

Control de Embarcaciones Mediante Modos Deslizantes con Ganancias PID

S. Alvarez-Rodríguez^{#1}

[#]Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez,
Unidad Académica Lagos de Moreno, Jalisco, México

¹sergio.alvarez@lagos.tecmm.edu.mx

Resumen— Tradicionalmente, el control automático de embarcaciones marítimas se ha realizado utilizando la técnica Proporcional-Integral-Derivativa (PID), ya que los diseñadores e ingenieros dedicados a esta tarea se han resistido históricamente a emplear técnicas de control avanzado. Sin embargo, aun cuando el control PID es altamente confiable y fácil de implementar, presenta generalmente poca resistencia a las perturbaciones y ruido. Esta es la primera etapa de un proyecto en el cual se realiza una aplicación sobre embarcaciones marítimas, de controladores que usan las técnicas de Modos Deslizantes con ganancia variable, que logre subsanar la escasa robustez del PID tradicional. Con estas nuevas técnicas se obtienen controladores robustos con propiedades similares a las de los controladores PID, pero resistentes al tipo de perturbaciones y ruido al que están sometidas cotidianamente las embarcaciones marítimas. Este tipo de control usa los conceptos básicos del control tipo PID para la obtención dinámica de ganancias para un control discontinuo de estructura variable. De esta forma, mediante resultados de simulación, se propone la aplicación de controladores que conserven la sencillez y confiabilidad de los controladores PID convencionales, pero dotándolos de la robustez que mantenga a las embarcaciones marítimas en estado estable y en convergencia asintótica con las señales de referencia en tiempo finito.

Palabras clave—Embarcaciones marítimas, control PID, control por modos deslizantes.

I. INTRODUCCIÓN

Las embarcaciones marítimas poseen variables como la trayectoria, el alabeo, el cabeceo y la guiñada, entre otras, las cuales son sujetas a algún tipo de control para el correcto desempeño y maniobrabilidad del buque. Las ecuaciones dinámicas que modelan el comportamiento de estas variables pueden presentarse en un formato especial llamado “espacios de estado”, dónde un sistema de ecuaciones diferenciales debe ser resuelto para cada uno de los estados, actuando bajo un sistema de control determinado. En [1], se menciona el hecho de que el sistema de control tradicionalmente empleado en las embarcaciones marítimas es el ampliamente conocido Proporcional-Integral-Derivativo, debido a la sencillez de su implementación, a su suavidad en la señal de control, y a su confiabilidad, sin embargo, este sistema de control presenta poca robustez operativa, entre otras desventajas. Recordar que los controladores PID son eficientes para el control de sistemas lineales, pero los buques marítimos resultan ser sistemas altamente no lineales.

Por otro lado, se han realizado esfuerzos como el trabajo reportado en [2], en donde se proponen controladores no lineales para vehículos marítimos utilizando mediciones tanto de posición, como de orientación (alabeo, cabeceo y guiñada).

Los Modos Deslizantes (véase [3]), son una técnica de control robusto ampliamente usada para sistemas no lineales, y sujetos a fuertes perturbaciones, variaciones paramétricas, dinámicas no modeladas y ruido. Sin embargo, los modos deslizantes son una clase de control perteneciente a los sistemas de estructura variable, donde la ley que los gobierna incluye señales discontinuas en el tiempo de alta frecuencia, lo que provoca un fenómeno indeseable llamado efecto de vibración (chattering-effect), el cual produce desgaste mecánico, pérdida de energía, imprecisión de posicionamiento, y otros fenómenos indeseables sobre la planta a controlar.

Como antecedentes inmediatos a este trabajo tenemos que en [4-5], se desarrollan técnicas de control por Modos Deslizantes con ganancias proporcionales al error de seguimiento, o bien, ganancias tipo PID.

A. Justificación.

Es escaso el volumen de investigación realizado en aplicaciones de control robusto por Modos Deslizantes sobre vehículos marítimos. En el presente trabajo se propone el uso tanto de los conceptos del controlador PID convencional, como de las técnicas de control por Modos Deslizantes, amalgamándolas de tal forma que se obtengan los beneficios de ambas en un solo sistema de control.

B. Contribución de este trabajo.

La principal contribución de este trabajo, que se encuentra en su primera etapa, es la aplicación práctica, mediante pruebas de simulación, de los conceptos expresados en [5] (artículo del mismo autor), referentes al uso de Modos Deslizantes con ganancias variables de tipo PID. Esta aplicación se implementa sobre un tipo específico de embarcación marítima. Una contribución adicional es la comparación del desempeño del PID tradicional con el del control por Modos Deslizantes de ganancia variable, donde la planta de control es la embarcación considerada.

II. MARCO TEÓRICO

Las embarcaciones navales son en la actualidad sistemas electromecánicos sujetos a control mediante técnicas que

estabilicen sus variables, haciendo converger asintóticamente el error de seguimiento al origen.

Las principales variables de un buque naval que pueden ser monitoreadas y controladas en forma automática mediante alguna técnica específica de control (véase [6]), son la posición en el espacio tridimensional (x, y, z) , y la orientación con respecto a un sistema inercial (ϕ, θ, φ) . En la trayectoria se consideran las variables dinámicas como el avance del buque (u), el desplazamiento lateral (v) y la arfada (w). Las dinámicas de rotación están constituidas por alabeo (p), cabeceo (q) y guiñada (r) (roll, pitch, yaw respectivamente), las cuales son mostradas en la Fig. 1.

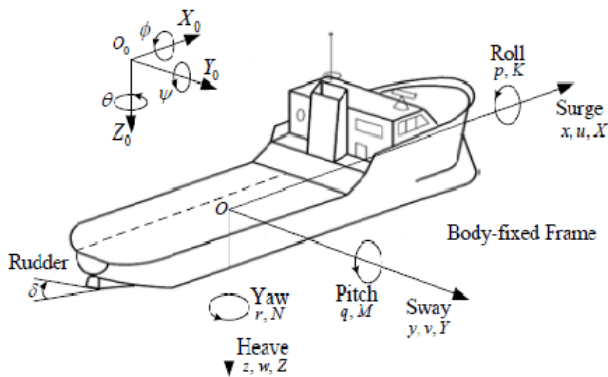


Fig. 1. Principales variables que pueden ser controladas en una embarcación marítima. Imagen tomada de Dheeraj, U, et al, Design of a ships autopilot using state space feedback control methodology.

Estas variables se pueden agrupar en dos vectores principales, uno para las posiciones lineales y angulares, y el otro para las velocidades lineales y angulares, como se muestra en las siguientes ecuaciones

$$\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \varphi] \quad (1)$$

$$v = [u, v, w, p, q, r] \quad (2)$$

Debido a que las velocidades son obtenidas mediante la primera derivada temporal de las posiciones, entonces introduciendo una razón de proporcionalidad vectorial como el Jacobiano de la orientación $J(\phi, \theta, \varphi)$, o simplemente J , obtenemos que

$$\dot{\eta} = J v \quad (3)$$

Por otra parte, usando las conocidas ecuaciones de Lagrange-Euler para el modelado de dinámicas de cuerpos sometidos a esfuerzos, tenemos que

$$M \dot{v} + C v + F = \tau \quad (4)$$

donde M representa la matriz de inercias; C es la matriz de fuerzas centrípetas y de Coriolis; y F es un vector que representa dinámicas no modeladas, variaciones paramétricas, perturbaciones y ruido, que en el caso de un buque naval puede representar tanto a las perturbaciones ambientales como olas, vientos y corrientes, como a las fuerzas y momentos

hidrodinámicos producidos por el movimiento del casco en el agua; τ representa a los esfuerzos de los sistemas de propulsión y a las superficies de control como son timones y aletas, lo que constituye el vector de las señales de control para los actuadores. En este punto cabe especificar que las perturbaciones y ruido pueden ser absorbidos por el controlador del sistema cuando son difíciles de modelar por su naturaleza caótica.

El sistema puede expresarse en espacios de estado para efectos de control a lazo cerrado, quedando de la siguiente forma

$$\dot{\eta} = J v \quad (5)$$

$$\dot{v} = -M^{-1} [C v + F] + M^{-1} \tau \quad (6)$$

Cuando se conocen las variables que se desean controlar en una embarcación marítima, así como el modelo matemático que modele las dinámicas de cada una de esas variables, es posible aplicar alguna técnica para su control.

En este trabajo se propone el uso híbrido del control PID y el control por Modos Deslizantes o Sliding Mode Control (SMC), con la finalidad de obtener un controlador con las ventajas de ambas técnicas.

Parte de los conceptos teóricos que se usan para el desarrollo del proyecto están centrados en las definiciones de controladores para sistemas lineales y no lineales, controladores PID y de modos deslizantes, respectivamente.

Un controlador tipo PID (véase [7]) está dado por la ecuación

$$u_{pid} = K_p e + k_i \int_{t_0}^{t_1} e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (7)$$

donde $u_{pid} \in \mathbb{R}^3$ representa el valor del par (señal de control); $K_p \in \mathbb{R}^3$, $K_i \in \mathbb{R}^3$ y $K_d \in \mathbb{R}^3$ son las ganancias proporcionales, integrales y derivadas, respectivamente; y $e = q - Ref \in \mathbb{R}^3$ representa el error de seguimiento del sistema de control, con Ref como señal de referencia.

La otra técnica considerada, es el siguiente control de modo deslizante (SMC) de segundo orden, llamado algoritmo Twisting:

$$u_{smc} = -r_1 \operatorname{sgn}(e) - r_2 \operatorname{sgn}(\dot{e}) \quad (8)$$

donde $u_{smc} \in \mathbb{R}^3$ representa la señal de control generada por el SMC $r_1, r_2 \in \mathbb{R}^3$ son los llamados parámetros Twisting; y $\operatorname{sgn}(\cdot)$ es la conocida función de signo.

Una variante del Twisting es el modo deslizante convencional, donde no se toma en cuenta el término del signo de la razón de cambio del error, es decir,

$$u_{smc} = -r_1 \operatorname{sgn}(e) \quad (9)$$

Para revisar con mayor profundidad los aspectos teóricos relacionados con el efecto chattering (parloteo) y los Modos Deslizantes se recomienda revisar los artículos [8-19].

III. DESARROLLO

Las ecuaciones (8)—(9) pueden tener ganancias variables en lugar de las ganancias constantes r_1, r_2 , y estas ganancias variables pueden tener una ley adaptativa que sea función del error, así como lo presenta la ecuación (7). Sustituyendo (7) en (9), tenemos que

$$u_{smc} = -[K_p e + k_i \int_{t_0}^{t_1} edt + K_d \frac{de}{dt}] sgn(e) \quad (10)$$

La ecuación (10) es la ley de control con la cuál se trabaja en este artículo.

Para comprobar las formalidades matemáticas que dan validez a la obtención de la expresión (10), se invita al lector a revisar el análisis de estabilidad en el sentido de Lyapunov ofrecido en [5].

En este desarrollo se diseñan pruebas de simulación en ambiente Simulink de Matlab, para conocer el comportamiento teórico del avance, desplazamiento lateral y guiñada de una embarcación ligera con masa m de 50 Kg, una ubicación del centro de masas xG de 0.5 m, una inercia Iz de 0.2 Kg. Por simplicidad conceptual se toma J como una matriz identidad de 3×3 , y las matrices de masas e inercias M , así como de Coriolis y fuerzas centrípetas C , poseen las siguientes formas:

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & m(xG) \\ 0 & m(xG) & Iz \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(xG r + v) \\ 0 & 0 & m u \\ m(xG r + v) & -m u & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

En la Fig. 2, se presenta el diagrama raíz de programación por bloques en Simulink-Matlab en el cual se aprecian dos sistemas de control con realimentación de estados, donde los bloques en color verde representan a la embarcación, es decir, donde están contenidas las ecuaciones (5)—(6), con sus respectivos valores matriciales (11)—(12). En el sistema de la parte superior en color cian tenemos el control de la embarcación mediante el control PID de la ecuación (7), mientras que en la parte inferior el bloque azul de control conteniendo la ecuación (10) referente a los Modos Deslizantes (SMC) de ganancia variable. Los bloques en gris oscuro generan señales de ruido blanco para simular las condiciones de movimiento acuoso caótico, mediante el generador de Simulink “Band-Limited white noise” con semilla de [23341] y ganancias de 0.0015.

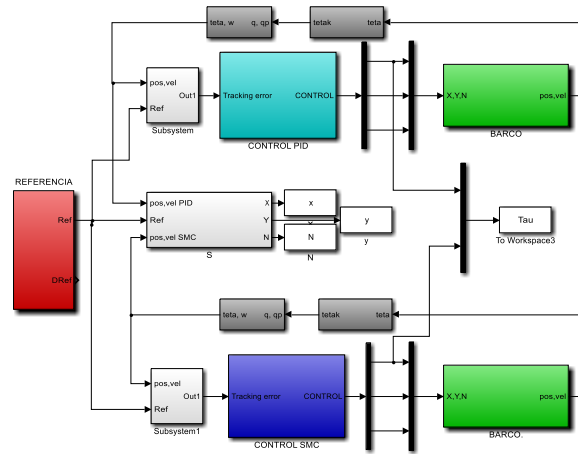


Fig. 2. Diagrama de bloques de control en Simulink.

IV. RESULTADOS

Habiendo realizado la implementación del sistema de control en la forma ya descrita, se realizaron corridas de simulación agrupadas en dos tandas, con las condiciones paramétricas indicadas anteriormente y tomando en cuenta que la primera tanda de simulaciones se realiza sintonizando el PID, tanto de (7) como de (10) con los valores:

$K_p=10000$; $K_i=50$; y $K_d=1500$. Con una restricción de saturación de 100 Nm para cada una de las señales de control.

En la Fig. 3, se puede apreciar el control de la embarcación en el eje X, es decir, el rumbo de proa o avance que se le marca al buque. Como observamos, la referencia es una señal de diente de sierra de 2 unidades de amplitud y una frecuencia de 0.07 Hz. Se observa que las condiciones iniciales (0.52 rad) están fuera del inicio (0.2 rad) de la referencia.

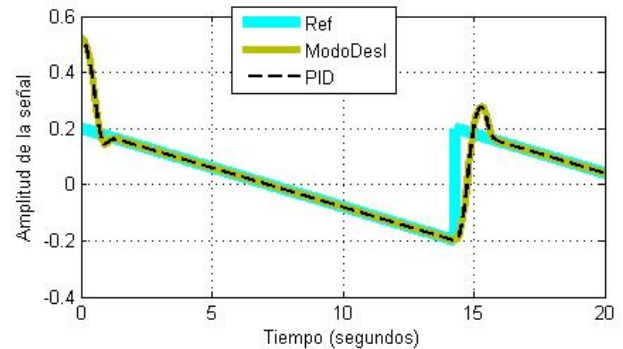


Fig. 3. Control de la embarcación en la posición en el eje X.

A partir del origen de la trayectoria, la embarcación tarda en alcanzar la convergencia aproximadamente 1.5 segundos utilizando cualquiera de las dos técnicas de control, tanto el PID como los modos deslizantes (con ganancias PID). A partir del momento en que alcanza la convergencia, ya no la pierde hasta el momento en que el diente de sierra salta de -0.2 a 0.2 rad, donde el proceso de convergencia vuelve a comenzar.

En la Fig. 4, se observa una señal de referencia senoidal con una amplitud unitaria y una frecuencia de 0.05 Hz, donde el control de la embarcación trata de controlar su movimiento en el eje Y, es decir, los desplazamientos laterales o deriva (babor-estribor). También tenemos una condición inicial de 0.52 rad, y para alcanzar la convergencia, tanto del controlador PID como de los modos deslizantes, se emplea un tiempo aproximado de 3.5 segundos, misma que ya no pierde durante todo el periodo de simulación, aún cuando se aprecia un pequeño sobresalto a los 10 segundos, provocado por el acomplamiento de la dinámica del control de φ (ver Fig. 5).

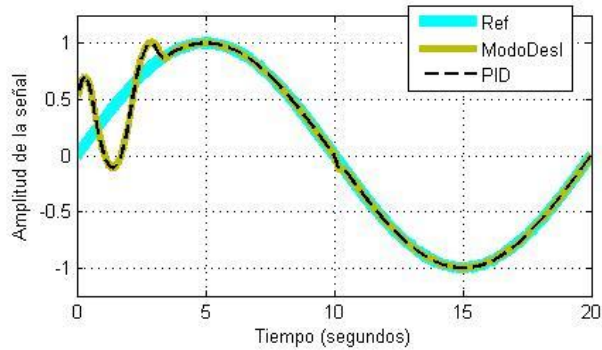


Fig. 4. Control de la embarcación en el eje Y.

En la Fig. 5, se aprecia la señal de referencia para φ , es decir, la guiñada de la embarcación, así como el comportamiento del buque bajo control PID y modo deslizante (con ganancias PID). La referencia es una onda cuadrada de 0.15 rad de amplitud y 0.05 Hz de frecuencia, donde las condiciones iniciales son de 0.52 rad. Se puede apreciar un control bastante exacto y suave, ya que no se producen sobreimpulsos a partir de que se alcanza el estado estable de guiñada. Esta es una variable fácil de controlar ya que se trata de la rotación del buque sobre el eje de guiño.

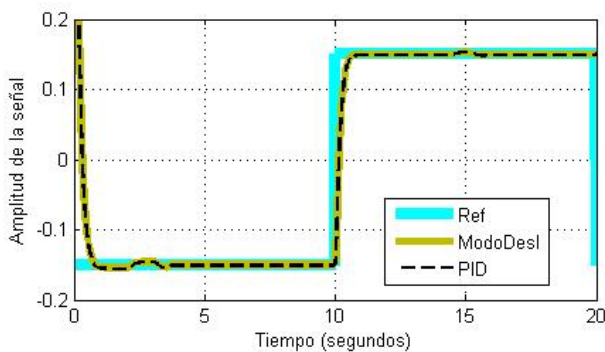


Fig. 5. Control de la embarcación en el eje N.

En la Fig. 6, se muestra la señal de control que genera el controlador PID (línea negra), en comparación con la señal generada por los modos deslizantes (línea verde). En esta imagen se visualiza la señal discontinua de alta frecuencia característica de los sistemas de estructura variable, comparada contra la señal continua del PID.

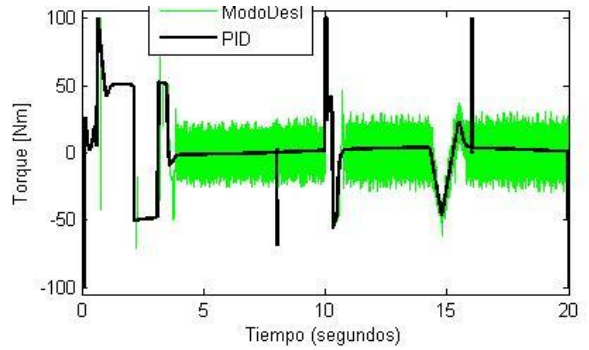


Fig. 6. Señales de control para mantener la embarcación en la referencia de φ .

Los resultados anteriores muestran un comportamiento casi idéntico de la embarcación, de las acciones de control tanto PID, como de los modos deslizantes (con ganancias PID), sin embargo, cambiar los parámetros de sintonización de los controladores, tiene un efecto sobre el desempeño de los controladores como se verá a continuación. El cambio radica en ajustar el valor de K_i , de 50 a un valor de 300, conservando todos los demás parámetros.

La Fig. 7, muestra el control del avance de la embarcación con este nuevo valor de $K_i=300$. Aparentemente la gráfica se ve igual que la Fig. 3, no obstante, al realizar un acercamiento en una sección (de 0.7 a 2.1 segundos), se aprecia una clara diferencia entre los dos controladores como se muestra en la Fig. 8, donde el PID nunca alcanza la convergencia sobre la señal de referencia, mientras que el modo deslizante la alcanza en aproximadamente 1.3 segundos, y mantiene forma robusta.

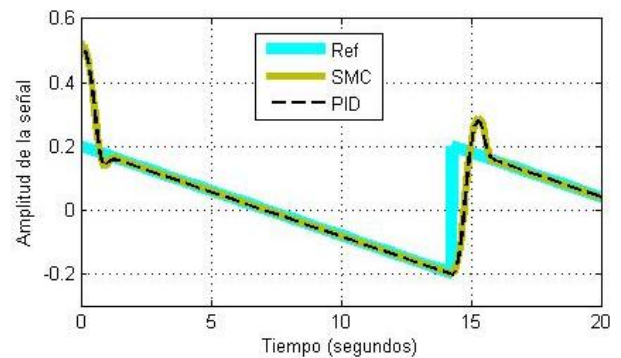


Fig. 7. Control de X con $K_i=300$.

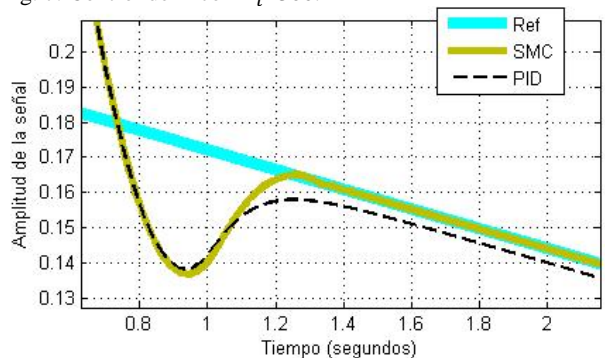


Fig. 8. Acercamiento en una región de la Fig. 6.

En la Fig. 9, no se requiere realizar acercamientos, ya que se aprecia como el modo deslizante termina su estado transitorio a los 3.5 segundos, mientras que el PID continúa oscilando con sobreimpulsos hasta los 5 segundos.

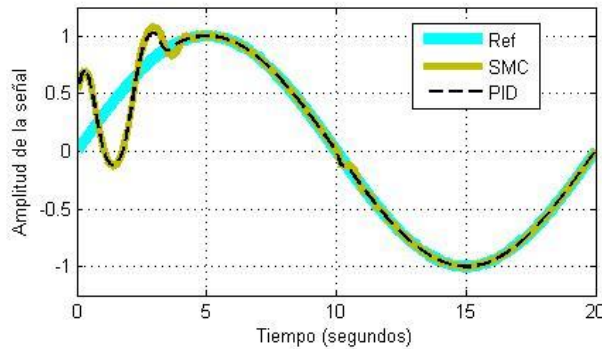


Fig. 9. Seguimiento de la referencia con $K_i=300$.

En la Fig. 10, se aprecia como el PID no se ajusta a la parte central de la línea de referencia, lo cual nos dice que no alcanza la convergencia, como sí lo hace el modo deslizante, bajo el nuevo valor de $K_i=300$.

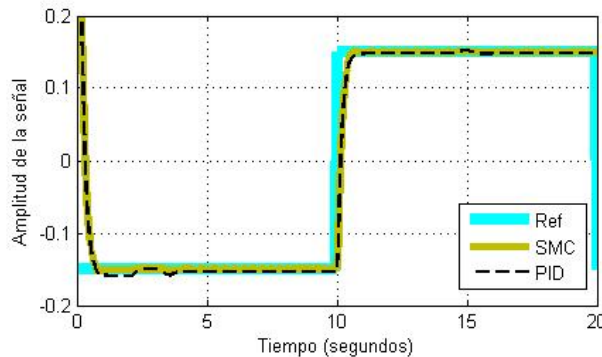


Fig. 10. Seguimiento de la onda cuadrada con $K_i=300$.

Cabe hacer notar que en las gráficas de seguimiento mostradas, no se aprecia de forma significativa el efecto de vibración o chattering. Las dinámicas de la embarcación representadas por las ecuaciones (4)—(5), contemplan efectos de amortiguamiento a vibraciones de alta frecuencia.

V. CONCLUSIÓN

Con el uso de los algoritmos de los Modos Deslizantes de ganancia variable, se obtiene un control más robusto de las principales variables de embarcaciones marítimas, comparado con el uso del controlador PID convencional. Debido a la lentitud de reacción de una embarcación marítima frente a la alta frecuencia de la señal de control de los Modos Deslizantes, no se aprecia en forma significativa el efecto de parloteo causado por estos sistemas de estructura variable, es decir, el fluido acuoso en el cual se desempeñan las dinámicas del buque, contribuyen a absorber vibraciones indeseables y por lo tanto a diluir el efecto chattering.

Los presentados en este artículo son resultados preliminares del trabajo de investigación iniciado en febrero del 2022 y que concluirá en su fase teórica en enero del 2023, quedando pendiente por reportar la parte medular del controlador propuesto, así como su respectivo análisis de estabilidad en el sentido de Lyapunov para sistemas de acoplamiento fuerte con tres grados de libertad.

El objetivo final al terminar el proyecto en su fase teórica, es establecer las condiciones para realizar implementaciones de tiempo real, es decir, aplicar los conceptos teóricos desarrollados sobre embarcaciones reales.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al TecMM por proporcionar los medios de investigación necesarios para la realización de este trabajo así como al apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías CONAHCYT.

REFERENCIAS

- [1] G. N. Roberts, "Trends in marine control systems", *Annual Reviews in Control*, Volume 32(2), pp. 263-269, 2008.
- [2] M. J. Paulsen, "Nonlinear control of Marine Vehicles Using Only Position and Attitude Measurements", PhD Thesis, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 1996.
- [3] Fridman, L., Moreno, J. and Iriarte, R. *Sliding Modes after the First Decade of the 21st Century: State of the Art*, 1st ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 2012.
- [4] Alvarez-Rodríguez et al., "Variable gains sliding mode control", *International Journal of Control Automation and Systems*, Vol. 17(3), pp. 555-564, 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/s12555-018-0095-9>.
- [5] Alvarez Rodríguez et al., "PID Principles to Obtain Adaptive Variable Gains for a Biorder Sliding Mode Control", *International Journal of Control Automation and Systems*, Vol. 8(10), pp. 2456-2467, 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/s12555-019-0343-7>.
- [6] T.I. Fossan, *Guidance and control of ocean vehicles*, 1st ed., John Wiley and Sons Ltd., England, 1994.
- [7] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, 3ra ed., Prentice-Hall, Mexico, 1998.
- [8] B. Bandyopadhyay, S. Spurgeon, and S. Janardhanan, *Advances in Sliding Mode Control: Concept, Theory and Implementation*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 2013.
- [9] G. Bartolini, "Chattering phenomena in discontinuous control systems", *Int. J. Systems Sci.*, vol. 20, pp. 2471-2481, 1989.
- [10] I. Boiko and L. Fridman, "Analysis of chattering in continuous sliding mode controllers", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.59(2), pp. 1194-1207, 2005.
- [11] L. Dorel and A. Levant, *On Chattering-Free Sliding-Mode Control*, Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, Mexico, 2008.
- [12] Y. Fang and T. Chow, *Chattering Free Sliding Mode Control Based on Recurrent Neural Network*, SMC'98 Conference Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No. 98CH36218). IEEE. pp. 1726-1731, 1998.

- [13] L. Fridman, "An averaging approach to chattering", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 46, pp. 1260-1264, 2001.
- [14] A. Levant, "Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control", *International Journal of Control*, vol. 58(6), pp. 1247- 1263, 1993.
- [15] A. Levant, "Chattering analysis", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 55(6), pp.1380-1389, 2010.
- [16] F. Plestan, Y. Shtessel, V. Bregeault and A. Poznyak, "New methodologies for adaptive sliding mode control", *International Journal of Control*, Taylor & Francis, 83(9), pp.1907-1919, 2010.
- [17] V. Utkin, J. Guldner and J. Shi, *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*, CRC Press, New York, N.Y., USA, 1999.
- [18] Y. J. Huang, T. C. Kuo, and S. H. Chang, "Adaptive sliding-mode control for nonlinear systems with uncertain parameters", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 38(2), pp. 534-539, 2008.
- [19] L. Yu, M. Zhang, and Z. Fei, "Nonlinear adaptive sliding mode switching control with average dwell-time", *International Journal of System Science*, vol. 44(3), pp. 471-478, 2013.