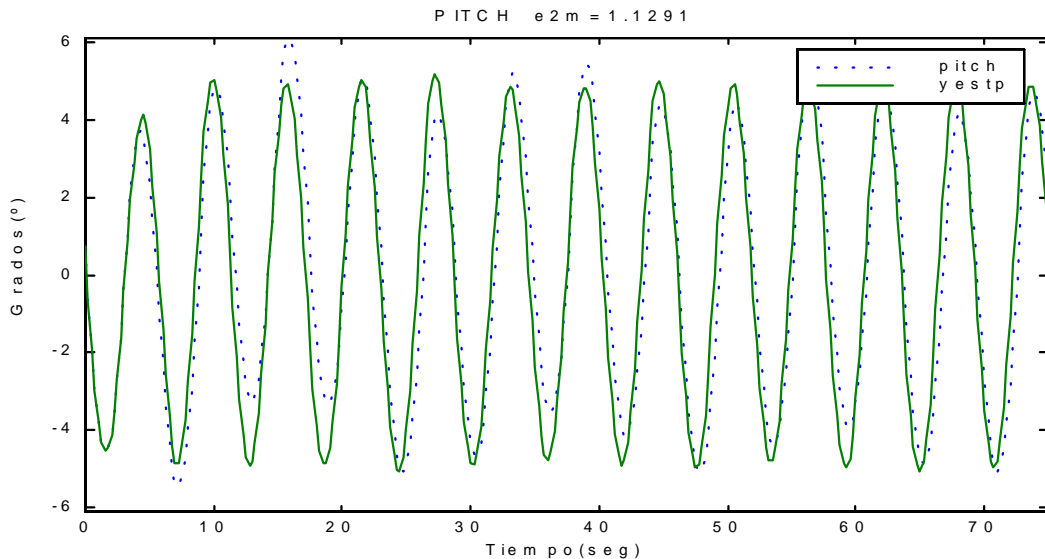
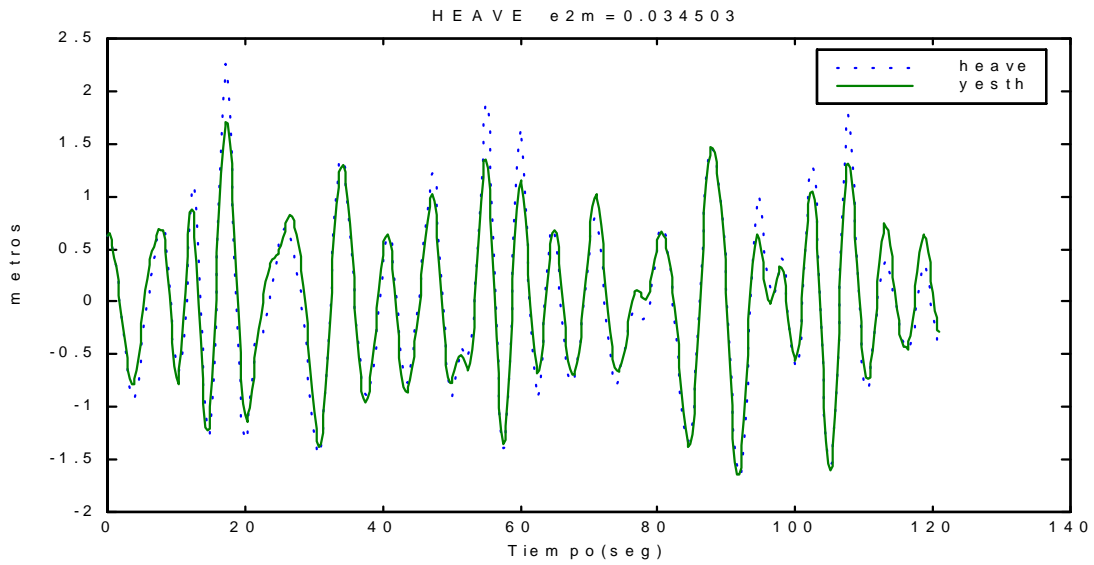


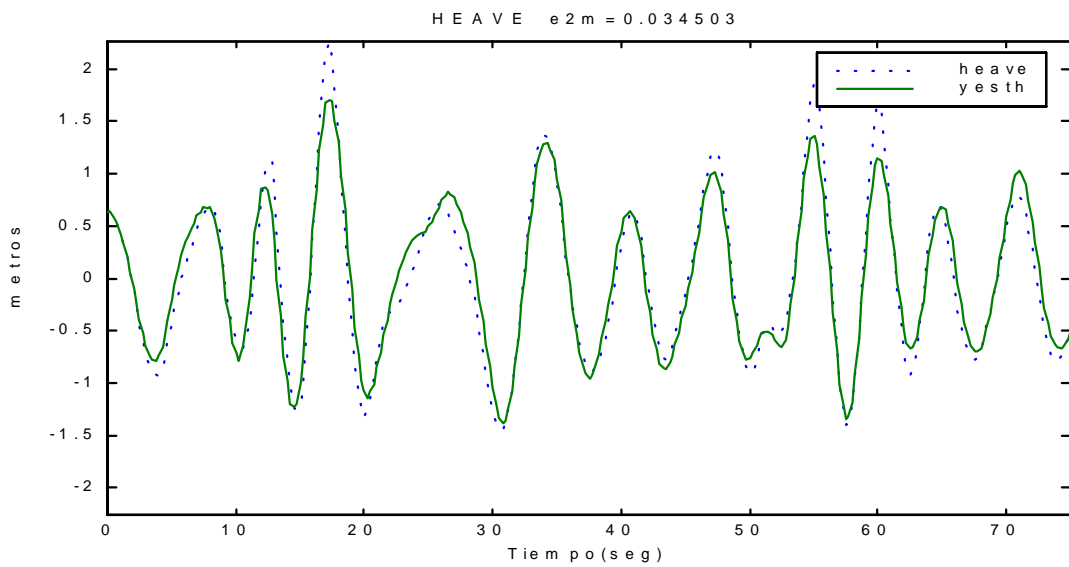
Figura 4.39 : Salida (yesth) de  $G_H(z)$  comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.40 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 4.40 : Salida(yesth) de  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

## 4.10 ESTADO DE LA MAR 6 Y VELOCIDAD 40 NUDOS.

### MODELO (3,10,10,0,10,7,0)

La función de transferencia  $G_p(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.4269 + 1.383 z^{-1} - 1.874 z^{-2} + 1.375 z^{-3} - 0.6081 z^{-4} + 0.2591 z^{-5} \\
 & - 0.3498 z^{-6} + 0.3603 z^{-7} - 0.2623 z^{-8} + 0.1439 z^{-9}
 \end{aligned}$$

$$G_p(z) = \frac{-0.4269 + 1.383 z^{-1} - 1.874 z^{-2} + 1.375 z^{-3} - 0.6081 z^{-4} + 0.2591 z^{-5} - 0.3498 z^{-6} + 0.3603 z^{-7} - 0.2623 z^{-8} + 0.1439 z^{-9}}{1 - 2.147 z^{-1} + 1.926 z^{-2} - 1.032 z^{-3} + 0.3372 z^{-4} - 0.1767 z^{-5} + 0.3255 z^{-6} - 0.142 z^{-7} + 0.07063 z^{-8} - 0.1428 z^{-9} + 0.05735 z^{-10}}$$

En la Tabla 4.18 se muestran los polos y ceros de  $G_p(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_p(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.18 : Polos y ceros de la  $G_p(z)$  derivada del modelo .*

Polos		Frecuencia Natural(rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0.33609 +	0.84404i	4.7828	0.080259
0.33609 -	0.84404i	4.7828	0.080259
0.89124 +	0.3116i	1.3649	0.16844
0.89124 -	0.3116i	1.3649	0.16844
-0.21311 +	0.62569i	7.7747	0.21301
-0.21311 -	0.62569i	7.7747	0.21301
-0.57661 +	0.34374i	10.537	0.15129
-0.57661 -	0.34374i	10.537	0.15129
0.72591		1.2813	1
0.54544		2.4246	1

Ceros		Frecuencia Natural(rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0		NaN	NaN
1.1091 +	0.41014i	1.5675	-0.42769
1.1091 -	0.41014i	1.5675	-0.42769
-0.58048 +	0.44055i	10.05	0.12596
-0.58048 -	0.44055i	10.05	0.12596
1		3.2863e-014	1
0.52556 +	0.79379i	3.9488	0.049826
0.52556 -	0.79379i	3.9488	0.049826
0.065787 +	0.70467i	6.0704	0.22778
0.065787 -	0.70467i	6.0704	0.22778

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

La función de transferencia  $G_H(z)$  del modelo es :

$$\begin{aligned}
 & -0.0474 + 0.1357 z^{-1} - 0.1101 z^{-2} - 0.05574 z^{-3} + 0.2057 z^{-4} \\
 & \quad - 0.1793 z^{-5} + 0.08973 z^{-6} \\
 G_H(z) = & \frac{-0.0474 + 0.1357 z^{-1} - 0.1101 z^{-2} - 0.05574 z^{-3} + 0.2057 z^{-4} - 0.1793 z^{-5} + 0.08973 z^{-6}}{1 - 1.896 z^{-1} + 0.7992 z^{-2} + 0.567 z^{-3} - 0.8036 z^{-4} + 0.6442 z^{-5} - 0.4283 z^{-6} + 0.2769 z^{-7} - 0.03913 z^{-8} - 0.1491 z^{-9} + 0.06734 z^{-10}}
 \end{aligned}$$

En la Tabla 4.19 se muestran los polos y ceros de  $G_H(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento, marcados con una franja gris aparecen los polos comunes a  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$  :

*Tabla 4.19 : Polos y ceros de la  $G_H(z)$  derivada del modelo .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.25984 + 0.67937i	7.8484	0.16224
-0.25984 - 0.67937i	7.8484	0.16224
0.33886 + 0.70307i	4.5949	0.21577
0.33886 - 0.70307i	4.5949	0.21577
0.89124 + 0.3116i	1.3649	0.16844
0.89124 - 0.3116i	1.3649	0.16844
-0.893	0.45267	1
0.86166	0.59558	1
0.54544	2.4246	1
-0.55851	2.33	1

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
0	NaN	NaN
-1.1947	0.71168	-1
1.6236	1.9386	-1
0.89611 + 0.73223i	2.8019	-0.20846
0.89611 - 0.73223i	2.8019	-0.20846
0.32101 + 0.79095i	4.7831	0.13237
0.32101 - 0.79095i	4.7831	0.13237

En la Figura 4.41 se muestran el diagrama de Bode y el diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

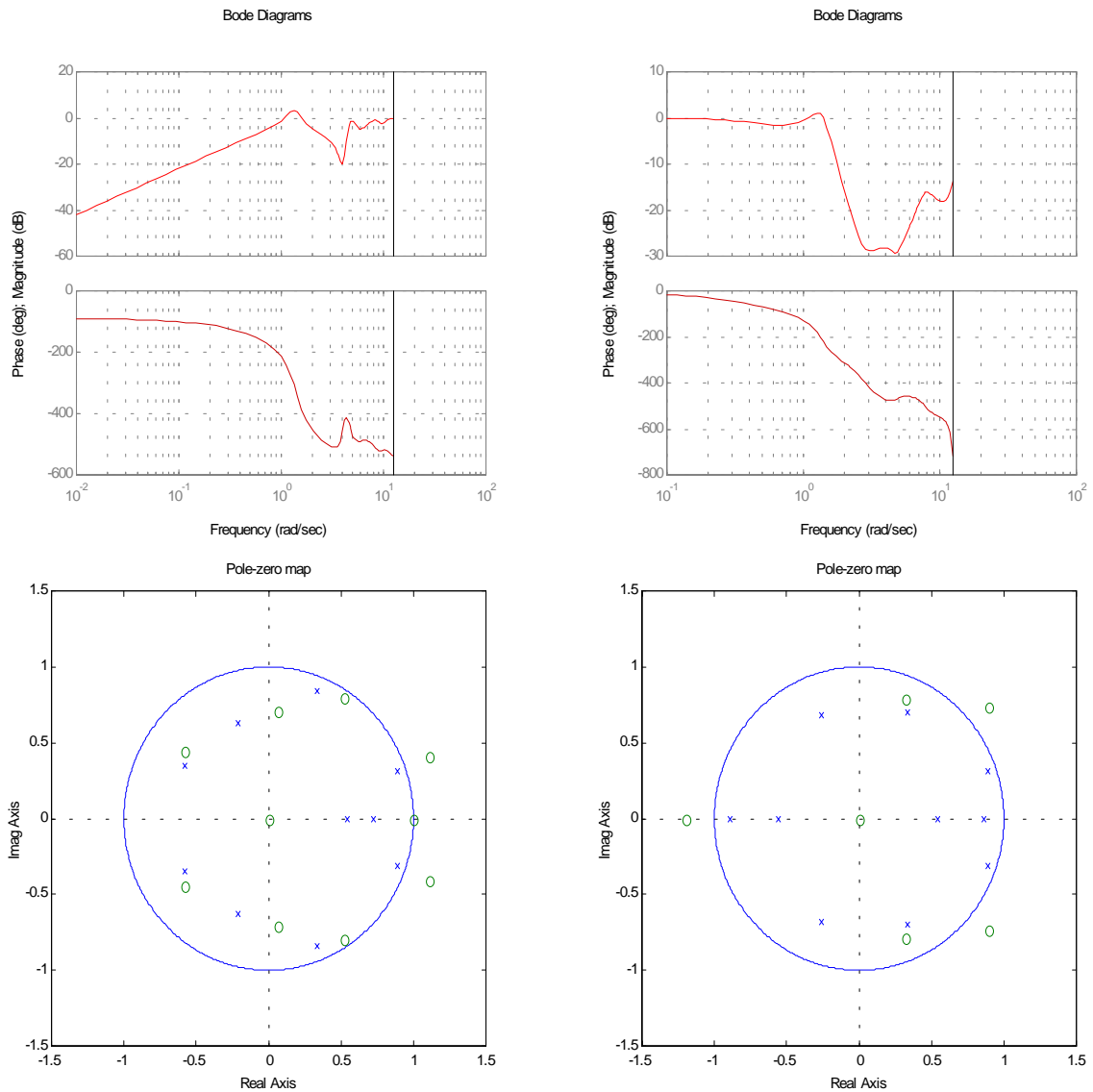


Figura 4.41 : (a)Diagrama de Bode del  $G_P(z)$  y de  $G_H(z)$  y (b)Diagrama de polos y ceros de  $G_P(z)$  y  $G_H(z)$

En la Figura 4.42 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

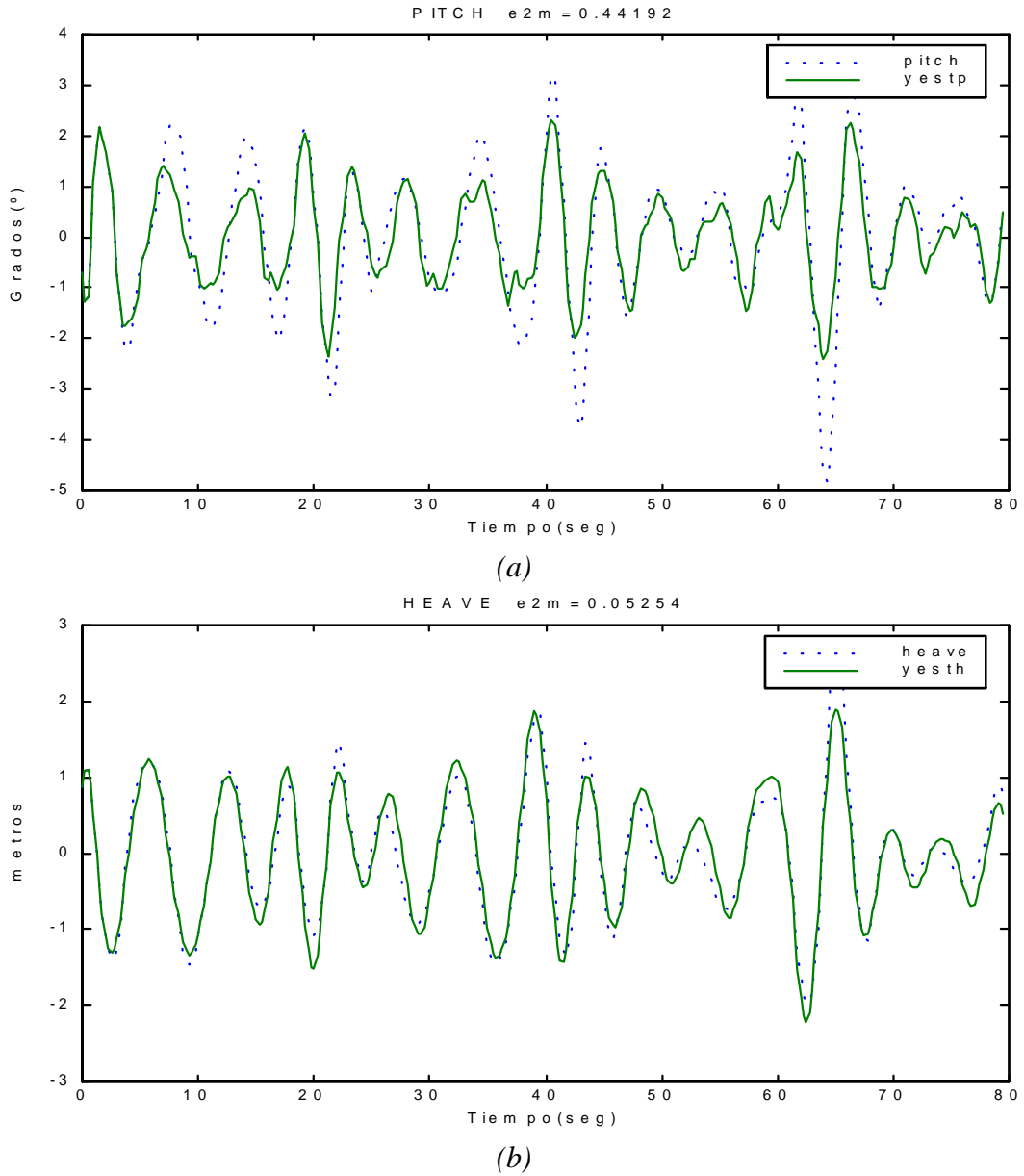


Figura 4.42 : Salida(yestp) de  $G_p(z)$  del modelo comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.43 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf4025).

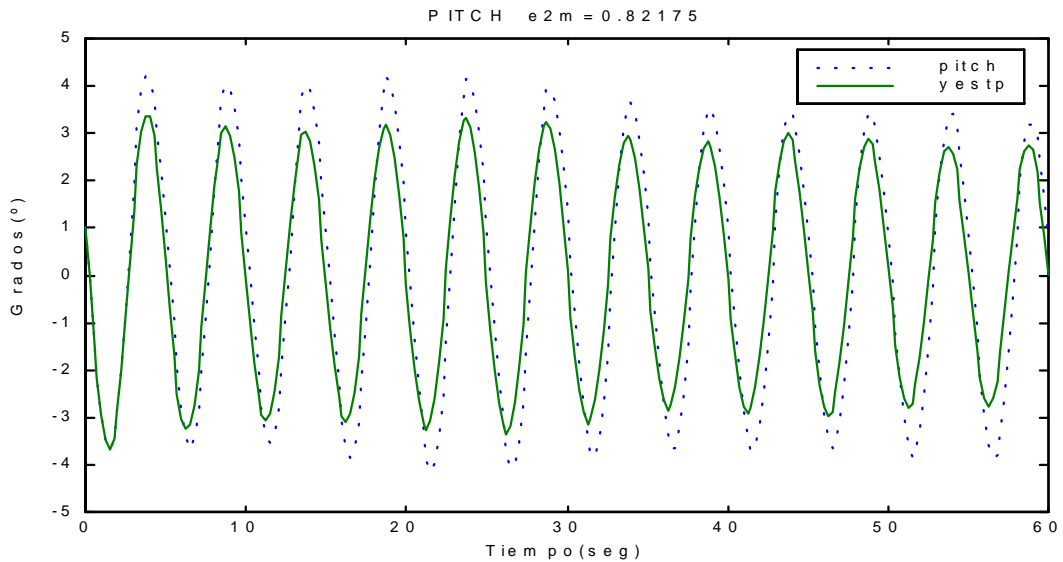


Figura 4.43 : Salida (yestp) de  $G_P(z)$  comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).

En la Figura 4.44 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje regular.(ensayo tf4025).

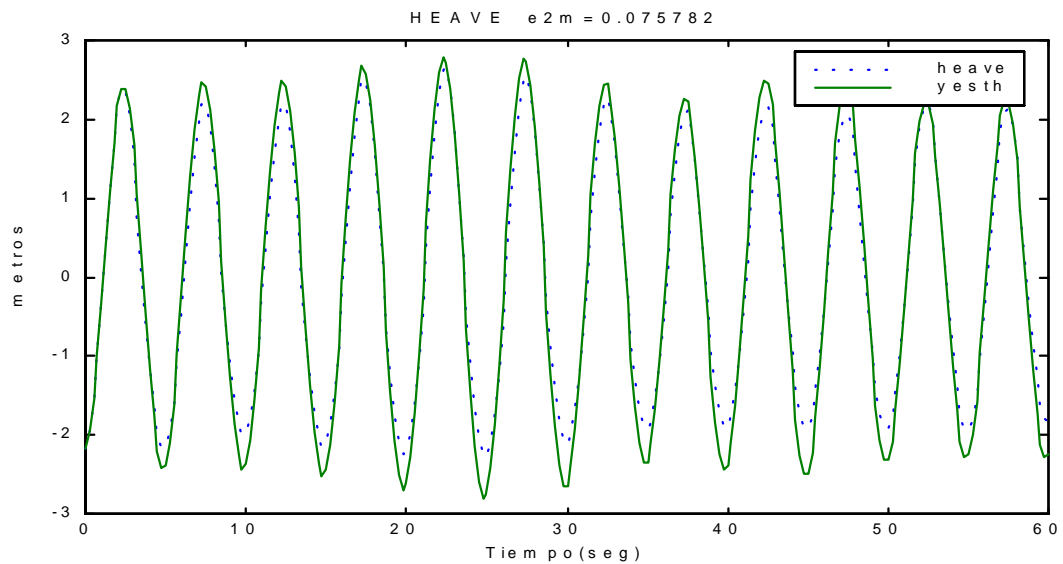


Figura 4.44 : Salida (yesth) de  $G_H(z)$  comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando oleaje regular(ensayo tf4025).

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 4.45 se muestra la salida generada por la  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.

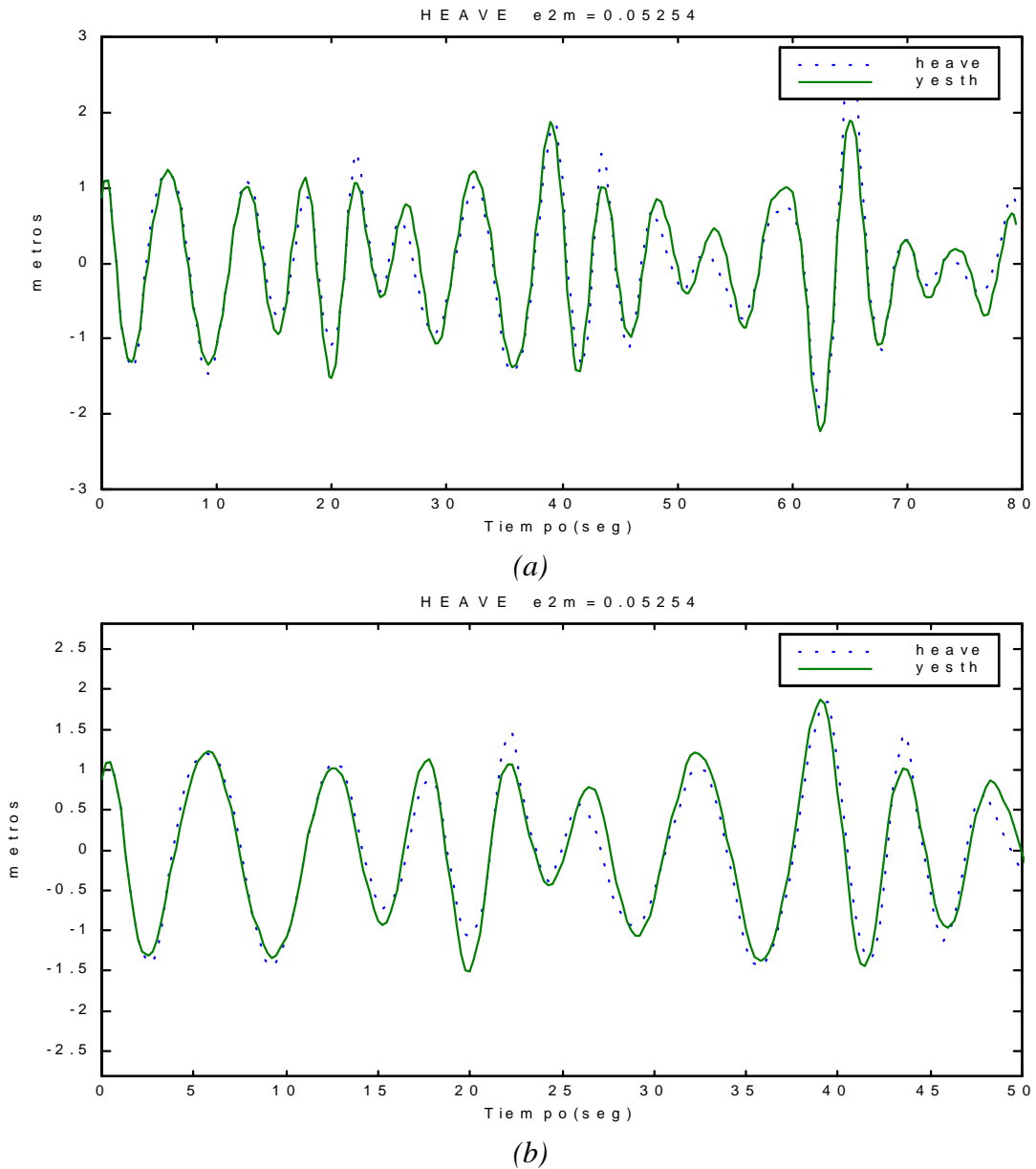


Figura 4.45 : Salida(yesth) de  $G_H(z)$  del modelo comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

## 5. MODELOS CONTINUOS SISO IDENTIFICADOS CON OLEAJE REGULAR

### 5.1 VELOCIDAD DEL BUQUE 20 NUDOS

#### 5.1.1 MODELO PARA EL MOVIMIENTO DE PITCH.

La función de transferencia  $G_p(s)$  del modelo es :

$$G_p(s) = \frac{-1.088 s^3 + 1.39 s^2 - 2.515 s}{s^5 + 2.588 s^4 + 4.597 s^3 + 5.925 s^2 + 3.81 s + 2.32}$$

El valor de la función de coste es  $V=0.179257$

En la tabla 5.1 se muestra los polos y ceros de  $G_p(s)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento

Tabla 5.1 : Polos y ceros de  $G_p(s)$ .

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-1.4903	1.4903	1
-0.24745 + 1.3176i	1.3406	0.18458
-0.24745 - 1.3176i	1.3406	0.18458
-0.30123 + 0.88064i	0.93073	0.32365
-0.30123 - 0.88064i	0.93073	0.32365

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	0	NaN
0.63849 + 1.3797i	1.5203	-0.41999
0.63849 - 1.3797i	1.5203	-0.41999

En la Figura 5.1 se muestra el diagrama de polos y ceros de  $G_p(s)$

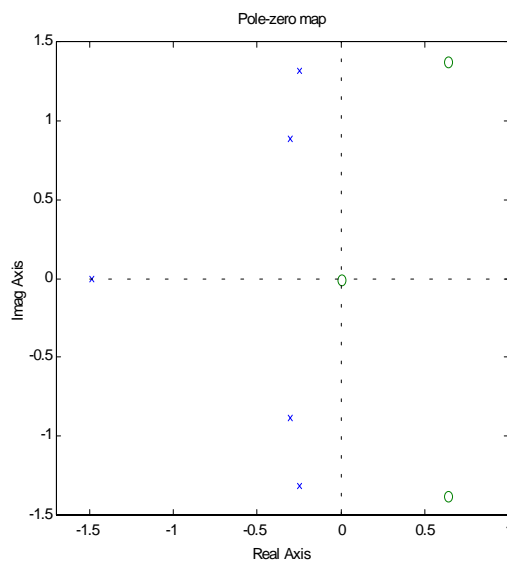


Figura 5.1 :Diagrama de polos y ceros de  $G_p(s)$

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

Si se pasa  $G_p(s)$  a discreto con un periodo de muestreo de  $T=0.25s$  se obtendría  $G_p(z)$

$$G_p(z) = \frac{-0.02435 z^{-1} + 0.06046 z^{-2} - 0.03063 z^{-3} - 0.02978 z^{-4} + 0.0243 z^{-5}}{1 - 4.278 z^{-1} + 7.437 z^{-2} - 6.55 z^{-3} + 2.916 z^{-4} - 0.5237 z^{-5}}$$

En la tabla 5.2 se muestra los polos y ceros de  $G_p(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento

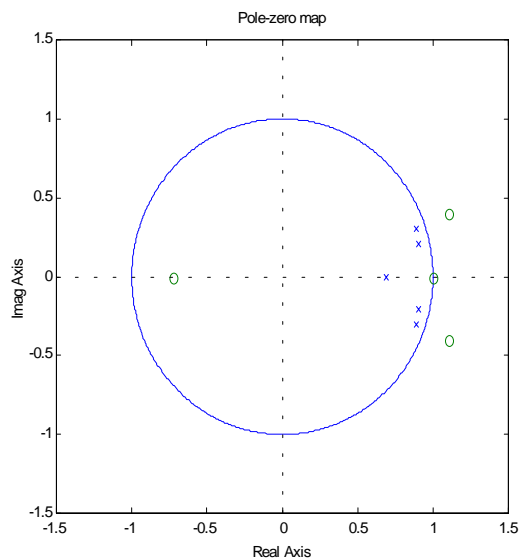
*Tabla 5.2 : Polos y ceros de  $G_p(z)$ .*

Polos		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0.88947 +	0.30407i	1.3406	0.18458
0.88947 -	0.30407i	1.3406	0.18458
0.90507 +	0.20254i	0.93073	0.32365
0.90507 -	0.20254i	0.93073	0.32365
0.68895		1.4903	1

Ceros		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
1.1039 +	0.39666i	1.5203	-0.41985
1.1039 -	0.39666i	1.5203	-0.41985
1		5.7732e-015	1
-0.72516		1.2854	1

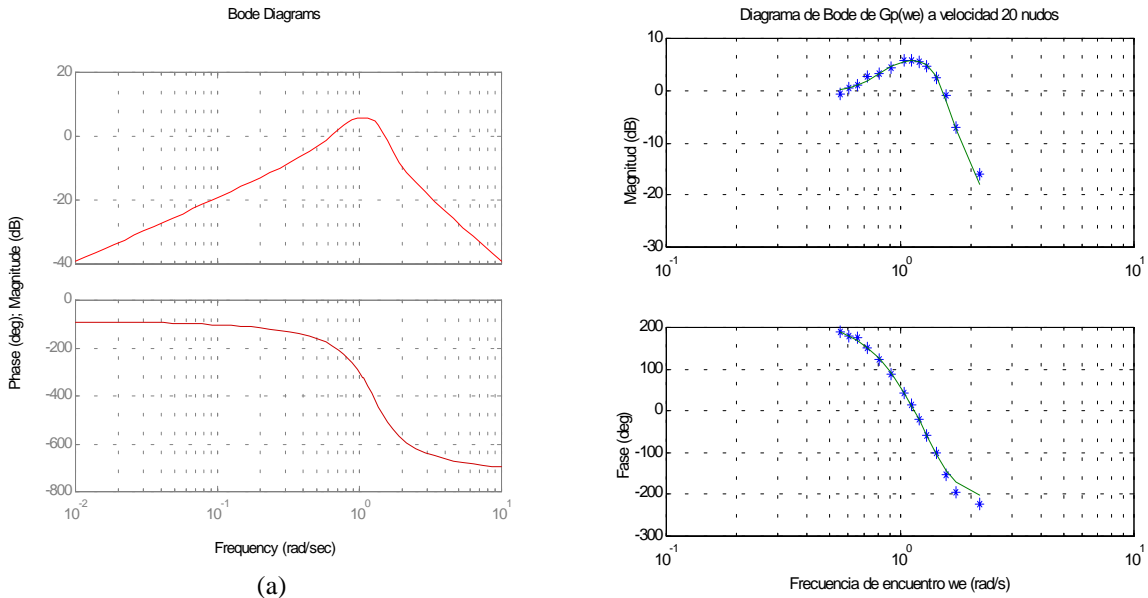
En la Figura 5.2 se muestra el diagrama de polos y ceros de  $G_p(z)$



*Figura 5.2 :Diagrama de polos y ceros de  $G_p(z)$*

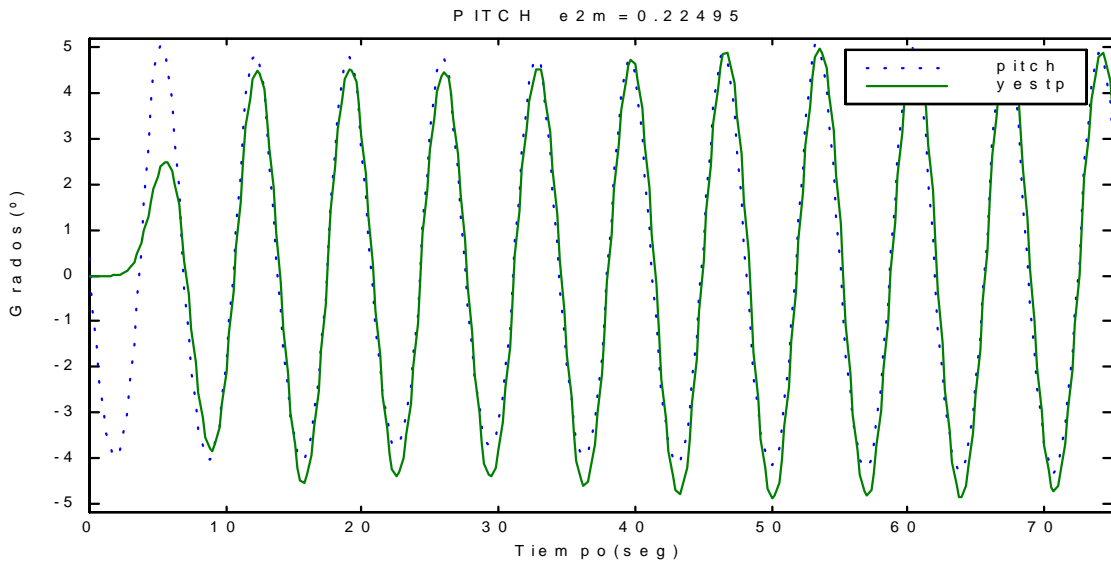
**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 5.3 se muestra el diagrama de Bode de  $G_P(s)$  comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos de las series temporales medidas en los ensayos con oleaje regular.



(a) Diagrama de Bode de  $G_P(s)$  (b) Diagrama de Bode de  $G_P(s)$  comparado con los puntos experimentales

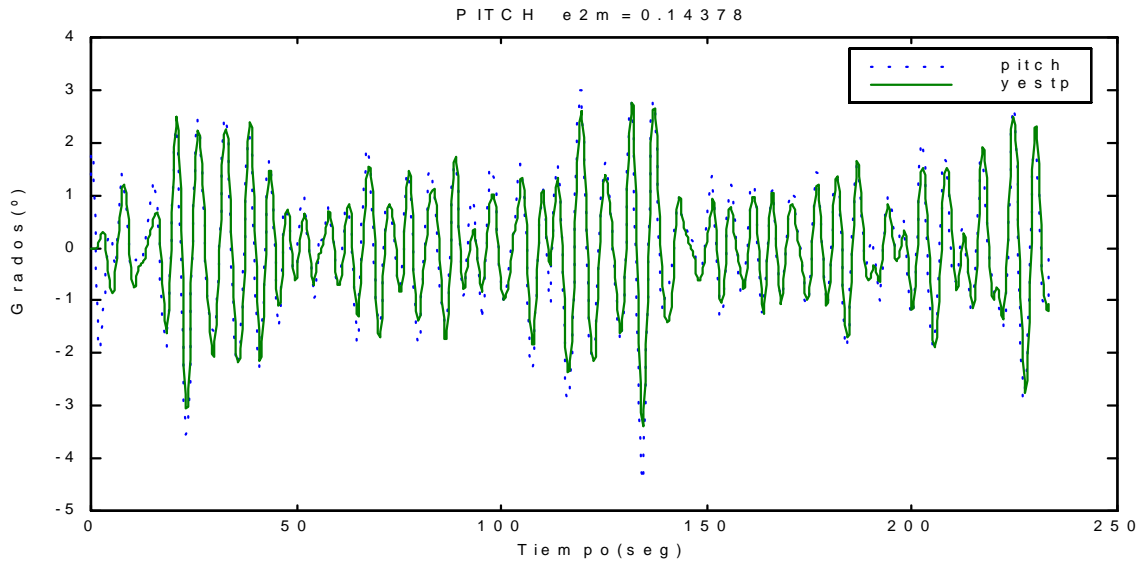
En la Figura 5.4 se muestra la salida de  $G_P(z)$  comparada a la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (tf2025)



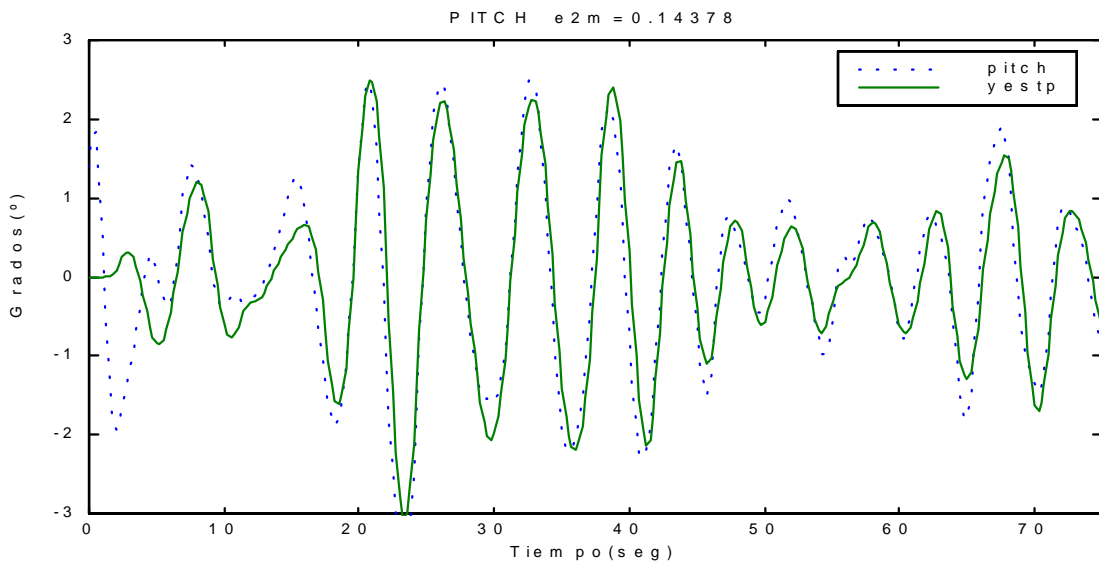
Salida( $y_{estp}$ ) de  $G_P(z)$  comparada con la salida ( $pitch$ ) medida experimentalmente utilizando como entrada oleaje regular (tf2025)

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 5.5 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada<sup>1</sup> con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 5.5 : Salida( $y_{estp}$ ) de  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida( $pitch$ ) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

<sup>1</sup> Con el fin de no falsear el error cuadrático medio  $e2m$ , las primeras cuarenta muestras de la salida estimada no se han considerado para el cálculo de  $e2m$ . La razón de esta medida es que en la simulación se utilizaron condiciones iniciales nulas lo que provoca que en los primeros 10 s de la simulación el desacuerdo entre la salida estimada y la real sea apreciable.

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

**5.1.2 MODELO PARA EL MOVIMIENTO DE HEAVE.**

La función de transferencia  $G_H(s)$  del modelo es :

$$G_H(s) = \frac{0.5815}{s^5 + 1.33 s^4 + 3.781 s^3 + 2.63 s^2 + 2.409 s + 0.5815}$$

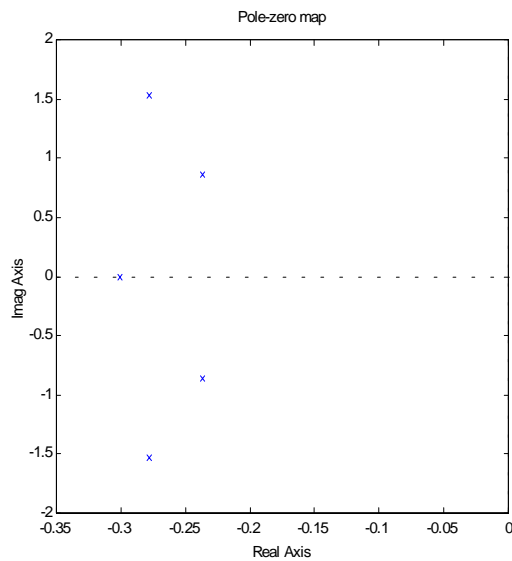
El valor de la función de coste es  $V=0.1778$ .

En la tabla 5.3 se muestra los polos de  $G_H(s)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento

*Tabla 5.3 : Polos de  $G_H(s)$  .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.27769 + 1.5254i	1.5505	0.1791
-0.27769 - 1.5254i	1.5505	0.1791
-0.23697 + 0.86461i	0.8965	0.26432
-0.23697 - 0.86461i	0.8965	0.26432
-0.30098	0.30098	1

En la Figura 5.6 se muestra el diagrama de polos y ceros de  $G_H(s)$



*Figura 5.6 :Diagrama de polos y ceros de  $G_H(s)$*



**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

Si se pasa  $G_H(s)$  a discreto con un periodo de muestreo de  $T=0.25s$  se obtendría  $G_H(z)$

$$G_H(z) = \frac{4.457e-006 z^{-1} + 0.0001086 z^{-2} + 0.0002598 z^{-3} + 9.721e-005 z^{-4} + 3.571e-006 z^{-5}}{1 - 4.5 z^{-1} + 8.261 z^{-2} - 7.729 z^{-3} + 3.686 z^{-4} - 0.7171 z^{-5}}$$

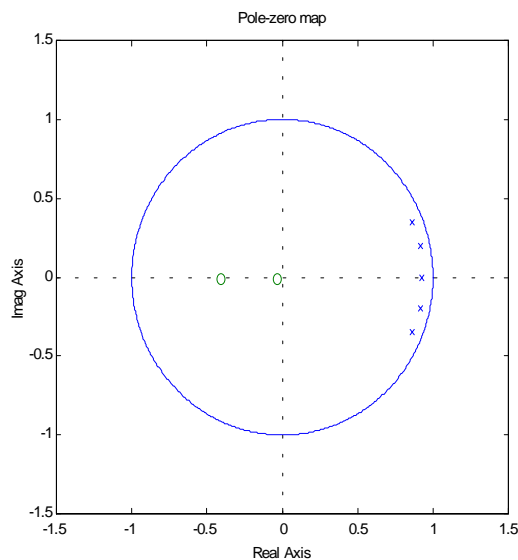
En la tabla 5.4 se muestra los polos y ceros de  $G_H(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento

*Tabla 5.4 : Polos y ceros de  $G_H(z)$ .*

Polos		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0.86591 +	0.34721i	1.5505	0.1791
0.86591 -	0.34721i	1.5505	0.1791
0.92752		0.30098	1
0.92055 +	0.20214i	0.8965	0.26432
0.92055 -	0.20214i	0.8965	0.26432

Ceros		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-21.732		12.315	-1
-2.186		3.1283	-1
-0.40942		3.5721	1
-0.041191		12.758	1

En la Figura 5.7 se muestra el diagrama de polos y ceros de  $G_H(z)$



*Figura 5.7 :Diagrama de polos y ceros de  $G_H(z)$*

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 5.8 se muestra el diagrama de Bode de  $G_H(s)$  comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos de las series temporales medidas en los ensayos con oleaje regular.

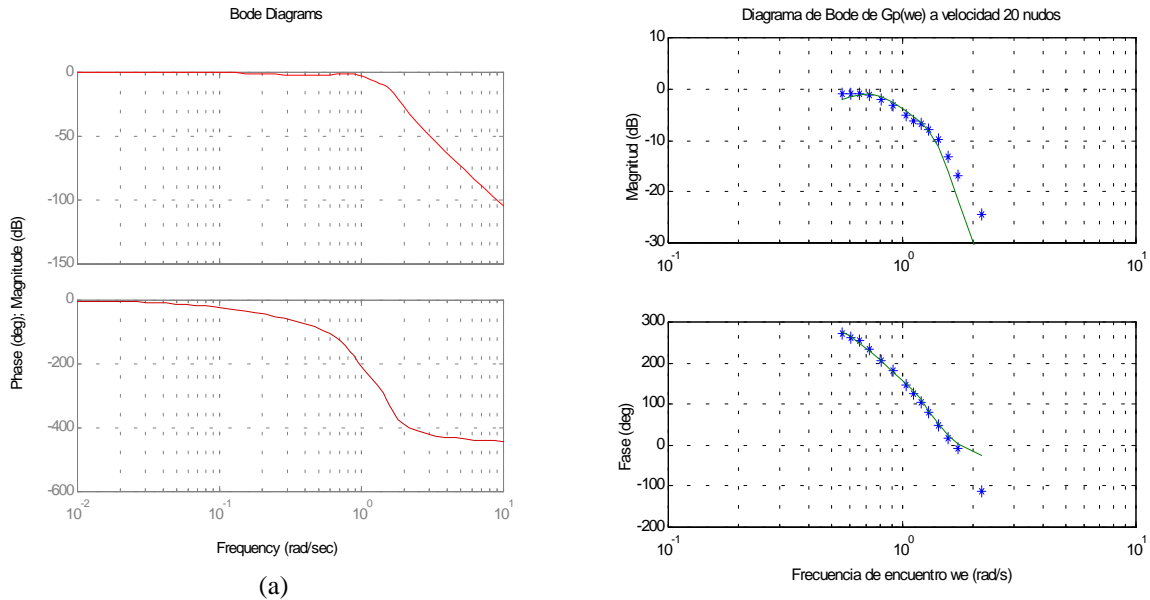


Figura 5.8 : (a) Diagrama de Bode de  $G_H(s)$  (b) Diagrama de Bode de  $G_H(s)$  comparado con los puntos experimentales

En la Figura 5.9 se muestra la salida de  $G_H(z)$  comparada a la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (tf2025)

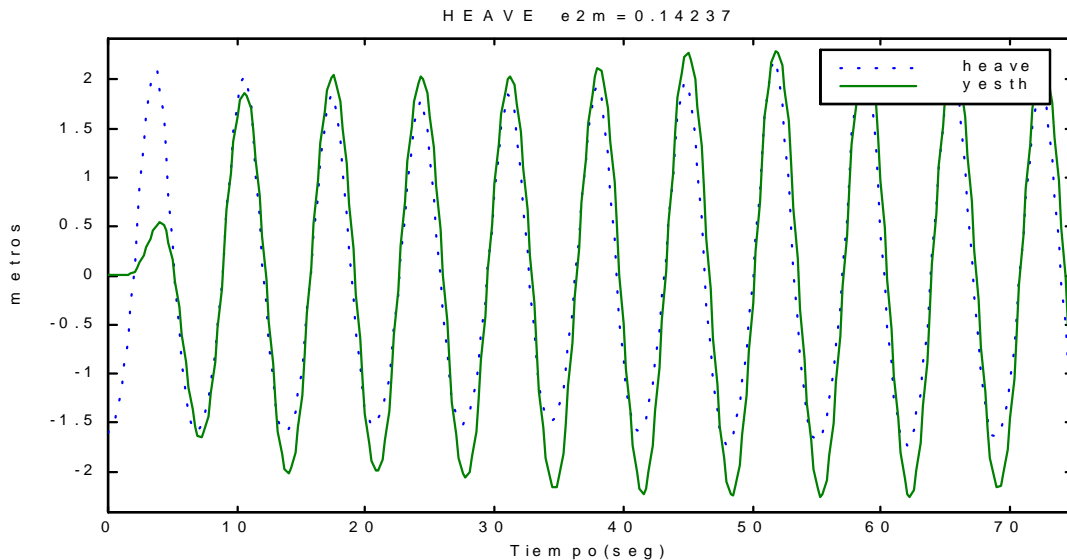
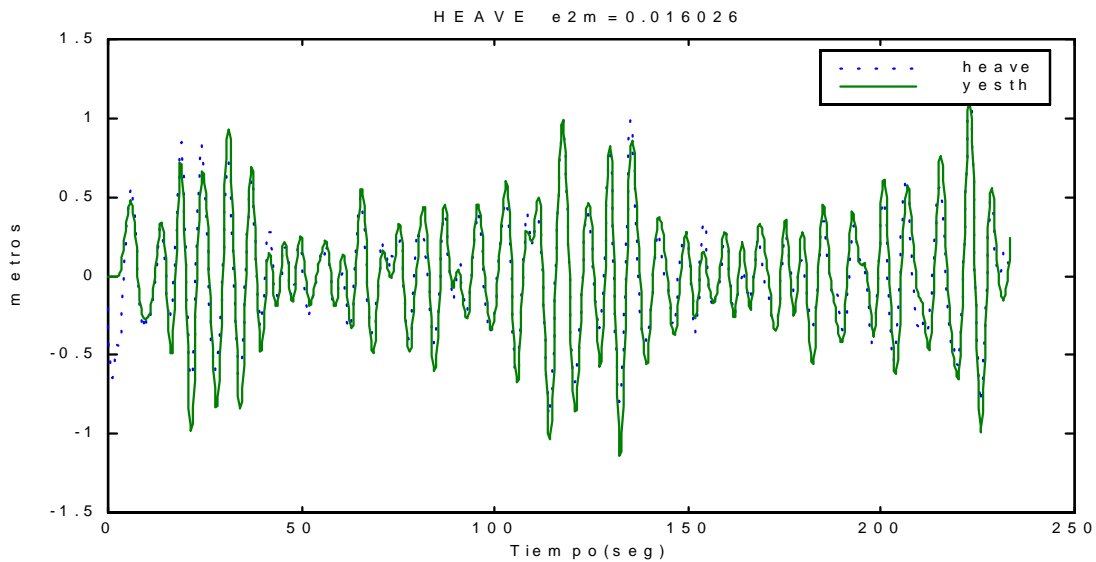


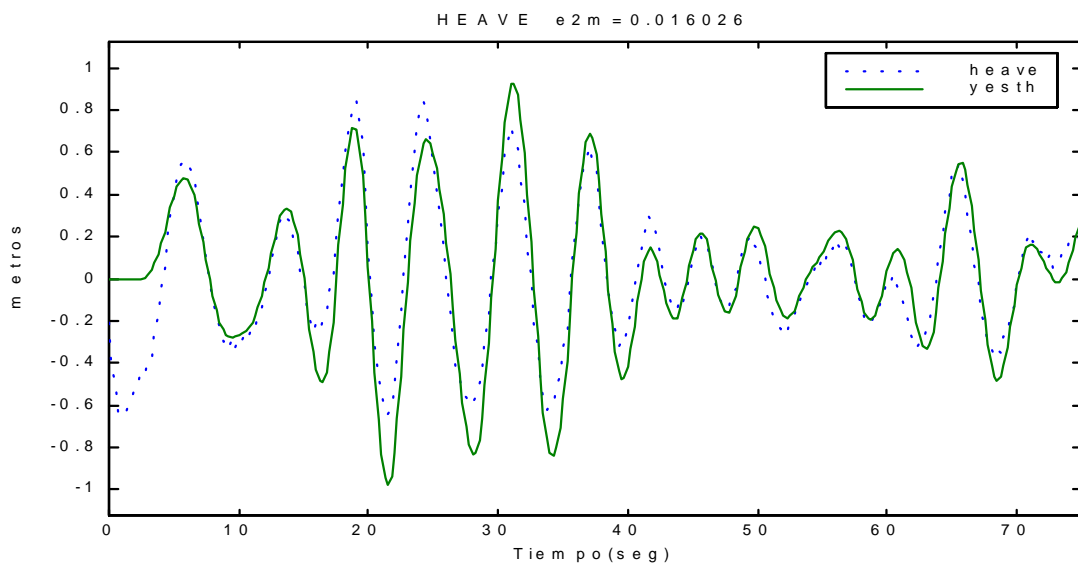
Figura 5.9 : Salida(yesth) de  $G_H(z)$  comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como entrada oleaje regular (tf2025)

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 5.10 se muestra la salida generada por la  $G_H(s)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 5.10 : Salida(yeshp) de  $G_H(s)$  del modelo comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

## 5.2 VELOCIDAD DEL BUQUE 30 NUDOS

### 5.2.1 MODELO PARA EL MOVIMIENTO DE PITCH.

La función de transferencia  $G_p(s)$  del modelo es :

$$G_p(s) = \frac{-0.9864 s^3 + 1.54 s^2 - 3.017 s}{s^5 + 2.06 s^4 + 5.201 s^3 + 5.621 s^2 + 4.997 s + 2.343}$$

El valor de la función de coste es  $V=0.13617$

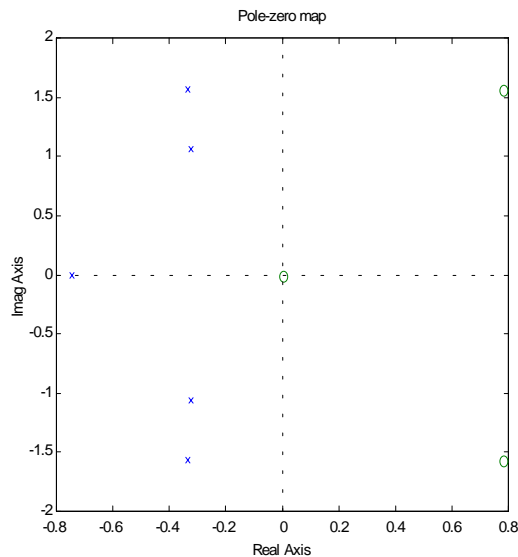
En la tabla 5.5 se muestra los polos y ceros de  $G_p(s)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento

*Tabla 5.5 : Polos y ceros de  $G_p(s)$ .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.33385 + 1.5635i	1.5987	0.20883
-0.33385 - 1.5635i	1.5987	0.20883
-0.32442 + 1.062i	1.1104	0.29216
-0.32442 - 1.062i	1.1104	0.29216
-0.74355	0.74355	1

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	0	NaN
0.78036 + 1.565i	1.7488	-0.44624
0.78036 - 1.565i	1.7488	-0.44624

En la Figura 5.11 se muestra el diagrama de polos y ceros de  $G_p(s)$



*Figura 5.11 :Diagrama de polos y ceros de  $G_p(s)$*

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

Si se pasa  $G_p(s)$  a discreto con un periodo de muestreo de  $T=0.25s$  se obtendría  $G_p(z)$

$$G_p(z) = \frac{-0.02239 z^{-1} + 0.05613 z^{-2} - 0.02959 z^{-3} - 0.02863 z^{-4} + 0.02447 z^{-5}}{1 - 4.311 z^{-1} + 7.614 z^{-2} - 6.875 z^{-3} + 3.171 z^{-4} - 0.5975 z^{-5}}$$

En la tabla 5.6 se muestra los polos y ceros de  $G_p(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento

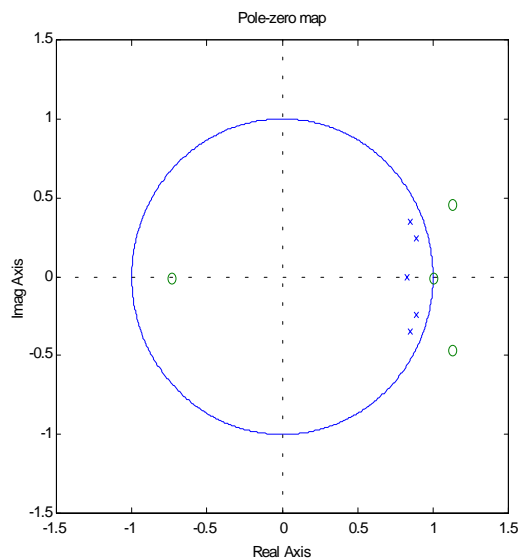
*Tabla 5.6 : Polos y ceros de  $G_p(z)$ .*

Polos		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0.85054 +	0.35048i	1.5987	0.20883
0.85054 -	0.35048i	1.5987	0.20883
0.88979 +	0.24194i	1.1104	0.29216
0.88979 -	0.24194i	1.1104	0.29216
0.83037		0.74355	1

Ceros		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
1.1235 +	0.4635i	1.7487	-0.44605
1.1235 -	0.4635i	1.7487	-0.44605
1		7.1054e-015	-1
-0.73995		1.2047	1

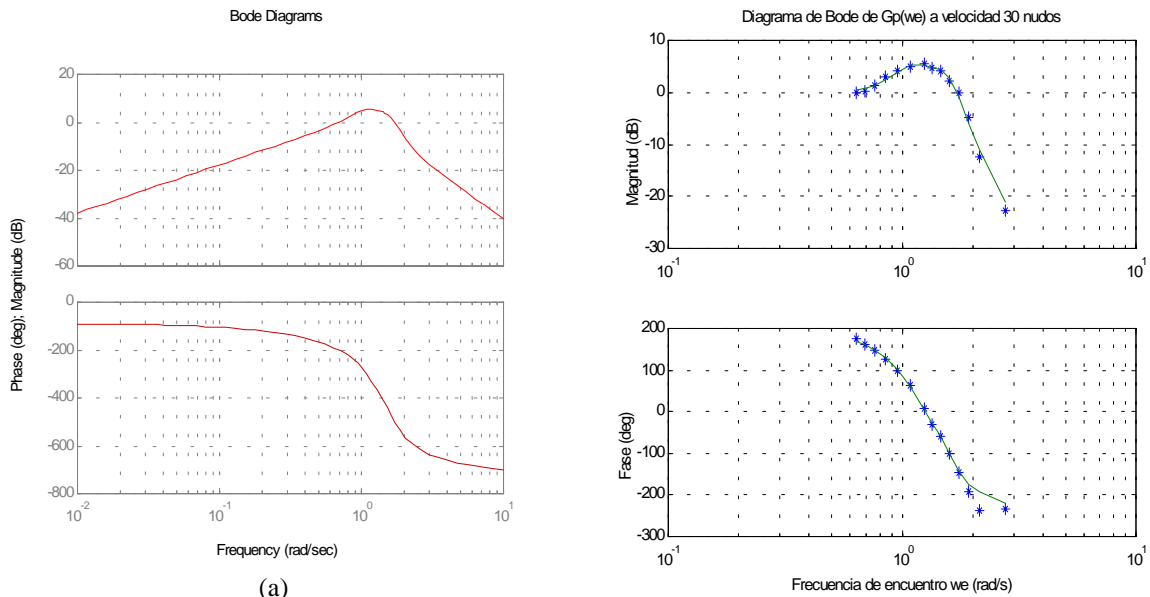
En la Figura 5.12 se muestra el diagrama de polos y ceros de  $G_p(z)$



*Figura 5.12 :Diagrama de polos y ceros de  $G_p(z)$*

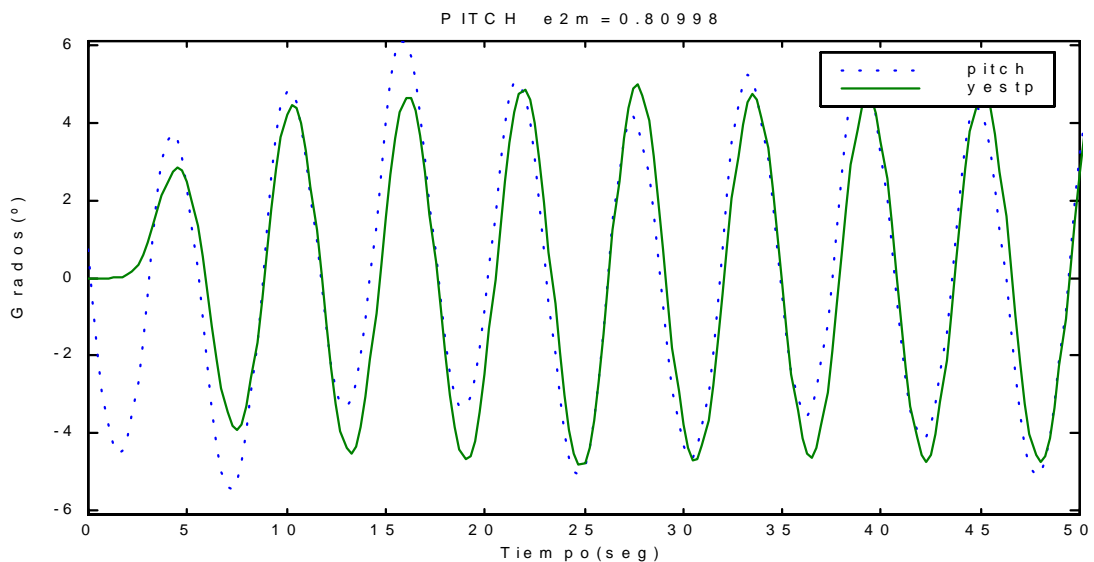
**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 5.13 se muestra el diagrama de Bode de  $G_P(s)$  comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos de las series temporales medidas en los ensayos con oleaje regular.



(a) Diagrama de Bode de  $G_P(s)$  (b) Diagrama de Bode de  $G_P(s)$  comparado con los puntos experimentales

En la Figura 5.14 se muestra la salida de  $G_P(z)$  comparada a la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (tf3025)



Salida(yestp) de  $G_P(z)$  comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando como entrada oleaje regular (tf3025)

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 5.15 se muestra la salida generada por la  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.

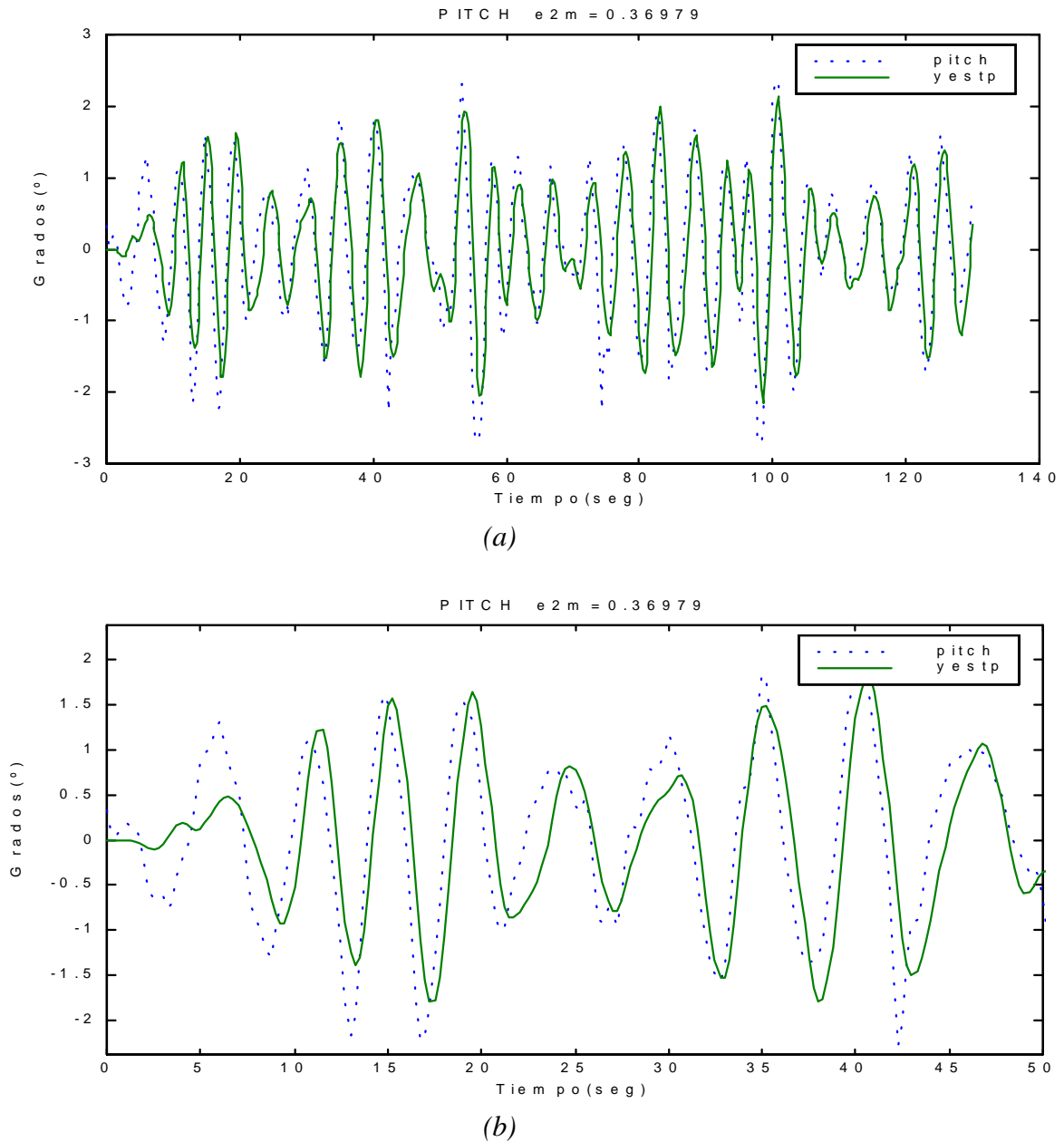


Figura 5.15 : Salida(yestp) de  $G_P(z)$  del modelo comparada con la salida(pitch) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

**5.2.2 MODELO PARA EL MOVIMIENTO DE HEAVE.**

La función de transferencia  $G_H(s)$  del modelo es :

$$G_H(s) = \frac{1.101}{s^5 + 1.629 s^4 + 4.396 s^3 + 3.888 s^2 + 3.743 s + 1.101}$$

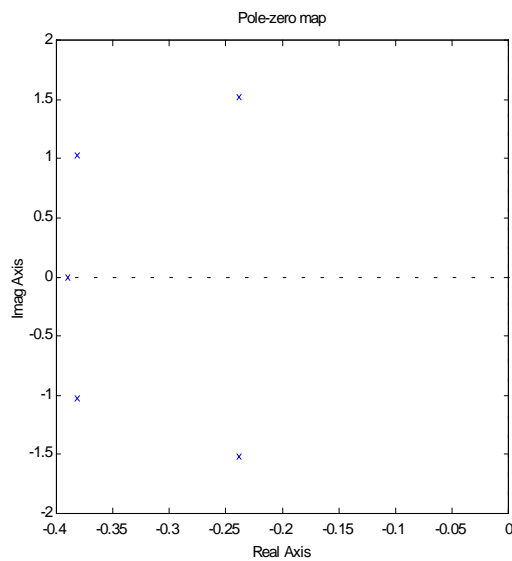
El valor de la función de coste es  $V=0.2080$

En la tabla 5.7 se muestra los polos de  $G_H(s)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento

*Tabla 5.7 : Polos de  $G_H(s)$  .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.23814 + 1.5138i	1.5324	0.15541
-0.23814 - 1.5138i	1.5324	0.15541
-0.38112 + 1.0277i	1.0961	0.34771
-0.38112 - 1.0277i	1.0961	0.34771
-0.39012	0.39012	1

En la Figura 5.16 se muestra el diagrama de polos y ceros de  $G_H(s)$



*Figura 5.16 :Diagrama de polos y ceros de  $G_H(s)$*



**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

Si se pasa  $G_H(s)$  a discreto con un periodo de muestreo de  $T=0.25s$  se obtendría  $G_H(z)$

$$G_H(z) = \frac{8.328e-006 z^{-1} + 0.0002003 z^{-2} + 0.0004731 z^{-3} + 0.0001749 z^{-4} + 6.348e-006 z^{-5}}{1 - 4.417 z^{-1} + 7.977 z^{-2} - 7.357 z^{-3} + 3.463 z^{-4} - 0.6655 z^{-5}}$$

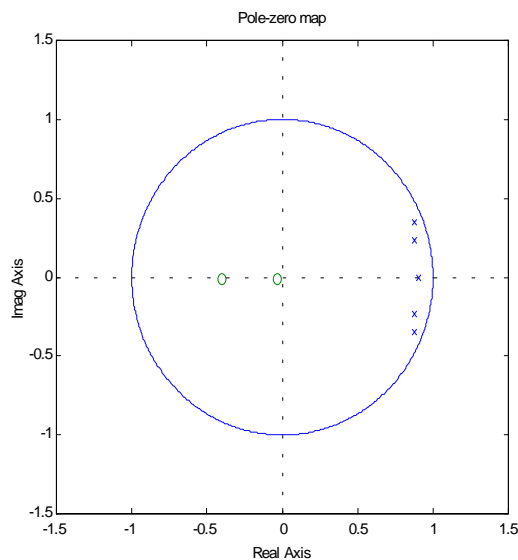
En la tabla 5.8 se muestra los polos y ceros de  $G_H(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento

*Tabla 5.8 : Polos y ceros de  $G_H(z)$ .*

Polos		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0.87554 +	0.34811i	1.5324	0.15541
0.87554 -	0.34811i	1.5324	0.15541
0.90707		0.39012	1
0.87928 +	0.23102i	1.0961	0.34771
0.87928 -	0.23102i	1.0961	0.34771

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-21.445	12.262	-1
-2.1582	3.077	-1
-0.40454	3.62	1
-0.040714	12.805	1

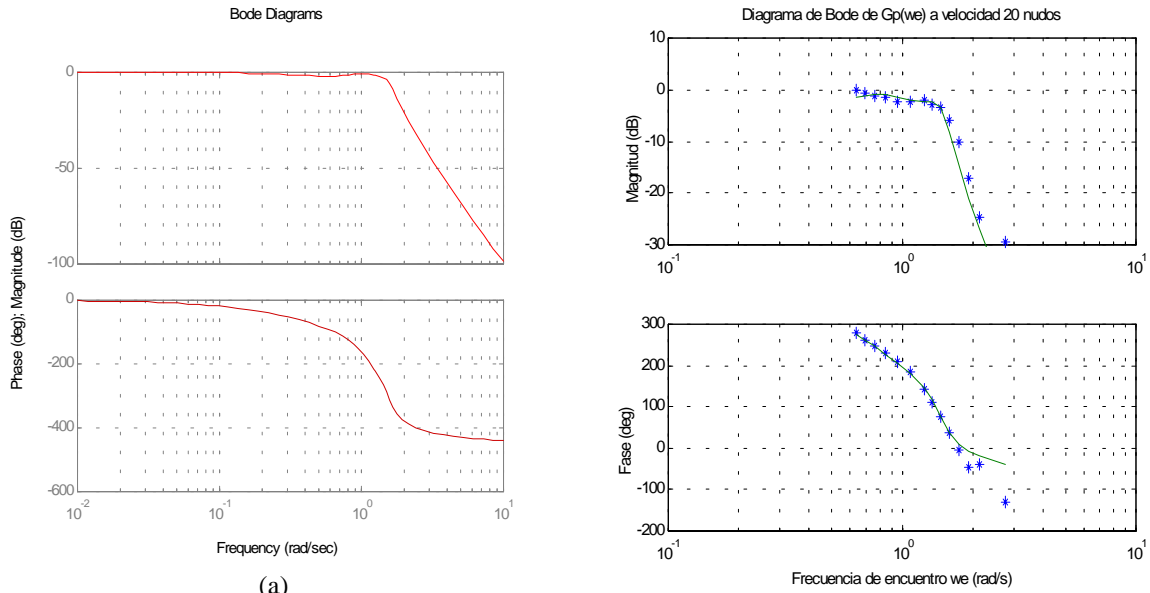
En la Figura 5.17 se muestra el diagrama de polos y ceros de  $G_H(z)$



*Figura 5.17 :Diagrama de polos y ceros de  $G_H(z)$*

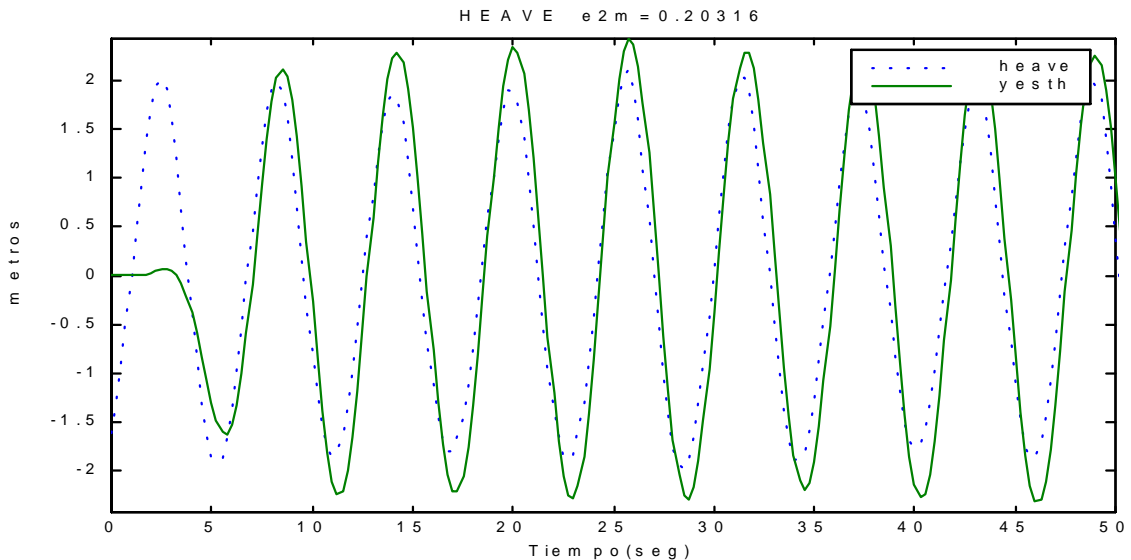
**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 5.18 se muestra el diagrama de Bode de  $G_H(s)$  comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos de las series temporales medidas en los ensayos con oleaje regular.



(a) Diagrama de Bode de  $G_H(s)$  (b) Diagrama de Bode de  $G_H(s)$  comparado con los puntos experimentales

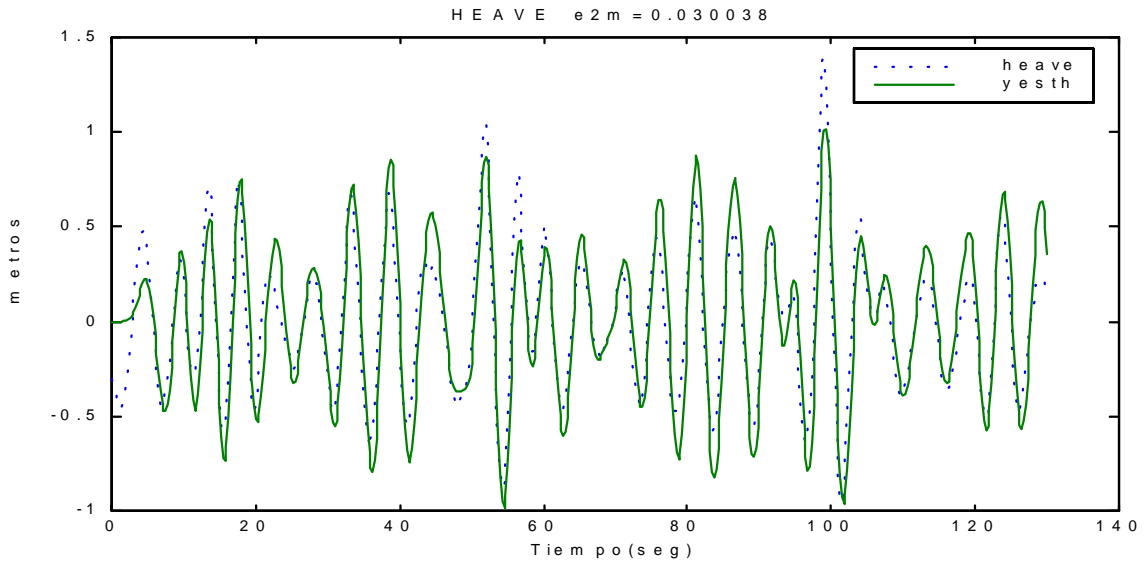
En la Figura 5.19 se muestra la salida de  $G_H(z)$  comparada a la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (tf3025)



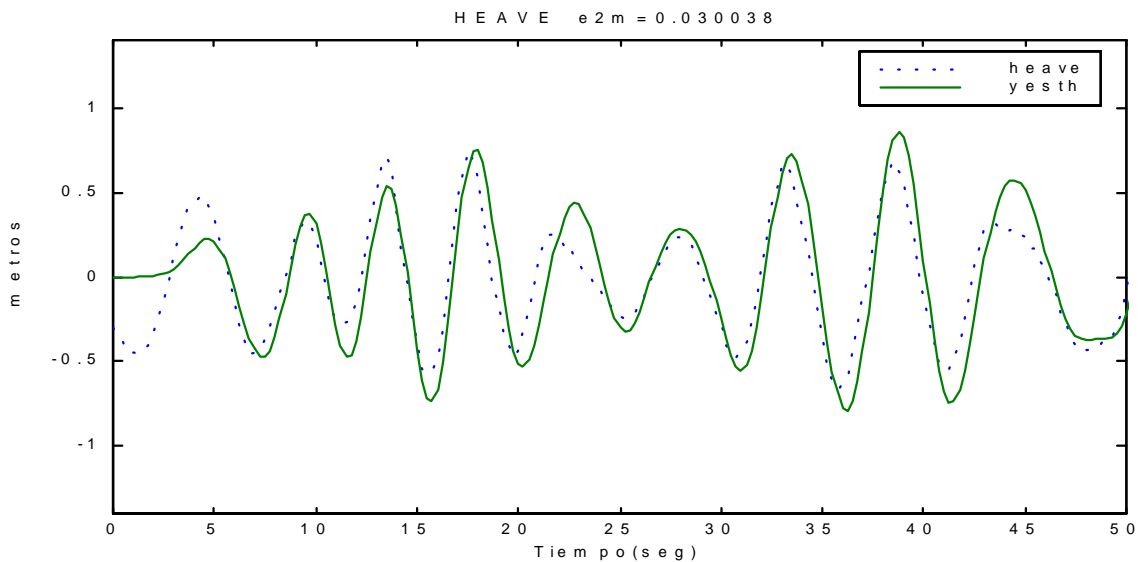
Salida(yesth) de  $G_H(z)$  comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como entrada oleaje regular (tf3025)

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 5.20 se muestra la salida generada por la  $G_H(s)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 5.20 : Salida(yeshp) de  $G_H(s)$  del modelo comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

### 5.3 VELOCIDAD DEL BUQUE 40 NUDOS

#### 5.3.1 MODELO PARA EL MOVIMIENTO DE PITCH.

La función de transferencia  $G_p(s)$  del modelo es :

$$G_p(s) = \frac{-0.9813 s^3 + 2.349 s^2 - 5.639 s}{s^5 + 3.448 s^4 + 7.537 s^3 + 11.95 s^2 + 9.546 s + 6.504}$$

El valor de la función de coste es  $V=0.1066$

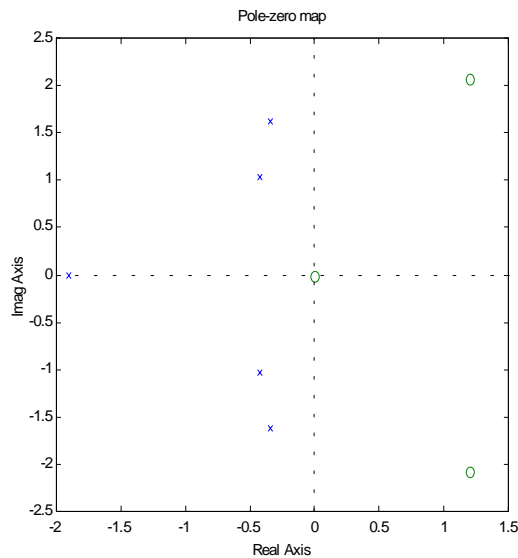
En la tabla 5.9 se muestra los polos y ceros de  $G_p(s)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento

*Tabla 5.9 : Polos y ceros de  $G_p(s)$ .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-1.899	1.899	1
-0.34682 + 1.6261i	1.6626	0.20859
-0.34682 - 1.6261i	1.6626	0.20859
-0.42754 + 1.0277i	1.1131	0.38409
-0.42754 - 1.0277i	1.1131	0.38409

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0	0	NaN
1.197 + 2.077i	2.3972	-0.49932
1.197 - 2.077i	2.3972	-0.49932

En la Figura 5.21 se muestra el diagrama de polos y ceros de  $G_p(s)$



*Figura 5.21 :Diagrama de polos y ceros de  $G_p(s)$*

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

Si se pasa  $G_p(s)$  a discreto con un periodo de muestreo de  $T=0.25s$  se obtendría  $G_p(z)$

$$G_p(z) = \frac{-0.01843 z^{-1} + 0.05022 z^{-2} - 0.03876 z^{-3} - 0.01364 z^{-4} + 0.0206 z^{-5}}{1 - 4.045 z^{-1} + 6.705 z^{-2} - 5.668 z^{-3} + 2.434 z^{-4} - 0.4224 z^{-5}}$$

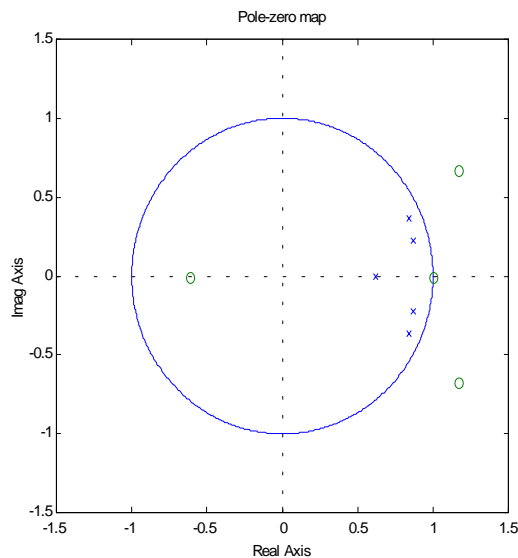
En la tabla 5.10 se muestra los polos y ceros de  $G_p(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento

*Tabla 5.10 : Polos y ceros de  $G_p(z)$ .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
1.1703 + 0.66929i	2.3971	-0.49847
1.1703 - 0.66929i	2.3971	-0.49847
1	6.6613e-015	1
-0.61517	1.9435	1

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0.84222 + 0.36257i	1.6626	0.20859
0.84222 - 0.36257i	1.6626	0.20859
0.86913 + 0.22836i	1.1131	0.38409
0.86913 - 0.22836i	1.1131	0.38409
0.62205	1.899	1

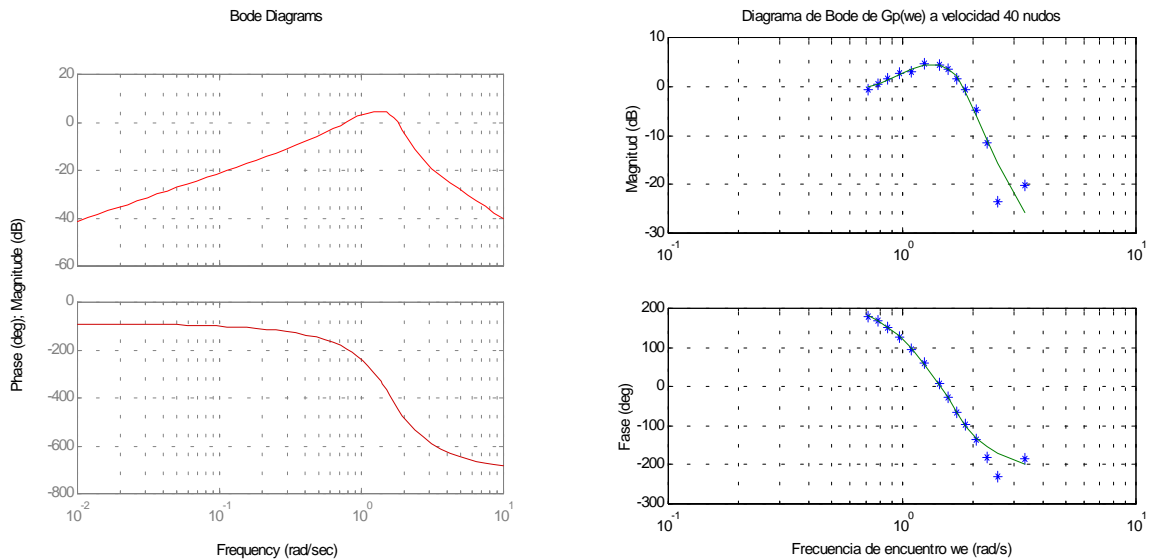
En la Figura 5.22 se muestra el diagrama de polos y ceros de  $G_p(z)$



*Figura 5.22 :Diagrama de polos y ceros de  $G_p(z)$*

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la Figura 5.23 se muestra el diagrama de Bode de  $G_P(s)$  comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos de las series temporales medidas en los ensayos con oleaje regular.



(a)

Figura 5.23 : (a) Diagrama de Bode de  $G_P(s)$  (b) Diagrama de Bode de  $G_P(s)$  comparado con los puntos experimentales

En la Figura 5.24 se muestra la salida de  $G_P(z)$  comparada a la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (tf4025)

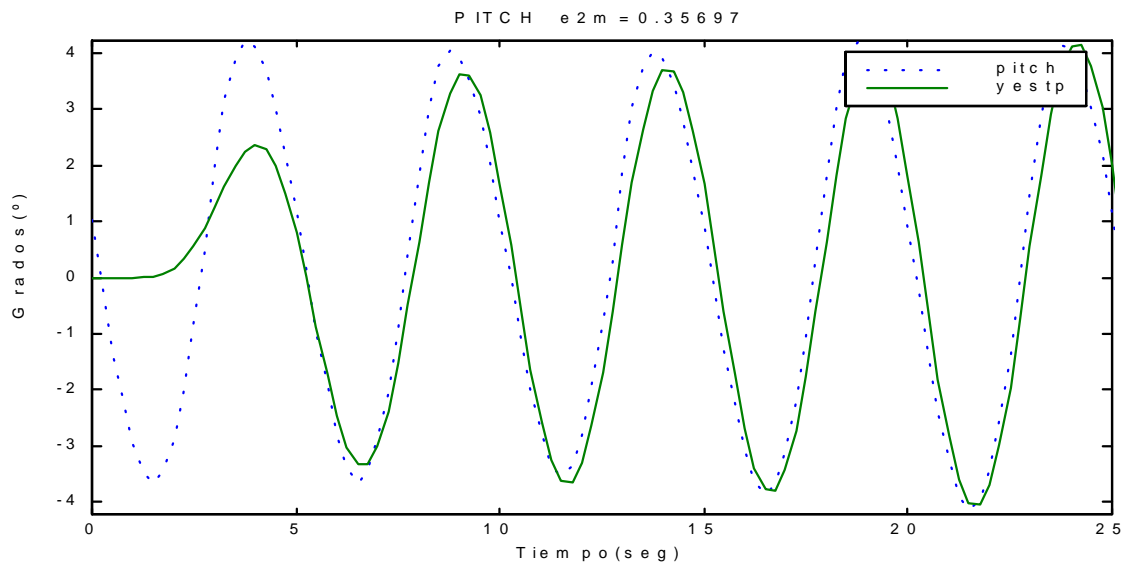
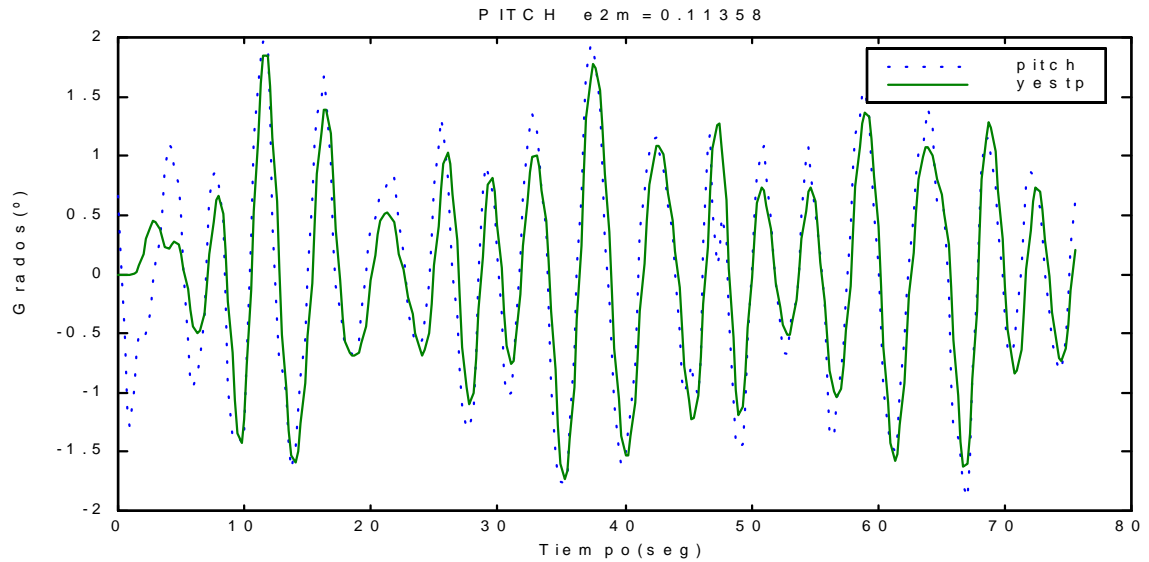


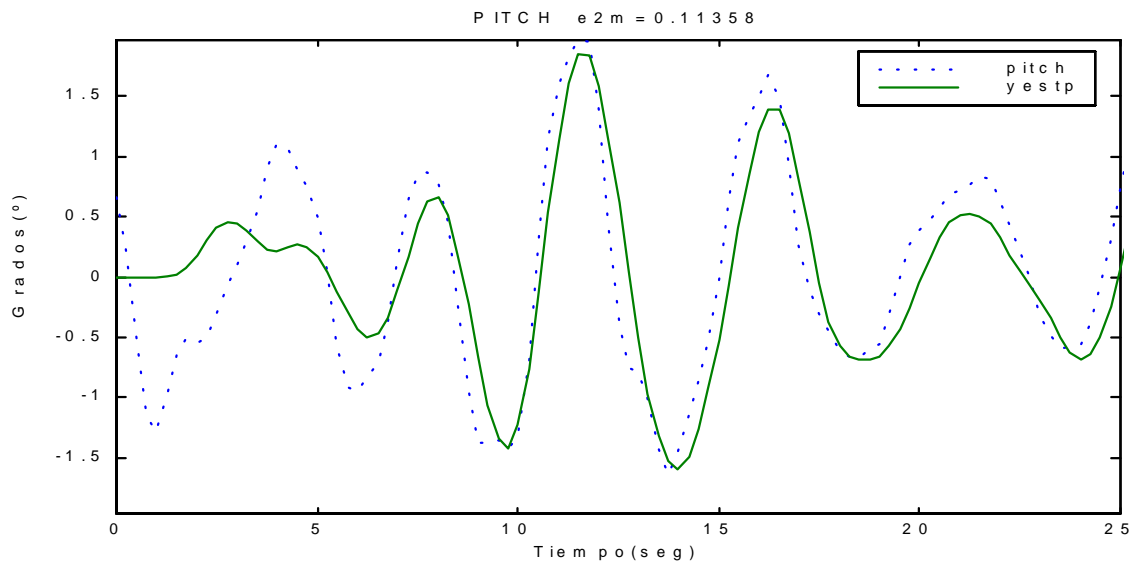
Figura 5.24 : Salida(yestp) de  $G_P(z)$  comparada con la salida (pitch) medida experimentalmente utilizando como entrada oleaje regular (tf4025)

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 5.25 se muestra la salida generada por la  $G_p(z)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 5.25 : Salida( $y_{estp}$ ) de  $G_p(z)$  del modelo comparada con la salida( $pitch$ ) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

**5.3.2 MODELO PARA EL MOVIMIENTO DE HEAVE.**

La función de transferencia  $G_H(s)$  del modelo es :

$$G_H(s) = \frac{2.049}{s^5 + 1.866 s^4 + 5.526 s^3 + 5.424 s^2 + 6.012 s + 2.049}$$

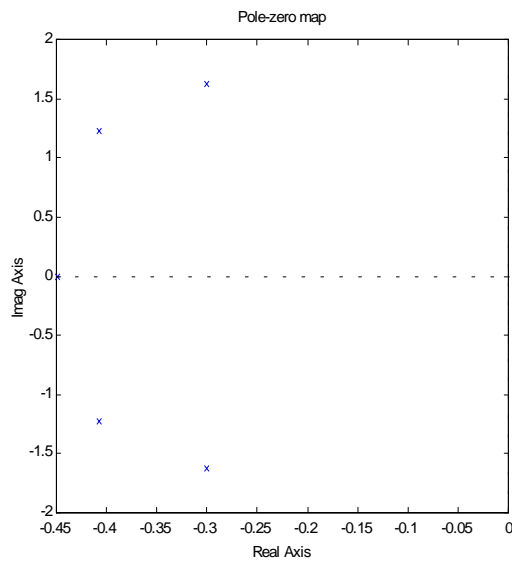
El valor de la función de coste es  $V=0.1008$

En la tabla 5.11 se muestra los polos de  $G_H(s)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento

*Tabla 5.11 : Polos de  $G_H(s)$  .*

Polos	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-0.30078 + 1.6233i	1.6509	0.18219
-0.30078 - 1.6233i	1.6509	0.18219
-0.40743 + 1.2279i	1.2937	0.31493
-0.40743 - 1.2279i	1.2937	0.31493
-0.44914	0.44914	1

En la Figura 5.26 se muestra el diagrama de polos y ceros de  $G_H(s)$



*Figura 5.26 :Diagrama de polos y ceros de  $G_H(s)$*



**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

Si se pasa  $G_H(s)$  a discreto con un periodo de muestreo de  $T=0.25s$  se obtendría  $G_H(z)$

$$G_H(z) = \frac{1.533e-005 z^{-1} + 0.0003643 z^{-2} + 0.0008511 z^{-3} + 0.0003118 z^{-4} + 1.124e-005 z^{-5}}{1 - 4.32 z^{-1} + 7.673 z^{-2} - 6.993 z^{-3} + 3.269 z^{-4} - 0.6273 z^{-5}}$$

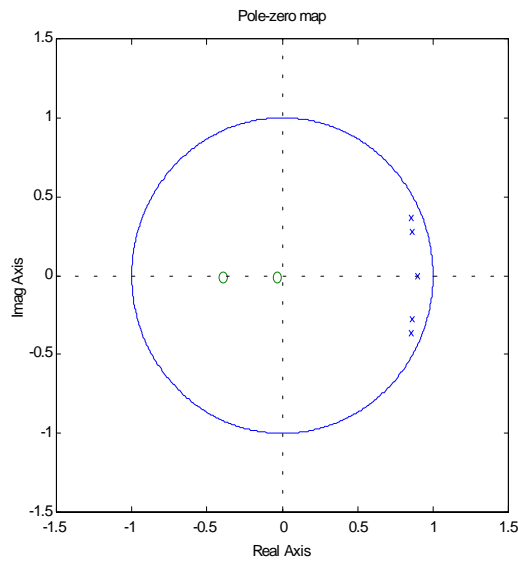
En la tabla 5.12 se muestra los polos y ceros de  $G_H(z)$  con sus frecuencias naturales y factores de amortiguamiento

*Tabla 5.12 : Polos y ceros de  $G_H(z)$ .*

Polos		Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
0.85222 +	0.36618i	1.6509	0.18219
0.85222 -	0.36618i	1.6509	0.18219
0.89379		0.44914	1
0.86094 +	0.27291i	1.2937	0.31493
0.86094 -	0.27291i	1.2937	0.31493

Ceros	Frecuencia Natural (rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
-21.179	12.212	-1
-2.1341	3.0322	-1
-0.40108	3.6544	1
-0.040421	12.834	1

En la Figura 5.27 se muestra el diagrama de polos y ceros de  $G_H(z)$



*Figura 5.27 :Diagrama de polos y ceros de  $G_H(z)$*

**CRIBAV**  
 CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 5.28 se muestra el diagrama de Bode de  $G_H(s)$  comparado con los puntos del diagrama de Bode que se obtiene utilizando los datos de las series temporales medidas en los ensayos con oleaje regular.

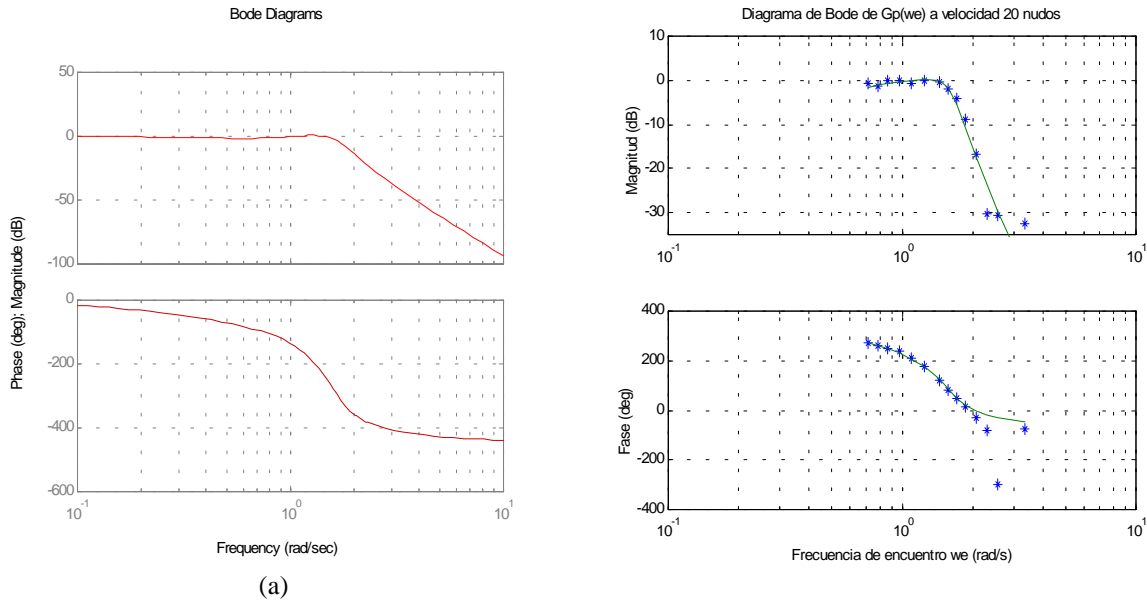


Figura 5.28 : (a) Diagrama de Bode de  $G_H(s)$  (b) Diagrama de Bode de  $G_H(s)$  comparado con los puntos experimentales

En la Figura 5.29 se muestra la salida de  $G_H(z)$  comparada a la salida medida experimentalmente cuando la entrada de excitación es oleaje regular (tf4025)

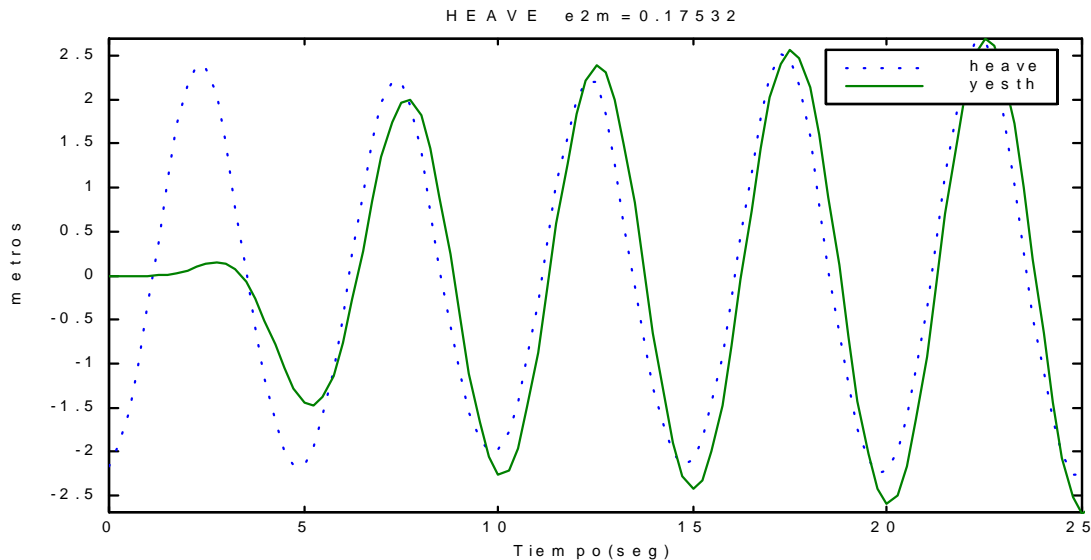
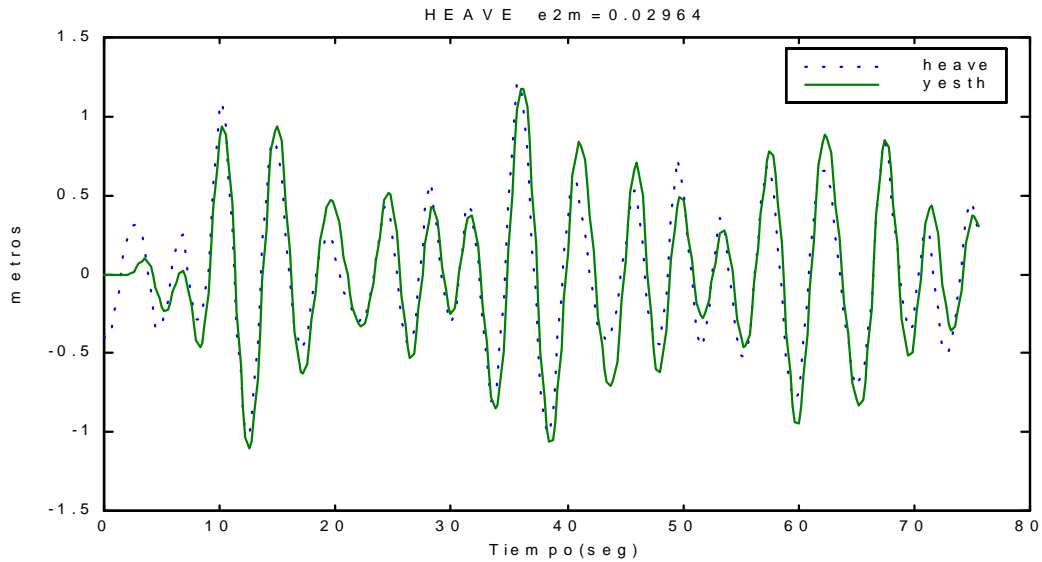


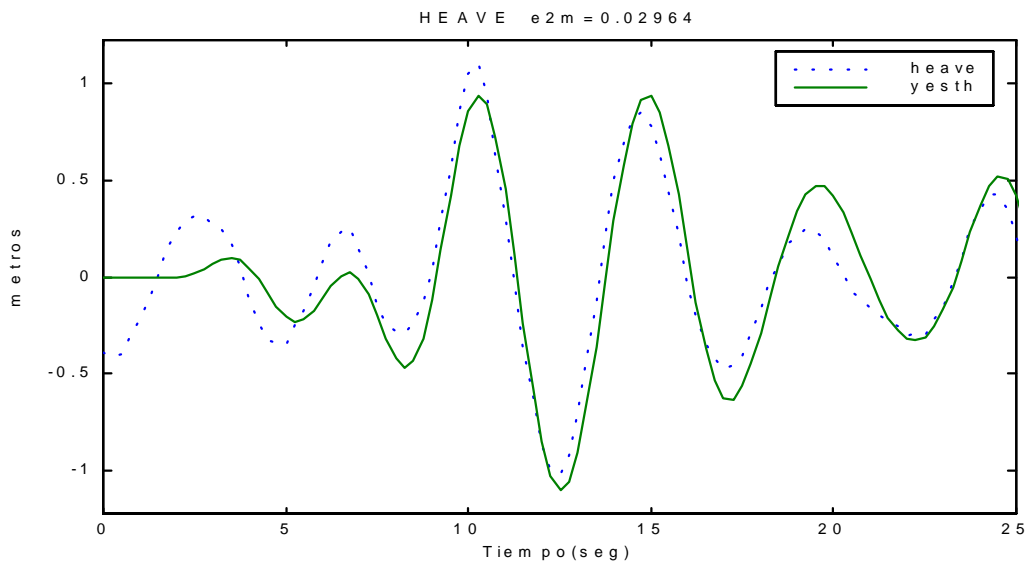
Figura 5.29 : Salida(yesth) de  $G_H(z)$  comparada con la salida (heave) medida experimentalmente utilizando como entrada oleaje regular (tf4025)

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

En la Figura 5.30 se muestra la salida generada por la  $G_H(s)$  del modelo comparada con la salida medida experimentalmente utilizando como entrada de excitación oleaje irregular.



(a)



(b)

Figura 5.30 : Salida(yeshp) de  $G_H(s)$  del modelo comparada con la salida(heave) medida experimentalmente utilizando oleaje irregular.(a)Rango completo (b)detalle

## 6. MODELO CONTINUO IDENTIFICADO CON INTERVALOS EN SUS PARAMETROS.

### 6.1 FUNCION DE TRANSFERENCIA NOMINAL

Se parte de la función de transferencia nominal  $G^I(s)$ , identificada por el método explicado en la sección 2.2.4. El conjunto de puntos  $D(j\omega)$  tiene una dimensión de  $N=14$ .

$$G^I(s) = \frac{-1.088s^3 + 1.39s^2 - 2.515s}{s^5 + 2.588s^4 + 4.597s^3 + 5.925s^2 + 3.81s + 2.32}$$

Los coeficientes de  $G^I(s)$  se muestran en la Tabla 6.1

Tabla 6.1 : Coeficientes de  $G^I(s)$

Coeficientes de $G^I(s)$	Valor de los Coeficientes de $G^I(s)$
$a_4$	2.3203
$a_3$	3.8096
$a_2$	5.9255
$a_1$	4.5972
$a_0$	2.5877
$b_2$	-2.5155
$b_1$	1.3898
$b_0$	-1.0884

### 6.2 SELECCIÓN DE PESOS W

Siguiendo las indicaciones de la sección 2.4.1

En la tabla 6.2 aparecen los coeficientes de las funciones  $G_l^I(s)$  que se han identificado donde  $l=1,2,3,\dots,N$ . Cada una de las funciones  $G_l^I(s)$  fue identificada por el mismo método que el utilizado en la obtención de  $G^I(s)$ .

Tabla 6.2 : Coeficientes de las funciones  $G_l^I(s)$

$G_1^I(s)$	$G_2^I(s)$	$G_3^I(s)$	$G_4^I(s)$	$G_5^I(s)$	$G_6^I(s)$	$G_7^I(s)$
2.2246	2.0364	2.2733	2.3106	2.3154	2.3675	2.3155
3.6760	3.4833	3.7720	3.8321	3.8058	3.8763	3.8101
5.7038	5.2747	5.8050	5.8857	5.9141	6.0338	5.9087
4.4891	4.3267	4.5607	4.6192	4.5942	4.6536	4.5992
2.5059	2.3344	2.5303	2.5559	2.5828	2.6338	2.5806
-2.3765	-2.2271	-2.4982	-2.5073	-2.5121	-2.5651	-2.5084
1.3123	1.192	1.3712	1.4060	1.3869	1.4311	1.3933
-0.9969	-0.9225	-1.0953	-1.0715	-1.0863	-1.1211	-1.0844
$G_8^I(s)$	$G_9^I(s)$	$G_{10}^I(s)$	$G_{11}^I(s)$	$G_{12}^I(s)$	$G_{13}^I(s)$	$G_{14}^I(s)$
2.2751	2.4930	2.3054	2.3741	2.6461	2.3439	2.2960
3.7812	3.9954	3.8417	3.8425	4.0086	3.8650	3.8398
5.8215	6.3610	5.9004	6.0395	6.5873	6.0156	5.9157
4.5732	4.7465	4.6160	4.6263	4.7642	4.6456	4.6239
2.5462	2.7696	2.5764	2.6328	2.8457	2.6277	2.5873
-2.4914	-2.6513	-2.4965	-2.5636	-2.7116	-2.6120	-2.5911
1.3697	1.4985	1.3931	1.4133	1.5200	1.4240	1.4052
-1.0726	-1.1684	-1.0846	-1.1149	-1.1991	-1.1439	-1.1342

**CRIBAV**  
**CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD**

En la tabla 6.3 se muestra el vector de pesos obtenido  $\vec{w}$  :

*Tabla 6.3 : Vector de pesos  $\vec{w}$*

$\vec{w}$
0.0824
0.0825
0.1864
0.0687
0.0758
0.0792
0.0495
0.0470

### 6.3 GENERACION DE INTERVALOS

De acuerdo con la sección 2.4.2 ,en la tabla 6.4 se muestra los valores obtenidos para  $\epsilon^-$  y  $\epsilon^+$  .

*Tabla 6.4 :Valores de  $\epsilon^-$  y  $\epsilon^+$*

$\epsilon^-$	$\epsilon^+$
-0.99284	1.7861
-1.5655	0.70879
-0.77521	0.30428
-0.94704	0.48051
-0.40392	3.3657
-1.7439	0.46764
-3.8532	0.2322
-1.3959	5.2

En la tabla 6.5 se muestran los intervalos para cada uno de los coeficientes de  $G^I(s)$

*Tabla 6.5 :Intervalos Generados.*

INTERVALOS		
Extremo Inferior	Valor Nominal	Extremo Superior
2.2385	2.3203	2.4675
3.6804	3.8096	3.8681
5.781	5.9255	5.9822
4.5321	4.5972	4.6302
2.5571	2.5877	2.8427
-2.6535	-2.5155	-2.4784
1.1991	1.3898	1.4013
-1.154	-1.0884	-0.84392

## 7. ESTUDIO DE LAS ACELERACIONES VERTICALES.

### 7.1 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.

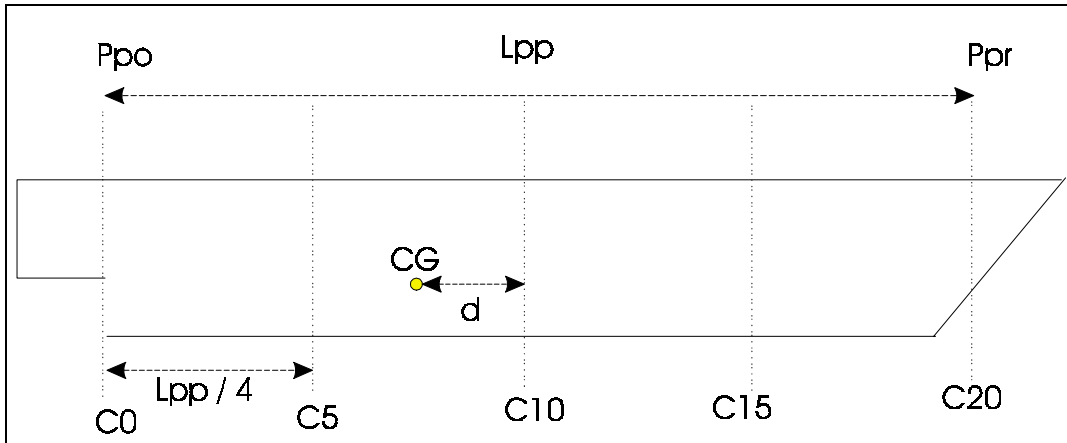


Figura 7.1 :Sección longitudinal del modelo a escala del TF-120

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  $a_{vH}$

$$a_v = a_{vP} + a_{vH} \quad (7.1)$$

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

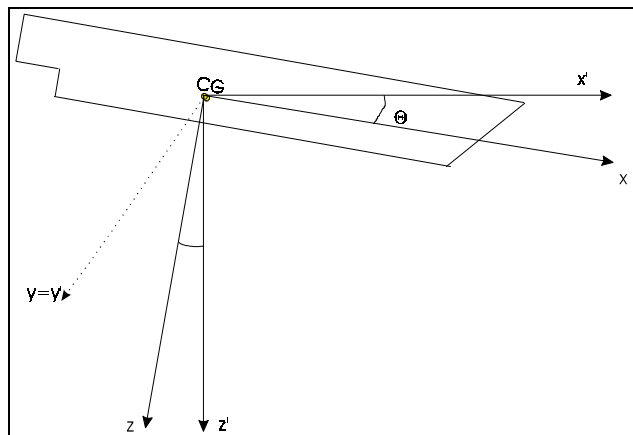


Figura 7.2 :Disposición de los ejes absolutos( $x',y',z'$ ) y de los ejes fijos al buque ( $x,y,z$ ).

**7.1.1 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
- $\theta$  desplazamiento angular de pitch (positivo cuando la proa se hunde)
- $z$  desplazamiento de heave.

Se sabe que :

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (7.2)$$

Luego la aceleración se obtendrá derivando la ecuación (7.2)

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{\alpha} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r} = \vec{a}_t + \vec{a}_n \quad (7.3)$$

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

$$a_{VP} = -x \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (7.4)$$

De la expresión (7.4) se puede ver que  $a_{VP}$  será directamente proporcional a la distancia x del punto donde se coloque 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 :

$$a_{VH} = \cos\theta \cdot \frac{d^2z}{dt^2} \quad (7.5)$$

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

$$a_v = a_{VP} + a_{VH} = -x \frac{d^2\theta}{dt^2} + \cos\theta \frac{d^2z}{dt^2} \quad (7.6)$$

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

$$a_v = a_{VP} + a_{VH} = -13.75 \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + \cos\theta \frac{d^2z}{dt^2} \quad (7.7)$$

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

$$\frac{d^2s}{dt^2} = \frac{1}{h^2} \left[ \Delta^2 s - \Delta^3 s + \frac{11}{12} \Delta^4 s - \frac{5}{6} \Delta^5 s \right] \quad (7.8)$$

$h = 0.25$

## 7.2 ACELERACION VERTICAL OBTENIDAS CON LOS MODELOS SISO DISCRETOS IDENTIFICADOS.

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

Se designará por  $ac10e$  a la aceleración vertical que se obtiene para la cuaderna C10 de aplicar las ecuaciones (7.7) y (7.8) a las series temporales medidas de pitch y de heave en los ensayos.

Se designará por  $ac10m$  a la aceleración vertical que se obtiene para la cuaderna C10 de aplicar las ecuaciones (7.7) y (7.8) a las series temporales de pitch y de heave obtenidas a partir de los modelos siso discretos identificados.

### 7.2.1 ACELERACION VERTICAL OBTENIDA CON MODELOS IDENTIFICADOS A $V=20$ NUDOS Y ESTADO DE LA MAR 4.

El modelo para el pitch es el (10,10,8)P y el modelo para el heave es el(10,8,5)H. En la Figura 7.3 se muestra las aceleraciones  $ac10$ ,  $ac10e$  y  $ac10m$ .

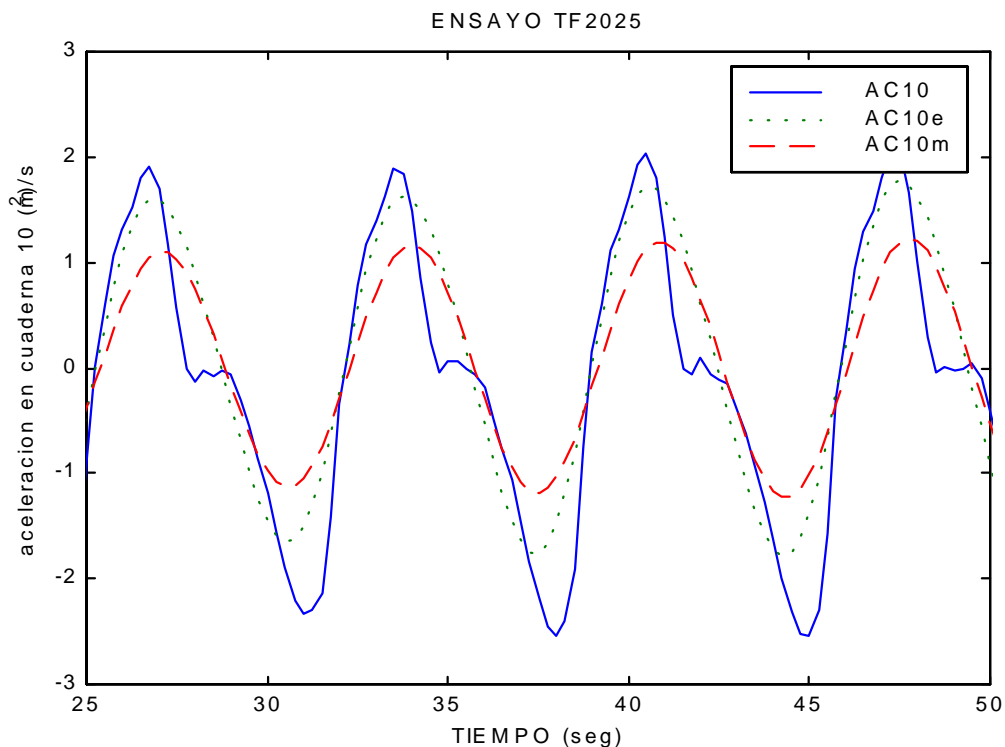


Figura 7.3 :Aceleraciones verticales  $ac10$ ,  $ac10e$  y  $ac10m$  obtenida con los modelos (10,10,8)P y (10,8,5)H



### 7.2.2 ACELERACION VERTICAL OBTENIDA CON MODELOS IDENTIFICADOS A $V=20$ NUDOS Y ESTADO DE LA MAR 5.

El modelo para el pitch es el (10,10,8)P y el modelo para el heave es el(10,10,4)H. En la Figura 7.4 se muestra las aceleraciones  $ac_{10}$ ,  $ac_{10e}$  y  $ac_{10m}$ .

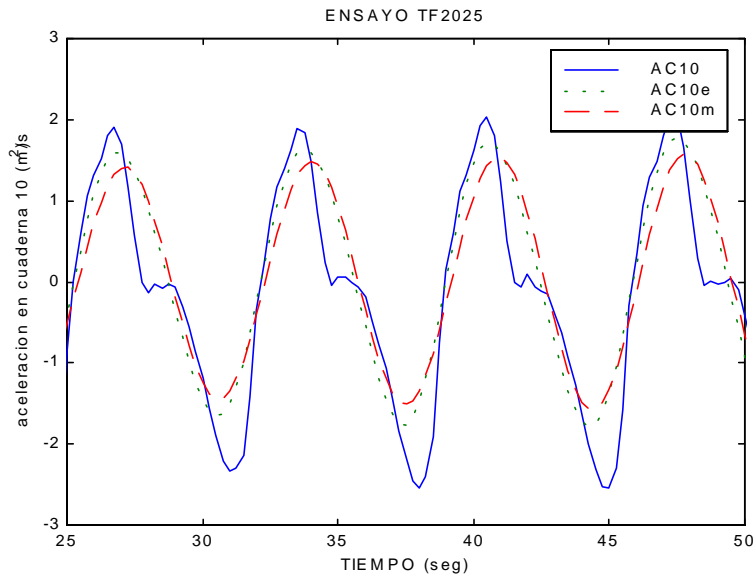


Figura 7.4 :Aceleraciones verticales  $ac_{10}$ ,  $ac_{10e}$  y  $ac_{10m}$  obtenida con los modelos (10,10,8)P y (10,10,4)H

### 7.2.3 ACELERACION VERTICAL OBTENIDA CON MODELOS IDENTIFICADOS A $V=20$ NUDOS Y ESTADO DE LA MAR 6.

El modelo para el pitch es el (10,10,6)P y el modelo para el heave es el(10,10,1)H. En la Figura 7.5 se muestra las aceleraciones  $ac_{10}$ ,  $ac_{10e}$  y  $ac_{10m}$ .

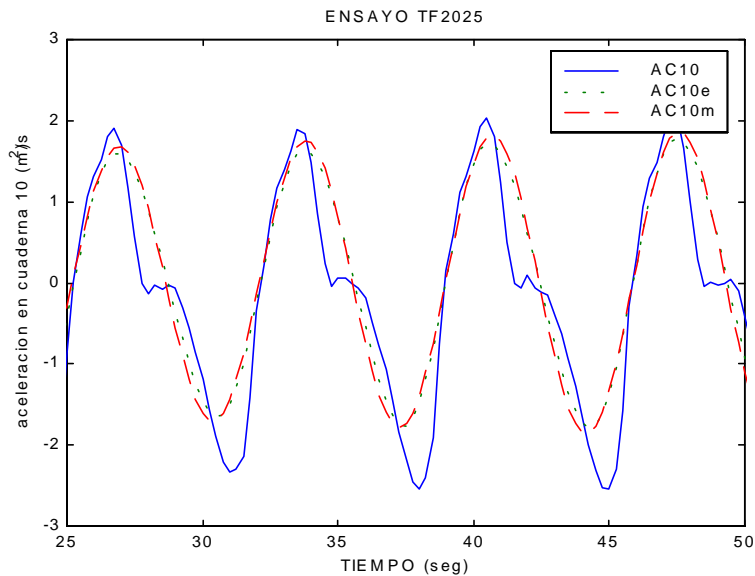


Figura 7.5 :Aceleraciones verticales  $ac_{10}$ ,  $ac_{10e}$  y  $ac_{10m}$  obtenida con los modelos (10,10,6)P y (10,10,1)H

### 7.2.4 ACELERACION VERTICAL OBTENIDA CON MODELOS IDENTIFICADOS A V=30 NUDOS Y ESTADO DE LA MAR 4.

El modelo para el pitch es el (10,8,8)P y el modelo para el heave es el (10,8,5)H. En la Figura 7.6 se muestra las aceleraciones ac10, ac10e y ac10m.

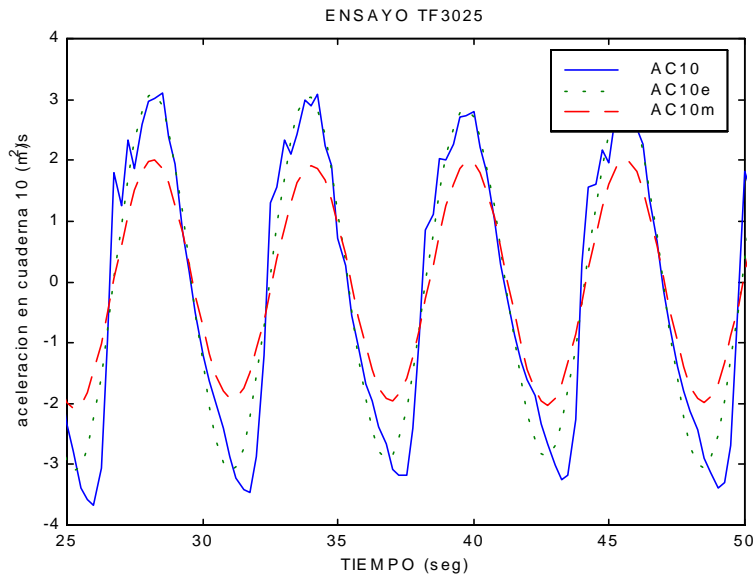


Figura 7.6 :Aceleraciones verticales ac10,ac10e y ac10m obtenida con los modelos (10,8,8)P y (10,8,5)H

### 7.2.5 ACELERACION VERTICAL OBTENIDA CON MODELOS IDENTIFICADOS A V=30 NUDOS Y ESTADO DE LA MAR 5.

El modelo para el pitch es el (7,7,8)P y el modelo para el heave es el (10,10,6)H. En la Figura 7.7 se muestra las aceleraciones ac10, ac10e y ac10m.

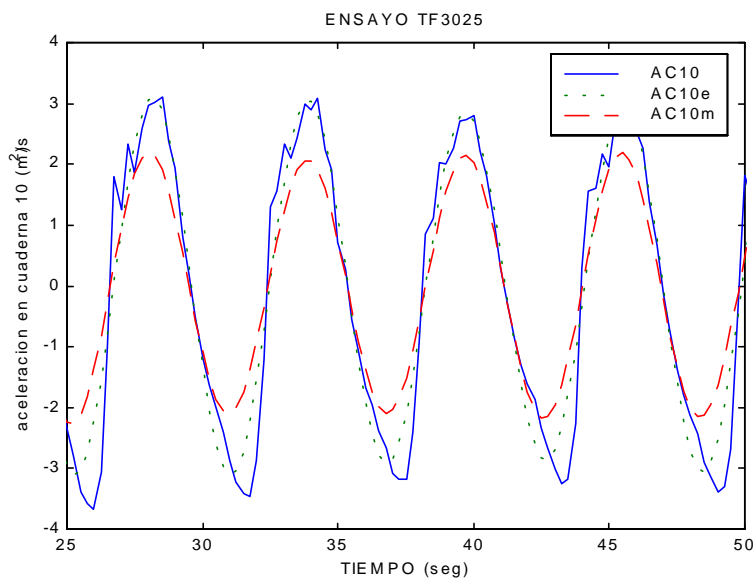


Figura 7.7 :Aceleraciones verticales ac10,ac10e y ac10m obtenida con los modelos (7,7,8)P y (10,10,6)H

**CRIBAV**  
CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

**7.2.6 ACELERACION VERTICAL OBTENIDA CON MODELOS IDENTIFICADOS A V=30 NUDOS Y ESTADO DE LA MAR 6.**

El modelo para el pitch es el (10,10,6)P y el modelo para el heave es el (10,8,4)H. En la Figura 7.8 se muestra las aceleraciones  $ac_{10}$ ,  $ac_{10e}$  y  $ac_{10m}$ .

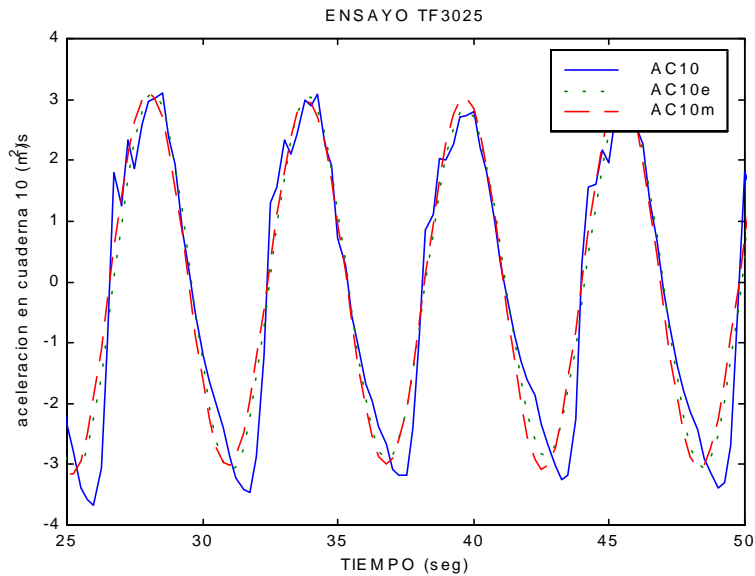


Figura 7.8 :Aceleraciones verticales  $ac_{10}$ ,  $ac_{10e}$  y  $ac_{10m}$  obtenida con los modelos (10,10,6)P y (10,8,4)H

**7.2.7 ACELERACION VERTICAL OBTENIDA CON MODELOS IDENTIFICADOS A V=40 NUDOS Y ESTADO DE LA MAR 4.**

El modelo para el pitch es el (9,9,9)P y el modelo para el heave es el (10,10,4)H. En la Figura 7.9 se muestra las aceleraciones  $ac_{10}$ ,  $ac_{10e}$  y  $ac_{10m}$ .

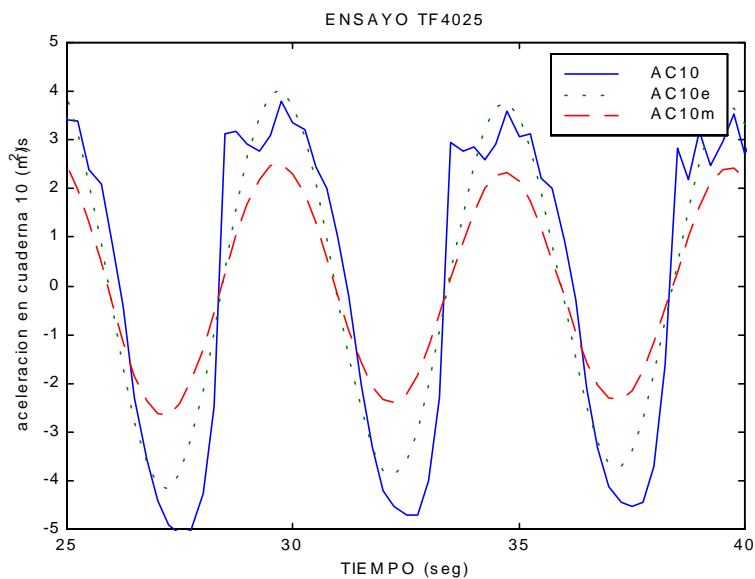


Figura 7.9 :Aceleraciones verticales  $ac_{10}$ ,  $ac_{10e}$  y  $ac_{10m}$  obtenida con los modelos (9,9,9)P y (10,10,4)H

### 7.2.8 ACELERACION VERTICAL OBTENIDA CON MODELOS IDENTIFICADOS A $V=40$ NUDOS Y ESTADO DE LA MAR 5.

El modelo para el pitch es el (10,10,6)P y el modelo para el heave es el (10,10,3)H. En la Figura 7.10 se muestra las aceleraciones  $ac_{10}$ ,  $ac_{10e}$  y  $ac_{10m}$ .

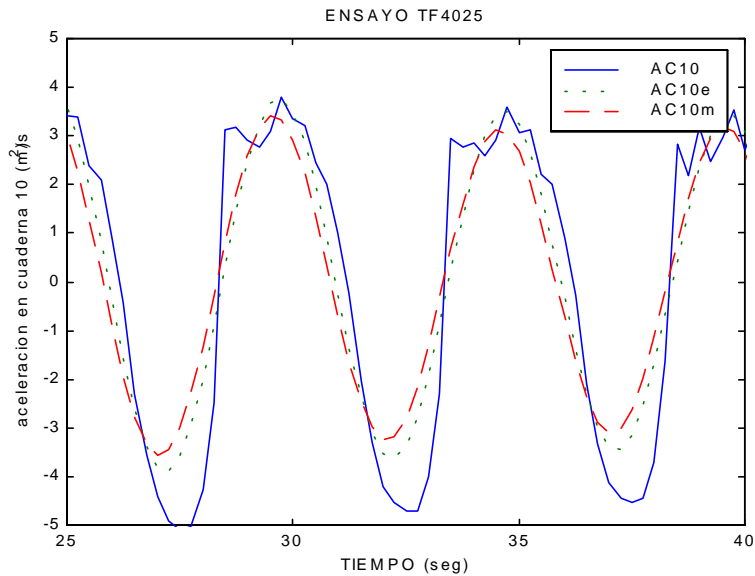


Figura 7.10 :Aceleraciones verticales  $ac_{10}$ ,  $ac_{10e}$  y  $ac_{10m}$  obtenida con los modelos (10,10,6)P y (10,10,3)H

### 7.2.9 ACELERACION VERTICAL OBTENIDA CON MODELOS IDENTIFICADOS A $V=40$ NUDOS Y ESTADO DE LA MAR 6.

El modelo para el pitch es el (7,6,6)P y el modelo para el heave es el (10,9,4)H. En la Figura 7.11 se muestra las aceleraciones  $ac_{10}$ ,  $ac_{10e}$  y  $ac_{10m}$ .

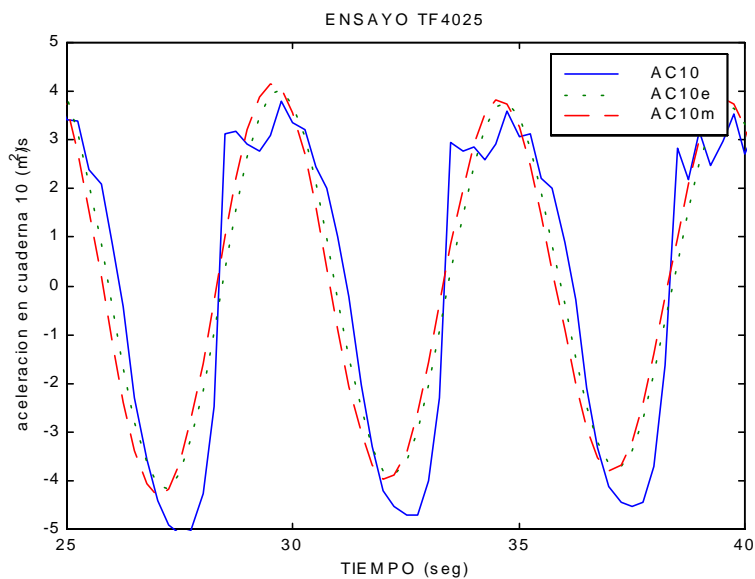


Figura 7.11 :Aceleraciones verticales  $ac_{10}$ ,  $ac_{10e}$  y  $ac_{10m}$  obtenida con los modelos (7,6,6)P y (10,9,4)H

## 8. CONCLUSIONES

En este documento se han presentado los modelos lineales que se han identificado, hasta la presente fecha, para la dinámica vertical del buque de alta velocidad TF-120. Estos modelos se pueden agrupar en tres categorías :

- Modelos discretos ARX siso.
- Modelos discretos ARX simo.
- Modelos continuos siso.

Además también se presenta un modelo continuo siso para el cual se han obtenido intervalos en los valores de los coeficientes de su función de transferencia.

### 8.1 CONCLUSIONES DERIVADAS DE LOS MODELOS ARX SISO OBTENIDOS.

Se obtuvo un modelo ARX siso para el movimiento de pitch y otro para el movimiento de heave para cada par de condiciones : de estado de la mar y velocidad del buque.

Los modelos que aquí se presentan son modelos identificados de acuerdo con las restricciones que se explican en la sección 2.2.1 y dejando el retardo  $n_k$  variar libremente entre los valores enteros 1,2,...,10.

Se ha de indicar que con anterioridad a los modelos aquí presentados se habían obtenidos otros modelos sin imponerles ninguna restricción , además de modelos con restricciones y retardo fijado a priori como  $n_k p = n_k h = 0$ .

En la tabla 8.1 se muestran los modelos que se obtuvieron para el movimiento del pitch, según se consideraran o no las restricciones

*Tabla 8.1 : Modelos identificados para el movimiento de pitch  
(velocidad 20 nudos y estado de la mar 4)*

	<b>Modelo ARX SISO</b>	<b>FPE</b>	<b>Simulación Irregular e2m</b>	<b>Simulación Regular TF2025 e2m</b>	<b>Simulación Regular TF2030 e2m</b>
<b>Identificado sin ninguna restricción</b>	(10,10,8)P	0.003089	0.067031	0.81242	1.7854
<b>Identificado con restricciones pero retardo libre</b>	(10,10,8)P	0.003322	0.069778	1.0278	3.6793
<b>Identificado con restricciones y retardo fijado a <math>n_k=0</math></b>	(10,10,0)P	0.003832	0.15993	5.7363	16.2383

En la tabla 8.2 se muestran los modelos que se obtuvieron para el movimiento del heave, según se consideraran o no las restricciones

Tabla 8.2 : Modelos identificados para el movimiento de heave  
 velocidad 20 nudos y estado de la mar 4

	<b>Modelo ARX SISO</b>	<b>FPE</b>	<b>Simulación Irregular e2m</b>	<b>Simulación Regular TF2025 e2m</b>	<b>Simulación Regular TF2030 e2m</b>
<b>Identificado sin ninguna restricción</b>	(10,10,7)H	0.0002727	0.00478	0.11575	3.7656
<b>Identificado con restricciones pero retardo libre</b>	(10,8,5)H	0.0004646	0.00545	0.12615	3.8619
<b>Identificado con restricciones y retardo fijado a nk=0</b>	(9,9,0)H	0.0004904	0.00527	0.324	6.3473

Tanto de la tabla 8.1 como de la tabla 8.2 puede verse que el modelo que mejor FPE y e2m a las distintas simulaciones presenta es aquel que es identificado sin ninguna restricción, a continuación le seguiría el identificado con restricciones y retardo variable. El peor modelo es aquel al que se le impone tener restricciones y retardo nulo. Si se compara el modelo de restricciones con retardo libre y el modelo sin restricciones se puede ver que el e2m para la simulación irregular y regular(tf2025) empeora poco, solo en la simulación regular(tf2030) el e2m se duplica.

Por eso en los modelos en este documento se ha optado por presentar los modelos identificados con restricciones físicas, pero con retardo libre.

La identificación de un retardo nkp y nkh distinto de 0 ,es uno de los puntos que han quedado de momento sin explicación, ya que se supone que los datos que se utilizaron, obtenidos a partir de oleaje irregular estaban corregidos al centro de gravedad del buque, y por tanto no tenían que aparecer ningún retardo entre la entrada (altura de olas)y las salidas del sistema (heave y pitch). Si bien el retardo que se identifica puede ser debido a efectos no lineales de origen desconocido.

En las tablas 3.1 y 3.2 se puede observar que como norma general según sube el estado de la mar aumenta el valor de V y de FPE para una misma velocidad del buque. Sin embargo si se miran las gráficas de las simulaciones el ajuste es mejor conforme aumenta el estado de la mar. La respuesta a esta paradoja está en que las escalas de las salidas son distintas, y aumentan según aumenta el estado de la mar con el correspondiente aumento del error cuadrático medio.

La aparición de polos discretos en el eje real negativo dentro del círculo unidad impiden el paso de las funciones de transferencia discretas a continuas. Pero estos modelos son perfectamente válidos para simulaciones y diseños discretos.

## 8.2 CONCLUSIONES DERIVADAS DE LOS MODELOS ARX SIMO OBTENIDOS.

Se obtuvo un modelo ARX simo para cada par de condiciones de estado de la mar y velocidad del buque. Los modelos que se muestran en este documento tienen un número de polos comunes  $n_c=3$ .

Un hecho significativo es que para varios de estos modelos los polos que se identificaron como acoplados no incluyen el par de polos complejos conjugados considerados como propios de la dinámica vertical, cuando en el diagrama de polos y ceros de  $G_p(z)$  y  $G_H(z)$  se ven que este par de polos están muy próximos y podrían considerarse también como comunes. Es por eso que se ha de probar a identificar con  $n_c=5$ .

En la tabla 8.3 se muestran los valores del  $e_{2m}$  para las simulaciones para las funciones  $G_p(z)$  y  $G_H(z)$  derivadas del modelo (3,10,10,10,10,9,4) para estado de la mar 4 y velocidad 20 nudos

Tabla 8.3 : Comparación de simulaciones entre modelos ARX SISO y modelos ARX SIMO (Velocidad 20 nudos y estado de la mar 4)

Modelos ARX	Simulación Irregular $e_{2m}$	Simulación Regular TF2025 $e_{2m}$
(10,10,8)P	0.067031	0.81242
(3,10,10,10,10,9,4) $G_p(z)$	0.072948	1.1789
(10,10,7)H	0.00478	0.11575
(3,10,10,10,10,9,4) $G_H(z)$	0.0055567	0.13323

Como era previsible el acoplar los modelos del pitch y del heave empeora el  $e_{2m}$  de las simulaciones, pero no de forma significativa.

## 8.3 CONCLUSIONES DERIVADAS DE LOS MODELOS CONTINUOS OBTENIDOS.

Los modelos continuos siso se identificaron en el dominio de la frecuencia a partir del ajuste a los datos de los diagramas de Bode obtenidos con las series temporales medidas con oleaje regular. Es por esto que no se habla en este caso de estado de la mar, y se identificaron modelos para el movimiento de pitch y de heave para las velocidades 20, 30 y 40 nudos.

La razón de escoger para  $n=5, m=3$  en  $G_p(s)$  y  $n=5, m=0$  en  $G_H(s)$ , es que son los ordenes más altos para los cuales la función de optimización utilizada converge a un sistema estable.

Indicar también como al pasar continuo a discreto se obtienen los polos característicos de la dinámica vertical del buque. Así en las tablas 8.4 y 8.5 se comparan este par de polos entre los obtenidos de discretizar el modelo continuo obtenido a velocidad 20 nudos y los obtenidos de los modelos discretos a velocidad 20 nudos y estado de la mar 4, 5 y 6. La discrepancia entre los valores de un tipo de modelo y otros no es muy significativa.

Tabla 8.4 : Comparación del par de polos característicos (movimiento de pitch)

Modelos velocidad 20 nudos	Polos característicos de la dinámica vertical (PITCH)		Frecuencia Natural(rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
continuo	0.90507 +	0.20254i	0.93073	0.32365
	0.90507 -	0.20254i	0.93073	0.32365
(10,10,8)P mar 4	0.91415 +	0.26751i	1.1553	0.16854
	0.91415 -	0.26751i	1.1553	0.16854
(10,10,8)P mar 5	0.91796 +	0.28292i	1.2067	0.13336
	0.91796 -	0.28292i	1.2067	0.13336
(10,10,6)P mar 6	0.91041 +	0.26403i	1.1491	0.18616
	0.91041 -	0.26403i	1.1491	0.18616

Tabla 8.5 : Comparación del par de polos característicos (movimiento de heave)

Modelos velocidad 20 nudos	Polos característicos de la dinámica vertical (HEAVE)		Frecuencia Natural(rad/seg)	Factor de amortiguamiento $\delta$
continuo	0.88947 +	0.30407i	1.3406	0.18458
	0.88947 -	0.30407i	1.3406	0.18458
(10,8,5)H mar 4	0.82105 +	0.25996i	1.3644	0.43802
	0.82105 -	0.25996i	1.3644	0.43802
(10,10,4)H mar 5	0.82305 +	0.24068i	1.2935	0.47536
	0.82305 -	0.24068i	1.2935	0.47536
(10,10,1)H mar 6	0.87269 +	0.21976i	1.0731	0.393
	0.87269 -	0.21976i	1.0731	0.393

En la tabla 8.6 se comparan las simulaciones de los distintos modelos obtenidos para estado de la mar 4 y velocidad 20 nudos. Se puede ver a la vista del e2m de las distintas simulaciones el buen acuerdo entre los modelos obtenidos, ya que el e2m es del mismo orden de magnitud en los tres tipos de modelos.

Tabla 8.6 : Comparación de simulaciones entre modelos ARX SISO, modelos ARX SIMO y modelos continuos SISO(Velocidad 20 nudos y estado de la mar 4)

Modelos ARX	Simulación Irregular e2m	Simulación Regular TF2025 e2m
(10,10,8)P	0.067031	0.81242
(3,10,10,10,10,9,4) $G_P(z)$	0.072948	1.1789
modelo continuo	0.074156	0.22495
(10,10,7)H	0.00478	0.11575
(3,10,10,10,10,9,4) $G_H(z)$	0.0055567	0.13323
modelo continuo	0.0095141	0.14237



## **8.4 CONCLUSIONES DERIVADAS DE LAS ACELERACIONES VERTICALES OBTENIDAS.**

En la sección 7 se muestran las aceleraciones verticales obtenidas con los modelos siso discretos identificados. Se puede observar como en general conforme aumenta el estado de la mar la  $ac_{10m}$  se aproxima mejor a la  $ac_{10e}$ . La razón de este comportamiento hay que buscarla en los modelos identificados que presentaban un mejor ajuste conforme aumentaba el estado de la mar y por tanto las series temporales de pitch y de heave que generan se aproximan más a las experimentales.

Se puede observar como la  $ac_{10}$  que se mide realmente en los ensayos presenta efectos extraños que la alejan de la regularidad, este fenómeno puede ser debido a la contribución del movimiento de surge a la aceleración vertical total.

## **8.5 LINEAS DE TRABAJO EN CURSO.**

Aunque ya se tienen modelos lineales que se pueden utilizar, se continua investigando en mejorar estos modelos. Así entre las líneas de trabajo que se están desarrollando actualmente están la obtención de :

- Modelos ARX SIMO con 5 polos de acoplo.
- Modelos continuos SISO con distintos tipos de estructuras.
- Modelos continuos SIMO.
- Intervalos para modelos continuos.

## **APENDICE A : NOMENCLATURA DE LOS FICHEROS CON LOS RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS EN EL CEHIPAR.**

### **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 el 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 Onume#.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 la 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. 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.

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

### B.1 FUNCIONES UTILIZADAS EN LA OBTENCION DE MODELOS ARX SISO.

Los datos obtenidos con oleaje irregular utilizados para identificar este tipo de modelos se encuentran en el fichero *variables\_sim.mat* . Una vez que este fichero es cargado se tienen en el espacio de trabajo de MATLAB las series temporales para altura de olas, movimiento de pitch y movimiento de heave para las carreras a y b con las medias y tendencias eliminadas.

Las variables utilizadas son matrices de N filas con dos columnas donde la primera columna siempre corresponde a la salida, ya sea pitch(p) o heave (h), y la segunda columna corresponde a la altura de las olas.

Para estimar los parámetros de los modelos se utilizaron las variables de formato  $p[V][mar]ad$  y  $h[V][mar]ad$  donde [V] se refiere a la velocidad del buque en el ensayo que podía ser 20, 30 o 40 nudos y donde [mar] hace referencia al estado de la mar que podía ser 4, 5 o 6.

Para validar los modelos se utilizaron las variables de formato  $p[V][mar]bd$  y  $h[V][mar]bd$ .

La función implementada para buscar la estructura con menor FPE es *arxcr\_minFPE.m*. A su vez esta función utilizaba la función *arxcr.m* que utilizaba para la optimización de mínimos cuadrados con restricciones a la función *conls.m*<sup>1</sup>.

Para pasar del vector de parámetros obtenido a formato de función de transferencia discreta se utilizó la función *arxcr2tf.m*

Los resultados que se fueron obteniendo se almacenaron en ficheros con nombre *res2\_p[V][mar].mat* o *res2\_h[V][mar].mat*.

Para calcular los polos y ceros de las funciones de transferencia discretas se utilizó la función *cal\_wn\_fa\_zp.m*

A continuación se listan el código de las funciones .m.

#### B.1.1 FUNCION ARXCR\_MINFPE.M

```
% ARXCR_MINFPE Función que busca la estructura ARX con minimo FPE. Para ello deja variar
% los indices na=min:max;nb=1:na;nk=0:ret;
%
% arxcr_minfpe(min,max,ret,'fich',id)
%
% Parametros de entrada:
% min      valor mínimo natural(1,2,..) de na.
% max      valor máximo de na
% ret      valor máximo permitido a nk
%'fich'    nombre del fichero Ej:'h204' o 'p204'.
% id       identificador si id=1 es el pitch si id=0 es el heave
%
% Toda la informacion más relevante queda almacenada en un fichero.mat de nombre res2_' fich '
%
% Ejemplo: arxcr_minfpe(4,10,10,'p204',1)
```

```
function arxcr_minfpe(min,max,ret,fich,id)
%carga de los ficheros con datos:
load variables_sim %contiene todos los datos
%datos seleccionados
ins=['datoswork=' fich 'ad;'];
eval(ins);
ins=['datosval=' fich 'bd;'];
eval(ins);
```

<sup>1</sup> Esta función pertenece a la toolbox OPTIM de MATLAB.

```
%Generacion de la funcion de coste para las estructuras que van na=1:10
Vmin=10000;
cont=0;
for na=min:max,
    for nb=1:na,
        for nk=0:ret,
            cont=cont+1;

                [V,x,N]=arxcr(na,nb,nk,datoswork,datosval,id,0);
                orden=[na nb nk]
                n=na+nb;

                matriz(cont,:)= [V,orden,n];%Matriz que contiene la funcion de coste para
                    %cada estructura
                %Para el calculo del FPE
                factor=(N+n)/(N-n)*(2/N);
                FPE=factor*V;
                newmat(cont,:)= [FPE,orden,factor,n];%Matriz que contiene el FPE para cada
estructura

                end

            end

        end
    end
    %Busqueda de la estructura con minima V
    [Vmin,pos]=min(matriz(:,1));
    nal=matriz(pos,2);
    nbl=matriz(pos,3);
    nk1=matriz(pos,4);
    orden1=[nal nbl nk1];

    [Vmin,xmin,N]=arxcr(nal,nbl,nk1,datoswork,datosval,id,1);
    load minimo
    AminV=A;
    %Calculo de parametros estadisticos
    n1=length(xmin)
    [mcov1,des_stan1]=par_est(AminV,n1,N,Vmin);

%Calculo de la estructura con menor FPE
    [FPE,pos]=min(newmat(:,1));
    na2=newmat(pos,2);
    nb2=newmat(pos,3);
    nk2=newmat(pos,4);

    orden2=[na2 nb2 nk2];
    [VdelFPEm,xf,N]=arxcr(na2,nb2,nk2,datoswork,datosval,id,1);
    load minimo
    AminF=A;
    AvF=Av;
    yre=bv;

    %Calculo de parametros estadisticos
    n2=length(xmf);
    [mcov2,des_stan2]=par_est(AminF,n2,N,VdelFPEm);

%Fichero donde se guardan los resultados.
ins=[' save res2_ ' fich ' matriz yre orden1 Vmin AminV xmin mcov1 des_stan1 newmat orden2
VdelFPEm AminF xmf mcov2 des_stan2 error'];
eval(ins);

%Presentacion de resultados
disp('*****')
disp('La estructura ARX con menor funcion de coste es:')
[orden1,Vmin]

disp('*****')
disp('La estructura ARX con menor FPE es:')
[orden2,FPE]
```

## CRIBAV

### CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
disp('Los parametros del modelo y su desviacion estandar son:')
[xmf,des_stan2]

%Funcion de transferencia discreta:
if id==1,
GP=arxcr2tf(na2,nb2,nk2,xmf);
set(GP,'variable','z^-1')
GP
ins=['save res2_' fich ' GP -append'];
eval(ins);
FT=GP;
else
GH=arxcr2tf(na2,nb2,nk2,xmf);
set(GH,'variable','z^-1')
GH
ins=['save res2_' fich ' GH -append'];
eval(ins);
FT=GH;
end
figure(1),bode(FT)
%Diagrama de ceros y polos
k=0:0.01:2*pi;
z=exp(j*k);
xc=real(z);
yc=imag(z);
figure(2),plot(xc,yc),axis([-1.5,1.5,-1.5,1.5])
hold on
figure(2),pzmap(FT)
hold off
%Polos y ceros
[p,z]=pzmap(FT)
%Validacion de los resultados
f=(1:length(yre))';
figure(3),plot(f,yre,'r',f,AvF*xmf,'b')
```

### B.1.2 FUNCION ARXCR.M

```
function [V,x,N]=arxcr(na,nb,nk,datw,datv,id,salvar)
%id=1 es el pitch sino es el heave

%Datos para la entrada.
ins=['u=datw(:,2)'];
eval(ins);
%Datos para la salida.
ins=['y=datw(:,1)'];
eval(ins);

%Numero de datos
N=length(u);
%Generacion de la matriz eta

%Columna 1:
eta(:,1)=-y(1:(N-1),1);
%Columnas 2 a na
for j=2:na,
    eta(:,j)=[zeros(j-1,1);-y(1:N-j,1)];
end

%Columna na+1
for i=1:N-1,
    for j=1:nb,
        c=1+i-(j-1)-nk;
        if c>0,
            peta(i,j)=u(c,1);
        else
            peta(i,j)=0;
        end
    end
end

%Union de las dos partes en la matriz A
p1=[eta,zeros(N-1,nb)];
p2=[zeros(N-1,na),peta];
A=p1+p2;

%La datos de y que se pueden generar son:
b=y(2:N,1);
%las matrices C y d de las restricciones estan en:

if id==1%Para el Pitch
    C=[zeros(1,na),ones(1,nb)];
    d=0;
else%Para el Heave
    C=[-ones(1,na),ones(1,nb)];
    d=1;
end

%Vamos a la funcion que nos minimiza la funcion de coste con restricciones:

x=conls(A,b,C,d,[],[],1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               V A L I D A C I O N
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Datos para la entrada.
ins=['uv=datv(:,2)'];
eval(ins);
%Datos para la salida.
ins=['yv=datv(:,1)'];
eval(ins);

%Numero de datos
N=length(uv);
%Generacion de la matriz eta

%Columna 1:
etav(:,1)=-yv(1:(N-1),1);
```

## CRIBAV

### CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
%Columnas 2 a na
for j=2:na,
    etav(:,j)=[zeros(j-1,1);-yv(1:N-j,1)];
end

%Columna na+1
for i=1:N-1,
    for j=1:nb,
        c=1+i-(j-1)-nk;
        if c>0,
            petav(i,j)=uv(c,1);
        else
            petav(i,j)=0;
        end
    end
end

%Union de las dos partes en la matriz A
p1v=[etav,zeros(N-1,nb)];
p2v=[zeros(N-1,na),petav];
Av=p1v+p2v;

%La datos de y que se pueden generar son:
bv=yv(2:N,1);

% La funcion de coste sería utilizando los datos de la validacion:
error=(bv-Av*x);
V=(0.5)*(error')*error;

if salvar==1
    save minimo uv yv bv Av u y b A error
end
N=length(u)-1;
```

### B.1.3 FUNCION ARXCR2TF.M

```
function FT=arxcr2tf(na,nb,nk,x)
% Paso de formato ARX a funcion de transferencia discreta:
c=na+1-nk-nb;

pol=[1,zeros(1,abs(c))];
num1=[x(na+1:na+nb,1)'];
den1=[1,x(1:na,1)'];

if c>0,
    num=conv(num1,pol);
    den=den1;
elseif c==0,
    num=num1;
    den=den1;
else
    den=conv(den1,pol);
    num=num1;
end

FT=tf(num,den,0.25);
```

### B.1.4 FUNCION CAL\_WN\_FA\_ZP.M

```
function cal_wn_fa_zp(G,T)
[num,den]=tfdata(G,'v');

%Ceros
z=roots(num);
for k=1:length(z),
    a(k,1)=real(z(k,1));
    b(k,1)=imag(z(k,1));

    sigmaz(k,1)=-(1/T)*log(sqrt(a(k,1)^2+b(k,1)^2));
if (a(k,1)>0 & (b(k,1)>=0|b(k,1)<0))
    wdz(k,1)=(1/T)*atan(b(k,1)/a(k,1));
elseif (a(k,1)<0 & b(k,1)==0)
    wdz(k,1)=0;
elseif (a(k,1)<0 & b(k,1)>0)
    wdz(k,1)=(1/T)*(atan(b(k,1)/a(k,1))+pi);
else
    wdz(k,1)=(1/T)*(atan(-b(k,1)/a(k,1))+pi);
end

wnz(k,1)=sqrt(sigmaz(k,1)^2+wdz(k,1)^2);
deltaz(k,1)=sigmaz(k,1)/wnz(k,1);
end

%POLOS
p=roots(den);
for k=1:length(p),
    a(k,1)=real(p(k,1));
    b(k,1)=imag(p(k,1));

    sigmap(k,1)=-(1/T)*log(sqrt(a(k,1)^2+b(k,1)^2));
if (a(k,1)>0 & (b(k,1)>=0|b(k,1)<0))
    wdp(k,1)=(1/T)*atan(b(k,1)/a(k,1));
elseif (a(k,1)<0 & b(k,1)==0)
    wdp(k,1)=0;
elseif (a(k,1)<0 & b(k,1)>0)
    wdp(k,1)=(1/T)*(atan(b(k,1)/a(k,1))+pi);
else
    wdp(k,1)=(1/T)*(atan(-b(k,1)/a(k,1))+pi);
end

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

%Polos
p=roots(den);
ap=real(p);
bp=imag(p);
sigmap=-(1/T)*log(sqrt(ap.^2+bp.^2));
wdp=(1/T)*atan(bp./ap);
wnz=sqrt(sigmaz.^2+wdz.^2);
deltaz=sigmaz./wnz;
```



## B.2 FUNCIONES UTILIZADAS EN LA OBTENCION DE MODELOS ARX SIMO

La función implementada para buscar la estructura de acoplo con menor FPE es *acominfpe.m* que fijados *nap*, *nbp*, *nah* y *nbh* varía *nkp* y *nkh* entre 0 y 10. Complementaria a esta función está *acominfpe2.m*, que fijado *nkp* y *nkh* varía *nap* y *nah* entre 9 y 10 ;y *nbp* y *nbh* entre 7,8,9 y 10.

Estas dos funciones se basan en la función *sis2\_acopla.m* que estima los parámetros de la estructura elegida utilizando a la función *constr.m*<sup>2</sup>. La función elegida para optimizar se implementa en *funlcr.m*.

Los resultados de la busquedas se almacenan en ficheros de nombre *mod\_acop\_[V][mar][#].mat* donde [#] es un número romano.(I,II,III,IV,...).

Estimado un vector de parámetros para una determinada estructura es necesario pasarlo a funciones de transferencia  $G_p(z)$  y  $G_H(z)$  para ello se utiliza la función *par2ft.m* . Se ha de indicar que para poder correr esta función es necesario haber corrido la función *sis2\_acopla.m* previamente.

A continuación se presenta el código de las funciones .m :

### B.2.1 FUNCION ACOMINFPE . M

```
% ACOMINFPE Función que busca la estructura de acoplo con minimo FPE.
% acominfpe(nc,nam,nkp,nkh,x0i,V,mar)
%
% Parametros de entrada:
% nc      numero de polos comunes al pitch y al heave.
% nam     valor de na minimo
% nkp     retardo del picth
% nkh     retardo del heave
% x0i     vector de valores iniciales de los parametros.
% V       velocidad en nudos
% mar     estado de la mar
%
% Salida
% Crea un fichero de nombre de salida busqueda1.mat con la siguiente informacion
% matriz  en ella se encuentran almacenados las distintas estructuras que se han creado
%         asi como el valor de la función de coste FC, del FPE y los valores de los
%         parametros de la función de transferencia, y el número de parametros
%         fila 1: FC FPE nc nap nbp nkp nah nbh nkh n x
%
% Vmin    el valor minimo de la función de coste encontrado entre todas las estructuras
% estr_mV estructura con menor función de coste
% x_mV    vector de parametros de la estructura con función de coste mínima.
%
% mFPE    valor de FPE minimo.
% estr_mFPE estructura con menor FPE
% x_mFPE  vector de parametros de la estructura con menor FPE.
%
% N       número de muestras utilizadas.
% T1     hora de comienzo de la busqueda
% T2     hora de finalizacion de la busqueda
%
% Ejemplo: arxcr_minfpe(4,10,10,'p204',1)

function acominfpe(nc,nam,nkp,nkh,x0i,V,mar)
T1=clock;
tic
%Generacion de la funcion de coste para las estructuras que
Vmin=10000;
cont=0;
%x0n=0;
for na=nam:10,
    ss=na+7

        for nbp=7:na,

            for nbh=7:na,
```

<sup>2</sup> Esta función pertenece a la toolbox OPTIM de MATLAB

## CRIBAV

### CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
% if(length(x0n) >= (2*na+ss-nbp+ss-nbh))
%   display('datos de la interacción anterior')
%   x0=x0n;
% else
%   display('datos iniciales')
%   x0=x0i;
% end

cont=cont+1;

orden=[nc na ss-nbp nkp na ss-nbh nkh]

[x,FC,N]=sis2_acopla(nc,na,ss-nbp,nkp,na,ss-nbh,nkh,x0i,V,mar)
x0n=x;

n=2*na+ss-nbp+ss-nbh;%número de parámetros

%Para el calculo del FPE
factor=((N+n)/(N-n))*(2/N);
FPE=factor*FC;
matriz(cont,:)= [FC,FPE,orden,n,x'];%Matriz que contiene la funcion de coste
para
    %cada estructura
    %Matriz que contiene el FPE para cada estructura
end
end
end

%Busqueda de la estructura con minima V
[Vmin,pos1]=min(matriz(:,1));
estr_mV=matriz(pos1,3:9);
d=matriz(pos1,10)
s=d+10;
x_mV=matriz(pos1,11:s);
%Calculo de la estructura con menor FPE
[mFPE,pos2]=min(matriz(:,2));
estr_mFPE=matriz(pos2,3:9);
d=matriz(pos2,10)
s=d+10;
x_mFPE=matriz(pos2,11:s);

%Presentacion de resultados
disp('*****')
disp('La estructura ARX con menor funcion de coste es:')
[estr_mV,Vmin]

disp('*****')
disp('La estructura ARX con menor FPE es:')
[estr_mFPE,mFPE]

T2=clock;

disp('*****')
disp('HORA DE INICIO:')
T1

disp('*****')
disp('HORA DE TERMINACION')
T2
toc

save busqueda1 matriz Vmin estr_mV x_mV mFPE estr_mFPE x_mFPE N T1 T2
```

### B.2.2 FUNCION ACOMINFPE2 . M

```
% ACOMINFPE2 Función que busca la estructura de acoplo con minimo FPE.Variando los retardos
%
%
% Parametros de entrada:
%
% Toda la informacion más relevante queda almacenada en un fichero.mat de nombre res2_ ' fich '
%
% Ejemplo: arxcr_minfpe(4,10,10,'p204',1)

function acominfpe2(nc,na,nbp,nbh,x0i,V,mar)
T1=clock;
%Generacion de la funcion de coste para las estructuras que
Vmin=10000;
cont=0;
x0n=0;

    for nkp=0:10,

        for nkh=0:10,

            cont=cont+1;

            orden=[nc na nbp nkp na nbh nkh]

            [x,FC,N]=sis2_acopla(nc,na,nbp,nkp,na,nbh,nkh,x0i,V,mar)
            x0n=x;

            n=2*na+nbp+nbh;%número de parámetros
            %Para el calculo del FPE
            factor=( (N+n)/(N-n) )*(2/N);
            FPE=factor*FC;
            matriz(cont,:)= [FC,FPE,orden,n,x'];%Matriz que contiene la funcion de coste

para

                %cada estructura
                %Matriz que contiene el FPE para cada estructura

            end

        end

    end

%Busqueda de la estructura con minima V
[Vmin,pos1]=min(matriz(:,1));
estr_mV=matriz(pos1,3:9);
d=matriz(pos1,10)
s=d+10;
x_mV=matriz(pos1,11:s);
%Calculo de la estructura con menor FPE
[mFPE,pos2]=min(matriz(:,2));
estr_mFPE=matriz(pos2,3:9);
d=matriz(pos2,10)
s=d+10;
x_mFPE=matriz(pos2,11:s);

%Presentacion de resultados
disp('*****')
disp('La estructura ARX con menor funcion de coste es:')
[estr_mV,Vmin]

disp('*****')
disp('La estructura ARX con menor FPE es:')
[estr_mFPE,mFPE]

T2=clock;
```

## CRIBAV

### CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
disp('*****')
disp('HORA DE INICIO:')
T1

disp('*****')
disp('HORA DE TERMINACION')
T2

save busqueda2 matriz Vmin estr_mV x_mV mFPE estr_mFPE x_mFPE N T1 T2
```

#### B.2.3 FUNCION SIS2\_ACOPLA

```
% SIS2_ACOPLA Función que identifica los parámetros de la función de transferencia del pitch
% y la función de transferencia del heave teniendo en cuenta el acoplo existente
% entre los movimientos.
% [x,FC,N]=sis2_acopla(nc,nap,nbp,nkp,nah,nbh,nkh,x0,V,mar)
%
% Parámetros de Entrada:
% nc número de polos acoplados entre el pitch y el heave
% nap número de polos totales del pitch (acoplados + no acoplados)
% nbp número de ceros menos uno para el pitch
% nkp retardo en el pitch
% nah número de polos totales del heave (acoplados + no acoplados)
% nbh número de ceros menos uno para el heave
% nkh retardo en el heave
% x0 valor inicial para los parámetros será un vector de dimensiones N=nap+nbp+nah+nbh
% V velocidad del buque en nudos
% mar estado de la mar
%
% Parametros de Salida:
% x vector de parámetros identificados, presenta la siguiente estructura
% FC valor de la función de coste (1/2)E'*E
% N número de muestras
%
% c1...cnc = x(1),...,x(nc) de los polos comunes
% f1...fnf = x(nc+1),...,x(nc+nf) de los polos exclusivos del pitch
% g1...gng = x(nc+nf+1),...,x(nc+nf+ng) de los polos exclusivos del heave
% b1...bnbp = x(nc+nf+ng+1),...,x(nc+nf+ng+nbp) de los ceros del pitch
% e1...enbh = x(nc+nf+ng+nbp+1),...,x(nc+nf+ng+nbp+nbh) de los ceros del heave

function [x,FC,N]=sis2_acopla(nc,nap,nbp,nkp,nah,nbh,nkh,x0,V,mar)
%x0=unifrnd(-1,1,n,1);
%Datos a utilizar:
load variables_sim
%Entradas y salidas
V=num2str(V);
mar=num2str(mar);

ins=['u=p' V mar 'ad(:,2)'];
eval(ins);
ins=['yp=p' V mar 'ad(:,1)'];
eval(ins);
ins=['yh=h' V mar 'ad(:,1)'];
eval(ins);

ins=['uv=p' V mar 'bd(:,2)'];
eval(ins);
ins=['ypv=p' V mar 'bd(:,1)'];
eval(ins);
ins=['yhv=h' V mar 'bd(:,1)'];
eval(ins);

N=length(u);

% Generación de las matrices A y Y para la estima de los parametros:
[A,Y]=gen_AY(N,nap,nbp,nkp,nah,nbh,nkh,yp,yh,u);
% Generación de las matrices AV y YV para la validación de los parametros:
N2=length(uv);
[AV,YV]=gen_AY(N2,nap,nbp,nkp,nah,nbh,nkh,ypv,yhv,uv);
```

## CRIBAV

### CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
save parametros nc nap nah nkp nbp nbh nkx A Y u yp yh uv ypv yhv AV YV

% Secuencia de minimizacion:

options=foptions;
options(1)=1;
options(13)=2;
options(14)=30000;%Número máximo de iteraciones
options(2)=0.0001;%tres cifras decimales exactas
options(3)=0.0001;%tres cifras decimales exactas
% condiciones iniciales aleatorias.
n=nap+nbp+nah+nbh;
x=constr('funlcr',x0,options);
FC=funlcr(x);
save parametros x FC -append
```

#### B.2.4 FUNCION FUNLCR.M

```
function [f,r]=funlcr(x)
load parametros
% Parametros necesarios
nf=nap-nc;
ng=nah-nc;
n=nap+nah+nbp+nbh;%número de parámetros totales

% El vector de parámetros X es un vector de dimension n x 1

% Su organización es la siguiente:
% c1...cnc = x(1),...,x(nc) de los polos comunes
% f1...fnf = x(nc+1),...,x(nc+nf) de los polos exclusivos del pitch
% g1...gng = x(nc+nf+1),...,x(nc+nf+ng) de los polos exclusivos del heave
% b1...bnbp = x(nc+nf+ng+1),...,x(nc+nf+ng+nbp) de los ceros del pitch
% e1...enbh = x(nc+nf+ng+nbp+1),...,x(nc+nf+ng+nbp+nbh) de los ceros del heave

c=x(1:nc,1);
f=x(nc+1:nc+nf,1);
g=x(nc+nf+1:nc+nf+ng,1);
b=x(nc+nf+ng+1:nc+nf+ng+nbp,1);
e=x(nc+nf+ng+nbp+1:nc+nf+ng+nbp+nbh,1);

% Expresión de los parámetros a en función de los c y los f
% a=M1*xl+c1;

% Matriz M1 y vector c1
% Primera columna de M1
M1(:,1)=[1;x(1:nc,1);zeros(nap-(nc+1),1)];

for j=2:nf,
    if (j+nc<nap),
        ter=zeros(nap-(j+nc),1);
        M1(:,j)=[zeros(j-1,1);1;c;ter];
    else
        M1(:,j)=[zeros(j-1,1);1;c];
    end
end

c1=[c;zeros(nap-nc,1)];

% Primera columna de M2:
M2(:,1)=[1;x(1:nc,1);zeros(nah-(nc+1),1)];

% Matriz M2 y vector c2
for j=2:ng,
    if (j+nc<nah),
        ter=zeros(nah-(j+nc),1);
        M2(:,j)=[zeros(j-1,1);1;c;ter];
    else
        M2(:,j)=[zeros(j-1,1);1;c];
    end
end
```

## CRIBAV

### CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
c2=[c;zeros(nah-nc,1)];

% Luego los coeficientes del denominador del pitch y los del heave serán:
a=M1*f+c1;
h=M2*g+c2;

% calculo del vector de salidas estimadas:
YS=A*[a;h;b;e];

% calculo del error;
E=Y-YS;

%función a minimizar:
f=0.5*E'*E;

%función con las restricciones:
r(1)=sum(b);
r(2)=sum(e)-sum(h)-1;
```

### B.2.5 FUNCION PAR2FT . M

```
function [GP,GH]=par2ft(x)
load parametros
% Parametros necesarios
nf=nap-nc;
ng=nah-nc;
n=nap+nah+nbp+nbh;%número de parámetros totales

% El vector de parámetros X es un vector de dimension n x 1

% Su organización es la siguiente:
% c1....cnc = x(1),...,x(nc) de los polos comunes
% f1....fnf = x(nc+1),...,x(nc+nf) de los polos exclusivos del pitch
% g1....gng = x(nc+nf+1),...,x(nc+nf+ng) de los polos exclusivos del heave
% b1....bnbp = x(nc+nf+ng+1),...,x(nc+nf+ng+nbp) de los ceros del pitch
% e1....enbh = x(nc+nf+ng+nbp+1),...,x(nc+nf+ng+nbp+nbh) de los ceros del heave

c=x(1:nc,1);
f=x(nc+1:nc+nf,1);
g=x(nc+nf+1:nc+nf+ng,1);
b=x(nc+nf+ng+1:nc+nf+ng+nbp,1);
e=x(nc+nf+ng+nbp+1:nc+nf+ng+nbp+nbh,1);

% Expresión de los parámetros a en función de los c y los f
% a=M1*x1+c1;

% Matriz M1 y vector c1
% Primera columna de M1
M1(:,1)=[1;x(1:nc,1);zeros(nap-(nc+1),1)];

for j=2:nf,
    if (j+nc<nap),
        ter=zeros(nap-(j+nc),1);
        M1(:,j)=[zeros(j-1,1);1;c;ter];
    else
        M1(:,j)=[zeros(j-1,1);1;c];
    end
end

c1=[c;zeros(nap-nc,1)];

% Primera columna de M2:
M2(:,1)=[1;x(1:nc,1);zeros(nah-(nc+1),1)];

% Matriz M2 y vector c2
for j=2:ng,
    if (j+nc<nah),
        ter=zeros(nah-(j+nc),1);
        M2(:,j)=[zeros(j-1,1);1;c;ter];
    else
        M2(:,j)=[zeros(j-1,1);1;c];
    end
end
```

## CRIBAV

### CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
end

c2=[c;zeros(nah-nc,1)];

% Luego los coeficientes del denominador del pitch y los del heave serán:
a=M1*f+c1;
h=M2*g+c2;

%
numpt=[b'];
numht=[e'];

denpt=[1 a'];
denht=[1 h'];

% Consideración del retardo del pitch
testp=-nkp-(nbp-1)+nap;
retntp=[1 zeros(1,abs(testp))];%polinomio generado por el retardo del pitch
if testp<0
    denp=conv(retntp,denpt);
    nump=numpt;
else
    nump=conv(retntp,numpt);
    denp=denpt;
end

% Consideración del retardo del heave
testh=-nkh-(nbh-1)+nah;
retnh=[1 zeros(1,abs(testh))];%polinomio generado por el retardo del pitch
if testh<0
    denh=conv(retnh,denht);
    numh=numht;
else
    numh=conv(retnh,numht);
    denh=denht;
end

GP=tf(nump,denp,0.25);
GH=tf(numh,denh,0.25);
set(GP,'variable','z^-1');
set(GH,'variable','z^-1');

figure(3),pzmapcu(GP,1.5)
figure(4),pzmapcu(GH,1.5)
figure(1),bode(GP)
figure(2),bode(GH)

% Validación de la salida:
% calculo del vector de salidas estimadas:
YS=AV*[a;h;b;e];
Tam=length(YS)/2;
for k=1:Tam,
    yps(k,1)=YS(2*k-1,1);
    yhs(k,1)=YS(2*k,1);
end
cont=(1:Tam)';
figure(5),plot(cont,ypv(2:(Tam+1),1),'r',cont,yps,'b')

figure(6),plot(cont,yhv(2:(Tam+1),1),'r',cont,yhs,'b')

save parametros yps yhs YS -append
Tam

ins=['[pp,zp]=pzmap(GP)']
eval(ins)
ins=['[ph,zh]=pzmap(GH)']
eval(ins)
[uno,dos,pp]=damp(GP);
[uno,dos,ph]=damp(GH);
```

## B.3 FUNCIONES UTILIZADAS EN LA OBTENCION DE MODELOS CONTINUOS SISO

Los puntos de magnitud y fase de los diagrama de Bode derivados de las series temporales medidas en los ensayos regulares se encontraban almacenados en los ficheros de nombre *med\_MF\_P\_[V].mat* y *med\_MF\_H\_[V].mat*. En estos ficheros también se encuentra almacenada el vector de frecuencias de encuentro a las que corresponden los puntos de magnitud y fase.

La función que estima los parámetros de G(s) dados el orden del numerador y el denominador de la función de transferencia es *proptim.m*. La función de coste a optimizar se encuentra en *funoptim.m* que requiere de *RH\_IH.m* para ser configurada. La función que realiza la estima de minimos cuadrados no lineales es *leastsq.m*<sup>3</sup>.

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 *Obt\_FT\_Bode.m*

Los resultados obtenidos se almacenan en ficheros de nombre *Opt2\_pitch[V].mat* y *Opt\_heave[V].mat*.

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*<sup>4</sup>.

A continuación se presenta el código de estas funciones

### B.3.1 FUNCION PROPTIM . M

```
%PROPTIM [x,V]=proptim(m,n,x0,datos,res,nume)
%
%Esta función encuentra, si es posible, los valores de los coeficientes de la función de
%transferencia a la que se pretende ajustar los datos del modulo y de la fase medidos de un
% sistema
%
%          m          m-1
%      x s      +x s      +.....+ x
%          n+m+1      n+m          n+1
%
%      G=-----
%          n          n-1
%          s +x s      +.....+ x
%          n          1
%
%
%Parámetros de entrada:
%m orden del numerador
%n orden del denominador
%x0 valor inicial de los parámetros que se quieren identificar
%'fichero' fichero .mat donde se debe encontrar las medidas del modulo (MODU),la fase (FASE)
%          en grados y la frecuencia (FREQ) en rad/seg, de un sistema.
%res vale 0 si no se ponen condiciones de igualdad o de nulidad a los coeficientes
%      del numerador.vale 1 si se ponen condiciones
%'nume' hay que escribir los coeficientes del numerador.
%
%Parámetros de salida:
%x coeficientes de la FT identificados.
%V función de coste
%
%
%EJEMPLO1:
%Se desea ajustar a una Funcion de transferencia con m=0 y n=5 hay 6 parámetros
%1) x0=[1 2 4 3 2 0.6];
%
%2)[x,V]=proptim(0,5,x0,'med_MF_H20',0,'');
%
```

<sup>3</sup> Esta función pertenece a la toolbox OPTIM de MATLAB

<sup>4</sup> Esta función pertenece a la toolbox CONTROL de MATLAB



```

%3) [FT,tabla]=Obt_FT_Bode(x,0,0, '');
%
% Resulta:
%           0.6273
%-----
% s^5 + 2.124 s^4 + 3.886 s^3 + 4.188 s^2 + 2.501 s + 1.16
%
% Con V= 0.059407
%
%EJEMPLO2:
% Se desea ajustar a una Funcion de transferencia con m=3 y n=5
% En principio habría 9 parametros libres, pero se desea que x6=0, con lo que solo
% se tendrían 8 parametros libres.
%
% 1) Se introduce x0=[2.3 3.8 5.9 4.5 2.58 -2.5 1.3 -1.08];
%
% 2) [x,V]=proptim(3,5,x0,'med_MF_P20',1,'x6=0;x7=x(6);x8=x(7);x9=x(8)');
% 3) [FT,tabla]=Obt_FT_Bode(x,1,1,'x(8) x(7) x(6) 0')
% Nos resulta
%
%           -1.088 s^3 + 1.39 s^2 - 2.515 s
%-----
% s^5 + 2.588 s^4 + 4.597 s^3 + 5.925 s^2 + 3.809 s + 2.32
%
% La funcion de coste es:
% V =0.17926

function [x,V]=proptim(m,n,x0,datos,res,nume)
% Fichero donde se encuentran la frecuencia (rad/seg), la fase medida (grados) y el modulo
medido
ins=['load ' datos];
eval(ins);
% 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]=RH_IH(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);

save temporal RH IH k1 k2 N n m res nume FREQ MODU FASE

% Opciones de trabajo de la función LEASTSQ
options=foptions;
options(1)=1; % Visualización de las iteraciones
options(14)=5000; % Número máximo de iteraciones
options(2)=0.0001; % tres cifras decimales exactas
options(3)=0.0001; % tres cifras decimales exactas

[x,options,f]=leastsq('funoptim',x0,options); % Llamada a la función que nos calcula el ajuste
% por mínimos cuadrados no lineales.

V=sum(f.*f); % funcion de coste

```

### B.3.2 FUNCION 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=l;
    k=num2str(k);
    ins=['x'k ' =sym('x' k ' ');'];

```

## CRIBAV

### CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
eval(ins);

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

% Generacion de n1
suma1=0;
for k=0:floor(m/2),
    ter=(-1)^k*bs((2*k)+1,1)*(w^(2*k));
    suma1=suma1+ter;
end
n1=suma1;

% 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
suma1=0;
for k=0:floor(n/2),
    ter=(-1)^k*as((2*k)+1,1)*(w^(2*k));
    suma1=suma1+ter;
end
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.3.3 FUNCION FUNOPTIM.M

```
function f=funoptim(x)
load temporal

% Generacion de los parametros a identificar del numerador
for s=1:n,
    pos=num2str(s);
    ins=['x' pos '=x(' pos ')'];
    eval(ins);
end
% Si res=0 se genera el numerador
if res==0
    for s=n+1:n+m+1,
        pos=num2str(s);
        ins=['x' pos '=x(' pos ')'];
        eval(ins);
    end
else % Ya ha sido dado
    ins=[nume];
    eval(ins)
end

% 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);

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

### B.3.4 FUNCION OBT\_FT\_BODE . M

```
%OBT_FT_BODE [FT,tabla]=OBT_FT_Bode(x,s,c,'num')
%
%Esta función nos representa el diagrama de Bode de la FT identificada sola y comparada con
%los puntos medidos
%
%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
% c si c=0 no hay que escribir la forma del numerador
% num hay que escribir la forma del numerador
function [FT,tabla]=OBT_FT_Bode(x,s,c,numerador)
load temporal
% Generacion de los parametros a identificar del denominador
for t=2:n+1,
    den(1,t)=x(n+2-t);
end
den(1,1)=1;
% Si res=0 se genera el numerador
if c==0
    for t=1:m+1,
        num(1,t)=x(n+m+2-t);
    end
else % SE debe escribir cuando se llama a la función
    ins=['num=' numerador ''];
    eval(ins);
end
```

## CRIBAV

### CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
%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
tabla=[cont w modulo phi];

% Diagrama de Bode comparado
figure(1)
subplot(2,1,1)
semilogx(FREQ,20*log10(MODU),'*',FREQ,20*log10(tabla(:,3)))
axis([1e-1,100,-60,20])
title('Diagrama de Bode ')

ylabel('Magnitud (dB)')
grid

subplot(2,1,2)
semilogx(FREQ,FASE,'*',FREQ,tabla(:,4))
ylabel('Fase (deg)')
xlabel('Frecuencia de encuentro we (rad/s)')
grid

%%Diagrama de Bode
figure(2)
subplot(1,1,1)
bode(FT);
% Diagrama de polos y de ceros:
figure(3)
pzmap(FT);
```

### B.3.5 FUNCION 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.3.6 FUNCION POL\_BODE . 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.4 FUNCIONES UTILIZADAS EN LA SIMULACIONES DISCRETAS

Los ficheros de datos para las entradas y para comparar las salidas son *variables.mat* para oleaje irregular y *datsimreg.mat* para oleaje regular.

La función que implementa la simulación es *simu\_dis2.m* que está basada en *sin\_mincua.m* que calcula la salida estimada mediante la resolución de una ecuación en diferencias.

### B.4.1 FUNCION SIMU\_DIS2.M

```
% SIMU_DIS2 Representa la simulación del pitch y del heave tomando como entradas olas
%           regulares o irregulares
% simu_dis(GP,GH,'V','mar','tipo','ensayo',liminf,limsup)
%
% parámetros de entrada:
% GP       función de transferencia del pitch expresada en z^-1
% GH       función de transferencia del heave expresada en z^-1
% V        velocidad del buque 20,30 o 40 nudos
% mar      estado de la mar 4, 5 o 6
% tipo     oleaje regular R o irregular I
% ensayo   número del ensayo de ola regular 17, 25 o 30
% liminf   número para el limite inferior del eje x de las graficas 3 y 4
% limsup   número para el limite superior del eje x de las graficas 3 y 4
%
% Ejemplo1:simu_dis2(GP,GH,'20','4','I','',1,300)
% Ejemplo2:simu_dis2(GP,GH,'20','4','R','25',1,300)
```

```
function simu_dis2(GP,GH,V,mar,tipo,ensayo,liminf,limsup)

% Selección de las entradas para la simulación y de las salidas de los experimentos
if tipo=='I' %oleaje irregular
    load variables_sim
    ins=['u1=p' V mar 'bd(:,2)'];
    eval(ins);
    ins=['u2=h' V mar 'bd(:,2)'];
    eval(ins);
    ins=['y1=p' V mar 'bd(:,1)'];
    eval(ins);
    ins=['y2=h' V mar 'bd(:,1)'];
    eval(ins);
    N1=length(u1);
    N2=length(u2);
else %oleaje regular
    load datsimreg
    ins=['u1=op' V ensayo 'd(:,2)'];
    eval(ins);
```

```
    ins=['u2=oh' V ensayo 'd(:,2)'];
    eval(ins);
    ins=['y1=op' V ensayo 'd(:,1)'];
    eval(ins);
    ins=['y2=oh' V ensayo 'd(:,1)'];
    eval(ins);
    N1=length(u1);
    N2=length(u2);
end
length(y1)
% Parametros necesarios para correr la simulación:
% de la función de transferencia GP
% supuesto que la función esta dada en (z^-1) se tendría
[nump,denp]=tfdata(GP,'v');
[numh,denh]=tfdata(GH,'v');
L1=length(denp);
L2=length(nump);
if nump(1,L2)==0
    nap=L1-1
    ap=denp(1,2:L1)';
    cont=0;
    for k=1:L2,
        if nump(1,k)~=0
            cont=cont+1;
            bp(cont,1)=nump(1,k);
        end
    end
    nbp=cont
    nkp=0
    x1=[ap;bp]
else
    cont=0;
    for k=1:L1,
        if denp(1,k)~=0 & denp(1,k)~=1
            cont=cont+1;
            ap(cont,1)=denp(1,k);
        end
    end
    nap=length(ap)
    nc=-(L1-(nap+1));
    cont=0;
    for k=1:L2,
        if nump(1,k)~=0
            cont=cont+1;
            bp(cont,1)=nump(1,k);
        end
    end
    nbp=length(bp)
    nkp=nap-nc-nbp+1
end
x1=[ap;bp]

%Funcion de transferencia del heave
L1=length(denh);
L2=length(numh);

    if numh(1,L2)==0
        nah=L1-1
        ah=denh(1,2:L1)';
        cont=0;
    for k=1:L2,
        if numh(1,k)~=0
            cont=cont+1;
            bh(cont,1)=numh(1,k);
        end
    end
    nbh=cont
    nkh=0
    x2=[ah;bh]
else
    cont=0;
    for k=1:L1,
        if denh(1,k)~=0 & denp(1,k)~=1
            cont=cont+1;
            ah(cont,1)=denh(1,k);
        end
    end
```

```
        end
    end
    nah=length(ah)
    nc=-(L1-(nah+1));
    cont=0;
    for k=1:L2,
        if numh(1,k)~=0
            cont=cont+1;
            bh(cont,1)=numh(1,k);
        end
    end
    nbh=length(bh)
    nkh=nah-nc-nbh+1
end
x2=[ah;bh]

% Generación de la salida estimada para el pitch:
yestp=sim_mincua(nap,nbp,nkp,u1,y1,x1);
mp1=max(y1);
mp2=max(yestp);
mp=max(mp1,mp2);
e1=y1-yestp;
V1=(1/N1)*(e1'*e1);
er2p=num2str(V1);

% Generación de la salida estimada para el heave:
yesth=sim_mincua(nah,nbh,nkh,u2,y2,x2);
mh1=max(y2);
mh2=max(yesth);
mh=max(mh1,mh2);
e2=y2-yesth;
V2=(1/N2)*(e2'*e2);
er2h=num2str(V2);

pitch=y1;
figure(25)
%subplot(2,1,1)
mues=(0:N1-1)';
length(mues)
plot(mues*0.25,pitch,':',mues*0.25,yestp,'-')
ins=['PITCH e2m=' er2p];
title(ins)
legend('pitch','yestp')
ylabel('Grados(°)')
xlabel('Tiempo(seg)')

figure(26)
%subplot(2,1,2)
mues=(0:N1-1)';
length(mues)
plot(mues*0.25,y1,':',mues*0.25,yestp,'-')
axis([liminf,limsup,-mp1,mp1])
ins=['PITCH e2m=' er2p];
title(ins)
legend('pitch','yestp')
xlabel('Tiempo(seg)')
ylabel('Grados(°)')

figure(26)
heave=y2;
% subplot(2,1,1)
figure(27)
mues=(0:N2-1)';
plot(mues*0.25,heave,':',mues*0.25,yesth,'-')
ins=['HEAVE e2m=' er2h];
title(ins)

legend('heave','yesth')
ylabel('metros')
xlabel('Tiempo(seg)')
```

```
% subplot(2,1,2)
figure(28)
mues=(0:N2-1)';
plot(mues*0.25,y2,':',mues*0.25,yesth,'-')
axis([lminf,limsup,-mh1,mh1])
ins=['HEAVE e2m=' er2h];
title(ins)
legend('heave','yesth')

xlabel('Tiempo(seg)')
ylabel('metros')

% Calculo de la autocorrelacion de los residuos y de la correlación cruzada entre
% los residuos y la entrada
M=100
[auto_rep,lags]=xcorr(e1,M,'unbiased');
%Intervalo de confianza.
N=length(e1);
sdre=2.58*(auto_rep)/sqrt(N);

figure(29)
subplot(2,2,1)
plot(lags,auto_rep)
xlabel('lags')
title('Autocorr de los resid para pitch')

[auto_reh,lags]=xcorr(e2,M,'unbiased');
figure(29)
subplot(2,2,2)
plot(lags,auto_reh)
xlabel('lags')
title('Autocorr de los resid para heave')

[corr_rep,lags]=xcorr(u1,e1,M,'unbiased');
figure(29)
subplot(2,2,3)
plot(lags,corr_rep)
xlabel('lags')
title('Cross-cor de los resid de pitch y olas')

[corr_reh,lags]=xcorr(u2,e2,M,'unbiased');
figure(29)
subplot(2,2,4)
plot(lags,corr_reh)
xlabel('lags')
title('Cross-cor de los resid de heave y olas')
```

#### **B.4.2 FUNCION SIM\_MINCUA . M**

```
% SIM_MINCUA Función que calcula la salida estimada de un modelo discreto ARX
%
%yest=sim_mincua(na,nb,nk,u,y,par)
%Parametros de entrada:
% na número de polos
% nb numero de ceros menos uno
% nk retardo
% u entrada experimental
% y salida experimental
% par vector de parámetros del modelo

function yest=sim_mincua(na,nb,nk,u,y,par)
L=length(u);
%Se empieza a estimar en :
kini=na+1;
% Condiciones iniciales:
yest(1:na,1)=y(1:na,1);
%yest(1:na,1)=0;
for k=kini:L,
%Una fila completa
for j=1:na,
if (k-j)>0
```



## CRIBAV

---

### CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

```
        A(1,j)=-yest(k-j,1);
    else
        A(1,j)=0;
    end
end
for j=na+1:na+nb,
    if (k-nk-(j-na)+1)>0,
        A(1,j)=u(k-nk-(j-na)+1);
    else
        A(1,j)=0;
    end
end
yest(k,1)=A(1,:)*par;
end
length(yest)
```

## **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  
Identification of Linear Systems  
Pergamon Press.1991
  
- [6]
  
  
- [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