

Automatización Segura de Carga Industrial: Aplicación de Control Borroso en Grúas

Santervás, P., Chicaiza, W.*, Escaño, J.M.

*Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla,
Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, Sevilla, España.*

To cite this article: Santervás, P., Chicaiza, W., Escaño, J.M. 2025. Safe Industrial Load Automation: Application of Fuzzy Control in Cranes. XX Simposio CEA de Control Inteligente, Huelva (Spain), 2025.

Resumen

La manipulación manual de cargas pesadas en entornos industriales representa un riesgo significativo para la seguridad y limita la eficiencia operativa. Este trabajo presenta el diseño, simulación y validación de un controlador basado en lógica borrosa (FLC) aplicado a un sistema de puente grúa automatizado, con el objetivo de mejorar la seguridad y la robustez ante condiciones variables de carga. Se desarrolla un modelo dinámico no lineal detallado del sistema grúa-carga utilizando el formalismo de Euler-Lagrange, validado mediante simulaciones en MATLAB/Simulink y Factory IO. Se implementan y comparan tres estrategias de control: un controlador clásico en cascada PID-PI, un controlador borroso basado en estructura PID y un controlador borroso fundamentado en conocimiento experto. Los resultados de simulación demuestran que el control borroso, especialmente el basado en conocimiento experto, supera al enfoque convencional en términos de estabilidad, adaptabilidad a variaciones de masa y amortiguación de oscilaciones. Además, el FLC propuesto se implementa con éxito en un autómata programable de bajo coste (Schneider TM221), mediante programación en texto estructurado y comunicación Modbus TCP/IP, demostrando la viabilidad de aplicar control inteligente en entornos industriales reales con recursos computacionales limitados.

Palabras clave: Control borroso, Automatización industrial, Controladores lógicos programables, Sistemas mecatrónicos

Safe Industrial Load Automation: Application of Fuzzy Control in Cranes

Abstract

The manual handling of heavy loads in industrial environments poses significant safety risks and limits operational efficiency. This paper presents the design, simulation, and validation of a fuzzy logic controller (FLC) for the automation of an overhead crane system, aimed at improving safety and robustness under variable load conditions. A detailed nonlinear dynamic model of the crane-load system is developed using the Euler-Lagrange formalism and validated through simulations in MATLAB/Simulink and Factory IO. Three control strategies are implemented and compared: a classical PID-PI cascade controller, a fuzzy controller based on PID structure, and an expert-knowledge-based fuzzy controller. Simulation results demonstrate that fuzzy control, particularly the expert-based strategy, outperforms conventional control in terms of stability, adaptability to mass variations, and oscillation damping. Furthermore, the proposed FLC is successfully implemented on a low-cost PLC (Schneider TM221) using structured text programming and Modbus TCP/IP communication, proving the feasibility of deploying intelligent control in real-world industrial settings with constrained computational resources.

Keywords: Fuzzy Control, Industrial Automation, Programmable Logic Controllers, Mechatronic systems

1. Introducción

La manipulación manual de cargas en entornos industriales sigue representando un riesgo importante para la seguridad de los operarios y limita la eficiencia operativa. Según los datos del Reino Unido (HSE, 2023), aproximadamente el 17 % de las lesiones laborales no mortales derivan de estas actividades Health and Safety Executive (2025). A nivel global, la Organización Internacional del Trabajo (OIT) estima que cada año se producen unos 374 millones de accidentes laborales no mortales y cerca de 2,8 millones de muertes, con un impacto económico próximo al 4 % del PIB mundial International Labour Organization (2017).

La automatización de procesos de carga y transporte se ha convertido en una estrategia prioritaria para mitigar estos riesgos y mejorar la productividad. Aunque los controladores PID han sido tradicionalmente la solución más extendida en grúas industriales por su sencillez y robustez en sistemas lineales, las características no lineales de las cargas suspendidas —como la variabilidad de masa y el balanceo— limitan su eficacia. En este contexto, el control inteligente mediante lógica borrosa ha sido objeto de creciente atención.

Diversos estudios han demostrado el potencial de la lógica borrosa para mejorar la estabilidad y adaptabilidad del control en grúas industriales. Así, en Ranjbari et al. (2015) se desarrolló un controlador borroso para minimizar el balanceo de la carga, mientras que Trabia et al. (2006) propuso un enfoque anti-swing adaptativo para grúas bidimensionales, ambos mostrando mejoras significativas respecto a técnicas convencionales.

Sin embargo, gran parte de las implementaciones publicadas se han validado únicamente en entornos de simulación o sobre hardware de control de altas prestaciones. A diferencia de estos trabajos Szytko and Smoczek (2008); Omar et al. (2004); Almutairi and Zribi (2016), la principal aportación de este estudio radica en la comparación experimental de estrategias PID y borrosas, ambas implementadas en un PLC de bajo coste, evaluando su rendimiento bajo variaciones de carga reales.

Este trabajo demuestra la viabilidad de aplicar controladores difusos en entornos industriales mediante su integración práctica en un autómatas económico (Schneider TM221), evidenciando que el control inteligente es factible incluso bajo restricciones de coste y capacidad computacional.

El artículo se estructura como sigue. La Sección 2 describe el sistema objeto de estudio. La Sección 3 presenta los modelos dinámicos empleados para el diseño de controladores. La Sección 4 detalla las estrategias de control y su validación experimental. Finalmente, la Sección 5 recoge las conclusiones y posibles líneas futuras.

2. Caso de estudio

El presente estudio se centra en el análisis de viabilidad de un sistema automatizado de transporte de lotes de chapas metálicas en una planta industrial real. Actualmente, el desplazamiento de los lotes se realiza manualmente mediante transpaletas, lo que limita la eficiencia logística, reduce el aprovechamiento del espacio y supone riesgos laborales.

Como solución, se propone la incorporación de un puente grúa automatizado capaz de realizar el ciclo completo de trans-

porte desde el almacén hasta la máquina de procesamiento, incluyendo una celda intermedia de desacoplamiento manual. La operación es supervisada mediante una interfaz HMI (Human-Machine Interface), conectada al PLC industrial, que permite seleccionar el destino de cada lote y visualizar en tiempo real el estado del sistema.

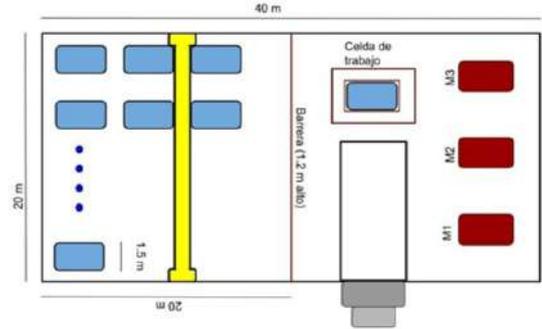


Figura 1: Layout de la solución planteada con puente grúa automático.

El *layout* funcional de la solución propuesta se muestra en la Figura 1, donde se detalla la distribución de zonas de almacenamiento, área operativa y máquina receptora. Aunque el acceso directo de los vehículos de suministro al área operativa constituye una limitación a considerar en otras plantas, el diseño permite una operación robusta, segura y optimizada en el espacio disponible.

Sobre este planteamiento industrial se ha desarrollado un modelo dinámico del sistema, representativo de su comportamiento físico, sobre el cual se realizan las simulaciones de control. El presente trabajo evalúa, mediante simulación, el desempeño comparativo de dos estrategias de control -PID clásico y lógica difusa Mamdani- antes de su posible implementación real en el sistema.

3. Modelado del sistema

La construcción de un modelo dinámico preciso resulta esencial para el análisis, diseño y validación de estrategias de control en sistemas industriales complejos. En este trabajo se desarrolla un modelo físico del sistema grúa-carga utilizando el enfoque de Euler-Lagrange (Ranjbari et al., 2015; Nguyen et al., 2022), con el fin de capturar las principales dinámicas que influyen en el movimiento del carro y el péndulo formado por la carga suspendida.

El sistema se modela en coordenadas bidimensionales, considerando como variables generalizadas la posición horizontal del carro (x) y el ángulo de oscilación de la carga respecto a la vertical (θ). Se asume que la cuerda es inelástica, la carga puntual y el movimiento restringido al plano. A partir de la formulación lagrangiana se obtienen las siguientes ecuaciones no lineales:

$$(M + m)\ddot{x} + mL\ddot{\theta} \cos(\theta) - mL\dot{\theta}^2 \sin(\theta) + \mu\dot{x} = F \quad (1)$$

$$mL^2\ddot{\theta} + mL\ddot{x} \cos(\theta) + mgL \sin(\theta) = 0 \quad (2)$$

donde M representa la masa del carro, m la masa de la carga, L la longitud de la cuerda, μ el coeficiente de fricción y F la fuerza aplicada.

3.1. Linealización para el diseño PID

Con el objetivo de facilitar el diseño del controlador PID, se realiza una linealización en torno al equilibrio, aplicando las aproximaciones $\cos(\theta) \approx 1$, $\sin(\theta) \approx \theta$ y $\dot{\theta}^2 \approx 0$, obteniéndose:

$$(M + m)\ddot{x} + mL\ddot{\theta} - \mu\dot{x} = F \quad (3)$$

$$mL^2\ddot{\theta} + mL\ddot{x} + mgL\theta = 0 \quad (4)$$

A partir de aquí se deriva una representación en espacio de estados para el diseño del PID:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (5)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (6)$$

donde el vector de estado es $x(t) = [x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}]^T$, y las matrices A, B, C, D se obtienen directamente de los parámetros físicos.

Este modelo linealizado se emplea exclusivamente para el ajuste del controlador PID en condiciones nominales. No obstante, para el diseño del controlador difuso y la validación final de ambas estrategias, se utilizará siempre el modelo completo no lineal.

3.2. Modelo no lineal completo para validación

A partir de la dinámica completa, se obtiene el siguiente sistema no lineal expresado en variables de estado (Nguyen et al., 2022):

$$\dot{\chi}_1 = \chi_2 \quad (7)$$

$$\dot{\chi}_2 = \frac{mg \sin \chi_3 \cos \chi_3 + mL\chi_4^2 \sin \chi_3 - \mu\chi_2 + F}{(M + m) - m \cos^2 \chi_3} \quad (8)$$

$$\dot{\chi}_3 = \chi_4 \quad (9)$$

$$\dot{\chi}_4 = \frac{(M + m)g \sin \chi_3 + mL\chi_4^2 \sin \chi_3 \cos \chi_3}{[m \cos^2 \chi_3 - (M + m)]l} + \frac{-\mu\chi_2 \cos \chi_3 + F \cos \chi_3}{[m \cos^2 \chi_3 - (M + m)]l} \quad (10)$$

Estas ecuaciones pueden reescribirse en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{\chi}_1 \\ \dot{\chi}_2 \\ \dot{\chi}_3 \\ \dot{\chi}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \\ \chi_3 \\ \chi_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \\ 0 \\ b_2 \end{bmatrix} F \quad (11)$$

Las expresiones completas de los coeficientes a_{ij} y b_i se omiten por brevedad, pudiendo consultarse su desarrollo completo a partir de Nguyen et al. (2022).

Aunque el sistema es inherentemente no lineal, la notación matricial utilizada permite expresar de forma estructurada y compacta las relaciones dinámicas entre las variables de estado, facilitando su implementación en entornos de simulación y el desarrollo de estrategias de control inteligente.

Este modelo completo constituye la base sobre la cual se validan todas las estrategias de control propuestas en el presente estudio.

4. Control del sistema

4.1. Implementación de controlador PID-PI en cascada

Con el objetivo de estabilizar la posición del carro y reducir la oscilación de la carga, se implementa una arquitectura de control en cascada basada en un controlador PID externo y un PI interno. Esta estructura permite un desacoplamiento parcial entre las dinámicas del sistema, mejorando la respuesta transitoria y la capacidad de rechazo ante perturbaciones.

Para el diseño de los controladores se emplean modelos linealizados obtenidos a partir del sistema no lineal desarrollado anteriormente. Cabe destacar que la sintonización de ambos controladores se realiza exclusivamente sobre el modelo linealizado, mientras que las posteriores simulaciones de validación se efectúan en todo momento sobre el modelo dinámico completo no lineal, garantizando así la evaluación bajo condiciones realistas. La planta se descompone en dos lazos: un lazo interno encargado de regular la velocidad del carro, y un lazo externo cuya variable controlada es la posición horizontal.

La Figura 2 muestra el modelo lineal obtenido, el cual representa de forma aproximada la respuesta del sistema bajo condiciones nominales y se emplea como referencia en la etapa de diseño de controladores PID.

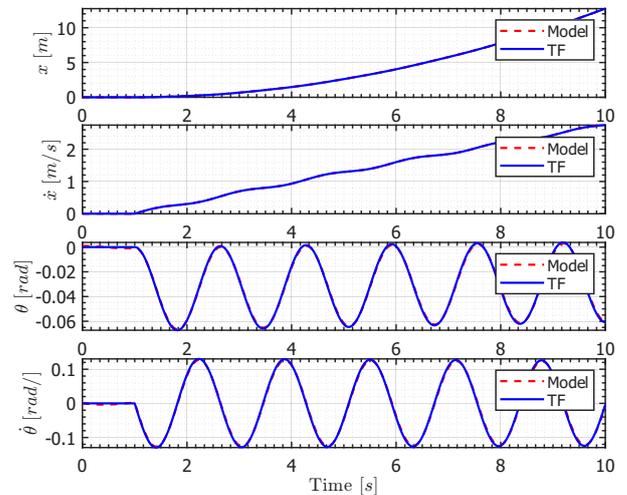


Figura 2: Modelo lineal del sistema identificado a partir de la simulación del modelo no lineal.

4.1.1. Control en cascada

El diseño del control se realiza en dos etapas. En primer lugar, se ajusta un controlador PI para el lazo interno (velocidad), con el objetivo de obtener una respuesta rápida y sin sobrepaso significativo. Posteriormente, se diseña un controlador PID para el lazo externo (posición), orientado a minimizar el error de seguimiento y a suprimir las oscilaciones residuales. Los parámetros de ambos controladores se determinan mediante un enfoque iterativo basado en la respuesta al escalón y ajuste fino por simulación en *Simulink*.

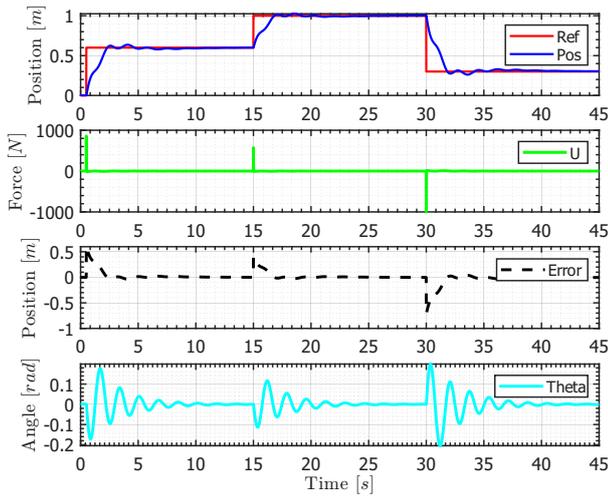


Figura 3: Respuesta del sistema bajo control en cascada PID-PI. Se observa la evolución temporal de la posición del carro y la oscilación de la carga ante un cambio de consigna.

Una vez definidos los controladores, se implementa la arquitectura en cascada. Esta configuración garantiza la estabilidad interna del sistema y proporciona una respuesta robusta ante perturbaciones o variaciones en la referencia. La Figura 3 muestra el comportamiento dinámico del sistema bajo esta estrategia de control, incluyendo el seguimiento de referencia y la evolución de las variables clave.

4.2. FLC basado en PID

Con el objetivo de comparar el rendimiento de técnicas de control clásico y control inteligente, se implementa un controlador difuso basado en la estructura de un PID clásico. Este enfoque permite incorporar las ventajas de los controladores lineales (simplicidad y estabilidad local) con la flexibilidad de la lógica difusa para adaptarse a condiciones no lineales o inciertas.

El controlador difuso adopta una estructura similar a un PID paralelo, en la que cada acción (proporcional, integral y derivativa) es modulada por un sistema difuso. Las variables de entrada del FLC son el error $e(t)$ y su derivada $\dot{e}(t)$, mientras que la salida del sistema difuso actúa como la señal de control $u(t)$. El conjunto de reglas se diseña a partir de la intuición proporcionada por el comportamiento de un PID, y la base de inferencia utiliza lógica Mamdani con funciones de pertenencia gaussianas (Mamdani, 1974).

El espacio de trabajo se define mediante conjuntos difusos lingüísticos. Las entradas del sistema se describen mediante cinco funciones de pertenencia (MFs), etiquetadas como: NL (Negative Large), NM (Negative Medium), ZR (Zero), PM (Positive Medium) y PL (Positive Large). Por su parte, la salida del controlador se representa mediante nueve funciones de pertenencia: NVL (Negative Very Large), NL, NM, NS (Negative Small), ZR, PS (Positive Small), PM, PL y PVL (Positive Very Large).

Cada combinación de valores lingüísticos en las entradas define una regla heurística que contribuye a estabilizar el sistema, buscando una respuesta rápida con mínima oscilación.

El controlador se implementa en *MATLAB* mediante el editor de sistemas difusos (FIS), y se evalúa sobre el modelo no

lineal del sistema grúa-carga. Las ganancias de escala (normalización y desnormalización) se ajustan iterativamente para equilibrar velocidad de respuesta y estabilidad.

Durante las simulaciones, el FLC presenta un comportamiento comparable al del controlador PID-PI en cascada bajo condiciones nominales. Sin embargo, muestra una mejor adaptabilidad en situaciones alejadas del punto de equilibrio, gracias a la naturaleza no lineal del sistema de inferencia difusa.

La Figura 4 ilustra la comparación entre ambas estrategias de control, destacando la capacidad del FLC para reducir la amplitud de las oscilaciones sin comprometer el seguimiento de la referencia.

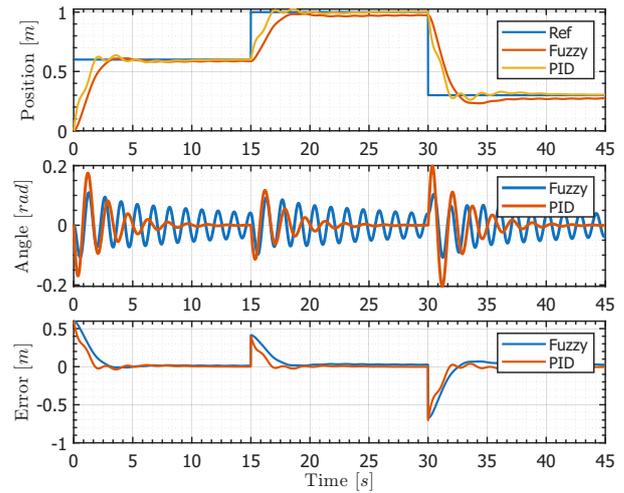


Figura 4: Comparación de la respuesta del sistema bajo control PID-PI en cascada y FLC basado en estructura PID. Se observa una mejora en la amortiguación de oscilaciones mediante el enfoque difuso.

El controlador FLC basado en estructura PID permite alcanzar un rendimiento satisfactorio con una arquitectura relativamente sencilla. Aunque no explota plenamente el potencial de la lógica difusa, representa una solución intermedia viable y fácilmente integrable en entornos industriales que ya disponen de controladores PID ajustados.

4.3. FLC basado en conocimiento de expertos

Con el objetivo de mejorar el rendimiento del sistema frente a condiciones no lineales, perturbaciones y variaciones en la carga, se desarrolla un controlador difuso cuyo diseño se fundamenta directamente en conocimiento experto. A diferencia del enfoque basado en controladores clásicos, esta estrategia no parte de equivalencias con estructuras PID, sino que se apoya en criterios cualitativos derivados de la observación de la dinámica real del sistema.

El sistema difuso considera como entradas el error y la derivada del error, definidos como la diferencia entre la posición de referencia y la posición actual del carro. La salida del controlador es la fuerza aplicada al sistema. Cada entrada se describe mediante siete funciones de pertenencia de tipo gaussiano: NL (Negative Large), NM (Negative Medium), NS (Negative Small), ZR (Zero), PS (Positive Small), PM (Positive Medium) y PL (Positive Large). Estas funciones permiten representar de forma difusa el estado del sistema en cada instante.

Las reglas se organizan en una matriz de inferencia de 7×7 entradas, como se muestra en la Tabla 1, con el objetivo de amortiguar las oscilaciones sin comprometer la estabilidad. El sistema utiliza inferencia Mamdani y defuzzificación mediante el centroide del conjunto de salida.

Tabla 1: Base de reglas heurísticas para el FLC basado en conocimiento experto.

$e \setminus \dot{e}$	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
NL		NM					
NM	PM	ZR	NM				
NS	PM	ZR	NM	NM	NL		
ZR	PL	PM	ZR	NM	NL		
PS	PL	PM	PM	ZR	NM		
PM				PM	ZR	NM	
PL							PM

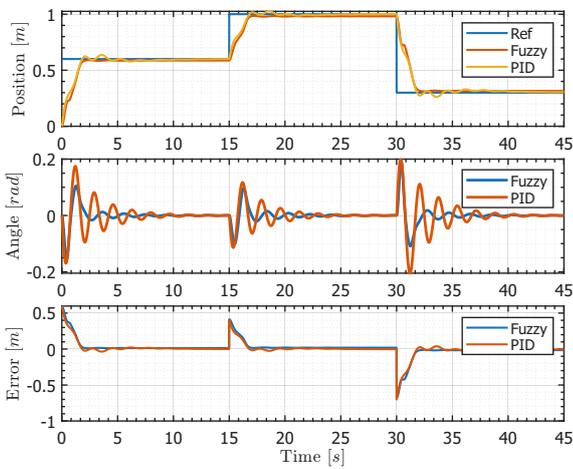


Figura 5: Comparación de la respuesta del sistema bajo control PID-PI en cascada y FLC basado en conocimiento experto. Se observa una mejora significativa en la reducción de las oscilaciones y el tiempo de asentamiento con el enfoque difuso.

Adicionalmente, se aplican dos reglas específicas sobre el ángulo de la carga (se activan únicamente en condiciones extremas que requieren correcciones inmediatas):

- IF θ is NL THEN F is NL
- IF θ is PL THEN F is PL

Gracias al conocimiento experto, de un conjunto inicial de $7 \cdot 7 \cdot 5 = 245$ combinaciones posibles, la base de reglas se reduce a solo 25, lo que representa un 10.20 % de su tamaño teórico. Esta reducción tiene un impacto positivo en el rendimiento computacional, ya que un menor número de reglas implica menor tiempo de procesamiento para generar la salida crisp del sistema de control.

La Figura 5 muestra la comparación del comportamiento dinámico del sistema bajo control PID-PI y FLC basado en conocimiento experto. El enfoque difuso proporciona una mayor robustez ante condiciones no lineales y mejora la amortiguación de las oscilaciones sin comprometer la estabilidad ni el tiempo de respuesta.

4.4. Control frente al cambio de carga

Una de las principales dificultades en el control de sistemas de transporte con cargas suspendidas es la variabilidad de

las condiciones de operación, en particular las variaciones en la masa del lote transportado. Estos cambios alteran significativamente la dinámica del sistema y pueden degradar el rendimiento del controlador si no son adecuadamente compensados.

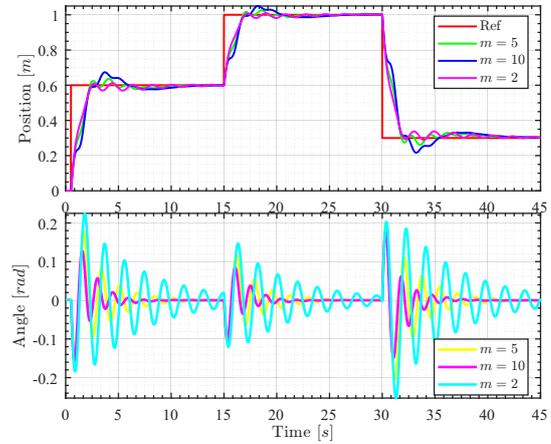


Figura 6: Respuesta del sistema bajo variaciones de masa utilizando control PID-PI. Se observa un deterioro en la estabilidad y el tiempo de asentamiento al alejarse del punto de diseño.

Para evaluar la robustez de las estrategias de control consideradas, se simulan escenarios con incrementos y reducciones del 50 % respecto a la masa nominal. Las métricas de evaluación incluyen el tiempo de asentamiento, el sobreimpulso, el error en régimen permanente y la amplitud de la oscilación.

La Figura 6 muestra el comportamiento del sistema bajo el control PID-PI en cascada ante distintas condiciones de carga. Se observa un aumento notable en el tiempo de estabilización y la aparición de oscilaciones adicionales conforme la masa se aleja del valor nominal.

En contraste, el FLC basado en conocimiento experto presenta una respuesta significativamente más estable, como se ilustra en la Figura 7. Gracias a la estructura no lineal del sistema de inferencia, el controlador adapta su comportamiento de forma más suave frente a los cambios de masa, manteniendo bajos niveles de oscilación y tiempos de recuperación consistentes.

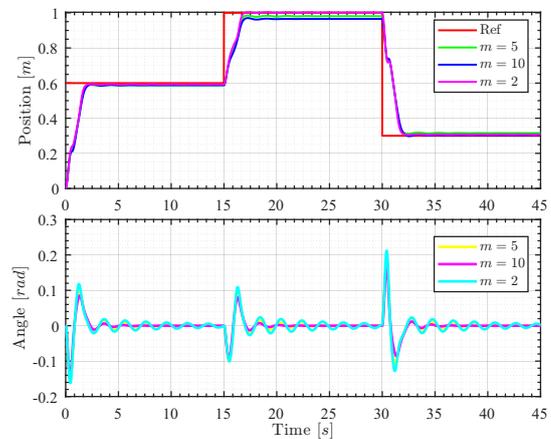


Figura 7: Respuesta del sistema con controlador difuso ante variaciones de masa. La estructura no lineal del FLC permite una mejor adaptabilidad sin comprometer la estabilidad.

Estos resultados refuerzan la idoneidad del enfoque basado en lógica difusa para aplicaciones industriales con alta incertidumbre paramétrica, donde la masa del sistema puede cambiar sin previo aviso. La mayor robustez y estabilidad frente a perturbaciones hacen de esta estrategia una alternativa eficaz al control clásico.

4.5. Implementación en PLC

Con el objetivo de validar la viabilidad de implementar controladores inteligentes en entornos industriales reales, se lleva a cabo la integración del controlador difuso en un autómata programable (PLC). Esta fase permite evaluar tanto la capacidad computacional del dispositivo como la comunicación con el entorno físico simulado.

La arquitectura de simulación se basa en la integración de *MATLAB/Simulink*, donde se ejecuta el modelo dinámico del sistema grúa-carga, y el entorno *Machine Expert Basic*, que simula el PLC y ejecuta el controlador. La comunicación entre ambos entornos se realiza mediante el protocolo estándar Modbus TCP/IP. A través de este canal, las variables de estado del sistema se transmiten al PLC, y éste devuelve la señal de control calculada por el FLC.

Para simplificar la implementación y garantizar la ejecución en tiempo real, el FLC se discretiza y se expresa como una tabla de reglas programable. Las funciones de pertenencia y las operaciones de inferencia se codifican directamente en lenguaje estructurado compatible con el PLC. El modelo físico se mantiene en ejecución en *Simulink*, proporcionando una planta virtual con comportamiento dinámico realista.

El controlador se implementa utilizando bloques funcionales en el entorno de programación del PLC, representando explícitamente las funciones de pertenencia, la lógica de inferencia y el algoritmo de defusificación (centroide). Debido a las limitaciones de procesamiento del autómata, se realiza una optimización previa de las reglas y se reduce el número de términos lingüísticos a cinco (NB, NS, ZE, PS, PB) sin afectar significativamente el rendimiento.

Durante la ejecución, el sistema mantiene un comportamiento estable y reactivo, validando la viabilidad de aplicar control difuso en entornos industriales basados en PLC. La experiencia demuestra que, con una correcta estructuración y optimización, es posible trasladar técnicas de control inteligente desde entornos de simulación a plataformas hardware de bajo coste y ampliamente utilizadas en la industria.

5. Conclusiones

Este trabajo ha validado la viabilidad de aplicar control borroso en sistemas industriales de manipulación de cargas variables, mostrando mejoras en robustez y adaptabilidad frente a controladores clásicos. La solución, basada en un modelo dinámico del sistema grúa-carga e implementada en un PLC de bajo coste, se evaluó en un entorno virtual con resultados positivos ante perturbaciones y variaciones de masa.

A pesar del esfuerzo requerido en el diseño del controlador difuso, los beneficios obtenidos en estabilidad, seguridad y eficiencia operacional justifican su aplicación. La propuesta evidencia el potencial de las técnicas de control inteligente para impulsar la automatización avanzada en entornos industriales reales.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Junta de Andalucía (Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades) la beca de investigación «Laboratorio de Ingeniería para la Sostenibilidad Energética y Medioambiental, ENGREEN», con referencia QUAL21 006 USE. Este trabajo también ha recibido financiación del PID2022-142069OB-I00/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, EU y ha sido realizado en parte gracias al apoyo de la subvención RED2022-134588-T concedida por el MICIU/AEI/10.13039/501100011033.

Referencias

- Almutairi, N. B., Zribi, M., 2016. Fuzzy controllers for a gantry crane system with experimental verifications. *Mathematical Problems in Engineering* 2016, 1–14.
DOI: 10.1155/2016/1965923
- Health and Safety Executive, 2025. Non-fatal injuries: causes and circumstances (including manual handling). <https://www.hse.gov.uk/statistics/causinj/index.htm>, hSE official statistics on manual handling-related injuries.
- International Labour Organization, 2017. Global estimates of occupational accidents and work-related illnesses (2017). https://www.icohweb.org/site/images/news/pdf/Report_Global_Estimates_of_Occupational_Accidents_and_Work-related_Illnesses_2017_rev1.pdf, ILO report estimating 374 million non-fatal and 2.78 million fatal occupational accidents.
- Mamdani, E. H., 1974. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* 121 (12), 1585–1588.
DOI: 10.1049/piee.1974.0328
- Nguyen, N. T., Nguyen, D. H., Nguyen, T. L., Nguyen, T. V. A., 2022. Takagi-sugeno fuzzy approach with compressed representation for overhead crane system. *Journal of Science and Technology: Smart Systems and Devices* 32 (3), 44–51.
DOI: 10.51316/jst.160.ssad.2022.32.3.6
- Omar, F., Karray, F., Basir, O., Yu, L., 2004. Autonomous overhead crane system using a fuzzy logic controller. *Journal of Vibration and Control* 10 (9), 1255–1280.
DOI: 10.1177/1077546304042038
- Ranjbari, L., Shirdel, A. H., Aslahi-Shahri, M., Anbari, S., Ebrahimi, A., Darvishi, M., Alizadeh, M., Rahmani, R., Seyedmahmoudian, M., Oct 2015. Designing precision fuzzy controller for load swing of an overhead crane. *Neural Computing and Applications* 26 (7), 1555–1560.
URL: <https://doi.org/10.1007/s00521-015-1825-z>
DOI: 10.1007/s00521-015-1825-z
- Szpytko, J., Smoczek, J., 2008. Human-machine interface implementation in designing crane control based on fuzzy logic algorithm. In: *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*. Seoul, Korea.
- Trabia, M., Renno, J., Moustafa, K., 2006. A general anti-swing fuzzy controller for an overhead crane with hoisting. In: *2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. pp. 627–634.
DOI: 10.1109/FUZZY.2006.1681777