CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

DOCUMENTO Nº: ***CRIBAV*/ 01-01-A**

Fecha:

Código SubProyecto:

MODELOS LINEALES COMPLEJOS PARA EL MOVIMIENTO VERTICAL DE UN BUQUE DE ALTA VELOCIDAD OBTENIDO MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

Autores:

Bonifacio de Andrés

Jesús Manuel de la Cruz

José María Girón

Segundo Esteban

Cristina Fernández

José Luis Lugo

CRIBAV

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

DOCUMENTO Nº: ***CRIBAV*/ 01-01-A**

Fecha: **30 – 09-1999**

Código SubProyecto:

MODELO LINEAL DE UN BUQUE DE ALTA VELOCIDAD OBTENIDO MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS (APÉNDICE)

Autores:
Bonifacio de Andrés

Jesús Manuel de la Cruz

José María Girón

Segundo Esteban

Cristina Fernández

José Luis Lugo

Grupo: Isa

Responsable del Grupo: Jesús Manuel de la Cruz

Responsable del Informe: Bonifacio de Andrés

SubProyecto:

Version: 01

Lista y Filiación de Autores:

Jesús Manuel de la Cruz jmcruz@eucmax.sim.ucm.es
Bonifacio de Andrés y Toro deandres@dacya.ucm.es
José María Girón Sierra gironsi@dacya.ucm.es
Segundo Esteban San Román segundo@dacya.ucm.es
José Antonio López Orozco jalo@eucmax.sim.ucm.es

Agradecimientos:

Lista de distribución:

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

Resumen:

Este documento presenta un estudio del modelo lineal para los movimientos Heave y Pitch y para las fuerzas Heave y los momentos Pitch de un barco de alta velocidad. Para ello se han tomado los datos experimentales a las velocidades de 20, 30 y 40 nudos. Con estos datos se ha realizado la identificación de los parámetros del mismo mediante Algoritmos Genéticos. Para ello se han estudiado distintos modelos haciendo variar el número de ceros y polos de la F.T en un rango bastante amplio.

Con todos los modelos estudiados se presenta una propuesta de los más aceptables, teniendo en cuenta el valor de la función de coste y su correspondencia a las distintas velocidades.

Los modelos se han validado con los datos experimentales dados por el CEHIPAR y PRECAL.

Summary:

CONTENIDO

1 ASPECTOS GENERALES DE LA IDENTIFICACIÓN..... 0

1.1 MODELO MATEMÁTICO..... 0

1.2 LA IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO..... 0

1.2.1 el método de los Algoritmos genéticos..... 0

1.2.1.1 Ideas generales..... 0

1.2.1.2 Descripción del cromosoma..... 0

1.2.1.3 La función de coste J..... 0

1.2.1.4 Especificaciones del A.G..... 0

1.2.1.5 Algoritmo..... 0

1.3 MÉTODO DE ELABORACIÓN DE RESULTADOS..... 0

1.3.1 Para obtener los parámetros..... 0

1.3.2 Para obtener los parámetros de la fuerza heave y momento pitch..... 0

2 PRESENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MODELO COMPLEJO..... 0

MODELOS G1(S) = WXF1204 G(S) = WXH1406..... 0

2.1 VELOCIDAD DE 20 NUDOS..... 0

2.1.1 Ecuaciones del modelo a 20 nudos..... 0

2.1.2 Gráficas de resultados para el modelo olas fuerzas w2f1204..... 0

2.1.3 Gráficas y validación de resultados: el modelo olas heave w2h1406..... 0

2.2 VELOCIDAD DE 30 NUDOS..... 0

2.2.1 Ecuaciones del modelo a 30 nudos..... 0

2.2.2 Gráficas de resultados para el modelo olas fuerzas w3f1204..... 0

2.2.3 Gráficas y validación de resultados: el modelo olas heave w3h1406..... 0

2.3 VELOCIDAD DE 40 NUDOS..... 0

2.3.1 Ecuaciones del modelo a 40 nudos..... 0

2.3.2 Gráficas de resultados para el modelo olas fuerzas w4f1204..... 0

2.3.3 Gráficas y validación de resultados: el modelo olas heave w4h1406..... 0

3 MODELOS $G_1(S)$ = WXM1204 G(S) = WXP1406 0

3.1 VALIDACIÓN DEL MODELO (20 NUDOS)..... 0

3.1.1 Ecuaciones del modelo a 20 nudos 0

3.1.2 Gráficas de resultados para el modelo olas MOMENTO w2m1204 0

3.1.3 Gráficas y validación de resultados: el modelo olas pitch w2h1406. 0

3.2 VALIDACIÓN DEL MODELO (30 NUDOS)..... 0

3.2.1 Ecuaciones del modelo a 30 nudos 0

3.2.2 Gráficas de resultados para el modelo olas MOMENTO w3m1204 0

3.2.3 Gráficas y validación de resultados: el modelo olas pitch w3h1406. 0

3.3 VALIDACIÓN DEL MODELO (40 NUDOS)..... 0

3.3.1 Ecuaciones del modelo a 40 nudos 0

3.3.2 Gráficas de resultados para el modelo olas MOMENTO w4m1204 0

3.3.3 Gráficas y validación de resultados: el modelo olas pitch w4h1406. 0

4 VALIDACIÓN DEL HEAVE A 20 NUDOS..... 0

4.1 VELOCIDAD DE 20 NUDOS 0

4.1.1 Ecuaciones del modelo a 30 nudos 0

4.1.2 Gráficas de resultados para el modelo olas MOMENTO w4m1204 0

CAPÍTULO 1

1 ASPECTOS GENERALES DE LA IDENTIFICACIÓN

1.1 MODELO MATEMÁTICO

El modelo considerado para el heave es de la forma general siguiente:

$$G_H = \frac{K.(s+a)(s^2+bs+c)(s^2+ds+e).....}{(s+f).(s^2+gs+h).(s^2+ms+n).....} \quad (1)$$

Restricción: La ganancia K del sistema toma el valor unidad para que a bajas frecuencias

$$|G(jw)|_{w\to 0} = 1 \quad (2)$$

El modelo considerado para el pitch es de la forma general siguiente:

$$G_P = \frac{K.s.(s+a)(s^2+bs+c)(s^2+ds+e).....}{(s+f).(s^2+gs+h).(s^2+ms+n).....} \quad (3)$$

Restricción: La ganancia del sistema a bajas frecuencias debe ser nula y la fase 90º.

$$|G(jw)|_{w\to 0} = 0 \qquad |G(jw() = 90^o \quad (4)$$

La parte izquierda de (1) y (2) es la relación entrada salida que hemos denominado Olas – Heave y Olas - Pitch. La parte derecha es un conjunto de ceros y polos con el que pretendemos modelar el sistema. Haremos un estudio para minimizar dicho número de ceros y polos.

El modelo considerado para la entrada olas y salida la fuerza heave tiene la forma general siguiente:

$$G_{FH} = \frac{K.(s+a)(s^2+bs+c)(s^2+ds+e).....}{(s+f).(s^2+gs+h).(s^2+ms+n).....} \quad (5)$$

Restricción: La ganancia K del sistema toma el valor unidad para que a bajas frecuencias

$$|G(jw)|_{w\to 0} = 1 \quad (6)$$

El modelo considerado para el momento pitch es de la forma general siguiente:

$$G_{MP} = \frac{K.s.(s+a)(s^2+bs+c)(s^2+ds+e).....}{(s+f).(s^2+gs+h).(s^2+ms+n).....} \quad (7)$$

Restricción: La ganancia del sistema a bajas frecuencias debe ser nula y la fase 90º.

$$\left|G(jw)\right|_{w\to 0} = 0 \qquad \left|\mathrm{G(jw()} = 90^{\circ} \right. \tag{8}$$

1.2 LA IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO

1.2.1 EL MÉTODO DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS

1.2.1.1 Ideas generales

Dados unos datos experimentales (en este caso suministrados por el CEHIPAR) suponemos un tipo de modelo de la forma ya comentada

$$G_H = \frac{K.(s+a)(s^2+bs+c)(s^2+ds+e).....}{(s+f).(s^2+gs+h).(s^2+ms+n).....} \quad (9)$$

abordamos el problema de ajustar el modelo de modo que la ecuación represente a esos datos.

De entre los diversos métodos existentes, *hemos investigado la potencialidad al respecto de los Algoritmos Genéticos.* Hemos considerado dos situaciones:

- a) La primera es la usual al comienzo de la modelación, cuando se tantean diversas posibilidades y se tiene una cierta idea de rangos de valores de los parámetros, pero no se cuenta con una solución de partida.
- b) La segunda puede suceder cuando se cuenta con una solución (un determinado conjunto de parámetros), pero se ve que conviene modificarla, bien porque el proceso haya cambiado, o bien porque debe intentarse una mejora del ajuste, (por ejemplo por estar trabajando en tiempo real).

Para ambos casos, hemos planteado formas de solución.
Empezamos con el caso primero: " no hay parámetros conocidos".

El problema del ajuste es un problema de optimización: minimizar un error. En nuestro caso, definimos un error global del ajuste, como una suma ponderada de los errores de las curvas obtenidas por el modelo con respecto a cada gráfica de datos reales. La función de coste se detalla más adelante.

1.2.1.2 Descripción del cromosoma

La clave para aplicar algoritmos genéticos es encontrar una representación del problema en términos de cromosomas, y definir adecuadamente el espacio de búsqueda (acotarlo de forma apropiada repercute en el coste computacional).
Dado el conjunto de parámetros a ajustar, definimos el cromosoma como un conjunto de genes correspondiendo cada uno a un parámetro del modelo, [a, b, c, d, ...m, n, ...]. Los genes son números reales dentro del rango de variabilidad de los parámetros. En el caso que estamos estudiando los parámetros son números reales comprendidos en el rango de [-∞ +∞]. Esto hace que el espacio de búsqueda sea muy grande y el problema de difícil solución.
Se ha visto que se mejora la eficacia del método si en lugar de hacer operar como acabamos de decir, lo hacemos de este otro modo. Se coge cada paréntesis del modelo y se descompone en sus raíces simples, (reales o conjugadas):

$$(s^2 + b.s + c) = (s - r_1).(s - r_2) \tag{10}$$

donde

$$r_1 = real_1 + imag_1.j \tag{11}$$
$$r_2 = real_2 + imag_2.j$$

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

$$Cromosoma = [real_1\ imag_1\ \ real_2\ imag_2\ real_3\ imag_3\ .....real_n\ imag_n] \tag{12}$$

1.2.1.3 La función de coste J.

Tomamos como función de evaluación de los cromosomas, el valor de Jg que se obtiene con los parámetros señalados por el cromosoma. Este valor se calcula integrando las ecuaciones del modelo, y midiendo los errores respecto a los datos de las gráficas. Para la primera gráfica considerada será:

$$\begin{aligned} J_{Real} &= \sum_{i=2}^{n} (Real_{Datos} - Real_{Modelo})^2 \\ J_{Imag} &= \sum_{i=2}^{n} (Imag_{Datos} - Imag_{Modelo})^2 \\ J_1 &= J_{Real} + J_{Imag} \\ J &= \frac{100}{J_1} \end{aligned} \tag{13}$$

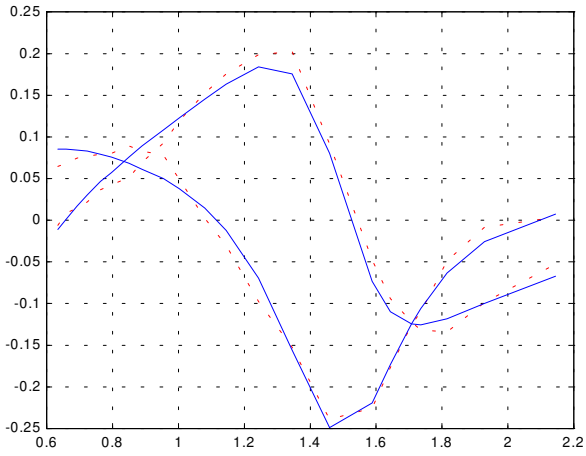


Figura 1 Parte real e imaginaria de datos y modelo para obtener la función de coste J.

El multiplicar **J** por **100** tiene como objeto aumentar el rango de comparación de los elementos que componen cada generación en una población ede AG.

1.2.1.4 Especificaciones del A.G.

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

población inicial de 10 individuos creados al azar
4 sustituciones por generación
probabilidad de cruce de 0.7
probabilidad de mutación de 0.007
selección de padres se hace mediante el método de la ruleta.
Se corren 10000 generaciones, en 40 eras.

1.2.1.5 Algoritmo.

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

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

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

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

El algoritmo se ha paralelizado con un doble objetivo:

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

Para ello se ha utilizado el Computador del centro de cálculo de la UCM, de marca Silicon Graphics, de 32 procesadores, utilizando técnicas propias elaboradas junto al grupo de paralelización del área de paralelismo. El método empleado se ha presentado en dos Congresos Internacionales [5] y [6], uno de paralelismo y otro de Algoritmos Genéticos.

1.3 MÉTODO DE ELABORACIÓN DE RESULTADOS

Como éste ha sido un proceso de depuración sólo se han elaborado los modelos que, con la experiencia adquirida en los trabajos anteriores, han dado los resultados mas aceptables

1.3.1 PARA OBTENER LOS PARÁMETROS

1º.- Se obtienen los parámetros para la velocidad de 20 nudos según los modelos siguientes empleando:

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

Modelo	nº ceros simples	nº ceros complejos	nº polos simples	nº polos complejos
xvm0212	0	2	1	2
xvm0204	0	2	0	4
xvm1204	1	2	0	4
xvm0214	0	2	1	4
xvm1214	1	2	1	4
xvm0414	0	4	1	4
xvm0006	0	0	0	6
xvm0206	0	2	0	6
xvm1206	1	2	0	6
xvm0406	0	4	0	6
xvm1216	1	4	0	6
xvm1406	1	4	0	6
xvm1416	1	4	0	6

Tabla 1: Tabla con la nomenclatura de los modelos
x = h para el heave; x = p para el pitch; m = f para la fuerza heave
m= m para el momento pitch; v = la velocidad

2º.- Se aplica lo mismo para las velocidades de 30 y 40 nudos.
3º.- Los modelos que hayan obtenido mejor J se le aplica el algoritmo de mejora:

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

1.3.2 PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE LA FUERZA HEAVE Y MOMENTO PITCH

Se aplica un método análogo al anterior sólo que se elimina el estudio de los modelos con seis polos, por parecer excesivo su número.

5º.- Se añade la búsqueda de ceros y polos coincidentes entre los modelos

- olas - heave y olas - fuerzas heave
- olas - pitch y olas - momentos pitch
-

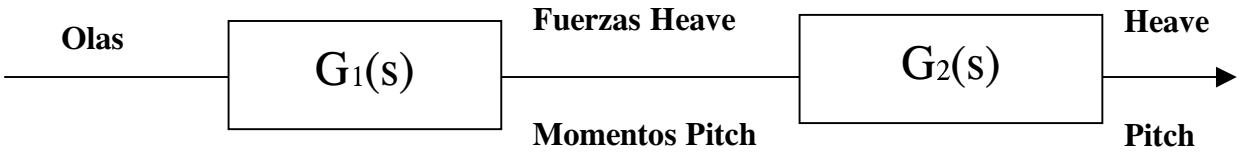
Para ello se aplica el algoritmo de COMPLETAR GENES. Consiste en que conociendo los genes del modelo olas – fuerzas (olas – momentos) éstos se completan hasta obtener un modelo olas - heave (olas – pitch) satisfactorio por la validación.

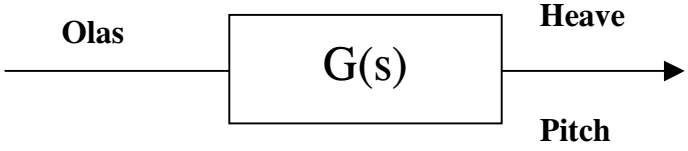
CAPÍTULO 2

2 PRESENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MODELO COMPLEJO

MODELOS G1(S) = WXF1204 G(S) = WXH1406

Estos modelos responden a la estructura general siguiente:





2.1 VELOCIDAD DE 20 NUDOS

2.1.1 ECUACIONES DEL MODELO A 20 NUDOS

$$G(s)=\frac{0.06325s^5+0.1206s^4+0.6457s^3-0.517s^2+1.444s-0.1844}{s^6+1.492s^5+4.847s^4+4.213s^3+4.356s^2+1.433s+0.1844}$$

$$G_1(s)=\frac{0.1271s^3-0.04003s^2+0.4615s-0.06097}{s^4+1.036s^3+1.35s^2+0.4647s+0.06097}$$

$$G_2(s)=\frac{0.4976s^2-0.7923s+3.0243}{s^2+0.456s+3.024}$$

damping de los polos

Eigenvalue	Damping	Freq. (rad/s)
-2.28e-001 + 1.72e+000i	1.31e-001	1.74e+000
-2.28e-001 - 1.72e+000i	1.31e-001	1.74e+000
-3.11e-001 + 9.68e-001i	3.06e-001	1.02e+000
-3.11e-001 - 9.68e-001i	3.06e-001	1.02e+000
-2.07e-001 + 1.27e-001i	8.52e-001	2.43e-001
-2.07e-001 - 1.27e-001i	8.52e-001	2.43e-001

2.1.2 GRÁFICAS DE RESULTADOS PARA EL MODELO OLAS FUERZAS W2F1204

J =2.6813e+003

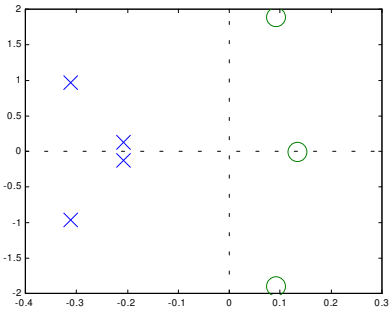


Figura 2: Mapa de polos y ceros

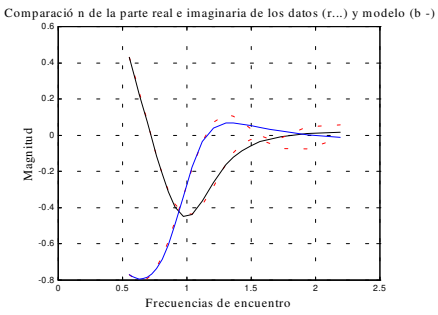


Figura 3: Parte real e imaginaria.

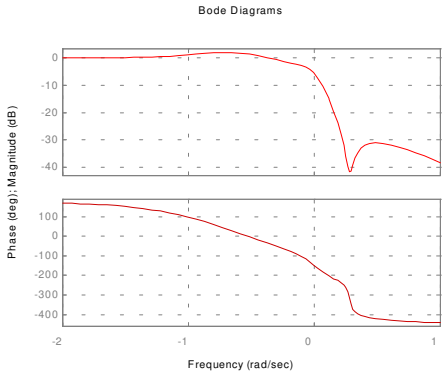


Figura 4: Bode del sistema.

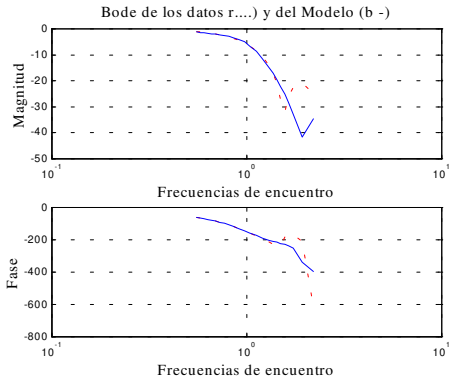


Figura 5: Bode comparado.

2.1.3 GRÁFICAS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS: EL MODELO OLAS HEAVE W2H1406

$$J = 2.1200e+003$$

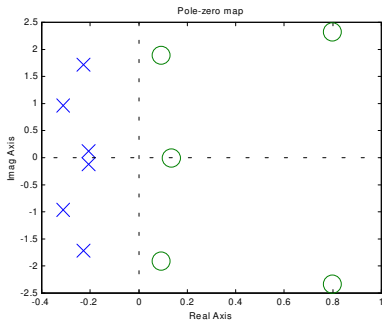


Figura 6: Mapa de polos y ceros.

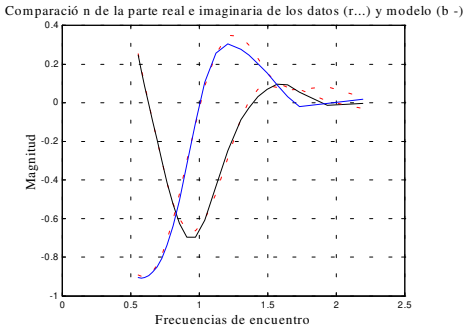


Figura 7: Parte real e imaginaria.

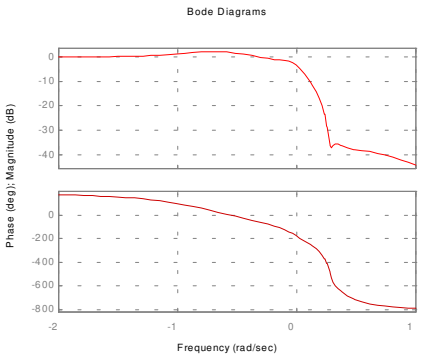


Figura 8: Bode del sistema.

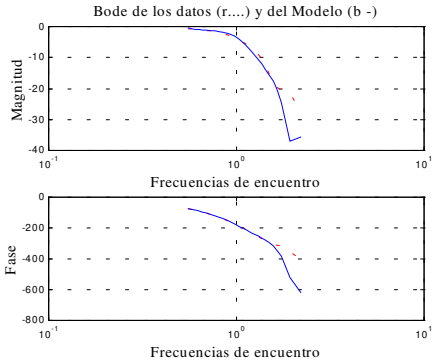


Figura 9: Bode comparado.

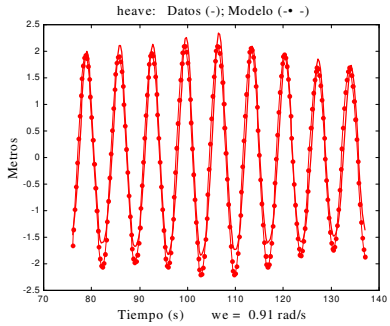


Figura 10: Validación con olas regulares.

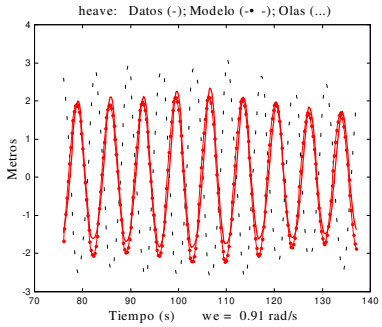


Figura 11: Validación con olas regulares.

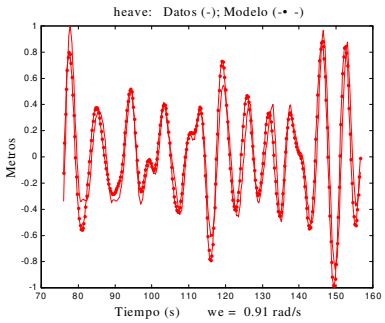


Figura 12: Validación con olas irregulares.

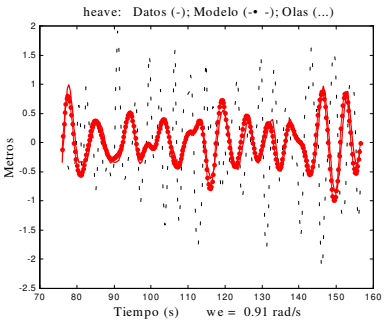


Figura 13: Validación con olas irregulares.

2.2 VELOCIDAD DE 30 NUDOS.

2.2.1 ECUACIONES DEL MODELO A 30 NUDOS

$$G(s)=\frac{0.03934s^5-0.06814s^4+0.6212s^3-0.5145s^2+2.344s-0.3287}{s^6+1.91s^5+5.493s^4+5.881s^3+6.125s^2+2.536s+0.3287}$$

$$G_1(s)=\frac{0.1208s^3-0.03309s^2+0.8061s-0.1158}{s^4+1.432s^3+1.969s^2+0.8736s+0.1158}$$

$$G_2(s)=\frac{0.3257s^2-0.4748s+2.8388}{s^2+0.478s+2.839}$$

damping de los polos

Eigenvalue	Damping	Freq. (rad/s)
-2.39e-001 - 1.67e+000i	1.42e-001	1.69e+000
-2.39e-001 + 1.67e+000i	1.42e-001	1.69e+000
-4.28e-001 - 1.10e+000i	3.63e-001	1.18e+000
-4.28e-001 + 1.10e+000i	3.63e-001	1.18e+000
-2.88e-001 - 1.20e-002i	9.99e-001	2.88e-001
-2.88e-001 + 1.20e-002i	9.99e-001	2.88e-001

2.2.2 GRÁFICAS DE RESULTADOS PARA EL MODELO OLAS FUERZAS W3F1204

J = 3.7317e+003

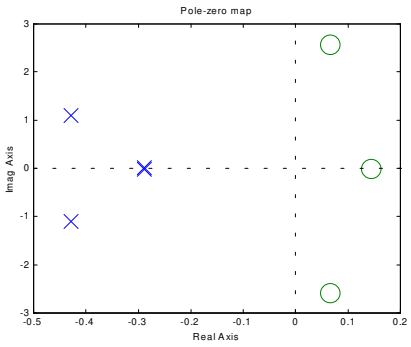


Figura 14: Mapa de polos y ceros

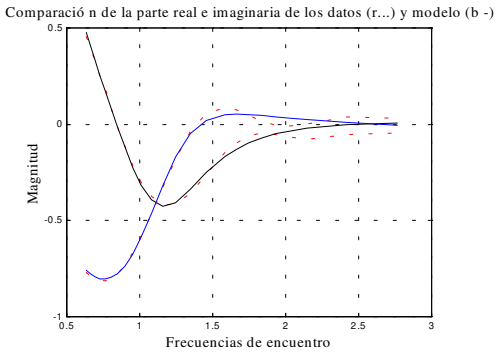


Figura 15: Parte real e imaginaria.

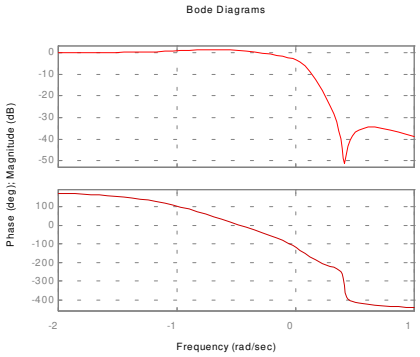


Figura 16: Bode del sistema.

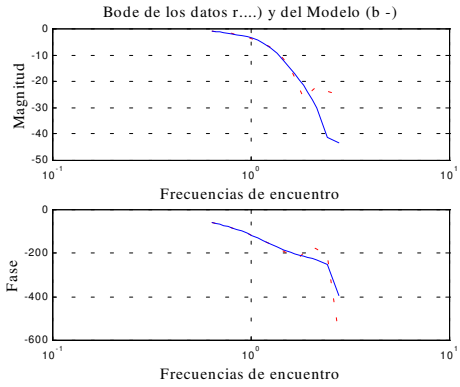


Figura 17: Bode comparado.

2.2.3 GRÁFICAS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS: EL MODELO OLAS HEAVE W3H1406

$$J = 2.8856e+003$$

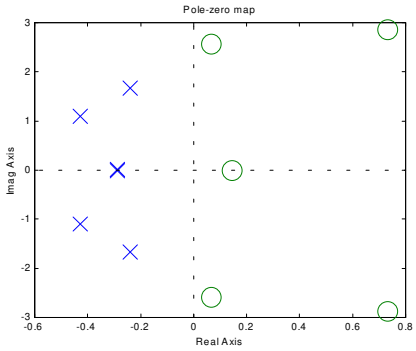


Figura 18: Mapa de polos y ceros.

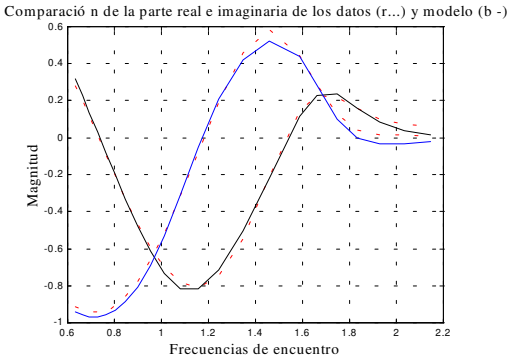


Figura 19: Parte real e imaginaria.

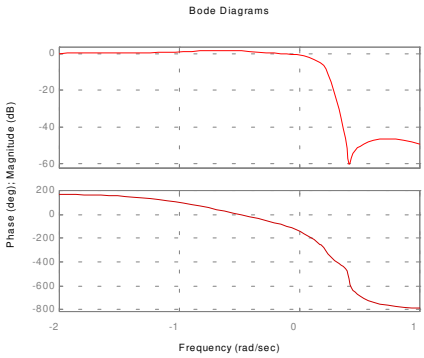


Figura 20: Bode del sistema.

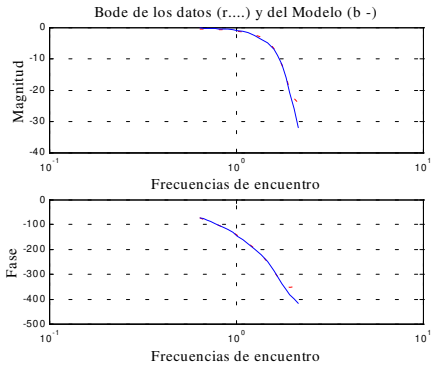


Figura 21: Bode comparado.

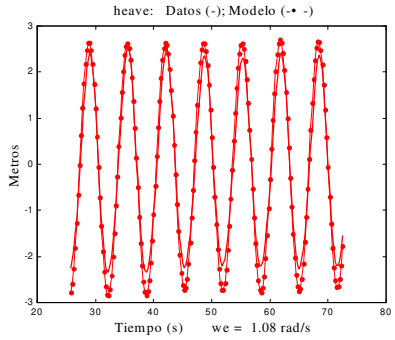


Figura 22: Validación con olas regulares.

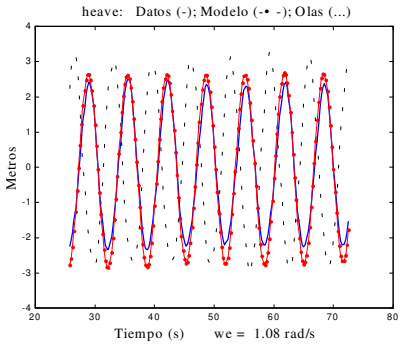


Figura 23: Validación con olas regulares.

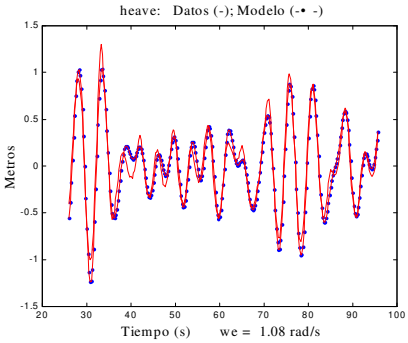


Figura 24: Validación con olas irregulares.

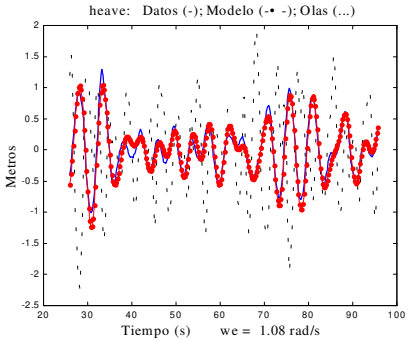


Figura 25: Validación con olas irregulares.

2.3 VELOCIDAD DE 40 NUDOS.

2.3.1 ECUACIONES DEL MODELO A 40 NUDOS

$$G(s)=\frac{0.02869s^5-0.03003s^4+0.5796s^3-0.36s^3+3.444s-0.4868}{s^6+2.044s^5+6.215s^4+7.083s^3+8.112s^2+3.567s+0.468}$$

$$G_1(s)=\frac{0.1034\ s^3+0.081565\ s^2+1.106\ s-0.1601}{s^4+1.578\ s^3+2.439\ s^2+1.149\ s+0.1601}$$

$$G_2(s)=\frac{0.2775\ s^2-0.5094\ s+3.041}{s^2+0.466\ s+3.04}$$

damping de los polos

Eigenvalue	Damping	Freq. (rad/s)
-2.33e-001 + 1.73e+000i	1.34e-001	1.74e+000
-4.88e-001 + 1.23e+000i	3.68e-001	1.33e+000
-2.33e-001 - 1.73e+000i	1.34e-001	1.74e+000
-4.88e-001 - 1.23e+000i	3.68e-001	1.33e+000
-3.01e-001 + 1.80e-002i	9.98e-001	3.02e-001
-3.01e-001 - 1.80e-002i	9.98e-001	3.02e-001

2.3.2 GRÁFICAS DE RESULTADOS PARA EL MODELO OLAS FUERZAS W4F1204

J = 5.3452e+003

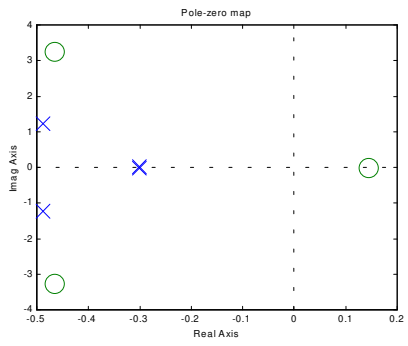


Figura 26: Mapa de polos y ceros.

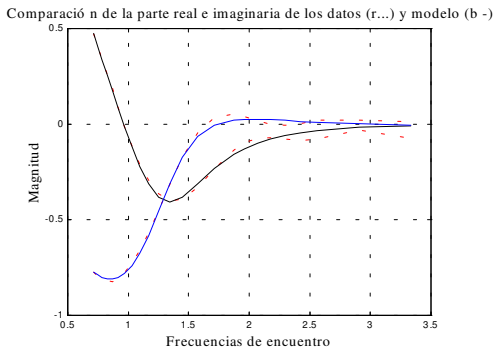


Figura 27: Parte real e imaginaria.

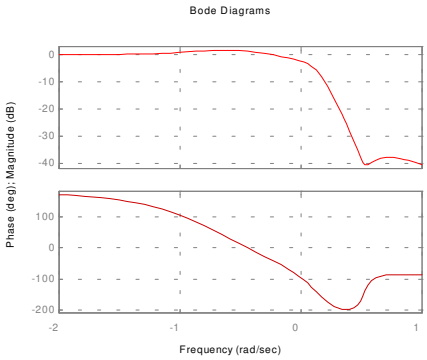


Figura 28: Bode del sistema.

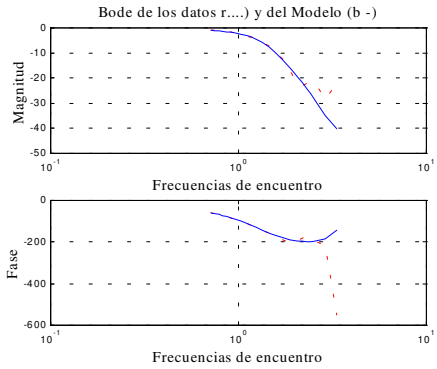


Figura 29: Bode comparado.

2.3.3 GRÁFICAS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS: EL MODELO OLAS HEAVE W4H1406

$$J = 4.6493e+003$$

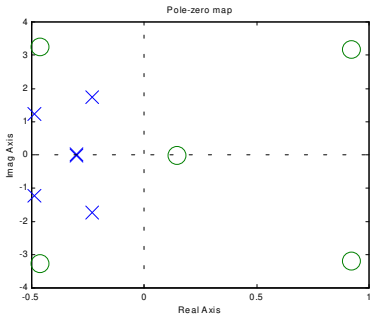


Figura 30: Mapa de polos y ceros.

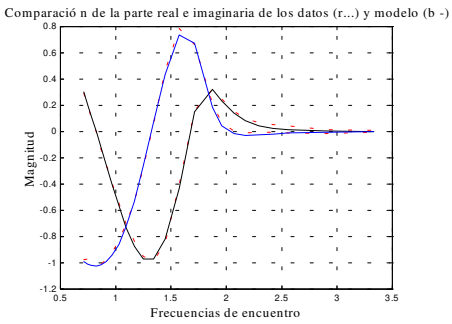


Figura 31: Parte real e imaginaria.

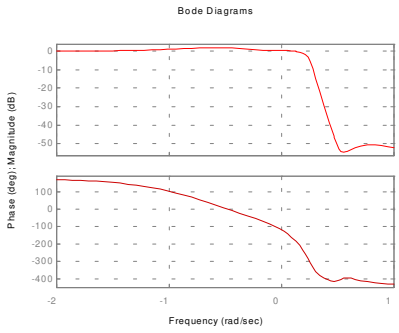


Figura 32: Bode del sistema.

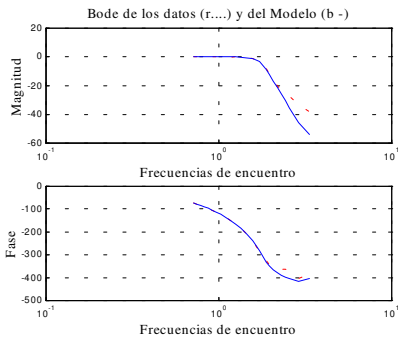


Figura 33: Bode comparado.

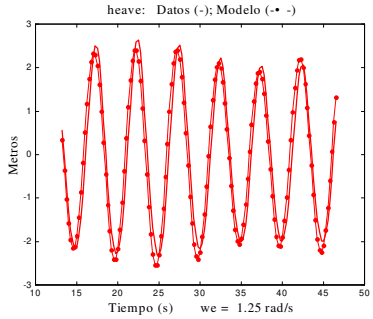


Figura 34: Validación con olas regulares.

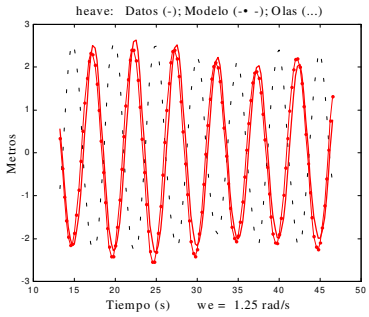


Figura 35: Validación con olas regulares.

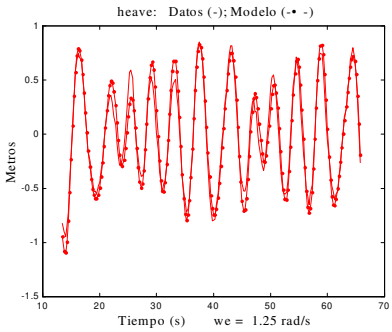


Figura 36: Validación con olas irregulares.

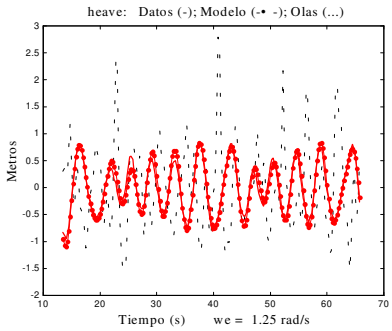


Figura 37: Validación con olas irregulares.

3 MODELOS $G_1(S)$ = WXM1204 G(S) = WXP1406

3.1 VALIDACIÓN DEL MODELO (20 NUDOS).

3.1.1 ECUACIONES DEL MODELO A 20 NUDOS

$$G(s) = \frac{s^6 + 0.58s^5 + 10.67s^4 - 13.96s^3 + 37.73s^2 - 51.78s}{s^6 + 11.88s^5 + 45.2s^4 + 72.58s^3 + 107.2s^2 + 71.64s + 41.82}$$

$$G_1(s) = \frac{s^4 - 1.094s^3 + 4.592s^2 - 4.791s}{s^4 + 11.4s^3 + 37.89s^2 + 33.99s + 23.63}$$

$$G_2(s) = \frac{s^2 + 2.484s + 10.81}{s^2 + 0.486s + 1.77}$$

damping de los polos

Eigenvalue	Damping	Freq. (rad/s)
-5.24e+000 + 4.00e-003i	1.00e+000	5.25e+000
-5.25e+000 - 4.00e-003i	1.00e+000	5.25e+000
-2.43e-001 + 1.31e+000i	1.83e-001	1.33e+000
-4.54e-001 + 8.08e-001i	4.90e-001	9.27e-001
-2.43e-001 - 1.31e+000i	1.83e-001	1.33e+000
-4.54e-001 - 8.08e-001i	4.90e-001	9.27e-001

3.1.2 GRÁFICAS DE RESULTADOS PARA EL MODELO OLAS MOMENTO W2M1204

J = 9.5499e+003

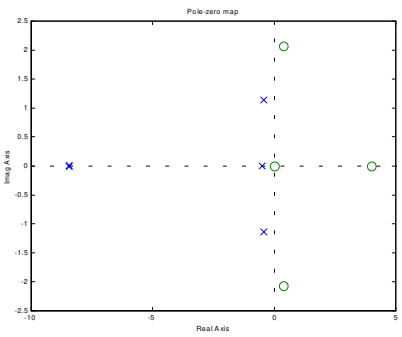


Figura 38: Mapa de polos y ceros

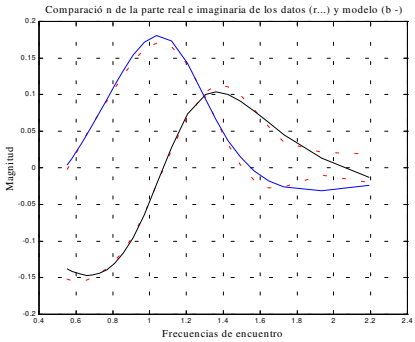


Figura 39: Parte real e imaginaria.

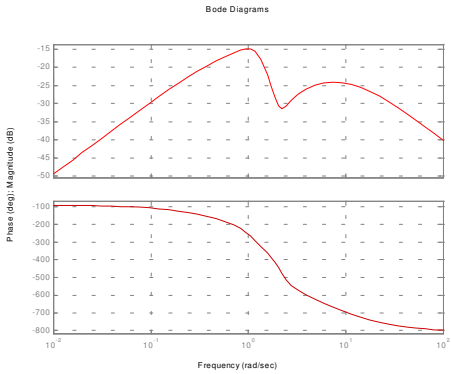


Figura 40: Bode del sistema.

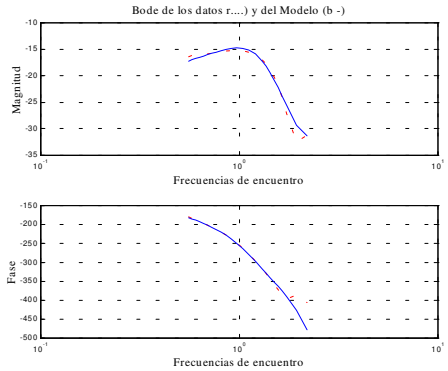


Figura 41: Bode comparado.

3.1.3 GRÁFICAS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS: EL MODELO OLAS PITCH W2H1406.

$$J = 145.5824$$

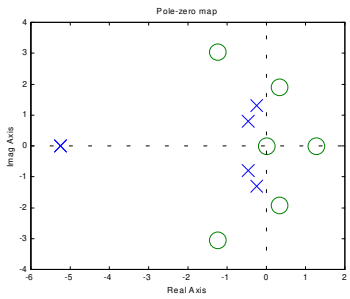


Figura 42: Mapa de polos y ceros.

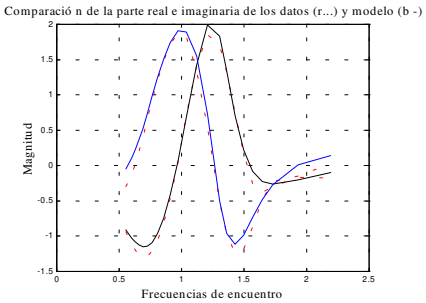


Figura 43: Parte real e imaginaria.

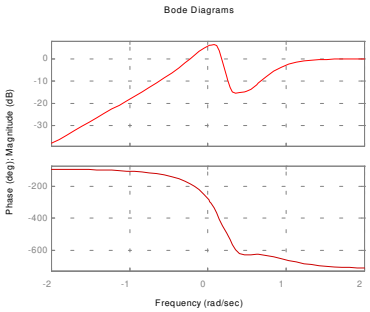


Figura 44: Bode del sistema.

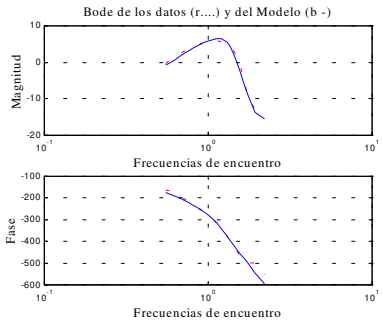


Figura 45: Bode comparado.

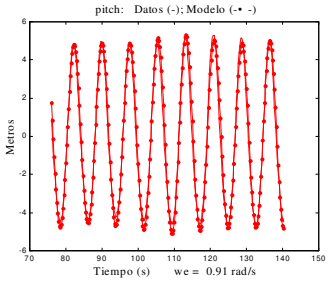


Figura 46: Validación con olas regulares.

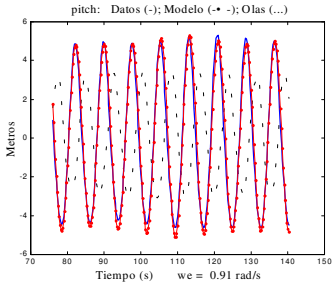


Figura 47: Validación con olas regulares.

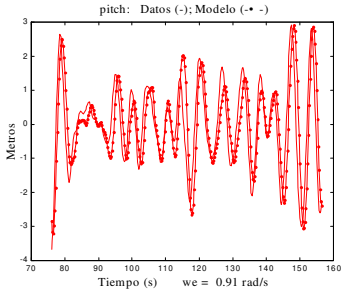


Figura 48: Validación con olas irregulares.

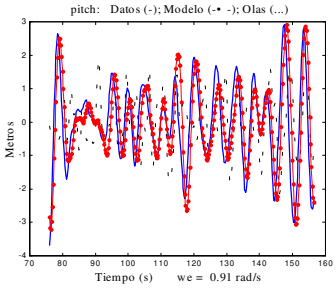


Figura 49: Validación con olas irregulares.

3.2 VALIDACIÓN DEL MODELO (30 NUDOS).

3.2.1 ECUACIONES DEL MODELO A 30 NUDOS

$$G(s) = \frac{s^6 - 1.43s^5 + 18.2s^4 - 35.52s^3 + 88.47s^2 - 133.7s}{s^6 + 15.02s^5 + 70.37s^4 + 127.6s^3 + 220.5s^2 + 173.9s + 109.8}$$

$$G_1(s) = \frac{s^4 - 2.478s^3 + 7.365s^2 - 9.957s}{s^4 + 14.55s^3 + 61.26s^2 + 65.03s + 46.98}$$

$$G_2(s) = \frac{s^2 + 1.048s + 13.43}{s^2 + 0.466s + 2.337}$$

damping de los polos

Eigenvalue	Damping	Freq. (rad/s)
-6.71e+000 - 9.00e-003i	1.00e+000	6.71e+000
-6.71e+000 + 9.00e-003i	1.00e+000	6.71e+000
-2.33e-001 - 1.51e+000i	1.52e-001	1.53e+000
-5.67e-001 - 8.50e-001i	5.55e-001	1.02e+000
-2.33e-001 + 1.51e+000i	1.52e-001	1.53e+000
-5.67e-001 + 8.50e-001i	5.55e-001	1.02e+00

3.2.2 GRÁFICAS DE RESULTADOS PARA EL MODELO OLAS MOMENTO W3M1204

J = 8.6799e+003

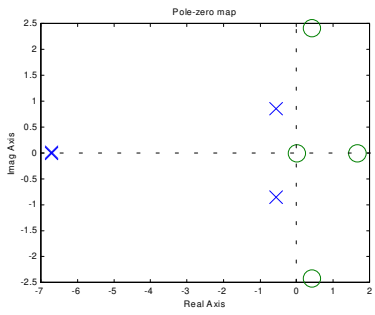


Figura 50: Mapa de polos y ceros.

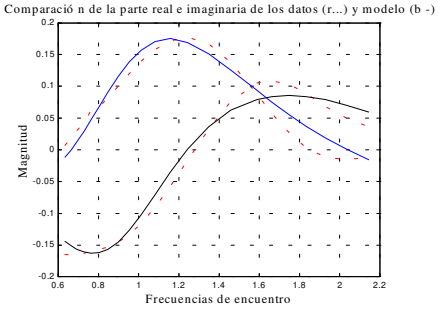


Figura 51: Parte real e imaginaria.

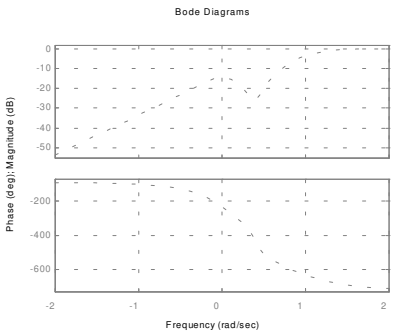


Figura 52: Bode del sistema.

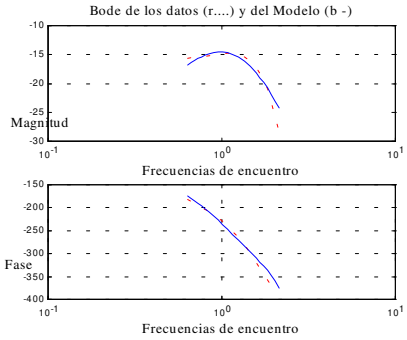


Figura 53: Bode comparado.

3.2.3 GRÁFICAS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS: EL MODELO OLAS PITCH W3H1406.

J = 179.7051

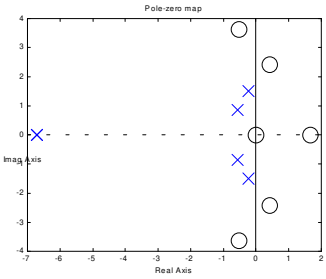


Figura 54: Mapa de polos y ceros.

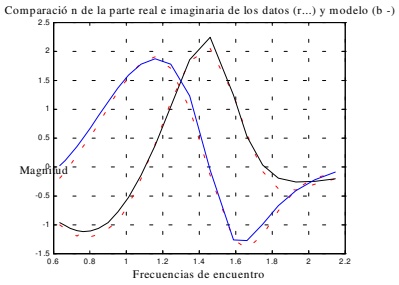


Figura 55: Parte real e imaginaria.

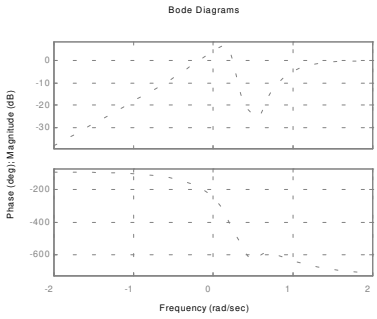


Figura 56: Bode del sistema.

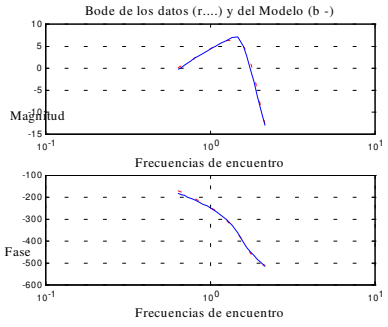


Figura 57: Bode comparado.

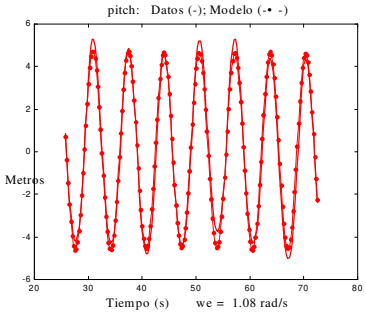


Figura 58: Validación con olas regulares.

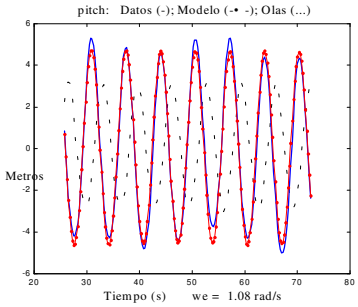


Figura 59: Validación con olas regulares.

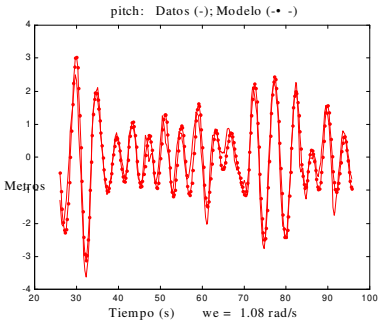


Figura 60: Validación con olas irregulares.

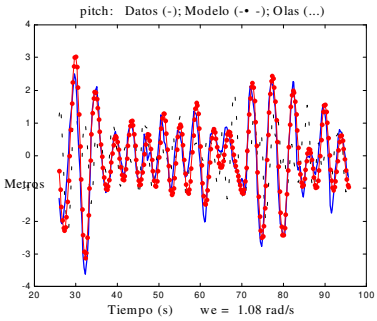


Figura 61: Validación con olas irregulares.

3.3 VALIDACIÓN DEL MODELO (40 NUDOS).

3.3.1 ECUACIONES DEL MODELO A 40 NUDOS

$$G(s)=\frac{s^6-2.096s^5+22.02s^4-51.31s^3+135.8s^2-260.6s}{s^6+18.48s^5+103.6s^4+200s^3+383.7s^2+338.6s+229.7}$$

$$G_1(s)=\frac{s^4-3.07s^3+10.85s^2-18.4s}{s^4+18.07s^3+93.37s^2+112.4s+85.16}$$

$$G_2(s)=\frac{s^2+0.974s+14.16}{s^2+0.416s+2.697}$$

damping de los polos

Eigenvalue	Damping	Freq. (rad/s)
-8.38e+000 - 8.00e-003i	1.00e+000	8.38e+000
-8.38e+000 + 8.00e-003i	1.00e+000	8.38e+000
-2.08e-001 - 1.63e+000i	1.27e-001	1.64e+000
-6.56e-001 - 8.85e-001i	5.95e-001	1.10e+000
-2.08e-001 + 1.63e+000i	1.27e-001	1.64e+000
-6.56e-001 + 8.85e-001i	5.95e-001	1.10e+000

3.3.2 GRÁFICAS DE RESULTADOS PARA EL MODELO OLAS MOMENTO W4M1204

J = 7.9459e+003

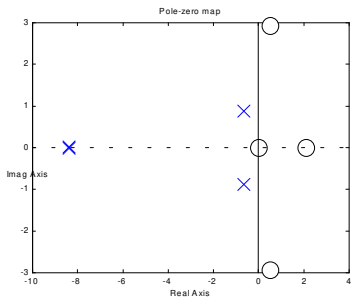


Figura 62: Mapa de polos y ceros.

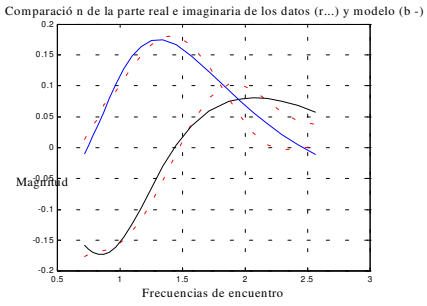


Figura 63: Parte real e imaginaria.

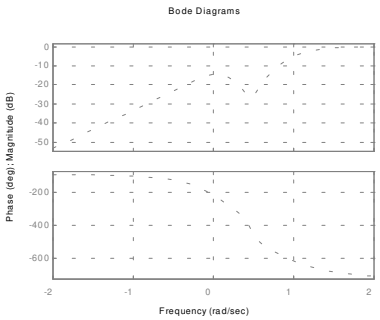


Figura 64: Bode del sistema.

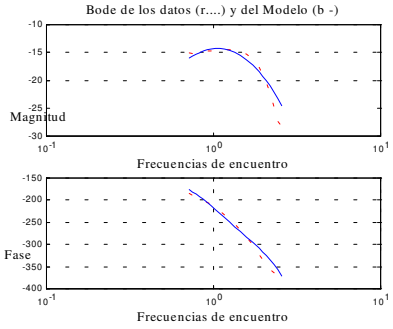


Figura 65: Bode comparado.

3.3.3 GRÁFICAS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS: EL MODELO OLAS PITCH W4H1406.

$$J = 150.2542$$

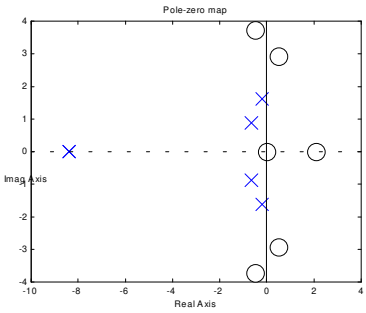


Figura 66: Mapa de polos y ceros.

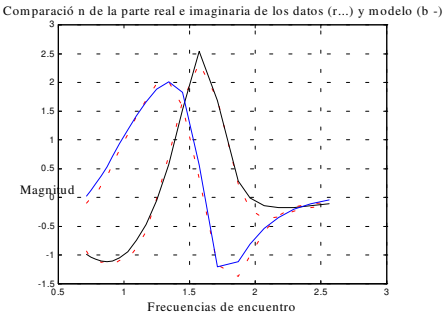


Figura 67: Parte real e imaginaria.

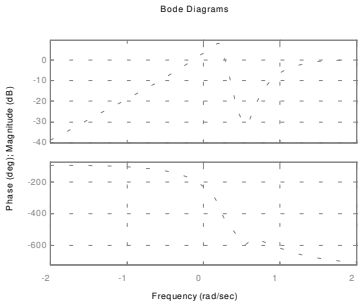


Figura 68: Bode del sistema.

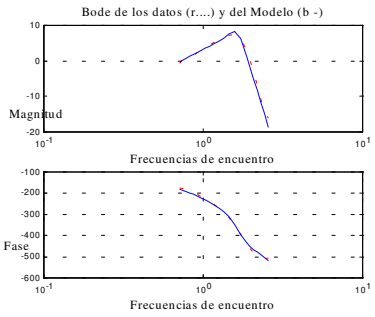


Figura 69: Bode comparado.

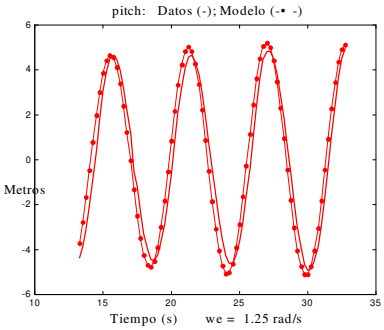


Figura 70: Validación con olas regulares.

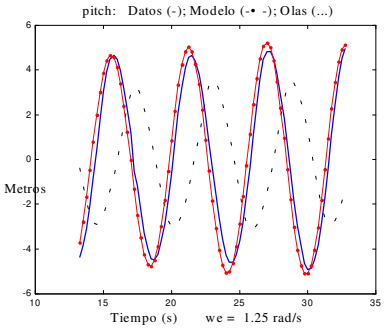


Figura 71: Validación con olas regulares.

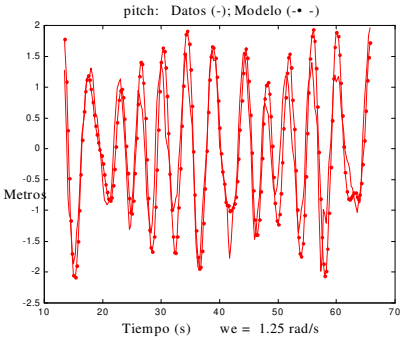


Figura 72: Validación con olas irregulares.

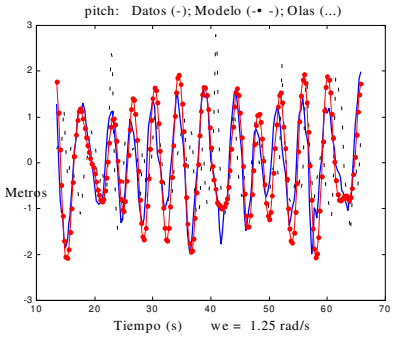


Figura 73: Validación con olas irregulares.

4 VALIDACIÓN DEL HEAVE A 20 NUDOS

4.1 VELOCIDAD DE 20 NUDOS

4.1.1 ECUACIONES DEL MODELO A 30 NUDOS

$$G(s) = \frac{16.52\,s^5 + 7.518\,s^4 + 75.75\,s^3 + 95.37\,s^2 + 0.4662\,s + 301}{s^6 + 23.27\,s^5 + 163.1\,s^4 + 353.6\,s^3 + 605\,s^2 + 543\,s + 301}$$

damping de los polos

Eigenvalue	Damping	Freq. (rad/s)
-1.05E+001 - 6.96E-001I	9.98E-001	1.05E+001
-1.05E+001 + 6.96E-001I	9.98E-001	1.05E+001
-3.70E-001 - 1.46E+000I	2.45E-001	1.51E+000
-7.71E-001 - 7.76E-001I	7.05E-001	1.09E+000
-3.70E-001 + 1.46E+000I	2.45E-001	1.51E+000
-7.71E-001 + 7.76E-001I	7.05E-001	1.09E+000

4.1.2 GRÁFICAS DE RESULTADOS PARA EL MODELO OLAS MOMENTO W4M1204

J = 4773.6

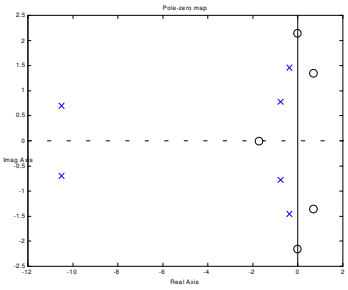


Figura 74: Mapa de polos y ceros.

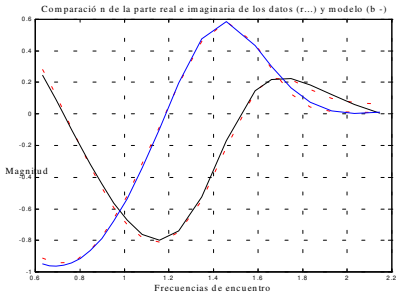


Figura 75: Parte real e imaginaria.

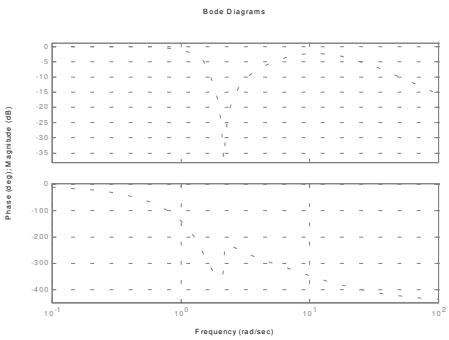


Figura 76: Bode del sistema.

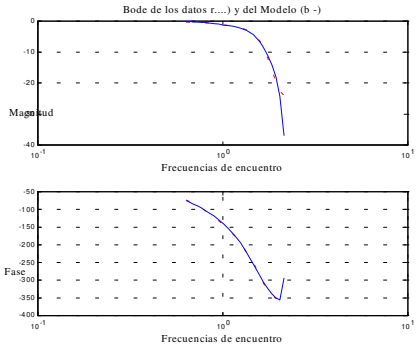


Figura 77: Bode comparado.

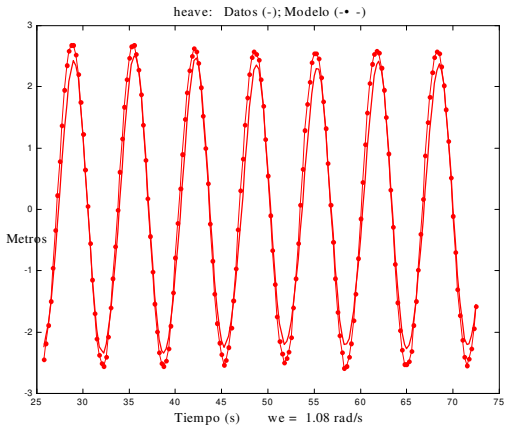


Figura 78: Validación con olas regulares.

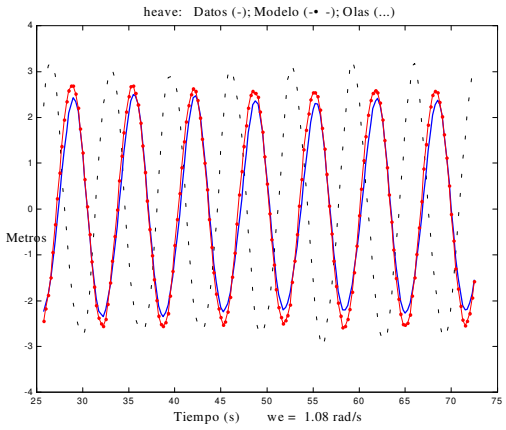


Figura 79: Validación con olas regulares.

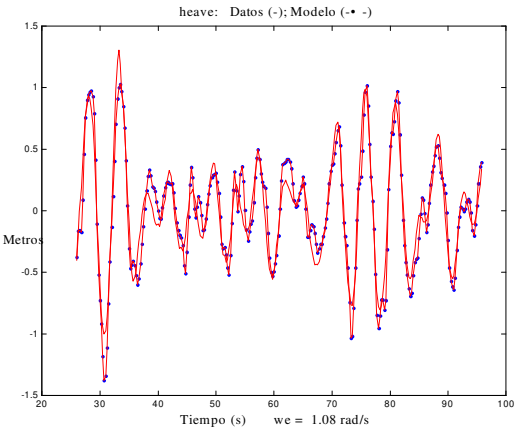


Figura 80: Validación con olas irregulares.

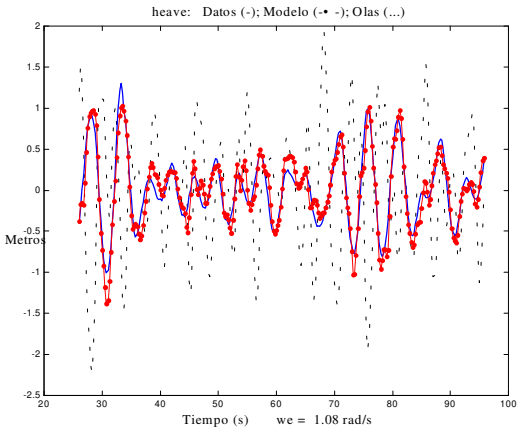


Figura 81: Validación con olas irregulares.