

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

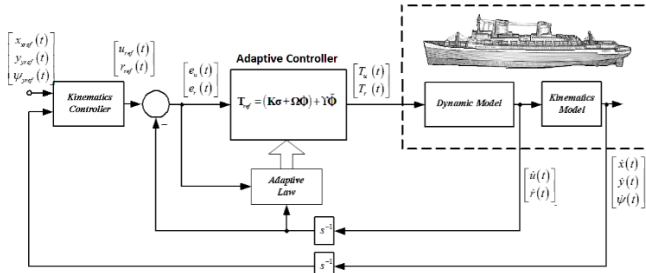


Figura 2: Muestra la estructura de control propuesta del buque marino

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.

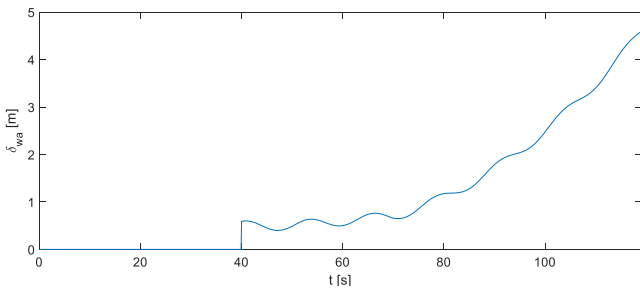


Figura 3: Perturbación de las ondas frente al tiempo introducido en las simulaciones

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

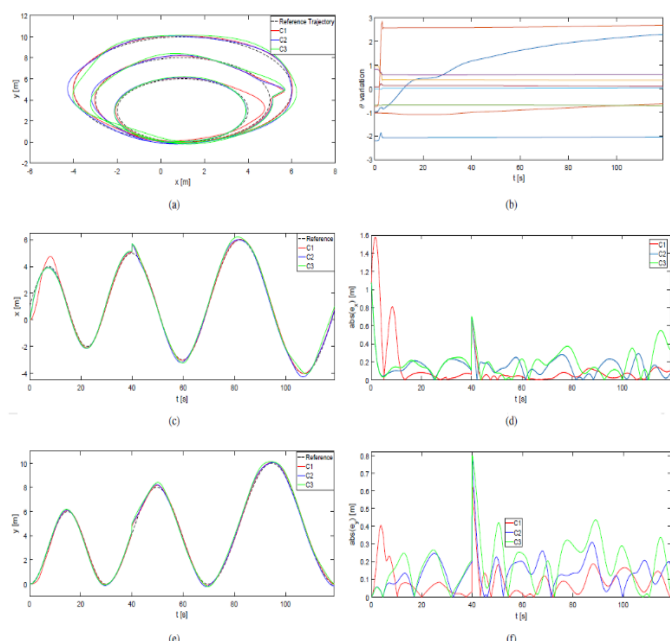


Figura 4: Resultados de la simulación teniendo en cuenta la perturbación de la onda: **a)** Trayectoria del recipiente marino teniendo en cuenta el efecto de las ondas **b)** Evolución temporal de los parámetros adaptables **c)** Señal de referencia y evolución de la posición del buque en x . **d)**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

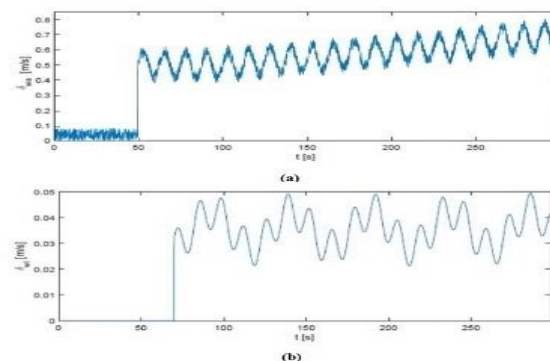


Figura 5: Disturbio introducido en el modelo del sistema: **a)** perturbación de las olas; **b)** perturbación del viento

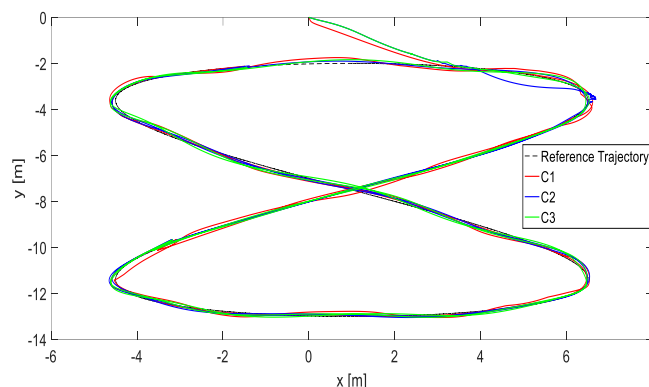


Figura 6: Resultados de la simulación teniendo en cuenta las olas y el efecto del viento

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

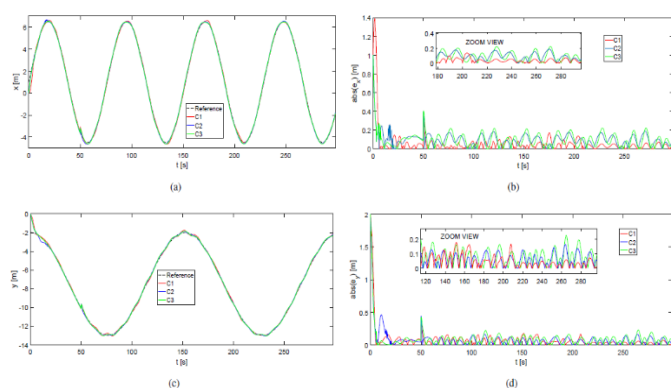


Figura 7: Resultados de la simulación teniendo en cuenta la perturbación de las olas y el viento. **a-** x -posición de la nave frente al tiempo para todos los controladores implementados; **b-** y -posición de la nave frente al tiempo de todos los controladores implementados; **c-** error absoluto en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

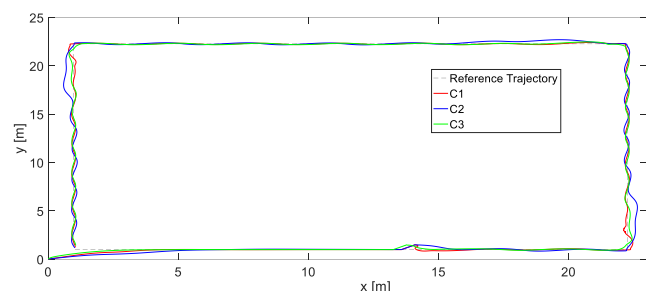


Figura 8: Posición del buque en trayectoria con cambios bruscos de dirección en presencia de olas y perturbaciones del viento.

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>

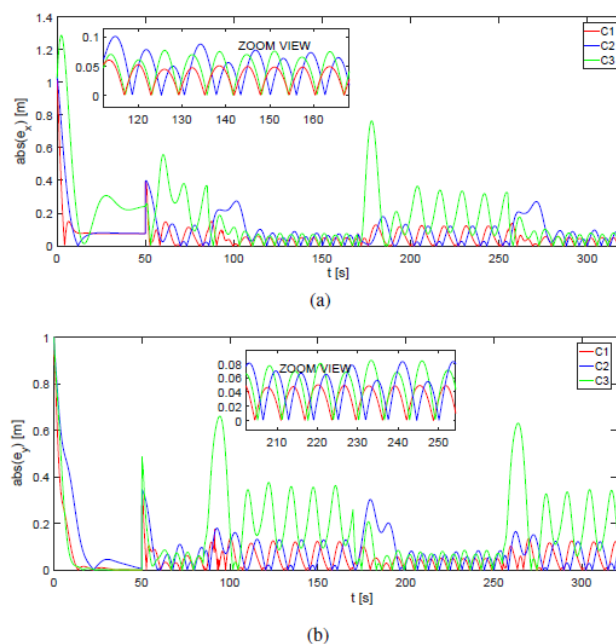


Figura 9: Resultados de la simulación teniendo en cuenta los errores de modelado, las olas y las perturbaciones del viento. **a-** señal de referencia y evolución de la posición del buque en variable x . **b-** señal de referencia y evolución de la posición del buque en variable y . **c-** una evolución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