

**III Congreso de Usuarios de MATLAB  
17-19 noviembre 1999  
Madrid, España  
Editor : Sebastián Dormido Bencomo (UNED)  
ISBN :84-699-1358-1**

**IDENTIFICACION DE SISTEMAS MULTIVARIABLES ACOPLADOS CON  
RESTRICCIONES**

**J.M. de la Cruz, J. Aranda, P. Ruipérez, J.M. Díaz**

**pp.: 239-246**

# IDENTIFICACION DE SISTEMAS MULTIVARIABLES ACOPLADOS CON RESTRICCIONES

J. Aranda, J.M. Díaz, P. Ruipérez  
Dept. de Informática y Automática. UNED. Madrid , jaranda@dia.uned.es

J. M. De La Cruz  
Dept. de Arquitectura de ordenadores y Automática. U. Complutense. Madrid, jmcruz@dacya.ucm.es

## Resumen

*En este trabajo se desarrolla un método para la identificación de funciones de transferencia de un sistema SIMO de salidas acopladas, con modelos paramétricos ARX. Donde en el proceso de estima de los parámetros por mínimos cuadrados, se consideran restricciones de igualdad de tipo no lineal. Se muestran los resultados obtenidos de aplicarlo a la identificación de la dinámica vertical de un buque de alta velocidad. Se presentan las funciones programadas en MATLAB™ que implementan este método.*

**Palabras claves :** Identificación, mínimos cuadrados, sistema SIMO, modelo ARX multivariable , restricción no lineal.

## 1 INTRODUCCION

Matlab dispone actualmente de un gran número de funciones repartidas en diferentes “toolboxes” para la identificación y optimización de funciones. En la Tabla 1 se hace un breve resumen de algunas de las funciones más características.

La toolbox Ident [5] de Matlab, para la identificación de sistemas proporciona un conjunto de funciones (ver Tabla 1), y un atractivo entorno gráfico para realizar estimación e identificación. Permite trabajar con funciones de transferencia o con representación en variables de estado, en el dominio temporal o en el frecuencial. Realizar estimación de modelos tanto paramétricos como no paramétricos. Permite también realizar modelos ARX multivariables y modelos de variables de estado con parámetros de acoplo. Sin embargo, a pesar de sus grandes cualidades, también presenta algunas carencias, entre ellas se pueden destacar :

- 1) La imposibilidad de realizar estima por mínimos cuadrados considerando restricciones en los parámetros.

- 2) La imposibilidad de identificar funciones de transferencia de sistemas multivariables con polos o ceros comunes a las distintas dinámicas.
- 3) La poca flexibilidad en la selección de la representación en variables de estado más conveniente. Así como en la configuración de los parámetros de acoplo de dicha representación.
- 4) La incomoda información adicional, en término de matrices de covarianza, que es necesario aportar para poder realizar la identificación en variables de estado.

Tabla 1 : Resumen de funciones Matlab características en problemas de identificación y optimización de funciones

Nombre	Descripción
dtrend <sup>1</sup>	Elimina tendencias de una serie temporal
spa <sup>1</sup>	Estima el espectro y la funciones de transferencia utilizando análisis espectral.
arx <sup>1</sup>	Estima un modelo ARX utilizando mínimos cuadrados.
struc <sup>1</sup>	Genera un conjunto de estructuras.
arxstruc <sup>1</sup>	Calcula la función de coste para un conjunto de estructuras de modelos ARX
selstruc <sup>1</sup>	Selecciona la mejor estructura.
elis <sup>2</sup>	Rutina general para la estimación de parámetros
elism1 <sup>2</sup>	Interface simple para resolver mediante elis los problemas de estimación más comunes
elistcost <sup>2</sup>	Valor de la función de coste para elis
fminu <sup>3</sup>	Minimización sin restricciones utilizando el método del gradiente.
constr <sup>3</sup>	Minimización con restricciones.
leastsq <sup>3</sup>	Mínimos cuadrados no lineales
conls <sup>3</sup>	Mínimos cuadrados lineales con restricciones

<sup>1</sup> Pertenece a la toolbox IDENT.

<sup>2</sup> Pertenece a la toolbox FDIDENT.

<sup>3</sup> Pertenece a la toolbox OPTIM

La toolbox FDIDENT, contiene funciones (ver Tabla 1) implementadas para realizar identificación en el dominio de la frecuencia. Esta toolbox se encuentra todavía poco desarrollada., presenta como principales defectos: la enorme dificultad que conlleva su uso, el gran número de parámetros a configurar y la excesiva información que es necesario aportar sobre el problema a identificar.

Problemas de optimización, que surgen al realizar identificaciones y que no son tratados por IDENT pueden ser resueltos adaptando adecuadamente las funciones implementadas en la toolbox de optimización de Matlab OPTIM [6]. Así, si la función a optimizar es de tipo no lineal se puede utilizar la función *fminu.m*. Si el problema de optimización requiere la imposición de restricciones de igualdad o desigualdades, ya sean lineales o no lineales, se puede utilizar la función *constr.m*. Para resolver problemas de mínimos cuadrados no lineales se puede utilizar la función *leastsq.m*. Si el problema es de mínimos cuadrados lineales con restricciones lineales se puede utilizar la función *conls.m*. Todas estas funciones presentan como único inconveniente, la necesidad de realizar una elección adecuada de las condiciones iniciales, para evitar la convergencia a mínimos locales.

Al enfrentar el problema de la identificación de la dinámica vertical de un buque de alta velocidad [1], se hace imprescindible el trabajar con modelos ARX acoplados, para así dar cuenta de las ecuaciones que sobre dicha dinámica ya estaban desarrolladas [3] [4]. Por otro lado el conocimiento a priori de ciertas características que debe presentar la dinámica vertical de un buque, impone una serie de restricciones sobre los parámetros a estimar en nuestros modelos. Había que realizar una estima de mínimos cuadrados con restricciones.

Al coincidir nuestras necesidades, con las carencias de la herramienta Ident se hizo necesario desarrollar un método para la identificación de un sistema SIMO de salidas acopladas, con modelos paramétricos ARX. Donde en el proceso de estima de los parámetros por mínimos cuadrados, se consideran restricciones de igualdad de tipo no lineal.

## 2 IDENTIFICACION DE SISTEMAS MULTIVARIABLES ACOPLADOS CON RESTRICCIONES

### 2.1 ESTIMACION PARAMETRICA CON RESTRICCIONES.

Sea un sistema lineal SIMO, como se muestra en la Figura 1.

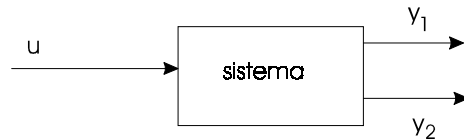


Figura 1 :Sistema SIMO

Supóngase que se tienen medidas experimentales de las series temporales de la entrada  $u(rT)$  y de las salidas  $y_1(rT)$  e  $y_2(rT)$ , donde  $r=1, \dots, N$  y  $T$  es el periodo de muestreo.

Una posible estima  $\hat{y}_1(k)$  e  $\hat{y}_2(k)$  de las salidas medidas en el instante  $k$  vendrían dadas por las siguientes ecuaciones en diferencias :

$$\hat{y}_1(k) = -a_1 y_1(k-1) - a_2 y_1(k-2) - \dots - a_{na} y_1(k-na) + b_1 u(k-nk_1) + b_2 u(k-1-nk_1) + \dots + b_{nb} u(k-(nb-1)-nk_1)$$

$$\hat{y}_2(k) = -h_1 y_2(k-1) - h_2 y_2(k-2) - \dots - h_{na} y_2(k-na) + e_1 u(k-nk_2) + e_2 u(k-1-nk_2) + \dots + e_{nb} u(k-(nb-1)-nk_2)$$

donde :

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

- na1 número de valores de la salida  $y_1$  en instantes anteriores que se utilizan en la estima de  $\hat{y}_1(k)$
- na2 número de valores de la salida  $y_2$  en instantes anteriores que se utilizan en la estima de  $\hat{y}_2(k)$
- nb1 número de valores de la entrada  $u$  en instantes anteriores que se utilizan en la estima de  $\hat{y}_1(k)$
- nb2 número de valores de la salida  $u$  en instantes anteriores que se utilizan en la estima de  $\hat{y}_2(k)$
- nk1 es el retardo existente entre la entrada  $u$  y la salida  $y_1$
- nk2 es el retardo existente entre la entrada  $u$  y la salida  $y_2$

Los parámetros a estimar se pueden expresar en forma vectorial :

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= [a_1, \dots, a_{na1}] \\ \mathbf{b} &= [b_1, \dots, b_{nb1}] \\ \mathbf{h} &= [h_1, \dots, h_{na2}] \\ \mathbf{f} &= [e_1, \dots, e_{nb2}] \end{aligned}$$

Es posible pasar las ecuaciones de diferencias a funciones de transferencia :

$$G_1(z^{-1}) = z^{-nk_1} \frac{b_1 + b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + \dots + b_{nb_1} z^{-(nb_1-1)}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{na_1} z^{-na_1}}$$

$$G_H(z^{-1}) = z^{-nk_2} \frac{e_1 + e_2 z^{-1} + e_3 z^{-2} + \dots + e_{nb_2} z^{-(nb_2-1)}}{1 + h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots + h_{na_2} z^{-na_2}}$$

Indicar que la función de transferencia  $G_1$  presenta  $na_1$  polos y  $(nb_1-1)$  ceros. De igual forma  $G_2$  presenta  $na_2$  polos y  $(nb_2-1)$  ceros.

Supóngase que el acoplo existente entre  $y_1$  e  $y_2$  se modela considerando  $nc$  polos comunes. Sería un esquema como el que se muestra en la Figura 2.

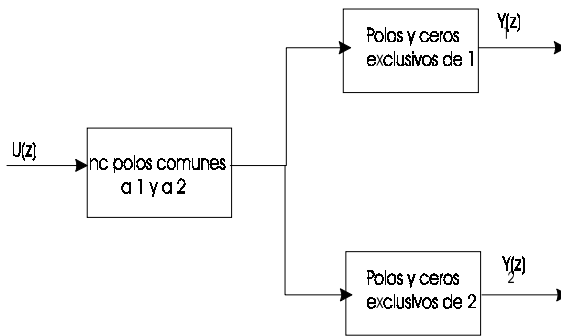


Figura 2 : Esquema del acoplo propuesto

Las funciones de transferencia se expresarán de la siguiente forma :

$$G_1(z^{-1}) = z^{-nk_1} \frac{b_1 + b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + \dots + b_{nb_1} z^{-(nb_1-1)}}{(1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_{nc} z^{-nc})(1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} + \dots + f_{nf} z^{-nf})}$$

$$G_2(z^{-1}) = z^{-nk_2} \frac{e_1 + e_2 z^{-1} + e_3 z^{-2} + \dots + e_{nb_2} z^{-(nb_2-1)}}{(1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_{nc} z^{-nc})(1 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + \dots + g_{ng} z^{-ng})}$$

donde :

$nf = na_1 - nc$  es el número de polos pertenecientes únicamente a  $G_1$

$ng = na_2 - nc$  es el número de polos pertenecientes únicamente a  $G_2$

Es evidente que las componentes de  $\mathbf{a}$  son función de los parámetros  $\mathbf{c}=[c_1, \dots, c_{nc}]$  y  $\mathbf{f}=[f_1, \dots, f_{nf}]$  y que las componentes de  $\mathbf{h}$  son función de los parámetros  $\mathbf{c}$  y de los parámetros  $\mathbf{g}=[g_1, \dots, g_{ng}]$ .

$$a_i = F_i(c_1, c_2, \dots, c_{nc}, f_1, f_2, \dots, f_{nf}) \quad i = 1, 2, \dots, na_1$$

$$h_j = G_j(c_1, c_2, \dots, c_{nc}, g_1, g_2, \dots, g_{ng}) \quad j = 1, 2, \dots, na_2$$

El vector  $\theta$  de parámetros a estimar es :

$$\theta = [c_1, c_2, \dots, c_{nc}, f_1, f_2, \dots, f_{nf}, g_1, g_2, \dots, g_{ng}, b_1, b_2, \dots, b_{nb_1}, e_1, e_2, \dots, e_{nb_2}]^T$$

La dimensión del vector  $\theta$  es :

$$d = na_1 + na_2 + nb_1 + nb_2 - nc$$

El error que se comete al trabajar con las salidas estimadas en el instante  $k$  es :

$$\begin{bmatrix} e_1(k) \\ e_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{y}_1(k) \\ \hat{y}_2(k) \end{bmatrix}$$

Si se consideran todos los instantes  $k=2, \dots, N$  se construye el siguiente vector de errores :

$$\begin{bmatrix} e_1(2) \\ e_2(2) \\ \vdots \\ e_1(N) \\ e_2(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1(2) \\ y_2(2) \\ \vdots \\ y_1(N) \\ y_2(N) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{y}_1(2) \\ \hat{y}_2(2) \\ \vdots \\ \hat{y}_1(N) \\ \hat{y}_2(N) \end{bmatrix}$$

que expresado en forma matricial sería :

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

Supóngase que los coeficientes  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{e}$  y  $\mathbf{h}$  están sometidos a  $m$  restricciones de igualdad, estas restricciones las imponen los conocimientos a priori que se posean sobre la dinámica del sistema a identificar :

$$R_p(a, b, e, h) = 0 \quad p = 1, \dots, m \quad (1)$$

El problema de optimización que se debe resolver es :

$$\hat{\theta}_N = \arg \min_{\theta} (V_N(\theta)) \quad (2)$$

Encontrar el vector de parámetros  $\hat{\theta}_N$ , que minimice la función de coste [7] siguiente.

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} E^T E \quad (3)$$

sujeta a las  $m$  restricciones dadas por (1).

Es un problema de mínimos cuadrados no lineales con restricciones. La función que se programó para resolver este problema fue *sis2\_acopla.m*, que recibe como parámetros de entrada los valores de  $nc$ ,  $na_1$ ,  $nb_1$ ,  $na_2$ ,  $nb_2$  y  $nk_2$ , así como las series temporales medidas de entrada y salida, y devuelve como salida el vector de parámetros  $\hat{\theta}_N$  y el valor mínimo encontrado para (3). Esta función utiliza a su vez la función *constr.m*, que pertenece a la toolbox de Optimización de Matlab.

## 2.2 SELECCIÓN DE LA MEJOR ESTRUCTURA.

Un paso previo a la estimación de los parámetros de un modelo, es seleccionar cual va a ser la estructura de dicho modelo. Si denotamos la estructura de un modelo ARX SIMO por :

$$(nc, na1, nb1, nk1, na2, nb2, nk2)$$

Hay que fijar los valores de nc, na1, nb1, nk1, na2, nb2 y nk2.

Se debe seguir algún criterio para discernir cual es la mejor estructura para el modelo de un sistema. Un posible criterio es seleccionar aquella estructura que presente el FPE (Akaike's Final Prediction Error) [7] más pequeño. El FPE no es más que una variación de (3) dada por la expresión :

$$FPE = \min_{d,\theta} \left( \frac{1 + \frac{d}{N}}{1 - \frac{d}{N}} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N \varepsilon^2(t, \theta) \right) \quad (4)$$

Este criterio permite buscar la mejor estructura, penalizando la utilización de un número d excesivo de parámetros. Se ha de pensar que la utilización de muchos parámetros no es sinónimo de tener un mejor modelo, muchas veces se está complicando excesivamente el modelo sin producir una mejora apreciable en su comportamiento.

Todavía existe otra dificultad que no ha sido tratada y que viene implícita con el tipo de estructura que se esta manejando. En los índices de la estructura se cumple que :

$$\begin{aligned} na1, na2 &\in \{1, 2, \dots, p\} \\ nk1, nk2 &\in \{0, 2, \dots, p\} \\ nc &< \min\{na1, na2\} \\ nb1 &\leq na1 \\ nb2 &\leq na2 \end{aligned} \quad (5)$$

A la vista de (5) podría pensarse en calcular el FPE de todas las posibles estructuras, y seleccionar aquella que presentase el menor FPE. El problema estriba en que el número de posibles estructuras es del orden de los millones, lo cual conllevaría un tiempo de cálculo prohibitivo, máxime cuando para calcular los parámetros de cada estructura hay que realizar una optimización de mínimos cuadrados no lineales con restricciones. Se hace necesario plantearse otro tipo de estrategias, que permita realizar una búsqueda en un espacio mucho más acotado y por tanto manejable de estructuras.

La técnica que se propone es la siguiente :

1. Fijar un valor para  $nc=nc'$  de acuerdo al conocimiento físico del sistema.
2. Fijar los valores de  $na1, nb1, na2, nb2$  :

$$(nc', p, p, nk1, p, p, nk2)$$

3. Calcular el FPE de las estructuras dejando variar  $nk1$  y  $nk2$ , entre 0 y p.
4. Seleccionar la estructura que presente el menor FPE

$$(nc, p, p, nk1', p, p, nk2')$$

5. Se deja variar ahora,  $na1, na2, nb1$  y  $nb2$  entre un valor mínimo r y p. El valor de r debe intentar deducirse de algún conocimiento previo del sistema a modelar, como por ejemplo posibles modelos SISO que se hayan obtenido con anterioridad. Se tendría una estructura :

$$(nc', na1, nb1, nk1', na2, nb2, nk2')$$

6. Selecciona la estructura que presente el menor FPE.

$$(nc', na1', nb1', nk1', na2', nb2', nk2')$$

Esta técnica se programó utilizando dos funciones: *acomínFPE1.m* y *acomínFPE2.m*.

La función *acomínFPE1.m*, implementa los pasos 3 y 4 de la técnica. De tal manera que recibe como parámetros de entrada los valores de nc y de p, y las series temporales de entrada y salida, y devuelve como salida los valores de  $nk1'$  y de  $nk2'$ .

La función *acomínFPE2.m*, implementa los pasos 5 y 6 de la técnica. Recibe como parámetros de entrada los anteriormente calculados  $nk1'$  y  $nk2'$ , así como los valores de p y de r, devuelve como salida la estructura encontrada con menor FPE.

Ambas funciones tienen un funcionamiento similar, van inspeccionando estructuras en los rangos propuestos, calculando, con la función *sis2\_acopla.m*, para cada una de ellas su FPE. Finalmente seleccionan la estructura que presente el menor FPE.

## 3 IDENTIFICACION DE LA DINAMICA DE UN BUQUE DE ALTA VELOCIDAD.

En esta sección se aplica el método desarrollado para la identificación de un modelo SIMO [1] con salidas acopladas para la dinámica vertical del buque de alta velocidad TF-120.

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas con los que se encuentra el transporte marítimo, es la aparición de mareos tanto en los pasajeros como en la tripulación como consecuencia de las aceleraciones verticales generadas por los movimientos verticales que se producen en el buque durante la navegación. El disminuir estas aceleraciones repercutirá en un aumento de la seguridad y del confort .

Los movimientos que principalmente contribuyen a las aceleraciones verticales son : el desplazamiento angular de cabeceo (pitch) y el desplazamiento vertical del centro de masas (heave).

Para disminuir las aceleraciones verticales es necesario diseñar un controlador robusto que actuando sobre los actuadores adecuados contrarreste los movimientos de pitch y de heave. Para poder diseñar este controlador es necesario disponer de un modelo de la dinámica vertical de un buque de alta velocidad sometido a oleaje irregular.

Las ecuaciones desarrolladas en la bibliografía [2], [3] indican la existencia de un acoplo entre los movimientos de pitch y de heave.

### 3.2 PROCESO DE IDENTIFICACION

El sistema a identificar, ver Figura 3 tiene como entrada la altura del oleaje, medida en metros, y como salidas del sistema : el movimiento angular de pitch, medido en grados, y el movimiento de heave, medido en metros.

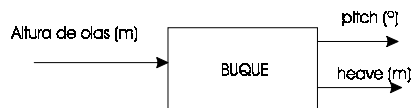


Figura 3 :Sistema a identificar.

Por otra parte, es conocido que a bajas frecuencias de encuentro el movimiento de pitch es nulo y el movimiento de heave sigue al oleaje. Esto se traduce en las siguientes restricciones

$$pitch : \left| G_p \right|_{\omega_e \rightarrow 0} \rightarrow 0 \Rightarrow R_1 = \sum_{i=1}^{nb1} b_i = 0 \quad (6)$$

$$heave : \left| G_H \right|_{\omega_e \rightarrow 0} \rightarrow 1 \Rightarrow R_2 = \sum_{i=1}^{nb2} e_i - \sum_{j=1}^{na2} h_j = 1$$

Se disponían de series temporales de altura de olas, pitch y heave obtenidos por el CEHIPAR [2]. muestreadas a T=0.25 seg. Para distintas velocidades 20, 30 y 40 nudos y para distintos SSN(Sea State Number), de acuerdo a STANAG 4194 (Standarized Wave and Wind Environments and Shipboard Reporting of Sea Conditions).

Se tomaron los siguientes valores para los índices de las estructuras.

$$\begin{aligned} na1, na2 &\in \{7,8,9,10\} \\ nk1, nk2 &\in \{0,2,\dots,10\} \\ nc &= 3 \\ nb1 &\leq na1 \\ nb2 &\leq na2 \end{aligned}$$

Luego  $r=7$  y  $p=10$ . El tomar  $r=7$  es por que previamente a obtener estos modelo ARX SIMO se habían obtenido modelos ARX SISO para pitch y para heave y para que presentasen un buen comportamiento necesitaban al menos siete polos discretos. El tomar  $p=10$  es por no trabajar con un número excesivo de parámetros.

Las restricciones a los parámetros a estimar son las dadas por (6)

Fijado un SSN y una velocidad se disponía de series temporales de entrada y de salida. Se les aplicaban las funciones siguientes :

- *acomínFPE1.m* que busca los retardos  $nk1'$  y  $nk2'$  , almacena los resultados de la búsqueda en *busqueda1.mat*
- *acomínFPE2.m* que busca la estructura con menor FPE. Almacena los resultados de la búsqueda en el fichero *busqueda2.mat*
- *sis2\_acoplo.m* calcula el vector de parámetros  $\theta$  de la estructura seleccionada . Esta función es utilizada tanto por *acomínFPE1.m* como por *acomínFPE2.m* .
- *par2ft.m* que dado el vector  $\theta$  de la estructura con menor FPE, devuelve las funciones de transferencia  $G_p$  y  $G_h$

### 3.3 RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestra las estructuras de los modelo ARX multivariantes seleccionadas por cada par de condiciones de SSN y velocidad del buque.

Tabla 1 : Modelos ARX SIMO seleccionados.

SSN	Velocidad del buque (nudos)	Modelo ARX SIMO con menor FPE (nc,nap,nbp,nkp,nah,nbh,nkh)	FPE
	20	(3,10,10,10,10,9,4)	0.00382
4	30	(3,10,10,8,10,8,2)	0.01052
	40	(3,10,10,7,10,9,5)	0.01249
	20	(3,10,10,6,10,10,3)	0.00307
5	30	(3,10,10,7,10,7,5)	0.01407
	40	(3,10,10,6,10,7,3)	0.03451
	20	(3,10,10,6,10,7,3)	0.00982
6	30	(3,10,10,6,10,9,2)	0.00619
	40	(3,10,10,0,10,7,0)	0.02301

Se muestran a continuación las funciones de transferencia  $G_p(z)$  y  $G_h(z)$  derivadas de la mejor estructura seleccionada (3.10,10,7,10,7,5) para velocidad 30 nudos y SSN=5.

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

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

En las Figura 4 y 5 aparecen los diagramas de polos y ceros de  $G_p(z)$  y  $G_h(z)$  de la mejor estructura seleccionada (3.10,10,7,10,7,5) para velocidad 30 nudos y SSN=5.

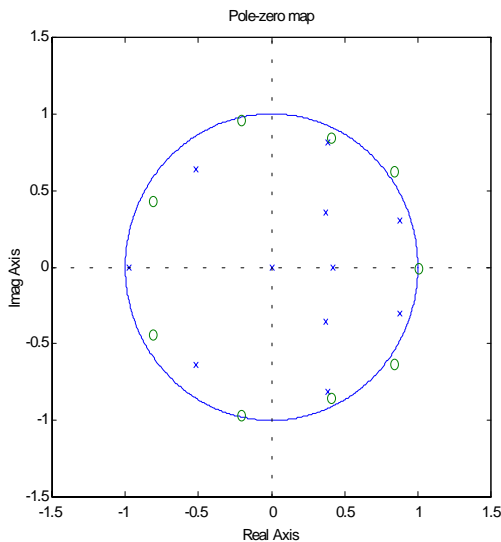


Figura 4 : Diagrama de polos y ceros de  $G_p(z)$  de la mejor estructura seleccionada (3.10,10,7,10,7,5) para velocidad 30 nudos y SSN=5.

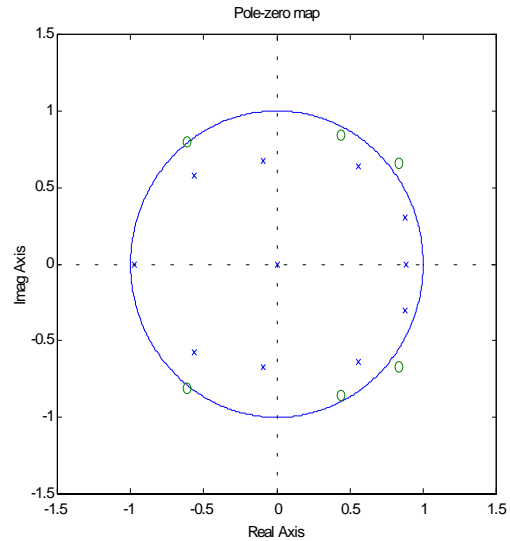


Figura 5 : Diagrama de polos y ceros de  $G_h(z)$  de la mejor estructura seleccionada (3.10,10,7,10,7,5) para velocidad 30 nudos y SSN=5.

Las funciones de transferencia  $G_p(z)$  y  $G_h(z)$  tienen tres polos comunes debido al acoplo : un par de polos complejos conjugados  $z_1=0.87435 \pm 0.30753i$  y un polo simple  $z=-0.97473$

Los polos complejos conjugados  $z_1$ , tiene una frecuencia natural de 1.3865 rad/seg y un factor de amortiguamiento de 0.21911. Por su parte  $z_2$  tiene una frecuencia natural de 0.10237rad/seg .

En las Figura 6 y 7 se muestran los diagramas de Bode de  $G_p(z)$  y  $G_h(z)$  de la mejor estructura seleccionada (3.10,10,7,10,7,5) para velocidad 30 nudos y SSN=5.

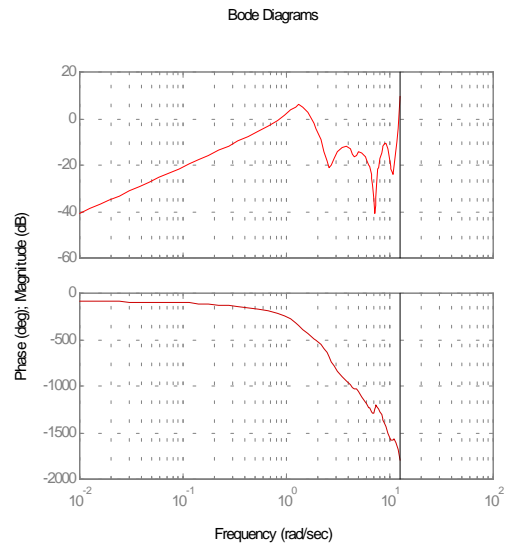


Figura 6 : Diagrama de Bode de  $G_p(z)$  de la mejor estructura seleccionada (3.10,10,7,10,7,5) para velocidad 30 nudos y SSN=5.

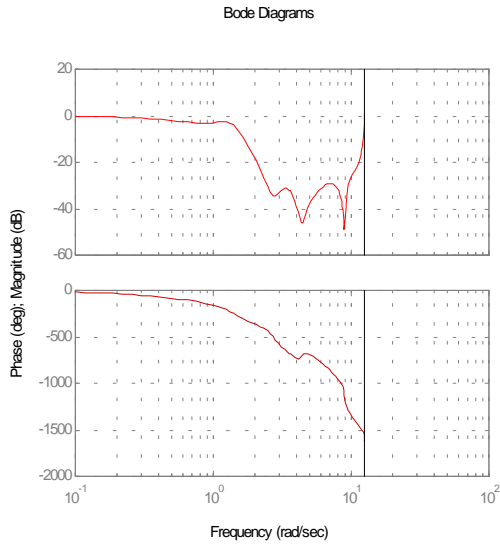


Figura 7 : Diagrama de Bode de  $G_H(z)$  de la mejor estructura seleccionada (3.10,10,7,10,7,5) para velocidad 30 nudos y SSN=5.

A la vista de las Figuras 6 y 7 se puede ver como nuestro modelo cumple con las restricciones que se le habían impuesto a baja frecuencia.

En la Figura 8 y 9 se muestra la salidas que presenta de la mejor estructura seleccionada (3.10,10,7,10,7,5) para velocidad 30 nudos y SSN=5. comparadas con las medidas experimentalmente. La excitación es oleaje irregular.

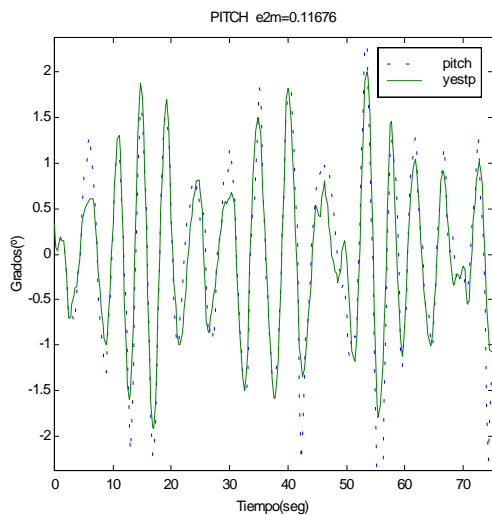


Figura 8: Pitch (yestp) estimado de la mejor estructura seleccionada (3.10,10,7,10,7,5) comparado con el pitch medido experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular, para velocidad 30 nudos y SSN=5

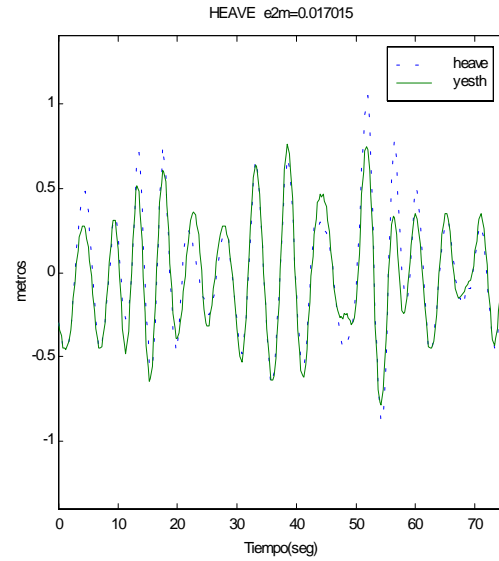


Figura 9: Heave (yesth) estimado de la mejor estructura seleccionada (3.10,10,7,10,7,5) comparado con el heave medido experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular, para velocidad 30 nudos y SSN=5

En la Figura 10 y 11 se muestra la salidas que presenta la mejor estructura seleccionada (3.10,10,7,10,7,5) para velocidad 30 nudos y SSN=5 comparadas con las medidas experimentalmente utilizando como entrada oleaje regular.

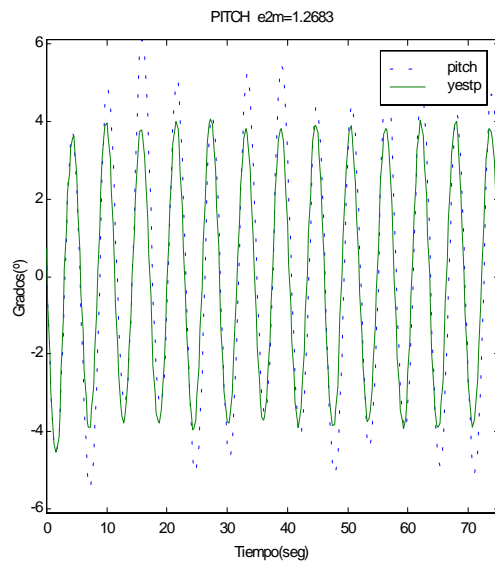


Figura 10: Pitch (yestp) estimado de la mejor estructura seleccionada (3.10,10,7,10,7,5) comparado con el pitch medido experimentalmente utilizando como excitación oleaje regular, para velocidad 30 nudos y SSN=5



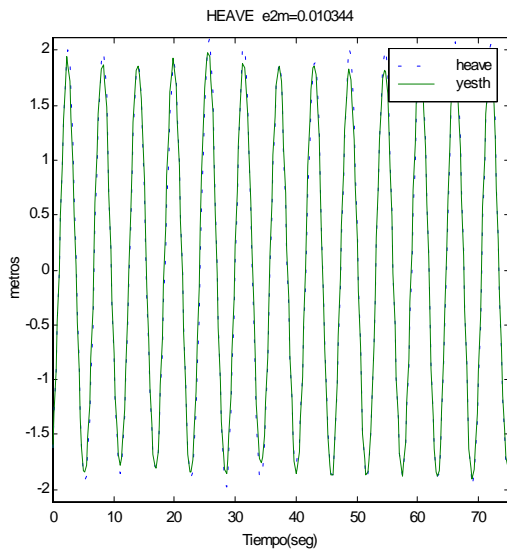


Figura 11: Heave (yesth) estimado de la mejor estructura seleccionada (3,10,10,7,10,7,5) comparado con el heave medido experimentalmente utilizando como excitación oleaje irregular, para velocidad 30 nudos y SSN=5

## 4 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método para la identificación de sistemas multivariables acoplados con restricciones. Se han programado funciones en MATLAB que implementan este método. Se ha puesto de manifiesto su utilidad, aplicándolo a la identificación de la dinámica vertical, de un buque de alta velocidad, donde se han obtenido resultados bastante buenos. Aunque en este trabajo únicamente se ha trabajado con un acoplo modelado con polos comunes, es posible utilizar la técnica de identificación propuesta para considerar otros modelos de acoplo.

### Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado bajo el proyecto de la CICYT :TAP97-0607-C03-02

### Referencias

- [1] J.Aranda, J.M De la Cruz, J.M Díaz, P.Ruipérez (1999) *Identificación de modelos lineales para la dinámica vertical del buque TF-120*. Versión 2. Documento CRIBAV /02/01
- [2] CEHIPAR (1998) Informe OTI-2135-CM-1 de los ensayos de comportamiento en la mar del Ferry TF-120 para investigación sobre control.

- [3] T. I. Fossen.(1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. John Wiley & sons..
- [4] E. V. Lewis (1989). *Principles of Naval Architecture. Second Revision. Volume III. Motions in Waves and Controllability*. Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- [5] Lennart Ljung *System Identification Toolbox. User's Guide*. The Math Works.Inc
- [6] Matlab Optimization Toolbox (1997). *User's Guide*. Version 5 The Math Works.Inc
- [7] J.Schoukens and R.Pintelon.(1991). *Identification of Linear Systems* Pergamon Press.
- [8] T.Söderström and P. Stoica. (1989). *System Identification*. Prentice Hall,