

Control mixto para el seguimiento de trayectoria en buques marinos

Carlos Vacca Sisterna^{a,*}, Emanuel Serrano^b, Gustavo Scaglia^b, Francisco Rossomando^a

^aCONICET, Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan, CP5400 Argentina.

^bCONICET, Instituto de Ingeniería Química, Universidad Nacional de San Juan, CP5400 Argentina.

To cite this article: Vacca Sisterna, C., Serrano, E., Scaglia, G., Rossomando, F. 2022. Mixed control for trajectory tracking in marine vessels. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 19, 27-36. <https://doi.org/10.4995/riai.2021.15027>

Resumen

Este trabajo muestra el diseño de un controlador adaptable para un buque marino; la estrategia de control que se propone es la aplicación de un controlador basado en álgebra lineal para la cinemática y una técnica de control adaptable para la parte dinámica del buque. El controlador basado en álgebra lineal (LABC) para cinemática recibe las referencias de posición deseadas y esto genera otro par de velocidad de referencia para el controlador adaptable (dinámico). El objetivo principal de la aplicación de la técnica de control adaptable se presenta en el caso de que la masa del buque varíe con su trayectoria (por ejemplo, buque pesquero, buque de reabastecimiento de combustible, etc.) donde el controlador adaptable ajusta sus parámetros mediante la ley de adaptación, que a su vez genera una acción de control que compensa las variaciones dinámicas del buque. Además, este trabajo presenta el análisis de estabilidad y la ley de ajuste adaptable basada en la teoría de Lyapunov. Los resultados de simulación muestran que el sistema puede seguir las señales de referencia con un error muy bajo aún en presencia de incertidumbre.

Palabras clave: Control adaptable, algebra lineal, seguimiento de trayectoria, buques marinos, control no lineal.

Mixed control for trajectory tracking in marine vessels

Abstract

This work proposes the design of an adaptive controller for a marine vessel; the proposed control strategy applies a controller designed on linear algebra for the kinematics and an adaptive control technique for the dynamic part of the vessel. The linear algebra based controller (LABC) for kinematics receives the desired position references and this generates another reference velocity pair for the adaptive (dynamic) controller. The main goal of the application of the adaptive control technique in this kind of enforcement is presented in the case that the mass of the vessel varies with its trajectory (e.g. fishing vessel, refueling vessel, etc.) where the adaptive controller adjusts its parameters through of adaptation law, which in turn generates a control action that compensates dynamic variations of the ship. Besides, this work presents the stability analysis and adaptive adjustment law based on the Lyapunov theory. And the simulation results that are presented prove that the control can deal with non-linearities and time-variant dynamics.

Keywords: Adaptive control, linear algebra, trajectory tracking, marine vessel, nonlinear control.

1. Introducción

En el comercio mundial, el transporte y la logística son fundamentales. En el caso de los buques marinos, para reducir

los costos de operación, éstos van aumentando de tamaño para permitir una mayor capacidad. El aumento de tamaño junto con su capacidad de carga hace que las tareas de maniobra sean un problema creciente. El control del curso del buque influye directamente en su maniobrabilidad, junto con la reducción de

costos, la seguridad de la navegación y la hora de llegada al destino (Serrano *et al.* 2018). Desde las primeras aplicaciones de las técnicas clásicas de control (PI, PID) hasta el control de aproximación y las maniobras de amarre de buques, se ha mejorado este tipo de controles para aumentar la seguridad de la tripulación y su carga, lo que a su vez significó la reducción de los tiempos de transporte con la reducción del consumo de combustible por tonelada de carga transportada.

Actualmente, existen muchas técnicas de control aplicadas a la navegación de buques, como el control adaptable basado en el modelo de referencia (Ghommam *et al.* 2010) y las variantes de control adaptable (Fossen *et al.* 2002), (Tee *et al.* 2006), (Martins *et al.* 2008) el uso de las técnicas de IA (Inteligencia Artificial) (Wondergem *et al.* 2010), (Do *et al.* 2002) Control de *Backstepping* (Liao *et al.* 2011) y métodos de álgebra lineal (Scaglia *et al.* 2010 a, b) con los que se obtuvieron diferentes tipos de resultados. El diseño de control basado en modelos linealizados también es ampliamente utilizado (Ghommam *et al.* 2010), (Scaglia *et al.* 2007).

Sin embargo, para una mejora en el enfoque del curso deseado, es necesario tener en cuenta todas las no linealidades involucradas en la dinámica de la nave. Otro trabajo (Xu *et al.* 2018) presenta el modelado, la identificación y el diseño de control para los buques marinos en el seguimiento de la trayectoria, este diseño de control considera diferentes tareas de maniobra. El diseño de control adaptable ajusta sus parámetros de acuerdo con las condiciones del entorno. Por lo tanto, para un modelo determinado, una ley de control basada en la linealización del estado de retroalimentación se puede diseñar de acuerdo con una referencia dada (Yang *et al.* 2003), hay obras basadas en el control no lineal que tienen en cuenta las no linealidades pasivas (He *et al.* 2016). Pero estas técnicas propuestas no tienen la robustez a la variación de los parámetros y los cambios de modelos, ya que estas técnicas requieren un conocimiento preciso de la dinámica del sistema con el comportamiento físico diferente. El modelo de sistema del vehículo puede ser incierto si se tiene en cuenta la variación de los diferentes parámetros dinámicos de la nave. Cuando el controlador se basa en el *Backstepping* y la síntesis de Lyapunov (Van 2019) se puede desarrollar una ley adaptativa, utilizando estas herramientas analíticas una limitación semi-global uniformemente acotada en última instancia (*SGUUB*) se puede obtener estabilidad. Basado en el control *Observer-based*, (Cui *et al.* 2017) muestra un controlador de seguimiento de trayectoria adaptable no lineal indirecto para un barco oceánico diseñado sobre un principio de liderazgo de línea de visión. Para alcanzar este objetivo, se utiliza una técnica de control indirecto adaptable diseñada en un observador de perturbaciones para la estimación y compensación de las corrientes marinas.

Cuando este observador se aplica junto como una técnica de control cuyo resultado es un seguimiento asintótico y un camino óptimo en presencia de perturbaciones marinas (corrientes oceánicas, vientos, etc.). Este método presenta una convergencia global del error transversal. El trabajo detallado se presenta en (Dai *et al.* 2019), utilizando cuatro técnicas de control diferentes (*Backstepping*, adaptable, *LI* y concepto de regulador de comando), donde se concluye que la combinación de un controlador adaptable y el concepto de comando de gobierno el rendimiento transitorio se mejora. El estudio de las

técnicas de control adaptable aplicadas a la navegación de buques con diferentes tipos de incertidumbres sigue siendo un importante tema de investigación en el campo del control. En este trabajo, se propone un esquema en cascada para hacer frente a los problemas de seguimiento de trayectoria en los buques marinos en presencia de desajustes de modelo y perturbaciones ambientales. En primer lugar, se diseña un control basado en álgebra lineal para la cinemática del buque. Se propone un algoritmo de control robusto no lineal adaptable para la dinámica. En una forma similar a la realizada por (Martins *et al.* 2008), este enfoque puede ser muy útil cuando la dinámica del buque tiene incertidumbres paramétricas. Donde en el esquema global de control se aplicó la teoría de Lyapunov para demostrar la estabilidad de las leyes de control propuestas. Para su análisis, el modelo matemático del buque se dividió en dos partes: una cinemática y una dinámica, considerando que las incertidumbres ocurren solamente en la dinámica. En una forma similar en la parte cinemática, se aplica un controlador de álgebra lineal (Scaglia *et al.* 2010 a, b), (Serrano *et al.* 2015) que se conecta en cascada con el controlador adaptable diseñado para la parte dinámica. Este trabajo demuestra la viabilidad del uso del Controlador de Álgebra Lineal en cascada con un Controlador Adaptable.

2. Descripción del modelo

Considere el modelo de barco descrito en (Serrano *et al.* 2018) y (Xu *et al.* 2018),

Modelo cinemático

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos(\psi) - v \sin(\psi) \\ \dot{y} &= u \sin(\psi) + v \cos(\psi) \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (1)$$

Modelo dinámico

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}\mathbf{v} = \mathbf{B}\boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

En (1) $\mathbf{h} = [x, y, \psi]^T$ denota el vector de posición en el marco de referencia fijo en tierra. En (2) $\mathbf{v} = [u, v, r]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ denota el vector de velocidad en el marco de referencia fijado al cuerpo, \mathbf{M} , $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ y \mathbf{D} son la inercia de buques, centrífugas y Coriolis y las matrices de amortiguación hidrodinámica, respectivamente; $\boldsymbol{\tau} = [\mathbf{T}_u, \mathbf{T}_r]^T$ es el vector de entrada de control, donde \mathbf{T}_u y \mathbf{T}_r son el control de sobretensión y guiñada respectivamente. Se supone que la matriz de masa e inercia es simétrica y positivamente definida es por el hecho de que la mayoría de los buques de superficie marina son simétricos a estribor. En particular, la estructura de las matrices \mathbf{M} y \mathbf{D} se asumen como (véase (Yang *et al.* 2003)):

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &\triangleq \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \\ \mathbf{D} &\triangleq \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

En (3) se observa la matriz de inercia \mathbf{M} y la matriz de Coriolis \mathbf{D} , en (4) se muestra la matriz Centrípeta $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ según lo expuesto por (Serrano *et al.* 2018) y (Yang *et al.* 2003)). En (4) también se muestra la matriz del actuador \mathbf{B} .

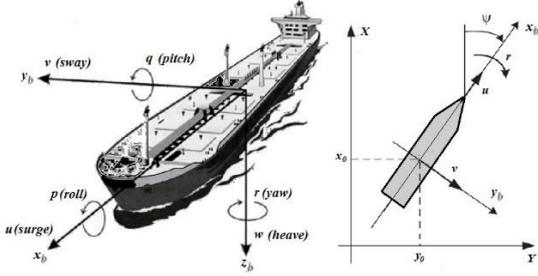


Figura 1: Marco de coordenadas fijos del cuerpo B y marco de coordenadas global U

$$C(\mathbf{v}) \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v - m_{23}r \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v + m_{23}r & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix} = \mathbf{M}^T; \quad (4)$$

$$\mathbf{B} \triangleq \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{32} \end{bmatrix}$$

Por último, después de operaciones simples, el modelo dinámico del modelo de nave se puede reorganizar como,

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \frac{m_{22}}{m_{11}}vr + \frac{m_{23}}{m_{11}}r^2 - \frac{d_{11}}{m_{11}}u + \frac{b_{11}}{m_{11}}T_u \\ \dot{r} &= \kappa \left((m_{11} - m_{22})vu + \left(\frac{m_{11}m_{23}}{m_{22}} - m_{23} \right)ru + \dots \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{d_{22}m_{23}}{m_{22}} - d_{32} \right)v + \left(\frac{d_{23}m_{23}}{m_{22}} - d_{33} \right)r + b_{32}T_r \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Dónde:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{m_{22}}{m_{11}}vr + \frac{m_{23}}{m_{11}}r^2 - \frac{d_{11}}{m_{11}}u \\ f_2 &= (m_{11} - m_{22})vu + \left(\frac{m_{11}m_{23}}{m_{22}} - m_{23} \right)ru + \dots \\ &\quad + \left(\frac{d_{22}m_{23}}{m_{22}} - d_{32} \right)v + \left(\frac{d_{23}m_{23}}{m_{22}} - d_{33} \right)r \\ \kappa &= \frac{m_{22}}{m_{22}m_{33} - m_{23}^2} \end{aligned} \quad (6)$$

3. Controlador Cinemático basado en Álgebra Lineal (LABC)

Para el desarrollo de un controlador de cinemática basado en el control inverso, primero el error de trayectoria \tilde{x}, \tilde{y} se definen en (7). Dónde x_{ref}, y_{ref} son las coordenadas de la posición de referencia. El propósito de la ley de control obtenida por la técnica de álgebra lineal es seguir la trayectoria deseada propuesta por el diseñador. Ahora definiendo el vector de error de salida $\tilde{\mathbf{h}}$ como:

$$\tilde{\mathbf{h}} = [\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{\psi}]^T = [x - x_{ref}, y - y_{ref}, \psi - \psi_{ref}]^T \quad (7)$$

y expresando las dos primeras líneas de (1) como:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{h}} &= \begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{\tilde{y}} \\ \dot{\tilde{\psi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} = \dots \\ &= \mathbf{H} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

A partir de (7) el control cinemático propuesto puede representarse como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} + v\sin(\psi) \\ \dot{\tilde{y}} - v\cos(\psi) \\ \dot{\tilde{\psi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ r \end{bmatrix} \quad (9)$$

O

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} + v\sin(\psi) \\ \dot{\tilde{y}} - v\cos(\psi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) \\ \sin(\psi) \end{bmatrix} u \quad (10)$$

A partir de (9), la ley de control se define como:

$$\begin{bmatrix} \cos(\psi) \\ \sin(\psi) \end{bmatrix} u = \begin{bmatrix} \dot{x}_{ref} + l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} \tilde{x}\right) + v\sin(\psi) \\ \dot{y}_{ref} + l_y \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} \tilde{y}\right) - v\cos(\psi) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Donde l_x, l_y , y k_x, k_y son ganancias de la saturación $\tanh(\cdot)$. Es fácil probar que

$$tg(\psi_{ref}) = \frac{\dot{y}_{ref} + l_y \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} \tilde{y}\right) - v\cos(\psi)}{\dot{x}_{ref} + l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} \tilde{x}\right) + v\sin(\psi)} \quad (12)$$

Entonces

$$\begin{aligned} u_{ref} &= \left(\dot{y}_{ref} + l_y \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} \tilde{y}\right) - v\cos(\psi) \right) \sin(\psi_{ref}) + \dots \\ &\quad + \left(\dot{x}_{ref} + l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} \tilde{x}\right) + v\sin(\psi) \right) \cos(\psi_{ref}) \end{aligned} \quad (13)$$

Y

$$r_{ref} = \left(\dot{\tilde{\psi}}_{ref} + l_\psi \tanh\left(\frac{k_\psi}{l_\psi} \tilde{\psi}\right) \right) \quad (14)$$

Haciendo la aproximación de $\cos(\psi)$ por serie Taylor

$$\begin{aligned} \cos(\psi) &= \cos(\psi_{ref}) - \sin(\psi_{ref} + \lambda(\psi - \psi_{ref}))(\psi - \psi_{ref}) \\ &= \cos(\psi_{ref}) - \sin(\psi_\lambda)\tilde{\psi} \end{aligned} \quad (15)$$

Dónde $\psi_\lambda = \psi_{ref} + \lambda(\psi - \psi_{ref})$ y $0 < \lambda < 1$, tomando x desde la (8) y sustituyendo en (15),

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= u\cos(\psi) - v\sin(\psi) = \dots \\ u(\cos(\psi_{ref}) - \sin(\psi_\lambda)\tilde{\psi}) - v\sin(\psi) &= \dots \\ &= u\cos(\psi_{ref}) - u\sin(\psi_\lambda)\tilde{\psi} - v\sin(\psi) \end{aligned} \quad (16)$$

Desde (13) y recordando $\Delta y = \dot{y}_{ref} + l_y \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} \tilde{y}\right) - v \cos(\psi)$ y $\Delta x = \dot{x}_{ref} + l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} \tilde{x}\right) + v \sin(\psi)$ y multiplicando por $\cos(\psi_{ref})$ conduce a:

$$u_{ref} \cos(\psi_{ref}) = \Delta y \sin(\psi_{ref}) \cos(\psi_{ref}) + \dots + \Delta x \left(\cos(\psi_{ref}) \right)^2 \quad (17)$$

Teniendo en cuenta (12) y reorganizando

$$\Delta y \left(\sin(\psi_{ref}) \right) = \Delta x \left(\cos(\psi_{ref}) \right) \quad (18)$$

Haciendo $\Delta y = \Delta y \left(\sin(\psi_{ref}) \right) / \left(\sin(\psi_{ref}) \right)$ y sustitución en (17)

$$u_{ref} \cos(\psi_{ref}) = \Delta x \left(\sin(\psi_{ref}) \right)^2 + \Delta x \left(\cos(\psi_{ref}) \right)^2 = \Delta x \quad (19)$$

Con (19) y reorganizando (16), se obtiene:

$$\dot{x} = \Delta x + u \sin(\psi_\lambda) \tilde{\psi} - v \sin(\psi) \quad (20)$$

Reemplazar Δx en (20)

$$\dot{x} = \dot{x}_{ref} + l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} \tilde{x}\right) + u \sin(\psi_\lambda) \tilde{\psi} \quad (21)$$

O

$$\dot{\tilde{x}} + l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} \tilde{x}\right) + u \sin(\psi_\lambda) \tilde{\psi} = 0 \quad (22)$$

Del mismo modo, se analiza la variable y:

$$\dot{\tilde{y}} + l_y \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} \tilde{y}\right) + u \cos(\psi_\rho) \tilde{\psi} \text{ being } 0 < \rho < 1 \quad (23)$$

Y para ψ

$$\dot{\tilde{\psi}} = -l_\psi \tanh\left(\frac{k_\psi}{l_\psi} \tilde{\psi}\right) \quad (24)$$

Considerando la teoría de Lyapunov para probar la estabilidad de ψ , la función candidata Lyapunov (CLF) es.

$$V_\psi = \frac{1}{2} (\tilde{\psi})^2 \quad (25)$$

Derivación (25) y sustitución (24).

$$\dot{V}_\psi = \tilde{\psi} \dot{\tilde{\psi}} = -\tilde{\psi} l_\psi \tanh\left(\frac{k_\psi}{l_\psi} \tilde{\psi}\right) \quad (26)$$

Para valores pequeños, de $l_\psi \tanh\left(\frac{k_\psi}{l_\psi} \tilde{\psi}\right) \cong k_\psi \tilde{\psi}$. Entonces

$$\dot{V}_\psi = -k_\psi (\tilde{\psi})^2 \leq 0 \quad (27)$$

Este resultado denota que $\tilde{\psi} \rightarrow 0$ cuando $t \rightarrow \infty$. Ahora analizando \tilde{x} e \tilde{y} , el CLF es

$$V_{xy} = \frac{1}{2} [(\tilde{x})^2 + (\tilde{y})^2] \quad (28)$$

Derivación (28) y sustitución $\dot{\tilde{x}}$ e $\dot{\tilde{y}}$.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{xy} = \tilde{x} \dot{\tilde{x}} + \tilde{y} \dot{\tilde{y}} = & -\tilde{x} \left(l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} \tilde{x}\right) + u \sin(\psi_\lambda) \tilde{\psi} \right) - \dots \\ & - \tilde{y} \left(l_y \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} \tilde{y}\right) + u \cos(\psi_\rho) \tilde{\psi} \right) = -\tilde{x} l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} \tilde{x}\right) - \dots \\ & - \tilde{x} u \sin(\psi_\lambda) \tilde{\psi} - \tilde{y} l_y \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} \tilde{y}\right) - \tilde{y} u \cos(\psi_\rho) \tilde{\psi} \end{aligned} \quad (29)$$

Considerando los términos $|\tilde{x} u \sin(\psi_\lambda) \tilde{\psi}| \leq k_\lambda \tilde{x} \tilde{\psi}$ y $|\tilde{y} u \cos(\psi_\rho) \tilde{\psi}| \leq k_\rho \tilde{y} \tilde{\psi}$, siendo k_ρ y k_λ constantes acotadas, debido a $u \leq u_{max}$ y $v \leq v_{max}$ son señales acotadas.

Reescribiendo (29) para pequeños errores $l_x \left(\frac{k_x}{l_x} \tilde{x}\right) \cong k_x \tilde{x}$ y $l_y \left(\frac{k_y}{l_y} \tilde{y}\right) \cong k_y \tilde{y}$. Y aplicando la norma

$$\dot{V}_{xy} \leq -k_x |\tilde{x}|^2 + k_\lambda |\tilde{x}| |\tilde{\psi}| - k_y |\tilde{y}|^2 + k_\rho |\tilde{y}| |\tilde{\psi}| \quad (30)$$

Reorganización (30)

$$\dot{V}_{xy} \leq |\tilde{x}| (-k_x |\tilde{x}| + k_\lambda |\tilde{\psi}|) + |\tilde{y}| (-k_y |\tilde{y}| + k_\rho |\tilde{\psi}|) \leq 0 \quad (31)$$

Para garantizar la convergencia

$$\begin{cases} |\tilde{x}| \geq \frac{k_\lambda |\tilde{\psi}|}{k_x} \\ |\tilde{y}| \geq \frac{k_\rho |\tilde{\psi}|}{k_y} \end{cases} \quad (32)$$

Este resultado denota que $\tilde{x} \rightarrow 0$ y $\tilde{y} \rightarrow 0$ cuando $t \rightarrow \infty$. Pero este resultado considera que no hay dinámica y hay un seguimiento de velocidad perfecto. Esta suposición se analizará en la sección "Análisis de Estabilidad y Reglas de Ajuste" cuando se debe considerar todo el análisis de estabilidad.

4. Controlador Adaptable

En esta sección, se diseña un controlador dinámico adaptable. El principal problema es la existencia de variaciones dinámicas en nuestro problema de control. Para sistemas con dinámica no lineal, el control adaptable es una solución interesante. En un buque marino, muchos parámetros dinámicos pueden variar por diferentes razones. Por ejemplo, aumentar la carga en buques mercantes o pesqueros o reducir la carga en un reabastecimiento de combustible para buques cisterna.

Este controlador propuesto está vinculado en cascada con el control cinemático propuesto, el método de control adaptable recibe de la ley de control cinemático (sección anterior) las señales de salida (velocidades lineales y angulares) que se introducen en el control adaptable como señales de referencia. Esta ley de control adaptable debe producir otro par de velocidad (lineal u_{ref} y angular r_{ref}) que se transferirá a la dinámica del buque como acciones de control, como se muestra en la Figura 1. El diseño de la ley de control adaptable se basa en la dinámica de los buques marinos. Y es necesario expresar esta dinámica sobre la forma parametrizada. Ahora, a partir de (5) computación T_u y T_r en función de v, u, r, \dot{u} y \dot{r} conduce a:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} T_u \\ T_r \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\varphi_4 vr - \varphi_3 r^2 + \varphi_2 u + \varphi_1 \dot{u} \\ -\varphi_5 vu - \varphi_6 ru - \varphi_7 v - \varphi_8 r + \varphi_9 \dot{r} \end{bmatrix} = \dots \\ &= \begin{bmatrix} \dot{u} & u & -r^2 & -vr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -vu & -ru & -v & -r & \dot{r} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_9 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (33)$$

Y determinar los parámetros de la (33) como:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{m_{22}}{b_{11}} & \varphi_2 &= \frac{m_{23}}{b_{11}} \\ \varphi_3 &= \frac{d_{11}}{b_{11}} & \varphi_4 &= \frac{m_{11}}{b_{11}} \\ \varphi_5 &= \frac{(m_{11} - m_{22})m_{22}}{b_{32}(m_{22}m_{33} - m_{23}^2)} & \varphi_6 &= \frac{(m_{11}m_{23} - m_{23}m_{22})}{b_{32}(m_{22}m_{33} - m_{23}^2)} \\ \varphi_7 &= \frac{(d_{22}m_{23} - d_{23}m_{22})}{b_{32}(m_{22}m_{33} - m_{23}^2)} & \varphi_8 &= \frac{(d_{22}m_{23} - d_{33}m_{22})}{b_{32}(m_{22}m_{33} - m_{23}^2)} \\ & & \varphi_9 &= \frac{(m_{22}m_{33} - m_{23}^2)}{b_{32}m_{22}} \end{aligned}$$

Empleando (33) puede modificarse como

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} T_u \\ T_r \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \varphi_1 & 0 \\ 0 & \varphi_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \dots \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & u & -r^2 & -vr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -vu & -ru & -v & -r & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \vdots \\ \varphi_8 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (34)$$

Expresar (34) en forma compacta

$$\mathbf{T} = \mathbf{K}\mathbf{v} + \mathbf{\Omega}(u, v, r)\mathbf{\Phi} \quad (35)$$

Donde $\mathbf{v} = [\dot{u} \ \dot{r}]^T$, $\mathbf{K} = \text{diag}(\varphi_1, \varphi_9)$, $\mathbf{\Phi} = [\varphi_2 \ \varphi_3 \ \varphi_4 \ \varphi_5 \ \varphi_6 \ \varphi_7 \ \varphi_8 \ \varphi_9]^T$ y la expresión para $\mathbf{\Omega}(u, v, r)$ como:

$$\mathbf{\Omega}(u, v, r) = \begin{bmatrix} 0 & u & -r^2 & -vr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -vu & -ru & -v & -r & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Ahora definiendo el siguiente vector

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_u \\ \sigma_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{u}_{ref} + k_u e_u \\ \dot{r}_{ref} + k_r e_r \end{bmatrix} \quad (37)$$

Donde $e_u = u_{ref} - u$ y $e_r = r_{ref} - r$ son los errores de velocidad, utilizando estas variables, se puede definir la ley de control como:

$$\mathbf{T}_{ref} = \mathbf{K}\boldsymbol{\sigma} + \mathbf{\Omega}\mathbf{\Phi} \quad (38)$$

Reescribiendo la (38) como:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{ref} &= \mathbf{Y}(\boldsymbol{\sigma}_u, \boldsymbol{\sigma}_r, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{r})\mathbf{\Phi} = \dots \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_u & u & -r^2 & -vr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -vu & -ru & -v & -r & \sigma_r & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_9 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (39)$$

Ahora teniendo en cuenta las incertidumbres de los parámetros, la (39) se puede describir como:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{ref} &= \mathbf{Y}\hat{\mathbf{\Phi}} = \mathbf{Y}(\mathbf{\Phi} + \tilde{\mathbf{\Phi}}) = \mathbf{Y}\mathbf{\Phi} + \mathbf{Y}\tilde{\mathbf{\Phi}} = \dots \\ &= (\mathbf{K}\boldsymbol{\sigma} + \mathbf{\Omega}\mathbf{\Phi}) + \mathbf{Y}\tilde{\mathbf{\Phi}} \end{aligned} \quad (40)$$

Donde $\tilde{\mathbf{\Phi}} = (\hat{\mathbf{\Phi}} - \mathbf{\Phi})$ es el vector de error de parámetros, empleando (38) y (35) sabemos que

$$\mathbf{K}\mathbf{v} + \mathbf{\Omega}\mathbf{\Phi} = (\mathbf{K}\boldsymbol{\sigma} + \mathbf{\Omega}\mathbf{\Phi}) + \mathbf{Y}\tilde{\mathbf{\Phi}} \quad (41)$$

Reorganizando (41), puede formularse como

$$\mathbf{K}(\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{v}) = -\mathbf{Y}\tilde{\mathbf{\Phi}} \quad (42)$$

Teniendo en cuenta que

$$\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \dot{u}_{ref} + k_u e_u \\ \dot{r}_{ref} + k_r e_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_c \mathbf{e} \quad (43)$$

Donde $\mathbf{K}_c = \text{diag}(k_u, k_r)$, y reemplazando (43) en (42) y la computación del error de control, produce

$$\dot{\mathbf{e}} = -\mathbf{K}_c \mathbf{e} - \mathbf{K}^{-1}\mathbf{Y}\tilde{\mathbf{\Phi}} \quad (44)$$

5. Análisis de estabilidad y determinación de las reglas de ajuste

Para adquirir la capacidad adaptable del controlador es necesario encontrar las reglas de ajuste, en primer lugar, es necesario establecer los requisitos de convergencia del método de control propuesto. Para obtener estos requisitos es necesario aplicar el criterio Lyapunov para conocer las condiciones de convergencia del control adaptable para la pieza dinámica. Ahora definiendo una función positiva de Lyapunov (CLF) como:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \left(\mathbf{e}^T \mathbf{e} + \frac{\tilde{\mathbf{\Phi}}^T \tilde{\mathbf{\Phi}}}{\gamma} \right) \quad (45)$$

Derivando (45) con respecto al tiempo, obtenemos:

$$\frac{d\mathcal{L}}{dt} = \dot{\mathbf{e}}^T \mathbf{e} + \frac{\tilde{\mathbf{\Phi}}^T \dot{\tilde{\mathbf{\Phi}}}}{\gamma} \quad (46)$$

Sustitución de la ecuación diferencial del error de control (44) en (46)

$$\frac{d\mathcal{L}}{dt} = -\mathbf{e}^T(\mathbf{K}_c)^T \mathbf{e} - \tilde{\Phi}^T \mathbf{Y}^T (\mathbf{K}^{-1})^T \mathbf{e} + \frac{\tilde{\Phi}^T \dot{\tilde{\Phi}}}{\gamma} \quad (47)$$

Donde \mathbf{K}_c y \mathbf{K} son matrices diagonales, por lo tanto $\mathbf{K}_c = (\mathbf{K}_c)^T$ y $\mathbf{K}^{-1} = (\mathbf{K}^{-1})^T$ respectivamente, entonces la (47) puede expresarse como:

$$\frac{d\mathcal{L}}{dt} = -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_c \mathbf{e} - \tilde{\Phi}^T \mathbf{Y}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{e} + \frac{\tilde{\Phi}^T \dot{\tilde{\Phi}}}{\gamma} \quad (48)$$

Tomando $\tilde{\Phi}^T$ como factor común en (48)

$$\frac{d\mathcal{L}}{dt} = -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_c \mathbf{e} - \tilde{\Phi}^T \left(\mathbf{Y}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{e} - \frac{\dot{\tilde{\Phi}}}{\gamma} \right) \quad (49)$$

Si igualamos a cero la expresión entre paréntesis, queda

$$\tilde{\Phi} = \gamma \mathbf{Y}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{e} \quad (50)$$

Definiendo la (50) como ley adaptativa, entonces la (49) se expresa como:

$$\frac{d\mathcal{L}}{dt} = -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_c \mathbf{e} \leq 0 \quad (51)$$

Este resultado verifica la estabilidad de la ley de control propuesta, esto sugiere que \mathbf{e} y $\tilde{\Phi}$ están limitados. Integrando (51) obtenemos:

$$\mathcal{L}(t) - \mathcal{L}(0) = - \int_0^t \mathbf{e}^T \mathbf{K}_c \mathbf{e} dt \quad (52)$$

O no considerando $\mathcal{L}(t)$ se verifica la siguiente condición:

$$\mathcal{L}(0) \geq \int_0^t \mathbf{e}^T \mathbf{K}_c \mathbf{e} dt \quad (53)$$

Como la matriz \mathbf{K}_c es simétrica y definida positiva.

$$\lambda_{\min}(\mathbf{K}_c) \|\mathbf{e}\|^2 \leq \mathbf{e}^T \mathbf{K}_c \mathbf{e} \leq \lambda_{\max}(\mathbf{K}_c) \|\mathbf{e}\|^2 \quad (54)$$

De (53) y (54) se obtiene

$$\int_0^t \|\mathbf{e}\|^2 dt \leq \frac{\mathcal{L}(0)}{\lambda_{\min}(\mathbf{K}_c)} \quad \forall t \quad (55)$$

Esta condición sugiere que \mathbf{e} es una señal integrable. Además $\dot{\mathbf{e}}$ está limitado, como aparece en $\dot{\mathbf{e}} = -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_c \mathbf{e} - \mathbf{K}^{-1} \mathbf{Y} \tilde{\Phi}$, como se puede ver \mathbf{e} , $\tilde{\Phi}$ y \mathbf{Y} también están limitados \mathbf{e} , $\tilde{\Phi}$ y \mathbf{Y} . Ahora, si no se considera un seguimiento de velocidad perfecto (ver Sección Controlador de Cinemática), la (9) se puede escribir como,

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} + v \sin(\psi) \\ \dot{\tilde{y}} - v \cos(\psi) \\ \dot{\tilde{\psi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_u \\ e_r \end{bmatrix} \quad (56)$$

Entonces

$$\begin{bmatrix} -\dot{\tilde{x}} - l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} \tilde{x}\right) \\ -\dot{\tilde{y}} - l_y \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} \tilde{y}\right) \\ -\dot{\tilde{\psi}} - l_\psi \tanh\left(\frac{k_\psi}{l_\psi} \tilde{\psi}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_u \\ e_r \end{bmatrix} \quad (57)$$

Siendo $\tilde{\mathbf{h}} = [\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{\psi}]^T$ y considerando el candidato a la función Lyapunov como:

$$V = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{h}}^T \tilde{\mathbf{h}} \quad (58)$$

Derivación (58) y sustitución (57)

$$\begin{aligned} \dot{V} = \tilde{\mathbf{h}}^T \dot{\tilde{\mathbf{h}}} = & -\tilde{x} \left(l_x \tanh\left(\frac{k_x}{l_x} \tilde{x}\right) + e_u \cos(\psi) \right) - \dots \\ & -\tilde{y} \left(l_y \tanh\left(\frac{k_y}{l_y} \tilde{y}\right) + e_u \sin(\psi) \right) - \dots \\ & -\tilde{\psi} \left(l_\psi \tanh\left(\frac{k_\psi}{l_\psi} \tilde{\psi}\right) + e_r \right) \end{aligned} \quad (59)$$

Para valores pequeños de $\tilde{\mathbf{h}}$

$$\begin{aligned} \dot{V} = \tilde{\mathbf{h}}^T \dot{\tilde{\mathbf{h}}} = & -k_x \tilde{x}^2 - (\tilde{x} e_u \cos(\psi)) - k_y \tilde{y}^2 - \dots \\ & -(\tilde{y} e_u \sin(\psi)) - k_\psi \tilde{\psi}^2 - \tilde{\psi} e_r \leq 0 \end{aligned} \quad (60)$$

Analizando cada variable y teniendo en cuenta que $|\cos(\psi)| \leq 1$ y $|\sin(\psi)| \leq 1$

$$-k_x (\tilde{x})^2 - \tilde{x} e_u \leq 0 \quad (61)$$

Reorganización (61)

$$-\tilde{x} (k_x \tilde{x} + e_u) \leq 0 \quad (62)$$

La condición para garantizar la convergencia es

$$\tilde{x} \geq \frac{e_u}{k_x} \quad (63)$$

Haciendo el mismo análisis para las otras variables.

$$\begin{cases} \tilde{y} \geq \frac{e_u}{k_y} \\ \tilde{\psi} \geq \frac{e_r}{k_\psi} \end{cases} \quad (64)$$

Esto implica que $\dot{V} \rightarrow 0$, lo que asegura que $\|\tilde{\mathbf{h}}\|$ está limitado. Además, el resultado obtenido permite afirmar que el error de posición está limitado en última instancia dependiendo del error de aproximación del controlador

adaptable dinámico. La Figura 2 presenta la estructura de control de la nave.

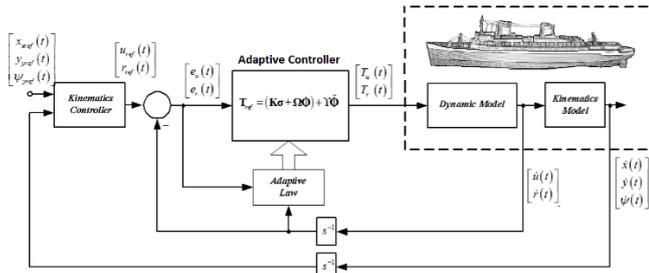


Figura 2: Muestra la estructura de control propuesta del buque marino

6. Análisis de Robustez

A partir de la (50), es fácil ver que usando el método propuesto, la matriz \mathbf{K} no necesita conocerse exactamente para obtener la estabilidad del método de control. Por lo tanto, la ley de actualización obtenida (50) necesita un conocimiento previo de la matriz \mathbf{K} , por lo que la robustez de la ley actualizada debe analizarse en el caso de que \mathbf{K} sea parcialmente conocida o desconocida. Esta incertidumbre de matriz \mathbf{K} se produce por variaciones dinámicas de la embarcación, debido a variaciones de masa en la trayectoria o condiciones climáticas, etc. Si \mathbf{K}^{-1} es desconocido y puede ser representado por un valor nominal más un valor variable que denota su variación, $\mathbf{K}^{-1} = \mathbf{K}_0^{-1}(\mathbf{I} + \Delta)$. Teniendo en cuenta que $\|\Delta\|$ está limitada, entonces la nueva condición de estabilidad de (49) se analiza de nuevo y se denota por:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathcal{L}}{dt} &= -(\mathbf{e}^T \mathbf{K}_c \mathbf{e}) - \tilde{\Phi}^T \mathbf{Y}^T \mathbf{K}_0^{-1} (\mathbf{I} + \Delta) \mathbf{e} + \frac{\tilde{\Phi}^T \dot{\tilde{\Phi}}}{\gamma} = \dots \\ &= -(\mathbf{e}^T \mathbf{K}_c \mathbf{e}) - \tilde{\Phi}^T \left(\mathbf{Y}^T \mathbf{K}_0^{-1} (\mathbf{I} + \Delta) \mathbf{e} - \frac{\dot{\tilde{\Phi}}}{\gamma} \right) \end{aligned} \quad (65)$$

Reescribir la ley actualizada utilizando \mathbf{K}_0^{-1}

$$\dot{\tilde{\Phi}} = -\gamma \mathbf{Y}^T \mathbf{K}_0^{-1} (\mathbf{I} + \Delta) \mathbf{e} \quad (66)$$

Entonces (50) se puede reescribir como:

$$\frac{d\mathcal{L}}{dt} = -(\mathbf{e}^T \mathbf{K}_c \mathbf{e}) \quad (67)$$

Este resultado indica que cualquier variación de parámetros en la ley actualizada no afecta a la estabilidad del control propuesto.

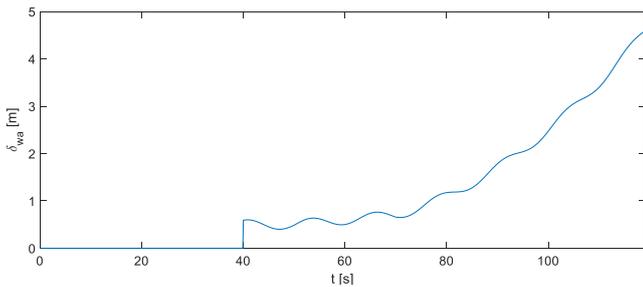


Figura 3: Perturbación de las ondas frente al tiempo introducido en las simulaciones

7. Resultados de la simulación y discusión

En esta sección, se presentan simulaciones numéricas teniendo en cuenta las ondas y las perturbaciones del viento para sondear el rendimiento del sistema de control adaptable. Con esto se proponen tres simulaciones realizadas utilizando un simulador desarrollado en la plataforma MATLAB, que considera un modelo preciso del buque. El modelo dinámico implementado para la simulación en (3) se utiliza con los mismos valores de parámetros que los de (Serrano *et al.* 2018), (Dai *et al.* 2019)

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} 25.8 & 0 & 0 \\ 0 & 33.8 & -11.748 \\ 0 & -11.748 & 6.813 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & -2.5425 \\ 0 & -2.5425 & 1.422 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (68)$$

El controlador diseñado en este trabajo se denomina C1, también se implementaron los controladores propuestos en (Serrano *et al.* 2018) y (Ghommam *et al.* 2010) los cuales se denominan C2 y C3 respectivamente. Para cuantificar el rendimiento de cada controlador, se calcula la integral del error absoluto (IAE) para todos los controladores:

$$IAE = \int_0^{t_{sim}} \sqrt{e_x^2(t) + e_y^2(t)} dt; \quad (69)$$

Los parámetros del controlador utilizados en las simulaciones se eligen mediante varias pruebas para que el barco pueda alcanzar y seguir una trayectoria predefinida sin oscilaciones no deseadas: $k_x = 0.9$, $k_y = 0.9$ y $k = 0.8$.

7.1. Simulación teniendo en cuenta las perturbaciones de las ondas

En primer lugar, las perturbaciones polinómicas en las variables x e y se introducen en el modelo continuo como se puede ver en (70) que representan el efecto de ondas. La variación de tiempo de δ_{wa} es dada por la Figura 3. Las incertidumbres con una forma similar ya han sido utilizadas por otros autores en la literatura (Yu *et al.* 2018), (Ghommam *et al.* 2010). En este trabajo, se añadió una dificultad adicional asumiendo altos valores de incertidumbre y que comienzan a actuar abruptamente en el momento $t = 40s$.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos(\psi) - v \sin(\psi) + \delta_{wa} \\ \dot{y} &= u \sin(\psi) + v \cos(\psi) + \delta_{wa} \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (70)$$

La trayectoria de referencia se establece en tres círculos. Los cuales poseen diferentes radios y están unidos por una sección de circunferencia, donde se muestra en la Figura 4(a). La trayectoria interna posee un radio de $r = 3m$, la del medio $r = 4m$ y la última $r = 5m$. La posición inicial de la nave está en: $(x(0); y(0)) = (0m; 0m)$ y la trayectoria comienza en la posición: $(x(0); y(0)) = (1m; 0m)$.

Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 3(a). Donde se visualiza que todos los controladores alcanzan y siguen la trayectoria deseada sin oscilaciones no

deseadas. Sin embargo, el mejor rendimiento es obtenido por C1 (controlador propuesto en este documento) como se muestra en

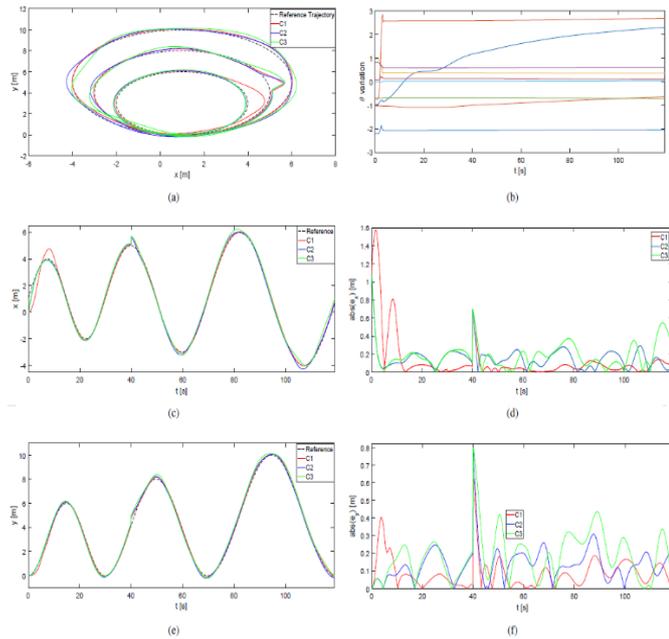


Figura 4: Resultados de la simulación teniendo en cuenta la perturbación de la onda: a)- Trayectoria del recipiente marino teniendo en cuenta el efecto de las ondas b)- Evolución temporal de los parámetros adaptables c)- Señal de referencia y evolución de la posición del buque en x. d)- Evolución del error en la variable x. e)- Señal de referencia y evolución de la posición del buque en y. f)- Evolución del error en la variable y.

Figuras 4 c) y 4 e). Las Figuras 4(d) y 4(f) muestran las gráficas del error de seguimiento en la coordenada x y la coordenada y. Como se puede ver, para todos los reguladores los errores se delimitan, pero con el enfoque adaptable (C1) son menores que con los otros reguladores. La evolución temporal de los parámetros estimados se muestra en la Figura 4(b), como se puede ver, todos los parámetros dinámicos convergen sin desviarse.

Las Figuras 4(d) y 4(f) muestran los errores de distancia para las simulaciones usando los reguladores C1, C2 y C3. En ambas Figuras (4(d) y 4(f)), muestra el error de control inicial alto (C1), que se debe a que los parámetros de control adaptable no se ajustan y que el punto inicial está tan lejos de la trayectoria de referencia. En esta prueba, el error de seguimiento de trayectoria de C1 alcanza un valor menor, si se compara con el caso C2 y C3, en el que los parámetros son inamovibles. Además, se puede ver en las Figuras. 4(d) y 4(f), que la técnica combinada presenta una mejor atenuación de perturbación que C2 y C3.

7.2. Simulación en presencia de olas y perturbaciones del viento

En esta sección, se evalúa el desempeño del sistema añadiendo una nueva perturbación. Aquí, las olas (δ_{wa}) y las perturbaciones del viento (δ_{wi}) se introducen en el modelo del sistema para evaluar los resultados teóricos obtenidos en la sección anterior. La perturbación debido a las olas

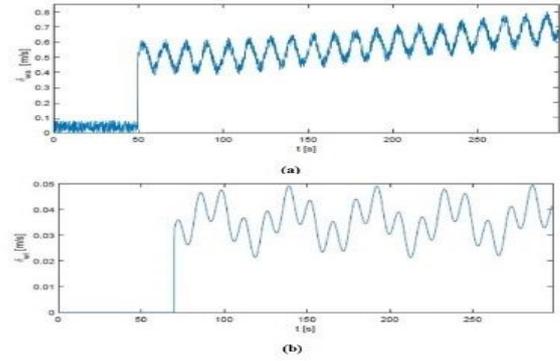


Figura 5: Disturbio introducido en el modelo del sistema: a)- perturbación de las olas; b)- perturbación del viento

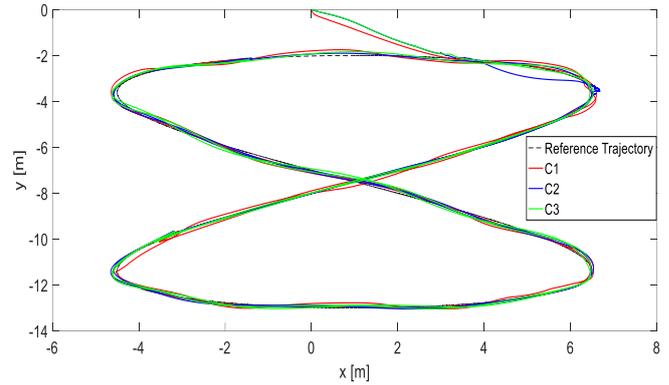


Figura 6: Resultados de la simulación teniendo en cuenta las olas y el efecto del viento

se muestra en la Figura (5(a)), en donde se ha considerado también el agregado de ruido. El efecto del viento se puede representar introduciendo una perturbación en las velocidades lineales y transversales (Fossen *et al.* 2002).

Por lo tanto, la perturbación δ_{wi} se ha mostrado en la Figura 5(b) se añade a las variables u y v (véase la Ecuación (5)). La prueba se realiza con una trayectoria de ocho formas como trayectoria de referencia. La posición inicial de la nave es en: $(x(0); y(0)) (0m; 0m)$ y la trayectoria comienza en la posición: $(x(0); y(0)) (1m; 2m)$.

Los resultados de las simulaciones se muestran en las Figuras. 6. La Figura 6 muestra la posición de la nave para todos los controladores y la trayectoria de referencia. Las Figuras 7(a) y 7(c) muestran que todo el controlador alcanza y sigue la trayectoria deseada. En las Figuras 7(b) y 7(d) muestra los errores de seguimiento en x -coordenada y y -coordenada, como puede observarse, el error de seguimiento obtenido por C1 (controlador adaptable) es significativamente menor que el obtenido con C2 y C3.

7.3. Simulación teniendo en cuenta los errores de modelado

Por último, se lleva a cabo una simulación teniendo en cuenta los errores de modelado y la perturbación en las acciones de control. En esta prueba, se combina un modelo de variación paramétrica que representa una pérdida de masa con las perturbaciones de las olas (δ_{wa}) y del viento (δ_{wi}) para probar el rendimiento del sistema de control propuesto. Las

perturbaciones de las olas y los vientos se incorporan de la misma manera que en la tarea presentada en la sección anterior, véase las figuras 5(a) y 5(b)). En la práctica, las pérdidas de masa pueden ser dadas por el consumo de combustible o la descarga de contenedores. Por lo tanto, los parámetros de la matriz M utilizados para el cálculo de la ley de control se están reduciendo un 15% como:

$$M = \begin{bmatrix} 21.92 & 0 & 0 \\ 0 & 28.73 & -9.9858 \\ 0 & -9.9858 & 5.791 \end{bmatrix}; \quad (71)$$

Una trayectoria cuadrada se adopta como señal de referencia. Esta forma en particular puede ser muy útil para simular escenarios donde el barco debe realizar una tarea de evitación de obstáculos y su orientación debe cambiar abruptamente. La trayectoria de referencia se realiza

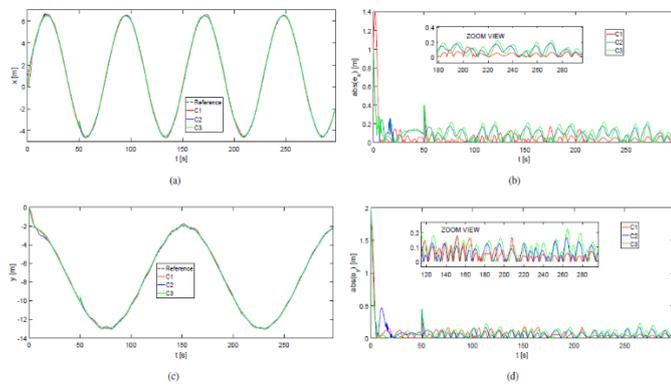


Figura 7: Resultados de la simulación teniendo en cuenta la perturbación de las olas y el viento. **a-** x -posición de la nave frente al tiempo para todos los controladores implementados; **b-** y -posición de la nave frente al tiempo de todos los controladores implementados; **c-** error absoluto en x variable frente a tiempo para todos los controladores implementados; **d-** variable y de error absoluto frente a tiempo para todos los controladores implementados.

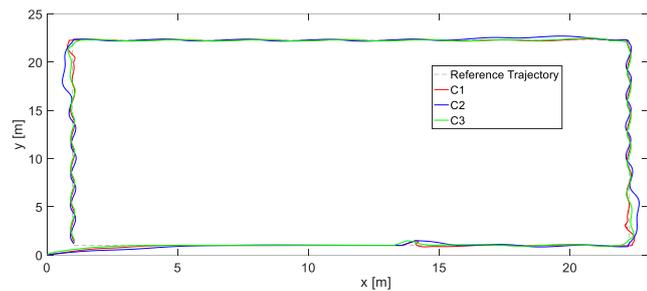


Figura 8: Posición del buque en trayectoria con cambios bruscos de dirección en presencia de olas y perturbaciones del viento.

con una velocidad lineal $u_{ref} = 0.25ms$, la posición inicial de la nave está en $(x(0); y(0)) = (0m; 0m)$ y la trayectoria comienza en la posición $(x(0); y(0)) = (1m; 1m)$.

Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 8. Como se puede ver, el buque alcanza y sigue la trayectoria de referencia sin oscilaciones no deseadas. Los errores de seguimiento se muestran en las Figuras 9(a) y 9(b), mediante la inspección de estas cifras, se puede concluir que el esquema adaptable presentado en este documento (C1) presenta el mejor rendimiento cuando se introducen errores paramétricos y perturbaciones en la acción de control.

El video de la simulación se encuentra en el siguiente link <https://youtu.be/ZF1C4Nk8ISY>

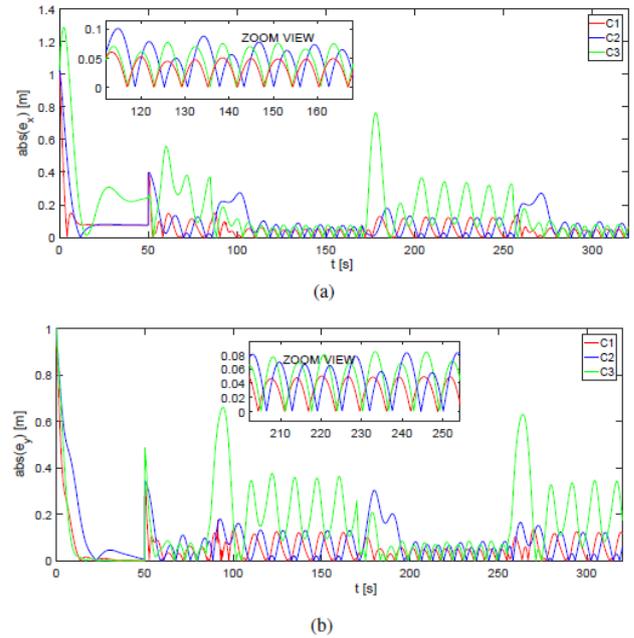


Figura 9: Resultados de la simulación teniendo en cuenta los errores de modelado, las olas y las perturbaciones del viento. **a-** señal de referencia y evolución de la posición del buque en variable x . **b-** señal de referencia y evolución de la posición del buque en variable y . **c-** una evolución del valor absoluto de e_x . **d-** la evolución del valor absoluto de e_y .

8. Discusión

En el desarrollo de este trabajo se presentó una técnica de control adaptable no lineal para diferentes tipos de navíos. Especialmente en buques mercantes donde la variación de la carga y su gran volumen la hacen vulnerable a contingencias climáticas (viento, olas, tormentas, etc.). En los experimentos realizados, se puede observar que el control adaptable (C1) es más eficiente en el momento de rechazar perturbaciones externas que pueden alterar su dinámica. Esto se refleja en la Figura 8 donde los parámetros permanecen inalterados frente a diferentes perturbaciones. Esta técnica podría aplicarse en diferentes tipos de barcos debido a su simplicidad y robustez.

9. Conclusiones

Un controlador adaptable para un buque marino en el seguimiento de trayectoria fue implementado y probado en este trabajo. Este método de control compuesto fue diseñado teniendo en cuenta dos partes, la primera se construye teniendo en cuenta la cinemática del buque utilizando una estrategia LABC. Y la segunda, se implementó una ley de control adaptable para la dinámica de los buques. El controlador LABC anterior produce las señales de referencia para la ley de control adaptable. Este controlador adaptable no sólo ofrece la acción de control, al mismo tiempo, sino que también genera la ley de ajuste de parámetros que trabaja en la parte dinámica de la embarcación marina para reducir el error de seguimiento de control. Este método compuesto podría mejorar el rendimiento general del sistema. La convergencia del método

propuesto se demostró utilizando la teoría de la estabilidad de Lyapunov y se aplicó tanto al álgebra lineal como a los controladores adaptables. Otra contribución de este trabajo es demostrar la eficacia del LABC en combinación con el control adaptable aplicado en los buques marinos autónomos.

Además, los resultados de esta simulación demuestran que los parámetros del buque convergen incluso si el método de control propuesto se utiliza de forma continua. Estos resultados demostraron que este método de control podría usarse en el control de seguimiento de trayectoria para embarcaciones marinas con un error mínimo cuando el método de control compuesto sintoniza los parámetros de la embarcación con diferentes perturbaciones externas. Esta ley de sintonización adaptable se puede aplicar cuando los parámetros de la embarcación no se conocen con exactitud o, en el peor de los casos, podrían cambiar debido a variaciones dinámicas. Este método de control compuesto podría aplicarse en buques mercantes marinos utilizados para el transporte de carga pesada, debido a que el ajuste de parámetros en línea conservaría un error de control de seguimiento mínimo incluso en el caso de variaciones dinámicas.

10. Conflictos de interés

Los autores afirman que no existen conflictos de intereses con respecto a la publicación de este trabajo de investigación.

Referencias

- Cui R, Chen L, Yang C, Chen M. "Extended state observer-based integral sliding mode control for an underwater robot with unknown disturbances and uncertain nonlinearities". *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2017; 64(8): 6785–6795.
- Dai SL, He S, Lin H. "Transverse function control with prescribed performance guarantees for underactuated marine surface vehicles". *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 2019; 29(5): 1577–1596.
- Do K, Jiang ZP, Pan J. "Universal controllers for stabilization and tracking of underactuated ships". *Systems & Control Letters* 2002; 47(4): 299–317.
- Fossen T. "Marine control systems. Marine cybernetics". Trondheim, Norway 2002.
- Fu M, Wang T, Wang C. "Adaptive Neural-Based Finite-Time Trajectory Tracking Control for Underactuated Marine Surface Vessels With Position Error Constraint". *IEEE Access* 2019; 7: 16309–16322.
- Ghommam J, Mnif F, Derbel N. "Global stabilization and tracking control of underactuated surface vessels". *IET control theory & applications* 2010; 4(1): 71–88.
- Ghommam J, Mnif F, Benali A, Derbel N. "Asymptotic backstepping stabilization of an underactuated surface vessel". *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 2006; 14(6): 1150–1157.
- He W, Yin Z, Sun C. "Adaptive neural network control of a marine vessel with constraints using the asymmetric barrier Lyapunov function". *IEEE transactions on cybernetics* 2016; 47(7): 1641–1651.
- Hu X, Du J, Zhu G, Sun Y. "Robust adaptive NN control of dynamically positioned vessels under input constraints". *Neurocomputing* 2018; 318: 201–212.
- Liao YI, Wan L, Zhuang Jy. "Backstepping dynamical sliding mode control method for the path following of the underactuated surface vessel". *Procedia Engineering* 2011; 15: 256–263.
- Martins, F. N., Celeste, W. C., Carelli, R., Sarcinelli-Filho, M., & Bastos-Filho, T. F. (2008). An adaptive dynamic controller for autonomous mobile robot trajectory tracking. *Control Engineering Practice*, 16(11), 1354–1363.
- Nie J, Lin X. "Robust Nonlinear Path Following Control of Underactuated MSV With Time-Varying Sideslip Compensation in the Presence of Actuator Saturation and Error Constraint". *IEEE Access* 2018; 6: 71906–71917.
- Scaglia, Gustavo; Serrano, Emanuel; Albertos, Pedro (2020). Control de Trayectorias Basado en Algebra Lineal. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, [S.l.], ago. 2020. ISSN 1697-7920. Disponible en: <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/13584>. doi:<https://doi.org/10.4995/riai.2020.13584>.
- Scaglia Gustavo, Serrano Mario Emanuel, Albertos Pedro (2020). "Linear Algebra Based Controller - Design and Applications". Publisher: Springer International Publishing. eBook ISBN 978-3-030-42818-1. Hardcover ISBN 978-3-030-42817-4. DOI 10.1007/978-3-030-42818-1.
- Scaglia, G., Mut, V., Rosales, A., Quintero, O., "Tracking Control of a Mobile Robot using Linear Interpolation", *Proceeding of the 3rd International Conference on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation, IMAACA 2007*. vol. 1, pp. 11-15, ISBN: 978-2-9520712-7-7 February 8-10, 2007
- Serrano M.E., Scaglia G.J.E., Auat Cheein F., Mut V. and Ortiz O.A. (2015). Trajectory-tracking controller design with constraints in the control signals: a case study in mobile robots. *Robotica*, 33, pp 2186-2203, diciembre 2015. doi:10.1017/S0263574714001325.
- Serrano ME, Godoy SA, Gandolfo D, Mut V, Scaglia G. "Nonlinear Trajectory Tracking Control for Marine Vessels with Additive Uncertainties". *Information Technology And Control* 2018; 47(1): 118–130.
- Tee KP, Ge SS. "Control of fully actuated ocean surface vessels using a class of feedforward approximators". *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 2006; 14(4): 750–756.
- Van M. "Adaptive neural integral sliding-mode control for tracking control of fully actuated uncertain surface vessels". *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 2019; 29(5): 1537–1557.
- Wang N, Su S F, Yin J, Zheng Z, Er MJ. "Global asymptotic model-free trajectory-independent tracking control of an uncertain marine vehicle: An adaptive universe-based fuzzy control approach". *Transactions on Fuzzy Systems* 2017; 26(3):1613–1625.
- Wang, D., Mu, C., & Liu, D. (2017, May). Neural network adaptive critic control with disturbance rejection. In *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)* (pp. 202-207). IEEE.
- Wondergem M, Lefeber E, Pettersen KY, Nijmeijer H. "Output feedback tracking of ships". *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 2010; 19(2): 442–448.
- Xu Z, Ge SS, Hu C, Hu J. "Adaptive Learning Based Tracking Control of Marine Vessels with Prescribed Performance". *Mathematical Problems in Engineering* 2018; 2018.
- Yang Y, Zhou C, Ren J. "Model reference adaptive robust fuzzy control for ship steering autopilot with uncertain nonlinear systems". *Applied Soft Computing* 2003; 3(4): 305–316.
- Yin Z, He W, Yang C. "Tracking control of a marine surface vessel with full-state constraints". *International Journal of Systems Science* 2017; 48(3): 535–546.
- Yu Y, Guo C, Yu H. "Finite-time predictor line-of-sight-based adaptive neural network path following for unmanned surface vessels with unknown dynamics and input saturation". *International Journal of Advanced Robotic Systems* 2018; 15(6): 1729881418814699.