



Máster Universitario en Ingeniería Informática
de la Universidad de Granada

Práctica de lógica y sistemas difusos

Estudio de un caso práctico: Control - Indoor Environment Quality

Inteligencia Computacional (IC)

Autora

Marina Jun Carranza Sánchez

Resumen:

Este documento expone un estudio realizado por investigadores de la Universidad de Granada, sobre la implementación de un controlador difuso unificado para mejorar la calidad del ambiente interior (IEQ) en edificios. Este sistema optimiza múltiples parámetros ambientales, como temperatura, humedad, CO2 e iluminación, para maximizar el confort de los ocupantes y minimizar el consumo energético. Además, se compara con otros estudios de controladores de difusión siguiendo otros enfoques. Los resultados muestran que el controlador difuso propuesto mejora la estabilidad y eficiencia en la gestión del IEQ, destacando la importancia de soluciones inteligentes en entornos modernos.

Abstract:

This document presents a study conducted by researchers from the University of Granada on the implementation of a unified fuzzy controller to improve Indoor Environment Quality (IEQ) in buildings. This system optimizes multiple environmental parameters, such as temperature, humidity, CO2, and lighting, to maximize occupant comfort and minimize energy consumption. Additionally, it compares this approach with other studies on fuzzy controllers following different methodologies. The results show that the proposed fuzzy controller enhances stability and efficiency in IEQ management, highlighting the importance of intelligent solutions in modern environments.

Índice

1. Introducción	5
1.1. Motivación y contexto	5
1.2. Objetivos	5
2. Análisis del problema	7
2.1. Descripción del problema	7
2.2. Importancia del problema	7
2.3. Desafíos en la resolución del problema	8
3. Desarrollo	9
3.1. Descripción del caso práctico	9
3.2. Diseño del controlador difuso	9
3.2.1. Entradas y salidas	9
3.2.2. Funcionamiento del controlador	10
3.3. Pruebas en simuladores y entornos reales	14
3.3.1. Configuración del simulador	14
3.3.2. Configuración experimental	17
3.4. Resultados del estudio	17
4. Estudios y enfoques alterativos	19
4.1. Control fuzzy de sistemas HVAC optimizado con algoritmos genéticos	19
4.1.1. Diseño del controlador difuso	19
4.1.2. Pruebas	22
4.1.3. Resultados y conclusiones	22
4.2. Sistema de inferencia difusa centrado en la evaluación de IEQ	23
4.2.1. Diseño del sistema difuso	23
4.2.2. Pruebas	25
4.2.3. Resultados y conclusiones	25
4.3. Comparaciones entre los tres estudios	26
5. Conclusiones y trabajos futuros	28
5.1. Consecución de objetivos	28
5.2. Trabajos futuros	29
6. Bibliografía	31

Índice de figuras

1.	Arquitectura PID y controlador fuzzy.	10
2.	Función de pertenencia.	11
3.	Función de pertenencia de las variables de entrada.	12
4.	Función de pertenencia de las variables de salida	12
5.	Conjunto de reglas.	13
6.	Método Mamdani Max-Min.	13
7.	Fórmula para calcular el centroide (Klir & Yuan, 1996).	14
8.	Panel de definición de intervalos de confort.	15
9.	Panel de definición de valores de entrada.	15
10.	Panel de definición de valores de salida.	16
11.	Valores de la temperatura recogidos en diciembre de 2012.	18
12.	Valores de la humedad recogidos en diciembre de 2012.	18
13.	Diagrama de flujo del algoritmo WMC-SSGA (Alcalá et al., 2003).	20
14.	Diagrama de módulos jerárquicos y funciones de pertenencia (Alcalá et al., 2003).	21
15.	Fórmula de Mean of Maxima (MOM) (Klir & Yuan, 1996).	22
16.	Diagrama del sistema de inferencia difusa (Jabłoński & Grychowski, 2018).	24
17.	Funciones de pertenencia de la fatiga y frescura (Jabłoński & Grychowski, 2018).	24
18.	Resultados de las encuestas y medidas del sistema (Jabłoński & Grychowski, 2018).	25

Índice de cuadros

1.	Subobjetivos generales para mejorar la IEQ.	6
2.	Comparación de tres estudios sobre controladores difusos para IEQ.	27
3.	Subobjetivos cumplidos del FLC unificado.	29

1. Introducción

La calidad del ambiente interior (Indoor Environment Quality, IEQ) es un factor relevante en la habitabilidad de edificios tanto residenciales como comerciales. Este concepto no solo abarca parámetros físicos, sino que también se enfoca en el bienestar general de los ocupantes. Los sistemas tradicionales de control no necesariamente optimizan el confort percibido, y con la proliferación de edificios inteligentes y sistemas HVAC avanzados, surge la necesidad de soluciones más centradas en el usuario.

En este trabajo, se realiza un estudio de un caso práctico, donde tres investigadores del Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial de la Universidad de Granada (Miguel Molina-Solana, Maria Ros y Miguel Delgado), proponen un controlador difuso unificado que integra diferentes aspectos de la calidad ambiental interior, con el objetivo de optimizar el confort del usuario mientras se reduce el consumo energético (Molina-Solana et al., 2013).

1.1. Motivación y contexto

La creciente preocupación por el consumo energético, que representa una proporción significativa del gasto global en edificios, junto con la demanda de entornos más cómodos y saludables, ha impulsado el desarrollo de tecnologías más avanzadas de gestión de IEQ. Los sistemas HVAC convencionales no logran responder adecuadamente a la variabilidad de las condiciones ambientales y las preferencias de los usuarios, lo que resalta la necesidad de enfoques más sofisticados.

En este contexto, la lógica difusa ofrece un marco versátil para abordar la complejidad y la interrelación de múltiples parámetros ambientales. El uso de FLC permite no solo controlar eficientemente la temperatura y la humedad, sino también integrar otros factores como la calidad del aire y la iluminación, mejorando así el confort general. Este enfoque, además, facilita la implementación en sistemas ya existentes, proporcionando una capa de control más robusta y adaptativa.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es diseñar e implementar un sistema de control basado en lógica difusa para optimizar la calidad del ambiente interior (IEQ), integrando múltiples parámetros ambientales con el fin de maximizar el confort de los ocupantes a la vez que se reduce el consumo energético.

A partir de este objetivo principal, se pueden extraer una serie de subobjetivos que vienen recogidos en el Cuadro 1.

Subobjetivos	Descripción
Optimización del consumo energético	Reducir el consumo energético de los sistemas HVAC mientras se mantienen niveles de adecuados de confort
Integración de sensores múltiples	Utilizar datos de múltiples sensores (temperatura, humedad, CO2, iluminación) para una evaluación más completa del entorno
Mejora de la estabilidad del sistema	Reducir las oscilaciones en los parámetros ambientales mediante la implementación de reglas difusas más precisas.
Flexibilidad y escalabilidad	Diseñar un sistema de control que pueda adecuarse fácilmente a diversos entornos y condiciones operativas.
Control predictivo y preventivo	Anticipar cambios en la calidad del ambiente interior y tomar medidas correctivas antes de que los niveles de confort se vean comprometidos.
Personalización del confort	Ajustar dinámicamente las condiciones ambientales de acuerdo con las preferencias y actividades de los usuarios

Cuadro 1: Subobjetivos generales para mejorar la IEQ.

Los cuatro primeros subobjetivos de la tabla anterior son de alta prioridad en cualquier implementación de FLC destinada al control de la IEQ, mientras que los dos últimos podrían considerarse funciones o capacidades adicionales, ya que para alcanzarlos es común utilizar enfoques híbridos con otras técnicas avanzadas como el aprendizaje automático.

2. Análisis del problema

La gestión eficiente de la calidad del ambiente interior (IEQ) influye directamente en la capacidad de garantizar el bienestar y la salud de los ocupantes en espacios cerrados. Sin embargo, la complejidad inherente a las múltiples variables que participan en el IEQ presenta desafíos significativos para los sistemas de control tradicionales.

2.1. Descripción del problema

El confort ambiental en interiores depende de la interacción de diversos factores, incluyendo temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂, iluminación y calidad del aire. Los sistemas de control convencionales, como los controladores PID y On-Off, suelen operar de manera independiente sobre cada variable, sin considerar las interdependencias entre ellas. Esta falta de integración puede conducir a situaciones donde la optimización de un parámetro afecta negativamente a otros, comprometiendo el confort general de los ocupantes. Por ejemplo, un aumento en la ventilación para reducir la concentración de CO₂ puede disminuir la temperatura interior, generando incomodidad térmica (Molina-Solana et al., 2013).

2.2. Importancia del problema

La calidad del ambiente interior (IEQ) es fundamental para el bienestar y la salud de los ocupantes de edificios. Según la Comisión Europea, los edificios son responsables del 40 % del consumo energético de la Unión Europea y del 36 % de las emisiones de gases de efecto invernadero, generadas principalmente durante su construcción, utilización, renovación y demolición (Comisión Europea, 2020).

Una gestión ineficiente del IEQ no solo afecta negativamente la salud y el confort de los ocupantes, sino que también contribuye al desperdicio de energía y al aumento de las emisiones de CO₂. La Comisión Europea destaca que aproximadamente el 75 % del parque inmobiliario de la UE es ineficiente desde el punto de vista energético, lo que significa que gran parte de la energía consumida se malgasta. Las pérdidas de energía pueden minimizarse mejorando los edificios ya existentes y apostando por soluciones inteligentes y materiales eficientes desde el punto de vista energético para las nuevas construcciones.

Además, la mejora de la eficiencia energética de los edificios será determinante para el ambicioso objetivo de conseguir la neutralidad en emisiones de carbono establecido para 2050 en el Pacto Verde Europeo. Por lo tanto, abordar la eficiencia energética en la gestión del IEQ es esencial no solo para el bienestar de los ocupantes, sino también para cumplir con los objetivos climáticos y energéticos de la UE.

2.3. Desafíos en la resolución del problema

La gestión de la calidad ambiental interior (CAI) enfrenta varios retos debido a la complejidad inherente del entorno interior. Estos desafíos surgen tanto de la interacción de múltiples variables como de las limitaciones en las infraestructuras y tecnologías disponibles. A continuación, se detallan los principales obstáculos identificados:

- **Complejidad multidimensional:** las variables que afectan el confort interior están interrelacionadas y pueden presentar comportamientos no lineales, lo que dificulta su modelado y control. Dicha complejidad añadida exige una solución integral que permita gestionar simultáneamente todas las variables interdependientes.
- **Subjetividad del confort:** el confort es altamente subjetivo y varía entre individuos, lo que complica la creación de un sistema que satisfaga a todos los usuarios. «Los conceptos de seguridad, limpieza y aislamiento... abarcan mucho más que la concentración de sustancias respirables y no son universales» (Vargas Marcos & Gallego Pulgarín, 2005).
- **Condiciones cambiantes:** factores como el clima exterior, la ocupación del espacio y la actividad de los usuarios pueden cambiar constantemente, requiriendo un sistema flexible y adaptativo.
- **Optimización energética:** «El mantenimiento de las condiciones ambientales interiores óptimas se consigue en gran medida a expensas del aumento en el consumo energético» (Vargas Marcos & Gallego Pulgarín, 2005). Esto viene a indicar que existe una tensión inherente entre mejorar el confort y reducir el consumo de energía, y diseñar un sistema que logre ambos objetivos simultáneamente es un reto significativo.
- **Integración tecnológica:** incorporar nuevos sistemas de control en infraestructuras existentes sin interrumpir su funcionamiento o requerir grandes inversiones es otro desafío técnico y económico.

Estos desafíos subrayan la necesidad de una solución innovadora que pueda abordar la complejidad y dinámica del problema de manera eficiente y efectiva.

3. Desarrollo

En esta sección se va a proporcionar una breve descripción del caso práctico, explicar el diseño detallado del FLC, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, así como las interpretaciones de los mismos. Todas las imágenes en esta sección han sido sacadas del estudio del controlador difuso unificado (Molina-Solana et al., 2013), salvo que se indique lo contrario.

3.1. Descripción del caso práctico

El estudio presentado propone un controlador difuso unificado para mejorar la gestión de la calidad del ambiente interior (IEQ). Este enfoque busca superar las limitaciones de los sistemas tradicionales de control HVAC, que a menudo son incapaces de manejar de manera eficiente múltiples variables y criterios interrelacionados.

El caso práctico analizado en la publicación consiste en aplicar el controlador difuso propuesto a una habitación piloto equipada con sensores de temperatura y humedad.

3.2. Diseño del controlador difuso

La propuesta incluye un controlador basado en lógica difusa, recomendado especialmente en aplicaciones donde el modelo matemático exacto del sistema no es conocido, pero su comportamiento puede ser descrito a partir de la experiencia. Este tipo de controlador mejora la flexibilidad ajustándose a los requisitos de confort y puede manejar situaciones críticas de manera más confiable, gracias a reglas basadas en el conocimiento experto.

3.2.1. Entradas y salidas

El sistema utiliza cinco sensores, que capturan cinco entradas distintas:

1. Temperatura interna ($S_{temp_{indoor}}$)
2. Temperatura externa ($S_{temp_{outdoor}}$)
3. Humedad relativa (S_{RH})
4. Concentración de CO₂ (S_{CO_2})
5. Nivel de iluminación (S_{light})

Las salidas son cuatro, que se corresponden a tres actuadores:

1. Programa del aire acondicionado (A_{Air}): caliente, frío, seco.

2. Nivel de temperatura ($A_{temp_{level}}$): bajar, mantener, subir.
3. Nivel de iluminación (A_{light}): bajo, medio y alto.
4. Nivel de humedad ($A_{h_{level}}$): apagado, bajo, estándar, alto, continuo.

Estos actuadores regulan el confort del ambiente interior al influir en el sistema HVAC. Las decisiones sobre estas salidas se toman con base en las lecturas de los cinco sensores y se ajustan dinámicamente según las reglas difusas definidas en el sistema

3.2.2. Funcionamiento del controlador

El FLC se basa en un motor de inferencia, que procesa las entradas tras la fuzzificación y genera salidas mediante un proceso de defuzzificación. Esto permite ajustar el sistema para lograr el confort del usuario.

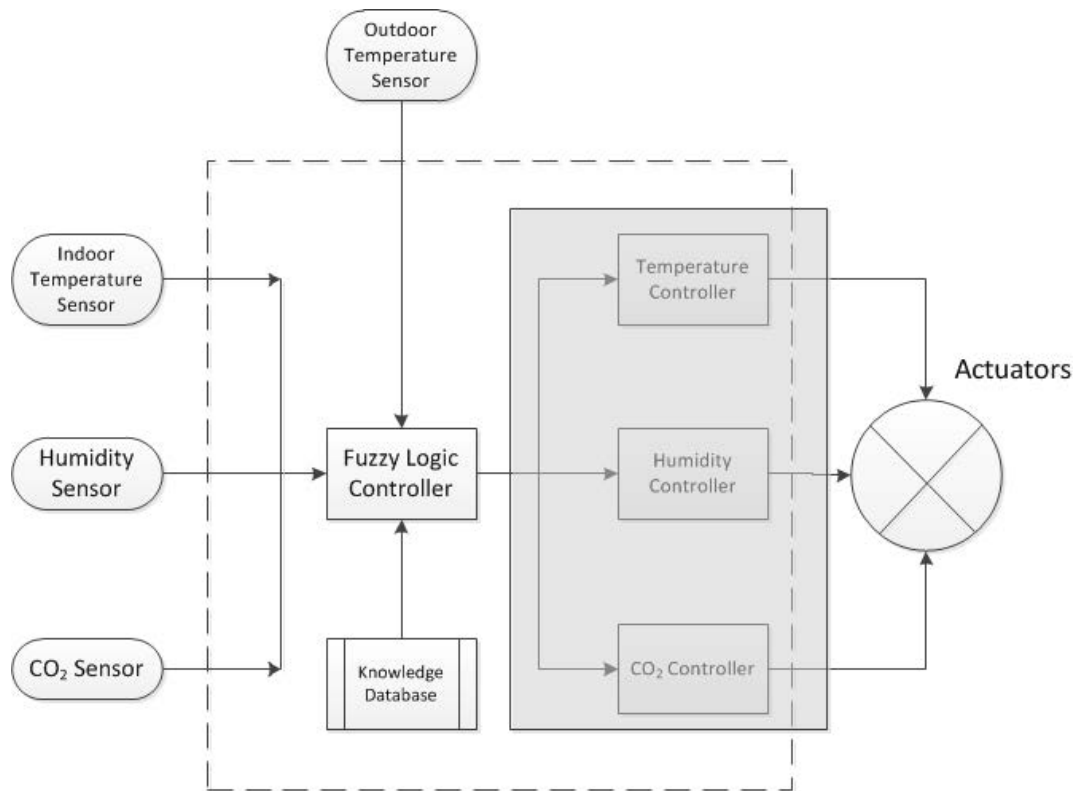


Figura 1: Arquitectura PID y controlador fuzzy.

La Figura 1 muestra la arquitectura del FLC, diseñado para regular diferentes variables ambientales mediante un conjunto de sensores y actuadores. Los sensores monitorean parámetros clave, como la temperatura interna y externa, la humedad y la concentración de CO2. Estas lecturas se envían al controlador difuso, que analiza los datos en combinación con una base de conocimiento.

Esta base de conocimiento contiene reglas y relaciones definidas por expertos que permiten al sistema tomar decisiones informadas.

El controlador difuso procesa las entradas y determina las acciones necesarias para mantener las condiciones óptimas dentro del entorno. Las decisiones se transmiten a una serie de controladores específicos para cada variable, como el controlador de temperatura, el de humedad y el de CO2. Finalmente, estos controladores ajustan los actuadores correspondientes para implementar las acciones recomendadas. De esta manera, el sistema asegura un ambiente confortable y eficiente, gestionando las interdependencias entre las distintas variables

La base de conocimiento del FLC incluye:

1. **Funciones de pertenencia:** se utilizan funciones trapezoidales para describir las etiquetas lingüísticas (Bajo, Medio, Alto) que serán empleadas para el proceso de fuzzificación.

$$\mu_L(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{si } x_i < a \text{ o } x_i > d, \\ \frac{x_i - a}{b - a} & \text{si } a \leq x_i \leq b, \\ 1 & \text{si } b \leq x_i \leq c, \\ \frac{d - x_i}{d - c} & \text{si } c \leq x_i \leq d. \end{cases}$$

Figura 2: Función de pertenencia.

En la Figura 2: L puede tomar el valor de Bajo, Medio y Alto; a y d son los puntos extremos de la función de pertenencia trapezoidal; b y c , los puntos máximos de la función de pertenencia trapezoidal; y x_i es el i -ésimo sensor.

Las Figuras 3 y 4 muestran las funciones de pertenencia utilizadas en el sistema de control difuso para las entradas y las salidas, respectivamente. Estas funciones son necesarias para convertir los valores numéricos (*crisp*) de los sensores en términos lingüísticos (bajo, medio, alto) que el sistema difuso pueda interpretar y procesar.

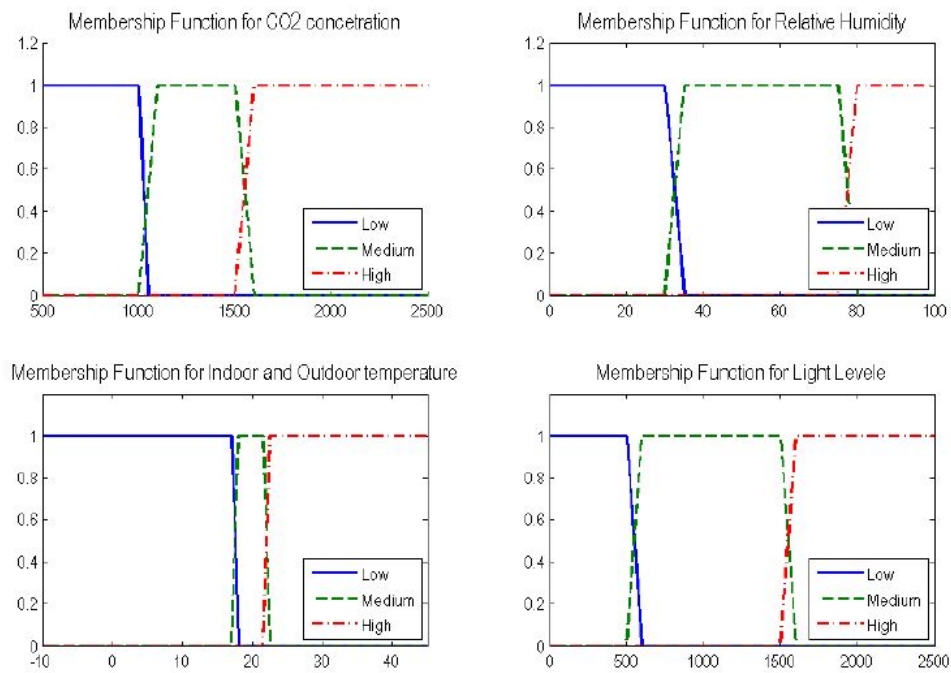


Figura 3: Función de pertenencia de las variables de entrada.

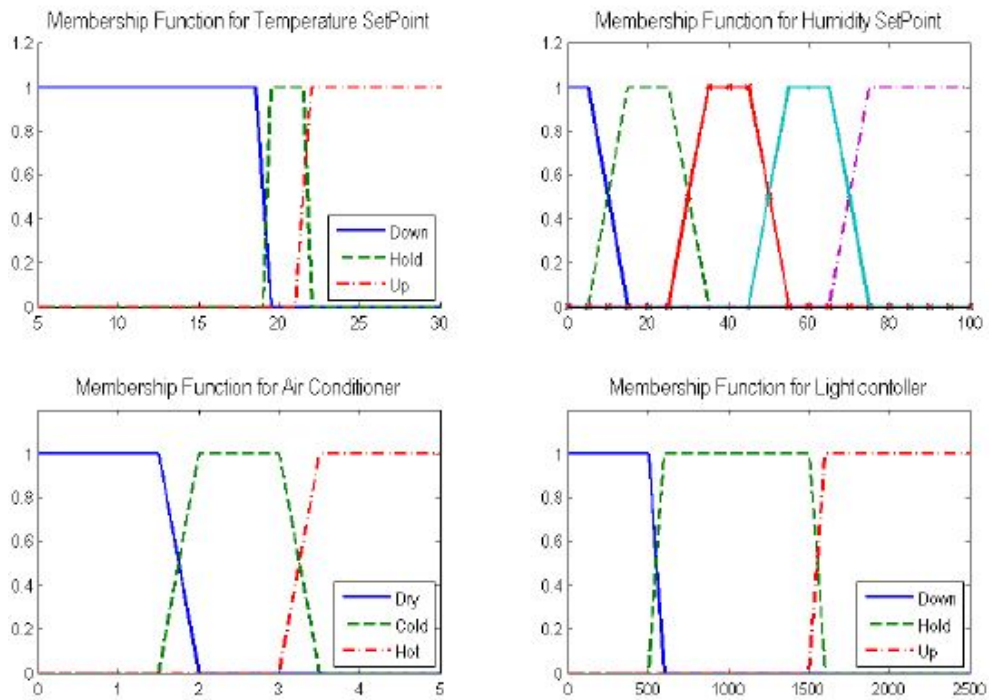


Figura 4: Función de pertenencia de las variables de salida

2. **Reglas difusas:** conjunto de reglas *IF-THEN* derivadas del conocimiento experto. Ejemplos:

- Si la temperatura interna es media y la externa es alta, entonces se mantiene la temperatura y se cambia el humidificador al nivel estándar.
- Si la humedad y la temperatura interna son bajas, entonces se pone el aire acondicionado en caliente, el humidificador en nivel alto y se sube la temperatura.

Se ha utilizado un total de 17 reglas, que dan lugar a diversos escenarios al combinar las posibles entradas del sistema. A continuación se muestra un subconjunto de dichas reglas:

IF $S_{temp_{indoor}}$ IS Medium AND $S_{temp_{outdoor}}$ IS High THEN $A_{temp_{level}}$ IS Hold AND $A_{h_{level}}$ IS Standard
IF S_{RH} IS Low AND $S_{temp_{indoor}}$ IS Low THEN A_{Air} IS Hot AND $A_{h_{level}}$ IS High AND $A_{temp_{level}}$ IS Up
IF S_{RH} IS Medium AND $S_{temp_{indoor}}$ IS Medium THEN $A_{h_{level}}$ IS Standard
IF S_{RH} IS High AND $S_{temp_{indoor}}$ IS Medium THEN A_{Air} IS Dry AND $A_{h_{level}}$ IS Continuous

Figura 5: Conjunto de reglas.

El motor de inferencia aplica el método *Mamdani Max-Min* para combinar reglas y calcular las salidas.

Como se ha visto antes, cada regla difusa tiene una condición (*IF*) y una conclusión (*THEN*). Para combinar las condiciones de entrada (los valores medidos por los sensores) con los antecedentes de las reglas, se usa el operador "min"(intersección). Esto calcula el grado de cumplimiento de la regla considerando las funciones de pertenencia de las entradas (en este caso, las funciones trapezoidales que traducen los valores crisp a difusos).

Luego, para combinar las salidas de varias reglas activadas, se usa el operador "max"(unión), generando así el conjunto difuso de salida que representa las conclusiones de todas las reglas activadas.

$$\mu_{R_i}(x) = \alpha_{i1} \wedge \alpha_{i2} \wedge \alpha_{i3} \wedge \alpha_{i4} \wedge \alpha_{i5}$$

$$\mu_{Output_i}(x) = \max(\mu_{R_1}(x), \mu_{R_2}(x), \dots, \mu_{R_{17}}(x))$$

Figura 6: Método Mamdani Max-Min.

En la Figura 6: x son las mediciones de los sensores de entrada, α_i es el grado en que una entrada dada satisface la condición de la i -ésima regla (R_i), y μ_{output_i} , la agregación de los conjuntos difusos de salida de todas las reglas para $output_i$.

Dado que el enfoque empleado es *Max-Min*, se puede asumir que se ha utilizado el *Modo A - FATI (First Aggregate Then Infer)*, que como su nombre indica, consiste en primero agregar

los conjuntos difusos individuales inferidos, y después defuzzificar para obtener un valor preciso, manteniendo toda la información difusa hasta el último paso (Peregrín Rubio, 2000).

Para el proceso de defuzzificación, en el estudio no se concreta de manera explícita el método utilizado, pero es muy probable que se haya empleado el método *centroide*, también conocido como centro de gravedad, ya que es uno de los más comunes asociados al método Mamdani tradicional.

Esta técnica calcula el punto medio del área bajo la curva del conjunto difuso resultante. Matemáticamente (Figura 7), se obtiene como el cociente entre: la suma ponderada de todos los valores de salida posibles (z) en el rango del conjunto difuso (cuánto contribuye cada valor z al equilibrio general) y la suma total de los grados de pertenencia ($C(z)$) en el conjunto difuso.

$$d_{CA}(C) = \frac{\int_{-c}^c C(z)z \, dz}{\int_{-c}^c C(z) \, dz}$$

Figura 7: Fórmula para calcular el centroide (Klir & Yuan, 1996).

3.3. Pruebas en simuladores y entornos reales

Se han realizado pruebas del FLC tanto en simuladores como en entornos físicos reales.

3.3.1. Configuración del simulador

Se desarrolló un simulador con una interfaz web para probar el controlador difuso que va a gestionar los parámetros de confort ambiental en interiores.

Dicho simulador permite definir rangos de confort, ingresar valores de las condiciones actuales del ambiente (temperatura, iluminación, humedad y concentración de CO₂) y obtener las acciones necesarias para mantener dichos parámetros dentro de los rangos deseados.

El simulador contiene tres paneles, asociados a tres elementos distintos:

1. **Los rangos de confort:** este panel permite definir los intervalos de confort que utilizará el controlador para sus reglas difusas. Por ejemplo, se pueden establecer valores específicos para las etiquetas ("baja", "media", "alta") de humedad o temperatura.

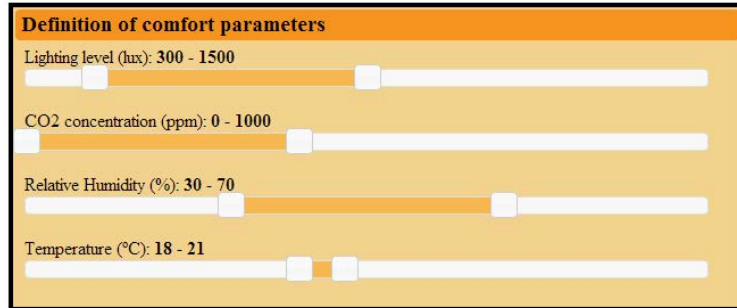


Figura 8: Panel de definición de intervalos de confort.

2. **Los valores de entrada:** encargado de registrar los datos de las condiciones de interior actuales, simulando los valores que los sensores reales proporcionarían en un entorno físico real. Estas entradas corresponden a las variables que figuran en los antecedentes de las reglas difusas.

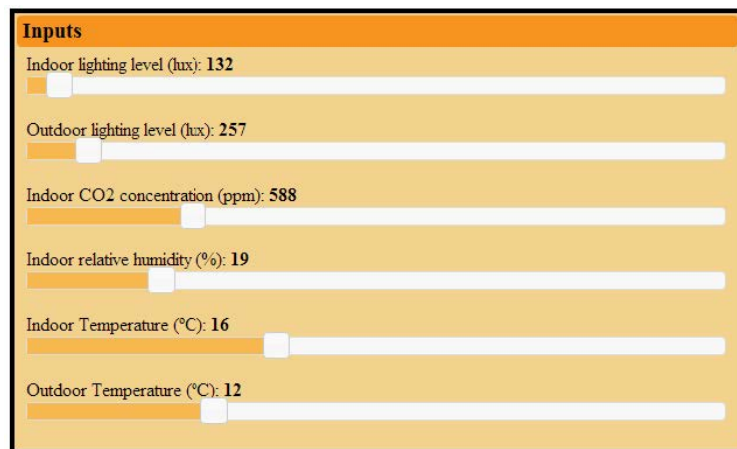


Figura 9: Panel de definición de valores de entrada.

3. **Los valores de salida:** donde se disponen las acciones sugeridas por el controlador para ajustar el ambiente, y así poder reajustar las condiciones actuales dentro de los intervalos de confort definidos en el primer panel.

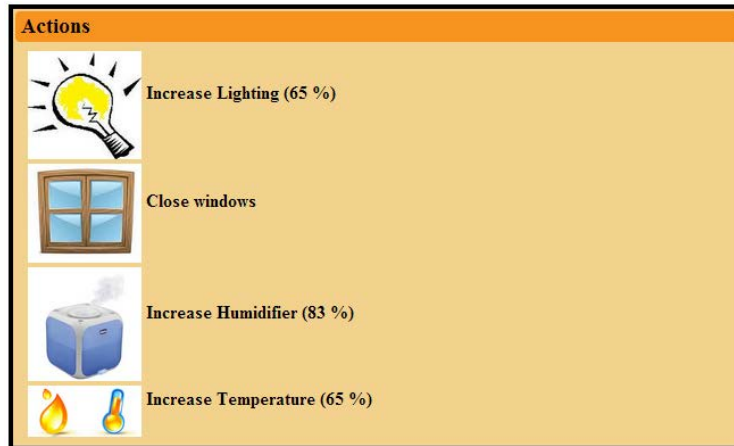


Figura 10: Panel de definición de valores de salida.

El formato de las salidas son acciones concretas con un grado de aplicación especificado, en el supuesto de que deba aplicarse. A continuación se muestran algunos ejemplos de salidas:

- Si la iluminación interior y exterior es baja, se sugiere activar la iluminación artificial.
- Si la humedad relativa interior es del 19 %, por debajo del umbral de confort del 30 %, se recomienda activar el humidificador.
- Si la temperatura interior es baja y la exterior también, se instruye cerrar las ventanas y aumentar la temperatura usando el sistema HVAC.

Los resultados obtenidos concuerdan con las previsiones de los expertos en energía que participaron en el proyecto. Esto demuestra que las reglas implementadas reflejan adecuadamente las estrategias recomendadas para mantener un entorno confortable en interiores.

Además, el simulador se convirtió en una herramienta útil para la mejora continua, ya que permitió a los expertos realizar ajustes y optimizaciones de manera iterativa. Pues inicialmente, se partió del conjunto de reglas definidas por los expertos, basándose en su conocimiento y experiencia previa; sin embargo, al observar los resultados generados por el simulador en distintos escenarios, pudieron identificar áreas de mejora, logrando así mejorar la precisión del controlador y su capacidad de adaptación a situaciones cambiantes.

En resumen, el simulador no solo sirvió para validar las reglas iniciales, sino que también actuó como un laboratorio virtual donde los expertos podían experimentar con diferentes configuraciones. Esto permitió un desarrollo progresivo hacia un sistema más robusto, eficiente y alineado con los objetivos de confort y sostenibilidad energética.

3.3.2. Configuración experimental

Para complementar las pruebas del simulador previamente mencionado, el controlador difuso fue sometido a una serie de tests en un entorno real, concretamente, en una habitación equipada con varios sensores.

La habitación experimental utilizada, con unas dimensiones de 5.2m x 5.2m x 2.5m, tenía las siguientes características:

- Una puerta y una ventana ubicadas en posiciones opuestas.
- Un sistema HVAC con calefacción, ventilación y aire acondicionado.
- Dos sensores para medir la temperatura y humedad, respectivamente (1).
- La ausencia de muebles y ocupantes durante el período de pruebas (2).

(1) De esta manera, aunque no pudieron obtenerse resultados en función de todos los parámetros implicados en la IEQ debido a limitaciones técnicas, las dos variables que sí pudieron tomarse en cuenta proporcionaron resultados interesantes.

(2) Para así poder eliminar grandes interferencias externas que pudieran alterar las mediciones; aunque al final la puerta se abrió ocasionalmente, con la entrada breve de algunas personas, lo que terminó generando pequeñas perturbaciones que fueron consideradas en el análisis.

En cuanto a la recopilación y almacenamiento de datos, se tomó el mes de diciembre como período de pruebas, capturando los datos medidos cada 15 minutos. Estas mediciones, que incluían información sobre la temperatura y humedad dentro de la habitación, se exportaron a una base de datos para su posterior análisis y comparación.

3.4. Resultados del estudio

Para este subapartado, se han tenido en cuenta los resultados que se obtuvieron en las pruebas experimentales en el período de diciembre de 2012.

Para analizar el rendimiento y utilidad de la propuesta, se realiza una comparación de los resultados obtenidos en la sala piloto cuando se ejecutan dos tipos distintos de controladores: el controlador difuso diseñado y un controlador reactivo más tradicional.

En el caso de la temperatura (Figura 11), se observa que el controlador difuso, representado en la zona gris del gráfico, logra mantener la temperatura en el rango de confort de manera constante y con mínima variación. Esto significa que el controlador difuso no solo ajusta la temperatura dentro de los límites deseados, sino que también evita grandes fluctuaciones, proporcionando un ambiente estable. En cambio, durante el periodo en blanco, cuando operaba el controlador reactivo, aunque

la temperatura también se mantenía en el rango de confort, las oscilaciones eran notoriamente más pronunciadas, lo que implica un ajuste menos preciso y estable.

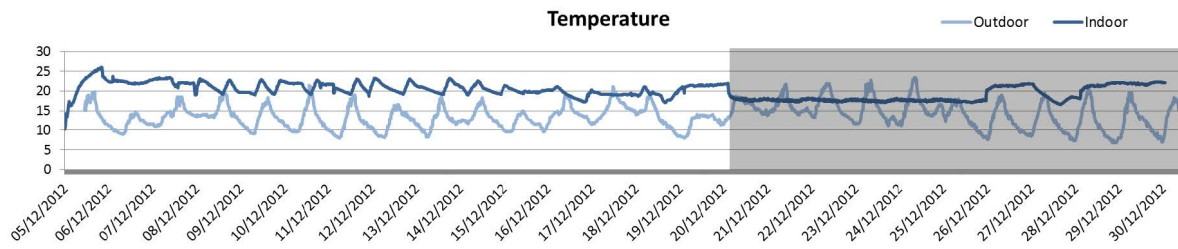


Figura 11: Valores de la temperatura recogidos en diciembre de 2012.

Para la humedad relativa (Figura 12), aunque la estabilidad es menos clara que en el caso de la temperatura, el controlador difuso también demuestra un mejor rendimiento. En la zona gris, donde el controlador difuso estaba activo, las oscilaciones en la humedad son menores, manteniéndose dentro del rango de confort de forma más controlada. Esto contrasta con el periodo inicial, donde el controlador reactivo produce mayores fluctuaciones, lo que sugiere que el controlador difuso es más efectivo en estabilizar tanto la temperatura como la humedad relativa.

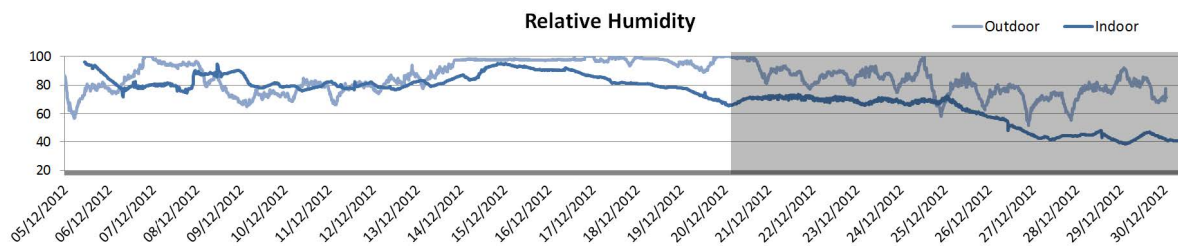


Figura 12: Valores de la humedad recogidos en diciembre de 2012.

En resumen, estos resultados indican que el controlador difuso no solo es eficaz en mantener las condiciones de confort (temperatura y humedad) dentro de los límites deseados, sino que además logra hacerlo con menos variaciones, creando un ambiente más estable en comparación con el controlador reactivo.

4. Estudios y enfoques alterativos

A continuación, se han evaluado dos enfoques alternativos de control difuso de la calidad del ambiente interior, para más adelante hacer un estudio comparativo de los tres.

4.1. Control fuzzy de sistemas HVAC optimizado con algoritmos genéticos

Este trabajo, realizado por un investigador de la Universidad de Jaén (Rafael Alcalá) y cuatro de la Universidad de Granada (José M. Benitez, Jorge Casillas, Oscar Cordón y Raúl Pérez) combina control difuso con algoritmos genéticos para optimizar los sistemas HVAC, mejorando la eficiencia energética y el confort (Alcalá et al., 2003).

El estudio se centró en el control de sistemas HVAC en dos sitios de prueba reales, con el objetivo de optimizar tanto el rendimiento energético como las condiciones de confort interior. Estos sitios incluían un centro de investigación en Francia y una instalación privada. Cada uno tenía características específicas, como sistemas HVAC de diferente configuración, lo que presentaba un desafío adicional para diseñar un controlador adaptable y eficiente. Los expertos proporcionaron modelos térmicos detallados para ambos sitios, ajustados a las condiciones climáticas y de ocupación específicas de cada temporada.

4.1.1. Diseño del controlador difuso

El controlador difuso fue diseñado para manejar múltiples criterios, como el confort térmico, la calidad del aire interior y el consumo de energía, usando una base de reglas construida con la experiencia de expertos. Además, se utilizaron funciones de pertenencia triangulares para simplificar el proceso de inferencia y mejorar la manejabilidad del sistema.

A diferencia del estudio principal que se trata en este documento, este proyecto también integró algoritmos genéticos (AG) para afinar automáticamente los parámetros del controlador difuso. Estos AG optimizaron las bases de conocimiento ajustando las funciones de pertenencia para mejorar el rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas. El método propuesto recibió el nombre de *Weighted Multi-Criteria Steady-State Genetic Algorithm* (WMC-SSGA), cuyo comportamiento viene reflejado en la Figura 13.

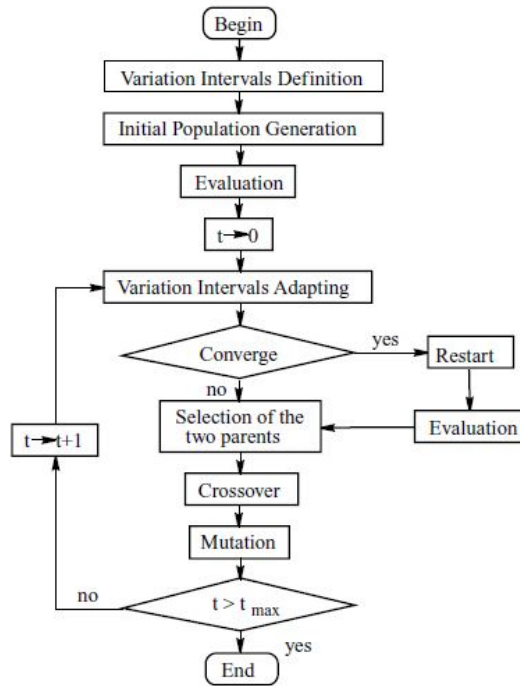


Figura 13: Diagrama de flujo del algoritmo WMC-SSGA (Alcalá et al., 2003).

No se va a entrar en detalle con el funcionamiento del algoritmo genético, pero se podría resumir de la siguiente manera:

El WMC-SSGA comienza con la generación de una población inicial dentro de unos límites. Estas soluciones potenciales codifican parámetros para el controlador difuso, que serán evaluadas por el algoritmo basándose en una función objetivo multicriterio ponderada (con indicadores como minimizar el consumo energético y mantener los niveles de confort). Si no hay suficiente mejora, se ajustan los límites, y después, se seleccionan las mejores soluciones (padres), que se combinan y modifican para crear nuevas soluciones. Este proceso se repite de forma iterativa, evaluando y mejorando las soluciones hasta llegar a un límite o encontrar una solución lo suficientemente buena.

El método anterior contrasta con el FLC unificado, que carece de capacidades de autoajuste y depende únicamente de reglas definidas por expertos.

El controlador difuso presenta una estructura jerárquica, diseñada para procesar múltiples variables y tomar decisiones complejas optimizando el rendimiento del sistema HVAC. Esta estructura se organiza en módulos jerárquicos, donde cada nivel se encarga de tareas específicas y alimenta al siguiente. Se muestra un ejemplo en la Figura 14.

En la primera capa, se procesan variables básicas como las entradas del índice de control térmico (PMV), el valor del PMV anterior (PMV_{t-1}), la diferencia entre la temperatura exterior y la interior ($T_{out-Tin}$) y la posición de la válvula antes del ajuste ($Valve\ old\ position$).

Las flechas entre módulos indican el flujo de la información, señalando cómo los módulos

de niveles inferiores sirven para calcular valores que son utilizados como entradas por los niveles superiores. Por ejemplo, partiendo de la *PMV* y *PMV t-1*, se obtiene la preferencia térmica (*Thermal preference*) basada en las condiciones actuales del ambiente. Y esta variable, que pertenece a la segunda capa, puede utilizarse con la *Tout-Tin* para obtener calor requerido (*Required heat*). Este último es necesario en la tercera capa para, junto con la anterior posición de la válvula y la prioridad térmica/energética, poder calcular tanto la nueva posición de la válvula como la velocidad del ventilador del sistema HVAC.

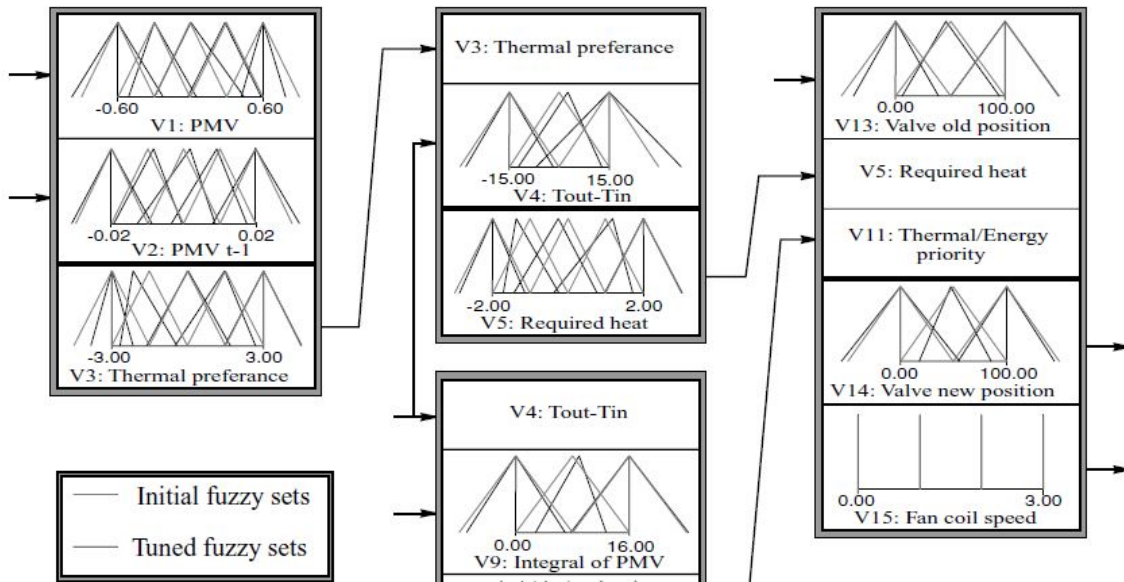


Figura 14: Diagrama de módulos jerárquicos y funciones de pertenencia (Alcalá et al., 2003).

Las optimizaciones fruto del algoritmo genético vienen reflejadas en la Figura 14 mediante las líneas negras de las gráficas, en contraste con las grises, que representan la configuración original del sistema. Tras la optimización, las funciones muestran ligeros desplazamientos y ajustes en sus picos y bordes, adaptándose mejor a los datos del modelo, ya que estos cambios buscan maximizar la precisión y robustez del sistema.

Asimismo, a diferencia del estudio anterior, en este se ha seguido el *Modo B - FITA (First Infer Then Aggregate)*. «En este modo de trabajo, se considera individualmente la contribución de cada conjunto difuso inferido y la acción precisa final se obtiene mediante algún tipo de operación efectuada sobre un valor preciso característico obtenido a partir de cada conjunto difuso individual. De este modo, se evita el calculo del conjunto difuso final, lo que ahorra una gran cantidad de tiempo de cálculo» (Peregrín Rubio, 2000). Dicho en otras palabras, cada conjunto difuso resultante de una regla se defuzzifica individualmente, y posteriormente, se utiliza una técnica para combinar los valores crisp obtenidos y así poder producir la salida final.

Para la defuzzificación, en lugar del cálculo del centroide, se ha empleado la técnica *MOM*

(*Mean of Maxima*) o media de los máximos, en el que se seleccionan todos los puntos del conjunto difuso de salida donde la función de pertenencia alcanza su valor máximo, para luego calcular el promedio aritmético de esos puntos máximos.

$$d_{MM}(C) = \frac{\sum_{z_k \in M} z_k}{|M|}$$

Figura 15: Fórmula de Mean of Maxima (MOM) (Klir & Yuan, 1996).

En la Figura 15, se considera un conjunto M de valores crisp (z_k) que tienen el grado de pertenencia máximo dentro del conjunto difuso C .

4.1.2. Pruebas

Se llevaron a cabo experimentos tanto en simulaciones como en entornos reales. Los primeros permitieron evaluar durante períodos de 10 días las distintas configuraciones del controlador bajo condiciones climáticas específicas; mientras que los segundos proporcionaron validación en condiciones más realistas. Los resultados se compararon con un controlador convencional On-Off y con versiones iniciales no optimizadas del FLC para medir la mejora alcanzada.

4.1.3. Resultados y conclusiones

Al igual que el controlador difuso unificado, los resultados de este estudio mostraron mejoras significativas en comparación con los controladores tradicionales.

En términos de eficiencia energética, en este estudio se lograron ahorros de hasta un 20 % en algunos casos gracias al uso de algoritmos genéticos, mientras que los parámetros de confort se mantuvieron dentro de los rangos deseados con fluctuaciones mínimas. Estos resultados sugieren que la integración de técnicas avanzadas de optimización puede potenciar aún más la eficacia de los controladores difusos.

En comparación con el FLC unificado, este permite la optimización automática de funciones de pertenencia y reglas, logrando un mayor desempeño en el balance entre eficiencia energética y confort, y es altamente escalable para sistemas complejos con múltiples variables y reglas. No obstante, supone una mayor complejidad computacional, su configuración inicial es más costosa y algunos ajustes pueden requerir reentrenamiento con los algoritmos genéticos.

4.2. Sistema de inferencia difusa centrado en la evaluación de IEQ

El sistema propuesto por Karol Jabłoński y Tomasz Grychowski, miembros de una universidad polaca, se diseñó para evaluar las condiciones ambientales interiores en un edificio mediante un sistema de sensores y un módulo de inferencia difusa. Similar al primer estudio, este sistema se enfocó en múltiples parámetros como temperatura, humedad y CO₂, pero también integró otros factores como iluminación, ruido y olores, proporcionando una evaluación más completa del confort interior (Jabłoński & Grychowski, 2018).

El estudio no describe un controlador difuso en el sentido clásico (es decir, un sistema que toma decisiones para regular un proceso dinámico), sino más bien un sistema de inferencia difusa diseñado para evaluar y calificar el confort ambiental en interiores. Aunque emplea lógica difusa y comparte componentes clave de un controlador difuso (como funciones de pertenencia, reglas difusas y defuzzificación), su propósito es diferente.

Dicho esto, el sistema podría evolucionar hacia un controlador difuso si sus salidas fueran utilizadas para ajustar automáticamente dispositivos como sistemas HVAC.

4.2.1. Diseño del sistema difuso

Este estudio adoptó un sistema híbrido de inferencia difusa para procesar múltiples índices, utilizando una estructura modular con subsistemas independientes para manejar los distintos parámetros.

La Figura 16 representa el funcionamiento del sistema de inferencia difusa, que se distingue por su enfoque integral, al combinar múltiples parámetros ambientales mediante subsistemas especializados que contribuyen a una evaluación global del confort.

Las variables monitoreadas incluyen temperatura del aire, temperatura de globo negro, humedad relativa, densidad de CO₂, iluminación, ruido y olores, que se procesan a través de módulos de inferencia difusa para estimar diferentes índices de confort. Cada uno de estos índices (confort térmico, frescura del aire y fatiga) es calculado de forma independiente en tres subsistemas, y luego integrado en un módulo principal (confort general) que genera una evaluación global del confort percibido.

Así, a diferencia de los otros dos sistemas que se centran en un conjunto más reducido de variables, este enfoque incluye factores adicionales como olores y ruido, que pueden tener un impacto significativo en la percepción del confort. Además, el sistema consta de 92 reglas difusas, distribuidas entre 4 subsistemas principales, lo que contrasta con un enfoque unificado, que habría requerido hasta 2400 reglas para cubrir todas las combinaciones posibles de entradas.

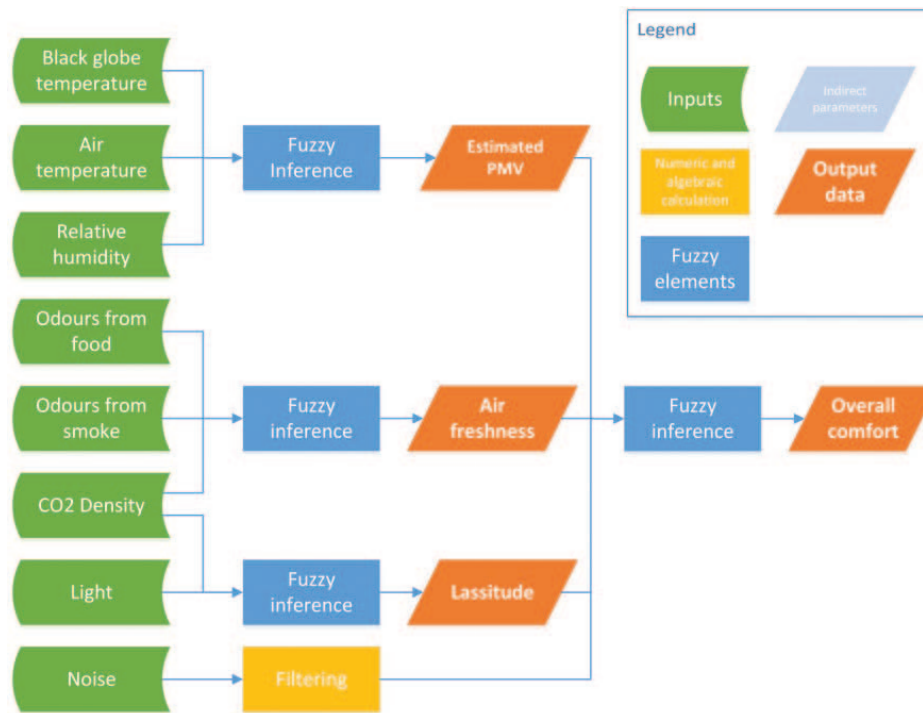


Figura 16: Diagrama del sistema de inferencia difusa (Jabłoński & Grychowski, 2018).

En este estudio se han utilizado funciones de pertenencia triangulares para las salidas y trapezoidales para algunas entradas. Se muestra un ejemplo en la Figura 17.

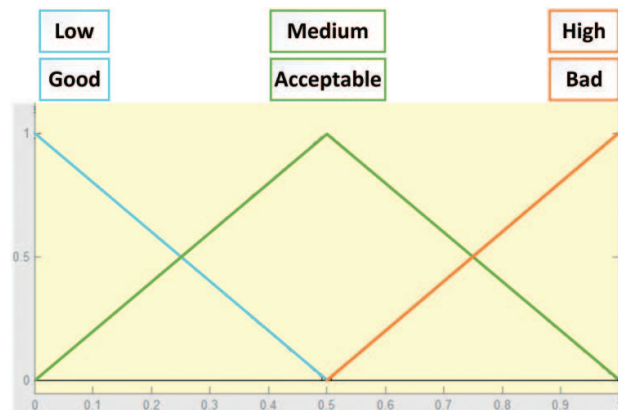


Figura 17: Funciones de pertenencia de la fatiga y frescura (Jabłoński & Grychowski, 2018).

Además, este sistema destaca por implementar un módulo de inferencia en *LabVIEW*, diseñando desde cero los bloques de fuzzificación, inferencia y defuzzificación, mientras que en otros estudios se utilizaron herramientas estándar o adaptaciones de controladores PID.

4.2.2. Pruebas

Las pruebas en este sistema se realizaron en un entorno real, con mediciones de confort en diferentes condiciones, incluyendo variaciones en ocupación y ventilación en múltiples escenarios.

Durante las pruebas, se realizaron encuestas para validar los índices calculados por el sistema, permitiendo alinear las percepciones humanas con las salidas del sistema y obteniendo una alta concordancia entre ambas. El enfoque anterior no está presente en los otros dos estudios, donde la validación se centró más en la comparación con sistemas tradicionales o en el análisis de la eficiencia energética.

4.2.3. Resultados y conclusiones

En la Figura 18, se comparan las salidas del sistema difuso con encuestas subjetivas en los cuatro aspectos del confort ambiental definidos por los subsistemas. Los resultados muestran que el sistema sigue tendencias similares a las percepciones humanas, con picos y descensos relacionados con cambios en las condiciones ambientales, aunque es más continuo y menos variable que las encuestas. Esto valida la capacidad del sistema para evaluar objetivamente el confort, reflejando correctamente los efectos de factores como temperatura, iluminación y concentración de CO₂.

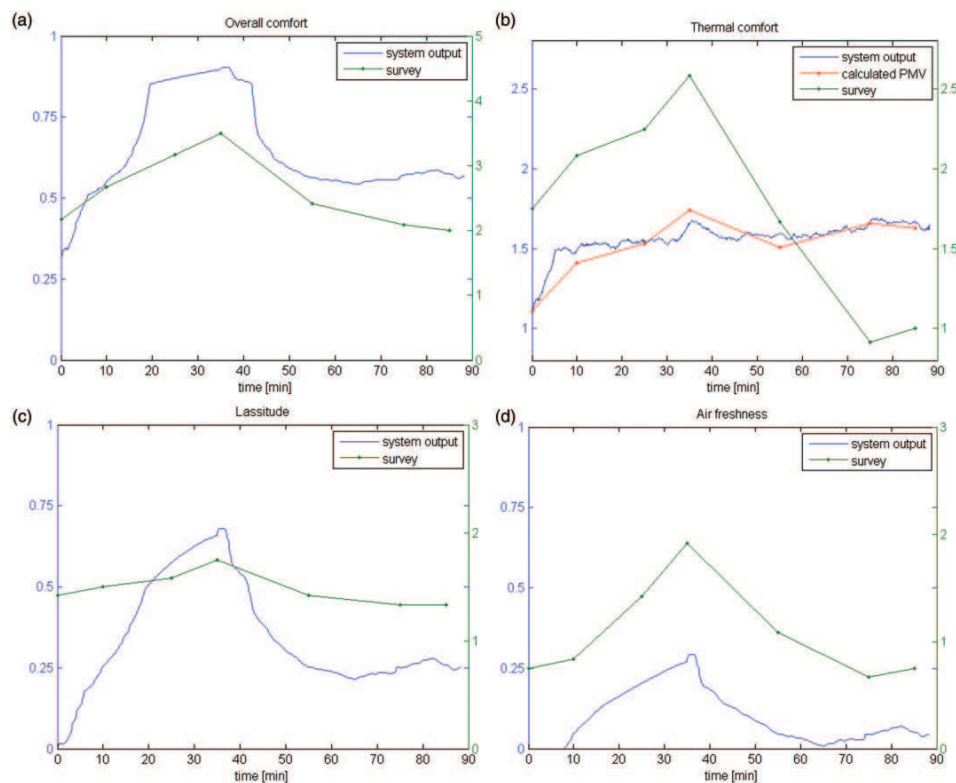


Figura 18: Resultados de las encuestas y medidas del sistema (Jabłoński & Grychowski, 2018).

Este enfoque destaca por la detección de eventos específicos como la presencia de alimentos o cambios en la ocupación. De esta forma, este sistema amplía el rango de variables monitoreadas y evaluadas, proporcionando una evaluación más centrada en todo aquello que define IEQ.

Como ventajas adicionales, dividir un sistema difuso en subsistemas reduce drásticamente la complejidad al evitar el crecimiento exponencial (n^m , siendo n es el número de valores de entrada y m el número de entradas) de reglas que ocurriría en un sistema unificado, donde cada entrada y sus combinaciones requieren cobertura. Esto hace que el diseño sea más manejable y ajustable. Además, la modularidad permite mejorar o expandir cada subsistema de forma independiente, sin afectar al resto; por ejemplo, al añadir un nuevo sensor solo se ajusta el subsistema correspondiente. También mejora la eficiencia computacional, ya que cada subsistema realiza cálculos más simples, permitiendo respuestas rápidas a los cambios ambientales.

Aunque dividir un sistema difuso en subsistemas ofrece claras ventajas, también puede presentar algunas desventajas en comparación con el enfoque unificado. Una de las principales limitaciones es la pérdida de interacción directa entre todas las variables de entrada. Al segmentar las entradas en módulos, las interacciones complejas que podrían influir en el resultado general pueden no ser capturadas de manera precisa, ya que cada subsistema procesa solo un subconjunto de las variables. Además, requiere una fase adicional de integración para combinar las salidas de los subsistemas en un resultado global, lo que puede introducir incertidumbre o simplificaciones adicionales. Finalmente, aunque se reduce la complejidad computacional, un sistema unificado podría ser más eficiente en aplicaciones donde el hardware es suficientemente potente, ya que permite procesar todas las combinaciones posibles en una sola etapa sin necesidad de combinar resultados.

4.3. Comparaciones entre los tres estudios

Las comparaciones entre FLCs diseñados se han realizado en base a cinco aspectos generales:

Aspecto	Controlador difuso unificado	Controlador con algoritmos genéticos	Sistema de inferencia difusa
Variables controladas	Temperatura, humedad, CO2, iluminación	Temperatura, humedad, CO2, consumo energético...	Temperatura, humedad, CO2, iluminación, ruido, olores...
Enfoque metodológico	Controlador difuso clásico con reglas definidas por expertos. FLC supervisa PIDs para HVAC	Integración de algoritmos genéticos para optimizar automáticamente reglas y funciones de pertenencia	Arquitectura modular con subsistemas independientes. Implementación en LabVIEW
Pruebas y validación	Pruebas en una habitación piloto controlada, comparando con controlador reactivo	Simulaciones y pruebas en múltiples entornos reales bajo diferentes condiciones estacionales	Pruebas en entornos ocupados reales, correlacionando resultados con encuestas de usuarios
Objetivo principal	Optimizar el confort interior y la eficiencia energética en sistemas HVAC	Equilibrio dinámico entre confort y eficiencia energética	Evaluación integral del confort interior basado en múltiples índices
Aplicación recomendada	Escenarios con reglas de confort bien definidas, simplicidad y robustez	Entornos donde se requiere máxima eficiencia energética y optimización precisa	Edificios donde la percepción humana del confort es crítica

Cuadro 2: Comparación de tres estudios sobre controladores difusos para IEQ.

En conjunto, estos tres enfoques destacan la flexibilidad de los controladores difusos y su capacidad para adaptarse a distintas necesidades y restricciones operativas.

La elección entre estos enfoques dependerá del contexto de aplicación y los objetivos específicos, como si se busca mayor integración en sistemas existentes o una evaluación más detallada de los parámetros de confort.

5. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se presentó un controlador difuso capaz de gestionar varias variables críticas para la calidad ambiental interior de una habitación. Su principal ventaja es la integración de múltiples controles en un solo sistema, lo que permite manejar las variables de manera conjunta y considerar las interacciones entre ellas. Esto resulta indispensable para evitar conflictos entre los distintos sistemas, como la activación simultánea de dispositivos que podrían contradecirse.

El desarrollo del simulador permitió configurar los rangos de confort y evaluar el desempeño del controlador antes de su aplicación en un entorno real. Al implementarse en una habitación, el sistema demostró un control eficiente de la temperatura y la humedad. Los resultados evidenciaron que, en comparación con un controlador reactivo, el controlador difuso mantiene la temperatura más estable y dentro del rango de confort.

5.1. Consecución de objetivos

Se recupera la tabla de objetivos de la sección 1.2. (Cuadro 1) para marcar aquellos que han sido alcanzados en una nueva tabla (Cuadro 3).

En primer lugar, el controlador difuso implementado mostró una mejora significativa en la eficiencia energética del sistema HVAC. Al comparar su desempeño con un controlador reactivo, se evidenció que el FLC no solo mantenía las condiciones de confort dentro de los rangos deseados, sino que lo hacía con una mayor estabilidad y menores oscilaciones. Esto implica un uso más eficiente de los recursos energéticos, ya que se evita la activación y desactivación innecesaria de los sistemas de climatización.

En relación con el segundo subobjetivo cumplido, el sistema desarrollado integró datos de diversos sensores, que permitieron una evaluación más completa del entorno, proporcionando al controlador una visión holística de las condiciones ambientales para tomar decisiones más precisas y coordinadas. Aunque el experimento en la habitación piloto se centró en temperatura y humedad, la funcionalidad para incluir más variables se validó en el simulador.

Uno de los logros más destacados del controlador difuso fue la reducción de las oscilaciones en las variables ambientales. Tanto la temperatura como la humedad se mantuvieron dentro de los rangos de confort con mínimas fluctuaciones durante los periodos en que el controlador difuso estuvo activo. Esto contrasta con el comportamiento del controlador reactivo, que mostró variaciones más notorias. Esta estabilidad mejorada contribuye directamente al confort de los ocupantes y a la eficiencia operativa del sistema.

Subobjetivos	Descripción	Alcanzado
Optimización del consumo energético	Reducir el consumo energético de los sistemas HVAC mientras se mantienen niveles de adecuados de confort	✓
Integración de sensores múltiples	Utilizar datos de múltiples sensores (temperatura, humedad, CO2, iluminación) para una evaluación más completa del entorno	✓
Mejora de la estabilidad del sistema	Reducir las oscilaciones en los parámetros ambientales mediante la implementación de reglas difusas más precisas.	✓
Flexibilidad y escalabilidad	Diseñar un sistema de control que pueda adecuarse fácilmente a diversos entornos y condiciones operativas.	~
Control predictivo y preventivo	Anticipar cambios en la calidad del ambiente interior y tomar medidas correctivas antes de que los niveles de confort se vean comprometidos.	x
Personalización del confort	Ajustar dinámicamente las condiciones ambientales de acuerdo con las preferencias y actividades de los usuarios	x

Cuadro 3: Subobjetivos cumplidos del FLC unificado.

5.2. Trabajos futuros

Con respecto al subobjetivo de *Flexibilidad y escalabilidad* del Cuadro 3, cabe mencionar que la configuración de la habitación experimental descrita en la sección 3.3.2., aunque ideal para este tipo de experimentos al permitir un mayor control sobre las variables, no es representativa de un entorno habitado típico. Por ello, en futuros experimentos, se podría introducir factores adicionales, como la presencia de personas y muebles, para evaluar el desempeño del controlador en condiciones más realistas y complejas. Los otros dos estudios resultan más escalables debido a los siguientes motivos: en caso de tener que incluir nuevos sensores o variables, en el sistema de inferencia difusa se reduce el impacto de los cambios debido a la separación en módulos y subsistemas, y en el FLC optimizado con algoritmos genéticos, se pueden ajustar automáticamente las funciones de pertenencia y reglas sin necesidad de rediseño manual, reduciendo a su vez la dependencia del conocimiento experto.

Asimismo, aunque las pruebas realizadas en este estudio han brindado resultados prometedores, el sistema tiene margen de mejora. El próximo paso es expandir su funcionalidad mediante

la incorporación de nuevos sensores y actuadores (ampliando también el subobjetivo cumplido de *Integración de sensores múltiples*) y redefinir las reglas, lo que permitirá controlar variables adicionales como la iluminación y la concentración de CO₂, que además ya han sido evaluadas en el simulador. En pocas palabras, este estudio ha permitido establecer las bases para futuras implementación adaptada a entornos más complejos.

El estudio principal se ha centrado en proponer un controlador difuso unificado, pero si se quisieran alcanzar los dos últimos subobjetivos, se podría combinar con otras técnicas, como se ha hecho en los dos estudios alternativos evaluados.

Por ejemplo, para poder ajustar las condiciones ambientales en función de las preferencias y actividades de los usuarios, se puede hacer como en el estudio del sistema de inferencia difuso de Polonia, que integra múltiples índices, incluidos fatiga y frescura del aire, lo que permite una evaluación más personalizada del confort en función de la percepción humana. Para profundizar todavía más, se podría optar por incluir módulos de aprendizaje automático que puedan aprender de las interacciones de los usuarios con el sistema para adaptar las reglas de confort a las preferencias individuales.

Para el último subobjetivo pendiente, que consiste en anticipar cambios en la calidad ambiental y tomar medidas correctivas antes de que los niveles de confort se vean comprometidos, se puede adoptar un enfoque parecido al seguido en el segundo estudio. Este permite gran flexibilidad gracias a la optimización automática de las reglas y funciones de pertenencia mediante algoritmos genéticos en tiempo real, lo que lo acerca a este objetivo, ya que anticipa cambios y ajusta parámetros de manera proactiva. También podría considerarse incorporar otros módulos de predicción basados en algoritmos de machine learning para alcanzar este objetivo.

6. Bibliografía

- Alcalá, R., Benítez, J. M., Casillas, J., Cordon, O., & Pérez, R. (2003). Fuzzy control of HVAC systems optimized by genetic algorithms. *Applied Intelligence*, 18, 155-177.
- Comisión Europea. (2020). La eficiencia energética de los edificios. https://commission.europa.eu/system/files/2020-03/in_focus_energy_efficiency_in_buildings_es.pdf
- Jabłoński, K., & Grychowski, T. (2018). Fuzzy inference system for the assessment of indoor environmental quality in a room. *Indoor and Built Environment*, 27(10), 1415-1430.
- Klir, G. J., & Yuan, B. (1996). Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications. *Possibility Theory versus Probab. Theory*, 32(2), 207-208.
- Molina-Solana, M., Ros, M., & Delgado, M. (2013). Unifying fuzzy controller for indoor environment quality. *2013 Joint IFSA world congress and NAFIPS annual meeting (IFSA/NAFIPS)*, 1080-1085.
- Peregrín Rubio, A. (2000). *Integración de operadores de implicación y métodos de defuzzificación en sistemas basados en reglas difusas: implementación, análisis y caracterización* [Tesis doctoral, Universidad de Granada].
- Vargas Marcos, F., & Gallego Pulgarín, I. (2005). Calidad ambiental interior: bienestar, confort y salud. *Revista española de salud pública*, 79, 243-251.