



**Revista Especializada de Ingeniería
y Ciencias de la Tierra**

VOL: 6 N° 1 julio - diciembre 2026

ISSN L: 2805-1874

**Diseño Computacional de un Control Adaptativo Mediante la Linealización
por Realimentación de Estados aplicado a Buques Marítimos, en la Industria
Naviera en Panamá, 2026**

**Computational Design of an Adaptive Control through State Feedback
Linearization applied to Maritime Vessels, in the Shipping Industry in
Panama, 2026**

Jorge Antonio Villarreal Cisneros
Universidad de Panamá. Facultad de Ingeniería. Panamá.
jorge.villarreal12901@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-8104-6111>

Denia Maritza Rodríguez Ureña
Universidad de Panamá. Facultad de Informática, Electrónica y Comunicación. Panamá
denia.rodriguez@up.ac.pa
<https://orcid.org/0009-0000-7729-7736>

Recibido: 9/2/2026 Aceptado: 10/5/2026

DOI <https://doi.org/10.48204/reicit.v6n1.10120>

RESUMEN

El diseño de un controlador adaptativo mediante la linealización por realimentación de estado aplicado a buque marítimo es considerado un elemento fundamental en la industria naviera, debido a su relevancia operativa de los buques marítimos, la sostenibilidad de las operaciones, la eficacia energética y la seguridad. Su objetivo es diseñar un controlador adaptativo para optimizar la eficacia y el rendimiento de los buques marítimos. La metodología se fundamenta en la mecánica analítica y el uso de la geometría analítica, aplicando las derivadas de Lie para obtener las salidas

del sistema y encontrar su contrabilidad y observabilidad y con el segundo criterio de estabilidad de Liapunov para establecer su estabilidad y establecer su ganancia mediante el método Cayley-Hamilton, mientras que MATLAB se usó como herramienta principal para el análisis de las señales, variables y componentes del sistema. Los resultados fueron validados mediante la comparación de las señales, alcanzando un rendimiento aproximado del 98% y un margen de error de error del 2%. Se demostró que el controlador adaptativo mediante la linealización de estado tuvo la capacidad de responder eficazmente a las bifurcaciones externa e interna, perfeccionando la eficacia y el rendimiento de los buques marítimos. En consecuencia, la investigación siguió un enfoque cuantitativo y se clasificó como de nivel aplicativo, al ser directamente transferible su metodología a buques reales.

Palabras Clave: Control adaptativo, linealización por realimentación de estado, segundo criterio de Liapunov, derivada de Lie y bifurcaciones.

ABSTRACT

The design of an adaptive controller using state-feedback linearization applied to maritime vessels is considered a fundamental element in the shipping industry due to its operational relevance, sustainability, energy efficiency, and safety. Its objective is to design an adaptive controller to optimize the efficiency and performance of maritime vessels. The methodology is based on analytical mechanics and the use of analytical geometry, applying Lie derivatives to obtain the system outputs and determine its checksibility and observability. The second Lyapunov stability criterion is used to establish its stability, and its gain is determined using the Cayley-Hamilton method. MATLAB was used as the primary tool for analyzing the system's signals, variables, and components. The results were validated by comparing the signals, achieving an approximate performance of 98% and a 2% error margin. It was demonstrated that the adaptive controller using state linearization was able to respond effectively to external and internal bifurcations, improving the efficiency and performance of maritime vessels. Consequently, the research followed a quantitative approach and was classified as application-level, since its methodology is directly transferable to real ships.

Keywords: Adaptive control, state feedback linearization, second Lyapunov criterion, Lie derivative, and bifurcations.

INTRODUCCIÓN

El problema actual de los buques marítimos consiste en perfeccionar su sistema de control para mejorar la eficacia operativa, considerando aspectos como el sistema de propulsión, la estabilidad, la maniobrabilidad y la reducción de su consumo energético, entre otros. Una de las alternativas para incrementar dicha eficacia es el diseño de un controlador que aproveche la naturaleza dinámica del buque marítimo, la cual puede determinarse mediante la mecánica analítica y la geometría diferencial. El objetivo es ajustar la respuesta frente a las variaciones dinámicas del sistema y las bifurcaciones externa e interna que esta enfrenta. Oleksiy Melnyk menciona que el control y la dirección de las embarcaciones representan un desafío, debido a la falta de control robusto. Además, estudio muestran estas deficiencias en las combinaciones de pruebas con modelos autopropulsados y algoritmos de control avanzado para mejorar la maniobrabilidad de los buques marítimos (Melnyk, Onishchenko, & Zaporozhets, 2025).

El objetivo general es diseñar un controlador computacional adaptativo mediante la linealización de estado, con la intención de aplicarlo a los buques marítimos de la industria naviera en Panamá, mejorando su eficacia operativa y el rendimiento de su sistema de control. Esta propuesta se justifica a través de técnicas de sistemas de inspiración biológica. El enfoque consiste en crear tecnología mas eficiente y sostenible mediante la dinámica natural, cuyo principio biológico es desarrollar sistemas capaces de adaptarse eficazmente a diversas condiciones, promoviendo una navegación más eficiente y respetuosa con el medio ambiente a largo plazo.

El controlador PID sigue siendo el mas usado debido a su estructura simple y su implementación es mas sencilla que los controladores no lineales (Xu & Guedes Soares, 2023). Asimismo, los controladores lineales ofrecen herramientas bien establecidos para diseño y validación, como los métodos PID o LQR, ampliamente documentados y aplicados en sistemas marítimos y usados en Panamá (Perez,2006). Sin embargo, los controladores no lineales, priorizan la confiabilidad y la capacidad de adaptación frente a condiciones complejas (Skjetne, Fossen, & Khargonekar, 2004). Adicionalmente, investigaciones muestran una mayor eficiencia energética y robustez frente a las condiciones ambientales frente a las condiciones cambiantes. (Yao & Zhang, 2019). La hipótesis planteada sostiene que el diseño de un controlador adaptativo, basado en la técnica de linealización por realimentación de estado puede optimizar la eficacia y rendimiento.

En el ámbito internacional, se ha desarrollado iniciativas orientadas a reducir la influencia humana en los procesos de control marítimo mediante sistema automatizado y automáticos, Zinchenko et al. (2020) presenta un estudio que aborda la creación de un barco por imitación para la síntesis y prueba de sistema de control.

Para enfrentar los desafíos naturales, los buques deben ser diseñados para soportar diversas condiciones climáticas. Aquí es donde entra en juego el controlador adaptativo, que se ajusta a las perturbaciones del entorno, permitiendo que el buque mantenga su estabilidad mediante la aplicación de conceptos como los múltiples puntos de equilibrio y los ciclos límite. Este tipo de controlador, basado en un control no lineal, divide el estado del proceso en dos escalas temporales: una lenta para los cambios de parámetros y otra rápida para la dinámica del bucle, las cuales evolucionan a diferentes velocidades (Peña, 2011). El diseño de un controlador adaptativo proporciona la flexibilidad necesaria para resistir perturbaciones, gracias a las características inherentes de los sistemas no lineales, como los múltiples puntos de equilibrio y los ciclos límites, permitiendo ajustes automáticos y reduciendo los costos operativos mientras se protege el medio ambiente (Martínez, 2020).

Los fundamentos teóricos de la investigación están basados en los sistemas de control no lineal y en la técnica de linealización por realimentación de estado aplicado a los buques marítimos. En donde iniciamos con el concepto de vector de configuración. El vector de configuración se entiende como una técnica que describe el conjunto de variables independientes que define la posición y orientación de un sistema dinámico y es la base para construir el modelo matemático del buque marítimo de seis grados de libertad (Fossen, 2011). Sin embargo, el vector de configuración contiene en su ecuación el jacobiano, el cual describe los cambios de entradas y salidas de las variables estudiadas en el buque (Slotine & Li, 1991). De esta manera se logra obtener la cinemática del buque, luego nos enfocamos en tener el momento de inercia del buque. El momento de inercia describe la distribución de la masa con respecto a un eje de rotación y para calcularlo aplicamos el teorema de los ejes paralelos, el cual dependerá de la geometría del casco y de la ubicación del centro de gravedad (Fossen, 2011; Serway & Jewett, 2014).

Otro, concepto fundamental es el uso del lagrangiano, el cual es una función que permite describir el comportamiento dinámico de un sistema físico y que se construye matemáticamente como la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial y con esto podemos encontrar las

ecuaciones de movimiento del buque marítimo (Goldstein, 1980). Sin embargo, el modelo matemático no es suficiente para crear un diseño de nuestro controlador, por tal motivo es necesario encontrar el modelo del actuador y que tipo de actuador, se va a utilizar. En este trabajo de investigación vamos a implementar el motor diésel, debido a su eficiencia en termino de consumo de combustible y entrega de potencia sostenida y operaciones de larga duración. Según, Heywood el motor diésel de dos tiempos es el adecuado para buque marítimo de gran tamaño mientras que el de cuatro tiempos es el adecuado para embarcaciones media y que el motor diésel de dos tiempos completa el ciclo en una sola vuelta (Heywood, 1988).

Además, de los conceptos mecánicos, también se debe hablar de los conceptos basado en la geometría diferencial. La geometría diferencial se fundamenta en el análisis de las variedades diferenciales, espacios matemáticos que se comporta como el espacio euclidiano, el cual permite realizar el cálculo diferencial. Esto implica que el buque marítimo puede considerarse como una variedad diferenciable, ya que cumple con los criterios esenciales: es localmente euclídeo, su posición y orientación y puede describirse mediante sus coordenadas generalizadas. Este método permite desarrollar el modelo matemático a través del formalismo lagrangiano y posibilita el diseño del sistema de control y el análisis de estabilidad mediante el uso de métricas y tensores propios de la geometría diferencial, como el tensor de inercia (Boothby, 1986; Isidori, 1995).

MÉTODOS Y MATERIALES

El método de investigación que se uso es de enfoque cuantitativo, el cual está fundamentado en el modelado matemático y la simulación numérica. El alcance es de nivel predictivo debido a la determinación de la dinámica del buque marítimo mediante las diferentes modalidades operativas. Para ello, se aplicó la mecánica analítica a través del formalismo de Euler-Lagrange, lo que genera un modelo cinemático y dinámico que representa las interacciones energéticas y los acoplamientos no lineales propio de un cuerpo rígido inmerso en el agua. A continuación, veremos el modelo matemático.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{c_2}{c_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{c_4}{c_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{c_6}{c_5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\frac{c_{12}}{c_{11}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{19}}{c_{18}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{c_7}{c_1} & \frac{c_8}{c_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{c_{13}}{c_3} & \frac{c_{14}}{c_3} & \frac{c_{15}}{c_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{c_{20}}{c_5} & \frac{c_{21}}{c_5} & \frac{c_{22}}{c_5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2c_9}{c_{11}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{24}}{c_{18}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^2 \\ x_2^2 \\ x_3^2 \\ x_4^2 \\ x_5^2 \\ x_6^2 \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{c_5} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} g + \begin{pmatrix} \frac{1}{mc_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{mc_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{mc_5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{12}{m(b^2+h^2)c_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12}{m(a^2+h^2)c_{11}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12}{m(b^2+a^2)c_{18}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{pmatrix} \quad (1)$$

donde:

$$\begin{aligned}
c_1 &= v_1^2 & c_2 &= 2v_1 \frac{dv_1}{dt} & c_3 &= v_2^2 & c_4 &= 2v_2 \frac{dv_2}{dt} \\
c_5 &= v_3^2 & c_6 &= 2v_3 \frac{dv_3}{dt} & c_7 &= v_2 \frac{\partial v_2}{\partial \phi} & c_8 &= v_3 \frac{\partial v_3}{\partial \phi} \\
c_9 &= v_4 \frac{\partial v_5}{\partial \phi} & c_{10} &= v_5 \frac{\partial v_5}{\partial \phi} & c_{11} &= v_4^2 & c_{12} &= v_4 \frac{dv_4}{dt} \\
c_{13} &= v_1 \frac{\partial v_1}{\partial \theta} & c_{14} &= v_2 \frac{\partial v_2}{\partial \theta} & c_{15} &= v_3 \frac{\partial v_3}{\partial \theta} & c_{16} &= v_4 \frac{\partial v_4}{\partial \theta} \\
c_{17} &= v_5 \frac{\partial v_5}{\partial \theta} & c_{18} &= v_5^2 & c_{19} &= 2v_5 \frac{dv_5}{dt} & c_{20} &= v_1 \frac{\partial v_1}{\partial \psi} \\
c_{21} &= v_2 \frac{\partial v_2}{\partial \psi} & c_{22} &= v_3 \frac{\partial v_3}{\partial \psi} & c_{23} &= v_4 \frac{\partial v_4}{\partial \psi} & c_{24} &= v_5 \frac{\partial v_5}{\partial \psi}
\end{aligned}$$

$$v_1 = \cos \psi \cos \theta + \sin \psi \cos \theta - \sin \theta$$

$$v_2 = -\sin \psi \cos \phi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi + \cos \psi \cos \phi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \sin \phi \cos \theta$$

$$v_3 = \sin \psi \sin \phi + \sin \theta \cos \psi \cos \phi - \cos \psi \cos \phi + \sin \phi \sin \psi \cos \phi + \cos \phi \cos \theta$$

$$v_4 = \sin \phi \tan \theta + \cos \phi + \frac{\sin \phi}{\cos \theta}$$

$$v_5 = \cos \phi \tan \theta - \sin \phi + \frac{\cos \phi}{\cos \theta}$$

a es la eslora; b es la manga; h es el calado o altura del buque marino de estudio.

La ecuación (1) representa el modelo matemático del buque marítimo, obtenido a partir del vector de configuración, del cálculo de la matriz de inercia del buque (considerando una geometría

rectangular) y mediante el formalismo lagrangiano, con el fin de derivar las ecuaciones de movimiento y expresarlas en forma de espacio de estado. Luego, de ver obtenido el modelo matemático del buque marítimo es importante determinar el modelo del actuador.

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{c_t}(u(t) - w(t)) \quad (2)$$

donde:

w es la velocidad angular del motor

c_t es la constante del tiempo

$u(t)$ es la unidad de control

La constante del tiempo se puede escribir de la siguiente manera:

$$c_t = \frac{I}{B} \quad (3)$$

Donde B es el coeficiente de amortiguamiento. La ecuación (3) la reemplazamos a la ecuación (2) y obtenemos el siguiente resultado:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{v_m}{r}\right) = \frac{B}{I}\left(u(t) - \frac{v_m}{r}\right)$$

$$\frac{d}{dt}(v_m) = rBI\left(u(t) - \frac{v_m}{r}\right) \quad (4)$$

Ahora, multiplicamos por la masa para obtener la fuerza del motor:

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} \frac{12rB}{m(b^2+h^2)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12rB}{m(a^2+h^2)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12rB}{m(b^2+a^2)} \end{pmatrix} (u(t)) - \begin{pmatrix} \frac{12B}{m(b^2+h^2)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12B}{m(a^2+h^2)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12B}{m(b^2+a^2)} \end{pmatrix} (v_m) \quad (5)$$

El torque se expresa de esta forma:

$$\tau = B \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} u(t) - B \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} w(t) \quad (6)$$

Con este resultado podemos expresar el modelo del actuador

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{12rB}{m(b^2+h^2)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12rB}{m(a^2+h^2)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12rB}{m(b^2+a^2)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B \end{pmatrix} * u(t) - \begin{pmatrix} \frac{12B}{m(b^2+h^2)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12B}{m(a^2+h^2)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12B}{m(b^2+a^2)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Ahora, combinaremos la ecuación (7) con la ecuación (1) obtenemos la planta del buque:

$$\begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \\ \ddot{x}_5 \\ \ddot{x}_6 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{c_2}{c_1} + \frac{12B}{m^2(b^2+h^2)c_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{c_4}{c_3} + \frac{12B}{m^2(a^2+h^2)c_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{c_6}{c_5} + \frac{12B}{m^2(b^2+a^2)c_5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{12B}{m^2(b^2+h^2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2c_{12}}{c_{11}} + \frac{12B}{m^2(a^2+h^2)c_{11}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{18}}{c_{18}} + \frac{12B}{m^2(a^2+b^2)c_{18}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} - g \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{c_5} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & \frac{c_7}{c_5} & \frac{c_8}{c_5} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{c_{13}}{c_1} & \frac{c_{14}}{c_3} & \frac{c_{15}}{c_5} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{c_{20}}{c_1} & \frac{c_{21}}{c_3} & \frac{c_{22}}{c_5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_9}{c_{11}} & \frac{c_{10}}{c_{18}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{16}}{c_{23}} & \frac{c_{17}}{c_{24}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{23}}{c_{11}} & \frac{c_{24}}{c_{18}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{12rB}{m^2(b^2+h^2)c_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12rB}{m^2(a^2+h^2)c_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12rB}{m^2(b^2+a^2)c_5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{12B}{m(b^2+h^2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12B}{m(a^2+h^2)c_{11}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12B}{m(a^2+b^2)c_{18}} \end{pmatrix} u \quad (8)$$

Una

vez determinado el modelo de la planta mediante el formalismo de Euler-Lagrange, procedemos al diseño del controlador adaptativo basado en la técnica de linealización por realimentación de estados.

$$u = \begin{pmatrix} \frac{1}{V_1 g_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{V_2 g_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{V_3 g_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{g_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{V_4 g_5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{V_5 g_6} \end{pmatrix} * \mu - \begin{pmatrix} \frac{f_1}{g_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{f_2}{g_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f_3}{g_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{f_4}{g_4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{f_5}{g_5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{f_6}{g_6} \end{pmatrix}$$

donde u es la salida del sistema de control real y μ es la solución singular del sistema y que representa la salida del controlador y que tiene como resultado un grado relativo 1, lo que implica que el sistema es isomorfo. Veamos el modelo del isomorfismo

$$z = \begin{pmatrix} V_1 x_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_2 x_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_3 x_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & V_4 x_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & V_5 x_6 \end{pmatrix}$$

La derivada del isomorfismo se puede expresar también de la siguiente forma:

$$\dot{z} = Az + Bu \quad (9)$$

Para que sea estable, la función de Liapunov debe tener esta forma:

$$\dot{V} = -z^T K z = -\sum_{i=1}^6 k_i z_{ii}^2$$

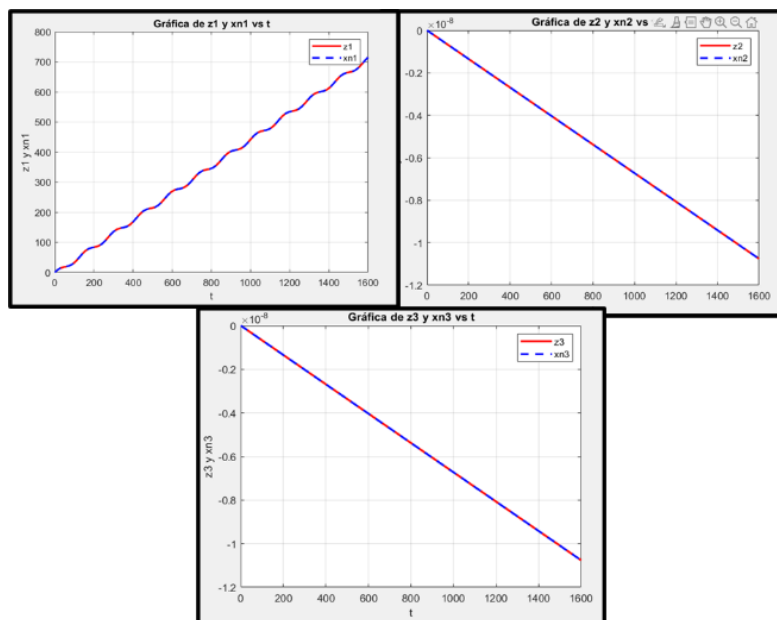
Donde K es la ganancia y aplicamos las asignaciones de polo por el teorema de Cayley- Hamilton y tenemos el diseño de nuestro controlador.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

El primer resultado que obtuvimos fue la operatividad de traslación del buque. El comportamiento que tiene lo podemos ver mediante la siguiente figura.

Figura 1

Comportamiento dinámico traslacional del buque marítimo

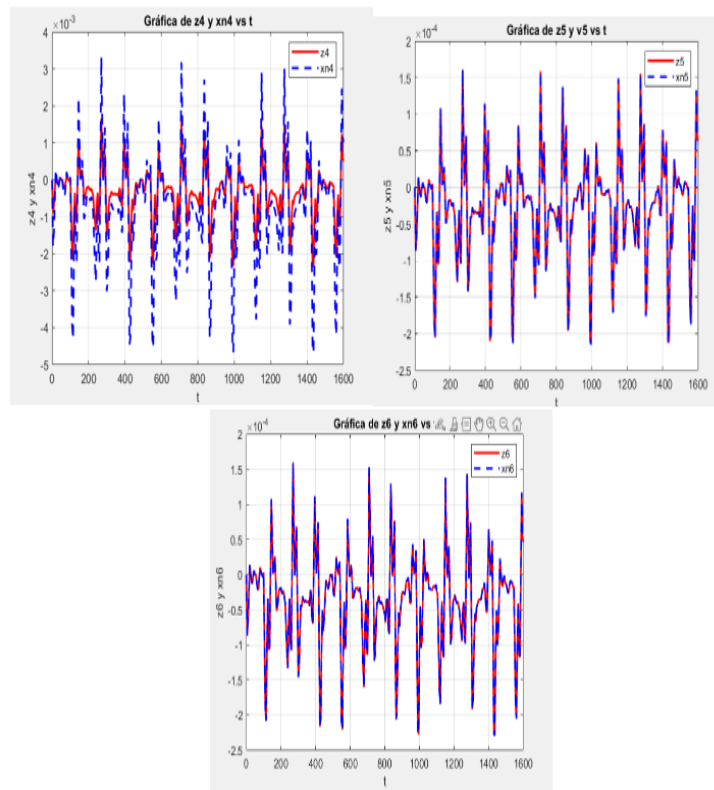


Nota. En la figura 1, se puede ver como las velocidades y el controlador se encuentran, dando muestra de la efectividad del controlador, con respecto al seguimiento.

En la figura 1, podemos ver que el controlador y las velocidades coinciden, esto implica que el controlador tiene un buen seguimiento, demostrando su gran funcionamiento óptimo en el sistema y que muestra una estabilidad bien marcada, esto permite seguridad y muestra su eficacia porque esta mantiene el curso. Ahora, analizaremos los controladores angulares con respecto a las velocidades angulares y cómo estas coinciden. Veamos la siguiente figura siguiente.

Figura 2

Comportamiento dinámico rotacional del buque marítimo



Nota. En la figura 2, se puede ver como las velocidades angulares y el controlador se encuentran, dando muestra de la efectividad del controlador, con respecto al seguimiento.

La figura 2, muestra cómo la salida del sistema coincide con el controlador, por tal motivo se puede decir que el sistema es estable. Además, su rendimiento es casi 1, lo que permite decir que su sistema es óptimo y es eficaz debido a que coinciden su trayectoria. La hipótesis dice que el diseño de un controlador adaptativo puede optimizar la eficacia y rendimiento de un buque marítimo mediante la mejora de la operativa de su sistema de control basado en la técnica de Linealización por realimentación de estado. Por lo tanto, los resultados mostrados indican que el controlador adaptativo es capaz de optimizar la eficacia y rendimiento del controlador debido a que los resultados mostrados dieron un rendimiento de 1 y una eficacia del 100%, lo que significa que el diseño de un controlador adaptativo optimiza la eficacia y rendimiento del buque marítimo.

CONCLUSIONES

El diseño del controlador adaptativo mediante linealización por realimentación de estado demostró ser una solución eficaz para la gestión dinámica del buque. Al integrar la mecánica analítica con la geometría diferencial, se logro transformar un sistema no lineal a una estructura controlable, garantizando un seguimiento de las señales de velocidad con errores mínimos.

Los resultados confirman que el uso de derivada y corchete de Lie permiten validar la contrabilidad y la observabilidad del sistema, mientras que el método de Cayley-Hamilton facilita las ganancias precisas. Esta metodología asegura la estabilidad marginal del buque antes perturbaciones externa, evitando el comportamiento caótico. En conclusión, este sistema de control optimiza el rendimiento operativo y la seguridad de la navegación ofreciendo una herramienta robusta para la modernización tecnológica de la industria naviera en Panamá

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Fossen, T. I. (2011). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. Wiley.

Goldstein, H. (1980). *Classical mechanics* (2.^a ed.). Addison-Wesley.

Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill.

Isidori, A. (1995). *Nonlinear control systems* (3.^a ed.). Springer.

Martínez Rodríguez, J. L., & Morales Rodríguez, J. (2010). *Control aplicado con variable de estado*. Editorial Paraninfo.

Melnyk, O., Onishchenko, O., & Zaporozhets, A. (Eds.). (2025). *Maritime systems, transport and logistics I: Safety and efficiency of operation* (Vol. 580). Springer.

Peña, M. E. (2011). *Control adaptable*. Academia.edu.
https://www.academia.edu/31904838/CONTROL_ADAPTABLE

Perez, T. (2006). *Ship motion control: Course keeping and roll stabilisation using rudder and fins*. Springer.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2014). *Física universitaria con física moderna* (13.^a ed.). Cengage Learning.

- Skjetne, E., Fossen, T. I., & Khargonekar, P. P. (2004). Adaptive maneuvering and control of marine vessels. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 12(3), 445–460.
- Slotine, J. J. E., & Li, W. (1991). *Applied nonlinear control*. Prentice Hall.
- Xu, H., & Guedes Soares, C. (2023). Review of path-following control systems for maritime autonomous surface ships. *Journal of Marine Science and Application*, 22, 153–171. <https://doi.org/10.1007/s11804-023-00338-6>
- Yao, Y., & Zhang, W. (2019). Energy-efficient control strategies for ship propulsion systems. *Ocean Engineering*, 182, 475–486.
- Zinchenko, S., Mateichuk, V., Nosov, P., Popovych, I., Solovey, O., Mamenko, P., & Grosheva, O. (2020). Use of simulator equipment for the development and testing of vessel control systems. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 16(2), 58–64. <https://doi.org/10.2478/ecce-2020-0009>