

Jornadas de Automática

Controlador borroso para regulación de temperatura: integración HOME I/O, EcoStruxure y MATLAB

Gloria G. Coello, Ramón A. García, Pablo G. Camacho*, Francisco Fuentes, Juan M. Escaño

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla, C/ Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092, Sevilla, España.

To cite this article: Coello, G.G., García, R.A., Camacho, P.G., Fuentes, F., Escaño, J.M.. 2026. Fuzzy controller for temperature regulation: HOME I/O, EcoStruxure, and MATLAB integration. Jornadas de Automática, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13821>

Resumen

Este trabajo aborda la regulación de temperatura en edificios mediante el diseño e implementación de un controlador borroso tipo Mamdani, orientado a mejorar la eficiencia energética y la suavidad en la acción de control. La originalidad de la propuesta reside en una arquitectura de co-simulación que integra tres niveles: el entorno virtual 3D HOME I/O, el motor de cálculo MATLAB/Simulink y la plataforma industrial EcoStruxure Automation Expert de Schneider Electric. Esta integración permite cerrar el lazo de control utilizando el estándar IEC 61499 y el protocolo de comunicación OPC-UA. Los resultados demuestran que, frente a un control PI tradicional, la solución borrosa proporciona una respuesta dinámica más resiliente y una señal de control sin picos agresivos, facilitando la transferencia tecnológica desde entornos de simulación a controladores industriales reales.

Palabras clave: Control borroso, Control Inteligente, Sistemas de control de edificios, Automatización industrial, Control basado en lógica borrosa, Estándares de software de control

Fuzzy controller for temperature regulation: HOME I/O, EcoStruxure, and MATLAB integration

Abstract

This paper addresses temperature regulation in buildings through the design and implementation of a Mamdani-type fuzzy controller, aimed at improving energy efficiency and control action smoothness. The novelty of the proposal lies in a co-simulation architecture that integrates three levels: the HOME I/O 3D virtual environment, the MATLAB/Simulink computing engine, and Schneider Electric's EcoStruxure Automation Expert industrial platform. This integration enables closing the control loop using the IEC 61499 standard and the OPC-UA communication protocol. The results demonstrate that, compared to a traditional PI control, the fuzzy solution provides a more resilient dynamic response and a control signal without aggressive peaks, facilitating technology transfer from simulation environments to real industrial controllers.

Keywords: Fuzzy control, Intelligent Control, Building control systems, Industrial automation, Fuzzy logic control, Control software standards

1. Introducción

Los edificios representan una proporción sustancial del consumo energético mundial, y la calefacción es uno de los principales contribuyentes en muchos climas. En consecuencia, la regulación de la temperatura a nivel de estancia sigue

siendo un problema central en la automatización de edificios, donde los controladores deben conciliar los objetivos de confort con las restricciones operativas y las perturbaciones. En la práctica, la dinámica térmica interior se ve afectada por entradas exógenas variables en el tiempo, como la temperatura exterior y la radiación solar, así como por interacciones no me-

*Autor para correspondencia: pgonzalez7@us.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

didas y puntos de operación cambiantes. Estas características hacen que el control robusto de la temperatura sea un reto, especialmente cuando los controladores se implementan con un esfuerzo de modelado limitado y deben seguir siendo eficaces en condiciones variables.

Las soluciones clásicas de retroalimentación, como el PID, se utilizan ampliamente debido a su simplicidad y facilidad de puesta en marcha. Los enfoques avanzados basados en modelos, en particular el control predictivo basado en modelos (MPC), pueden manejar explícitamente las restricciones y anticipar la evolución futura del sistema, pero su rendimiento y ajuste están fuertemente ligados a la disponibilidad y validez de un modelo adecuado. Estudios experimentales recientes confirman el potencial del MPC en aplicaciones de calefacción de edificios, pero también destacan su sensibilidad a la precisión del modelado y a las condiciones experimentales (Langner et al., 2025). Esto motiva enfoques complementarios que prioricen la robustez frente a la incertidumbre con un esfuerzo de modelado reducido.

El control borroso, basado en la teoría de los conjuntos borrosos (Zadeh, 1965), proporciona un marco basado en reglas para codificar el conocimiento experto y gestionar la incertidumbre y las no linealidades mediante variables lingüísticas interpretables. La modelización y el control borrosos proporcionan un paradigma alternativo que resulta especialmente atractivo en entornos caracterizados por incertidumbre, variabilidad y conocimiento limitado de modelización.

En el contexto de los edificios, se han propuesto controladores basados en lógica borrosa para regular la temperatura interior, combinando el conocimiento experto con variables ambientales medidas, logrando a menudo un rendimiento robusto bajo condiciones exteriores cambiantes (Alcalá et al., 2003; Meana-Llorián et al., 2017). Estos enfoques priorizan la robustez y la interpretabilidad sobre la estricta optimalidad, lo que se ajusta bien a los requisitos prácticos de la automatización de edificios. Otra motivación adicional para el controlador borroso propuesto es su implementabilidad en la automatización industrial de edificios. Los controladores borrosos basados en reglas pueden expresarse utilizando el Fuzzy Control Language (FCL), estandarizado en la IEC 61131-7, y pueden integrarse en flujos de trabajo centrados en PLC. Incluso cuando una plataforma PLC no proporciona ejecución nativa de FCL, la cadena de inferencia (fuzzificación, evaluación de reglas, agregación y desfuzzificación) puede traducirse sistemáticamente a código IEC 61131-3 (por ejemplo, Structured Text o Function Block Diagram), permitiendo una ejecución determinista con bajo sobre costo computacional (International Electrotechnical Commission (IEC), 2000; PLCopen, 2000).

El resto del artículo se organiza como sigue. La Sección 2 describe las plataformas experimentales utilizadas. La Sección 3 resume la estrategia de control empleada. La Sección 4 presenta la implementación de la solución propuesta y los resultados de la simulación, mientras que la Sección 5 presenta las conclusiones y líneas futuras de trabajo.

2. Plataformas empleadas

Para realizar las pruebas experimentales de este trabajo, se han usado distintas plataformas, tanto para la simulación

del entorno como para el control del PLC. A continuación se detallan cada uno de ellos.

2.1. HOME I/O

Una herramienta clave para este trabajo ha sido HOME I/O, un entorno de simulación de hogar inteligente en 3D ampliamente utilizado para prototipado rápido y educación en automatización de edificios (Realgames, 2025). La plataforma, lanzada en 2016 con un propósito educativo (RIERA et al., 2016), proporciona un banco de pruebas en tiempo real e interactivo en el que la temperatura interior evoluciona bajo la influencia combinada de (i) la acción de control aplicada a actuadores tipo HVAC y (ii) perturbaciones debidas a las condiciones meteorológicas y a los efectos de la envolvente del edificio. Esto hace que HOME I/O sea adecuado para probar estrategias de control en condiciones repetibles pero acopladas de forma realista, superando modelos térmicos excesivamente simplificados.

El estudio de caso aborda la regulación de la temperatura del dormitorio de adolescente de la vivienda (Figura 1). La habitación incluye un calentador eléctrico de potencia variable (radiador) y un termostato que mide la temperatura interior y proporciona la señal principal de realimentación para el control. Una característica física relevante de la habitación es una gran superficie acristalada con una persiana que cubre la pared lateral, lo que incrementa la sensibilidad de la temperatura interior a las condiciones exteriores.



Figura 1: Vista interior de la habitación en el entorno HOME I/O, en la que se muestran mediciones y datos varios.

2.2. EcoStruxure Automation Expert

EcoStruxure Automation Expert (EAE) es la plataforma software de Schneider Electric basada en la norma IEC 61499, que plantea un paradigma de automatización centrado en el software mediante bloques de función distribuidos, eventos y paso de mensajes. EAE facilita la ingeniería modular, la orquestación de aplicaciones y el despliegue en tiempos de ejecución heterogéneos, además de ofrecer conectividad con protocolos industriales estándar (Schneider Electric, 2026). La Figura 2 muestra la interfaz de ingeniería y una vista de la estructura de bloques utilizada en los experimentos.

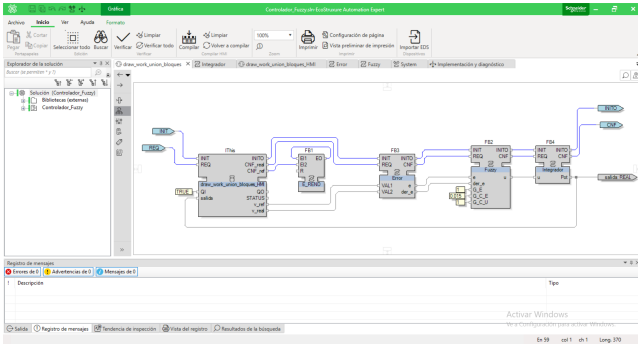


Figura 2: Vista del software EcoStruxure Machine Expert

En este trabajo EAE se considera tanto como entorno de destino para la implementación de la lógica de control (bloques de inferencia y escalado) como plataforma de integración para desplegar y evaluar controladores en un contexto de automatización distribuida. Su modelo de ejecución orientado a eventos permite mapear directamente estructuras basadas en reglas (por ejemplo, un controlador borroso implementado en bloques de función) y facilita la interoperabilidad con soluciones de control embebido y PLC, lo que resulta relevante para discutir la transferibilidad del controlador propuesto a entornos industriales.

2.3. Comunicación entre softwares

Se ha usado MATLAB/Simulink como enlace central en la comunicación. Por un lado tendremos la comunicación MATLAB/Simulink con HOME I/O y por otro lado tendremos la comunicación MATLAB/Simulink con EAE, siguiendo el esquema de comunicación y control de la Figura 3.

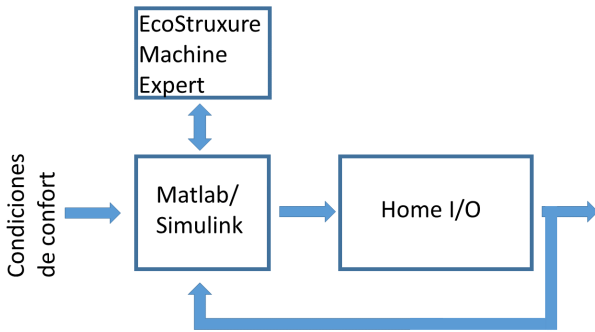


Figura 3: Esquema de comunicación y control.

En lazo entre MATLAB/Simulink y HOME I/O, la interfaz empleada es de lectura-escritura sobre registros compartidos. Esta solución minimiza la latencia y la variabilidad temporal, permitiendo muestreos con período constante T_s y una sincronización sencilla entre el paso de simulación y el tiempo real de ejecución. Para preservar la integridad de datos se utiliza un esquema de doble búfer y verificaciones de consistencia en cada ciclo de muestreo; además, las escrituras se saturan en el rango físico del actuador para evitar comandos inválidos. Para este trabajo, se ha empleado un $T_s = 1$ segundo.

La integración de MATLAB/Simulink con EAE se aborda desde la perspectiva de despliegue y supervisión: EAE, basado en IEC 61499, integra componentes mediante eventos y

mensajes, mientras que la conectividad con sistemas externos suele realizarse mediante servidores y gateways (OPC UA, Modbus/TCP, MQTT u otras pasarelas industriales) (Schneider Electric, 2026). En este trabajo, la lógica borrosa se modela y verifica en MATLAB/Simulink y, posteriormente, su estructura funcional se mapea a bloques y servicios que pueden desplegarse en un proyecto compatible con IEC 61499 para evaluar la transferencia al entorno industrial.

Dado que los experimentos emulan variaciones a escala de día, resulta útil distinguir el tiempo de simulación del tiempo de reloj real al ejecutar ensayos en lazo cerrado. En Simulink, el ritmo de ejecución puede imponerse con mecanismos como el bloque Real-Time Pacer, que regula la velocidad de simulación para mantenerla alineada con el tiempo real mediante un factor de aceleración configurable (Vallabha, 2026). Esto también permite experimentación acelerada (por ejemplo, $\times 5$, $\times 50$ o mayor) conservando un registro determinista.

Todas las señales se muestrearon con un período constante T_s para capturar tanto las fases transitorias como las de régimen permanente durante calefacción y enfriamiento. Estas condiciones definen el banco de pruebas utilizado para el diseño y la evaluación del controlador, incluidas las pruebas de robustez entre distintos escenarios.

3. Estrategia de control

Son muchas las posibilidades para poder regular la temperatura, como aparece en (Camacho et al., 2026). El controlador propuesto en este trabajo es un controlador borroso, basado en sistemas de inferencia borrosa del tipo Mamdani, y no en un modelo matemático explícito de la dinámica térmica (Coello, 2026). En su lugar, codifica el conocimiento de control en forma de reglas lingüísticas que relacionan el error de seguimiento de la temperatura y su tasa de variación con la orden de control del calentador. Sigue una estructura PI borroso, como el de la Figura 4

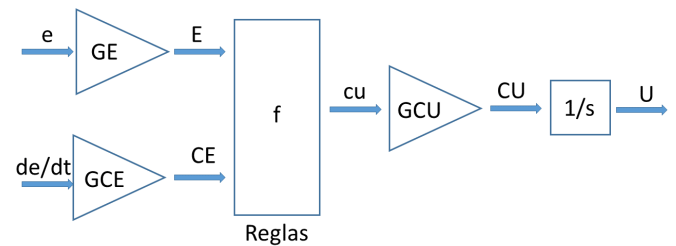
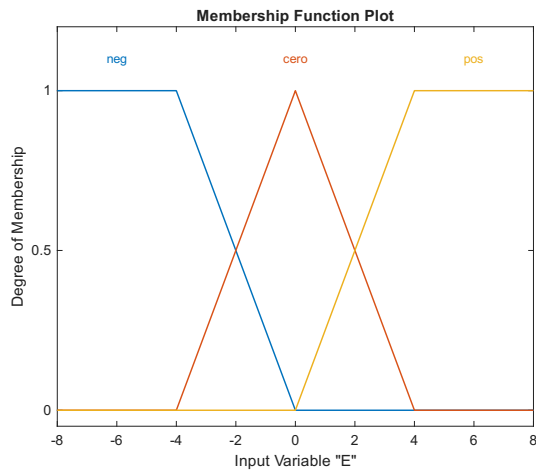
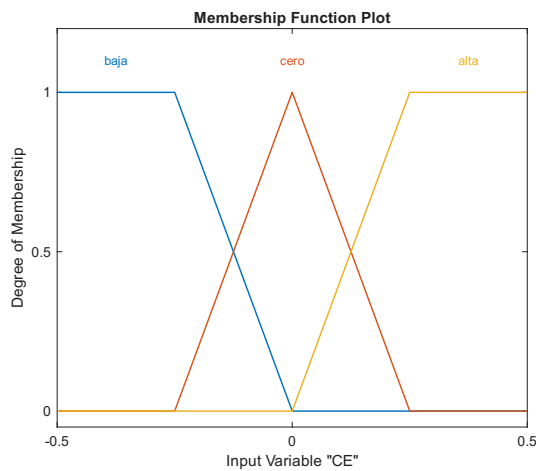


Figura 4: Esquema del controlador borroso

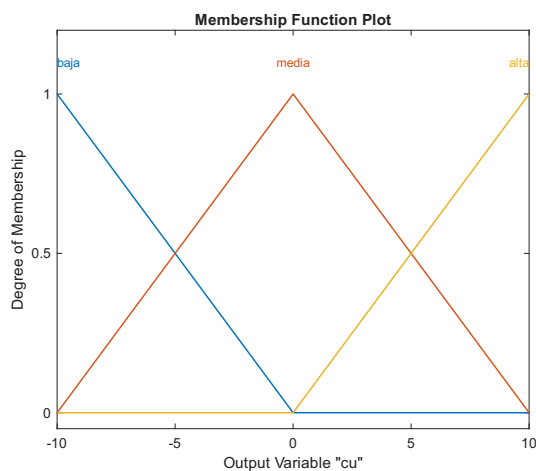
Para lograr una regulación precisa, las señales de entrada sin procesar se ajustan mediante las ganancias de escalado G_E y G_{CE} , que mapean el error de temperatura y su derivada en los universos de discurso borrosos. Sus valores son, respectivamente 1 y 0,015. También se multiplica a la salida del sistema de inferencia borrosa por una ganancia de salida G_{CU} , de valor 1, y se pasa a través de un integrador ($1/s$) para generar una acción de control estable. Estos parámetros se obtuvieron mediante un método heurístico, tomando los valores iniciales de un control PI inicial que se propuso.



(a) Función de Pertenencia del error



(b) Función de Pertenencia de la derivada del error



(c) Función de Pertenencia de la señal de control

Figura 5: Funciones de pertenencia de Mamdani.

En cuanto a las variables de entrada: el error de temperatura y la derivada del error. Cada entrada se describe mediante tres términos lingüísticos: en el caso del error, este puede ser negativo (es decir, temperatura alta), estable o positivo (es decir, temperatura baja), implementados a través de funciones de pertenencia simples; en el caso de la derivada del error, esta puede ser una variación baja, estable o alta, también con una

implementación en funciones de pertenencia. La Figura 5(a) muestra las funciones de pertenencia definidas para el error y la Figura 5(b) muestra las funciones de pertenencia definidas para la derivada del error. En cuanto a la variable de salida, la señal de control, corresponde a la potencia del calentador y sus funciones de pertenencia se muestran en la Figura 5(c). Los valores que definen los límites de cada función de pertenencia se han obtenido mediante un método heurístico, basado inicialmente en el conocimiento de operadores y luego ajustado mediante simulaciones de prueba y error. El motor de inferencia procesa estas entradas utilizando una composición mínimo-máximo, seguida de un método de desdifuminación basado en el centroide para calcular la señal salida.

La base de reglas sigue un razonamiento experto intuitivo, con el objetivo de aumentar la potencia de calefacción cuando la temperatura está por debajo de la referencia y/o está disminuyendo, y de reducir la actuación a medida que se aproxima a la referencia. Las nueve reglas lingüísticas que correlacionan las dos entradas del sistema y su salida para determinar así la actuación adecuada de control siguen la arquitectura estándar de Mamdani:

- Regla 1 : SI E es neg Y CE es bajo ENTONCES cu es baja*
- Regla 2 : SI E es neg Y CE es cero ENTONCES cu es baja*
- Regla 3 : SI E es neg Y CE es alta ENTONCES cu es media*
- Regla 4 : SI E es cero Y CE es bajo ENTONCES cu es baja*
- Regla 5 : SI E es cero Y CE es cero ENTONCES cu es media*
- Regla 6 : SI E es cero Y CE es alta ENTONCES cu es alta*
- Regla 7 : SI E es pos Y CE es bajo ENTONCES cu es media*
- Regla 8 : SI E es pos Y CE es cero ENTONCES cu es alta*
- Regla 9 : SI E es pos Y CE es alta ENTONCES cu es alta*

donde E es el error multiplicado por la ganancia, CE es la derivada del error multiplicada por la ganancia y cu es la señal de control.

4. Resultados

Se muestran ahora algunos resultados experimentales obtenidos. Para establecer una mínima comparativa, se ha empleado, además del controlador borroso descrito en la sección anterior, un controlador PI clásico, más sencillo.

La Figura 6 muestra la acción de control obtenida con el PI. En ella se puede apreciar un pico que sobrepasa los 70W en el momento del cambio de referencia.

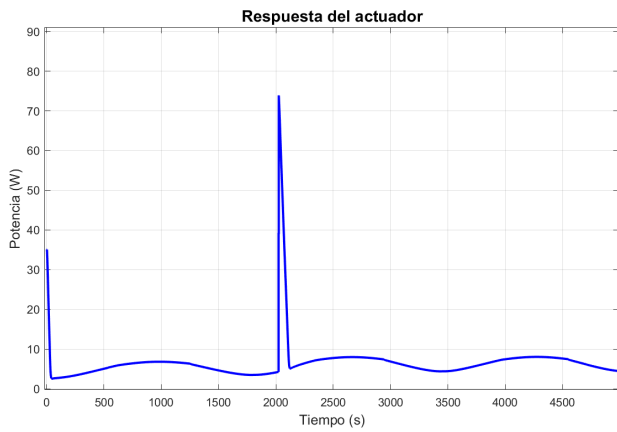


Figura 6: Señal de control con controlador PI.

El seguimiento de la temperatura usando el controlador se muestra en la Figura 7. Logra seguir la referencia con un error menor a $0,25^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, lo hace a costa de una acción de control demasiado agresiva.

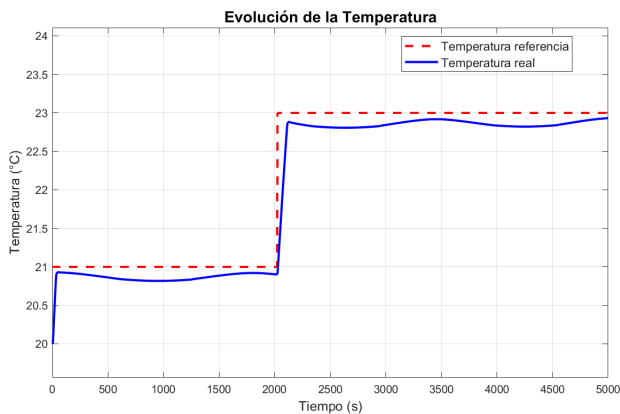


Figura 7: Evolución de la temperatura de la habitación con PI.

En el caso del control borroso, la Figura 8 muestra la acción de control obtenida. En este caso, no se produce el pico abrupto en la señal de control que se producía en el controlador PID, aunque sí se pueden observar sobreoscilaciones en la potencia del radiador, las cuales se van atenuando con el paso del tiempo.

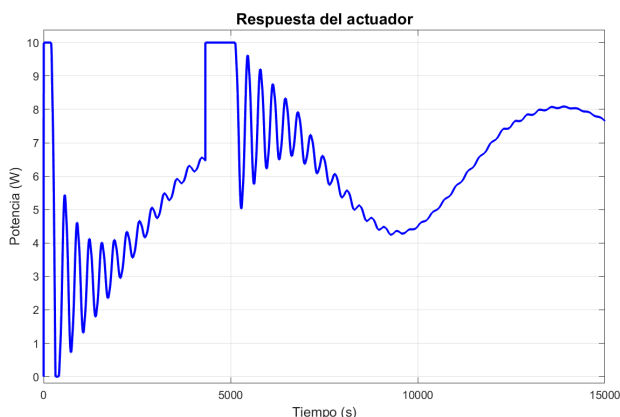


Figura 8: Señal de control con controlador Fuzzy.

En cuanto a la respuesta del controlador borroso, la Figura 9 presenta el seguimiento de la temperatura de manera correcta, con un error de la temperatura en régimen permanente mínimo. Así mismo, aunque existen sobreoscilaciones, están no llegan a ser muy grandes, no sobrepasando nunca los $0,3^{\circ}\text{C}$.

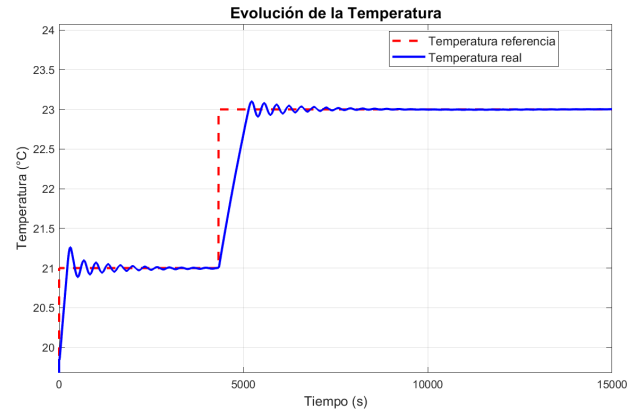


Figura 9: Evolución de la temperatura de la habitación con Fuzzy.

Ambos controladores funcionan adecuadamente. El controlador basado en sistemas borrosos tipo Mamdani logra adaptarse mejor a la variabilidad del ambiente, intentando hacer un uso más eficiente de la potencia del radiador sin llegar a forzarlo.

Por último, se presenta la Tabla 1, donde se han establecido unas métricas de errores para poder comparar el desempeño de ambos controladores

Tabla 1: Métricas de error entre temperatura de referencia y temperatura real.

Controlador	$\bar{E}$	σ_E	RMSE	R^2
Borroso	0.0601	0.2719	0.2785	0.9092
PID	0.1580	0.1605	0.2252	0.9473

siendo $\bar{E}$ el error medio, σ_E la desviación estándar, que refleja cuanto varía el error alrededor de su valor medio; RMSE el error cuadrático medio, que penaliza los errores grandes al elevarlos al cuadrado; y R^2 el coeficiente de determinación, que mide qué proporción de la variabilidad de la referencia queda explicada por la temperatura real. El controlador borroso presenta el error medio más bajo, aunque el valor del resto de métricas aumenta ligeramente con respecto al controlador PID debido a la sobreoscilación en la respuesta del primero.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha diseñado, implementado y validado con éxito una arquitectura de simulación orientada a la regulación de temperatura en edificios, integrando el entorno virtual 3D HOME I/O, el motor de cálculo MATLAB/Simulink y la plataforma EcoStruxure Automation Expert (EAE). Mediante el empleo del estándar IEC 61499 y el protocolo de comunicación OPC-UA, se ha cerrado el lazo de control dentro de

un marco interoperable y distribuido que emula de forma fiel las restricciones operativas de la automatización industrial, facilitando la viabilidad de una futura transferencia tecnológica hacia PLC reales. Los resultados obtenidos confirman que, si bien el controlador PI clásico logra un seguimiento preciso de la referencia con un error inferior a $0,25^{\circ}\text{C}$, lo hace a expensas de una acción de control agresiva que exhibe picos de potencia superiores a los 70 W. En contraposición, el controlador borroso tipo Mamdani propuesto adapta su comportamiento de manera suave y resiliente ante la variabilidad térmica y las perturbaciones del entorno. Aunque la solución borrosa manifiesta ciertas sobreoscilaciones iniciales decrecientes en la potencia del radiador, elimina por completo los transitorios abruptos de corriente y minimiza el error en régimen permanente, lo cual reduce el estrés en los actuadores, prolonga la vida útil del equipamiento y favorece un uso más eficiente de la potencia disponible.

Como línea de trabajo futuro a corto plazo, se contempla el refinamiento de ambas estrategias de control mediante la incorporación de bloques de saturación física en los actuadores y la implementación de técnicas de compensación por anticipación (feedforward). Este añadido permitirá contrarrestar el impacto de perturbaciones en la estancia, tales como cambios bruscos de la temperatura exterior y la radiación solar.

Agradecimientos

Este trabajo ha recibido financiación del proyecto FLARE (Grant Agreement n.º 101293878), financiado por el Programa Marco de Investigación e Innovación Horizonte Europa de la Unión Europea, y del proyecto INERH2 (0409_INERH2.6.E, Investigación en infraestructuras de recarga de electricidad e hidrógeno para movilidad sostenible), cofinanciado por el Programa Interreg VI-A España–Portugal (POCTEP) 2021–2027 a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Referencias

- Alcalá, R., Benítez, J. M., Casillas, J., Cerdón, O., Herrera, F., 2003. Fuzzy control of hvac systems optimized by genetic algorithms. *Applied Intelligence* 18 (2), 155–177.
DOI: 10.1023/A:1021986309149
- Camacho, P. G., Fuentes, F., Escaño, J. M., 2026. Fuzzy logic controller for room temperature regulation: A co-simulation study with home i/o and matlab. In: *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*.
- Coello, G. G., 2026. Integración de controlador borroso en plc bajo la norma iec 61499 para la regulación térmica de una habitación. International Electrotechnical Commission (IEC), 2000. IEC 61131-7:2000 programmable controllers – part 7: Fuzzy control programming. <https://webstore.iec.ch/en/publication/4556>, international Standard.
- Langner, F., Kovačević, J., Spatafora, L., Dietze, S., Waczowicz, S., Çakmak, H. K., Matthes, J., Hagenmeyer, V., 2025. Experimental evaluation of model predictive control and fuzzy logic control for demand response in buildings. *Applied Energy* 401, 126666.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2025.126666
- Meana-Llorián, D., González García, C., Pelayo G-Bustelo, B. C., Cueva Lovelle, J. M., García-Fernández, N., 2017. Iofclime: The fuzzy logic and the internet of things to control indoor temperature regarding the outdoor ambient conditions. *Future Generation Computer Systems* 76, 275–284.
DOI: 10.1016/j.future.2016.11.020
- PLCopen, 2000. Iec 61131-7. <https://www.plcopen.org/standards/logic/iec-61131-7/>.
- Realgames, 2025. Home i/o simulation of a smart house and surrounding environment.
URL: <https://realgames.co/home-io/>
- RIERA, B., EMPRIN, F., ANNEBICQUE, D., COLAS, M., VIGÁRIO, B., 2016. Home i/o: a virtual house for control and stem education from middle schools to universities. In: *IFAC-PapersOnLine*. Vol. 49. Elsevier B.V., pp. 168–173.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.172
- Schneider Electric, 2026. Ecostruxure™ automation expert. <https://www.se.com/es/es/product-range/23643079-ecostruxure-automation-expert/>.
- Vallabha, G., 2026. Real-Time Pacer for Simulink. MATLAB Central File Exchange, retrieved January 20, 2026.
URL: <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29107-real-time-pacer-for-simulink>
- Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* 8 (3), 338–353.
DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X