

**Autores: Teresa M. Rueda, Fco. J. Velasco, Eloy López, Emiliano Moyano,**

**Laura Bravo, Niceto Pérez**

**Título: Aplicación del Método de Asignación de Polos con Enfoque Polinómico al Control del Cambio de Rumbo de un Buque**

**Congreso: XX Jornadas de Automática**

**Publicación: XX Jornadas de Automática**

**Lugar celebración: Salamanca**

**Fecha:**

**1999**

# APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ASIGNACIÓN DE POLOS CON ENFOQUE POLINÓMICO AL CONTROL DEL CAMBIO DE RUMBO DE UN BUQUE

Teresa M. Rueda Rodríguez

Dpto. de Tecnología Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática. Escuela Superior de la Marina Civil. Universidad de Cantabria, [tere@teisa.unican.es](mailto:tere@teisa.unican.es)

Fco. Jesús Velasco González

Dpto. de Tecnología Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática. Escuela Superior de la Marina Civil. Universidad de Cantabria, [velasco@teisa.unican.es](mailto:velasco@teisa.unican.es)

Eloy López García

Dpto. de Ciencias y Técnicas de la Navegación, Máquinas y Construcciones Navales. Escuela Superior de la Marina Civil. Universidad del País Vasco, [cnplogae@lg.ehu.es](mailto:cnplogae@lg.ehu.es)

Emiliano Moyano Pérez

Dpto. de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación. E.T.S.I.I. y T. Universidad de Cantabria, [emoyano@macc.unican.es](mailto:emoyano@macc.unican.es)

Laura Bravo Sánchez

Dpto. de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación. E.T.S.I.I. y T. Universidad de Cantabria, [lbravo@macc.unican.es](mailto:lbravo@macc.unican.es)

Niceto Pérez Cagigal

Dpto. de Tecnología Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática. E.T.S.I.I. y T. Universidad de Cantabria, [niceto@teisa.unican.es](mailto:niceto@teisa.unican.es)

## Resumen

*A continuación se presenta el diseño del controlador de un piloto automático marino de un buque de carga, utilizando el método de asignación de polos con enfoque polinómico. Se estudia el control del cambio de rumbo y se compara con un regulador PID convencional.*

**Palabras Clave:** Piloto automático marino, sistemas marinos, sistemas de control, control del buque, modelo del buque, control del cambio de rumbo.

## 1 INTRODUCCIÓN

De entre los múltiples métodos de control posibles se va a utilizar el de asignación de polos con enfoque polinómico para el control del cambio de rumbo de un buque.

El diseño del controlador por asignación de polos se puede basar en el modelo entrada\_salida o en el espacio de estado. Se ha escogido el primer método

ya que es uno de los más simples de utilizar porque está basado en la manipulación de polinomios.

Se va a aplicar este método al control de cambio de rumbo de un buque de carga "Mariner Class", utilizando el modelo de Nomoto de primer orden [7]. Se presentarán estudios de simulación para diferentes especificaciones de diseño. Los resultados se compararán con los obtenidos con un piloto automático PID convencional.

## 2 EL MODELO MATEMÁTICO DEL BUQUE

En la Figura 1 se muestra el diagrama de bloques del sistema de gobierno del buque con un piloto automático PID convencional. La señal de referencia  $\psi_r$  representa el rumbo deseado,  $\psi_e$  es el error en el rumbo,  $\psi$  representa el rumbo del buque, la señal del ángulo del timón  $\delta_c$  es la señal que actúa sobre el sistema de gobierno y representa el ángulo de timón necesario para corregir la desviación del rumbo, y  $\delta$  es el valor del ángulo de timón.

La respuesta del buque  $\psi$  ante una determinada entrada  $\delta$  puede estar caracterizado por diferentes

modelos matemáticos [6]. Suponiendo que la relación es lineal, se puede utilizar el siguiente modelo simplificado [7]:

$$\frac{\psi}{\delta}(s) = \frac{K}{s(1+sT)} \quad (1)$$

donde  $\omega_n$  es la frecuencia natural y  $\zeta$  ( $0,8 \leq \zeta \leq 1$ ) el coeficiente de amortiguamiento del sistema deseado en lazo cerrado.

El sistema en lazo cerrado con control por asignación de polos [1][2] puede ser representado por el diagrama de bloques de la figura 2, donde el

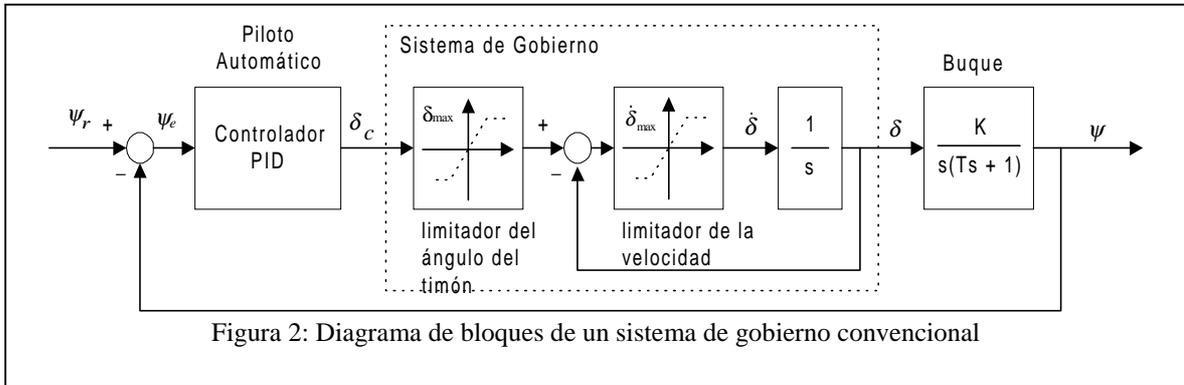


Figura 2: Diagrama de bloques de un sistema de gobierno convencional

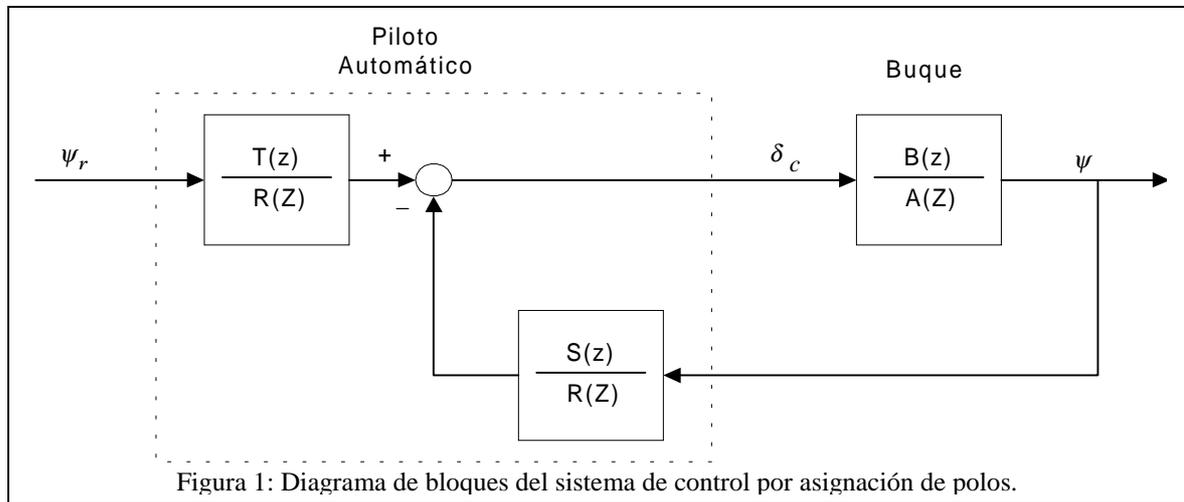


Figura 1: Diagrama de bloques del sistema de control por asignación de polos.

Los parámetros del modelo están determinados básicamente por las dimensiones y formas del buque, y dependen también de las condiciones de operación como son la velocidad, calado, carga, trimado y profundidad del agua. En este artículo, se considera que la planta a controlar incluye toda la relación dinámica entre el ángulo del timón  $\delta_c$  requerido por el regulador y el rumbo del buque dado por  $\psi$ .

### 3 EL DISEÑO DEL CONTROLADOR

En el control del cambio de rumbo se desea que se realice sin sobreoscilaciones y en el mínimo tiempo. En [4] se sugiere especificar la trayectoria por medio de un modelo de referencia de segundo orden

$$\ddot{\psi}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{\psi}(t) + \omega_n^2\psi(t) = \omega_n^2\psi_r \quad (2)$$

proceso se determina por la función de transferencia discreta

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)}$$

siendo  $A(z)$  y  $B(z)$  polinomios sin factores comunes.

La ley de control se puede expresar por la ecuación:

$$R(q)u(k) = T(q)ref(k) - S(q)y(k) \quad (3)$$

que incluye un término de prealimentación y otro de realimentación de la salida. Los polinomios  $R$  (polinomio mónico),  $S$  y  $T$  se obtienen del diseño [1][2].

Las especificaciones deseadas del servo están expresadas también por una función de transferencia de lazo cerrado

$$H_m(z) = \frac{B_m(z)}{A_m(z)}$$

donde  $A_m(z)$  y  $B_m(z)$  no tienen factores comunes. Como en un sistema en lazo cerrado el orden normalmente es mayor que el del modelo deseado, es necesario introducir cancelaciones polo-cero estables, entonces:

$$H_m(z) = \frac{B_m(z)A_0(z)}{A_m(z)A_0(z)}$$

denominándose  $A_0(z)$  polinomio del observador.

Para el sistema en lazo cerrado definido anteriormente se cumplirá la relación entrada-salida si:

$$\frac{BT}{AR + BS} = \frac{B_m A_0}{A_m A_0} \quad (4)$$

Los sistemas de control en lazo cerrado deben cumplir el Principio de causalidad. En el caso del controlador por asignación de polos esto implica unas restricciones en los grados de los polinomios  $R$ ,  $S$  y  $T$ :

$$\deg R \geq \deg T \text{ y } \deg R \geq \deg S.$$

Mediante métodos racionales se obtienen los polinomios  $R$ ,  $S$  y  $T$  que satisfacen la ecuación (4) y las restricciones de control.

En el proceso de diseño se deben seguir los siguientes pasos:

1) Se deben separar los ceros estables en el proceso ( $B(z) = B^+(z)B^-(z)$ ), donde  $B^-(z)$  es un polinomio mónico.

2) Debido a que los ceros inestables no se pueden cancelar, deben ser incluidos en el modelo, es decir  $B_m(z) = B^-(z)B_m^-(z)$ .

3) Para que se cancelen los ceros estables se debe factorizar  $R(z) = B^+(z)R^-(z)$ .

4) Como el polinomio del observador ha sido cancelado (4), entonces:

$$T(z) = B_m^-(z)A_0(z) \quad (5)$$

$$A(z)R(z) + B(z)S(z) = A_0(z)A_m(z) \quad (6)$$

La ecuación (5) determina uno de los polinomios ( $T$ ) de la ley de control y la ecuación (6) es la ecuación característica del sistema en lazo cerrado.

5) Para que el sistema tenga una solución causal deben cumplirse las siguientes condiciones:

$$\text{grado}(A_m) - \text{grado}(B_m) \geq \text{grado}(A) - \text{grado}(B)$$

$$\text{grado}(A_0) \geq 2\text{grado}(A) - \text{grado}(A_m) - \text{grado}(B) - 1$$

$$\text{grado}(R) = \text{grado}(A_0) + \text{grado}(A_m) - \text{grado}(A)$$

$$\text{grado}(S) = \text{grado}(A) - 1$$

6) Los polinomios  $R$  y  $S$  se pueden deducir de la solución de la ecuación diofántica (6).

## 4 SIMULACIONES

Ahora se describirá un piloto automático para el control del rumbo de un buque, diseñado utilizando la metodología propuesta.

Para la simulación se ha elegido el modelo matemático de un buque de carga de la clase Mariner cuyas características principales [3] son las siguientes:

Eslora total	171,80 m.
Eslora entre perpendiculares	160,93 m.
Manga	23,17 m.
Calado	8,23 m.
Desplazamiento	18541 m <sup>3</sup> .
Velocidad	15 nudos.

Como parámetros del modelo se han tomado [5] los valores siguientes:

$$K = -0,185 \text{ s}^{-1} \text{ y } T = 107,3 \text{ s}$$

Se han escogido como especificaciones en el dominio del tiempo, un coeficiente de amortiguamiento  $\zeta = 0,9$  y una frecuencia natural  $\omega_n = 0,01 \text{ rad/s}$ . Para el diseño del regulador, y a partir de estas especificaciones, se determina el tiempo de subida  $t_r$  y se elige el periodo de muestreo  $T_s$  que debe estar entre  $t_r/4$  y  $t_r/10$  [2].

En la figura 3 se representa la trayectoria deseada para realizar un cambio de rumbo de 10° así como cuatro respuestas de la simulación del cambio de rumbo, con diversos ajustes del regulador.

En la figura 4 se pueden comparar las trayectorias de cambio de rumbo del buque con un regulador PID convencional [8] y con el diseñado por asignación de polos.

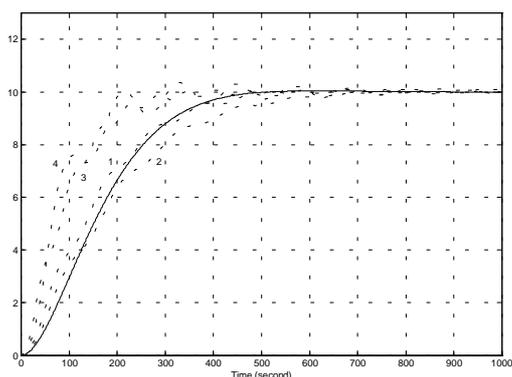


Figura 3: Rumbo deseado(continuo),  $t_r=500$ ,  $T_s=50$  (punteada 1),  $t_r=600$ ,  $T_s=60$  (punteada 2),  $t_r=300$ ,  $T_s=60$  (punteada 3),  $t_r=300$ ,  $T_s=30$  (punteada 4)

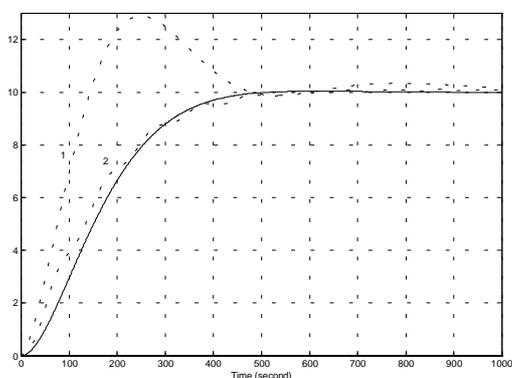


Figura 4: Rumbo deseado (continuo), control PID (punteado 1), asignación de polos (punteado 2)

## 5 CONCLUSIONES

Se ha presentado el método de asignación de polos en el diseño del control del cambio de rumbo de un buque "Mariner class". La sencillez que proporciona el emplear un método basado en la manipulación de polinomios permite realizar fácilmente diferentes estudios del comportamiento del sistema, en este caso los resultados de la simulación han mostrado que el comportamiento de este controlador en el régimen transitorio es bastante bueno. El rumbo deseado es seguido con considerable precisión en la maniobra de cambio de rumbo. Existe un buen comportamiento incluso si se producen pequeñas incertidumbres aceptables en los parámetros de la planta. Se encontró también que en este método de diseño la elección del tiempo de subida y el periodo de muestreo tienen gran relevancia.

Este método, incluyendo algunas restricciones adicionales, es también aplicable si el sistema sufre perturbaciones, permite por tanto realizar el estudio correspondiente al control del seguimiento del rumbo del buque.

## Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por la CICYT con el proyecto TAP97-0607-C03-03.

## Referencias

- [1] Åström, K. J., Wittenmark, B., (1989) Adaptive Control, Addison-Wesley.
- [2] Åström, K. J., Wittenmark, B., (1988) Sistemas Controlados por Computador, Paraninfo.
- [3] Chiselett, M. S., Strom-Tejsen J., (1965b) "Planar Motion Mechanism Tests and full-scale Steering and Maneuvering Predictions for a Mariner Class Vessel", *Technical Report Hy-6 hydrodynamics Department, hydro- and Aerodynamics Laboratory, Lyngby, Denmark.*
- [4] Fossen, T. I., (1994) Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley and Sons Ltd.
- [5] Källström, C. G., Åström, K. J., (1981) "Experiences of System Identification Applied to Ship Steering", *Automatica*, vol.17, enero.
- [6] López, E., Velasco, F. J., Rueda, T. M., (1997) "Modelos matemáticos de Buques", *I Congreso Nacional de Investigación e Innovaciones Tecnológicas en el Ámbito Marítimo*, pp. 671-680.
- [7] Nomoto, K., Taguchi, T., Honda, K., Hirano S., (1957) "On the steering qualities of Ships", *International Shipbuilding Progress*, vol.4.
- [8] Quevedo J., Villà R., (1982) "Autotimoneles", *Mundo Electrónico*, nº 115, pp. 57-64.