

PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN DE LA DINÁMICA NO LINEAL DE UN BUQUE MEDIANTE UN PROCEDIMIENTO ADAPTATIVO

Manuel Haro Casado
Facultad de Ciencias Náuticas. Universidad de Cádiz
C/ Polígono Río San Pedro s/n. Edificio C.A.S.E.M
11510. Puerto Real. Cádiz. España
Tfno: +34 956 016148
Fax:+34 956 016126
E-mail: manuel.haro@uca.es

Daniel Espinosa Corbellini
Escuela Politécnica Superior de Algeciras. Universidad de Cádiz
Av. Ramón y Puyol s/n
11202. Algeciras. Cádiz. España
Tfno: +34 956 028086
Fax:+34 956 028001
E-mail: daniel.espinosa@uca.es

Resumen: En este artículo se ha diseñado un procedimiento de identificación de la dinámica no lineal de un buque mediante un procedimiento no lineal adaptativo. El procedimiento parte de los resultados experimentales obtenidos durante las pruebas de mar que incluye la maniobra en espiral. La dinámica del buque ha sido ajustada de acuerdo con el modelo no lineal de Norrbin determinando mediante el procedimiento descrito los valores de sus coeficientes constantes que definen la no linealidad.

Palabras clave: Modelado, sistemas no lineales, dinámica del buque, backstepping adaptativo.

1. INTRODUCCIÓN

Hasta la fecha se han propuesto diversos test de prueba para vehículos marinos, la maniobra de zig-zag (Kempf), la maniobra de zig-zag modificada, la espiral directa (Dieudonné), la espiral inversa (Bech), frenado, inercia de frenado, mantenimiento de rumbo, hombre al agua, maniobra de cambio de rumbo, inercia de giro, test de maniobra de zig-zag a baja velocidad, giro con aceleración, test de aceleración/deceleración, arremetida, revolución mínima, test de choque frontal, aunque no hay estándares definitivos que rijan las maniobras de pruebas de mar. Muchos constructores de buques han desarrollado sus propios procedimientos apoyados en su propia experiencia, siguiendo las recomendaciones realizadas por la International Towing Tank Conference (ITTC, Proceedings 1963-1975) y otras Organizaciones e Institutos (Journée and Pinkster, 2001). La sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos (SNAME) ha creado tres guías: Code on manoeuvring and Special Trials and Tests” (1950), “Code for Sea Trials” (1973) and “Guide for Sea Trials” (1989). La Organización de Estandarización Noruega ha creado el “Testing of

New Ship, Norsk Standard” (1985). La Japan Ship Research Association (JSRA) ha creado un “Sea Trial Code for Giant Ships (1972) La resolución de la IMO A.601 (1987) e IMO A.751 (1993), fueron adoptadas por la organización IMO (International Maritime Association) para definir la maniobrabilidad de un barco. La última Resolución adoptada por esta organización fué la MSC 137(76) el 4 de Diciembre de 2002. El test de maniobra de zig-zag (Kempf) junto con la maniobra en espiral proporciona información sobre la efectividad de control (ángulo de deriva frente al ángulo de timón) siendo estas dos maniobras las únicas recomendadas por todas las organizaciones permitiendo extrapolar las características de maniobrabilidad de un determinado buque a otros semejantes.

Las características de los diversos tests de prueba que constituyen las denominadas pruebas de mar se pueden consultar en los “Fundamentos de Maniobra y Control” (Crane, 1999).

Los diseños de backstepping (Krstić, *et al.*, 1995) han sido aplicados con éxito en: Válvulas de estrangulamiento y de cebado (Banaszuk and Krener, 1997), la inyección de aire (Behnken and Murray, 1997), (Protz and Paduano, 1997), sistemas

aeronáuticos (Monahemi and Krstić , 1996), máquinas eléctricas (Marino, *et al.*, 1999), control de barcos, planificación de ruta (Haro and Velasco,2003), problemas de optimización (Fossen, 1994), y sistemas de generación eléctrica basados en energía del viento (Haro, *et al.*,2003).

El propósito de este artículo es la realización del proceso de identificación de los parámetros que definen la dinámica no lineal de un buque suponiendo que dicha dinámica verifica el modelo de Norrbin (1963). El procedimiento está basado en la teoría del backstepping adaptativo y la maniobra del test de en espiral. Para este propósito tan sólo se necesita una única medida, la variación temporal del rumbo. Esta medida esta disponible a través de los dispositivos de medida basados en GPS/INS, es decir, El sistema de posicionamiento global basado en satélite (GPS), apoyado por el sistema de navegación inercial (INS). Las cuatro fases del test de giro, Fig.1, son distinguibles según las condiciones mostradas en la Tabla 1, donde v , r , representan la velocidad del buque y la velocidad angular a lo largo de un eje perpendicular al mismo que pasa por el centro de gravedad del buque, mientras \dot{v} , $\dot{r} = \alpha$ son la aceleración lineal y angular respectivamente.

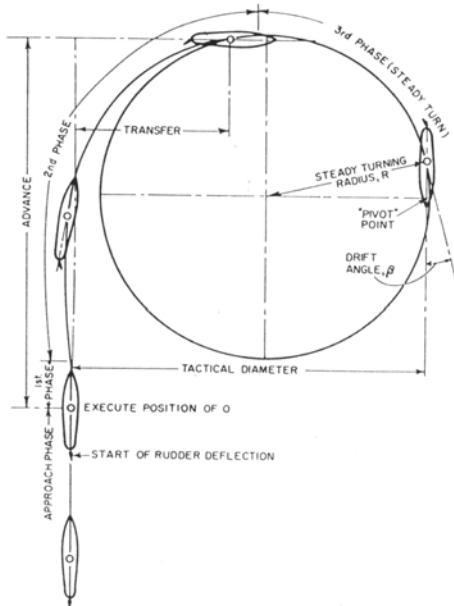


Fig.1. Trayectoria de giro de un barco.

Tabla 1. Características cinemáticas de las fases mostradas en la figura 1

Fase	\dot{v}	\dot{r}	v	r
Aproximación	0	0	0	0
Primera	$\neq 0$	$\neq 0$	0	0
Segunda	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$
Tercera	$=0$	$=0$	$\neq 0$	$\neq 0$

2. MODELO DEL BARCO

El movimiento del barco es descrito en el modelo de Norrbin según la siguiente ecuación:

$$T \cdot \ddot{\psi} + H_N(\dot{\psi}) = K \cdot \delta \quad (1)$$

donde ψ es el rumbo, $r = \dot{\psi}$ la velocidad angular, δ el ángulo de timón, gobernado por una dinámica lineal de primer orden con una constante de tiempo τ , K la constante de ganancia de Nomoto, y T una constante de tiempo equivalente

$$\frac{\delta(s)}{U(s)} = \frac{1}{1 + s \cdot \tau} \quad (2)$$

U representa al control y $H_N(\dot{\psi})$ la característica no lineal de maniobra usualmente representada por un polinomio de tercer grado

$$H_N(\dot{\psi}) = n_3 \cdot \dot{\psi}^3 + n_2 \cdot \dot{\psi}^2 + n_1 \cdot \dot{\psi} + n_0 \quad (3)$$

La dinámica del cambio de ángulo de rumbo puede ser expresada mediante las ecuaciones (1) y (3) como

$$\ddot{\psi} = a_3 \cdot \dot{\psi}^3 + a_2 \cdot \dot{\psi}^2 + a_1 \cdot \dot{\psi} + a_0 + b \cdot \delta \quad (4)$$

siendo

$$a_i = -\frac{n_i}{T} \quad (i = 0 \dots 3) \quad (5.a)$$

$$b = \frac{K}{T} \quad (5.b)$$

Las ecuaciones de estado tomando como variables de estado r (velocidad angular) y $\alpha = \dot{r}$ (aceleración angular) son,

$$\dot{r} = \alpha \quad (6.a)$$

$$\dot{\alpha} = a_3 \cdot r^3 + a_2 \cdot r^2 + a_1 \cdot r + a_0 + b \cdot \delta \quad (6.b)$$

En la ecuación genérica se considera una asimetría en el casco ($a_2 \neq 0$) y las perturbaciones ambientales (vientos, olas y corrientes) que pueden actuar sobre el barco.

El buque de tipo roll-on/roll-off o roro según la terminología inglesa, que es un buque destinado al transporte de pasajeros y vehículos en rutas no demasiado largas cuyas características se muestran en la Tabla 2, tiene las siguientes características de la variación temporal del ángulo de rumbo durante la realización de la maniobra en espiral (Figura 2, ecuación 7) y el ajuste ha sido obtenido mediante el

procedimiento de mínimos cuadrados de los puntos experimentales del ángulo de deriva obtenido mediante la realización de las tres fases del test en espiral a un polinomio de cuarto orden. El test fue llevado a cabo en condiciones normales de carga, velocidad de avance máxima con un ángulo de timón de 35 grados. El giro provocó una reducción en la velocidad del buque como se indica en la Tabla 3.

$$r_d = -0.22815 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 + 7.433 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 6.7401 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 + 0.2319 \cdot t - 0.4611 \quad (7)$$

donde r_d es la variación temporal deseada de la relación de desviación en $\text{deg} \cdot \text{s}^{-1}$.

Tabla 2. Características principales del buque analizado (Izar,2001)

Calado a proa (condición de plena carga)	6m
Peso muerto	7456 toneladas
Desplazamiento máximo	19949 toneladas
Eslora	188.3 m
Manga	28.7 m
Bulbo a proa	Sí
Tipo de timón	Becker
Numero de unidades	2
Máximo ángulo de timón	65 grados
Tiempo de tránsito de banda a banda	56 s
Hélices	2
Tipo	paso controlable
Motores (2 por eje)	4 x 6000 kW
Potencia máxima	
Velocidad en carga (todo avante)	22.68 knots
Velocidad en lastre (todo avante)	23.14 knots

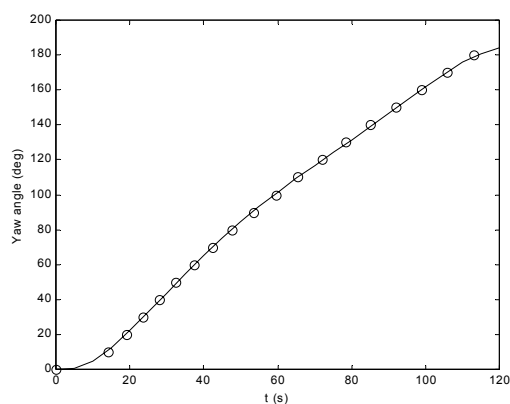


Fig. 2. Variación del ángulo de rumbo frente al tiempo. Línea continua (ajuste obtenido), círculos (puntos experimentales).

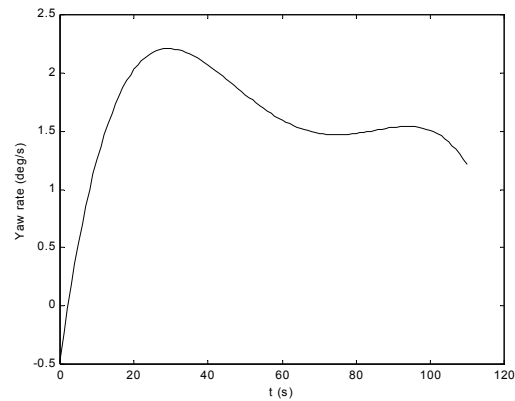


Fig. 3. Variación de la velocidad de giro frente al tiempo (línea continua)

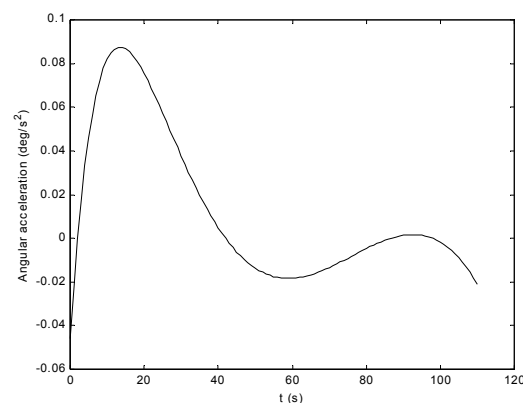


Fig. 4. Variación de la aceleración angular (línea continua)

Tabla 3. Reducción de la velocidad del barco desde el valor inicial (22.68 nudos) durante la realización de la prueba

Cambio de rumbo (grados)	Velocidad del barco (nudos)	Cambio de rumbo (grados)	Velocidad del barco (nudos)
10	19.24	100	9.07
20	18.27	110	8.18
30	17.22	120	7.37
40	16.08	130	6.69
50	14.89	140	6.15
60	13.64	150	5.69
70	12.41	160	5.30
80	11.22	170	5.00
90	10.09	180	4.74

3. PROCEDIMIENTO DEL BACKSTEPPING ADAPTIVO

Con idea de obtener la identificación de los parámetros a_i ($i=0...3$) en la ecuación (6.b) mediante el procedimiento del backstepping adaptativo es

conveniente definir las nuevas variables de error, como

$$z_1 = r - r_d \quad (8.a)$$

$$z_2 = \alpha - \beta(z_1) \quad (8.b)$$

donde $\beta(z_1)$ representa una función estabilizadora.

En el primer paso del backstepping es necesario derivar la ecuación (8.a) con la ayuda de la (8.b) para obtener

$$\dot{z}_1 = z_2 + \beta(z_1) - \dot{r}_d \quad (9)$$

y elegir la función estabilizadora como:

$$\beta(z_1) = \dot{r}_d - K_1 \cdot z_1 - \beta_1(z_1) \cdot z_1 \quad (10)$$

siendo $K_1 > 0$, $\beta_1(z_1) \geq 0, \forall z_1$. En este paso una función candidata a función de Liapunov es,

$$V_1 = \frac{1}{2} \cdot z_1^2 \quad (11)$$

cuya derivada es

$$\dot{V}_1 = -[K_1 + \beta_1(z_1)] \cdot z_1^2 + z_1 \cdot z_2 \quad (12)$$

El segundo paso del backstepping parte de la ecuación (8.b) donde la variación de la segunda variable de estado backstepping es,

$$\dot{z}_2 = \dot{\alpha} - \dot{\beta}(z_1) = \sum_{i=0}^3 a_i \cdot r^i + b \cdot \delta - \dot{\beta}(z_1) \quad (13)$$

Como consecuencia de las indeterminaciones en los parámetros a_i ($i=0..3$) esta no es cancelada por el control. Por el principio de equivalencia cierta, cada uno de los parámetros es sustituido por su estimación \hat{a}_i ($i=0..3$), el error cometido es \tilde{a}_i ($i=0..3$)

$$\tilde{a}_i = a_i - \hat{a}_i \quad (i=0..3) \quad (14)$$

La segunda función de Liapunov propuesta es,

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \cdot z_2^2 + \frac{1}{2} \cdot \left[\sum_{i=0}^3 \frac{1}{\gamma_i} \cdot \tilde{a}_i^2 \right] \quad (15)$$

cuya derivada es

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \cdot \dot{z}_2 + \sum_{i=0}^3 \frac{1}{\gamma_i} \cdot \tilde{a}_i \cdot \dot{\tilde{a}}_i \quad (16)$$

después de considerar (12,13,14) la ecuación (16) puede ser transformada en

$$\dot{V}_2 = -[K_1 + \beta_1(z_1)] \cdot z_1^2 + z_1 \cdot z_2 + z_2 \cdot \left[\sum_{i=0}^3 \hat{a}_i \cdot r^i + b \cdot \delta - \dot{\beta} \right] + \sum_{i=0}^3 \tilde{a}_i \cdot \left[r^i \cdot z_2 + \frac{1}{\gamma_i} \cdot \dot{\tilde{a}}_i \right] \quad (17)$$

en una situación real es predecible que $\sum_{i=0}^3 \tilde{a}_i \neq 0$, es decir, siempre hay un error en las estimaciones de parámetros, en consecuencia para eliminar el último término en (17), se pueden adoptar dos soluciones,

• solución menos restrictiva,

$$\sum_{i=0}^3 r^i \cdot z_2 = - \sum_{i=0}^3 \frac{1}{\gamma_i} \cdot \dot{\tilde{a}}_i \quad (18.a)$$

• solución más restrictiva,

$$r^i \cdot z_2 = - \frac{1}{\gamma_i} \cdot \dot{\tilde{a}}_i \quad (i=0 \dots 3) \quad (18.b)$$

Si se cumplen alguna de las condiciones (18.a) o (18.b), entonces de la ecuación (17) se obtiene

$$\dot{V}_2 = -[K_1 + \beta_1(z_1)] \cdot z_1^2 + z_1 \cdot z_2 + z_2 \cdot \left[\sum_{i=0}^3 \hat{a}_i \cdot r^i + b \cdot \delta - \dot{\beta} \right] \quad (19)$$

Si el ángulo de timón se elige como,

$$\delta = \frac{1}{b} \left\{ -z_1 - \sum_{i=0}^3 \hat{a}_i \cdot r^i + \dot{\beta} - [K_2 + \beta_2(z_2)] \cdot z_2 \right\} \quad (20)$$

la derivada de la segunda función de Liapunov (19) es ahora,

$$\dot{V}_2 = -[K_1 + \beta_1(z_1)] \cdot z_1^2 - [K_2 + \beta_2(z_2)] \cdot z_2^2 \quad (21)$$

si $\beta_1(z_1) \geq 0, \beta_2(z_2) \geq 0, K_1 > 0, K_2 > 0$, mediante el método directo de Liapunov o mediante el teorema de LaSalle (Khalil, 1996) se puede demostrar que el sistema es asintóticamente estable de una forma global.

La dinámica del primer estado de error puede ser obtenido a partir de (9) y considerando (10). El resultado obtenido es el siguiente:

$$\dot{z}_1 = -[K_1 + \beta_1(z_1)] \cdot z_1 + z_2 \quad (22)$$

mientras que la correspondiente variación del estado z_2 , es obtenida a partir de (8.b) considerando (6.b) con el valor del ángulo de timón elegido (20)

$$\dot{z}_2 = -z_1 - [K_2 + \beta_2(z_2)] \cdot z_2 + \sum_{i=0}^3 \tilde{a}_i \cdot r^i \quad (23)$$

en forma matricial después de tomar en cuenta (8.a)

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[K_1 + \beta_1(z_1)] & 1 \\ -1 & -[K_2 + \beta_2(z_2)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \sum_{i=0}^3 \tilde{a}_i \cdot (z_1 + r^d)^i \end{bmatrix} \quad (24)$$

Cuyo diagrama de bloques se muestra en la Figura 5. Para la implementación del control del ángulo de timón (20) es necesario expresar la derivada de la función β en términos de las variables. Es fácil mostrar que esta última está definida por la ecuación,

$$\dot{\beta} = \ddot{r}_d - \left[K_1 + \frac{\partial [\beta_1(z_1) \cdot z_1]}{\partial z_1} \right] \cdot \dot{z}_1 \quad (25)$$

La forma más simple para los β_i ($i = 1, 2$) que verifica que las condiciones impuestas con anterioridad son

$$\beta_1(z_1) = z_1^2 \quad (26.a)$$

$$\beta_2(z_2) = z_2^2 \quad (26.b)$$

con esta elección,

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= \ddot{r}_d - [K_1 + 3 \cdot z_1^2] \cdot \dot{z}_1 = \\ \ddot{r}_d &- [K_1 + 3 \cdot z_1^2] \cdot [-(K_1 + z_1^2) \cdot z_1 + z_2] \end{aligned} \quad (27)$$

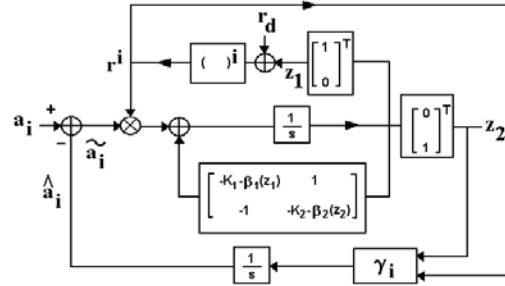


Fig. 5. Implementación del algoritmo de identificación introducido.

4. SIMULACION DEL SISTEMA

De acuerdo con el diagrama de bloques mostrado en la Figura 5, se ha realizado la simulación del sistema. Mediante la utilización del algoritmo de integración de Backward- Euler con un tamaño de paso de 0.1 s. La optimización que permite la reducción del error entre los parámetros estimados y sus valores reales fue el de Fletcher Reeves, que requiere pocas iteraciones para la convergencia (Flannery, *et al.*, 1989). Para este propósito los resultados experimentales de la variación de velocidad del rumbo frente al tiempo se obtienen en el test de maniobra en espiral para el buque estudiado ($K=1$, $T=97$ s) cuyas características se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes de la ecuación no lineal que definen la dinámica del buque cuando se adopta el procedimiento de identificación más restrictivo (18.b)

Coefficiente	Valor estimado (unidades propias)
a_0	$1.155 \cdot 10^{-2}$
a_1	$-2.673 \cdot 10^{-2}$
a_2	$2.648 \cdot 10^{-2}$
a_3	$-3.719 \cdot 10^{-2}$

Tabla 5. Valores de las diferentes ganancias en el sistema analizado

Constante	Valor (unidades propias)
γ_0	$-5.199 \cdot 10^{-3}$
γ_1	$-5.440 \cdot 10^{-4}$
γ_2	$-9.986 \cdot 10^{-5}$
γ_3	$-8.830 \cdot 10^{-5}$
K_1	57.09
K_2	50.00

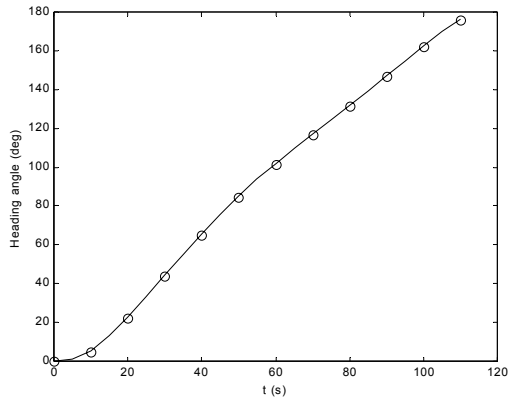


Fig.6. Variación del rumbo frente al tiempo. Línea continua (valores obtenidos del modelo identificado), círculos (ajuste mostrado en la Fig.2).

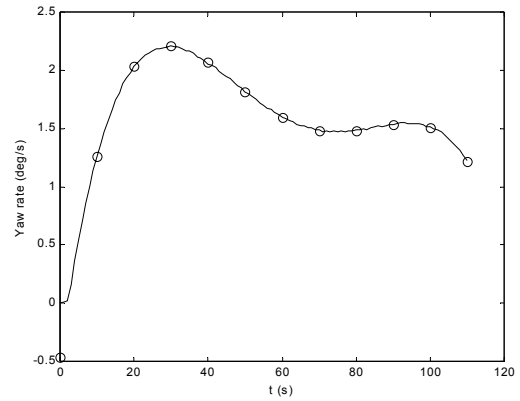


Fig.9. Variación de la variable de estado del error(z_2).

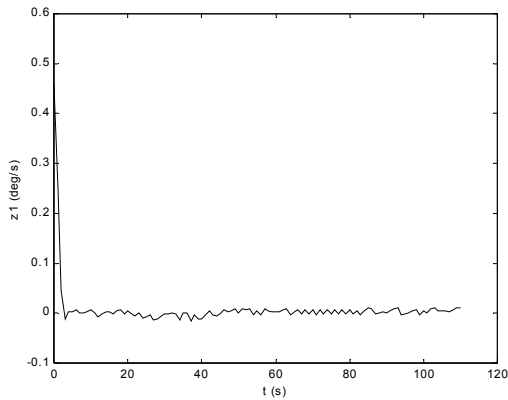


Fig.7. Variación del ángulo de rumbo frente al tiempo. Línea continua (valores obtenidos del modelo identificado), círculos (ajuste mostrado en la Fig.3).

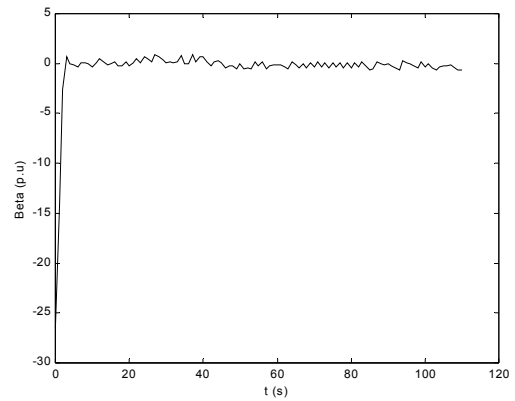


Fig.10. Variación temporal de la función estabilizadora del error (β)

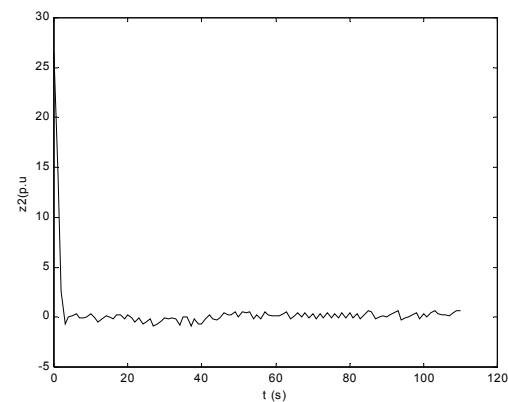


Fig. 8. Variación de la variable de estado del error (z_1).

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un procedimiento de identificación basado en el procedimiento recursivo de backstepping adaptativo con el propósito de determinar los coeficientes del polinomio que define las características de la maniobra. El procedimiento sólo toma en cuenta los resultados experimentales de la variación de rumbo en el test de la maniobra en espiral. El procedimiento obvia la dificultad de resolver la solución de la ecuación diferencial no lineal de segundo orden que sería necesario resolver de una forma analítica con el propósito de ajustar los resultados experimentales del ángulo de deriva con la dinámica que representa el modelo de Norrbín. Los resultados muestran una rápida convergencia de las estimaciones iniciales de los parámetros del modelo hacia sus valores reales (Figs.8,9), además de una excelente concordancia entre los valores experimentales y los teóricos correspondientes (Figs.6,7).

REFERENCIAS

- Banaszuk, A. and A. Krener (1997). Design of controllers for MG3 compressor models with general characteristics using graph backstepping. *Proceedings of the 1997 American Control Conference*, Albuquerque, NM., 977-981.
- Behnken, B. and R. Murray (1997). Combined air injection control of rotating stall and bleed valve control of surge. *Proceedings of the 1997 American Control Conference*, Albuquerque, NM., 987-992.
- Crane, CL., H. Eda and A.Landsberg (1990). Principles of Naval Architecture. The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Flannery, B.P., W.H. Press and W.T. Vetterling (1989). Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press.
- Fossen, T.I (1994). Guidance and control of ocean vehicles. Chichester, England. Wiley.
- Journée, M.J. and J.A. Pinkster (2001). Ship Hydromechanics. Part I: Introduction. Delft University of Technology. p.70.
- Haro Casado, M. and F. Velasco (2003). Surface ship trajectory control using non-linear backstepping design. *Journal of Marine Engineering and Technology*, Part A3.
- Haro Casado, M., A.F.Ameal and D.E. Corbellini (2003). Variable speed control of wind turbines using tuning functions design. European Control Conference 2003. Cambridge (U.K).
- Izar (2001). State shipyard localiced in Cádiz bay. Construction code H81.
- Khalil, H.K. (1996). Nonlinear systems. Prentice Hall, New Jersey.
- Krstić, M., I. Kanellakopulos, P. Kokotovic (1995). Nonlinear and adaptive control design. New York, Wiley.
- Marino, R., S. Peresada and P. Tomei. (1999). Output feedback control of induction motors with uncertain rotor resistance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44, 967-983.
- Monahemi, M.M. and M. Krstić (1996). Control of Wing Rock Motion Using Adaptive Feedback Linearization. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. Vol.19.No.4, July-August, 905-912.
- Norrbin, N.H. (1963). On the Design and Analyses of the Zig-Zag test on Base of Quasi Linear Frecuency Response, *Technical Report B 104-3, The Swedish State Shipbuilding Experimental Tank (SSPA)*, Gothenburg, Sweden.
- Protz, J. and J. Paduano (1997). Rotating stall and surge: Alternate modelling and control concepts. *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*, Hartford, 866-873