

Controlador PD-Difuso para seguimiento de pared de un robot móvil: validación experimental

A Fuzzy-PD controller for wall-following of a mobile robot: experimental validation

Xavier Aguas^{ID}, Jefferson Revelo^{ID}, Marco Herrera^{ID}, Andres Cuaycal^{ID}, Oscar Camacho^{ID}*

*Departamento de Automatización y Control Industrial, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 170525;
xavier.aguas@epn.edu.ec; jefferson.revelo@epn.edu.ec; marco.herrera@epn.edu.ec; andres.cuaycal@epn.edu.ec*

* Correspondence: oscar.camacho@epn.edu.ec

Recibido 18 noviembre 2019; Aceptado 06 diciembre 2019; Publicado 10 diciembre 2019

Resumen: Este artículo presenta un controlador Fuzzy-PD para resolver el problema de seguimiento de pared a través de un robot móvil. El desempeño del controlador propuesto es comparado con un controlador clásico PD a través del análisis del índice de la integral del error cuadrático (ISE) y el índice de variación total de la acción de control (TV). Para el diseño del controlador Fuzzy-PD, se consideró la distancia que existe entre el robot móvil y la pared la cual es medida a través de un sensor ultrasónico que tiene el robot. En este trabajo se realizaron dos pruebas con el objetivo de mostrar la efectividad que posee cada controlador, un cambio de referencia de la distancia de seguimiento y el seguimiento de una pared desconocida. Los controladores fueron sintonizados a través del algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO) e implementados en la plataforma DaNI 2.0 mediante el uso del software LabView Robotics.

Palabras clave: Controlador difuso, controlador PD, robot móvil, seguimiento de pared

Abstract: *This article presents a Fuzzy-PD controller in order to solve the problem of wall following for a mobile robot. The performance of the proposed controller is compared to a classic PD controller through the analysis of the quadratic error integral index (ISE) and the total variation index of the control action (TV). For the design of the Fuzzy-PD controller, the distance between the mobile robot and the wall is measured through an ultrasonic sensor that has the mobile robot. In this work two tests were carried out with the objective of showing the effectiveness of each controller; a reference change of the tracking distance and the tracking of an unknown wall. The controllers were tuned by Particle Swarm Optimization (PSO) and implemented on the DaNI 2.0 platform through the use of LabView Robotics software.*

Keywords: *Fuzzy controller, mobile robot, PD controller, wall-following*



1 Introducción

En los últimos años, el control de robots móviles autónomos ha tenido un notable avance en el ámbito de la investigación. En dependencia de la aplicación que se da a dichos robots y como la información de datos es generada a partir de los sensores permitiendo analizar el entorno y la planificación de trayectorias. Por ejemplo en (Van Turenout & Honderd, 1992), se discute que la distancia y la orientación del robot respecto a una pared puede ser calculada para realizar el seguimiento con el objetivo de identificar lugares desconocidos. Mediante el uso de métodos tradicionales de control, el rendimiento del robot se ve afectado directamente debido a la precisión de los sensores, la señales adquiridas presentan ruidos provenientes de otras fuentes de señales no deseadas al detectar obstáculos. En consecuencia, el detectar dichos obstáculos y posicionar correctamente el robot frente a una pared se vuelve un problema lleno de incertidumbres como se describe en (Al-Mutib *et al.*, 2016). Por esta razón varios autores han propuesto diferentes enfoques inteligentes con el objetivo de disminuir este problema. El uso de un algoritmo mejorado de colonia de abejas (IABC) o la utilización de controladores de lógica difusa (FLC) con funciones de membresía permiten mejorar el desempeño de dicho controlador (Chen *et al.*, 2017). Los controladores difusos se han convertido en populares aplicaciones de ingeniería, especialmente para sistemas complejos o que poseen gran incertidumbre en el conocimiento del entorno en el que se desarrollan, como los robots móviles autónomos. Un controlador difuso mejora el rendimiento y la efectividad de un controlador clásico PD para el seguimiento de pared por medio del ajuste de las funciones de membresía (Desouky & Schwartz, 2009). Las pruebas para medir el desempeño del controlador propuesto son a través de simulaciones que no permiten observar como se comporta el sistema por la interferencia del ruido en los sensores. Aljanaideh & Demirly (2010) presentan una nueva metodología difusa utilizada para la sintonización de la ganancia del controlador para pruebas de seguimiento de paredes (Aljanaideh & Demirly, 2010). Otro enfoque que presenta un controlador de lógica difusa es presentado por Li & Wang (2015), el controlador combina toda la información adquirida por varios sensores láser con el objetivo de seguir paredes desconocidas (Li & Wang, 2015). Todos estos estudios que se han detallado anteriormente muestran que los controladores de

lógica difusa implementados en robots móviles, mejoran considerablemente las acciones de control dirigidas a los motores, generando un movimiento más real al seguir una pared. El siguiente trabajo presenta la implementación de dos controladores para el seguimiento de paredes y analizar la efectividad de cada uno de ellos, el primero es un controlador clásico PD y el otro es un controlador PD con lógica difusa para mejorar el seguimiento, tanto para cambios de referencia de la distancia entre robot-pared y para el seguimiento de una pared desconocida. Estos controladores son sintonizados a través de un algoritmo de optimización conocido como enjambre de partículas (PSO), el cual permite generar un gran desempeño en el sistema. La integral del error cuadrático (ISE) y la variación total de la acción de control (TV) fueron los índices utilizados para medir el desempeño de los controladores. El índice ISE analiza la respuesta del sistema en estado transitorio y el índice TV estudia la calidad de las acciones de control. El robot móvil empleado en esta investigación fue DaNI 2.0, la cual es una plataforma educativa desarrollada por National Instruments y ha sido utilizado por Villacrés *et al.* (2017) para el seguimiento de referencias. La distancia entre el robot y la pared es medida a través de un sensor ultrasónico montado en la parte frontal del robot Villacrés *et al.* (2017).

La organización de este documento es la siguiente: La sección 2 describe la metodología empleada para resolver el problema de seguimiento de pared. La sección 3 presenta el diseño del controlador PD con lógica difusa y la sintonización a través de PSO. La sección 4 ilustra la implementación de los controladores y los resultados experimentales. Finalmente, las conclusiones de esta investigación son reflejadas en la última sección.

2 Metodología

Este trabajo utiliza la investigación descriptiva. La investigación descriptiva permite aplicar los conceptos necesarios para encontrar el modelo cinemático del robot móvil, el problema del seguimiento de pared y el procedimiento para desarrollar los controladores para que el robot móvil cumpla este objetivo. Toda esta información es recolectada en artículos científicos, libros y sitios web académicos.

2.1 Descripción de la plataforma de robot móvil

El robot móvil de tracción diferencial utilizado en este trabajo es la plataforma DaNI 2.0, el cual fue desarrollado por las empresas Pitsco Education y National Instruments. Posee dos motores, cada uno con un encoder en cuadratura incorporado para la medición de velocidad y posición del robot; además, contiene un sensor ultrasónico que mide la distancia. La placa de control es un NI Single-Board RIO (FPGA), el cual se programa mediante el software LabView Robotics. El robot DaNI 2.0 se muestra en la figura 1 y las características mecánicas y eléctricas son presentadas en la tabla 1.

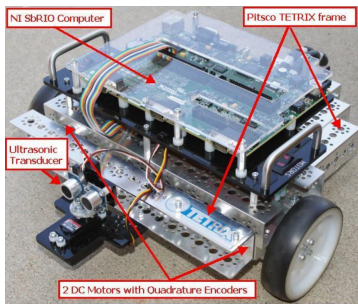


Figura 1: Plataforma robótica DaNI 2.0. Fuente: (Browne & Conrad, 2017)

Tabla 1: Características del robot DaNI 2.0. Fuente: (Browne & Conrad, 2017)

Parámetros	Valor
Radio de las ruedas	0.1016[m]
Distancia entre las ruedas	0.3937 [m]
Velocidad Angular máx	2 [rad/s]
Velocidad lineal máx	0.5 [m/s]
Cable Ethernet	CAT 5
CPU	NI 9623 sbRIO
Sensor Ultrasónico	0.05-1.2 [m]

2.2 Problemas del seguimiento de pared y modelo cinemático

El seguimiento de pared se caracteriza por mantener una cierta distancia entre el robot y la pared (Van Turennot & Honderd, 1992). Para cumplir este objetivo se debe proporcionar una orientación y velocidad adecuada al robot para.

La distancia elegida en este trabajo debe ser mayor a $D_d = 0.25m$ para conservar un rango de seguridad para evitar accidentes o colisiones en las pruebas de seguimiento. Según Cheng *et. al* (2004), la pared es elegida bajo los siguientes supuestos que se indican a continuación (Chung *et al.*, 2004):

- La curvatura de la pared debe ser suficientemente mayor que el radio de giro del robot móvil.
- La señal del error es la diferencia entre la distancia medida por el robot y la distancia deseada determinada por el diseñador.

A continuación se modela al robot DaNI 2.0, el cual es un robot de tracción diferencial, donde V es la velocidad lineal del robot y W es la velocidad angular del robot (Salem, 2013) como se muestra en la figura 2.

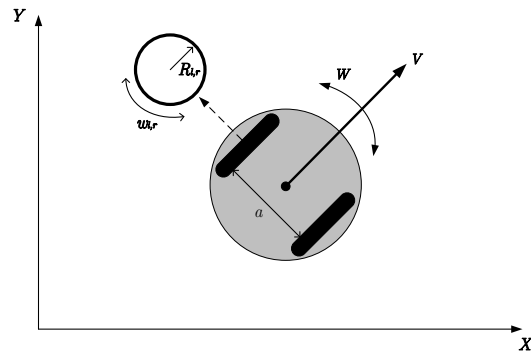


Figura 2: Esquema de un robot de tracción diferencial.

Las ecuaciones de la cinemática para este robot son presentadas en (1) y (2).

$$V = \frac{1}{2}(R_r w_r + R_l w_l) \quad (1)$$

$$W = \frac{1}{a}(R_r w_r - R_l w_l) \quad (2)$$

donde R_r , R_l son los radios de la rueda derecha e izquierda respectivamente, w_r , w_l son las velocidades angulares de cada rueda y a es la distancia entre las dos ruedas.

3 Diseño del Controlador

3.1 Controlador PD

Para el diseño del controlador PD es necesario definir el error de seguimiento. El error está definido por la siguiente ecuación:

$$e(t) = D_d(t) - D_m(t) \quad (3)$$

donde $D_d(t)$ es la distancia deseada y $D_m(t)$ es la distancia medida entre el robot y la pared. El esquema de control del controlador PD es mostrado en la figura 3.

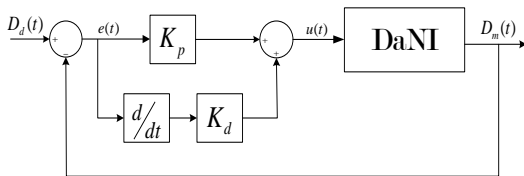


Figura 3: Esquema del controlador PD.

El controlador PD es representado mediante la notación (4).

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

donde K_p y K_d son parámetros de sintonización.

3.2 Controlador PD-Difuso

Con el objetivo de mantener la distancia deseada entre el robot-pared y observar como la lógica difusa mejora el desempeño del controlador PD se diseña un controlador difuso. Este controlador posee dos entradas: el error $e(t)$ y la derivada del error $\dot{e}(t)$; por otro lado, la salida es la acción de control $u(t)$. El esquema del controlador PD-Difuso es ilustrado en la figura 4. La selección adecuada del controlador PD-Difuso está basada en el conocimiento cualitativo sobre el proceso que va a ser controlado, el mismo que es definido por medio del software Matlab/Simulink y el uso de Fuzzy Logic Toolbox (Desouky & Schwartz, 2009; Villacres *et al.*, 2017).

A continuación se detallan los pasos para realizar un controlador con lógica difusa:

1. Diseño de las funciones de membresía para la fuzzificación de las variables de entrada y salida.
2. Implementación de las reglas de inferencia difusa usando la función IF-THEN.

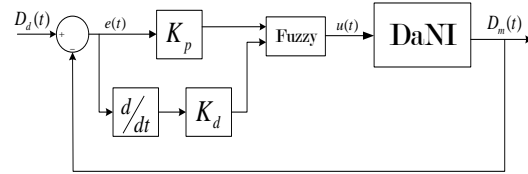


Figura 4: Esquema del controlador PD-Difuso.

3. Comprobación del resultado de la variable de salida a través del visor de reglas.

En este trabajo se eligieron siete funciones de membresía (MFs) con el objetivo de suavizar las acciones de control con la siguiente descripción: NB (Negative Big), NM (Negative Medium), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Small), PM (Positive Medium), and PB (Positive Big). El rango del universo de discurso para las variables de entrada $e(t)$, $\dot{e}(t)$ es $[-1 \ 1]$. Este rango es escogido dependiendo del error máximo que se ha establecido en el desarrollo del controlador. Para la variable de salida $u(t)$ es $[-0.25 \ 0.25]$, cuyo rango es escogido de acuerdo a la velocidad mínima requerida en esta investigación. Cada una de las funciones de membresía son definidas como triángulos simétricos con un 50% de solapamiento entre cada una de ellas (Ghosh *et al.*, 2015). Las funciones de membresía son mostradas en las figuras 5 y 6.

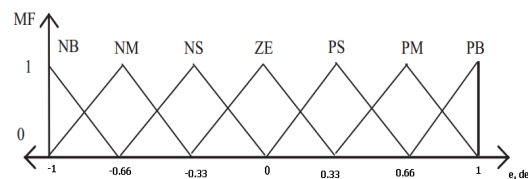


Figura 5: Funciones de membresía para las variables de entrada (Ghosh *et al.*, 2015).

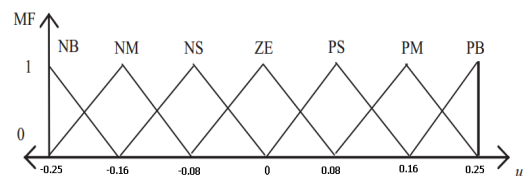


Figura 6: Funciones de membresía para la variable de salida (Ghosh *et al.*, 2015).

La superficie difusa de salida es mostrada en la figura 7. Fahmizal & Kuo (2013) presentan cuarenta y nueve reglas de control difuso, sobre las cuales se basa el presente estudio (Fahmizal & Kuo, 2013) y son presentadas en la tabla 2.

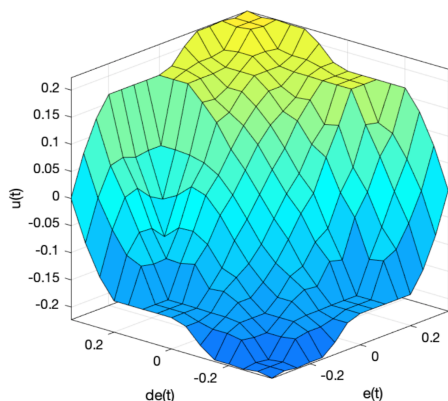


Figura 7: Superficie difusa de la salida.

Tabla 2: Reglas difusas de control

\dot{e} / e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZE
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PM	PB	PB	PB

3.3 Sintonización a través PSO

Particle Swarm Optimization es una técnica aplicada para resolver problemas de optimización de alta complejidad (Xue *et al.*, 2019). Este método se basa en el comportamiento colaborativo de sistemas biológicos que están agrupados por enjambres en la naturaleza. En este caso es utilizado para encontrar valores óptimos de sintonización para el controlador clásico PD, buscando minimizar la función de costo. El índice de desempeño escogido como función de costo es: la integral del error cuadrático (ISE). En este estudio, es necesario escoger un vector candidato, donde se encuentran los parámetros que se requieren optimizar (Biswas *et al.*, 2014). El vector de solución candidato es:

$$y = [K_p \ K_d] \quad (5)$$

Donde K_p es la componente proporcional y K_d es la componente derivativa del controlador PD. El procedimiento para llevar a cabo dicho algoritmo consiste en iterar las siguientes ecuaciones:

$$v_{ij}^{k+1} = wv_{ij}^k + c_1r_1 (pbest_{ij}^k - y_{ij}^k) + \dots + c_2r_2 (gbest_{ij}^k - y_{ij}^k) \quad (6)$$

$$y_{ij}^{k+1} = y_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \quad (7)$$

Donde i es el número de partícula, j es el número del parámetro de sintonización, k es el número de iteración, y es el vector candidato que contiene los parámetros de sintonización, v es la velocidad de la partícula, $pbest$ es la mejor solución particular, $gbest$ es la mejor solución global, r_1 y r_2 son números aleatorios entre 0 y 1, c_1 y c_2 son constantes positivas de las tasas de aprendizaje y w es el factor de restricción (Noureddine *et al.*, 2013). La función de costo f es definida como la integral del error cuadrático:

$$f = \int e_1(t)^2 dt \quad (8)$$

donde $e(t) = D_d(t) - D_m(t)$ y la función de costo f serán usadas para encontrar los parámetros de sintonización a través de la reducción del índice de desempeño ISE.

Los parámetros escogidos para la iteración de este algoritmo fueron: 20 iteraciones, 15 partículas con un rango de [0 5], $c_1 = 1.7$, $c_2 = 1.3$ y $w = 0.95$. Estos parámetros fueron escogidos a través de simulaciones buscando obtener el mejor desempeño del controlador, al final se obtuvo: $K_p = 4.023$ y $K_d = 0.12$.

3.4 Implementación de los controladores

Los controladores fueron implementados en el robot DaNI 2.0 que es compatible con el software LabView Robotics 2017. Los experimentos llevados a cabo fueron realizados mediante un computador Intel(R) Core(TM) i7-5500U CPU @ 2.40GHz con 8.00 GB de RAM. El setpoint (SP) de la distancia deseada entre el robot y la pared es enviada por el computador mediante comunicación TCP/IP al sistema embebido sbRIO-9632 y la lectura de la distancia del robot respecto a la pared es medida por medio del sensor ultrasónico. Por lo tanto, la tarjeta sbRIO-9632 calcula las acciones de control necesarias para controlar al robot DaNI 2.0 para que siga la pared. La figura 8 muestra

el esquema de funcionamiento utilizado para las pruebas presentadas.

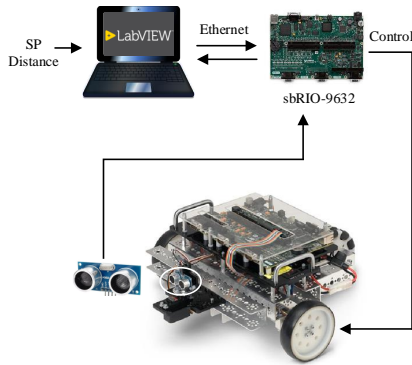


Figura 8: Esquema de funcionamiento para el robot DaNI 2.0.

Con el objetivo de que el robot móvil realice el seguimiento de pared, la técnica utilizada se conoce como Left Wall-Following presentada en (Fahmizal & Kuo, 2013), donde la velocidad de las ruedas está dada por las siguientes ecuaciones:

$$w_r = Speed_{BASE} - u(t) \quad (9)$$

$$w_l = Speed_{BASE} + u(t) \quad (10)$$

donde $Speed_{BASE}$ es la velocidad lineal promedio del robot móvil dado por el fabricante, en este caso es $0.4m/s$ y $u(t)$ es una velocidad mínima que proviene del controlador (acción de control). Finalmente, los parámetros de sintonización $K_p = 4.023$ y $K_d = 0.12$ fueron adquiridos a través del algoritmo PSO como se mostró en la sección 3.3. Los índices de desempeño para evaluar los controladores son la integral del error cuadrático y la variación total de la acción de control y son dados por las siguientes ecuaciones (Klan & Gorez, 2008):

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (11)$$

$$TV = \sum_{i=0}^{\infty} |u_{i+1} - u_i| \quad (12)$$

4 Resultados experimentales

En esta sección se describe las dos pruebas realizadas para comparar el desempeño de los controladores detallados anteriormente. La primera

prueba pone en evidencia a los controladores para que el robot pueda seguir una pared desconocida. Por otro lado, en la segunda prueba, el robot móvil debe ser capaz de seguir diferentes cambios de la distancia de seguimiento entre el robot y la pared.

4.1 Prueba de seguimiento de una pared desconocida

En esta prueba se realiza el seguimiento de una pared desconocida con una distancia de $D_d = 0.45m$ entre el robot móvil y la pared. El esquema de la prueba vista desde la parte superior es ilustrada en la figura 9.

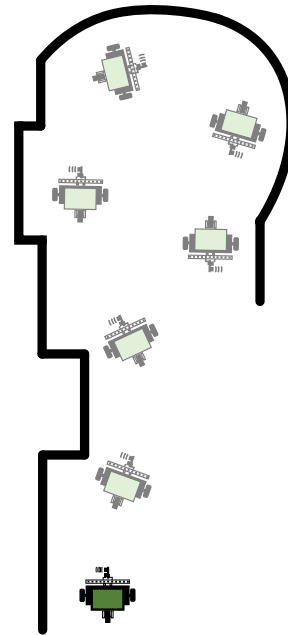
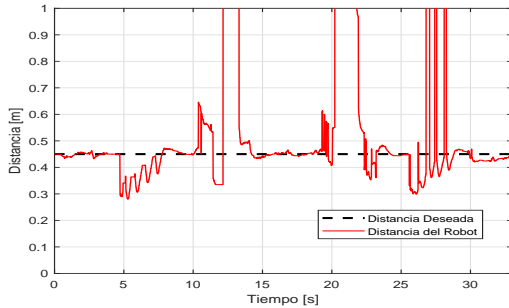


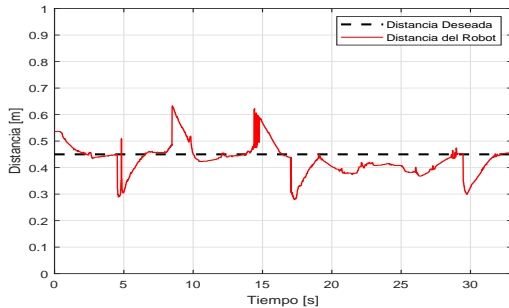
Figura 9: Esquema de prueba de una pared desconocida.

La figura 10 presenta el desempeño de cada controlador y se observa que el controlador PD muestra cambios repentinos en su comportamiento al seguir una pared desconocida tratando de mantener la distancia entre el robot y la pared constante. El experimento puede ser visto en el siguiente enlace: <https://youtu.be/gVP7zJcMH78>.

La figura 11 ilustra las acciones de control de ambos controladores en esta prueba donde las acciones del controlador PD-Difuso presentan menor magnitud. La tabla 3 muestra los índices ISE y TV para cada uno de los controladores en la prueba de seguimiento de una pared desconocida donde

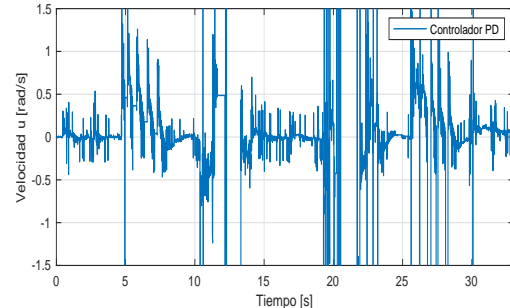


(a)

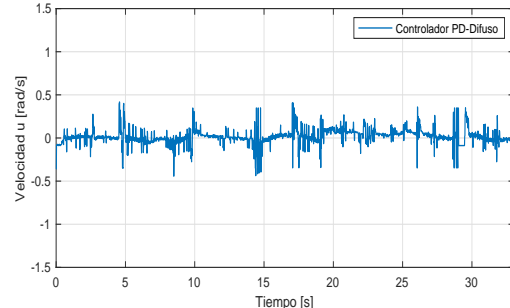


(b)

Figura 10: Prueba de seguimiento de una pared desconocida. (a) PD. (b) PD-Difuso.



(a)



(b)

Figura 11: Prueba de seguimiento de una pared desconocida - acciones de control. (a) PD. (b) PD-Difuso.

el controlador PD-Difuso presenta menores sobrepicos que el controlador clásico PD, permitiéndole aumentar la vida útil de los motores.

Tabla 3: Prueba de seguimiento de una pared desconocida.

Índice	Controlador PD	Controlador PD-Difuso
ISE	86.7941	0.8465
TV	3.871e+03	98.0678

4.2 Prueba de cambio de distancia entre el robot y la pared

En esta prueba se realizaron cambios de 0.1m y 0.2m en la distancia deseada D_d . La figura 12 ilustra los diferentes cambios que se ejecutaron en la prueba para verificar si ambos controladores logran cumplir este objetivo. El controlador PD no puede alcanzar cambios de 0.2m porque el robot móvil pierde el seguimiento al tratar de llegar a esa nueva referencia mientras que el controlador PD-Difuso no tiene problemas en seguir los cambios de

referencia realizados. Este comportamiento puede ser visto en la figura 13.

La figura 14 describe las acciones de control de ambos controladores para esta prueba donde el controlador PD-Difuso presenta acciones de control suavizadas que el controlador convencional PD.

La tabla 4 presenta los índices ISE y TV para cada uno de los controladores en la prueba de cambio de distancia entre el robot y la pared donde el desempeño del controlador PD-Difuso muestra valores más bajos en los índices ISE y TV cuando los cambios son realizados.

Tabla 4: Prueba de cambio de distancia entre el robot y la pared.

Índice	Controlador PD	Controlador PD-Difuso
ISE	9.7705	0.2458
TV	146.6890	27.9870

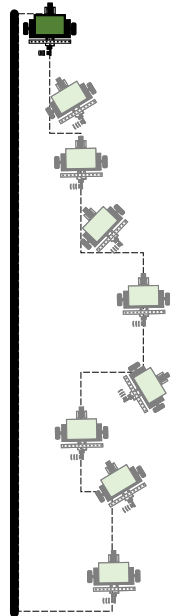
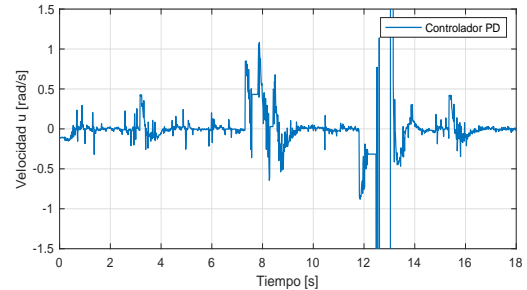
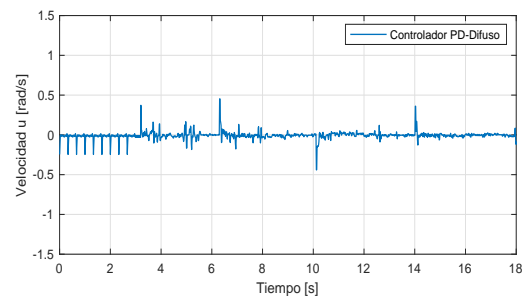


Figura 12: Prueba de cambio de distancia entre robot y pared.

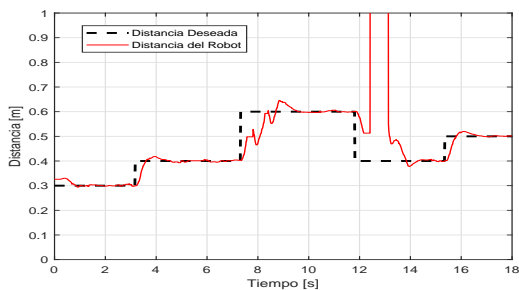


(a)

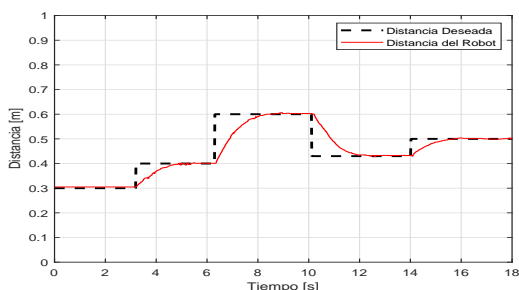


(b)

Figura 14: Prueba de cambio de distancia entre el robot y la pared - acciones de control. (a) PD. (b) PD-Difuso.



(a)



(b)

Figura 13: Prueba de cambio de distancia entre el robot y la pared. (a) PD. (b) PD-Difuso.

5 Conclusiones

En este trabajo fueron implementados dos controladores con el objetivo de realizar un seguimiento de pared. El primero se trató de un controlador PD sintonizado a través de PSO y a partir de éste, se implementó el controlador PD basado en lógica difusa, los cuales fueron comparados a través los índices ISE y TV. El controlador PD-Difuso presentó valores más bajos en ambos índices, tanto, para al seguir una pared desconocida como al seguir diferentes cambios de referencia. Al usar un controlador PD-Difuso, el robot móvil presentó una respuesta más acertada al seguir la pared y mantener una acción de control uniforme.

REFERENCIAS

Al-Mutib, K., Abdessemed, F., Faisal, M., Ramdane, H., Alsulaiman, M., & Bencherif, M. (2016). Obstacle avoidance using wall-following strategy for indoor mobile robots. In *Robotics and Manufacturing Automation (ROMA), 2016 2nd IEEE International Symposium on*, pp. 1–6. IEEE: Ipoh, Malaysia.

- Aljanaideh, K., & Demirli, K. (2010). Gain scheduling fuzzy logic controller for a wall-following mobile robot. In *Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS), 2010 Annual Meeting of the North American*, pp. 1–6. IEEE: Toronto, Canada.
- Biswas, P., Maiti, R., Kolay, A., Sharma, K. D., & Sarkar, G. (2014). Pso based pid controller design for twin rotor mimo system. *Proceedings of The 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC)*, pp. 56–60.
- Browne, A. F., & Conrad, J. M. (2017). A versatile approach for teaching autonomous robot control to multi-disciplinary undergraduate and graduate students. *IEEE Access*, 6, 25060–25065.
- Chen, C., Du, H., & Lin, S. (2017). Mobile robot wall-following control by improved artificial bee colony algorithm to design a compensatory fuzzy logic controller. In *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2017 14th International Conference on*, pp. 856–859. IEEE: Phuket, Thailand.
- Chung, T. L., Bui, T. H., Kim, S. B., Oh, M. S., & Nguyen, T. T. (2004). Wall-following control of a two-wheeled mobile robot. *KSME international journal*, 18(8), 1288–1296.
- Desouky, S. F., & Schwartz, H. M. (2009). Genetic based fuzzy logic controller for a wall-following mobile robot. In *American Control Conference, 2009. ACC'09.*, pp. 3555–3560. IEEE: St. Louis, USA.
- Fahmizal, & Kuo, C. (2013). Development of a fuzzy logic wall following controller for steering mobile robots. In *2013 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY)*, pp. 7–12. IEEE: Taipei, Taiwan.
- Ghosh, A., Sen, S., & Dey, C. (2015). Design and real-time implementation of a fuzzy pi controller on a servo speed control application. In *Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), 2015 2nd International Conference on*, pp. 384–387. IEEE: Noida, India.
- Klan, P., & Gorez, R. (2008). Pi controller design for actuator preservation. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 5820–5824.
- Li, X., & Wang, D. (2015). Behavior-based mamdani fuzzy controller for mobile robot wall-following. In *Control, Automation and Robotics (ICCAR), 2015 International Conference on*, pp. 78–81. IEEE: Singapore.
- Noureddine, B., Djamel, B., & Boudjema, F. (2013). Tuning fuzzy fractional order pid sliding-mode controller using pso algorithm for nonlinear systems. In *3rd International Conference on Systems and Control*, pp. 797–803. IEEE: Algiers, Algeria.
- Salem, F. A. (2013). Kinematics and dynamic models and control for differential drive mobile robots. *Int. J. Current Eng. Technol*, 3, 253–263.
- Van Turenout, P., & Honderd (1992). Wall-following control of a mobile robot. In *Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference on*, pp. 280–285. IEEE: Nice, France.
- Villacres, J., Herrera, M., Sotomayor, N., & Camacho, O. (2017). A fuzzy sliding mode controller from a reduced order model: A mobile robot experimental application. In *2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, pp. 0674–0678. IEEE: Barcelona, Spain.
- Xue, H., Bai, Y., Hu, H., Xu, T., & Liang, H. (2019). A novel hybrid model based on tviv-pso-gsa algorithm and support vector machine for classification problems. *IEEE Access*, 7, 27789–27801.