

Comparación de controladores en un vehículo acuático tipo barco

Joaquín Saucedo Barajas y Alejandro Enrique Dzúl López*

Instituto Tecnológico de la Laguna

Blvd. Revolución y Cuauhtémoc S/N, CP 27000, Torreón, Coah., México

* dzul@faraday.itlalaguna.edu.mx

Tel.: +52 (871) 705 1331 Ext. 120

Resumen—Este artículo presenta el estudio de tres leyes de control aplicadas a un vehículo acuático tipo barco. Los controladores aplicados son: un Proporcional-Derivativo, un controlador de linealización por realimentación, y un controlador por backstepping. Una comparación de éstos es analizada a través de simulaciones en MATLAB con el fin de establecer cuál de los tres es el mejor para estabilizar en posición, según el modelo dinámico tomado.

Palabras clave: Control de barcos, Modelado dinámico, controladores PD, Controladores de linealización por realimentación, Controladores por Backstepping.

I. INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones en robótica móvil se han incrementado recientemente, tanto en vehículos terrestres, aéreos como acuáticos. Algunas de las aplicaciones de robots tipo barco son búsqueda y rescate, detección de minas, pesca, aplicaciones militares, etc. El controlar un vehículo autónomo tipo barco a lo largo de una trayectoria deseada se vuelve un problema muy importante, donde esta meta puede ser alcanzada al resolver los problemas del seguimiento de trayectoria o del seguimiento de un camino (Fossen, 2002). La principal dificultad con los problemas de seguimiento de trayectoria o de camino es que el eje sway (velocidad en el eje y con respecto al marco unido al cuerpo) no está actuado en la mayoría de los casos. Esta configuración es la más común entre la mayoría de los vehículos acuáticos (Fossen, 2002). En (Pettersen y Lefeber, 2001), se propone un control de barcos con seguimiento de camino basado en puntos, desarrollándose una ley de control basada en la realimentación de estados, usando un enfoque de cascada. En (Almeida *et al.*, 2007), se trata el problema de guiar un barco a lo largo de un camino deseado. Diseñando para ello un controlador adaptable no lineal que produzca la convergencia de las trayectorias del sistema de lazo cerrado bajo la presencia de corrientes oceánicas desconocidas e incertidumbre paramétrica en el modelo. En (Fossen y Strand, 1998), se describe una ley de control por backstepping para barcos, mientras que en (Witkowska *et al.*, 2007) se presenta también un enfoque backstepping pero utilizando el modelado presentado en (Aström y Wittenmark, 1989). En (Do y Pan, 2006) se propone un método para diseñar un controlador adaptable robusto que fuerce a un barco a seguir

un camino de referencia bajo perturbaciones constantes o variantes en el tiempo de las olas. Este control se desarrolló para cubrir aplicaciones a bajas o altas velocidades. Se tomaron como desconocidos los coeficientes no lineales de la matriz de amortiguamiento, pero se asumió que sus valores se encuentran en un conjunto compacto cerrado, también se presenta una plataforma experimental.

El presente artículo está organizado de la siguiente manera: La sección II muestra el modelo matemático de un robot acuático (Fossen, 1994), al cual se le han agregado los elementos no lineales de la matriz de amortiguamiento $D(\nu)$. La sección III trata sobre el sistema de direccionamiento utilizado. Las leyes de control aplicadas al vehículo son presentadas en la sección IV. Las simulaciones de las leyes de control aplicadas al barco son mostradas en la sección V. Finalmente, en la sección VI se presentan las conclusiones de este trabajo comparativo.

II. MODELO DE UN ROBOT ACUÁTICO

El movimiento horizontal (plano $X - Y$) de un Robot Acuático tipo Barco está descrito usualmente por lo componentes de movimiento en avance u (surge), lateral v (sway) y la guiñada r (yaw), obsérvese la figura 1. El modelo matemático de un Robot Acuático tipo Barco de tres grados de libertad puede entonces escribirse como (Fossen, 1994):

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + (D + D_n(\nu))\nu = \tau \quad (1)$$

$$\dot{\eta} = R(\psi)\nu \quad (2)$$

donde $\nu = [u \ v \ r]^T$ denota al vector de velocidades con respecto al marco unido al cuerpo. $\eta = [x \ y \ \psi]^T$ es el vector de posiciones con respecto al marco inercial, con x y y como las posiciones y ψ como la orientación. Obsérvese la figura 2 y la tabla I, en donde se definen los movimientos de un vehículo acuático. Nótese que de los seis grados de libertad que tiene este tipo de vehículo, no se están tomando en cuenta los movimientos de altura (heave), alabeo (roll) y cabeceo (pitch) con el fin de simplificar el modelo.

También, $M = M^T > 0$ representa la matriz de masas e inercias. C corresponde a la matriz de fuerzas cen-

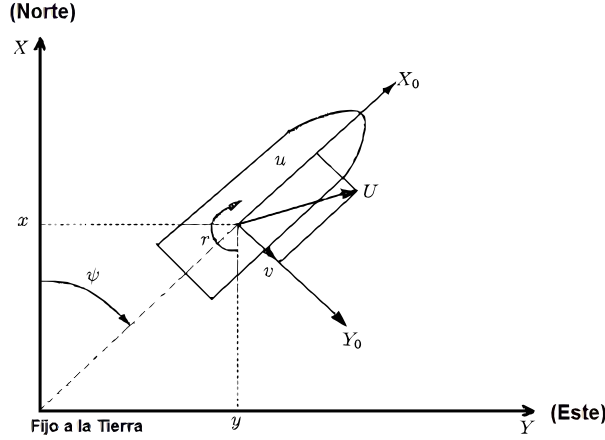
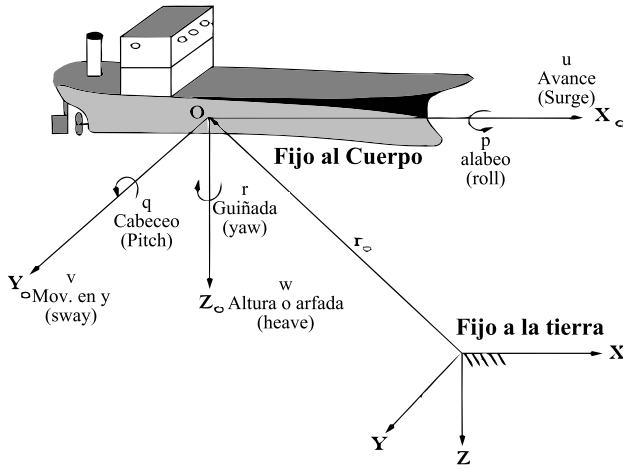

 Figura 1. Sistema coordenado para una trayectoria en $X - Y$


Figura 2. Movimientos en un robot acuático

trífugas y de coriolis. $D > 0$ denota la matriz de amortiguamiento que incluye términos lineales y no lineales. $\tau = [\tau_u \ \tau_v \ \tau_r]^T$ es el vector de pares aplicados al robot acuático. $R(\psi)$ es una matriz de transformación de coordenadas. Estas matrices están descritas como (Fossen, 1994):

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} & M_{23} \\ 0 & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

TABLA I

NOTACIÓN DE MOVIMIENTOS DE UN ROBOT ACUÁTICO

Mov.		Fuerza y Mom.	Vel. lin. y ang.	Pos. y orientación
1	Mov. en x (surge)	X	u	x
2	Mov. en y (sway)	Y	v	y
3	Mov. en z (heave)	Z	w	z
4	Giro en x (roll)	K	p	ϕ
5	Giro en y (pitch)	M	q	θ
6	Giro en z (yaw)	N	r	ψ

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & C_{13} \\ 0 & 0 & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$D + D_n(\nu) = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & 0 \\ 0 & D_{22} & D_{23} \\ 0 & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

donde:

$$M_{11} = m - X_{\dot{u}} \quad (7)$$

$$M_{22} = m - Y_{\dot{v}} \quad (8)$$

$$M_{23} = mx_g - Y_{\dot{r}} \quad (9)$$

$$M_{32} = mx_g - N_{\dot{v}} \quad (10)$$

$$M_{33} = I_z - N_{\dot{r}} \quad (11)$$

$$C_{13} = -C_{31} = -M_{22}v - M_{22s}r \quad (12)$$

$$C_{23} = -C_{32} = M_{11}u \quad (13)$$

$$D_{11} = -(X_u + X_{|u|u}|u|) \quad (14)$$

$$D_{22} = -(Y_v + Y_{|v|v}|v| + Y_{|r|v}|r|) \quad (15)$$

$$D_{23} = -(Y_r + Y_{|v|r}|v|) \quad (16)$$

$$D_{32} = -(N_v + N_{|v|v}|v| + N_{|r|v}|r|) \quad (17)$$

$$D_{33} = -(N_r + N_{|v|r}|v| + N_{|r|r}|r|) \quad (18)$$

con m como la masa del robot, I_z es la inercia del barco con respecto al eje z del marco unido al cuerpo, x_g es la coordenada en x del centro de gravedad con respecto al marco unido al cuerpo. $X_{\dot{u}}$, $Y_{\dot{v}}$, $Y_{\dot{r}}$, $N_{\dot{v}}$ y $N_{\dot{r}}$ son masas agregadas, por ejemplo, la fuerza de masa agregada hidrodinámica a lo largo del eje y , debido a la aceleración \dot{u} en la dirección x se escribe como: $Y_{\dot{u}}\dot{u}$, además $Y_{\dot{u}} \triangleq \frac{\partial Y}{\partial \dot{u}}$, también: X_u , Y_v , Y_r , N_v y N_r son los coeficientes lineales de amortiguamiento. $Y_{|v|v}$, $Y_{|r|v}$, $Y_{|u|r}$, $N_{|v|v}$, $N_{|v|r}$, $N_{|r|r}$ son coeficientes no lineales de amortiguamiento.

III. SISTEMA DE DIRECCIÓN

III-A. Camino de Puntos

Considérese que la misión del barco está dada por una serie de puntos $[x_d(k), y_d(k)]$ para $(k = 1 \dots N)$. Por lo tanto, se puede definir la línea de visión en términos de la guiñada como:

$$\psi_d(t) = \tan^{-1} \left(\frac{y_d(k) - y(t)}{x_d(k) - x(t)} \right) \quad (19)$$

Es necesario tener una selección apropiada del cuadrante para ψ_d . El próximo punto puede ser seleccionado sí el barco entra al círculo de aceptación de radio ρ_0 , alrededor del punto del camino $[x_d(k), y_d(k)]$. Más aún, si la posición del vehículo $[x(t), y(t)]$, en el tiempo t satisface:

$$[x_d(k) - x(t)]^2 + [y_d(k) - y(t)]^2 \leq \rho_0^2 \quad (20)$$

entonces el próximo punto del camino $[x_d(k+1), y_d(k+1)]$ podrá ser seleccionado. Una

guía para seleccionar ρ_0 consiste en igualar este valor a dos longitudes del barco, es decir $\rho_0 = 2L$.

IV. LEYES DE CONTROL APLICADAS AL BARCO

IV-A. Control PD

El objetivo de control consiste en llevar al vehículo a través de un camino de puntos deseado. La ley de control utilizada se muestra a continuación:

$$\tau = \begin{bmatrix} K_{p1} \cdot (\sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2}) \\ 0 \\ K_{p2} \cdot \tilde{\psi} + K_{d2} \cdot \dot{\tilde{\psi}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

donde $\tilde{x} = x_d - x$ se define como el error de posición en x , $\tilde{y} = y_d - y$ denota el error de posición en y , y $\tilde{\psi} = \psi_d - \psi$ representa al error de guiñada. K_{p1} es la ganancia proporcional del error de avance (surge), K_{p2} es la ganancia proporcional del error de guiñada (yaw), y K_{d2} es la ganancia derivativa del error de guiñada (yaw).

IV-B. Control de Linealización por Realimentación

Este control se divide en dos controladores (Børhaug *et al.*, 2006): iniciando con la ley de control de velocidad de avance,

$$\tau_u = -\frac{1}{M_{11}} (M_{22}v + M_{23}r) r - k_u (u - U) \quad (22)$$

donde $k_u > 0$, y después se tiene la ley de control para la guiñada, la cual está dada por:

$$\begin{aligned} \tau_r = & -\frac{M_{22}}{\Lambda} \begin{bmatrix} (-M_{22}v - M_{23}r)u + M_{11}uv \\ -D_{32}v - D_{33}r \end{bmatrix} \\ & + \frac{M_{23}}{\Lambda} (-M_{11}ur - D_{22}v - D_{23}r) \\ & + \dot{r}_d - k_r (r - r_d) \end{aligned} \quad (23)$$

donde $\Lambda = M_{22}M_{33} - M_{23}^2 > 0$, $k_r > 0$ y r_d como:

$$r_d = \frac{\Delta}{e^2 + \Delta^2} (u \sin \psi + v \cos \psi) - k_\psi (\psi - \psi_d) \quad (24)$$

con $k_\psi > 0$, $\Delta > U > 0$ y $e = y_d - y$.

IV-C. Control Backstepping

La ley de control para el posicionamiento dinámico toma la siguiente forma (Fossen y Strand, 1998):

$$\begin{aligned} \tau = & M\dot{\nu}_r + C(\nu)\nu_r + D(\nu)\nu_r - \mathbf{R}^T(\psi)\mathbf{K}_d s \\ & - \mathbf{R}^T(\psi)\mathbf{K}_p \eta \end{aligned} \quad (25)$$

donde:

$$s = \dot{\eta} - \Lambda\eta = \mathbf{R}(\psi)\nu - \Lambda\eta \quad (26)$$

$$\nu_r = \mathbf{R}^T(\psi)\dot{\eta}_r = \mathbf{R}^T(\psi)\alpha_1 \quad (27)$$

$$= [u_r \ v_r \ r_r] \triangleq \mathbf{J}^{-1}(\eta)\dot{\eta}_r \quad (28)$$

$$\alpha_1 = \Lambda\tilde{\eta} \quad (29)$$

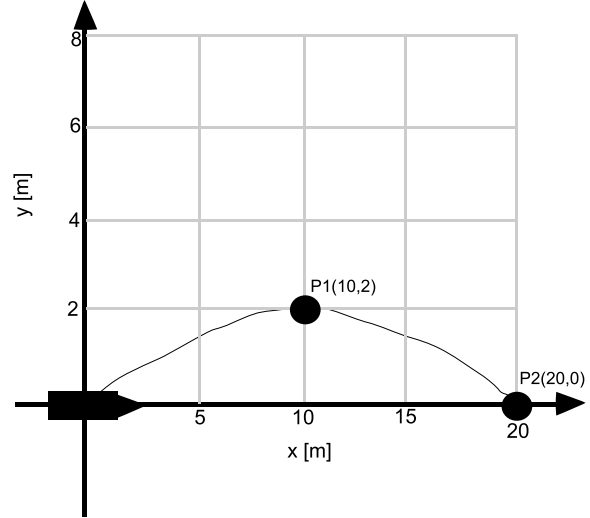


Figura 3. Trayectoria deseada descrita por un camino de puntos

$$\tilde{\eta} = \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \\ \psi_d - \psi \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\dot{\eta}_r = [x_r \ y_r \ \psi_r] \triangleq \dot{\eta}_d - \Lambda\tilde{\eta} \quad (31)$$

$$\mathbf{K}_d = \text{Matriz de diseño} \quad (32)$$

$$\mathbf{K}_p = \text{Matriz de diseño} \quad (33)$$

$$\Lambda = \text{Matriz de diseño} \quad (34)$$

V. SIMULACIONES

Se pretende que este vehículo acuático siga la trayectoria en $X - Y$ que se encuentra descrita por el camino de puntos mostrado en la figura 3. Como se puede observar, el vehículo empezará su trayectoria en el origen ($x = 0$, $y = 0$), con una velocidad inicial cero y un ángulo de guiñada también cero ($\psi = 0$). Se resalta que el camino consta de dos puntos de consigna, $p_1 = (x_1 = 10, y_1 = 2)$ y $p_2 = (x_2 = 20, y_2 = 0)$. El radio de aceptación está definido como $\rho_0 = 1$.

Los parámetros utilizados en el modelo matemático (1), (2) se encuentran en la tabla II. Los parámetros para la simulación con el controlador PD, ecuación (21), se pueden encontrar en la tabla III. Los parámetros utilizados para la simulación del control de linealización por realimentación, ecuaciones (22) y (23), se encuentran en la tabla IV y los parámetros para simular el sistema con el control por backstepping, ecuación (25), están descritos en la tabla V.

V-A. Plataforma de Simulación

El paquete de software utilizado para estas simulaciones está basado en MATLAB - Simulink, en éste se ha implementado el esquema del sistema mostrado en la figura 4. La utilización de este paquete tiene ventajas de utilizar bloques que permiten separar el sistema completo en sus diferentes sistemas o subsistemas, como lo es el sistema

TABLA II
PARÁMETROS DEL MODELO MATEMÁTICO

Parámetro	Valor
M_{11}	25.8
M_{22}	33.8
M_{33}	2.76
M_{23}	6.2
M_{32}	M_{23}
M_{22s}	$0.5(M_{23} + M_{32})$
C_{13}	$-M_{22}v - M_{22s}r$
C_{31}	$-C_{13}$
C_{23}	$M_{11}u$
C_{32}	$-C_{23}$
D_{11}	$12 + 2.5 u $
D_{22}	$17 + 4.5 v $
D_{23}	0.2
D_{32}	0.5
D_{33}	$0.5 + 0.1 r $

TABLA III
PARÁMETROS CONTROL PD

Parámetro	Valor
k_{p1}	3
k_{d1}	0
k_{p2}	4
k_{d2}	5

de dirección, el sistema de control, el modelo dinámico del Robot Acuático y su cinemática. Cada sistema a su vez está compuesto por otros bloques o elementos que pueden contener desde ganancias y elementos matemáticos hasta “archivos M” que se componen de programas o funciones definidas por el usuario. El ambiente virtual mostrado en la figura 5 fue desarrollado utilizando el lenguaje VRML con el editor V-Realm builder de MATLAB. Este ambiente es utilizado para visualizar los resultados de las simulaciones y ofrecer un panorama de lo que ocurriría a través de un mundo virtual.

V-B. Resultados Comparativos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones. Se efectuaron simulaciones con los tres controladores presentados en este artículo, con la finalidad

TABLA IV
PARÁMETROS CONTROL POR LINEALIZACIÓN

Parámetro	Valor
k_u	250
k_r	0.2
k_ψ	4
Δ	2
U	1

TABLA V
PARÁMETROS CONTROL BACKSTEPPING

Parámetro	Valor
K_p	$\text{diag}\{10, 0, 110\}$
K_d	$\text{diag}\{3, 0, 0.1\}$
Λ	$\text{diag}\{0.12, 0, 9\}$

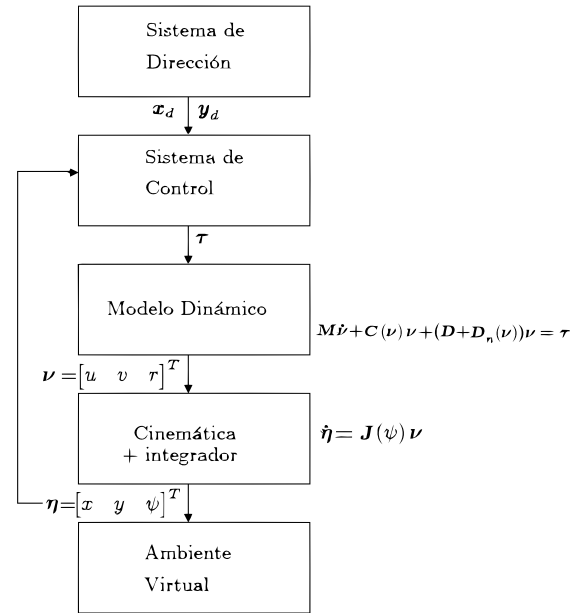


Figura 4. Sistema de control automático

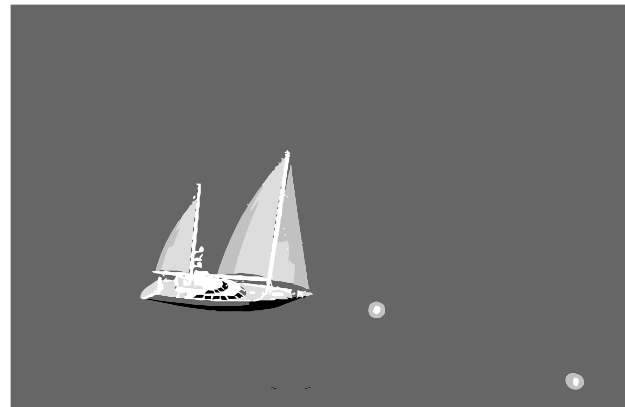


Figura 5. Realidad virtual

de realizar una comparación entre ellos. En las figuras 6-8, se observan las gráficas $X - Y$ de las trayectorias efectuadas por el vehículo con cada uno de los controladores. En estas figuras no existe en realidad una gran diferencia entre los tres controladores, tomando en cuenta que la trayectoria deseada se encuentra descrita por un camino de puntos, por lo que se aprecia que los tres controladores cumplen claramente con el objetivo, es decir, llegan a cada punto del camino.

En las figuras 9-11, se puede apreciar que los errores de posición en $X - Y$ de los tres controles tienden a cero para cada punto del camino, es decir, cuando el vehículo llega más allá de la circunferencia del primer punto del camino, automáticamente se cambia la consigna para que ahora se trate de alcanzar al segundo punto. Sin embargo, si se observa la escala del tiempo, el control más rápido es el de backstepping (25), dado que cumple con la trayectoria en

aproximadamente 15 segundos. El control por linealización por realimentación (23), (22) al igual que el control PD (21) realizan la trayectoria en menos de 27 segundos.

En las figuras 12-14, es posible observar el valor del ángulo de guiñada con respecto al tiempo.

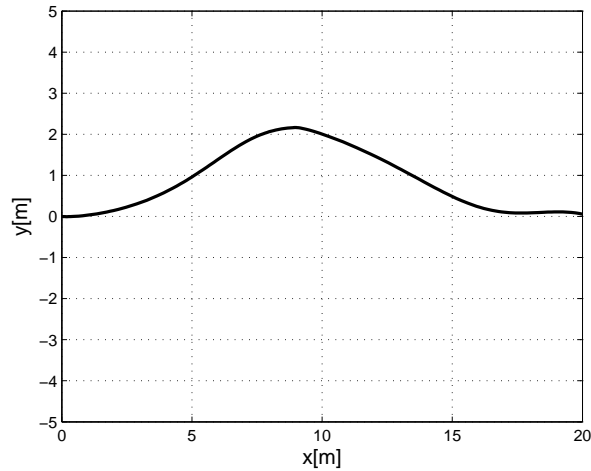


Figura 6. Trayectoria efectuada con PD

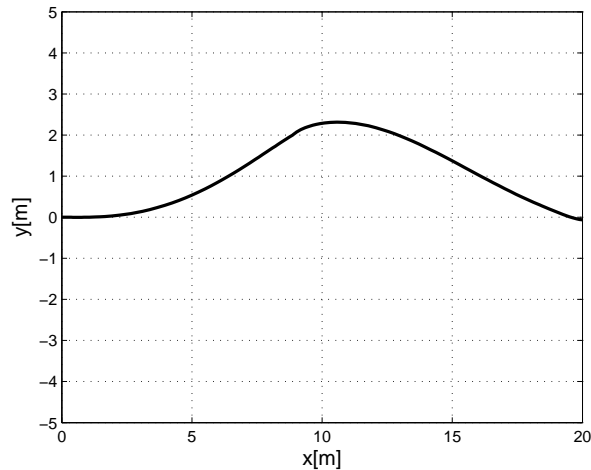


Figura 7. Trayectoria efectuada con Linealización

VI. CONCLUSIONES

En el presente artículo, se muestra un estudio de tres diferentes leyes de control. Aplicando las técnicas del control PD, del control de linealización por realimentación, y del control backstepping, se ha demostrado que las tres leyes de control permiten al robot acuático tipo barco cumplir satisfactoriamente con el objetivo de control (seguimiento de una trayectoria deseada descrita por un camino de puntos -solo en posición-). Sin embargo, tomando en cuenta las simulaciones realizadas, se puede decir que la técnica de control que cumple más rápidamente con el objetivo es la

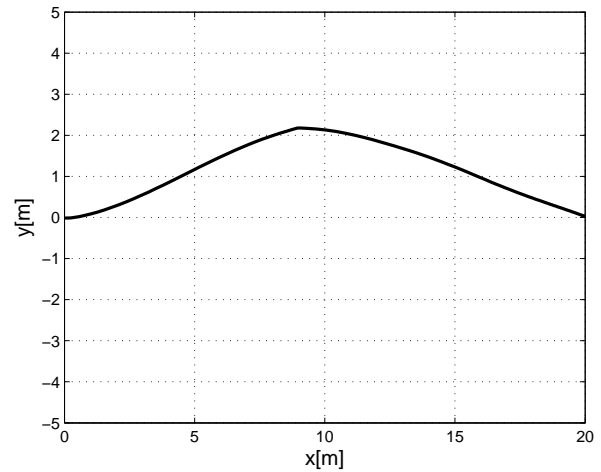


Figura 8. Trayectoria efectuada con Backstepping

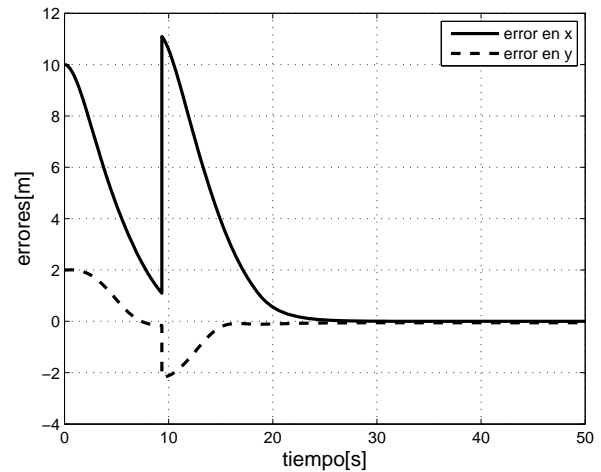


Figura 9. Error de posición con PD

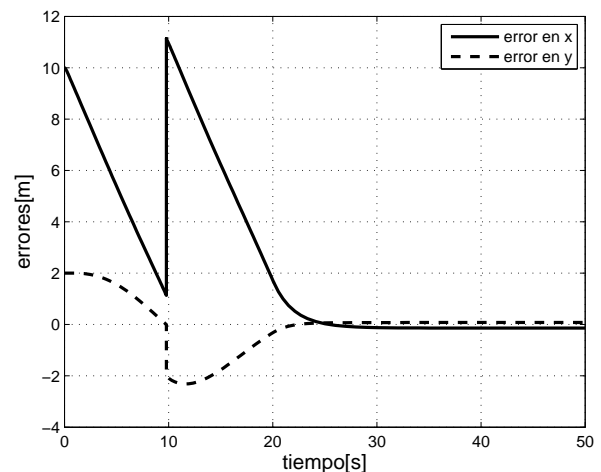


Figura 10. Error de posición con Linealización

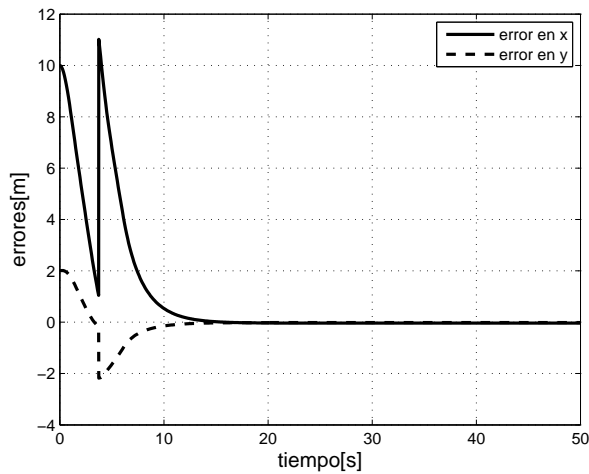


Figura 11. Error de posición con Backstepping

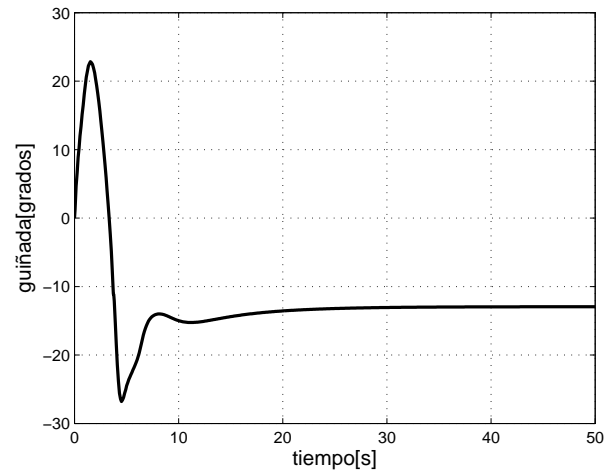


Figura 14. Ángulo de guiñada con Backstepping

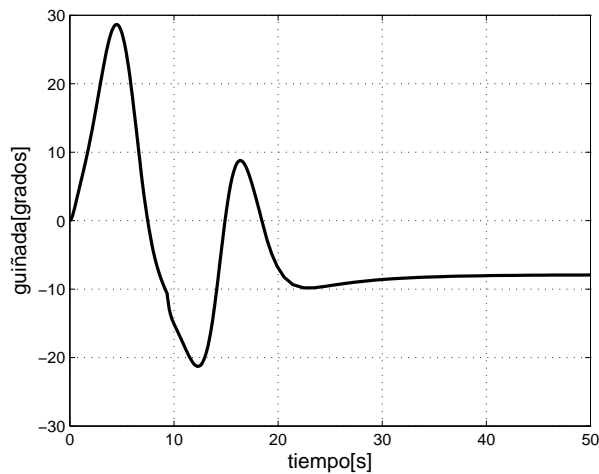


Figura 12. Ángulo de guiñada con PD

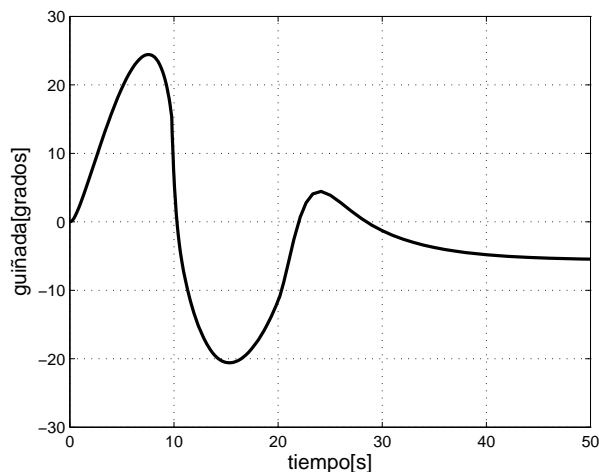


Figura 13. Ángulo de guiñada con Linealización

del control por backstepping, seguida por la linealización por realimentación y el control PD que prácticamente lo hacen de la misma manera. Como trabajo futuro, se pretende validar experimentalmente los resultados obtenidos en simulación.

VII. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación está siendo financiado por CONACYT y la DGEST.

REFERENCIAS

- Almeida, J., C. Silvestre y A. Pascoal (2007). Path-following control of Fully-actuated surface vessels in the presence of ocean currents. *Proc. Conference on Control Applications in Marine Systems, CAMS*.
- Aström, Karl Johan y Björn Wittenmark (1989). *Adaptive Control*. Reading, Massachusetts San Juan : Addison-Wesley Publishing.
- Børhaug, Even, Alexey Pavlov, Reza Ghabcheloo, Kristin Y. Pettersen y António Pascoal (2006). Formation control of underactuated marine vehicles with communication constraints. *Proc. of the 7th IFAC Conference on Maneuvering and Control of Marine Craft (MCMC)*.
- Do, K. D. y J. Pan (2006). Global robust adaptive path following of underactuated ships. *Automatica* **42**, 1713–1722.
- Fossen, T. I> (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Jhon Wiley & Sons Ltd.
- Fossen, T. I. y Jann Peter Strand (1998). Nonlinear ship control. *IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems CAMS*.
- Fossen, Thor Inge (2002). *Marine Control Systems*. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics.
- Pettersen, Kristin Y. y E. Lefeber (2001). Way-point tracking control of ships. *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control* pp. 940–945.
- Witkowska, A., M.Tomera y R. Śmierchalski (2007). A backstepping approach to ship course control. *The International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, AMCS* **17**(1), 73–85.