



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. Simulación y pruebas	13
3.3.1. Pruebas con el simulador	13
3.3.2. Pruebas experimentales	13
3.4. Resultados del estudio	13
4. Estudios y enfoques alterativos	15
4.1. Control fuzzy de sistemas HVAC optimizado con algoritmos genéticos	15
4.2. Sistema de inferencia difusa centrado en la evaluación de calidad ambiental	15
4.3. Comparación y resultados interesantes	15
5. Conclusiones y trabajos futuros	16
5.1. Consecución de objetivos	16
5.2. Trabajos futuros	16
6. Bibliografía	17

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

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 se propone un controlador difuso unificado que integra diferentes aspectos de la calidad ambiental interior, para 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.

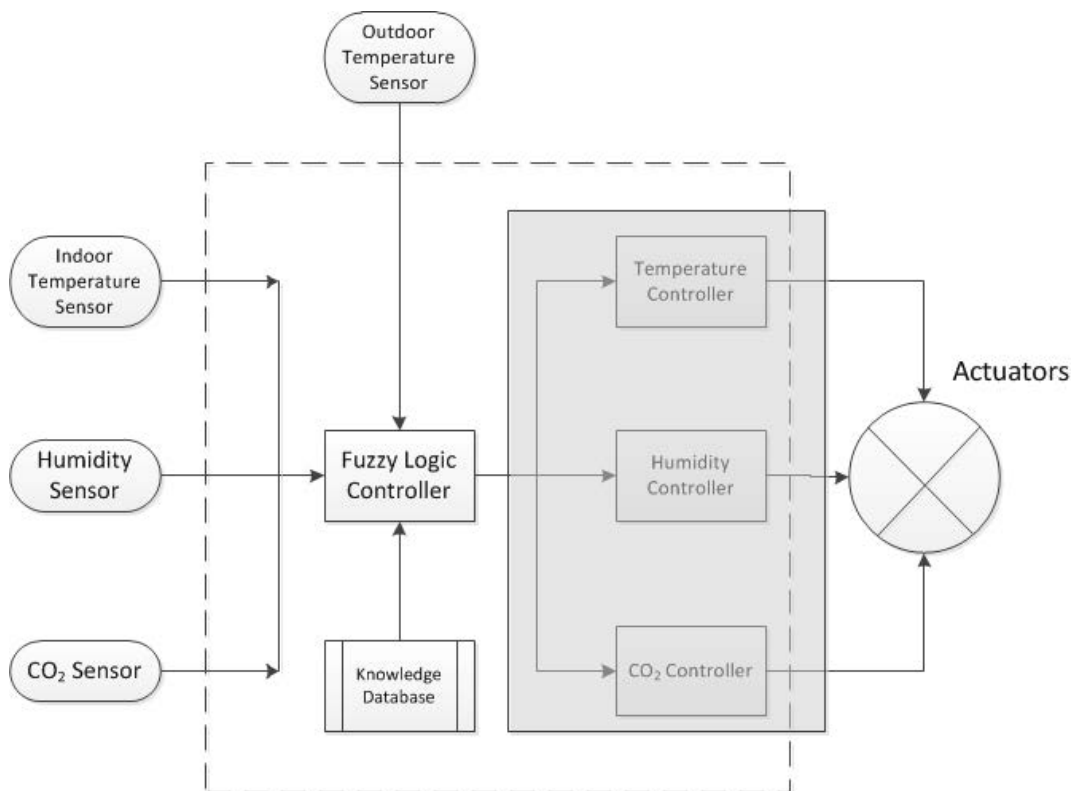


Figura 1: Arquitectura PID y controlador fuzzy

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.

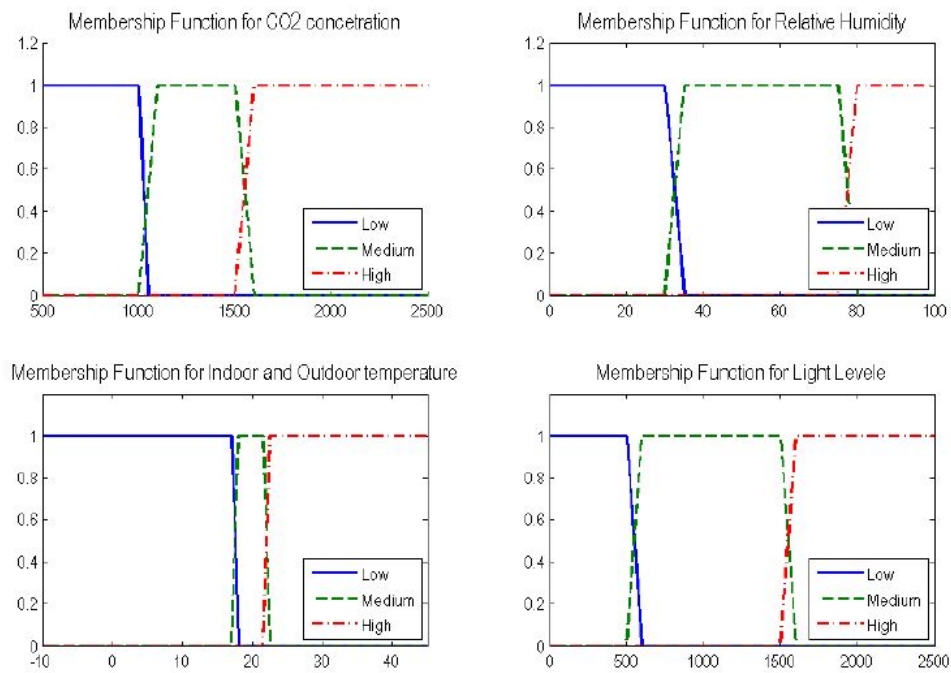


Figura 3: Función de membresía de las variables de entrada

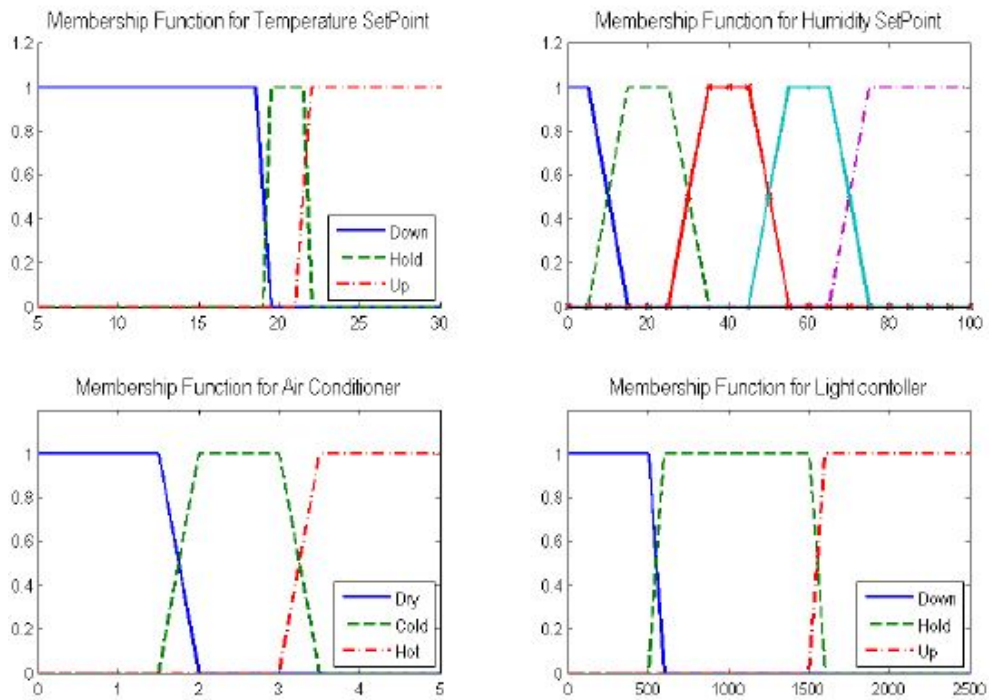


Figura 4: Función de membresía de las variables de salida

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} es la agregación de los conjuntos difusos de salida de todas las reglas para $output_i$.

3.3. Simulación y pruebas

3.3.1. Pruebas con el simulador

3.3.2. Pruebas experimentales

3.4. Resultados del estudio

- 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

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

Como aplicación práctica de

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.