



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:

Abstract:

Palabras clave:

Key words:

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	13
3.3.1. Configuración del simulador	13
3.3.2. Configuración experimental	16
3.4. Resultados del estudio	16
4. Estudios y enfoques alterativos	19
4.1. Control fuzzy de sistemas HVAC optimizado con algoritmos genéticos	19
4.2. Sistema de inferencia difusa centrado en la evaluación de calidad ambiental	19
4.3. Comparación y resultados interesantes	19
5. Conclusiones y trabajos futuros	20
5.1. Consecución de objetivos	20
5.2. Trabajos futuros	20
6. Bibliografía	21

Índice de figuras

1.	Arquitectura PID y controlador fuzzy	10
2.	Función de membresía	11
3.	Función de membresía de las variables de entrada	12
4.	Función de membresía de las variables de salida	12
5.	Conjunto de reglas	13
6.	Método mamdani max-min	13
7.	Panel de definición de intervalos de comfort	14
8.	Panel de definición de valores de entrada	14
9.	Panel de definición de valores de salida	15
10.	Valores de la humedad recogidos en diciembre de 2012	17
11.	Valores de la temperatura recogidos en diciembre de 2012	18

Índice de cuadros

1. Subobjetivos del trabajo.	6
--------------------------------------	---

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.

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 minimiza 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
Personalización del confort	Ajustar dinámicamente las condiciones ambientales de acuerdo con las preferencias y actividades de los usuarios
Integración de sensores múltiples	Utilizar datos de múltiples sensores (temperatura, humedad, CO2, iluminación) para una evaluación más completa del entorno
Flexibilidad y escalabilidad	Diseñar un sistema de control que pueda adecuarse fácilmente a diversos entornos y condiciones operativas.
Mejora de la estabilidad del sistema	Reducir las oscilaciones en los parámetros ambientales mediante la implementación de reglas difusas más precisas.
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.

Cuadro 1: Subobjetivos del trabajo.

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

(Molina-Solana et al., 2013)

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, humedad y calidad del aire.

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:

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 ($A_{humidity}$): 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. REVISAR.

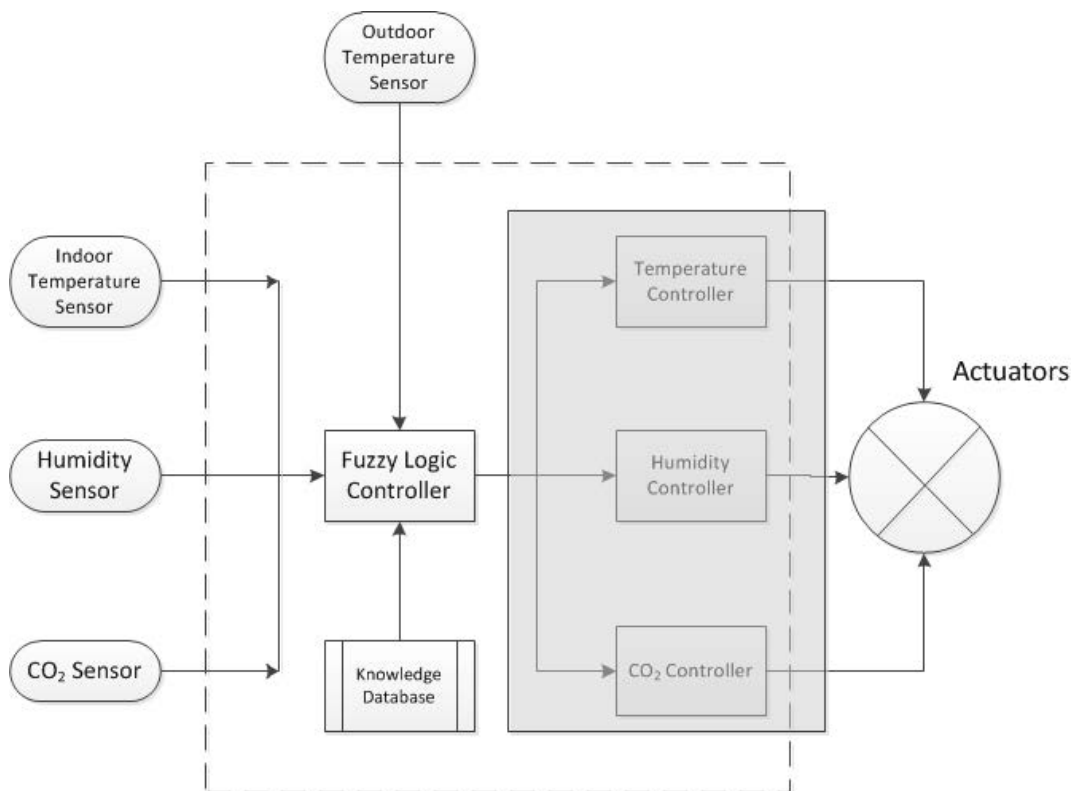


Figura 1: Arquitectura PID y controlador fuzzy

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 membresía:** se utilizan funciones trapezoidales para describir las etiquetas lingüísticas (Bajo, Medio, Alto).

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

Figura 2: Función de membresía

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

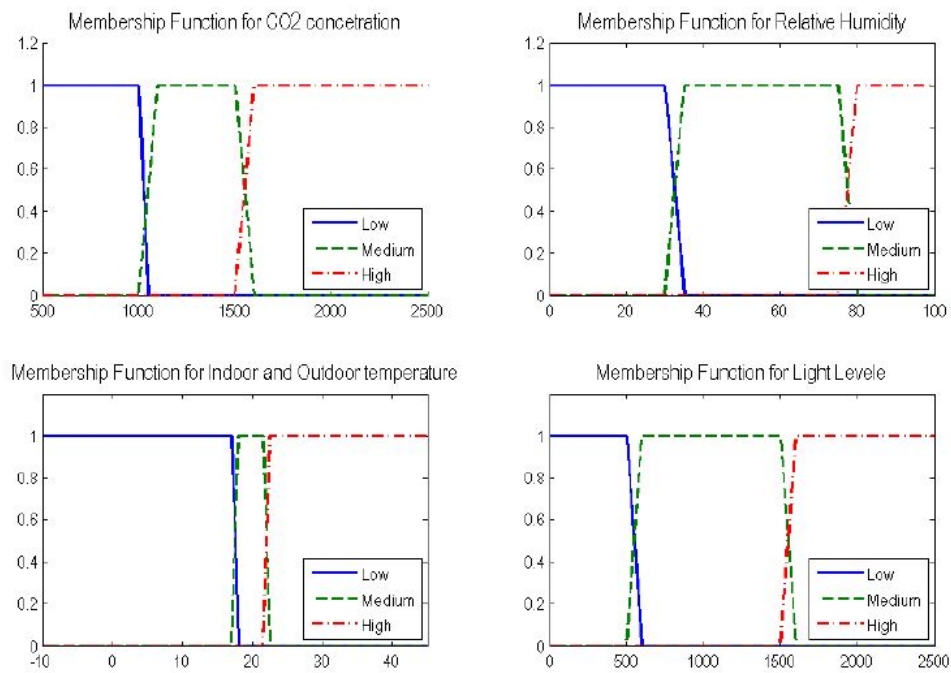


Figura 3: Función de membresía de las variables de entrada

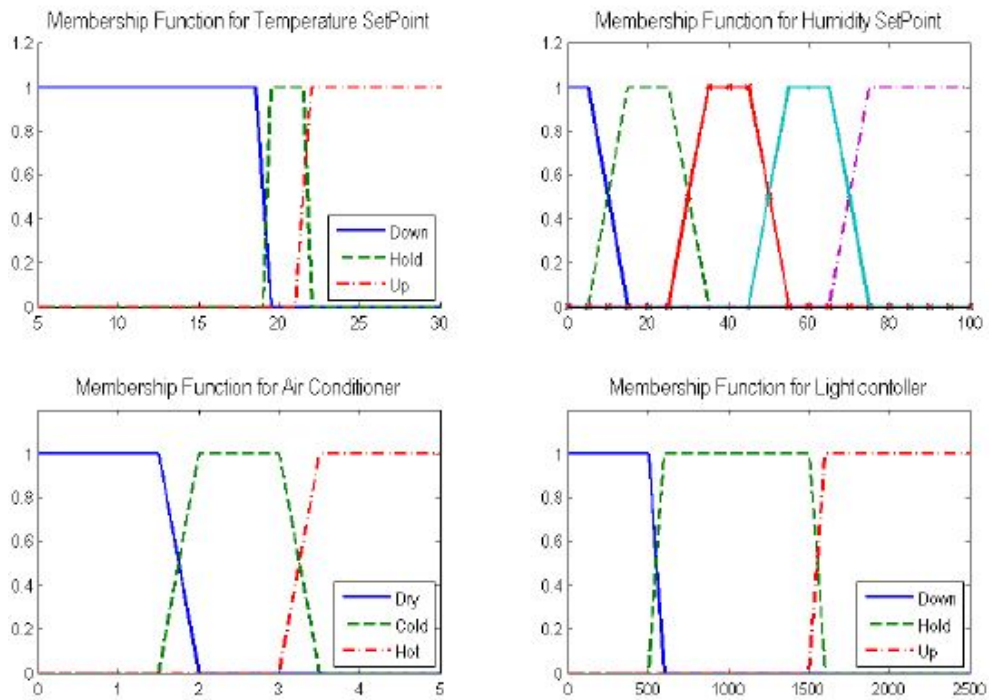


Figura 4: Función de membresía de las variables de salida

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 mantener la temperatura y el humidificador en nivel estándar.
- Si la humedad es Baja y la temperatura interna es Baja, entonces el aire acondicionado debe estar en caliente, el humidificador en nivel Alto, y subir la temperatura.

Se han utilizado 17 reglas, que dan lugar a diversos escenarios al combinar las posibles entradas del sistema. Se muestra un subconjunto de las reglas en la Figura 5.

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. Este método evalúa el grado en que cada regla se cumple y combina las salidas difusas.

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

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

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 $output_i$.

3.3. Pruebas en simuladores y entornos 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.

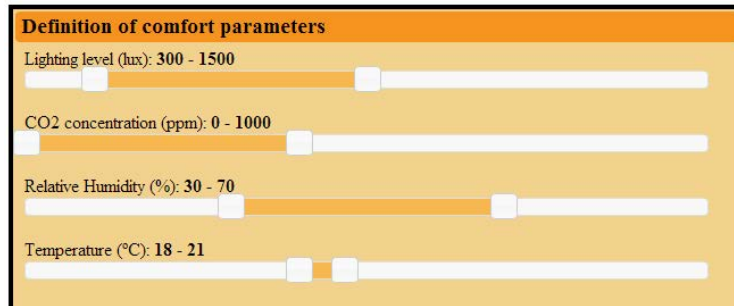


Figura 7: Panel de definición de intervalos de confort

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.

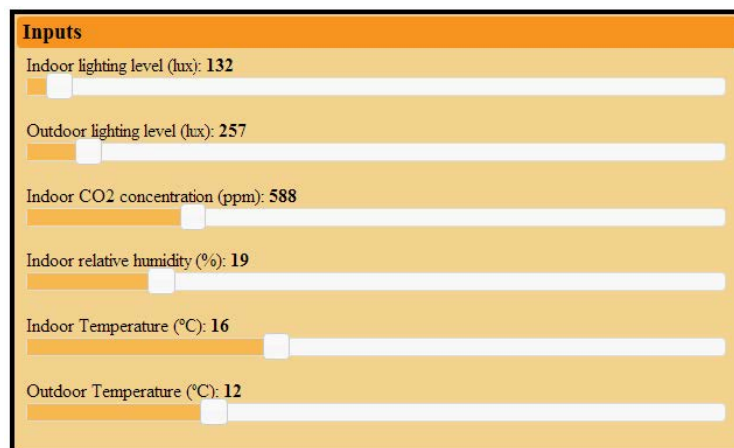


Figura 8: Panel de definición de valores de entrada

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.

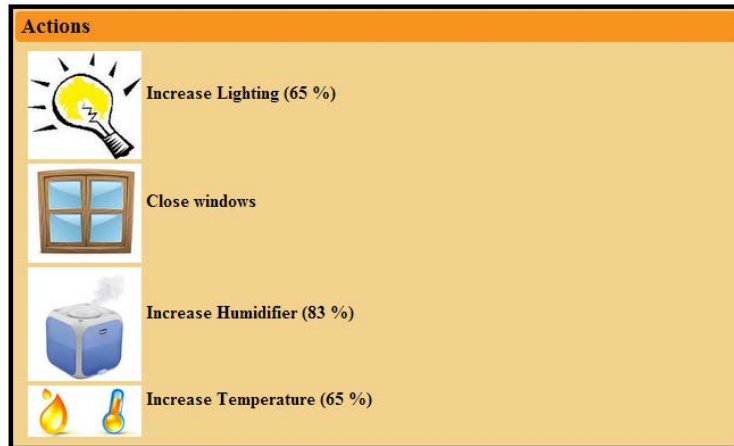


Figura 9: Panel de definición de valores de salida

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.

Para la humedad relativa (Figura 10), 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.

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.

- resumen de resultados

Los resultados obtenidos del estudio indican que el controlador difuso logró mantener las condiciones ambientales dentro de los rangos de confort definidos, con una notable reducción en las fluctuaciones de temperatura y humedad. Durante el período de prueba, el controlador mostró un mejor desempeño que los sistemas reactivos, proporcionando un ambiente más estable y confortable para los ocupantes

- interpretación de los mismos

Estos hallazgos destacan la eficacia del controlador difuso para mejorar la gestión de la calidad ambiental interior. La capacidad del sistema para ajustarse dinámicamente a las condiciones cambiantes del entorno permitió no solo mejorar el confort, sino también optimizar el uso de energía. Esto subraya el potencial de la lógica difusa como una solución integral para sistemas HVAC avanzados en contextos de edificios inteligentes

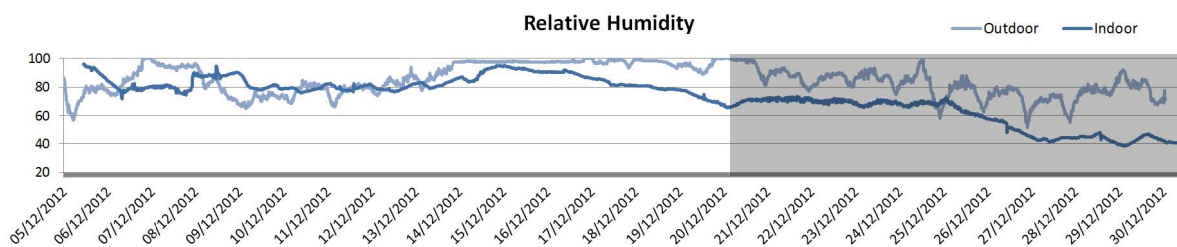


Figura 10: Valores de la humedad recogidos en diciembre de 2012

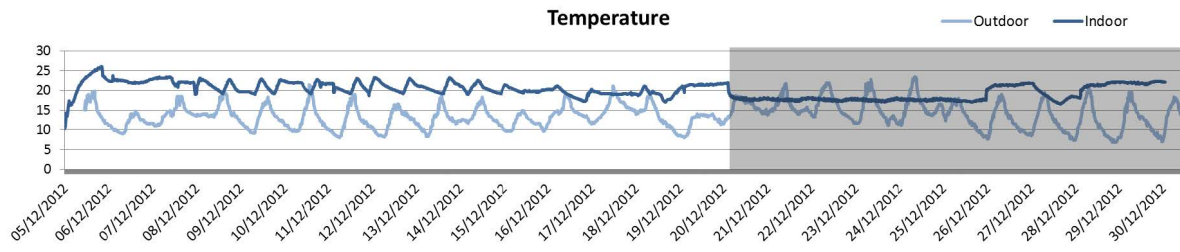


Figura 11: Valores de la temperatura recogidos en diciembre de 2012

4. Estudios y enfoques alterativos

4.1. Control fuzzy de sistemas HVAC optimizado con algoritmos genéticos

Este trabajo combina control difuso con algoritmos genéticos para optimizar los sistemas HVAC, mejorando la eficiencia energética y el confort. (Alcalá et al., 2003)

Relevancia: Es particularmente relevante como alternativa, ya que añade una capa de optimización automática a través de algoritmos genéticos. Esto permite ajustar de forma automática las reglas difusas y los parámetros, lo cual es útil en sistemas complejos con múltiples criterios de control como el de este caso.

4.2. Sistema de inferencia difusa centrado en la evaluación de calidad ambiental

: (Jabłoński & Grychowski, 2018)

Objetivo: Diseñar un sistema que evalúe el confort ambiental considerando múltiples parámetros como temperatura, humedad, calidad del aire y ruido. Implementación: Utiliza un sistema de microcontroladores con sensores y una aplicación de PC para la inferencia difusa. Resultados: Este enfoque se enfoca en medir y analizar simultáneamente múltiples parámetros para evaluar el confort global y específico (como frescura del aire y confort térmico). Ventajas: Ofrece un sistema integral para evaluar y analizar el confort ambiental en edificios inteligentes, con capacidad de identificar causas de incomodidad y posibles fallos en sistemas HVAC.

4.3. Comparación y resultados interesantes

Sistema de Inferencia Difusa (2017): Proporciona una evaluación más completa del confort ambiental, integrando un amplio rango de factores y enfocándose en un análisis cualitativo basado en estándares y percepción humana. Controlador Difuso Unificado (2013): Está más orientado a la optimización energética y la integración eficiente de subsistemas mediante ajustes dinámicos y adaptativos. Ambos enfoques son prometedores, pero el primero se centra más en la evaluación global del confort, mientras que el segundo apunta a un control eficiente y coordinado de múltiples sistemas dentro de un entorno.

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 conclusión, este

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.

5.2. Trabajos futuros

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.

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.

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.
- 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.
- Vargas Marcos, F., & Gallego Pulgarín, I. (2005). Calidad ambiental interior: bienestar, confort y salud. *Revista española de salud pública*, 79, 243-251.