

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01- 22

# **METODOLOGÍAS DE AHORRO ENERGETICO APLICADAS A LOS SISTEMAS HVAC UTILIZANDO INTELIGENCIA ARTIFICIAL: UNA REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE**

Julio César De la Barrera Castillo

Gestión de Sistemas Energéticos Industriales

**Asesor de Monografía**

**MSc. Daniel Sanín Villa**

**Docente Seminario de profundización II**

María Vilma García Buitrago

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**10/03/2023**

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RESUMEN

---

El presente trabajo de grado se centra en el análisis de las metodologías que han sido implementadas para el ahorro energético de los sistemas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado mediante el uso de inteligencia artificial para el ahorro energético.

En este trabajo, se recopiló información relacionada con el desarrollo de tecnología de inteligencia artificial (IA) para mejorar el rendimiento de los sistemas HVAC. Se revisaron 52 artículos recientes y de los cuales 24 están enfocados al uso de la IA con diferentes metodologías. Estas metodologías utilizan algoritmos tales como: Red neuronal artificial (ANN), Redes neuronales convolucionales (CNN), Redes neuronales recurrentes (RNN), Memoria a corto y largo plazo (LSTM), Fallas basadas en datos (FDD), Aprendizaje automático (ML), Lógica difusa, entre otras.

Según los resultados obtenidos, los estudios demostraron una reducción del consumo de energía de alrededor del 20%, dependiendo de la metodología aplicada. Además, se encontraron métodos en los estudios revisados que pueden reducir significativamente el consumo de energía y los costos asociados con la operación de los sistemas HVAC. Además, se sugiere que la aplicación de técnicas avanzadas de aprendizaje automático puede mejorar considerablemente el rendimiento del control inteligente en los edificios. Por otro lado, otros estudios concluyen que los algoritmos de aprendizaje profundo son altamente efectivos para detectar fallas y mejorar los modelos de optimización de estos equipos.

En conclusión, este trabajo evidencia el potencial de la inteligencia artificial en el campo de los sistemas HVAC, mostrando cómo su implementación puede conducir a mejoras significativas en la eficiencia energética, reducción de costos y optimización del rendimiento de estos sistemas.

*Palabras clave:* IA; HVAC; ANN; MPC.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RECONOCIMIENTOS

Primero que todo le doy gracias a Dios por sus bendiciones a lo largo de mi trabajo de grado y en toda la especialización. También por permitirme cumplir esta meta.

También quisiera aprovechar este espacio para expresar mi gratitud a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo de grado.

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a mi asesor de trabajo de grado MSc. Daniel Sanín Villa, por su aportación experta, su paciencia y su apoyo. Sus conocimientos fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo y para mi crecimiento profesional.

También quiero agradecer a los profesores de los cursos de esta especialización Adrián Martínez, Adriana Trejos, Alejandro Morales, Alexander Valencia, Daniel Hincapié, Karen Cacia, María García y Mario Suarez por su valioso conocimiento compartido, su tiempo y su paciencia en las clases. Sus comentarios fueron de gran importancia para ampliar mi perspectiva y mis conocimientos.

A mis compañeros Julio Aragón, Juan Rúa y Frank Durango que brindaron su apoyo incondicional, su conocimiento, su tiempo y su experiencia en todo el transcurso de esta etapa.

A mi familia, quienes me motivaron y estuvieron a mi lado durante todo el proceso. A mis padres Carlos De la Barrera y Sofia Castillo, por su amor incondicional, su apoyo moral y su confianza en mí. A mis hermanos Guillermo De la Barrera y Luis De la Barrera, por su aliento constante y por comprender los momentos de dedicación y esfuerzo que este trabajo demandó.

Además, quiero agradecer a Kassandra Amaris por su apoyo y aliento cuando más los necesitaba. Su compañía y paciencia me ayudaron a mantener un equilibrio saludable durante este período intenso de trabajo académico.

¡Muchas gracias y que Dios los bendiga a todos!

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# ACRÓNIMOS

---

*AHU Air Handling Unit*

*ANN Artificial Neural Network (red neuronal artificial)*

*CNN Convolutional Neural Networks (redes neuronales convolucionales)*

*DRNN redes neuronales recurrentes profundas*

*EODC control óptimo basado en eventos*

*FDD Failure Data Based (fallas basadas en datos)*

*GRU unidades recurrentes con compuertas*

*HMM modelo oculto de markov*

*HVAC Heating, Ventilating and Air Conditioned (Calefacción, Ventilación y Aire acondicionado)*

*IA Artificial intelligence (Inteligencia Artificial)*

*IoT Internet de las Cosas*

*KDD descubrimiento de conocimiento en base de datos*

*LDA análisis discriminante lineal*

*LSTM Long-Short Term Memory (Memoria a corto y largo plazo)*

*MILP programación lineal mixta entera*

*MIMO modelo múltiple de entrada múltiple*

*ML machine learning (aprendizaje automático)*

*MPC Model Predictive Control (Control predictivo de modelos)*

*NLG natural language generation (generación del lenguaje natural)*

*NLP Natural Language Processing (Procesamiento natural del lenguaje)*

*PCA principal component analysis (análisis de componentes principales)*

*PID Proporcional Integral Derivativo (Derivado Integral Proporcional)*

*RACHP refrigeración, aire acondicionado, calefacción y ventilación*

*RNN Recurrent neural networks (redes neuronales recurrentes)*

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01- 22

*SVM vector support machines (máquinas de soporte vectorial)*

*VAV Variable Air Volume*

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Sistemas HVAC.....	8
2.2. Inteligencia artificial.....	11
3. ESTADO DEL ARTE .....	13
3.1. Fundamentos de inteligencia artificial aplicados a sistemas HVAC .....	13
3.2. Ramas de inteligencia artificial aplicadas a sistemas HVAC .....	15
3.3. Casos de estudio y resultados.....	21
4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	26
REFERENCIAS .....	28

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas HVAC (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado) son un componente importante del confort y la calidad del aire en edificios industriales, comerciales y sobre todo residenciales (SafetyCulture. 2022). Estos sistemas son responsables de controlar la temperatura, la humedad y el flujo de aire para crear un ambiente cómodo y productivo para quienes trabajan o viven en el área.

Sin embargo, si estos sistemas no se diseñan correctamente, pueden tener un impacto negativo en la salud de las personas, en la productividad de la empresa y sobre todo en la eficiencia energética (Noya, 2019). Un equipo HVAC mal diseñado puede causar problemas respiratorios, fatiga, irritabilidad, insolación, problemas de estabilidad y más. Además, los sistemas HVAC ineficientes consumen más energía de la que deberían, lo que aumenta los costos de energía y mantenimiento (Batterman, S. et al. 1995).

Por lo tanto, es importante optimizar el confort y la eficiencia energética para evitar estos problemas y mejorar la calidad del aire interior. El uso de inteligencia artificial en los sistemas HVAC puede administrar de manera efectiva la calidad del aire entregado a los recintos, y sobre todo el consumo de energía, por lo que ayuda a reducir los costos de energía, las emisiones de CO2 y la propagación de enfermedades.

El objetivo de esta monografía es hacer una revisión de las metodologías de los dispositivos de calefacción, ventilación y aire acondicionado sistemas, para analizar las posibles mejoras que se vienen implementando con la inteligencia artificial en función del ahorro energético y del buen uso del sistema. Además, se discutirán las posibles aplicaciones y oportunidades futuras para el uso de la inteligencia artificial en este campo en constante evolución.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2. MARCO TEÓRICO

---

### 2.1. Sistemas HVAC

Los sistemas HVAC, basados en los principios de la termodinámica, controlan la temperatura y la humedad del aire en espacios cerrados (McDowall, R. 2007). Estos sistemas se componen de varios componentes básicos, como el intercambiador de calor, el ventilador, la cámara de combustión, el condensador, el evaporador, el termostato y el controlador.

Para mover el aire a través de conductos y ventiladores, controlando el flujo de aire y la presión, se utiliza la mecánica de fluidos (Domingo, A. et al. 2011). Esta rama de la ingeniería se encarga del estudio del movimiento de los fluidos, tanto gases como líquidos, y las fuerzas que actúan sobre ellos. En el contexto de los sistemas HVAC, la mecánica de fluidos es fundamental para comprender conceptos como la velocidad del aire, la presión, la caída de presión y la pérdida de carga (Mott, R. et al. 2006).

Al igual que la mecánica de fluidos la psicrometría es otra rama fundamental que se utiliza en los equipos de HVAC, se dedica al estudio de las propiedades termodinámicas y físicas del aire húmedo (Soler & Palau Ventilation Group. 2020). Esta rama se utiliza para controlar la humedad relativa del aire en espacios cerrados. En este contexto, conceptos como la temperatura del bulbo seco, la temperatura del bulbo húmedo, la humedad relativa y la entalpía del aire son fundamentales para el diseño del sistema HVAC.

En los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado, el controlador desempeña un papel fundamental al utilizar sistemas automáticos que regulan la temperatura, la humedad y la calidad del aire en espacios cerrados. Según (GlobalSpec, s.f.) algunos conceptos claves en el control automático de los sistemas HVAC se aplican para garantizar un funcionamiento eficiente. Estos conceptos incluyen la retroalimentación, el control de límite, el control lineal, el control PID, el control de avance, la lógica difusa y los controles avanzados o no lineales.

El control de límite implica establecer puntos de ajuste o límites que generan una señal en el controlador de equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado para iniciar o detener una variable de proceso. Por otro lado, el control lineal consiste en hacer coincidir una señal de entrada variable con una señal de control correspondientemente variable, lo que implica regular la cantidad de energía suministrada de acuerdo con las necesidades del

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

espacio. En el caso del control PID, este requiere retroalimentación en tiempo real del sistema donde permite un control preciso y estable de los sistemas HVAC al ajustar continuamente los parámetros de control en función de las condiciones cambiantes. En cuanto al control feedforward o de retroalimentación, este proporciona una compensación de control directa basada en la señal de referencia. En lugar de esperar a que se produzca un error en la retroalimentación, este enfoque anticipa las necesidades del sistema y toma medidas preventivas.

En cuanto a la lógica difusa, esta permite que las variables tengan valores imprecisos, en lugar de un estado binario (verdadero o falso). Y por último en los controles avanzados o no lineales utilizan algoritmos como la ganancia adaptativa y las redes neuronales lo que permite una mayor adaptabilidad a las condiciones cambiantes lo que garantiza un funcionamiento eficiente de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

Dentro de los sistemas HVAC, el aire acondicionado desempeña un papel fundamental al enfriar el aire y reducir su humedad relativa (Mejías-Murillo, R. 2019). Los sistemas de aire acondicionado están compuestos por varios componentes interrelacionados que trabajan en conjunto para lograr un funcionamiento efectivo. Según (Hundy, et al. 2008) los sistemas de aire acondicionado están compuestos por un compresor, un evaporador, un condensador y un dispositivo de expansión.

El compresor es un componente clave del sistema de aire acondicionado, este tiene la tarea de controlar y gestionar el refrigerante dentro del sistema. Su función consiste en succionar el gas lo comprime, aumentando la presión y temperatura, de esta manera prepara el refrigerante para el proceso de enfriamiento posterior. Por otro lado, el condensador es otro componente fundamental, el refrigerante de alta presión y temperatura entra en contacto con el aire exterior y como resultado el fluido cede este calor y se enfría.

En el caso de la válvula de expansión, es la que se encarga de regular el flujo del refrigerante hacia el evaporador. La válvula de expansión expande el refrigerante produciendo una caída de presión, permitiendo que reduzca su temperatura. Y por último el evaporador, este es otro componente fundamental. Su tarea consiste absorbe el calor del entorno a enfriar. Este proceso de evaporación del refrigerante en el evaporador genera un enfriamiento del aire, dado que el calor se transfiere del entorno hacia el refrigerante.

Además de las funciones mencionadas anteriormente, el aire acondicionado tiene funciones adicionales. Por ejemplo, algunas unidades de aire acondicionado incorporan una

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

válvula de cuatro vías lo que permite revertir el proceso de enfriamiento y cambiarlo a calefacción.

En cuanto a la calefacción los sistemas HVAC utilizan diversas fuentes de energía, como calderas y bombas de calor, para generar calor en los edificios (Refrinoticias, s.f.) (BOXT, s.f.). Los calentadores pueden utilizar diferentes metodologías de calentamiento, como resistencias, bobinas de vapor o quemadores de combustible (McQuiston, F. 2004). La calefacción mediante el uso de radiadores distribuye aire caliente a diferentes habitaciones o mediante sistemas de calefacción radiante que utilizan superficies radiantes para irradiar calor directamente a los ocupantes y objetos en un espacio (ASHRAE, 2016) (Siegenthaler, J. 2012).

Un ejemplo de sistema de calefacción radiante es aquel en el cual se utilizan superficies radiantes como pisos, paredes o techos para transmitir calor directamente a los ocupantes y objetos en el espacio. Este sistema puede operar mediante radiadores eléctricos, tuberías de agua caliente o sistemas de suelo radiante eléctrico. Con el avance de la tecnología, los dispositivos de calefacción en los sistemas HVAC están adoptando cada vez más tecnologías inteligentes, como la conectividad IoT y los controladores programables. Esto permite una gestión eficiente de la calefacción al regular automáticamente la temperatura y optimizar el consumo energético (ProInstalaciones, 2018).

De acuerdo con (Soler & Palau Ventilation Group, 2018) la ventilación es un componente fundamental en los equipos calefacción, ventilación y aire acondicionado, se encarga de reemplazar el aire en un espacio cerrado por aire fresco proveniente del exterior. El sistema de ventilación se compone de ventiladores, conductos y filtros de aire. Existen dos tipos de sistemas de ventilación de flujo simple y de flujo doble. Los sistemas de flujo simple extraen el aire contaminado del interior y lo expulsan al exterior sin controlar la entrada de aire nuevo, lo que puede generar problemas en edificios herméticos. Por otro lado, los sistemas de flujo doble extraen el aire interno contaminado e inyectan aire tratado, asegurando una adecuada renovación del aire en los recintos.

Dentro del sistema de ventilación, los filtros de aire desempeñan un papel crucial en la limpieza del aire y la eliminación de partículas y contaminantes. Los sistemas HVAC pueden incorporar diferentes tipos de filtros de aire, como filtros mecánicos, electrostáticos y de carbón activado (Environmental Protection Agency, EPA, 2021). Estos filtros garantizan que el aire que ingresa al espacio cerrado esté limpio y libre de impurezas. Por otro lado, los conductos se utilizan para distribuir el aire en el interior del edificio. Estos conductos

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

pueden estar fabricados con chapa, fibra de vidrio u otros materiales flexibles (CR Latinoamérica, 2017).

En cuanto al control de la temperatura, los termostatos son componentes esenciales en los sistemas HVAC. Estos dispositivos están diseñados para regular la temperatura en base a un punto de ajuste predefinido (Meier, A. 2010). Los termostatos permiten mantener automáticamente la temperatura deseada, activando o desactivando el sistema de calefacción o enfriamiento cuando se alcanza dicho punto.

Además de la ventilación y el control de la temperatura, los sistemas HVAC también pueden incluir humidificadores y deshumidificadores para regular la humedad relativa en espacios cerrados (H2OTek, s.f.) (Universal Blue, s.f.). Un humidificador se encarga de aumentar la humedad del aire cuando es demasiado seco, mientras que un deshumidificador reduce la humedad cuando es excesiva.

## **2.2. Inteligencia artificial**

La inteligencia artificial (IA) es una rama de la informática que se enfoca en desarrollar algoritmos y sistemas que imitan la inteligencia humana. En el contexto de los sistemas HVAC, la IA se puede utilizar para mejorar la eficiencia energética, la calidad del aire interior, la comodidad de los ocupantes y reducir los costos de mantenimiento (Russell, S. 2010).

Dentro de la IA, el aprendizaje automático (Machine Learning) es un enfoque central que permite a las máquinas aprender de los datos y mejorar el rendimiento a través de la experiencia. Se basa en algoritmos y modelos sistemáticos estadísticos para identificar patrones y hacer predicciones. (Heaton, J. 2018) destaca la importancia del aprendizaje automático en el desarrollo de sistemas de IA.

Las redes neuronales artificiales son modelos inspirados en el funcionamiento del cerebro humano. Estas redes están compuestas por capas de nodos interconectados (neuronas artificiales) que procesan información y realizan cálculos para resolver tareas específicas. (Nielsen, M. 2015) explica el funcionamiento y las aplicaciones de las redes neuronales artificiales en la IA.

Otro campo de la IA es el procesamiento del lenguaje natural (Natural Language Processing, NLP), que se refiere a la capacidad de las máquinas para comprender y generar el lenguaje humano. Esta área implica tareas como reconocimiento de voz, traducción automática, generación de texto, entre otros. (Jurafsky, D. 2023) destaca la importancia del procesamiento del lenguaje natural en la comunicación entre humanos y máquinas.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La visión por computadora es otra área de la IA que se ocupa de la interpretación automática de imágenes y videos. Los sistemas de visión por computadora pueden reconocer objetos, reconocer rostros, detectar patrones y realizar otras tareas relacionadas con la visión. (Szeliski, R. 2022) explora las aplicaciones y los desafíos de la visión por computadora en la IA.

La robótica y los sistemas inteligentes combinan la IA con la ingeniería robótica para desarrollar sistemas inteligentes capaces de interactuar con el entorno de forma automática. Los robots inteligentes pueden realizar tareas complejas, adaptarse a diferentes situaciones y aprender de la experiencia (Choset, H., 2005).

Los algoritmos genéticos son técnicas basadas en la evolución que se utilizan para resolver problemas de investigación y optimización. Estos algoritmos imitan los procesos genéticos de reproducción, mutación y selección natural. A través de la generación y evaluación de soluciones candidatas, el algoritmo genético encuentra las soluciones más adecuadas en un espacio de búsqueda dado (Mitchell, M., 1995).

Por último, la lógica difusa (Fuzzy Logic) es un enfoque de inteligencia artificial que permite gestionar la incertidumbre y la imprecisión en los sistemas de toma de decisiones. A diferencia de la lógica booleana tradicional, la lógica difusa permite la representación y manipulación de grados de verdad difusos, lo que la hace adecuada para modelar y controlar sistemas complejos con variables que no son del todo verdaderas o falsas. (Zadeh, L. 2023) destaca las aplicaciones y las ventajas de la lógica difusa en la IA.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 3. ESTADO DEL ARTE

En este estado del arte se abordará los fundamentos, ramas y estudios que se han realizado usando inteligencia artificial aplicada a los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado explicando las metodologías encontradas y aplicadas para lograr un ahorro energético eficiente.

#### 3.1. Fundamentos de inteligencia artificial aplicados a sistemas HVAC

La aplicación de la inteligencia artificial en sistemas HVAC abarca la predicción y modelado de carga térmica, el control y optimización energética, la detección de fallas y el mantenimiento predictivo, la optimización de la gestión de energía, el análisis de datos y minería de datos, así como el uso de redes neuronales recurrentes y LSTM. Estas aplicaciones permiten mejorar la eficiencia energética, el confort térmico y la confiabilidad de los sistemas mencionados.

Empezando por los algoritmos de aprendizaje autónomo donde se pueden utilizar para la predicción y modelado de carga térmica en los sistemas HVAC. Estos algoritmos, como la regresión lineal, los árboles de decisión y las redes neuronales, permiten desarrollar modelos predictivos basados en variables como la temperatura exterior, la tasa de utilización cero del emplazamiento y las características del edificio (Liang et al., 2022; Lu, 2023). Esto resulta útil para la optimización en tiempo real del tamaño de la unidad en este caso de los sistemas y el control de temperatura.

Además, los algoritmos de aprendizaje autónomo se aplican al control y la optimización energética de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Técnicas como el control predictivo basado en modelos (Model Predictive Control, MPC) utilizan modelos de aprendizaje automático para predecir el comportamiento y ajustar las variables de control del sistema, como la temperatura del aire acondicionado y la velocidad del ventilador (Ngarambe et al., 2020; Shaikh, 2018). Esto permite un control adaptativo y dinámico en función de las condiciones ambientales presentes y de ocupación de los lugares de trabajo, con el objetivo de maximizar la eficiencia energética y el confort térmico.

Asimismo, los algoritmos de aprendizaje automático (machine learning) se emplean también en la detección de fallas y el mantenimiento predictivo del HVAC. Algoritmos como las máquinas de soporte vectorial (SVM) y las redes neuronales convolucionales analizan datos históricos y en tiempo real, obtenidos de sensores de temperatura, presión y flujo de

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

aire, para identificar patrones inusuales y predecir posibles problemas o fallas en los equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Esto permite la planificación anticipada de actividades de mantenimiento y reduce los costos asociados con interrupciones y reparaciones no planificadas (Es-sakali, N. et al., 2022).

También, la inteligencia artificial se aplica al proceso de detección de fallas basado en datos de los HVAC. Este enfoque utiliza técnicas de aprendizaje automático o métodos de análisis estadístico multivariado para construir o entrenar modelos a partir de datos. Esta área de investigación se enfoca en el proceso de detección de fallas, los sistemas estudiados, las fallas identificadas y las fuentes de datos asociadas, así como en las métricas de evaluación (Chen, Z. et al., 2023).

Otro fundamento de la inteligencia artificial es su aplicación para la optimización de la gestión de energía en edificios mediante el análisis de datos de sensores y de equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Donde según (He, X. et al., 2014) los algoritmos como el algoritmo genético, el algoritmo de enjambre de partículas y el algoritmo de optimización por enjambre de luciérnagas se aplican para encontrar configuraciones óptimas de los equipos mencionados, ajustando parámetros como la temperatura, la velocidad del ventilador y el flujo de aire. Esto permite minimizar el consumo de energía y los costos operativos.

Para la optimización del control y la detección de problemas se utiliza el análisis de datos y la minería de datos, estas son herramientas esenciales en la extracción de información valiosa de grandes conjuntos de datos generados por sistemas HVAC. Algoritmos como el análisis de componentes principales (PCA), el clustering y los algoritmos de detección de anomalías se utilizan para identificar patrones, agrupar datos y encontrar comportamientos anormales en el rendimiento de estos sistemas (Chen, Z. et al., 2023).

En última instancia, las redes neuronales recurrentes y las redes neuronales de memoria a largo plazo son técnicas efectivas para modelar y predecir secuencias de datos temporales en sistemas HVAC. Estos algoritmos son especialmente útiles para predecir la demanda de energía, la temperatura y otros parámetros a lo largo del tiempo, y capturan dependencias a largo plazo en los datos temporales. Las RNN y LSTM son adecuadas para la predicción y el control de sistemas calefacción, ventilación y aire acondicionado (Mendoza-Pittí, L. et al., 2021) (Chen, Y. et al., 2023).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 3.2. Ramas de inteligencia artificial aplicadas a sistemas HVAC

Según (Adelekan, D. 2022) existen varias ramas de la inteligencia artificial que se aplican a equipos HVAC para mejorar su eficiencia, rendimiento y comodidad ver Figura 1.

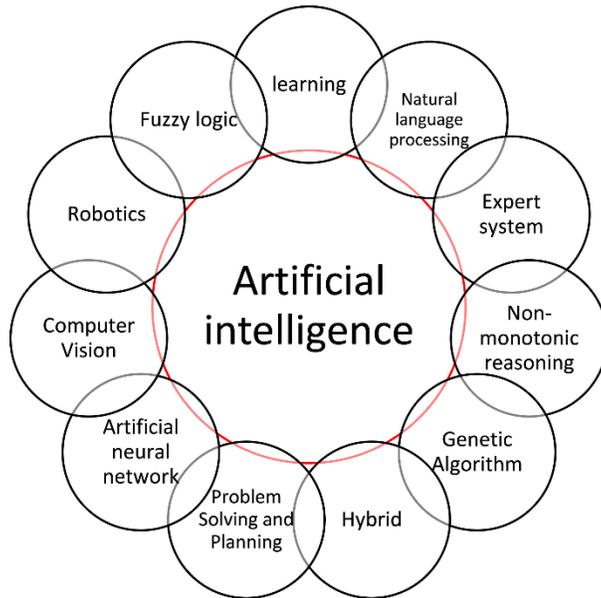


Figura 1. Ramas de la inteligencia artificial. Fuente: (Adelekan, D. 2022).

A continuación, se presenta una descripción de algunas metodologías de inteligencia artificial utilizadas en sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

Empezando por el aprendizaje automático (ML), según (Bouchefry, 2020) esta trata de una subdisciplina de la inteligencia artificial que se enfoca en desarrollar algoritmos dinámicos capaces de tomar decisiones basadas en datos, a diferencia de los modelos que siguen instrucciones de programación estáticas. El ML permite que los programas informáticos mejoren automáticamente su rendimiento en ciertas tareas a través de la experiencia adquirida. El aprendizaje automático se divide en dos categorías principales: aprendizaje supervisado y aprendizaje no supervisado.

El aprendizaje automático supervisado según (Tien, P. 2022) se utiliza en problemas de clasificación y regresión, basándose en algoritmos que se entrenan con conjuntos de datos completamente etiquetados. Estos conjuntos de datos contienen tanto características como una clave de respuesta, lo que permite evaluar la precisión del algoritmo. Por otro lado, el aprendizaje automático no supervisado se enfoca en encontrar sentido en datos no etiquetados, extrayendo patrones y características por sí solo, sin instrucciones claras sobre cómo interpretarlos. Este enfoque es útil cuando no se cuenta con conjuntos de datos

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

completamente etiquetados y, en algunos casos, cuando el resultado o la respuesta deseada no son conocidas.

En la Figura 2a. se describe un resume de las técnicas más comunes de aprendizaje profundo y de máquinas basadas en inteligencia artificial (IA) que se utilizan actualmente en el sector del entorno construido.

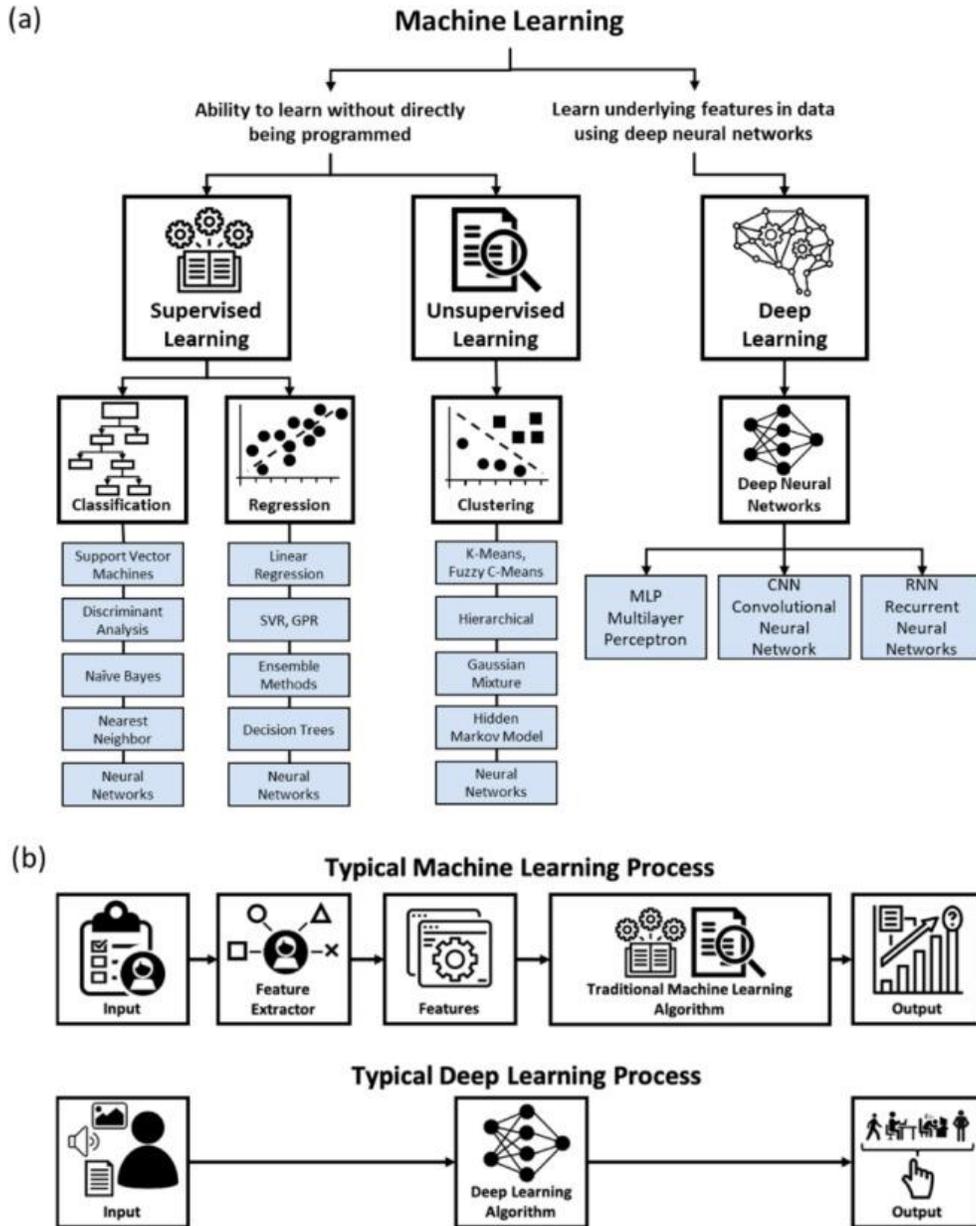


Figura 2. (a) Técnicas de aprendizaje profundo y aprendizaje automático basadas en IA (b) Aprendizaje automático típico frente a aprendizaje profundo. Fuente: (Tien, P. 2022).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Otra metodología son las redes neuronales artificiales. Su enfoque son los modelos de inteligencia artificial más ampliamente utilizados en el campo de RACHP (Refrigeración, Aire Acondicionado, Calefacción y Ventilación). Las ANN procesan información al modelar las relaciones neuronales desde las entradas de datos hasta las salidas. Se comportan como cajas negras que contienen unidades de procesamiento interconectadas, es decir, neuronas. Estas neuronas reciben y envían señales transformadas entre sí utilizando funciones matemáticas, que pueden incluir oficios de activación, suma o transferencia (Adelekan, D. 2022). En la figura 3 se puede observar cómo se describe el funcionamiento de las redes neuronales artificiales de forma simplificada.

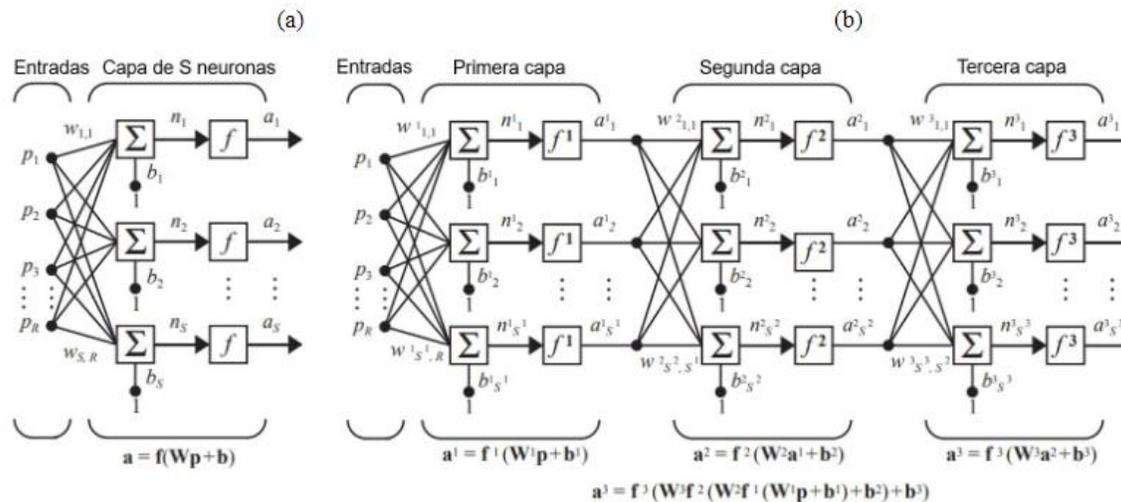


Figura 3. Redes neuronales artificiales: (a) de una capa oculta y (b) de múltiples capas. Fuente: (Sarmiento-Ramos, J. 2020)

Una metodología muy importante es la lógica difusa (Fuzzy Logic). Esta abarca un enfoque matemático que se utiliza para modelar y tratar la incertidumbre, suministrando así herramientas sensatas para su sistema en este caso HVAC (González, C. 2015). A diferencia de la lógica tradicional, que opera sobre valores binarios (verdadero o falso), la lógica difusa permite la representación y manipulación de valores difusos, es decir, valores que son relativamente verdaderos o falsos (Jerez, A. et al. 2015).

En la lógica difusa, los valores borrosos se representan mediante conjuntos borrosos, y los conjuntos difusos son conjuntos de grados de pertenencia descritos por grados de pertenencia en el intervalo [0, 1] (Fernández, A. 2023). Un ejemplo clásico es el de la altura de los hombres. Anteriormente, si una persona medía 1,80 metros se consideraba alta, pero si medía 1,79 metros no se le consideraba alto. Fue en este punto donde surgió el enfoque

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de la lógica difusa (Ver figura 4) (Jerez, A. et al. 2015). La lógica difusa utiliza reglas difusas para realizar inferencias y tomar decisiones. Estas reglas se expresan en términos de variables lingüísticas y operadores difusos. Los operadores difusos, como "y", "o" y "no", se utilizan para combinar los grados de membresía de conjuntos difusos y generar nuevos conjuntos difusos resultantes de las operaciones (González, C. 2015).

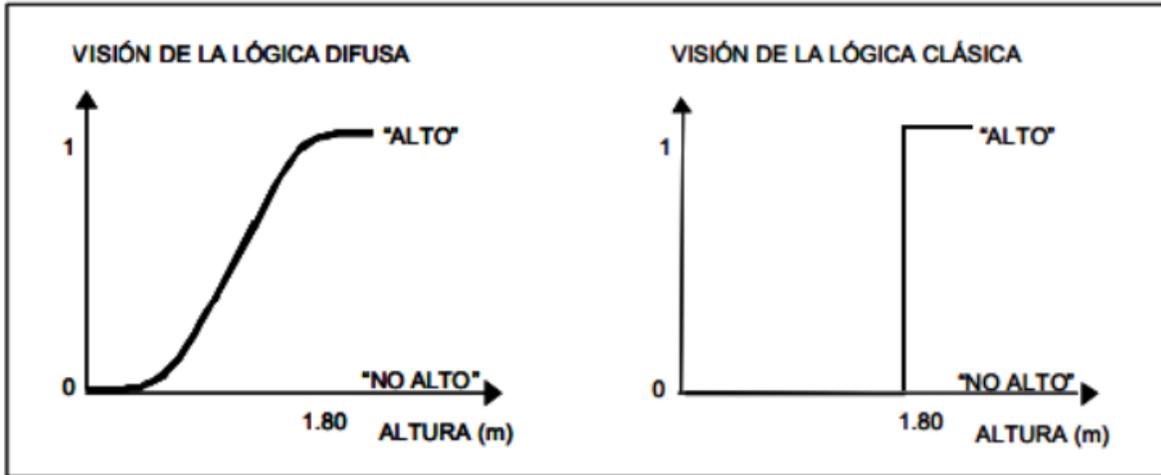


Figura 4. Visión de la lógica fuzzy vs la lógica clásica. Fuente: (Jerez, A. et al. 2015).

Otra metodología aplicada en los sistemas HVAC son los algoritmos genéticos, estos son utilizados en la informática para buscar soluciones exactas o aproximadas en problemas de optimización y búsqueda. Estos algoritmos se basan en conceptos de la biología evolutiva, como la herencia, la mutación, la selección y el cruce. Los algoritmos genéticos pertenecen a la categoría de heurísticas de búsqueda global y se fundamentan en cálculos independientes controlados por una estrategia probabilística. A diferencia de los métodos de búsqueda local, los algoritmos genéticos simulan la selección natural de los individuos más sobresalientes a lo largo de generaciones consecutivas con el propósito de encontrar soluciones óptimas para problemas complejos en diversos campos, como la biología, la ingeniería, las ciencias de la computación y las ciencias sociales (Kumar, M. 2010), a continuación, se presenta un diagrama de flujo del algoritmo genético para explicar su funcionamiento ver figura 5.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

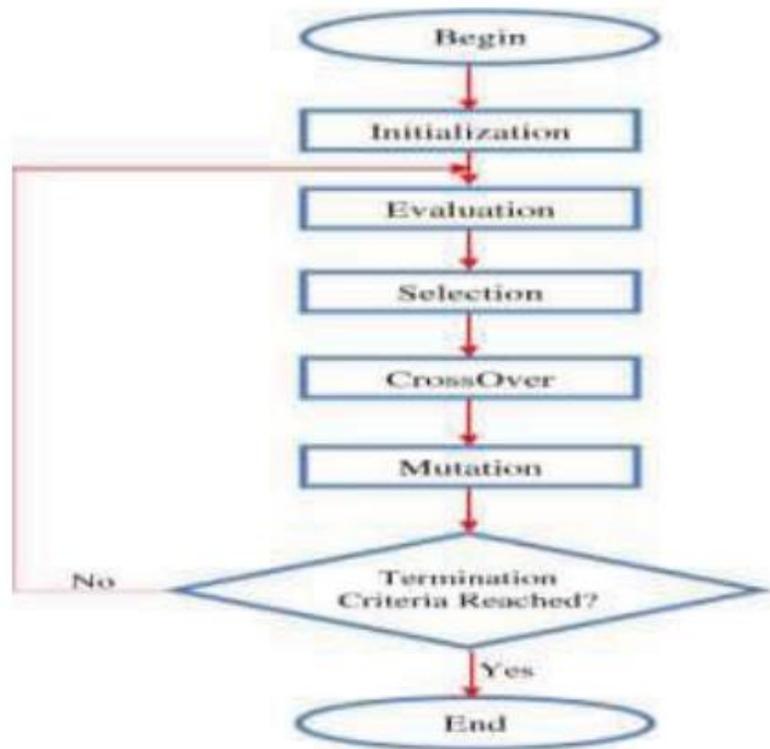


Figura 5. Diagrama de flujo algoritmo genético. Fuente: (Lambora, A. 2019).

Existe otra metodología llamada la minería de datos, también conocida como descubrimiento de conocimiento en bases de datos (KDD), implica el proceso de identificar patrones, tendencias y relaciones valiosas en vastos conjuntos de datos. Este enfoque utiliza técnicas estadísticas, matemáticas y de aprendizaje automático para analizar los datos y extraer información útil. Los resultados obtenidos a través de la minería de datos permiten tomar decisiones informadas en diversos ámbitos, como negocios, ciencia, medicina y muchos otros (Joseph, S. 2016).

En la figura 6. Se describe el funcionamiento de la minería de datos.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

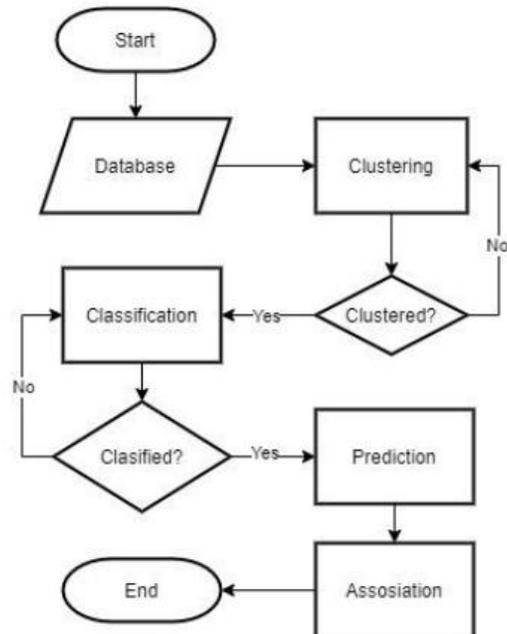


Figura 6. Flujograma minería de datos. Fuente: (Triayudi, A. 2020).

Además, el MPC según (Schwenzer, M. 2021) es un método avanzado de control que usa modelos matemáticos para predecir el comportamiento futuro de un sistema controlado. En lugar de usar una ley de control fija, como en los métodos de control convencionales, el MPC determina la ley de control óptima resolviendo un problema de optimización en línea.

El proceso en esta metodología MPC comienza con la construcción de un modelo matemático del sistema a controlar. Este modelo puede ser lineal o no lineal y puede tener restricciones en las variables del sistema. Un punto de partida es la función objetivo, esta es capaz de describir el rendimiento deseado del sistema. Puede incluir múltiples objetivos, como minimizar el error entre la salida real y la deseada, minimizar el consumo de energía o maximizar la eficiencia.

Una vez que se ha definido el modelo y la función objetivo, se resuelve un problema de optimización para determinar la ley de control óptima. Este problema busca encontrar los valores óptimos para las variables de entrada del sistema que minimizan o maximizan la función objetivo sujeta a las restricciones del modelo.

El MPC se ejecuta en línea, lo que significa que se actualiza continuamente a medida que cambian las condiciones del sistema. En cada iteración, se recopilan datos actuales del

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

sistema y se utilizan para actualizar el modelo y resolver un nuevo problema de optimización para determinar la nueva ley de control óptima.

A continuación, en la figura 7. Se representa un diagrama del funcionamiento del MPC.

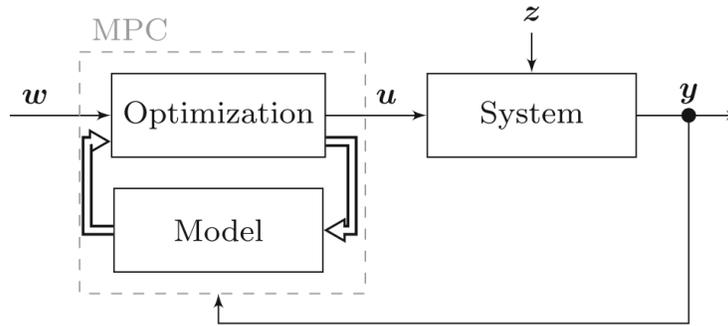


Figura 7. Diagrama de bloques simplificado de un lazo de control basado en MPC. Fuente: (Schwenzer, M. 2021).

### 3.3. Casos de estudio y resultados

Empezando por el marco de control predictivo óptimo propuesto en (Dullinger, C. et al 2018), utiliza programación lineal mixta entera (MILP) para optimizar la operación de calefacción, ventilación y aire acondicionado. El marco consta de dos niveles: un nivel superior que utiliza un controlador predictivo de modelo múltiple de entrada múltiple (MIMO) para tomar decisiones a largo plazo y un nivel inferior que utiliza un controlador MILP-MPC basado en el modelo MILP propuesto para tomar decisiones a corto plazo.

En el nivel superior, el controlador predictivo MIMO se encarga de las dinámicas lentas del sistema HVAC y resuelve un problema de programación lineal mixta entera (MILP) para determinar una trayectoria de referencia óptima. En el nivel inferior, el controlador MILP-MPC utiliza la trayectoria de referencia del nivel superior como entrada y resuelve otro problema MILP para determinar las acciones óptimas a corto plazo.

El modelo MILP propuesto es altamente modular y flexible, lo que permite su adaptación a diferentes situaciones. Además, se utiliza una aproximación ajustable lineal por partes para aproximar las características no lineales del componente, lo que mejora la eficiencia computacional del modelo.

Los resultados encontrados muestran que el enfoque propuesto puede optimizar la operación HVAC en términos de energía, comodidad y desgaste. Además, el modelo MILP propuesto es altamente versátil y puede lograr un óptimo (casi global) en diferentes

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

situaciones. La aproximación ajustable lineal por partes también se muestra efectiva para aproximar las características no lineales del componente. En general, los resultados sugieren que el enfoque propuesto puede ser útil para mejorar la eficiencia energética y la comodidad en edificios con equipos calefacción, ventilación y aire acondicionado.

Asimismo, (Mobarakeh, J. et al. 2023) describe el sistema de inteligencia artificial basado en modelos predictivos utilizando redes neuronales artificiales para predecir los sistemas de calefacción más ideales para los edificios. Ellos realizaron un modelo utilizando datos de distintos tipos de sistemas HVAC, sus respectivos costos de ciclo de vida útil y las emisiones productoras de CO<sub>2</sub>. Esta metodología de predicción tiene la ventaja de ser fácilmente escalable a una amplia variedad de edificios lo que resaltan el potencial de aplicación.

Por otro lado, en los métodos y tecnologías de detección y diagnóstico de fallas en sistemas HVAC, (Chen, Z. et al 2023) realizaron una revisión exhaustiva donde su enfoque se basa en tres aspectos principales: el proceso, los sistemas estudiados y las métricas de evaluación. Según ellos existen numerosos métodos prometedores, se pueden categorizar como supervisados, semi-supervisados o no supervisados, los ejemplos descritos incluyen los siguientes métodos: Análisis de componentes principales (PCA), Análisis discriminante lineal (LDA), Redes neuronales artificiales, Máquinas de vectores de soporte (SVM), Modelos ocultos de Markov (HMM), Análisis de series temporales, Métodos basados en reglas y Métodos basados en modelos físicos

En general, los estudios revisados por Chen se centran en la aplicación y evaluación de diferentes métodos para detectar y diagnosticar fallas en sistemas HVAC, utilizando conjuntos de datos experimentales o simulados. Además, ofrecen ejemplos concretos de cómo estos métodos pueden aplicarse con éxito a equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado típicos como AHU-VAV y chillers.

Un estudio similar, sobre la detección de fallas en sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado fue realizado por (Taheri, S. 2021). Se enfoca en el uso de algoritmos de aprendizaje profundo y como se puede mejorar los hiperparametros. Algoritmos tales como: redes neuronales convolucionales, redes neuronales recurrentes (RNN) y redes neuronales recurrentes profundas (DRNN). En particular, se utilizó un DRNN para modelar la secuencia temporal de datos de sensores en sistemas HVAC y detectar anomalías en los patrones de datos.

Como resultados de este estudio se concluye que los algoritmos de aprendizaje profundo son altamente efectivos para detectar fallas en los equipos HVAC y que la optimización de

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

hiperparámetros puede mejorar aún más su precisión. Destacando el modelo DRNN logró una alta precisión en la detección de fallas en sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

(Metsä-Eerola, I. 2022), presenta el uso de redes neuronales recurrentes para predecir el consumo de energético por calefacción en sistemas HVAC. Se describe la obtención y preprocesamiento de datos a partir de los modelos de aprendizaje automático. En la que se compararon cinco tipos diferentes de algoritmos de modelo basados en su rendimiento predictivo. Tales como: Regresión lineal, Perceptrón multicapa, Red neuronal recurrente, Red neuronal recurrente activada por memoria a largo plazo, Red neuronal recurrente activada por unidades recurrentes con compuertas (GRU).

De los análisis realizados, los resultados obtenidos revelan que las redes neuronales recurrentes son una herramienta efectiva para predecir el consumo de energía de calefacción en sistemas HVAC. Específicamente se observó que los modelos basados en RNN superan a los modelos lineales tradicionales. Además, se determinó que las RNN con memoria a largo plazo y las RNN con unidades recurrentes activadas por compuertas, son exclusivamente ciertas para el tipo de predicción descrito.

Otro estudio similar, fue realizado por (Satrio, P. et al. 2019). Donde busca optimizar el consumo energético en los sistemas HVAC, esto mediante la combinación de redes neuronales y algoritmos genéticos multiobjetivo.

Al igual que los estudios anteriores (Maalej, S. 2022) afirma que el uso de redes neuronales enfocados en la predicción de parámetros de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado utilizando aprendizaje profundo mejoran la eficiencia energética reduciendo la pérdida de energía.

Con respecto a la lógica difusa, (Belman-Flores, J. et al. 2022) realiza una revisión sobre usos de esta metodología en el control de sistemas de refrigeración. Donde se encontraron estudios aplicando el control difuso para mejorar la eficiencia energética de un sistema de refrigeración, mostrando una reducción del 20% en el consumo de energía. Otro estudio revisado, está enfocado en la optimización de la temperatura y la humedad relativa en una cámara frigorífica, en los resultados mostraron una mejora en la uniformidad de la temperatura y la humedad relativa.

En otro estudio se utilizó el control difuso para mejorar el rendimiento de un sistema de aire acondicionado en un edificio comercial. Los resultados mostraron una reducción del

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

15% en el consumo de energía. Otro estudio para mejorar la eficiencia energética de un sistema de refrigeración solar, mostraron como resultado una mejora del 25% en la eficiencia.

Otro caso de estudio relacionado con el control, este fue realizado por (Abida, A., & Richter, P. 2023). Se trata sobre el control en los sistemas HVAC, se evalúan diferentes técnicas de aprendizaje automático, incluyendo redes neuronales convolucionales, recurrentes y LSTM. Estas técnicas de aprendizaje automático lograron una precisión alta y consistente en la predicción de los datos de control de calefacción para un equipo calefacción, ventilación y aire acondicionado basado en una base de datos histórica optimizada. Además, se encontró que la optimización basada en datos y el rendimiento del aprendizaje automático son importantes para mejorar el control eficiente de los equipos mencionados y reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. En general, los resultados sugieren que la aplicación de técnicas avanzadas de aprendizaje automático puede mejorar significativamente el rendimiento del control inteligente de edificios.

Con respecto a la minería de datos, (Wang, J. et al 2021) presenta un enfoque para mejorar el control óptimo en tiempo real de los sistemas HVAC. Utiliza un formato estándar llamada control optimo basado en eventos (EODC) para representar la estrategia de control optimo. Además, de adopta el algoritmo de bosques aleatorios para encontrar relaciones impulsadas por eventos en los datos operativos. La EODC se basa en el formato “evento-política-acción” donde un evento es una condición bien definida que describe un grupo de transiciones de estado del sistema ocurre de forma instantánea o continuamente en un periodo de tiempo.

Por el caso contrario sino ocurre ningún evento no se tomará ninguna acción y si ocurren ciertos eventos, se tomarán medidas correspondientes según la política para lograr ciertos objetivos, como la eficiencia energética. La política es una regla o conjunto de reglas que especifican cómo se deben tomar las decisiones en función del estado actual del sistema y los eventos que ocurren. Usando este enfoque se lograron unos resultados que muestran el aumento del ahorro energético en un 0.9% - 4.6%.

También se contemplaron varios artículos donde realizan estudios sobre el modelo de energía. (Ala'raj, M. et al. 2022) realizan una revisión de literatura para identificar las principales tendencias y desafíos en el modelado, control y optimización de sistemas calefacción, ventilación y aire acondicionado utilizando modelos impulsados por datos. Los autores sugieren que hay un gran potencial de información para utilizar modelos impulsados por datos para mejorar significativamente la eficiencia energética y reducir

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

costos en sistemas HVAC. Sin embargo, también señalan que se necesitan más investigaciones para abordar los desafíos identificados y desarrollar soluciones prácticas y efectivas para implementar estos modelos en entornos reales.

Al igual que (Ala'raj, Kim, D. et al. 2022) realizan una revisión de literatura enfocada en la investigación sobre el modelado de energía y control predictivo de los sistemas HVAC. Los autores indican que el modelo de energía y el control predictivo pueden ser herramientas efectivas para mejorar la eficiencia energética. En los estudios revisados se encontraron métodos que pueden reducir significativamente el consumo de energía y los costos asociados con la operación de los equipos HVAC. Además, se identificaron varios campos claves para futuras investigaciones, como la consideración de factores humanos y la integración de tecnologías inteligentes en los sistemas menciona.

Asimismo, un estudio realizado por (Serale, G. et al. 2018) enfocado al modelo predictivo utilizado en el contexto de Model Predictive Control (MPC) para mejorar la eficiencia energética. Este modelo predictivo se basa en la predicción de las variables de perturbación, como la temperatura exterior, la carga térmica interna y el flujo de aire, utilizando modelos blancos, grises y negros.

Los modelos blancos son modelos físicos que describen las relaciones entre las variables del sistema HVAC y los parámetros del edificio. Los modelos grises son modelos empíricos que utilizan datos históricos para predecir el comportamiento futuro de equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Los modelos negros son modelos estadísticos que utilizan técnicas de aprendizaje automático para predecir el comportamiento futuro del sistema HVAC.

Una vez que se han obtenido las predicciones de las variables de perturbación, se utiliza un modelo matemático del sistema HVAC para predecir el comportamiento futuro del sistema y optimizar el control en tiempo real. El objetivo es minimizar el consumo energético mientras se mantiene un nivel adecuado de confort térmico en el edificio.

Como resultado de los estos estudios revisados por (Serale, G. et al. 2018), indica que el uso de MPC puede reducir significativamente el consumo energético, mientras se mantiene un nivel óptimo de confort térmico. De los resultados se puede mencionar que al usar el MPC para controlar un sistema de calefacción centralizado en oficinas se logró una reducción del consumo en un 20%. Otro resultado aplicado para controlar un sistema de ventilación se redujo el consumo en un 30% y otro para controlar un sistema de calefacción se redujo el

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

consumo en un 40%. En general el MPC es una estrategia efectiva a la hora de mejorar la eficiencia energética.

## 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Este documento proporciona una revisión del proceso de optimización mediante la implementación de la inteligencia artificial en sistemas HVAC. La literatura existente suministra métodos y marcos prometedores para implementar esta metodología, sobre todo aplicada a la eficiencia energética, al confort térmico y al tamaño del equipo.

Muchos estudios realizados afirman la reducción de costos energéticos ya sea en los equipos de calefacción, ventilación o aire acondicionado, los resultados muestran distintos porcentajes entre un 0.9% hasta un 40% de ahorro la cual depende de la metodología aplicada y del campo donde se aplica.

Los métodos más reconocidos, como el control predictivo óptimo, optimizan eficazmente el funcionamiento y mejoran la operación de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Además, el uso de redes neuronales artificiales y algoritmos de aprendizaje profundo mejora la detección de fallas y la predicción de parámetros. Las redes neuronales recurrentes destacan por su eficacia en la predicción del consumo energético. Por otro lado, el control difuso ayuda a mejorar la eficiencia energética, mientras que las técnicas de aprendizaje automático posibilitan datos predictivos para mejorar el control y el consumo de energía. Como tal, los métodos de control óptimos pueden mejorar el control en tiempo real, mientras que los modelos predictivos benefician el consumo de energía y el confort térmico.

En cuanto a la minería de datos y el control difuso puede aumentar el ahorro energético. Asimismo, las redes neuronales recurrentes son efectivas para reducir el consumo de energía en la calefacción. Por su parte, los algoritmos de aprendizaje profundo detectan anomalías y mejoran la eficiencia energética.

En términos generales, la literatura existente ha sentado una base sólida para demostrar la viabilidad y el beneficio del uso de inteligencia artificial, aunque tiene sus limitantes, como la cantidad de datos con los que se debe contar para implementar estos métodos de

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01- 22

optimización. Además de la complejidad y dificultad de la implementación de estas metodologías.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## REFERENCIAS

Abida, A., & Richter, P. (2023). HVAC control in buildings using neural network. *Journal of Building Engineering*, 65, 105558.

Adelekan, D. S., Ohunakin, O. S., & Paul, B. S. (2022). Artificial intelligence models for refrigeration, air conditioning and heat pump systems. *Energy Reports*, 8, 8451-8466.

Ala'raj, M., Radi, M., Abbod, M. F., Majdalawieh, M., & Parodi, M. (2022). Data-driven based HVAC optimisation approaches: A Systematic Literature Review. *Journal of Building Engineering*, 46, 103678.

Alaminos-Fernández, A. F. (2023). Introducción a la teoría de conjuntos difusos y sus aplicaciones en investigación social e IA. Recuperado de: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/132732/6/Introduccion-a-la-teoria-de-conjuntos-difusos-y-sus-aplicaciones-en-investigacion-social-e-IA.pdf>

ASHRAE. (2016). HVAC Systems and Equipment Handbook (IP Edition). Recuperado de <http://arco-hvac.ir/wp-content/uploads/2016/11/ASHRAE-Handbook-2016-HVAC-Systems-and-EquipmentIP.pdf>

BOXT. (s. f.). HVAC System Types. Recuperado de <https://www.boxt.co.uk/air-conditioning/guides/hvac-system-types>

Caloryfrio. (2020). Tipos de termostatos para regular la temperatura [Infografía]. Recuperado de <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/herramientas-y-regulacion/tipos-de-termostatos-para-regular-la-temperatura-infografia.html>

Chen, Y., Ye, Y., Liu, J., Zhang, L., Li, W., & Mohtaram, S. (2023). Machine Learning Approach to Predict Building Thermal Load Considering Feature Variable Dimensions: An Office Building Case Study. *Buildings*, 13(2), 312.

Chen, Z., O'Neill, Z., Wen, J., Pradhan, O., Yang, T., Lu, X., ... & Herr, T. (2023). A review of data-driven fault detection and diagnostics for building HVAC systems. *Applied Energy*, 339, 121030.

Choset, H., Lynch, K. M., Hutchinson, S., Kantor, G. A., & Burgard, W. (2005). *Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementations*. MIT press.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

CR Latinoamérica. (2017). Top cinco de mejores prácticas para el diseño e instalación de ductos. Recuperado de <https://www.acrlatinoamerica.com/201705097359/noticias/empresas/top-cinco-de-mejores-practicas-para-el-diseno-e-instalacion-de-ductos.html>

Domingo, A. M. (2011). Apuntes de mecánica de fluidos.

Dullinger, C., Struckl, W., & Kozek, M. (2018). A general approach for mixed-integer predictive control of HVAC systems using MILP. *Applied Thermal Engineering*, 128, 1646-1659.

El Bouchefry, K., & de Souza, R. S. (2020). Learning in big data: Introduction to machine learning. In *Knowledge discovery in big data from astronomy and earth observation* (pp. 225-249). Elsevier.

Environmental Protection Agency (EPA). (2021). Purificadores de aire residenciales [PDF]. Recuperado de [https://espanol.epa.gov/sites/default/files/2021-05/documents/spanish\\_-\\_residential\\_air\\_cleaners.pdf](https://espanol.epa.gov/sites/default/files/2021-05/documents/spanish_-_residential_air_cleaners.pdf)

Es-sakali, N., Cherkaoui, M., Mghazli, M. O., & Naimi, Z. (2022). Review of predictive maintenance algorithms applied to HVAC systems. *Energy Reports*, 8, 1003-1012.

GlobalSpec. (s. f.). HVAC Controllers - Process Controllers - Manufacturing Process Equipment. Recuperado de [https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing\\_process\\_equipment/process\\_controllers/hvac\\_controllers](https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/process_controllers/hvac_controllers)

González, C. (2015). Lógica difusa una introducción práctica, técnicas de Soft Computing. Recuperado de: [https://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011\\_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf](https://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf).

H2OTek. (s. f.). Los humidificadores en los sistemas HVAC: Ideales para el control de humedad. Recuperado de <https://h2otek.com/tienda/los-humidificadores-en-los-sistemas-hvac-ideales-para-el-control-de-humedad/>

He, X., Zhang, Z., & Kusiak, A. (2014). Performance optimization of HVAC systems with computational intelligence algorithms. *Energy and Buildings*, 81, 371-380.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Heaton, J. (2018). Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville: Deep learning: The MIT Press, 2016, 800 pp, ISBN: 0262035618. Genetic Programming and Evolvable Machines, 19(1-2), 305-307.

Hundy, G. F., Trott, A. R., & Welch, T. C. (2008). Refrigeration and air-conditioning. Butterworth-Heinemann.

Jerez, A. N. M. (2015). Lógica Clásica y Lógica Fuzzy. Universidad Santo Tomás. Recuperado de: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/1024/2015-ArizaJerez%2CNataliaMilena-Mauales.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Joseph, S. R., Hlomani, H., & Letsholo, K. (2016). Data mining algorithms: an overview. Neuroscience, 12(3), 719-43.

Jurafsky, D., & Martin, J. H. (2023). Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition (3rd ed., draft). Stanford University & University of Colorado at Boulder.

Kang, Y., Cai, Z., Tan, C. W., Huang, Q., & Liu, H. (2020). Natural language processing (NLP) in management research: A literature review. Journal of Management Analytics, 7(2), 139-172.

Kim, D., Lee, J., Do, S., Mago, P. J., Lee, K. H., & Cho, H. (2022). Energy Modeling and Model Predictive Control for HVAC in Buildings: A Review of Current Research Trends. Energies, 15(19), 7231.

Kumar, M., Husain, D. M., Upreti, N., & Gupta, D. (2010). Genetic algorithm: Review and application. Available at SSRN 3529843.

Lambora, A., Gupta, K., & Chopra, K. (2019, February). Genetic algorithm-A literature review. In 2019 international conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon) (pp. 380-384). IEEE.

Liang, Y., Pan, Y., Yuan, X., Jia, W., & Huang, Z. (2022). Surrogate modeling for long-term and high-resolution prediction of building thermal load with a metric-optimized KNN algorithm. Energy and Built Environment.

Lu, C., Li, S., Penaka, S. R., & Olofsson, T. (2023). Automated machine learning-based framework of heating and cooling load prediction for quick residential building design. Energy, 274, 127334.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Maalej, S., Lafhaj, Z., Yim, J., Yim, P., & Noort, C. (2022, June). Prediction of HVAC System Parameters Using Deep Learning. In 12th eSim Building Simulation Conference. IBPSA Publications.

McDowall, R. (2007). Fundamentals of HVAC systems: SI edition. Academic Press.

McQuiston, F. C., Parker, J. D., & Spitler, J. D. (2004). Heating, ventilating, and air conditioning: analysis and design. John Wiley & Sons.

Meier, A., Peffer, T., Pritoni, M., & Aragon, C. (2010). Thermostat interface and usability: a survey (No. LBNL-4182E). Lawrence Berkeley National Lab. (LBNL), Berkeley, CA (United States).

Mejías-Murillo, R. (2019). Diseño de un sistema de acondicionamiento de aire y extracción mecánica para la sucursal del Instituto Nacional de Seguros de Jacó, Puntarenas.

Metsä-Eerola, I. (2022). On Forecasting Heating Energy Consumption of HVAC Systems with Recurrent Neural Networks.

Mendoza-Pittí, L., Calderón-Gómez, H., Gómez-Pulido, J. M., Vargas-Lombardo, M., Castillo-Sequera, J. L., & de Blas, C. S. (2021). Developing a Long Short-Term Memory-Based Model for Forecasting the Daily Energy Consumption of Heating, Ventilation, and Air Conditioning Systems in Buildings. *Applied Sciences*, 11(15), 6722.

Mitchell, M. (1995, September). Genetic algorithms: An overview. In *Complex*. (Vol. 1, No. 1, pp. 31-39).

Mobarakeh, J. M., & Sayyaadi, H. (2023). A novel methodology based on artificial intelligence to achieve the foremost Buildings' heating system. *Energy Conversion and Management*, 286, 116958.

Mott, R. L., Untener, J. A., Murrieta, J. E. M., & Cárdenas, R. H. (2006). *Mecánica de fluidos*.

Ngarambe, J., Yun, G. Y., & Santamouris, M. (2020). The use of artificial intelligence (AI) methods in the prediction of thermal comfort in buildings: Energy implications of AI-based thermal comfort controls. *Energy and Buildings*, 211, 109807.

Nielsen, M. A. (2015). *Neural networks and deep learning* (Vol. 25, pp. 15-24). San Francisco, CA, USA: Determination press.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Noya Zambrano, A. E. (2019). Evaluación de la percepción de confort térmico que tienen los estudiantes en el bloque 10 de la Universidad de la Costa (Doctoral dissertation, Universidad de la Costa)

Ochsner, K. (2012). Geothermal heat pumps: a guide for planning and installing. Routledge.

ProInstalaciones. (2018). IoT en los sistemas HVAC/R: ¿De qué manera la conectividad incrementará la eficiencia? Recuperado de <https://www.proinstalaciones.com/articulos/tecnico/2232-iot-en-los-sistemas-hvac-r-de-que-manera-la-conectividad-incrementara-la-eficiencia>

Refrinoticias. (s. f.). Sistemas de calefacción: confort contra el frío. Recuperado de <https://refrinoticias.com/sistemas-de-calefaccion-confort-contra-el-frio/>

Russell, S. J. (2010). Artificial intelligence a modern approach. Pearson Education, Inc.

SafetyCulture. (2022). Sistemas HVAC. Recuperado el 24 de marzo de 2023, de <https://safetyculture.com/es/temas/sistemas-hvac/>

Sarmiento-Ramos, J. L. (2020). Aplicaciones de las redes neuronales y el deep learning a la ingeniería biomédica. *Revista UIS Ingenierías*, 19(4), 1-18.

Serale, G., Fiorentini, M., Capozzoli, A., Bernardini, D., & Bemporad, A. (2018). Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: Problem formulation, applications and opportunities. *Energies*, 11(3), 631.

Satrio, P., Mahlia, T. M. I., Giannetti, N., & Saito, K. (2019). Optimization of HVAC system energy consumption in a building using artificial neural network and multi-objective genetic algorithm. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 35, 48-57.

Schwenzer, M., Ay, M., Bergs, T., & Abel, D. (2021). Review on model predictive control: an engineering perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:10.1007/s00170-021-07682-3

Shaikh, P. H., Nor, N. B. M., Nallagownden, P., & Elamvazuthi, I. (2018). Intelligent multi-objective optimization for building energy and comfort management. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 30(2), 195-204.

Siegenthaler, J. (2012). Modern hydronic heating: for residential and light commercial buildings. Cengage Learning.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Soler & Palau Ventilation Group. (2018). Sistemas de ventilación [Blog post]. Recuperado de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/sistemas-ventilacion/>

Soler & Palau Ventilation Group. (2020). Qué es el diagrama psicrométrico [Página web]. Recuperado de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/diagrama-psicrometrico/#:~:text=La%20psicrometr%C3%ADa%20es%20una%20rama,materiales%20y%20el%20confort%20humano>

Szeliski, R. (2022). Computer vision: algorithms and applications. Springer Nature.

Taheri, S., Ahmadi, A., Mohammadi-Ivatloo, B., & Asadi, S. (2021). Fault detection diagnostic for HVAC systems via deep learning algorithms. *Energy and Buildings*, 250, 111275.

Tien, P. W., Wei, S., Darkwa, J., Wood, C., & Calautit, J. K. (2022). Machine learning and deep learning methods for enhancing building energy efficiency and indoor environmental quality—a review. *Energy and AI*, 100198.

Triayudi, A., Sumiati, S., Nurhadiyan, T., & Rosalina, V. (2020). Data mining implementation to predict sales using time series method. *Proceeding of the Electrical Engineering Computer Science and Informatics*, 7(2), 1-6.

Universal Blue. (s. f.). Humidificador y deshumidificador: diferencias. Recuperado de <https://universalblue.es/blog/humidificador-y-deshumidificador-diferencias/#:~:text=Los%20deshumidificadores%20reducen%20notablemente%20la,reduce%20los%20niveles%20de%20humedad>

Wang, J., Hou, J., Chen, J., Fu, Q., & Huang, G. (2021). Data mining approach for improving the optimal control of HVAC systems: An event-driven strategy. *Journal of Building Engineering*, 39, 102246.

Yao, Y., & Shekhar, D. K. (2021). State of the art review on model predictive control (MPC) in Heating Ventilation and Air-conditioning (HVAC) field. *Building and Environment*, 200, 107952.

Zadeh, L. A. (2023). Fuzzy logic. In *Granular, Fuzzy, and Soft Computing* (pp. 19-49). New York, NY: Springer US.



 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01- 22

--