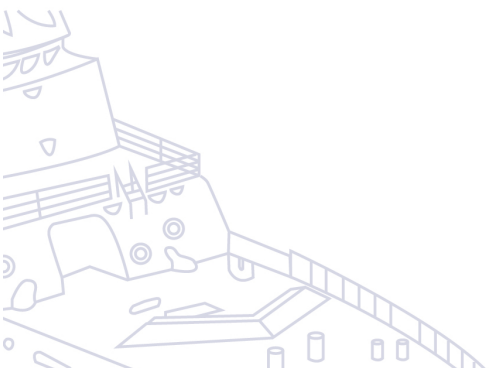
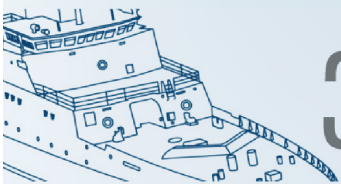


Identificación y Control Difuso Adaptativo para Sistemas de Navegación de Vehículos Autónomos

**Manuel Ariza, Luís Velásquez, Alcides Ramos,
Vladimir Díaz, Julián Arbeláez, Juan Contreras**

**Escuela Naval Almirante Padilla
Facultad de Ingeniería Naval
Cartagena de Indias, Colombia**



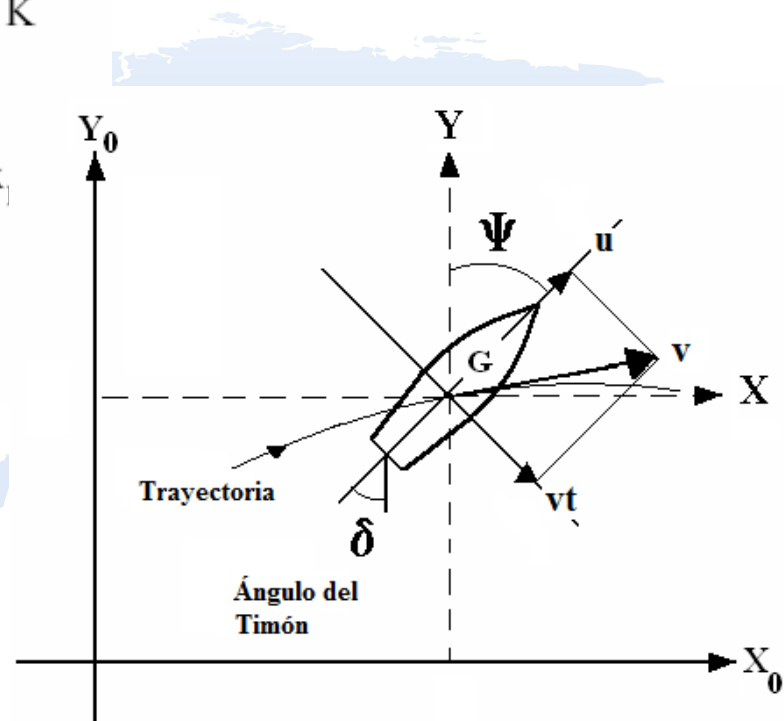


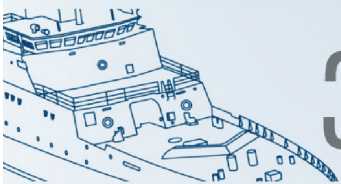
Agenda:

- 1. Introducción**
- 2. Descripción del prototipo de buque**
- 3. Identificación**
- 4. Análisis del modelo matemático**
- 5. Diseño e implementación del PID**
- 6. PID difuso autoajutable**
- 7. Conclusiones**

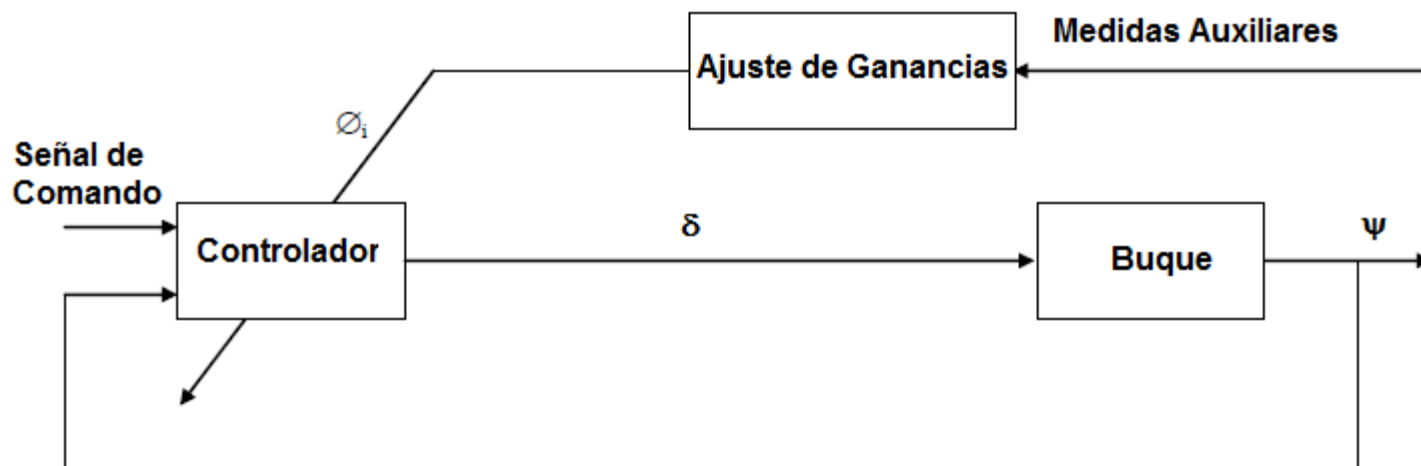


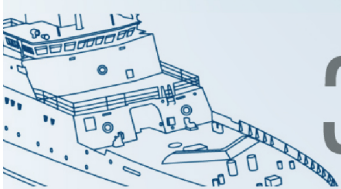
A stylized line drawing of a cityscape. On the left, a large, multi-story building with a grid-like facade is shown. A bridge or walkway extends from the building towards the center. In the foreground, there's a road with several small, simplified car shapes. To the right, a long, low structure, possibly a pier or a long building, stretches towards the horizon. The drawing is composed of simple black lines on a white background.





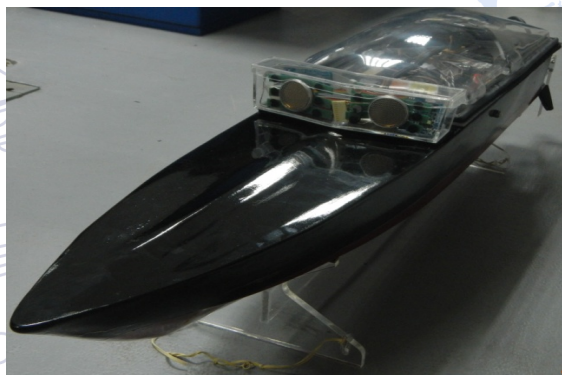
1. Introducción



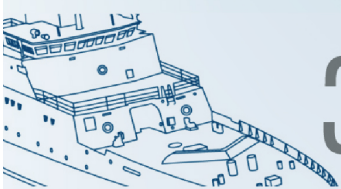


2. Descripción del prototipo de buque

El vehículo de superficie utilizado pertenece a la Escuela Naval Almirante Padilla, ubicada en Cartagena, Colombia, y posee un casco construido en madera, con una eslora de 0.78m. y una manga de 0.22 m.



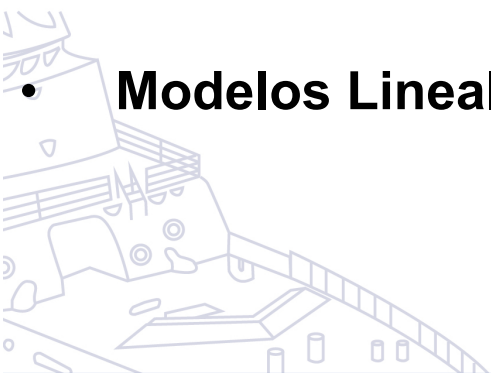
Ítem	Descripción
Eslora	0.78m
Manga	0.22m
Puntal	0.15
Peso	9.2 Kg
Propelling source	DC motor
Autonomía	1.2 hours
Velocidad máxima	1.3 m/s

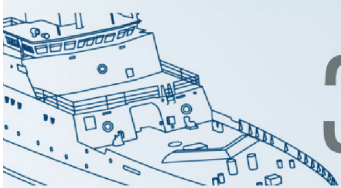


3. Identificación

3.1 Tipos de modelos:

- **Modelos Holísticos:** la dinámica de las maniobras del buque son modeladas como un sistema completo y cerrado; es decir, el casco, propulsión y timón constituyen un único modelo
- **Modelos Modulares:** casco, propulsión y timón son estudiados como modelos separados y luego son integrados.
- **Modelos No Lineales:** Abkowitz, Norrbin, Blanke, etc
- **Modelos Lineales:** Nomoto
- **Modelos Lineales con Adición de No Linealidades:**





3. Identificación

3.2 Pruebas de maniobras:

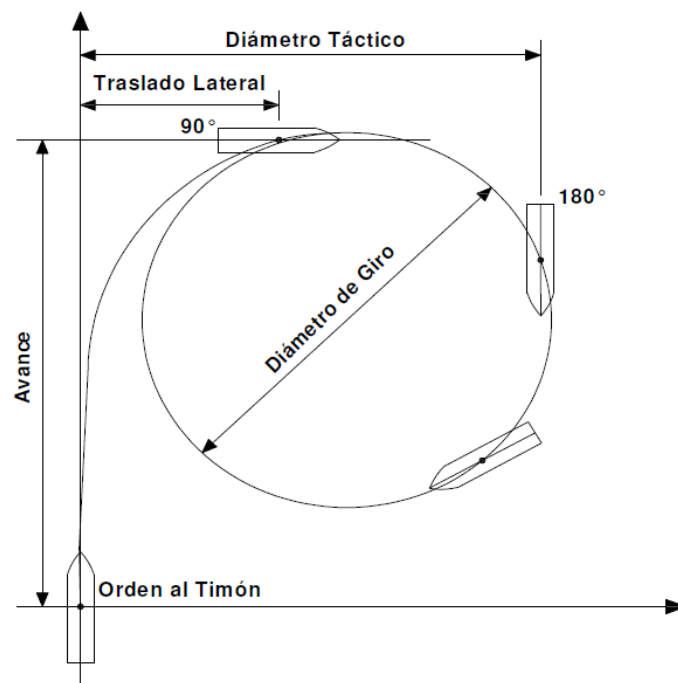
- **Círculo evolutivo:**

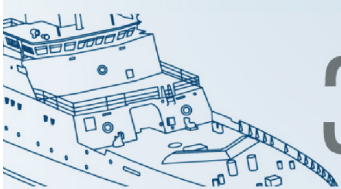
Avance: distancia longitudinal recorrida por el buque, avante, hasta alcanzar la caída de 90° de su proa a la banda de metida del timón y a una determinada velocidad.

Traslado Lateral: distancia lateral alcanzada por el buque cuando su proa ha caído 90° de la proa inicial.

Diámetro Táctico: cuando la proa del buque ha caído 180° de su proa inicial.

Diámetro de Giro: a la distancia máxima de separación entre dos puntos opuestos del giro en el periodo uniforme. Si bien esta dimensión es la característica más conocida de la curva de giro, puede decirse que no quedan representados los condicionantes que limitan el espacio mínimo necesario para maniobrar en una zona dada



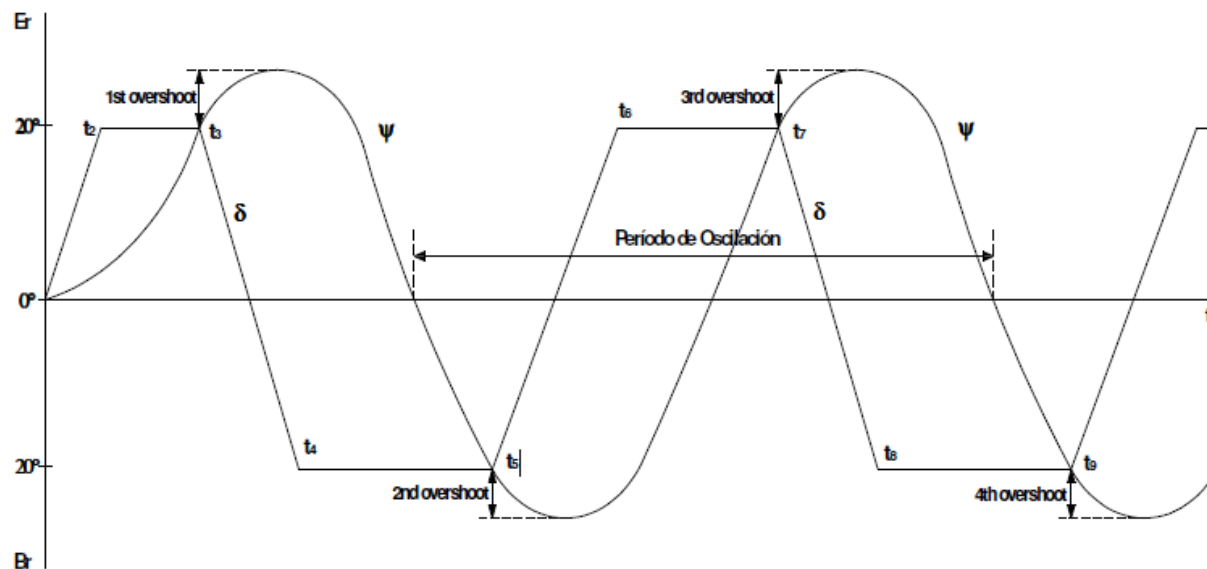


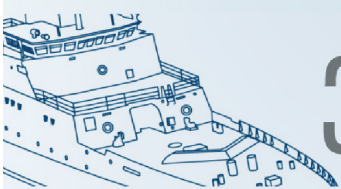
3. Identificación

3.2 Pruebas de maniobras:

- **Maniobra de zig-zag (Kempf):**

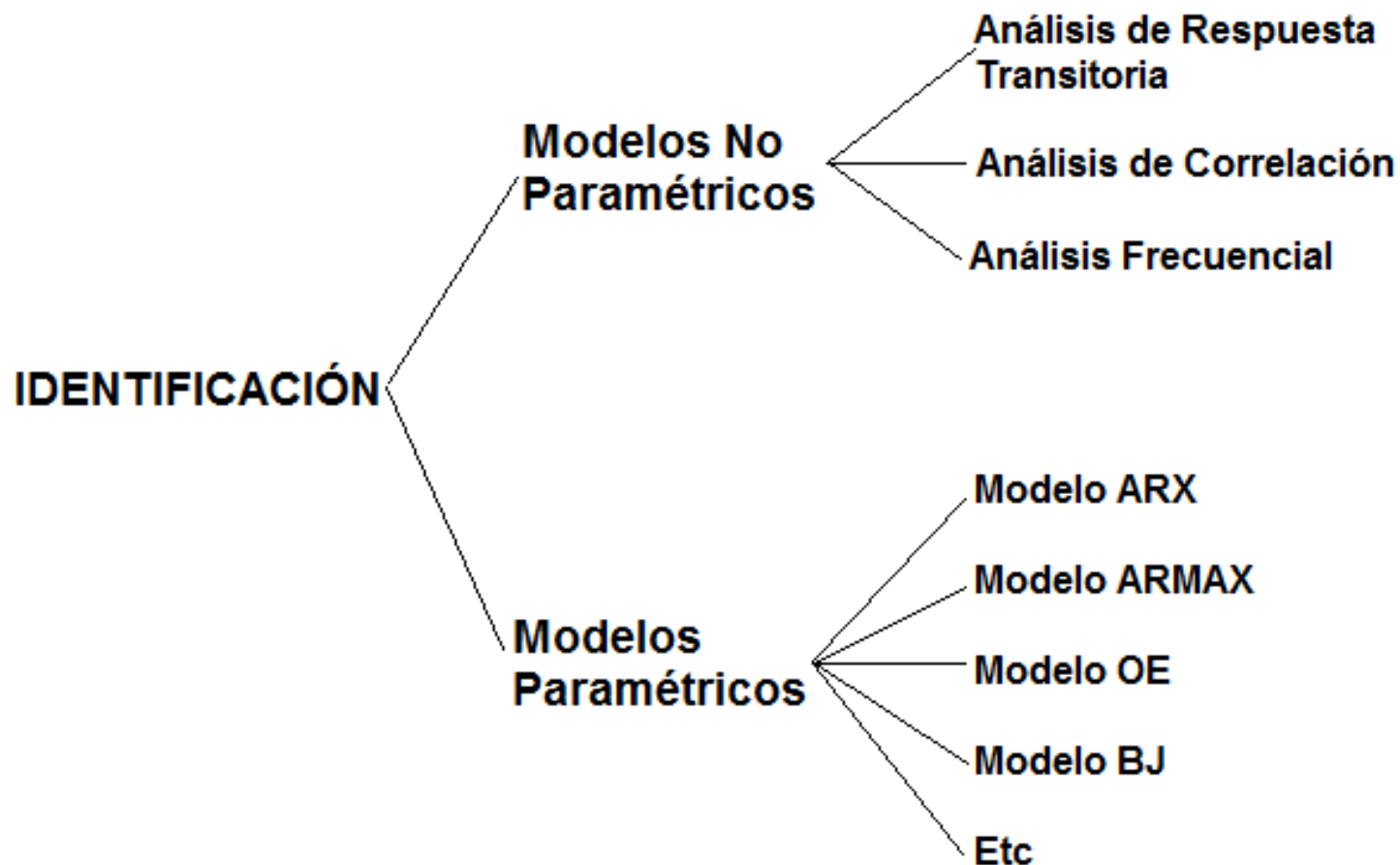
Consiste en mantener el buque a una velocidad constante, en línea recta, durante un tiempo determinado. Después de alcanzar la condición de equilibrio, el timón es accionado y colocado a θ° y mantenido constante hasta que el curso del buque alcance θ° . Entonces el ángulo del timón es cambiado a $-\theta^\circ$. Los parámetros que se consideran son: el tiempo entre movimientos sucesivos del timón y el overshoot (sobreimpulso).

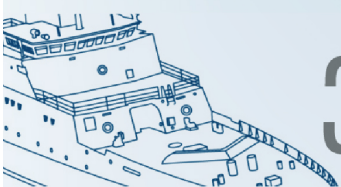




3. Identificación

3.3 Métodos de Identificación:

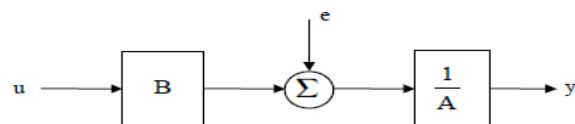




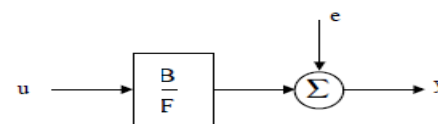
3. Identificación

3.3 Métodos de Identificación: Modelos paramétricos

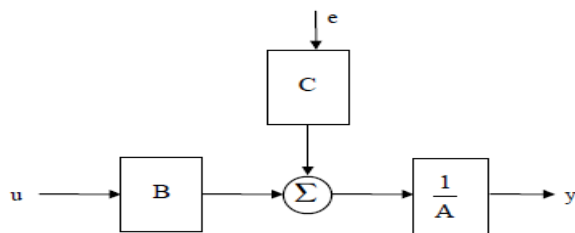
Tipo de modelo	Condición	Estructura resultante
Modelo ARX	$F(q^{-1})=D(q^{-1})=C(q^{-1})=1$	$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1}) \cdot u(t) + e(t)$
Modelo Output Error (OE)	$C(q^{-1})=D(q^{-1})=A(q^{-1})=1$	$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \cdot u(t) + e(t)$
Modelo ARMAX	$F(q^{-1})=D(q^{-1})=1$	$A(q^{-1}) \cdot y(t) = B(q^{-1}) \cdot u(t) + C(q^{-1}) \cdot e(t)$
Modelo Box Jenkins (BJ)	$A(q^{-1})=1$	$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \cdot u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} \cdot e(t)$



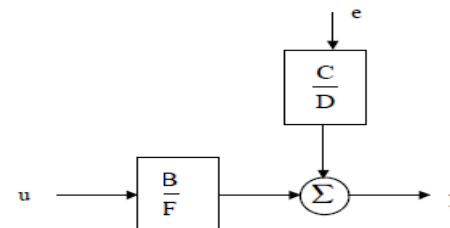
a) Estructura ARX



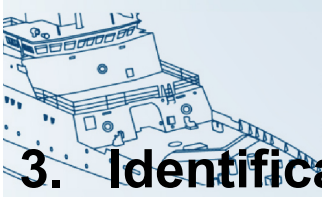
b) Estructura OE



c) Estructura ARMAX



d) Estructura BJ



3. Identificación

3.4 Proceso de Identificación:

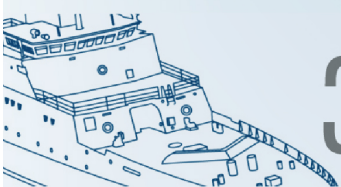
Un modelo simple que describe el comportamiento dinámico de un buque puede expresarse mediante el modelo de Nomoto de tercer orden):

$$\ddot{\psi}(t) + \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \dot{\psi}(t) + \frac{1}{T_1 T_2} H_N \left(\dot{\psi}(t) \right) = \frac{K}{T_1 T_2} \left(T_3 \dot{\delta}(t) + \delta(t) \right)$$

donde $\Psi(t)$ es el ángulo de rumbo y $\delta(t)$ es el ángulo de timón. Si se asumen condiciones iniciales nulas, la ecuación de Nomoto se puede representar en el dominio de Laplace mediante la siguiente función de transferencia:

$$\frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{K(T_3 s + 1)}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

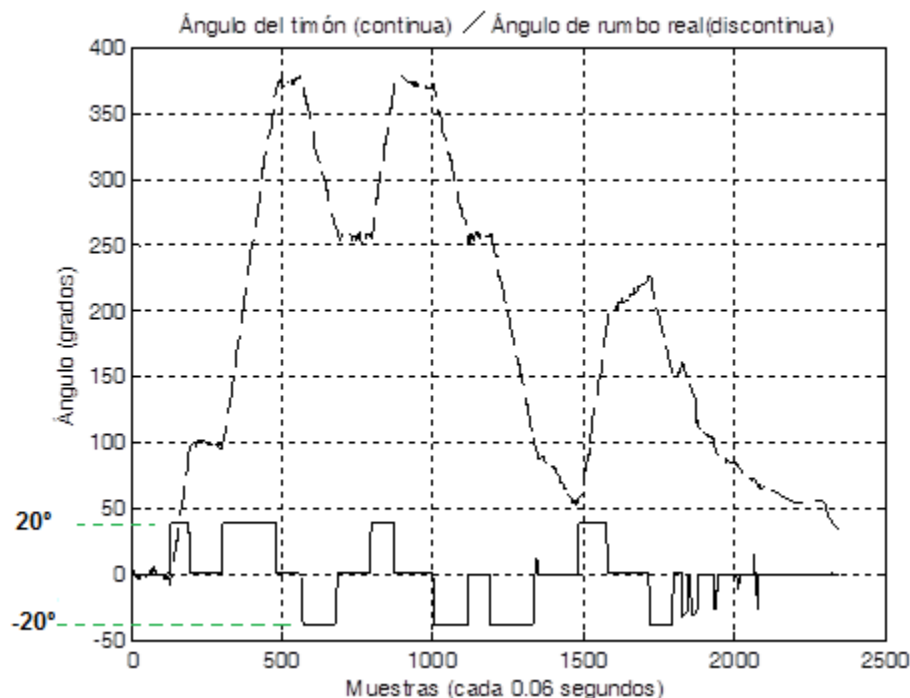
La anterior ecuación podría ser obtenida mediante técnicas de identificación utilizando datos experimentales y seleccionado una de las estructuras de modelos incluidas en la herramienta de identificación IDENT de MATLAB (arx, armax, oe, etc.) que mejor se aproximara a la dinámica representada por los datos experimentales.

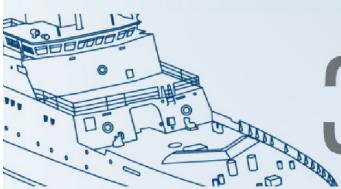


3. Identificación

3.4 Proceso de Identificación:

Para la identificación de rumbo se utilizó una maniobra similar a la curva de zig-zag en la que se varió el ángulo de timón entre 20° y -20° , con frecuencia variable, lo cual ocasiona cambios de rumbo del modelo físico hacia babor y estribor. La plataforma mantiene la velocidad aproximadamente constante durante toda la maniobra. Las pruebas fueron realizadas en la Bahía de Cartagena de Indias, sector El Laguito.





3. Identificación

3.4 Proceso de Identificación:

Se intentó obtener un modelo de bajo orden pero debido al retardo que presentaba la respuesta del modelo, no fue posible alcanzar un modelo de segundo orden que permitiese hacer una analogía de los coeficientes con la estructura del modelo de Nomoto. El mejor modelo se obtuvo con la estructura ARMAX (del acrónimo en inglés AutoRegressive Moving Average eXogen), cuya representación en tiempo discreto se muestra a continuación:

$$\frac{\psi(z)}{\delta(z)} = \frac{0.02347}{z^4 - 1.29z^3 + 0.2897z^2}$$

En tiempo continuo

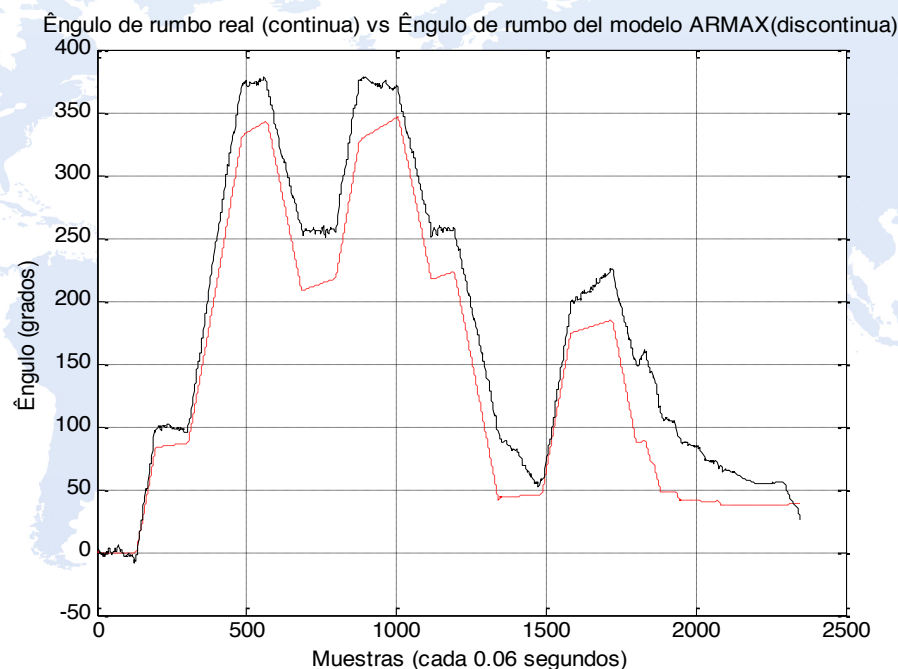
$$\frac{\psi(s)}{\delta(s)} = \frac{0.009098s^4 - 1.213s^3 + 60.65s^2 - 1348s + 11230}{s^4 + 85.02s^3 + 2335s^2 + 20390s - 137.6}$$

El error cuadrático medio alcanzado fue de 1.2446e+003.

3. Identificación

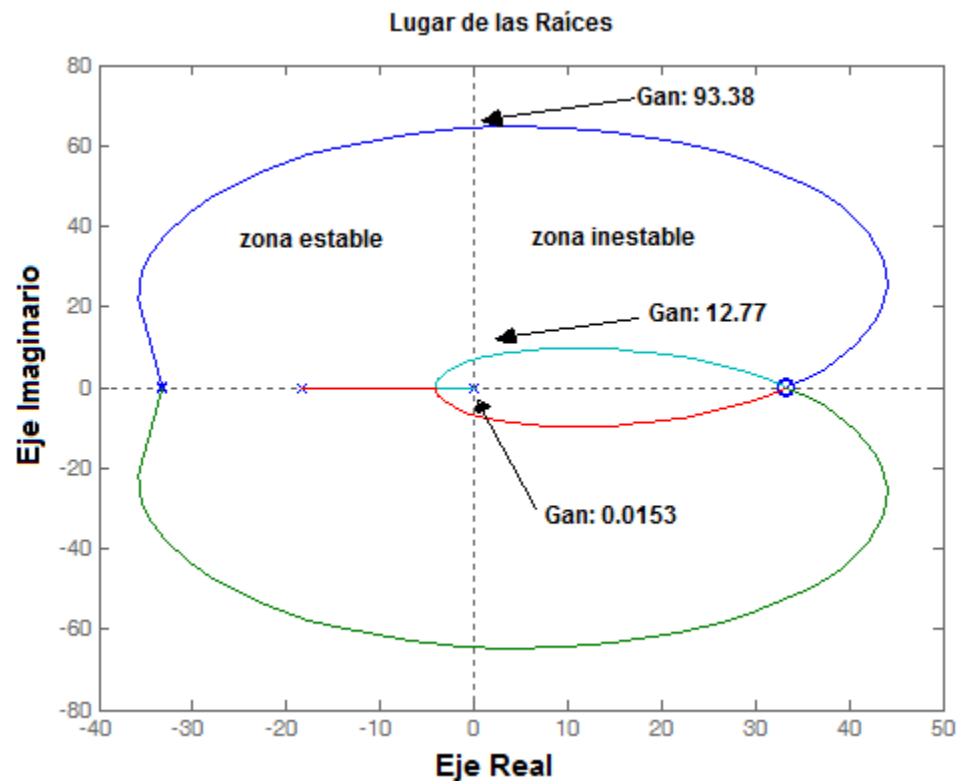
3.4 Proceso de Identificación:

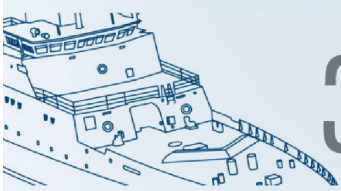
El modelo matemático obtenido es de cuarto orden, con un polo cerca al origen ($s_1=0.0067$) pero en el lado positivo del plano complejo S lo que indica una tendencia a la inestabilidad. Presenta un polo sobre el eje real negativo ($s_2 = -18.3478$) y dos polos complejos conjugados con parte real negativa ($s_3 = -33.3394 + j0.7993$; $s_4 = -33.3394 - j0.7993$), los cuales dan una indicación de que el sistema puede presentar oscilaciones amortiguadas en su respuesta (siempre y cuando se saque de la zona de inestabilidad).



4. Análisis del modelo matemático

El Lugar de las Raíces muestra que el sistema tiene un polo que a baja ganancia del sistema se ubica cerca del origen pero en el lado positivo del plano S, lo que genera un comportamiento inestable. Este polo puede ser desplazado hacia el lado izquierdo del plano S si la ganancia del sistema en lazo cerrado es mayor a 0.0123. Si se incrementa la ganancia de lazo cerrado por encima de 90 el sistema caerá nuevamente en la inestabilidad.



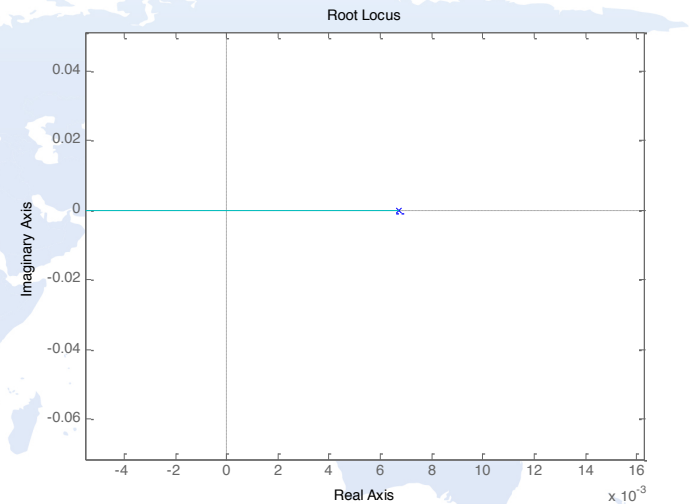


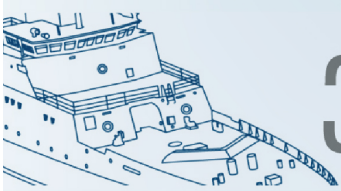
4. Análisis del modelo matemático

Para obtener el valor de ganancia K1 para el cual el polo que está en el lado positivo cruce por el origen (s=0):

$$\left| \frac{\psi(s)}{\delta(s)} \right| = \left| K1 * \frac{0.009098s^4 - 1.213s^3 + 60.65s^2 - 1348s + 11230}{s^4 + 85.02s^3 + 2335s^2 + 20390s - 137.6} \right|_{s=0} = 1$$

$$K1 = 0.0153$$



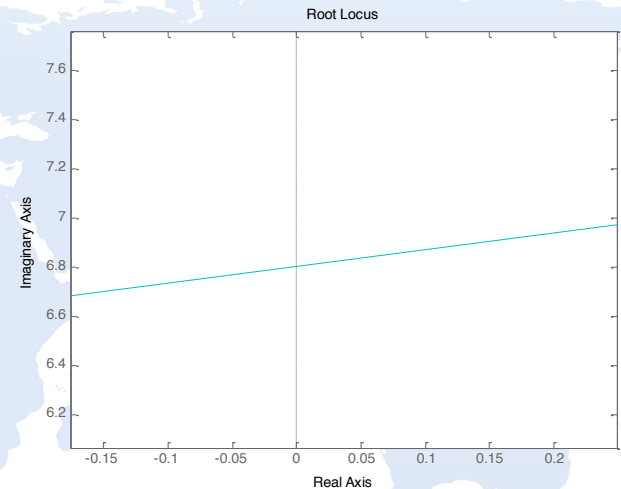


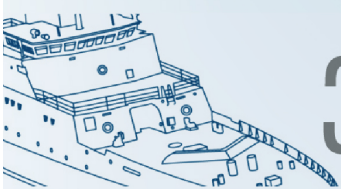
4. Análisis del modelo matemático

Para obtener el valor de ganancia K_2 para el cual los polos cruzan del lado izquierdo del plano S al lado positivo ($s=0+j6.8$ ó $s=0-j6.8$):

$$\left| \frac{\psi(s)}{\delta(s)} \right| = \left| K_2 * \frac{0.009098s^4 - 1.213s^3 + 60.65s^2 - 1348s + 11230}{s^4 + 85.02s^3 + 2335s^2 + 20390s - 137.6} \right|_{s=0+j6.80} = 1$$

$$K_2 = 12.77$$



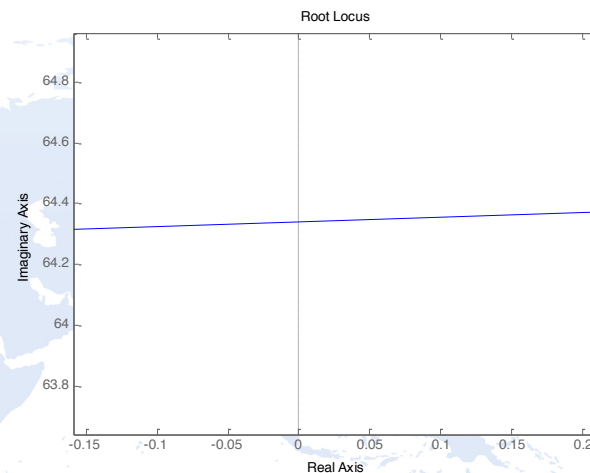


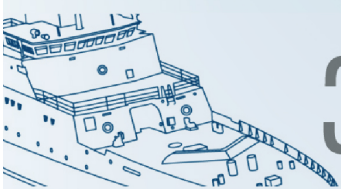
4. Análisis del modelo matemático

Para obtener el valor de ganancia K2 para el cual los polos cruzan del lado izquierdo del plano S al lado positivo ($s=0+j64.34$ ó $s=0-j64.34$):

$$\left| \frac{\psi(s)}{\delta(s)} \right| = \left| K3 * \frac{0.009098s^4 - 1.213s^3 + 60.65s^2 - 1348s + 11230}{s^4 + 85.02s^3 + 2335s^2 + 20390s - 137.6} \right|_{s=0+j64.34} = 1$$

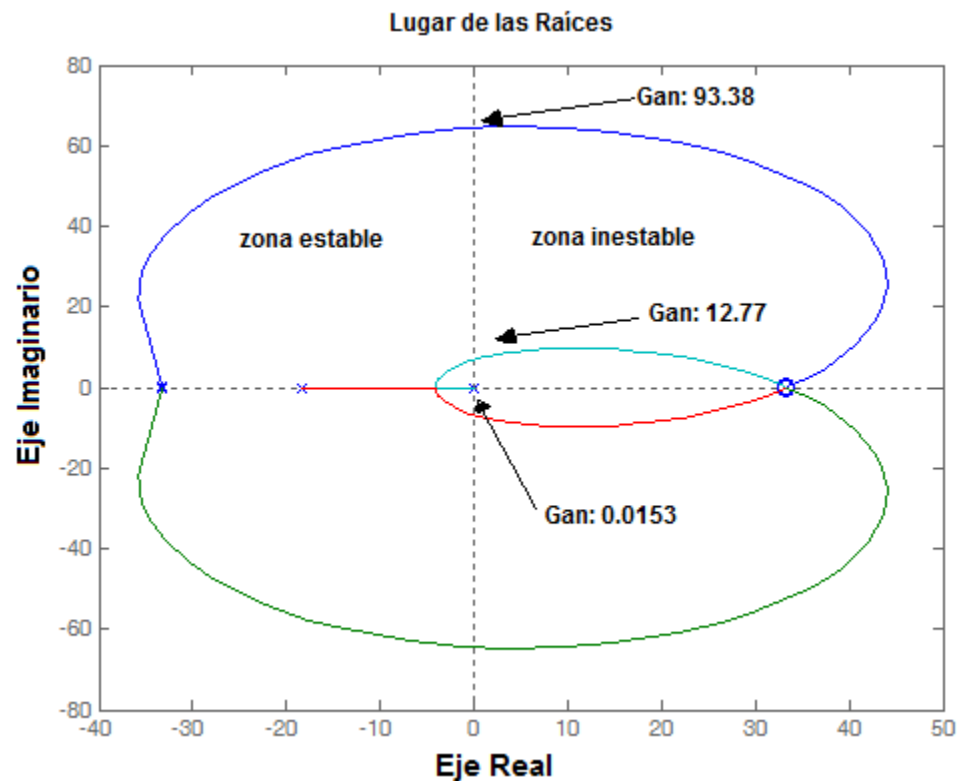
$$K3 = 93.38$$

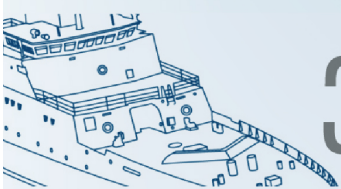




4. Análisis del modelo matemático

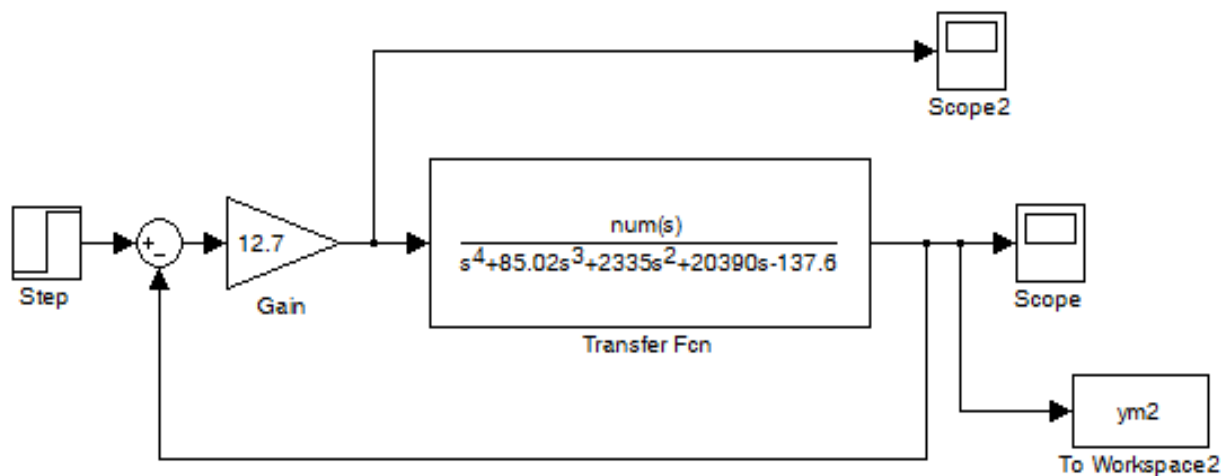
En resumen, el sistema es estable para valores de ganancias entre 0.0153 y 12.77. Además, en ese rango de valores de ganancia el sistema presentará oscilaciones amortiguadas; es decir, un comportamiento similar a un sistema subamortiguado.





5. Diseño e implementación del controlador PID

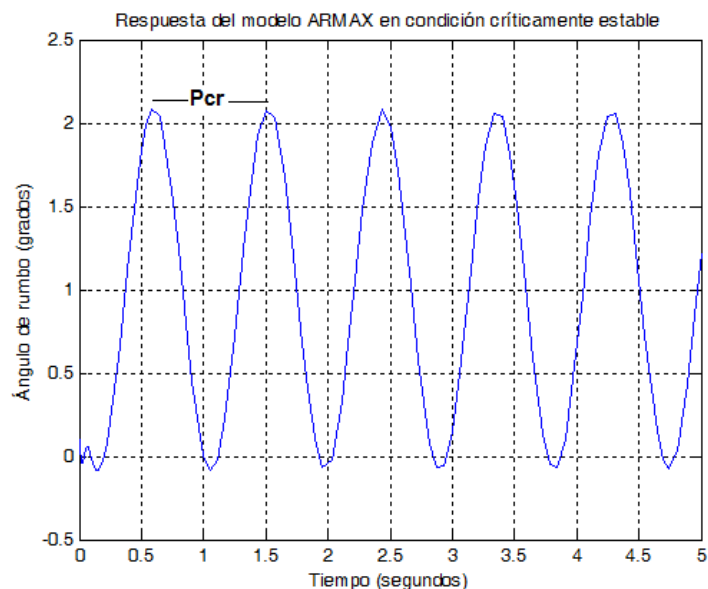
El lugar de las raíces muestra que existe un valor de ganancia en el cual la dinámica del sistema en lazo cerrado presenta oscilaciones sostenidas ($K=12.77$). Por tal motivo, se procede a implementar el segundo método de Ziegler_Nichols





5. Diseño e implementación del controlador PID

El lugar de las raíces muestra que existe un valor de ganancia en el cual la dinámica del sistema en lazo cerrado presenta oscilaciones sostenidas ($K=12.77$). Por tal motivo, se procede a implementar el segundo método de Ziegler_Nichols.



$$P_{cr} = 0.93$$

Segundo Método de Ziegler Nichols

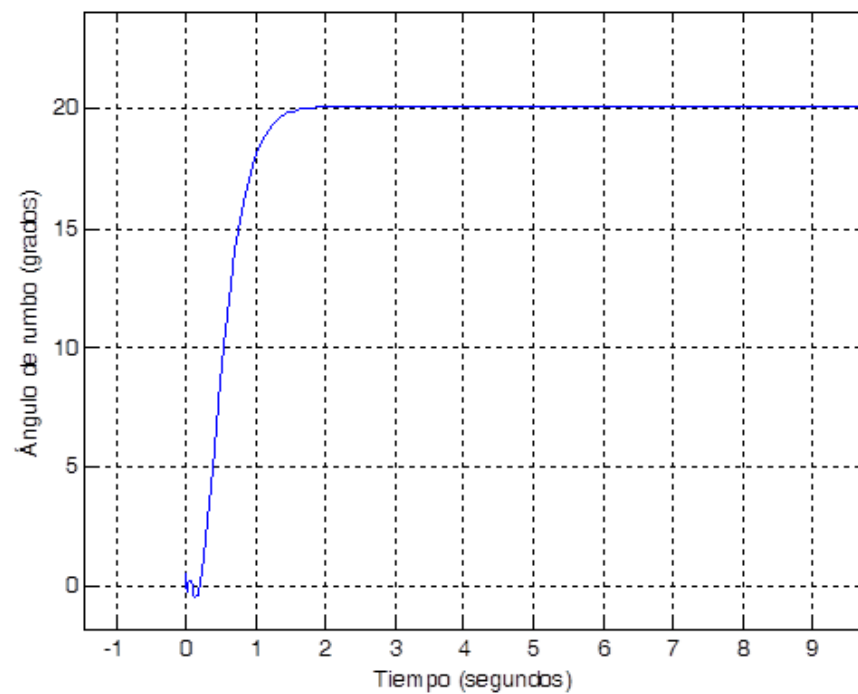
Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P			0
PI	0.5		0
PID	0.6	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$



5. Diseño e implementación del controlador PID



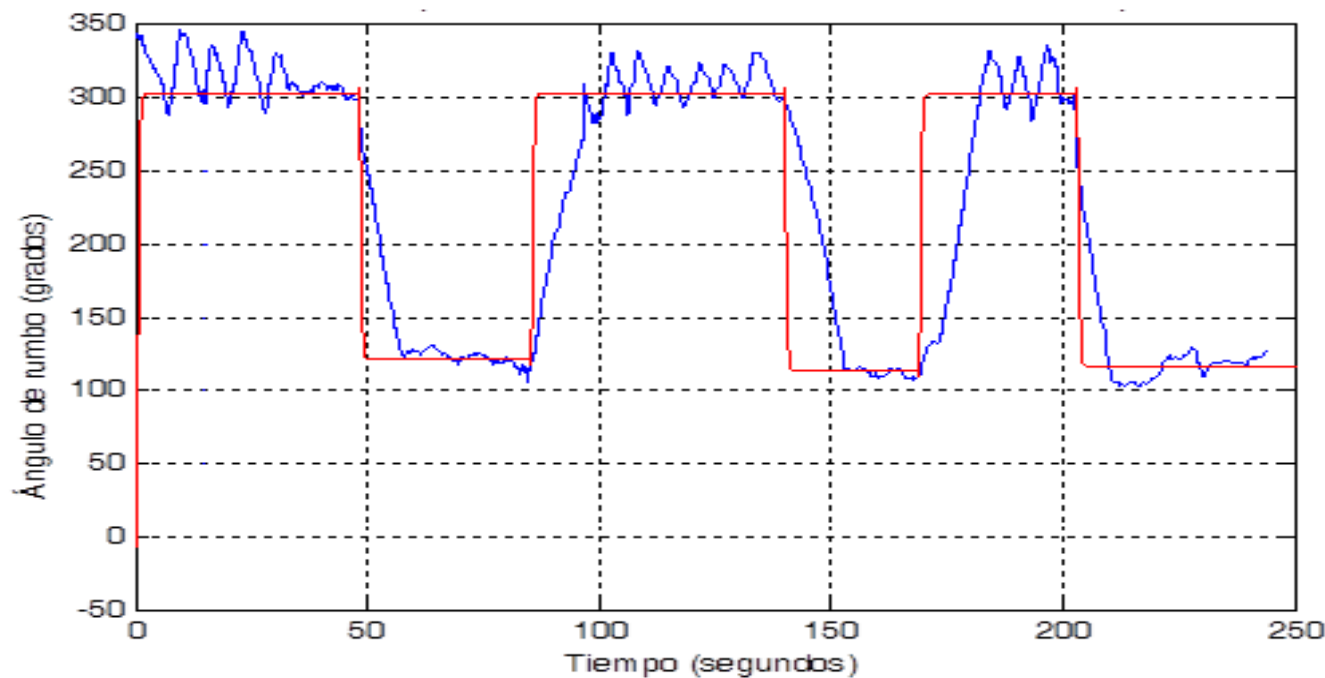
$K_p = 6.35$; $T_i = 0.775$



$K_p = 3.0$; $T_i = 0.775$



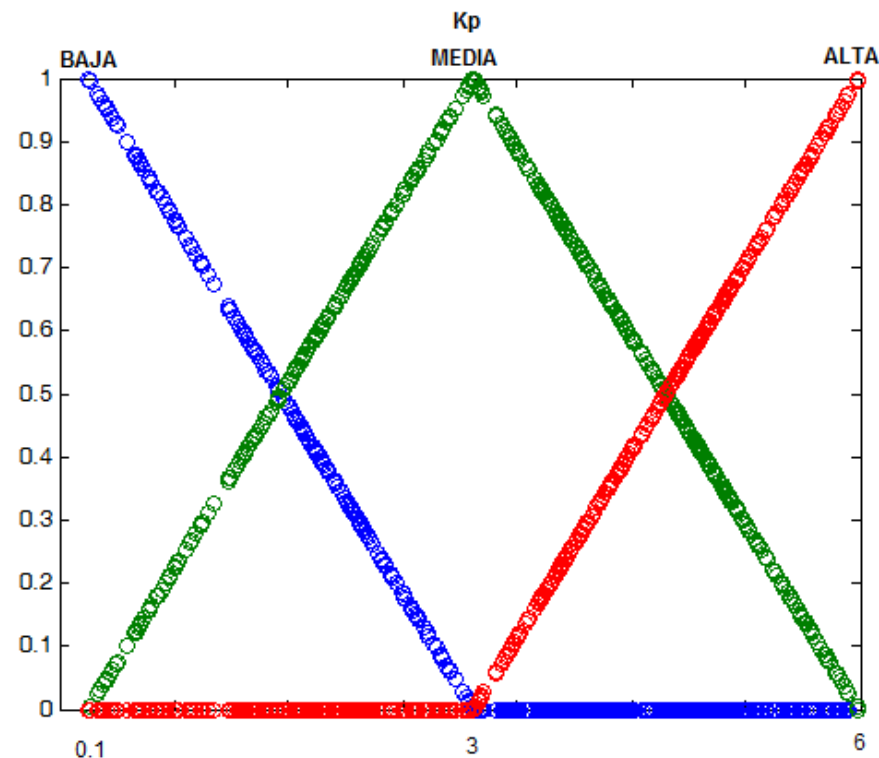
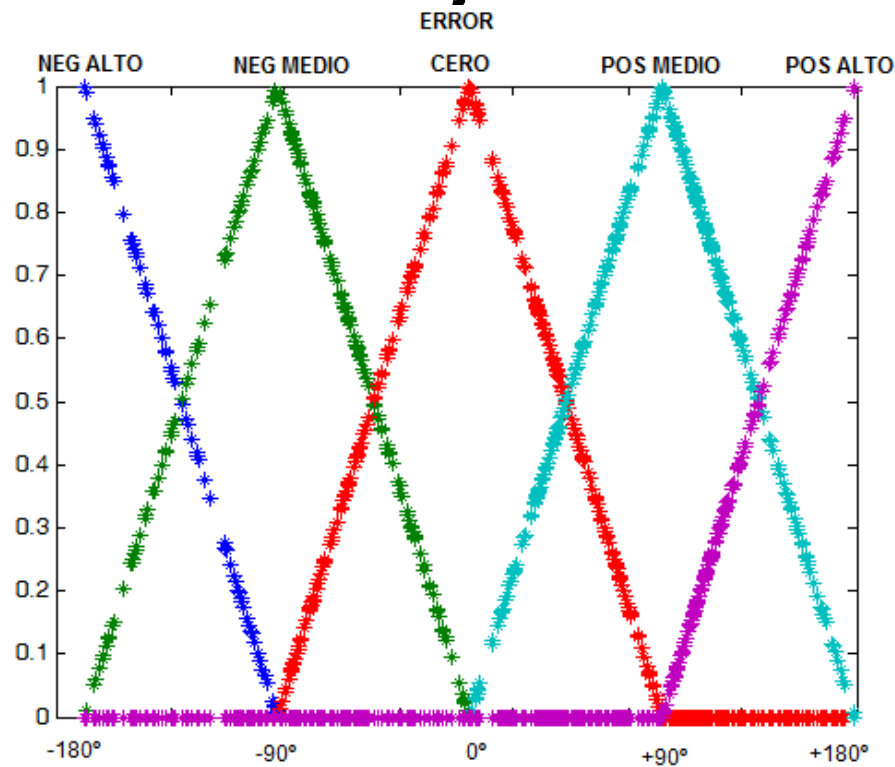
5. Diseño e implementación del controlador PID



Respuesta real del vehículo controlado ($P = 3$ e $I = 8.19$) ante solicitud de cambio de rumbo de 125° a 305°



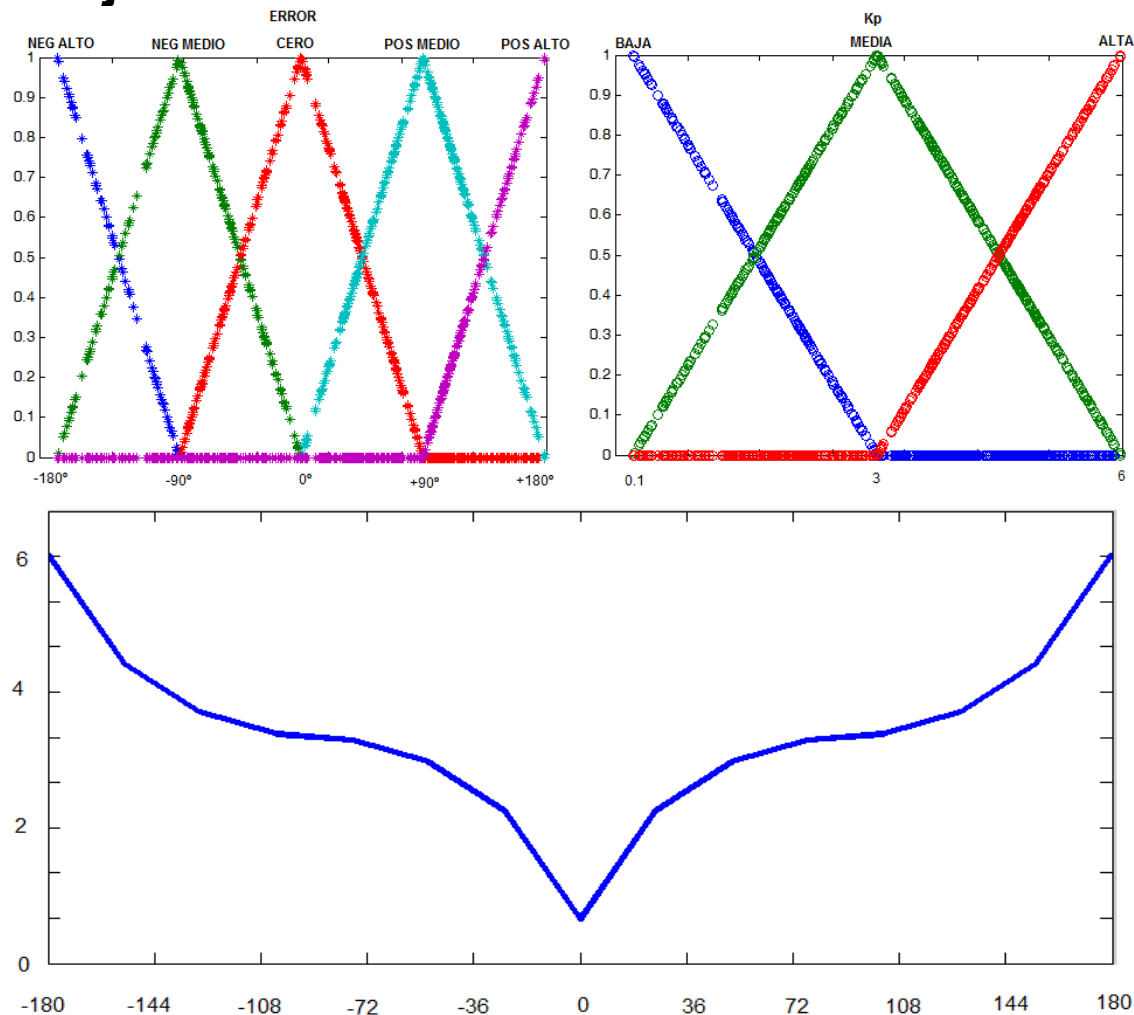
6. PID difuso autoajustable



Error \ Ganancia	Baja	Media	Alta
Negativo Alto			X
Negativo Medio		X	
Cero	X		
Positivo Medio		X	
Positivo Alto			X



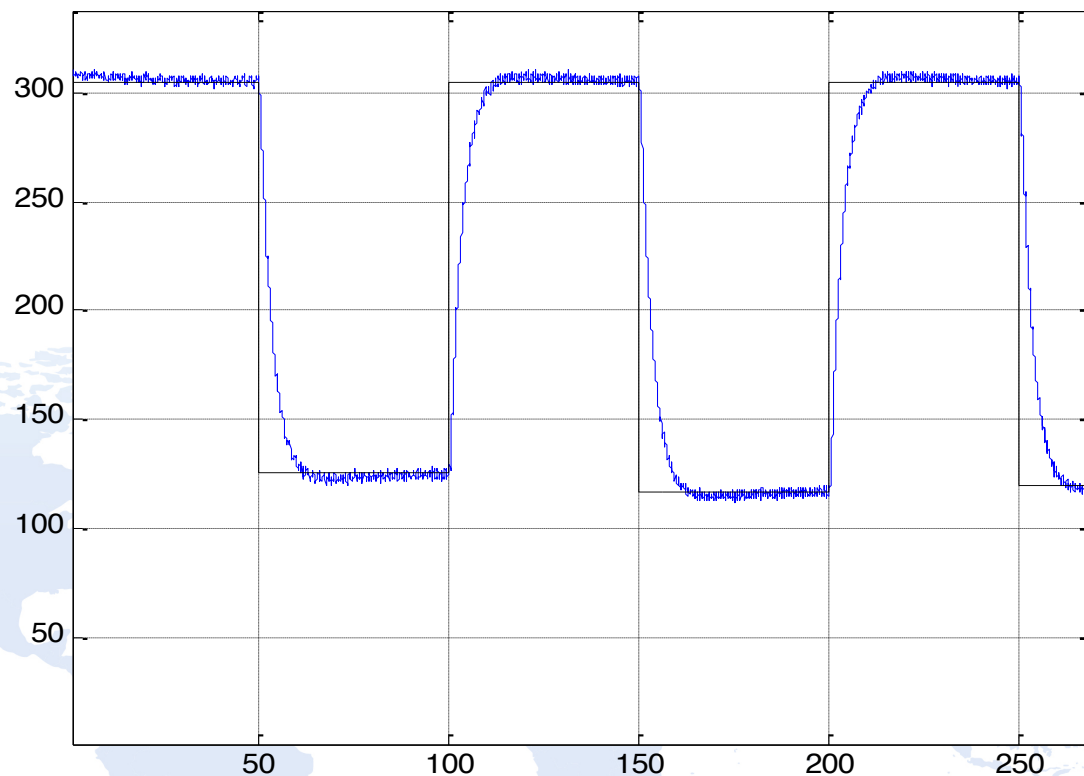
6. PID difuso autoajustable



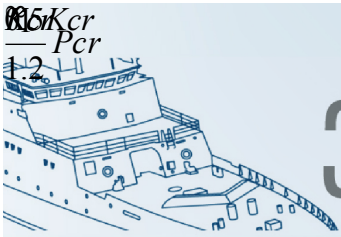
Superficie del adaptador difuso



6. PID difuso autoajustable



Se aprecia una respuesta sin sobreimpulsos ni oscilaciones significativas, aunque con un tiempo de establecimiento ligeramente mayor que con el controlador PI debido a que los valores de K_p y de T_i se disminuyen a medida que se va alcanzando la respuesta (rumbo) deseada.



7. Conclusiones

Se presentó el proceso de identificación de un modelo a escala de vehículo de superficie; el análisis de la respuesta temporal a partir de la información entregada por el lugar de las raíces del modelo matemático obtenido; y, con el análisis temporal se procedió a obtener los parámetros de un controlador PI, para regular el cambio de rumbo del vehículo, empleando el segundo método de Ziegler Nichols. Los datos obtenidos de la aplicación del controlador PI en una operación real del vehículo permitió ver que el vehículo seguía el cambio de rumbo ordenado pero presentaba altas oscilaciones en la respuesta permanente (manteniendo el rumbo).

Se presentó una sencilla estructura de un controlador PI difuso autosintonizable en el cual solo se deben indicar el rango en que pueden variar los parámetros K_p y T_i . De esta manera, si el error disminuye, entonces también disminuye la ganancia (K_p y T_i), con lo cual se reducen considerablemente las oscilaciones en el estado estable o permanente.