

PROPUESTA PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES EN PEQUEÑAS INDUSTRIAS USANDO SISTEMAS EMBEBIDOS DE BAJO COSTO

Proposal for Industrial Process Automation in Small Industries Using Low-cost Embedded Systems

Claudia Milena González Arbeláez ¹  · Diego Fernando Ramírez Jiménez ² 

¹Programa de Tecnología en Instrumentación Electrónica, Universidad del Quindío, Armenia – Colombia

²Programa de Ingeniería Electrónica, Universidad del Quindío, Armenia – Colombia

¹cmgonzalez@uniquindio.edu.co, ²dframirez@uniquindio.edu.co

RESUMEN

La automatización de procesos industriales en pequeñas y medianas empresas enfrenta grandes desafíos debido a los altos costos de equipos comerciales y a su limitada capacidad de adaptación tecnológica. En el departamento del Quindío – Colombia, pequeñas empresas productoras de alimentos operan líneas de producción con procesos predominantemente manuales o semiautomatizados, afectando su nivel de competitividad y capacidad de escalamiento. En este trabajo se propone como alternativa a las soluciones comerciales, el diseño y la implementación de un controlador difuso usando sistemas embebidos de bajo costo y herramientas de inteligencia artificial, para regular la velocidad en una banda transportadora dentro de la línea de empaque en una empresa del sector agroindustrial de la región. La metodología propuesta para el desarrollo de la investigación se centró en cuatro etapas: revisión de la literatura, diseño de la arquitectura hardware-software para el controlador y el sistema embebido, implementación del controlador difuso en la planta de prueba y validación experimental de los controladores desarrollados. Los resultados obtenidos evidenciaron que la implementación de controladores digitales a través de sistemas embebidos constituye una alternativa viable para que pequeñas empresas de la región puedan introducir nuevas tecnologías a sus procesos, generando valor agregado en sus productos y contribuyendo a la transformación tecnológica empresarial local mediante la articulación entre el sector productivo y la universidad.

Palabras clave:

automatización industrial, Agroindustria regional, control difuso, Inteligencia Artificial, sistemas embebidos de bajo costo, transferencia tecnológica

FECHA DE RECEPCIÓN:

27 de mayo de 2026

FECHA DE ACEPTACIÓN:

15 de julio de 2026

FECHA DE PUBLICACIÓN:

03 de agosto de 2026



ABSTRACT

The automation of industrial processes in small and medium-sized enterprises (SMEs) faces significant challenges due to the high cost of commercial equipment and their limited capacity for technological adaptation. In the Quindío department of Colombia, small food producers operate production lines with predominantly manual or semi-automated processes, impacting their competitiveness and scalability. This paper proposes, as an alternative to commercial solutions, the design and implementation of a fuzzy logic controller using low-cost embedded systems and artificial intelligence tools to regulate the speed of a conveyor belt within the packaging line of a company in the region's agro-industrial sector. The proposed research methodology focuses on four stages: literature review, design of the hardware-software architecture for the controller and the embedded system, implementation of the fuzzy logic controller in the test plant, and experimental validation of the developed controllers. The results obtained demonstrated that the implementation of controllers through embedded systems constitutes a viable alternative for small businesses in the region to introduce new technologies into their processes, generating added value in their digital products and contributing to local business technological transformation through collaboration between the productive sector and the university.

Keywords:

industrial automation, regional agro-industry, fuzzy control, Artificial Intelligence, low-cost embedded systems, technology transfer

INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico de diferentes sectores productivos en América Latina se centra en la capacidad que tienen las pequeñas y medianas empresas (PYMES) para incorporar tecnologías de automatización en sus procesos productivos. En Colombia, las PYMES representan más del 95% de las empresas legalmente constituidas y generan aproximadamente el 80% del empleo en todo el país; sin embargo, su capacidad de producción ha crecido a tasas anuales inferiores al 1% durante la última década, valores que se encuentran por debajo del promedio de las economías en desarrollo (OECD et al., 2024).

Respecto a los sistemas embebidos de control difuso, (Pamungkas et al., 2023) implementaron un controlador por lógica difusa directamente sobre el procesador del ESP32 con transmisión inalámbrica de datos vía Wi-Fi, confirmando la viabilidad computacional de esta plataforma para algoritmos de inferencia difusa en tiempo real. (Martínez-González et al., 2025) desarrollaron un controlador difuso por inferencia de Mamdani en un microcontrolador para aplicaciones de combustión industrial. (Torres-Salinas et al., 2022) y (Rodríguez-Abreo et al., 2024) emplearon algoritmos genéticos para optimizar las funciones de membresía en controladores difusos. (Khater et al., 2025) a novel adaptive fuzzy controller based on deep reinforcement learning (DRL integraron aprendizaje por refuerzo profundo con lógica difusa en un servosistema electrohidráulico como alternativa a los controladores difusos, PID y difuso-PI convencionales.

El objetivo del presente trabajo fue el diseño y la validación experimental de un sistema de control difuso embebido para la regulación de velocidad en una banda transportadora, comparando cuantitativamente el desempeño de un controlador difuso sintonizado manualmente frente a un controlador cuyos parámetros son optimizados mediante algoritmos de optimización, con el fin de integrar soluciones de bajo costo como alternativa para la automatización de procesos en pequeñas empresas agroindustriales de la ciudad de Armenia, Quindío. La propuesta surgió desde los laboratorios de los programas de Tecnología en Instrumentación Electrónica e Ingeniería Electrónica de la Universidad del Quindío, en concordancia con el rol que las universidades desempeñan como agentes de transferencia tecnológica a empresas que carecen de investigación y desarrollo (Padilla Bejarano et al., 2023). El trabajo está estructurado con la sección de Desarrollo donde se presenta el marco teórico-experimental y los resultados esperados. Finalmente, se formulan las principales conclusiones del trabajo realizado.

DESARROLLO

Materiales

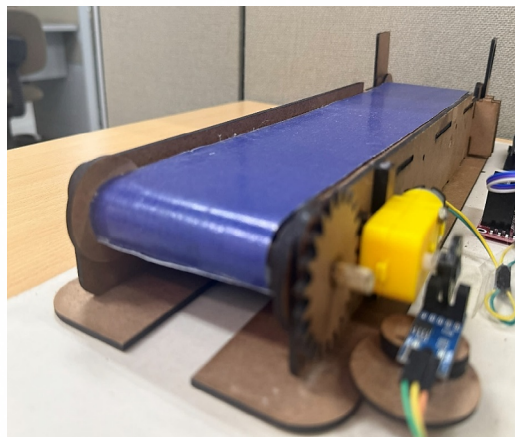
Sistema utilizado

Para el trabajo realizado, en la tabla 1 se resumen las principales características a nivel de hardware utilizado. Con estos elementos se desarrolló el prototipo de banda transportadora presentado en la figura 1.

Tabla 1
Especificaciones de los componentes del sistema

Componente	Especificación
Sistema embebido	Arduino UNO, ATmega328P, 16 MHz, 2 KB SRAM
Motor DC	12 V, 250 RPM con caja reductora
Encoder óptico	360 PPR, incremental
Driver de motor	L298N, doble puente H
Banda transportadora	PVC, 60 × 10 cm, con rodillos
Fuente de alimentación	12 V / 5 A regulada

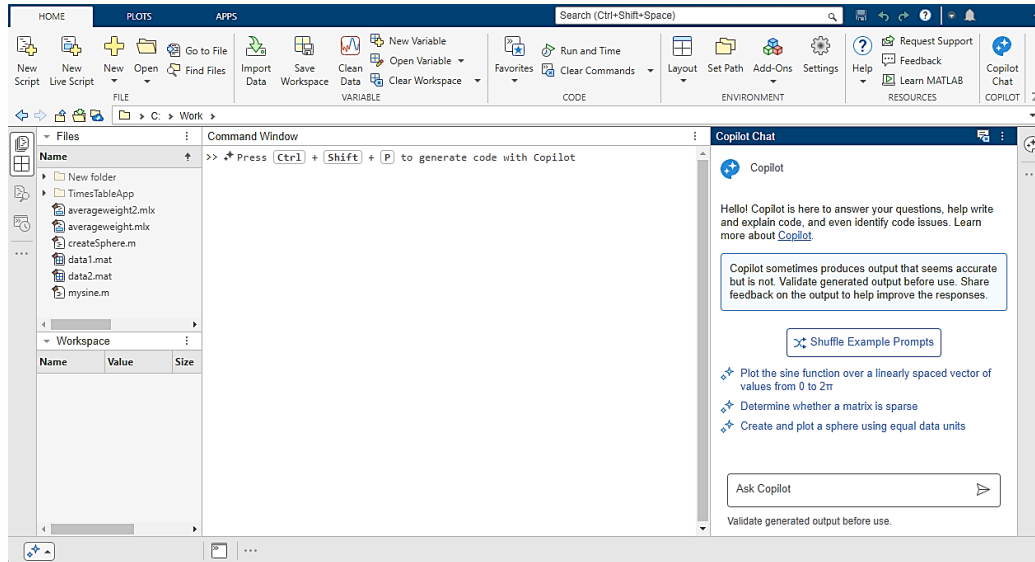
Figura 1
Prototipo de banda transportadora utilizada



MATLAB R2025b

Desarrollado por MathWorks, Inc., la interfaz de usuario de la versión R2025b es mostrada en la figura 2. Equipada con diferentes Toolboxes para el desarrollo de sistemas de control, incluyendo el Fuzzy Logic Toolbox, MATLAB se utilizó para el diseño, simulación y validación del controlador difuso propuesto. Adicionalmente, se utilizó para realizar la comunicación por puerto serial entre el controlador difuso y el prototipo de banda transportadora a través del Arduino UNO. Otra característica importante de esta versión es que cuenta con la integración de Copilot, una inteligencia artificial que actúa como asistente y ayuda a explicar código, identificar errores y optimizar algoritmos.

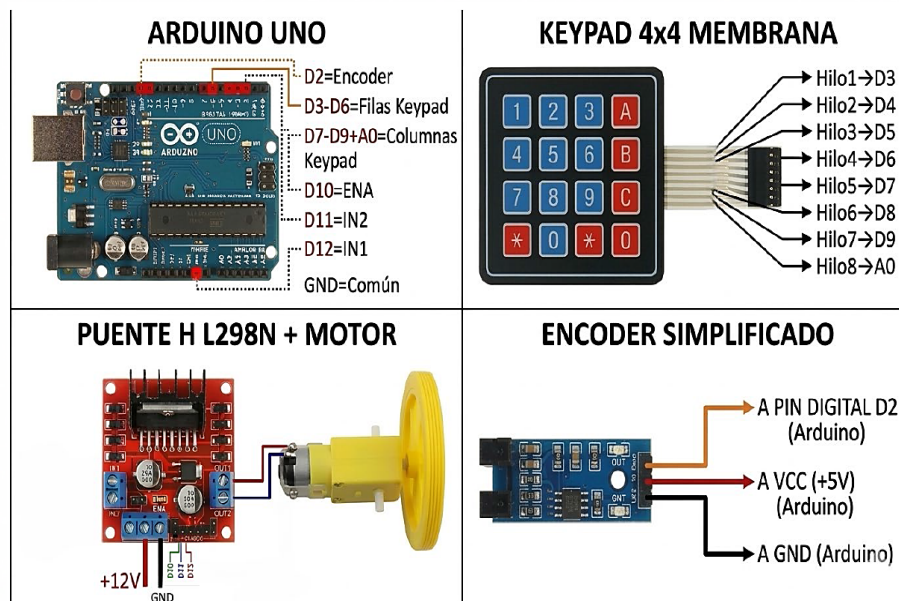
Figura 2
Interfaz gráfica de MATLAB R2025b. Fuente: MathWorks, Inc.



Métodos

La arquitectura del sistema implementado sigue un esquema distribuido en lazo cerrado donde el Arduino UNO actúa como nodo de adquisición de datos, y MATLAB realiza el procesamiento del controlador difuso. La comunicación entre ambos se realiza por protocolo serial USB a 115200 baudios y en la figura 3 se presenta la distribución de pines utilizada para cada uno de los dispositivos que integran el sistema.

Figura 3
Distribución de pines para la conexión del sistema propuesto. Fuente: Los autores.



Programa en Arduino UNO

El código implementado en el Arduino UNO se desarrolló en lenguaje C/C++ usando el IDE de Arduino. En el algoritmo se implementaron tres funciones principales: lectura de la velocidad, lectura del teclado y recepción de datos desde MATLAB. En la función se configuraron los pines de salida para el controlador L298N (pines 10, 11 y 12), el pin de entrada con resistencia de pull-up interna para el encoder óptico (pin 2), se inicializa la comunicación serial a 115200 baudios, y se registra la rutina de servicio de interrupción.

Diseño del controlador difuso en MATLAB

El controlador difuso se diseñó en MATLAB R2025b utilizando el Fuzzy Logic Toolbox, mediante la función `fuzzy`. La señal de error sobre la cual actúa el controlador es velocidad de la banda, definida como:

$$e(k) = r(k) - \hat{y}(k) \quad (1)$$

donde $r(k)$ es la velocidad de referencia en RPM ingresada a través del teclado matricial (limitada a un máximo de 60 RPM), y $\hat{y}(k)$ es la velocidad en RPM estimada del motor DC:

$$\hat{y}(k) = 0,4 * y(k) + 0,6 * \hat{y}(k-1) \quad (2)$$

Al error se le realiza un proceso de filtrado antes ingresar al sistema difuso:

$$e_f(k) = 0,5 * e_f(k-1) + 0,5 * e(k) \quad (3)$$

Posteriormente, se definieron tres conjuntos difusos para la variable de entrada y salida *PWM_Change*, con funciones de membresía trapezoidales y triangulares diseñados a partir del análisis de la dinámica del motor DC. Los parámetros definidos para las funciones de membresía de entrada y de salida son presentados en la tabla 2.

Luego de tener las funciones de membresía, se definieron las reglas de inferencia a través de las variables lingüísticas como se muestra a continuación:

```
fis=addRule(fis,["If Error is Negative then PWM_Change is Decrease
```

```
fis=addRule(fis,["If Error is Zero then PWM_Change is Hold"])]
```

```
fis=addRule(fis,["If Error is Positive then PWM_Change is Increase"])]
```

Tabla 2
Funciones de membresía definidas para el controlador difuso

Variable	Conjunto difuso	Tipo	Parámetros
Error	Negative	trapmf	[-210, -200, -80, -10]
Error	Zero	trimf	[-60, 0, 60]
Error	Positive	trapmf	[10, 80, 200, 210]
PWM_Change	Decrease	trimf	[-25, -15, 0]
PWM_Change	Hold	trimf	[-6, 0, 6]
PWM_Change	Increase	trimf	[0, 15, 25]

Posteriormente, la defuzzificación se realiza mediante el método del centroide:

$$u^* = \frac{\int u * \mu(u) du}{\int \mu(u) du} \quad (4)$$

donde u^* es el valor de salida estimado, u es la variable de salida y $\mu(u)$ es la función de membresía agregada. La evaluación del sistema difuso se realiza mediante la función `evalfis()` de MATLAB. La ley de control incremental que actualiza el valor del PWM en cada ciclo se formula como:

$$PWM(k) = PWM(k-1) + Kg * evalfis(fis, e_f(k)) \quad (5)$$

donde $Kg=0.4$ es la ganancia de ajuste que escala la salida del sistema difuso para adecuarla a la dinámica del motor. El valor resultante se limita al rango operativo [110,230], donde el límite inferior corresponde al voltaje mínimo para vencer la inercia estática del motor con carga.

Optimización por algoritmo genético

Para obtener el controlador difuso optimizado, se empleó la función `ga()` del Global Optimization Toolbox de MATLAB R2025b. El algoritmo genético optimiza los parámetros de las funciones de membresía del controlador difuso para minimizar el índice ITAE (Integral of Time-weighted Absolute Error).

$$ITAE = \sum k * \Delta t * |e(k)| \quad (6)$$

donde k es el índice de muestra, $\Delta t=0.5$ es el tiempo de muestreo del sistema, y $e(k)$ es el error de velocidad. El índice ITAE se seleccionó

porque permite penalizar errores persistentes en el tiempo, favoreciendo a controladores con tiempos de establecimiento cortos y error en régimen permanente (Joseph et al., 2022). El AG codifica los parámetros de las funciones de membresía como un vector de números reales.

RESULTADOS

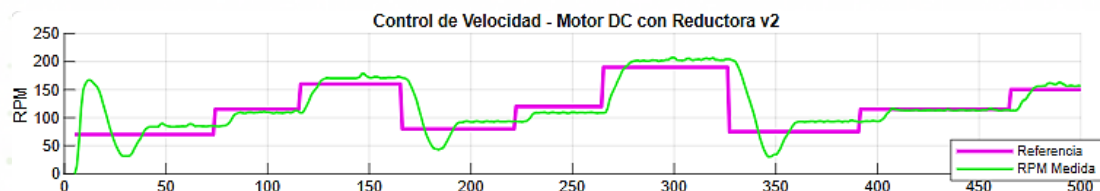
Validación experimental

La validación experimental se diseñó como un estudio comparativo controlado en el que ambos controladores se evaluaron bajo condiciones similares en la banda transportadora del laboratorio de la Universidad del Quindío. Se definieron dos tipos de ensayos: en el primero, se aplicaron escalones para la velocidad con diferentes valores de referencia. En el segundo se introdujo una carga a la banda para analizar la respuesta de los controladores frente a las perturbaciones presentadas. Cada ensayo se repitió cinco veces para cada controlador, para un total de 20 ejecuciones experimentales.

Respuesta del controlador difuso manual

La ejecución del controlador difuso sintonizado manualmente se realizó a partir de las funciones de membresía descritas en la tabla 2. Los resultados obtenidos para el seguimiento de referencia se muestran en la figura 4. En la respuesta del sistema se observa que al inicio apareció un sobreimpulso, cuya magnitud se acerca a las 170 RPM. Este comportamiento se atribuye a la naturaleza del controlador e inercia del motor.

Figura 4
Respuesta del controlador difuso sintonizado de manera experimental



El proceso de optimización del controlador difuso con algoritmos genéticos (AG) inició con la identificación de la planta a través de variaciones de respuesta al escalón, obteniendo un modelo de primer orden con ganancia estática y constante de tiempo. El algoritmo genético aplicado convergió en 51 generaciones (627,3 s de ejecución) con una población de 100 individuos y 5 restricciones lineales. En la tabla 3 se presentan los parámetros de las funciones de membresía obtenidos en ambos métodos. El AG redistribuyó las funciones de membresía de forma asimétrica. En la tabla 4 se presentan las métricas de desempeño obtenidas para los controladores implementados. La optimización por AG se realizó teniendo en cuenta la estructura presentada en la figura 5.

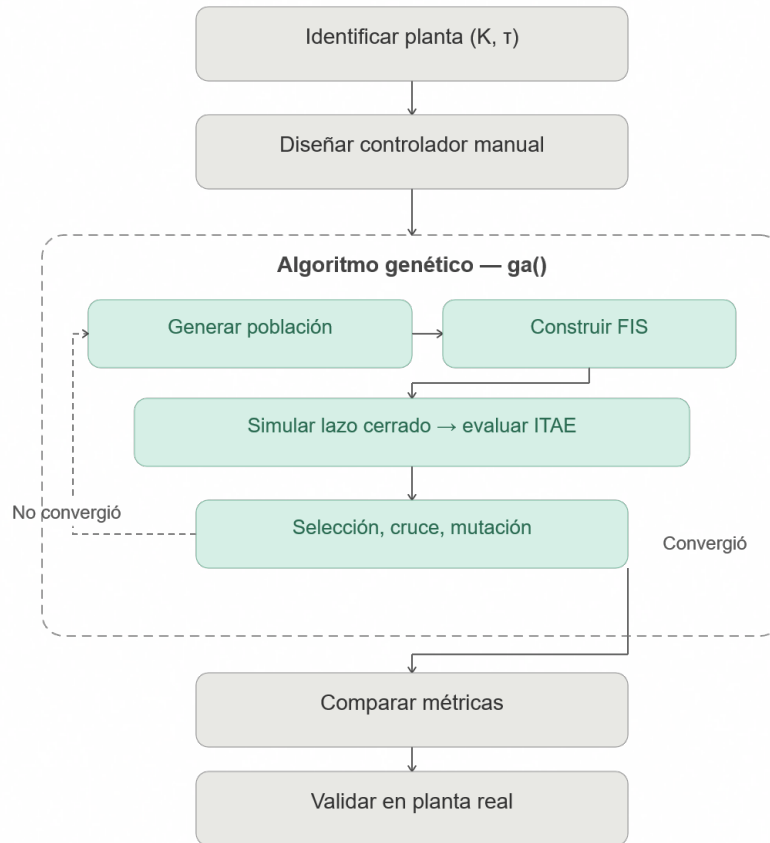
Tabla 3
Parámetros de las funciones de membresía: experto vs. AG

Variable	Parámetro	Manual	AG
Entrada: Error [-200, 200] RPM			
Negative (trapmf)	Meseta → pendiente	[-210, -200, -80, -10]	[-210, -200, -120, -3]
Zero (trimf)	Izq, centro, der	[-60, 0, 60]	[-80, 0, 80]
Positive (trapmf)	Pendiente → meseta	[10, 80, 200, 210]	[9.3, 30, 200, 210]
Salida: PWM_Change [-10, 10]			
Decrease (trimf)	Centro	-6	-3
Hold (trimf)	Izq, centro, der	[-3, 0, 3]	[-4.8, 0, 1.0]
Increase (trimf)	Centro	6	3
Ganancia			
Kg	Fijo (no optimizado)	0.4	0.4

Tabla 4
Métricas de desempeño comparativas para los controladores

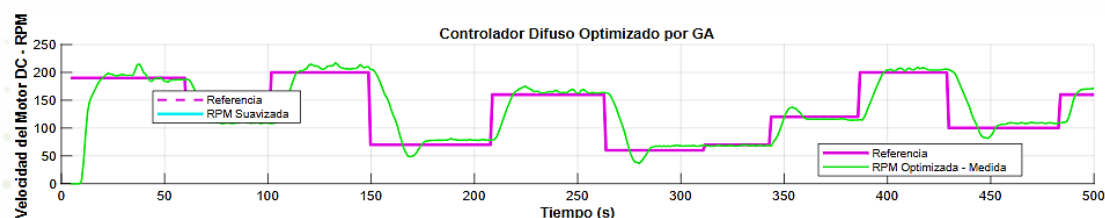
Métrica	Controlador manual	Controlador AG	Mejora
ITAE	48956,44	36691,85	25,1 %
RMSE (RPM)	26,24	21,60	17,7 %
MAE (RPM)	23,15	19,51	15,7 %

Figura 5
Proceso de optimización del controlador usando AG



En la tabla 4, RMSE (Root Mean Square Error) o raíz del error cuadrático medio, sirve para detectar si el controlador tiene picos de error grandes y se expresa en las mismas unidades de la variable (RPM). El MAE (Mean Absolute Error) o error absoluto medio es simplemente el promedio de los valores absolutos del error, tratando a todos los errores por igual. El ITAE (Integral of Time-weighted Absolute Error) o integral del error absoluto ponderado por el tiempo. La clave es que penaliza más los errores que persisten en el tiempo, que es exactamente lo que se quiere evaluar en los controladores. Finalmente, la respuesta del controlador optimizado por AG es presentada en la figura 6.

Figura 6
Respuesta del controlador difuso optimizado con AG. Fuente: Los autores.



CONCLUSIONES

Se implementó un sistema de control difuso en lazo cerrado con arquitectura distribuida (Arduino UNO + MATLAB), de bajo costo, capaz de regular la velocidad de una banda transportadora en el rango de 0 a 200 RPM. El Arduino UNO cumple las funciones de adquisición y actuación, mientras que MATLAB ejecuta el controlador difuso tipo Mamdani mediante la función `evalfis()` y gestiona la comunicación serial entre ambos dispositivos.

El algoritmo genético, ejecutado mediante la función `ga()` del Global Optimization Toolbox de MATLAB R2025b con 100 individuos, 51 generaciones y función de aptitud ITAE, encontró parámetros de funciones de membresía que superaron al controlador manual en todas las métricas evaluadas: reducción del 25,1 % en ITAE, 17,7 % en RMSE y 15,7 % en MAE. La clave del éxito fue mantener la ganancia fija y optimizar únicamente las formas de las funciones de membresía con restricciones de solapamiento.

La experiencia de desarrollo evidenció que la brecha entre el modelo simulado y la planta real constituye el principal desafío de la optimización fuera de línea. Los parámetros que minimizan el ITAE en simulación no garantizan un desempeño satisfactorio en la planta física si el modelo no captura adecuadamente las no linealidades que se puedan presentar en el sistema, la fricción de la banda y las características del encoder. Esto refuerza la necesidad de una identificación apropiada como paso previo a la optimización.

REFERENCIAS

- Joseph, S. B., Dada, E. G., Abidemi, A., Oyewola, D. O., & Khammas, B. M. (2022). Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: Review, approaches and open problems. *Heliyon*, 8(5), e09399. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09399>
- Khater, A. A., Fekry, M., El-Bardini, M., & El-Nagar, A. M. (2025). Deep reinforcement learning-based adaptive fuzzy control for electro-hydraulic servo system. *Neural Computing and Applications*, 37(30), 24607-24624. <https://doi.org/10.1007/s00521-024-10741-x>
- Martínez-González, A., Moreno-Hernández, D., Zamarripa-Ramírez, J. C. I., & Ortega-Martínez, O. F. (2025). Design and Implementation of a Fuzzy Logic Algorithm Embedded in a Microcontroller for Combustion Applications. *International Journal of Fuzzy Systems*. <https://doi.org/10.1007/s40815-025-02052-7>
- OECD, CAF Development Bank of Latin America, & Latin American and Caribbean Economic System. (2024). Índice de Políticas para PyMEs: América Latina y el Caribe 2024: Hacia una recuperación inclusiva, resiliente y sostenible. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/807e9eaf-es>
- Padilla Bejarano, J. B., Zartha Sossa, J. W., Ocampo-López, C., & Ramírez-Carmona, M. (2023). University Technology Transfer from a Knowledge-Flow Approach—Systematic Literature Review. *Sustainability*, 15(8), 6550. <https://doi.org/10.3390/su15086550>
- Pamungkas, Y., Cahya Romadhona, N., Satria Alam Syahputra, Z., Nazwa Rayhani, K., Sakti Wibowo, A., & Akbar Parinduri, F. (2023). Implementation of Fuzzy Logic Control on the ESP32 Microcontroller for an Automatic Infusion Monitoring System. 2023 International Conference on Modeling & E-Information Research, Artificial Learning and Digital Applications (ICMERALDA), 289-294. <https://doi.org/10.1109/ICMERALDA60125.2023.10458205>
- Rodríguez-Abreo, O., Rodríguez-Reséndiz, J., García-Cerezo, A., & García-Martínez, J. R. (2024). Fuzzy logic controller for UAV with gains optimized via genetic algorithm. *Heliyon*, 10(4), e26363. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26363>
- Torres-Salinas, H., Rodríguez-Reséndiz, J., Cruz-Miguel, E., & Ángeles-Hurtado, L. (2022). Fuzzy Logic and Genetic-Based Algorithm for a Servo Control System. *Micromachines*, 13(4), 586. <https://doi.org/10.3390/mi13040586>