

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“MODELACIÓN, PROGRAMACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CONTROL AUTOMÁTICO MEDIANTE PLC PARA SISTEMAS INDUSTRIALES”

MODELACIÓN, PROGRAMACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CONTROL AUTOMÁTICO MEDIANTE PLC DE UN AIRE ACONDICIONADO RESIDENCIAL DE 36 000 BTU.

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

YAJAIRA MERCEDES ARAGON PAZMIÑO

yajaira.aragon@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. OSCAR IVÁN ZAMBRANO OREJUELA MSc.

ivan.zambrano@epn.edu.ec

Quito, Julio 2024

CERTIFICACIONES

Yo, YAJAIRA MERCEDES ARAGON PAZMIÑO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

YAJAIRA MERCEDES ARAGON PAZMIÑO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por YAJAIRA MERCEDES ARAGON PAZMIÑO, bajo mi supervisión.

**ING. IVÁN ZAMBRANO MSc.
DIRECTOR DEL PROYECTO**

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

YAJAIRA MERCEDES ARAGON PAZMIÑO

OSCAR IVÁN ZAMBRANO OREJUELA

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a las siguientes personas quienes hicieron posible este logro:

A mis Padres: Christian Aragon y Cristina Pazmiño.

A mis Hermanos: Christian, Hellen y Mateo.

A mis abuelos: Aida Arellano y Manuel Pazmiño.

A mis queridos amigos y allegados.

Finalmente, al Coro Mixto Politécnico y su director el Doctor Ramiro Analuisa.

AGRADECIMIENTO

Primero, agradezco a Dios por ser mi guía y brindarme su gracia e infinitas bendiciones.

A mis queridos padres y familiares, por su esfuerzo y dedicación con todos sus hijos. Por su gran amor, confianza hacia mi persona y apoyo en todo este trayecto.

A mis amigos y allegados por ser un apoyo en los momentos que más lo necesitaba.

A mi tutor el ingeniero Iván Zambrano Msc. por ser una guía importante para la elaboración del presente trabajo.

A mi querida EPN, la facultad de Ingeniería Mecánica y sus profesores, quienes forjaron a esta persona de manera profesional y me brindaron sus conocimientos.

Finalmente, al Coro Mixto Politécnico por ser la fuente de inspiración, fomentándome y adentrándome a ese hermoso mundo de cultura musical.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
Índice de Figuras	VII
Índice de Tablas.....	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT.....	X
1 Aplicación de un plc para un sistema de aire acondicionado	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco Teórico	3
1.4.1. Dinámica de sistemas mecánicos	3
1.4.1.1. Modelación Matemática de sistemas dinámicos	3
1.4.1.2. Modelación en espacio de estado	4
1.4.1.3. Modelación en función de transferencia	6
1.4.2. Simulación computacional	7
1.4.2.1. Tipos de entradas de control	7
1.4.2.2. Formas de controlar un sistema de control.....	9
1.4.2.3. Control lógico programable (PLC)	12
1.4.3. Control automático.....	13
1.4.3.1. Tipos de control.....	13
1.4.3.2. Componentes de la automatización.....	14
1.4.3.3. Señales y componentes analógicos y digitales.....	17
1.4.4. Control de un aire acondicionado.....	18
1.4.4.1. Sistemas de refrigeración	18
1.4.4.2. El ciclo de refrigeración.	18
1.4.4.3. Componentes principales del sistema de aire acondicionado	
20	
1.4.4.4. Transferencia de calor.....	21
1.4.4.5. Primer principio termodinámico	22

2	METODOLOGÍA.....	23
2.1	Aspectos Técnicos y Ambientales.....	23
2.1.1.	Propiedades del aire acondicionado seleccionado	23
2.1.2.	Condiciones ambientales	24
2.1.3.	Condiciones de diseño	24
2.2	Sistema Termodinámico de un Aire Acondicionado	25
2.2.1.	Modelo matemático para un sistema cerrado de aire acondicionado	25
2.2.2.	Ecuaciones en espacio de estado para un sistema de aire acondicionado	26
2.2.3.	Cálculo de cargas térmicas.....	26
2.2.4.	Selección del refrigerante y cálculo del COP del sistema de enfriamiento.....	27
2.2.5.	Proceso de enfriamiento de la residencia	28
2.2.6.	Enfriamiento inicial del aire acondicionado	29
2.2.7.	Control de temperatura en lazo abierto con uso de termostato	29
2.2.8.	Control de enfriamiento del aire acondicionado en lazo cerrado	29
2.2.5.	Potencia requerida para el compresor	30
2.3	Diseño Lógico y Simulación del Control del aire acondicionado.	31
2.3.1.	Asignación de variables	31
2.3.2.	Control del sistema de aire acondicionado.....	32
2.3.3.	Simulación del aire acondicionado.....	34
3	RESULTADOS	35
3.1	Análisis de gráficas del Control del Sistema en Matlab	35
3.2	Resultados de Simulación en EcoStruxure Control Expert.	37
4	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES y TRABAJOS FUTUROS.....	41
4.1	Conclusiones	41
4.2	Recomendaciones	42
4.3	Trabajos Futuros.....	42
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
6	ANEXOS	46
	ANEXO I	46
	ANEXO II	48
	ANEXO III	49
	ANEXO IV.....	50

Índice de Figuras

Figura 1.	Sistema dinámico de la planta	2
Figura 2.	Diagrama de Modelado utilizando el Espacio de Estados	3
Figura 3.	Diagrama de Modelado basado en Función de Transferencia	4
Figura 4.	Entrada tipo Impulso Unitario	8
Figura 5.	Entrada tipo Escalón Unitario	8
Figura 6.	Entrada tipo Rampa.....	9
Figura 7.	Entrada tipo Frecuencial o Vibratoria.....	9
Figura 8.	Representación general del control automático de tipo "lazo abierto"	10
Figura 9.	Control automático de tipo lazo abierto, sintetizado.....	10
Figura 10.	Representación general del control de tipo "lazo cerrado"	11
Figura 11.	Control automático de tipo "lazo cerrado", sintetizado	11
Figura 12.	Elementos "lazo cerrado"	12
Figura 13.	PLC Siemens	12
Figura 14.	Señal analógica	17
Figura 15.	Señal digital.....	17
Figura 16.	Ciclo de refrigeración.....	19
Figura 17.	Componentes de un aire acondicionado.....	20
Figura 18.	Aire Acondicionado CLARK 36000 BTU.....	23
Figura 19.	Boceto residencia.....	26
Figura 20.	Entradas y salidas de una planta térmica	28
Figura 21.	Control temperatura del termostato	29
Figura 22.	Control PID.....	30
Figura 23.	Ladder del control del aire acondicionado	32
Figura 24.	Bloque int	33
Figura 25.	Bloque Mul	33
Figura 26.	Bloque Gt	33
Figura 27.	Bloque Lt	33
Figura 28.	Simulación del sistema de aire acondicionad	34
Figura 29.	Proceso enfriamiento aire acondicionado	35
Figura 30.	Control temperatura del termostato	36

Figura 31.	Control Enfriamiento del aire acondicionado	37
Figura 32.	Barra de herramientas Api de EcoStruxure Control Expert	38
Figura 33.	Simulación del aire acondicionado	38
Figura 34.	Simulación del aire acondicionado – Activación Termostato.....	39
Figura 35.	Simulación del aire acondicionado – Activación Termostato.....	39
Figura 36.	Encendido de aire acondicionado en valores menores a los mínimos de temperatura.....	40
Figura 37.	Encendido de aire acondicionado en valores mayores a los máximos de temperatura.....	40

Índice de Tablas

Tabla 1.	Condiciones ambientales de la ciudad de Quito.....	24
Tabla 2.	Cargas Internas	27
Tabla 4.	Datos obtenidos para la selección de refrigerante.....	27
Tabla 5.	Asignación de variables para la simulación.....	31
Tabla 6.	Temperaturas de ajuste del termostato	37

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en el control automático de un aire acondicionado de 36000 BTU utilizando un Controlador Lógico Programable (PLC), con el propósito de mejorar el rendimiento del aire acondicionado asegurando una refrigeración eficiente.

En primer lugar, se modela el comportamiento del aire acondicionado considerando variables como la temperatura ambiente, la humedad y el flujo de aire. Luego, se programa el PLC utilizando lenguajes específicos como Ladder para implementar algoritmos de control que regulen estas variables.

La simulación se utiliza para validar el sistema antes de su implementación real. Se emplean software de simulación para recrear el comportamiento del aire acondicionado y del PLC, permitiendo detectar y corregir posibles fallos en las etapas de modelado y programación.

El PLC se encarga de regular las variables del aire acondicionado de acuerdo con los algoritmos de control programados, garantizando un funcionamiento óptimo.

Este proyecto resalta la importancia de la modelación, programación y simulación en el control automático de sistemas industriales, y cómo puede conducir a la optimización de los procesos de refrigeración en este caso específico.

PALABRAS CLAVE: modelación, aire acondicionado, programación, simulación, PLC.

ABSTRACT

This work focuses on the automatic control of a 36000 BTU air conditioner using a Programmable Logic Controller (PLC), with the purpose of improving the performance of the air conditioner by ensuring efficient cooling.

First, the behavior of the air conditioning is modeled considering variables such as ambient temperature, humidity and air flow. Then, the PLC is programmed using specific languages such as Ladder or Structured Text to implement control algorithms that regulate these variables.

Simulation is used to validate the system before its actual implementation. Simulation software is used to recreate the behavior of the air conditioning and the PLC, allowing possible failures to be detected and corrected in the modeling and programming stages.

The PLC is responsible for regulating the air conditioning variables in accordance with the programmed control algorithms, guaranteeing optimal operation.

This project highlights the importance of modeling, programming and simulation in the automatic control of industrial systems, and how it can lead to the optimization of refrigeration processes in this specific case.

KEYWORDS: modeling, programming, simulation, PLC.

1 APLICACIÓN DE UN PLC PARA UN SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO

Este proyecto se centra en la automatización del control del aire acondicionado, un componente vital en el almacenamiento y preservación de productos perecederos, como alimentos, medicamentos y otros materiales sensibles a las condiciones de temperatura.

A continuación, se detalla exhaustivamente este componente:

Modelado del Sistema:

La fase de modelado implica la creación de un modelo que manifieste el comportamiento un aire acondicionado. Este proceso incluye la consideración de variables como la temperatura ambiente, la carga térmica (productos almacenados), la capacidad de enfriamiento del sistema y la humedad, entre otros aspectos.

Programación del PLC (Controlador Lógico Programable):

El PLC constituye el núcleo del sistema de control. Se programa para tomar decisiones basadas en las entradas proporcionadas por los sensores y para activar las salidas correspondientes (actuadores) según las necesidades del sistema.

Este programa debe tener en cuenta la lógica de control, los algoritmos de regulación de temperatura y las secuencias de arranque y parada.

Simulación del Sistema:

La simulación permite la evaluación del sistema antes de su implementación física. Se emplean herramientas de software como MATLAB y un software específico para PLC con el fin de simular el comportamiento del sistema en diferentes escenarios.

Durante la simulación, se examinan diversos casos, como cambios en la carga térmica, posibles fallos en los sensores o actuadores, y variaciones en las condiciones ambientales.

Esta simulación facilita la optimización de los parámetros de control y la identificación temprana de posibles problemas antes de la implementación real.

Consideraciones de Seguridad y Eficiencia:

Se deben integrar medidas de seguridad para prevenir situaciones peligrosas, como el sobrecalentamiento o la congelación excesiva.

En resumen, la modelación, programación y simulación del control automático mediante PLC en un sistema de aire acondicionado representa un proceso interdisciplinario que combina conocimientos de ingeniería mecánica, electrónica y control automático. El resultado final es un sistema fiable, eficiente y seguro que garantiza una óptima conservación de los productos almacenados.

1.1 Objetivo general

Desarrollar el control automático de un dispositivo para aire acondicionado de 36000 BTU mediante el uso de un PLC para garantizar y mantener un ambiente de confort residencial.

1.2 Objetivos específicos

1. Recopilar datos relevantes referentes a la automatización mediante PLC para automatizar el funcionamiento de un dispositivo de aire acondicionado.
2. Desarrollar un modelo dinámico para el control automático de un aire acondicionado mediante un PLC.
3. Desarrollar y simular un programa de control de PLC para regular y supervisar el funcionamiento automatizado de un aire acondicionado de 36000 BTU.
4. Validar el funcionamiento adecuado del aire acondicionado, con el fin de minimizar su consumo energético mediante el uso del PLC.

1.3 Alcance

Este trabajo se enfoca en recopilar datos clave para automatizar un aire acondicionado usando un Controlador Lógico Programable (PLC). Para lograrlo, se recoge información certificada sobre el uso de PLCs en estos sistemas, se sintetizan y analizan los datos obtenidos, y se registra el estado actual de la automatización en aires acondicionados. Estas actividades proporcionan una base de conocimiento sólida y actualizada, crucial para avanzar en el proyecto.

Además, se desarrolla un modelo dinámico para el control automático del aire acondicionado con un PLC, considerando las condiciones y limitaciones específicas de un entorno residencial. Se crea este modelo teniendo en cuenta parámetros de control automático y principios de termodinámica y transferencia de calor, y se documenta

detalladamente. Finalmente, se va a diseñar y simular un programa de control para un aire acondicionado de 36000 BTU. Esto incluye el diseño lógico del programa, su programación conforme al modelo dinámico, la simulación para asegurar su correcto funcionamiento, y la documentación completa del programa en la memoria del proyecto.

1.4 Marco Teórico

1.4.1 Dinámica de sistemas mecánicos

1.4.1.1 Modelación matemática de sistemas dinámicos

Una planta industrial se puede describir como un complejo de subsistemas, componentes, partes y elementos que trabajan conjuntamente para producir un bien o ejecutar un proceso en un entorno manufacturero. [1]

Es crucial entender que una planta opera como un sistema dinámico, con un comportamiento que cambia y se adapta con el tiempo. Este dinamismo implica movimientos variados, tales como el de sólidos, líquidos, calor y energía eléctrica.

El desempeño y la operación de la planta están definidos por la interacción entre sus diversos componentes y flujos. La planta posee entradas y salidas que reflejan diferentes variables de movimiento, cuyo número y naturaleza dependen de la planta en cuestión, como se ve en la figura 1.



Figura. 1. Sistema dinámico "planta".[1]

El modelo matemático referente a la conducta dinámica de una planta se compone de un sistema de ecuaciones diferenciales de orden variable, determinado por la cantidad de entradas y salidas del sistema. Tradicionalmente, este sistema se resolvía analíticamente mediante las transformadas de Laplace. No obstante, debido a la complejidad inherente de este método, el control moderno ha desarrollado dos modelos matemáticos adicionales que facilitan el análisis y diseño del control. [2]

1.4.1.2 Modelación en espacio de estado.

En la ingeniería, dichos modelos conocidos como espacio de estados son cruciales para el análisis de sistemas dinámicos complejos. Mediante el uso de ecuaciones diferenciales y matriciales, estos modelos representan sistemas físicos a través de variables de estado y entradas. La simulación por computadora ha tomado el lugar de los métodos analíticos tradicionales debido a su mayor eficiencia y facilidad de uso con matrices y vectores. Estos modelos transforman ecuaciones diferenciales de cualquier orden en un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer grado, simplificando así el estudio del comportamiento dinámico del sistema. [2]

El método de modelado en el espacio de estados ofrece varias ventajas, entre las cuales se incluyen:

- Permite trabajar directamente en el dominio temporal.
- Elimina la necesidad de largos desarrollos analíticos, gracias a su estructura basada en matrices y vectores, que facilita la resolución mediante simulaciones computacionales.

A continuación, se presenta la forma matricial de un sistema compuesto por “n” ecuaciones diferenciales ordinarias de primer grado.



Figura. 2. Diagrama de Modelado utilizando el Espacio de Estados.[1]

Así, tenemos los siguientes vectores:

$U = [u_1, u_2, \dots, u_m]$: Entradas de la planta

$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$: Salidas o vector de estado

$\frac{dx}{dt} = \dot{X} = [\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_n]$: Derivadas de las salidas

Por lo tanto, la forma general de representar el modelo matemático del comportamiento dinámico de la planta se describe mediante la siguiente expresión en forma de matriz:

$$\dot{X} = A.X + B.U \quad (1)$$

$$Y = C.X + D.U \quad (2)$$

Así:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix}$$

Por lo tanto:

\dot{X} : vector de derivadas de las salidas $n \times 1$

X : vector de estado (salidas) $n \times 1$

A : matriz de coeficientes $n \times n$

U : vector de entradas $m \times 1$

B : matriz de coeficientes $n \times m$

Y : vector espejo $n \times 1$

C : matriz de escala $n \times m$

D : matriz estereo $n \times m$

Dichos modelos matemáticos se ajustan a ciertos criterios y condiciones esenciales en cualquier diseño de control:

Consideraciones:

- Condiciones iniciales: Se establece el tiempo inicial como $t = 0$.
- Condiciones de frontera: Se toman en cuenta momentos específicos en el tiempo.

Parámetros:

- Tiempo de ascenso, se señala es instante de un cambio significativo en el estado, según la variable en análisis, como temperatura, flujo de aire o humedad.
- Tolerancia al error.
- Valores máximos sobre pico.
- Estabilidad del sistema.

Así, este enfoque de modelado se alinea estrechamente con la filosofía holística de la mecatrónica, lo que justifica su recomendación y aplicación generalizada. [2]

1.4.1.3 Modelación de la función de transferencia

Se conceptualiza como un modelo matemático que conecta la respuesta "xi" de un sistema con una señal de entrada "u j". Esta conexión se expresa como la fracción de dos polinomios en el dominio de la frecuencia "s", uno relacionado con la salida y otro con la entrada. Dentro de la ecuación que simboliza esta relación, "G(s)" representa la función de transferencia específica para esta correspondencia uno a uno.

$$G(s) = \frac{\text{Polinomio de salida } x_i \text{ en el dominio de la frecuencia } (s)}{\text{Polinomio de la señal de entrada } u_j \text{ en el dominio de la frecuencia } (s)} \quad (3)$$

En contraposición al enfoque del modelado en espacio de estados, el método de la función de transferencia postula que tanto el análisis como la síntesis del comportamiento dinámico y del control de la planta deben realizarse de manera biunívoca. Esto implica que para cada entrada se debe asignar una única salida de la planta y en sentido inverso. [2]

Este enfoque de modelado de sistemas como funciones de transferencia presenta las siguientes ventajas:

- Facilita la eficiente aplicación de técnicas numéricas y módulos visuales para obtener respuestas a las señales de control.
- La transformada de Laplace se convierte en una herramienta útil para transformar ecuaciones diferenciales en polinomios algebraicos, simplificando así su resolución.
- Aunque comúnmente los sistemas tienen una única salida, pueden existir casos con múltiples entradas y salidas, representadas por vectores de dimensiones específicas. En estos escenarios, la función de transferencia se determina mediante matrices.

Es fundamental señalar que no se requiere que la cantidad de entradas sea igual a la cantidad de salidas.

A continuación, se muestra una descripción de una configuración típica de una planta con " m " entradas y " n " salidas, en la cual el comportamiento de la planta sigue una relación uno a uno, lo que significa que cada salida " xi " está vinculada a una única entrada " u j ".



Figura. 3. Diagrama de Modelado basado en Función de Transferencia.[1]

1.4.2 Simulación computacional

1.4.2.1 Tipos de entradas de control

Una vez definida la función de transferencia, se elige una señal de entrada unitaria. A través de simulaciones computacionales, se ajusta esta señal para obtener la salida deseada. Las señales de entrada o funciones temporales específicas son utilizadas para analizar el comportamiento y el control del sistema. De esta manera, se optimiza la respuesta del sistema según la entrada seleccionada. En esencia, la simulación se utiliza para ajustar las entradas y mejorar la salida del sistema. [1]

Los tipos principales de señales de entrada de control son:

- **Entrada de impulso unitario:** La reacción del sistema a esta clase de entrada proporciona una representación cercana al comportamiento intrínseco del sistema. El modelo matemático establece las siguientes condiciones:

$$f(t) = 0 \quad \text{si } t \neq 0$$

$$f(t) = a \quad \text{si } t = 0$$

La transformada de Laplace para la entrada de tipo impulso se expresa como:

$$F(s) = a.$$

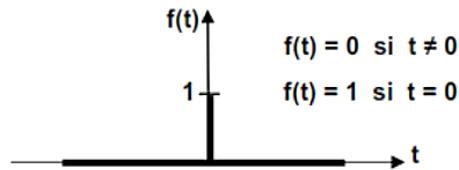


Figura. 4. Entrada tipo Impulso Unitario. [1]

- **Entrada de tipo escalón unitario:** Este tipo de entrada brinda información sobre la reacción del sistema ante cambios repentinos en su entrada. [1] El modelo matemático establece las siguientes condiciones:

$$f(t) = 0 \text{ si } t \leq 0$$

$$f(t) = a \text{ si } t > 0$$

La transformada de Laplace para la entrada de tipo escalón se expresa como:

$$F(s) = a/s.$$

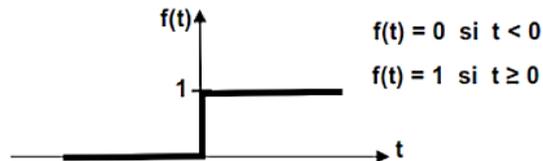


Figura. 5. Entrada tipo Escalón Unitario. [1]

- **Entrada de tipo rampa:** Este tipo de entrada se caracteriza por señales que varían de manera lineal conforme avanza el tiempo. [1] El modelo matemático establece condiciones específicas:

$$f(t) = 0 \text{ si } t \leq 0$$

$$f(t) = a \cdot t \text{ si } t > 0$$

La transformada de Laplace correspondiente a esta entrada tipo rampa se expresa

como $F(s) = \frac{a}{s^2}$.

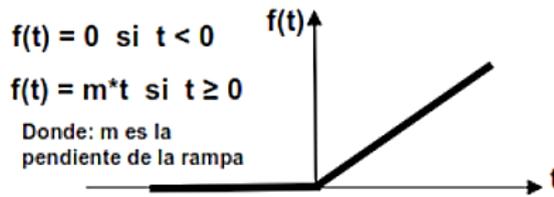


Figura. 6. Entrada tipo Rampa. [1]

- Entrada de tipo frecuencial o vibratoria:** Se aplica a la entrada del sistema en forma de una onda sinusoidal o fluctuante, que se repite de manera periódica, como se ilustra en la figura 7. Estas señales sinusoidales están caracterizadas por su amplitud efectiva (rms) y su frecuencia de oscilación, medida en Hertz (Hz) o ciclos por minuto (cpm). La respuesta de la salida ante esta señal de entrada también es frecuencial, con una amplitud que puede ser mayor, menor o igual a la de la entrada, y además presenta un desfase temporal con respecto a la entrada, conocido como fase (Φ). [1]

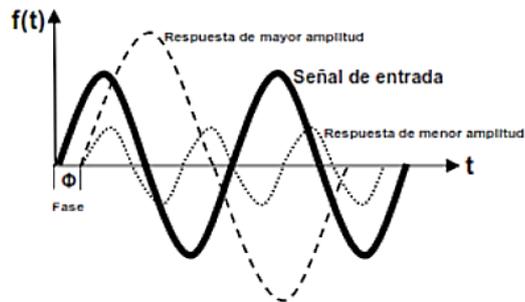


Figura. 7. Entrada tipo Frecuencial o Vibratoria. [1]

1.4.2.2 Formas de controlar un sistema de control.

Los sistemas de control son de importancia en la automatización industrial al posibilitar la regulación efectiva de procesos y maquinaria. En el contexto de una cámara frigorífica, estos sistemas son vitales para mantener las condiciones óptimas de temperatura y humedad dentro de un rango predefinido, garantizando así la conservación adecuada de los productos almacenados. [1]

Existen dos enfoques fundamentales para controlar un proceso o sistema: lazo abierto y lazo cerrado. A continuación, se ofrece un análisis detallado de ambas metodologías:

a) Lazo Abierto

En estos sistemas, la señal de salida no afecta la señal de entrada, y no se compara la señal de salida con una referencia. Esta forma de control puede ser descrito en la figura 8.

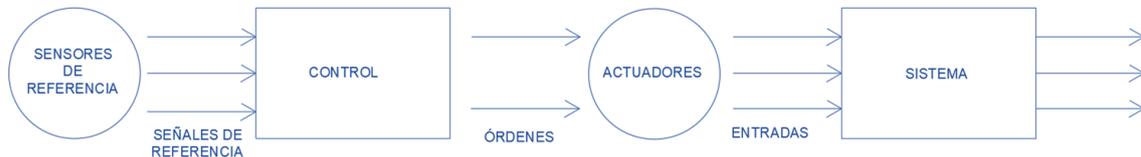


Figura. 8. Representación general del control automático de tipo "lazo abierto". [1]

De forma sintetizada, el control puede ser descrito en la figura 9.



Figura. 9. Representación general del control automático de tipo "lazo abierto", sintetizado. [1]

Los sistemas de lazo abierto tienen ciertas ventajas, como su simplicidad, bajo costo y una confiabilidad relativamente alta. No obstante, carecen de precisión debido a la falta de corrección de errores. [3]

b) Lazo cerrado

En estos sistemas, la señal de entrada es afectada por la señal de salida, empleando retroalimentación para comparar la salida real con una referencia deseada. Se evalúa el error que hay entre la salida real y el error en la de referencia, y se realizan ajustes correspondientes para reducir este error y asegurar la fiabilidad del sistema [1].

Esta forma de control puede ser descrito en la figura 10.

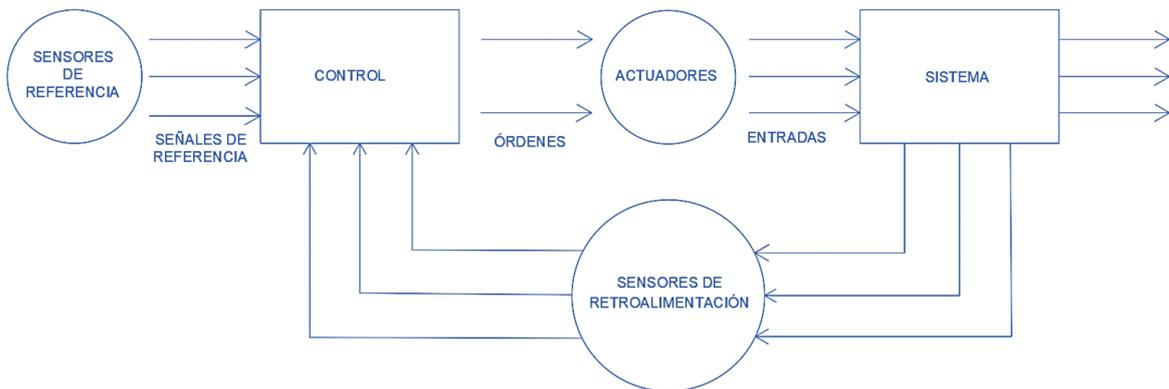


Figura. 10. Representación general del control automático de tipo "lazo cerrado".[1]

De forma sintetizada, el control puede ser descrito en la figura 11.

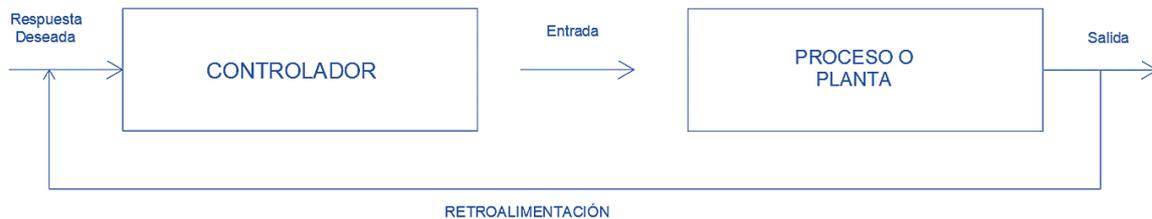


Figura. 11. Representación general del control automático de tipo "lazo cerrado", sintetizado.[1]

Es relevante destacar que una ventaja en los sistemas de lazo cerrado es ser altamente precisos ya que iguala el valor real con el valor deseado. No obstante, suelen ser más complejos, lo que resulta en un aumento de costos y la necesidad de más componentes. [3]

Elementos de un sistema de lazo cerrado:

- **Comparador:** encargado de comparar la señal de referencia con la señal medida de la variable controlada. En caso de discrepancia, emite una señal de error para que el controlador tome medidas correctivas.
- **Controlador:** realiza acciones para corregir la señal de error generada por el comparador.
- **Elemento de corrección o actuador:** responsable de modificar el proceso para corregir, controlar o ajustar la condición de medición.
- **Planta o sistema de proceso:** el proceso o sistema que se pretende controlar.

- **Medidor o sensor:** traduce el valor actual de la variable controlada para su interpretación por parte del controlador.[3]
- **Señales de referencia:** las señales que deben ajustarse en función de los valores deseados de salida del sistema.
- **Señales controladas:** las variables de salida del proceso, controladas por los sistemas de retroalimentación.

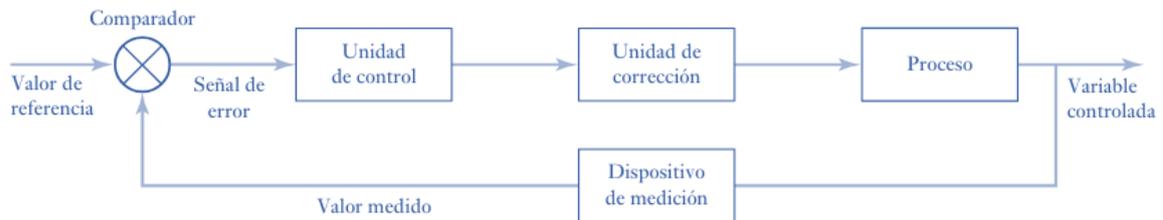


Figura. 12. Elementos "lazo cerrado".[1]

1.4.2.3 Controlador lógico programable (PLC)

Los PLC son elementos electrónicos creados para gestionar, controlar y regular procesos industriales y maquinaria. Utilizan memorias programables para almacenar instrucciones que realizan tareas específicas, como control lógico, secuenciación, temporización y cálculos aritméticos, lo que facilita la gestión tanto de entradas como salidas ya sean digitales o analógicas para controlar diversos equipos y procesos. [3]



Figura. 13. PLC Siemens.[3]

Estos PLCs se destacan por su robusto diseño, lo que les permite operar de manera confiable en entornos industriales adversos, soportando condiciones extremas como altas y bajas temperaturas, humedad, golpes y vibraciones. Son programables

mediante lenguajes especializados como Ladder Logic o Diagrama de bloques, lo que les confiere flexibilidad y adaptabilidad para ser reprogramados y adaptados a nuevas necesidades de producción.

Además, los PLCs exhiben una resiliencia notable al operar durante períodos prolongados sin necesidad de mantenimiento previo, lo que contribuye a su fiabilidad. Son capaces de responder rápidamente ante situaciones de emergencia, como cortes de suministro eléctrico, lo que asegura la continuidad de la producción.

1.4.3 Control automático

El control de un sistema se refiere a la capacidad de regular su comportamiento mediante dispositivos y algoritmos con el fin de alcanzar un rendimiento deseado. Este concepto, fundamental en ingeniería y tecnología, abarca la manipulación de variables como temperatura, velocidad o posición en diversos contextos, como sistemas de calefacción, vehículos o brazos robóticos. La implementación de sistemas de control es crucial en campos como la automatización industrial, la robótica y el transporte.

1.4.3.1 Tipos de control

- **Control Manual:** En este método, todas las operaciones requeridas para regular el sistema son llevadas a cabo exclusivamente por un operario humano, sin intervención de dispositivos automáticos.
- **Control Automático:** Este enfoque implica que las operaciones de control del sistema son ejecutadas por elementos artificiales, sin necesidad de la intervención directa del operador humano. Aquí, los dispositivos automatizados se encargan de supervisar y ajustar el sistema de manera autónoma.
- **Control Semiautomático:** En este tipo de control, las operaciones para regular el sistema se realizan tanto de forma automática como manual. Esto implica una combinación de intervención humana y automatizada para gestionar y ajustar el sistema según sea necesario.

1.4.3.2 Componentes de la automatización

La automatización se define como un procedimiento que emplea tecnología para supervisar y operar sistemas o dispositivos de manera automática, sin requerir intervención directa humana. Para alcanzar este propósito, se precisa una integración de componentes interdependientes.

a) Sensores: Estos componentes críticos son responsables de la captura y medición de variables físicas, trasladando esta información al controlador. Basándose en estos datos, el controlador efectúa decisiones para mantener o alterar el comportamiento del sistema. [6]

Atributos de los sensores:

- Sensibilidad: Habilidad para detectar mínimas variaciones en la magnitud medida.
- Rango de medición: Amplitud de valores que el sensor puede medir.
- Precisión: Nivel de precisión con el que el sensor efectúa la medición.
- Linealidad: Proporcionalidad entre la magnitud medida y la señal de salida del sensor.
- Repetibilidad: Capacidad del sensor para reproducir la misma salida ante una misma magnitud medida en diferentes ocasiones.
- Ruido: Interferencias no deseadas que perturban la medición del sensor.

Tipos de sensores:

- Sensores de posición: Detectan y miden la ubicación de un objeto en relación a un punto de origen. Ejemplo, un sensor de posición lineal determina la posición de un pistón en un cilindro neumático.
- Sensores de fuerza: Detectan y cuantifican la fuerza ejercida sobre ellos. Ejemplo, un sensor de fuerza mide la fuerza aplicada a un resorte en un sistema de suspensión de automóvil.
- Sensores de temperatura: Detectan y miden la temperatura de un objeto o ambiente. Ejemplo, un termistor controla la temperatura de un motor de automóvil para evitar el sobrecalentamiento. [3]
- Sensores de luz: Detectan y cuantifican la intensidad luminosa en un entorno dado. Ejemplo, un fotodiodo detecta la luz emitida por una lámpara en un sistema de iluminación automatizado.

- Sensores de humedad: Detectan y miden la humedad que hay en el aire o en un objeto. Ejemplo, un higrómetro mide la humedad relativa en un invernadero para controlar el riego de las plantas. [3]

b) Actuadores: Se refieren a dispositivos que convierten la energía en movimiento, siendo elementos encargados de ejecutar las acciones requeridas para controlar el sistema. Estos dispositivos reciben instrucciones directas del controlador. En entornos industriales, son empleados para regular válvulas, motores, cilindros y otros mecanismos [7].

Características de los actuadores:

- Fuerza: es la máxima fuerza que el actuador puede generar.
- Velocidad: representa la velocidad máxima a la que el actuador puede mover una carga.
- Precisión: indica el grado de exactitud con el que el actuador puede posicionar una carga.
- Carrera: define la máxima distancia que el actuador puede desplazar una carga.
- Eficiencia: relaciona la energía suministrada al actuador y la aprovechada en la salida.
-

Tipos de Actuadores:

- Actuadores neumáticos: Transforman la energía proveniente del aire comprimido en movimiento físico. Por ejemplo, un cilindro neumático puede generar fuerza lineal al expandir un pistón en respuesta a la presión del aire.
- Actuadores hidráulicos: Por ejemplo, un cilindro hidráulico puede generar fuerza lineal al mover un pistón impulsado por la presión del fluido hidráulico. [5]
- Actuadores eléctricos: Cambia la energía eléctrica en mecánica. Por ejemplo, un motor eléctrico. [5]
- Actuadores piezoeléctricos: Son dispositivos que utilizan el efecto piezoeléctrico para generar movimiento. Por ejemplo, un actuador piezoeléctrico puede

cambiar de forma cuando se aplica un campo eléctrico, lo que se utiliza en aplicaciones de precisión como los enfoques de cámaras fotográficas.

- c) Controladores:** Constituye el núcleo del sistema de control, encargado de recibir, procesar y transmitir la información proveniente de los sensores, así como de emitir instrucciones a los actuadores para que realicen acciones sobre el sistema, en conformidad con las condiciones establecidas.

Características de los controladores:

- Capacidad de procesamiento: se refiere a la velocidad y capacidad de cálculo del controlador.
- Memoria: representa la cantidad de almacenamiento disponible para guardar programas y datos.
- Entradas y salidas: indica el número y tipo de interfaces de entrada y salida disponibles para conectar sensores y actuadores.
- Facilidad de programación: describe el nivel de complejidad para programar y configurar el controlador.
- Comunicación: denota la capacidad del controlador para intercambiar información con otros dispositivos y sistemas.

Tipos de Controladores

- Controladores lógicos programables (PLCs): Son dispositivos electrónicos que controlan procesos industriales mediante secuencias lógicas programadas, activando o desactivando actuadores según condiciones predefinidas.
- Controladores basados en microcontroladores: Ejecutan algoritmos de control, como regular la velocidad de un motor en base a su temperatura ambiente.
- Controladores PID: Mantienen una variable controlada ajustando la salida del sistema según el error, la integral y la derivada del error. [4]
- Controladores basados en sistemas de control distribuido (DCS): Utilizan una red de controladores distribuidos para monitorear y controlar partes de un proceso industrial.

- Controladores basados en inteligencia artificial: Basados en inteligencia artificial adaptan y aprenden del entorno, optimizando el consumo de energía y manteniendo el confort térmico.

1.4.3.3 Señales y componentes analógicos y digitales

- Señales analógicas: Son expresiones de valores que cambian de manera continua a lo largo del tiempo, como la temperatura o la presión. Estas señales se transmiten y procesan mediante circuitos electrónicos analógicos, donde la información se conserva en forma de fluctuaciones eléctricas variables. [1]

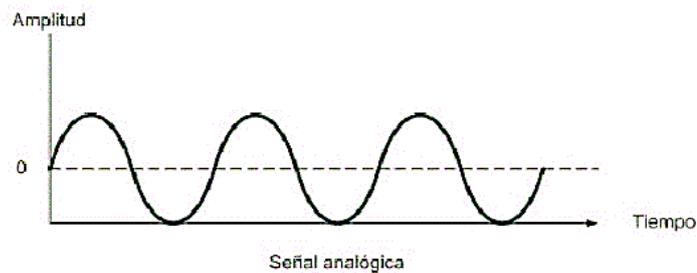


Figura. 14. Señal analógica. [1]

Dentro de las señales analógicas tenemos: Sensores analógicos, actuadores analógicos, amplificadores y filtros.

- Señales digitales: Representan valores discretos que solo pueden existir en dos estados distintos, comúnmente denotados como 0 y 1. Estas señales se transmiten y procesan utilizando circuitos electrónicos digitales, donde la información se codifica en secuencias binarias. [1]

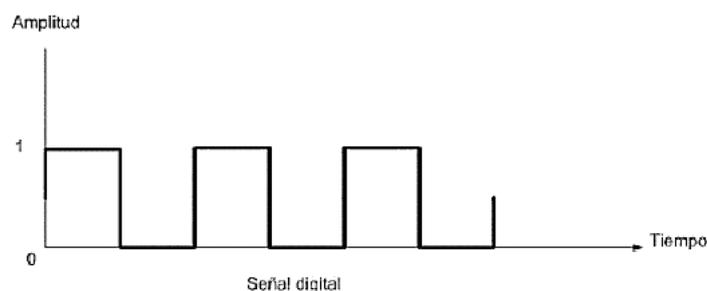


Figura. 15. Señal digital.[1]

Dentro de las señales tenemos: Sensores digitales, ADC, DAC, microcontroladores, buses de comunicación.

1.4.4 Control de un aire acondicionado

Los sistemas de aire acondicionado son dispositivos diseñados para regular las condiciones ambientales en un espacio cerrado, como una habitación, edificio u otra área interior. Estos sistemas controlan la temperatura, humedad, circulación y filtración del aire para un ambiente mucho más cómodo y saludable. [4]

Para realizar un control de un sistema de aire acondicionado se debe gestionar diversas variables, entre ellas la temperatura del ambiente, la circulación del flujo de aire, la velocidad del ventilador y la activación del sistema de enfriamiento o calefacción según sea necesario. Esto se logra a través de un controlador centralizado o unidades individuales de control, que pueden ser programadas manualmente o de manera automática para mantener las condiciones deseadas dentro del espacio.

1.4.4.1 Sistemas de refrigeración

Los sistemas de refrigeración son importantes en la vida moderna, permitiendo controlar y mantener temperaturas bajas en diversos entornos y productos. Estos sistemas utilizan principios termodinámicos para extraer calor de un área y transferirlo a otra, logrando así preservar alimentos, medicamentos y otros productos sensibles a la temperatura. La refrigeración no solo es esencial en el ámbito doméstico y comercial, sino que también juega un papel crucial en procesos industriales y tecnológicos, como en la conservación de muestras biológicas y en la optimización de equipos electrónicos. [6]

1.4.4.2 El ciclo de refrigeración

En un aire acondicionado el ciclo de refrigeración refiere a un proceso termodinámico el cual implica transferir calor de un espacio frío a uno caliente, este ciclo se utiliza para eliminar el calor del interior de un espacio y transferirlo al exterior, manteniendo así el interior fresco y cómodo. [8]

El ciclo de refrigeración básico consta de cuatro procesos principales como se describe en la Figura 16:

Ciclo de refrigeración industrial

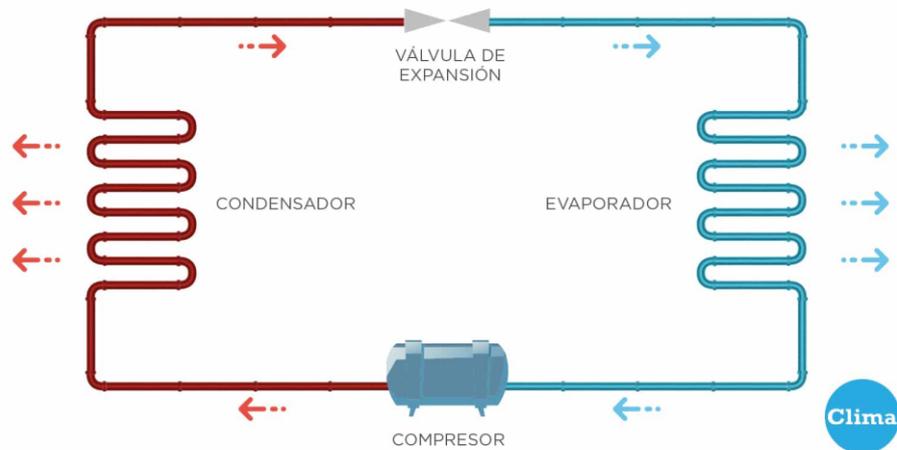


Figura. 16. Ciclo de refrigeración. [8]

1. **Compresión:** El refrigerante en estado gaseoso, es sometido a compresión en el compresor, lo que resulta en un aumento tanto de su temperatura como de su presión.
2. **Condensación:** El refrigerante ya comprimido y con una temperatura elevada es depositado en el condensador, para ceder calor al ambiente externo y consecuentemente condensarse un líquido de presión elevada.
3. **Expansión:** A través de la válvula de expansión el refrigerante líquido con una elevada presión se expande, provocando una disminución súbita de la presión y la temperatura.
4. **Evaporación:** Para finalizar se introduce en el evaporador al refrigerante de baja presión y temperatura, para absorber el calor del aire interior, convirtiéndose nuevamente en gas y completando el ciclo. [8]

Este proceso se repite cíclicamente mientras el aire acondicionado está en funcionamiento, extrayendo calor del interior y liberándolo al exterior para mantener una temperatura confortable en el espacio acondicionado.

1.4.4.3 Componentes principales de un sistema de aire acondicionado

Estos sistemas constan de varios componentes principales que trabajan juntos para enfriar y deshumidificar el aire en un espacio interior. Estos son los componentes principales que se localizan en la mayoría de los sistemas, aunque la configuración específica puede variar según el tipo de sistema y la aplicación: [8]

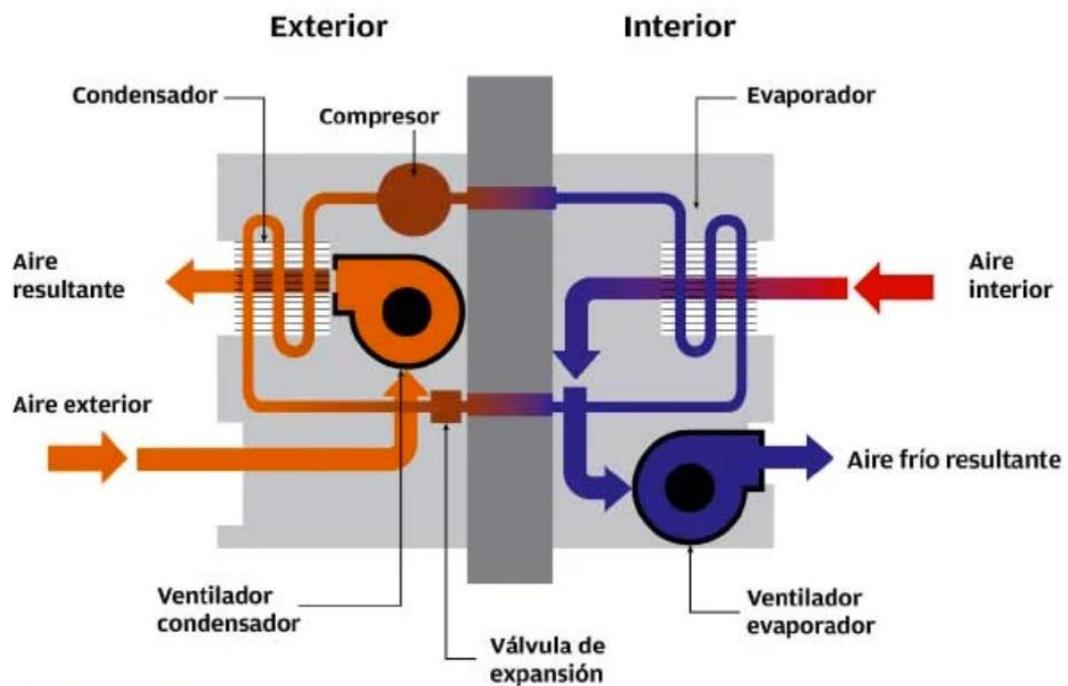


Fig. 17. Componentes de un aire acondicionado.[8]

1. Compresor: Responsable de comprimir y bombear el refrigerante a través del sistema, con el fin de aumentar la presión y la temperatura del mismo.
2. Condensador: Después de que el refrigerante se ha comprimido y calentado en el compresor, pasa al condensador. Aquí, el refrigerante libera calor al entorno exterior para condensarse en líquido de elevada presión.
3. Evaporador: Durante este proceso, el refrigerante absorbe calor del aire del interior de la habitación, enfriándolo. [8]
4. Válvula de expansión: Este componente regula el flujo de refrigerante del condensador al evaporador y mantiene la presión adecuada en el sistema.

5. Ventilador del evaporador: El ventilador del evaporador circula el aire del interior de la habitación a través del evaporador, permitiendo que el aire se enfríe y se deshumidifique.

6. Ventilador del condensador: Ayuda a enfriar el refrigerante y a mantener el sistema dentro de los rangos de temperatura adecuados.

7. Filtro de aire: El aire acondicionado también puede incluir un filtro de aire, que atrapa partículas de polvo, polen y otros contaminantes presentes en el aire. [8]

Es importante que todos estos componentes funcionen de manera conjunta y eficiente para garantizar un rendimiento óptimo del sistema de aire acondicionado. Todos los elementos juntos se pueden observar en la Figura (17).

1.4.4.4 Transferencia de calor

En el proceso de enfriamiento como en un sistema de aire acondicionado es fundamental transferir calor. A continuación, se describen los conceptos clave de transferencia de calor y cómo se aplican en este proceso:

Conducción:

- La conducción se encarga de transferir calor a través de un material sólido debido al movimiento de las partículas en el material. En un sistema de aire acondicionado, la conducción se puede observar en el intercambiador de calor del evaporador y el condensador, ya que el calor del aire del interior se transfiere a través de las paredes del evaporador al refrigerante que circula en su interior.[10]

Para ello se hace uso de la ecuación (1).

$$\dot{Q} = K_{\text{cond}} \cdot A \cdot \Delta T \quad (1)$$

Convección:

Transfiere calor a través de un fluido ya sea líquido o gas, debido al movimiento del fluido. En un evaporador, el aire calentado del interior de la habitación entra en contacto con las bobinas frías del evaporador. El aire se enfría al transferir calor al refrigerante en las

bobinas a través del proceso de convección. Este aire frío luego se distribuye por la habitación a través del sistema de ventilación. [10]

Para ello se hace uso de la ecuación (2).

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Radiación:

A través de ondas electromagnéticas, sin la necesidad de un medio material para transportarlo se transfiere calor. [3] En el proceso de enfriamiento de un aire acondicionado, la radiación no juega un papel tan significativo como la conducción y la convección. Sin embargo, en el condensador, donde el refrigerante caliente libera calor al ambiente exterior, una pequeña cantidad de radiación térmica puede estar involucrada en la transferencia de calor. [10] Para ello se hace uso de la ecuación (3).

$$\dot{Q} = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (3)$$

Teniendo en cuenta la emisividad del material e y la constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$.

1.4.4.5 Primer principio termodinámico

Según este principio la variación producida en la energía interna de un sistema cerrado (ΔE) cambia según la diferencia entre la energía que entra y la que sale, lo que se conoce como un balance energético. [11]

$$\Delta E = E_{entra} - E_{sale} \quad (4)$$

$$\Delta E = W + \Delta Q \quad (5)$$

Para sistemas de refrigeración se conoce que $W = 0$, y se obtiene:

$$\Delta E = \Delta Q \quad (6)$$

$$\Delta E = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (7)$$

Para un sistema cerrado, tenemos:

$$\frac{d(\Delta E)}{dt} = \dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \frac{d(\Delta T)}{dt} \quad (8)$$

Así:

$$\dot{m}_{sale} = \dot{m}_{entra} = 0 \quad (9)$$

2 METODOLOGÍA

La estructura del presente trabajo se compone de tres secciones. En la primera sección, se lleva a cabo la recopilación de datos técnicos y fichas relevantes del equipo, así como las condiciones operativas, de diseño y ambientales. Posteriormente, se procede al desarrollo del modelo matemático del sistema de aire acondicionado. La segunda sección, se enfoca en el control del sistema de aire acondicionado empleando los modelos matemáticos en MATLAB con ayuda de la librería Control SystemToolbox, las cargas térmicas del sistema con un software online de acceso libre y el cálculo del COP del sistema mediante el software CoolProp. Además, se implementa un control retroalimentado para gestionar la potencia del compresor y asegurar así que el espacio acondicionado mantenga la temperatura deseada de manera eficiente, ya sea para calentar o enfriar la residencia. Por último, la tercera sección se centra en la implementación práctica de los resultados previos obtenidos en MATLAB utilizando el software EcoStruxure Control Expert (Unity Pro XL). Esta etapa incluye tanto el control digital como analógico de la temperatura en la residencia. Se aprovechan las herramientas disponibles en el software, como sensores, actuadores y pantallas digitales, para monitorear y ajustar los parámetros operativos del sistema de manera efectiva, proporcionando una base sólida para la investigación y el desarrollo en el campo del aire acondicionado industrial.

2.1 Aspectos Técnicos y Ambientales

2.1.1 Propiedades del aire acondicionado seleccionado

El trabajo se enfoca en el control automatizado del sistema de acondicionamiento, por lo que se va a seleccionar un equipo comercial adecuado. Se ha elegido un sistema de aire acondicionado producido por Clark, modelo CCF-36HRE, con una capacidad de 36000 BTU Frío /Calor por Bomba de calor que se detalla en el anexo 1. [8]



Figura. 18. Aire Acondicionado CLARK 36000 BTU, Frío /Calor por Bomba de calor, Equipo Piso Cielo. [8]

2.1.2 Condiciones ambientales

Para el desarrollo de la investigación presente se toma en cuenta las condiciones ambientales de la ciudad de Quito y condiciones de confort térmico, estos datos se obtuvieron del anuario meteorológico del INHAMI 2017 [8] anexo 2. Los parámetros necesarios se pueden visualizar en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones ambientales de la ciudad de Quito

Condiciones ambientales de la ciudad de Quito		
Condición	Cantidad	Unidad
Temperatura Ambiente	15	°C
Temperatura máxima Verano	28	°C
Temperatura mínima Invierno	8	°C
Temperatura punto de rocío.	8.7	°C
Velocidad máxima	14	m/s - NE
Velocidad promedio	4.2	m/s
Humedad relativa anual	74	% HR

Para el presente trabajo, se han empleado los datos de la estación meteorológica M0024 QUITO IÑAQUITO, tomando en cuenta las temperaturas máximas, la temperatura media mensual y la humedad relativa promedio del mes de septiembre. [8]

2.1.3 Condiciones de diseño

El comportamiento termodinámico y el respectivo control automático del aire acondicionado de 36,000 BTU diseñado para climatizar una residencia será evaluado a partir de las siguientes condiciones:

- Capacidad de Enfriamiento: El aire acondicionado de 36 000 BTU debe ser capaz de enfriar eficientemente un área residencial de $56 \text{ m}^2 = 592 \text{ ft}^2$.
- Temperatura de Confort Térmico: El sistema de aire acondicionado debe mantener una temperatura interna de la residencia confortable, de 22°C . [14]
- Temperatura Exterior: La temperatura promedio exterior se estima en 15°C .

- Dimensiones de la Residencia: La residencia tiene una superficie total de 56 m² con una altura de 2.4 m = 7.9 ft.
- Ubicación: La residencia se encuentra dentro de una edificación que proporciona protección contra condiciones climáticas extremas.
- Las cargas térmicas y el uso de la residencia: Se estima una residencia en la que habitan 6 personas.

Estas condiciones de diseño aseguran que el aire acondicionado de 36,000 BTU pueda mantener de manera eficiente un ambiente confortable en la residencia de 56 m².

2.2 Sistema Termodinámico de un Aire Acondicionado

Previamente se mencionó que los sistemas termodinámicos, se clasifican en abiertos y cerrados, para un sistema de aire acondicionado, el cual es cerrado, implica enfriar o calentar el aire del ambiente. Para el caso de enfriamiento se logra transfiriendo calor desde el aire en este caso de la residencia hacia un refrigerante que circula por las tuberías internas, hasta que se alcanza la temperatura deseada. Para el caso de calentamiento se logra transfiriendo el calor desde un fluido caliente que circula por tuberías internas, hasta que se alcanza la temperatura deseada. [15]

2.2.1 Modelo matemático para un sistema cerrado de aire acondicionado.

El enfriamiento del aire se considera un sistema termodinámico cerrado, lo que significa que no hay intercambio de masa como se observa en la ecuación (9).

Para calcular la temperatura dentro del aire acondicionado en cada instante de tiempo se hace uso de la ecuación 11. [4]

$$\frac{d(\Delta E)}{dt} = \dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale}$$

$$\dot{m} * C_p * \frac{d(\Delta T)}{dt} = Pot_Q - Perd_Q * (\Delta T) \quad (10)$$

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = \frac{1}{\dot{m} * C_p} * Pot_Q - \left[\frac{Perd_Q}{\dot{m} * C_p} \right] * (\Delta T) \quad (11)$$

2.2.2 Ecuaciones en espacio de estado para un sistema de aire acondicionado

Así para el caso de enfriamiento, donde el aire acondicionado elimina el calor del ambiente al hacer que el refrigerante absorba el calor en el evaporador, distribuyendo el aire frío en el espacio mediante un ventilador, tenemos:

$$[\dot{\Delta T}] = \left[\frac{Perd_Q}{\dot{m} * Cp} \right] * [\Delta T] + \left[\frac{1}{\dot{m} * Cp} \right] * [Pot_Q] \quad (12)$$

$$[y] = [1] * [\Delta T] + [0] * [Pot_Q] \quad (13)$$

Donde:

$$A = \left[\frac{Perd_Q}{\dot{m} * Cp} \right] \quad (14)$$

$$B = \left[\frac{1}{\dot{m} * Cp} \right] \quad (15)$$

$$C = [1] \quad (16)$$

$$D = [0] \quad (17)$$

Lo mismo para el caso de calentamiento, pero con el signo de A negativo,

2.2.3 Cálculo de cargas térmicas

Para ello se hace uso de un software online de acceso libre de cálculo de cargas térmicas en una residencia de 56 m², se hace un boceto aproximado con exposición al sol al Norte, obteniendo los siguientes datos:

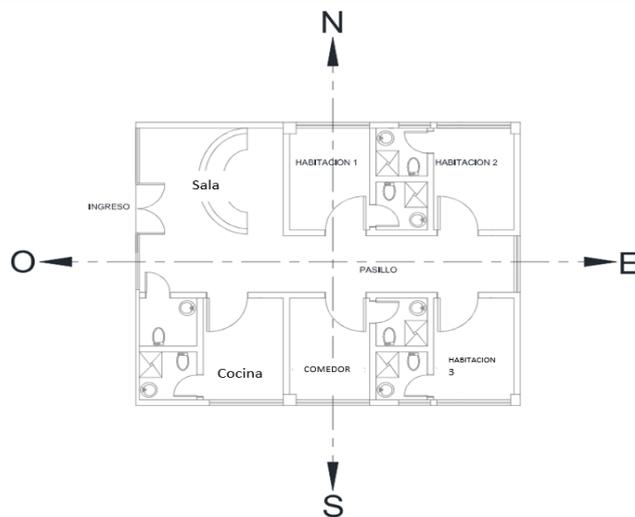


Figura. 19. Boceto residencia. Fuente propia.

Cargas internas:

Tabla 2. Cargas Internas.

Cargas Internas	Cantidad	
Iluminación	750 watts	
Equipos Eléctricos	4000 watts	
Misceláneos	Sensible: 820 BTU/hr/persona	Latente: 820 BTU/hr/persona
Ocupantes (6)	Sensible: 75 BTU/hr	Latente: 50 BTU/hr

Con los datos anteriores se obtuvo una carga térmica de 34000 BTU, menor a la capacidad térmica del equipo por lo que se espera funcione bien, los resultados se pueden visualizar en la Tabla 3 de los anexos. [5]

2.2.4 Selección del refrigerante y cálculo del COP del sistema de enfriamiento

Entre los refrigerantes utilizados en sistemas de aire acondicionado modernos están 'R22', 'R134a', 'IsoButane'. La elección uno de estos refrigerantes va a depender de varios factores, incluidas las regulaciones ambientales locales, la eficiencia energética deseada y las especificaciones del fabricante del equipo. Para ello se va hacer uso del software CoolProp, analizando datos de propiedades termodinámicas de fluidos de los refrigerantes seleccionados para comparación. Del script adjunto en anexos 3, se obtuvieron los resultados de la tabla 3.

Tabla 3. Datos obtenidos para la selección de refrigerante.

Tipo de Refrigerante	COP	GWP	ODP	Clasificación ASHRAE
R22	4.51	1810	0.055	A1 (no tóxico, no inflamable).
R134a	4.44	1430	0	A1 (no tóxico, no inflamable).
R600A (IsoButano)	4.58	3	0	A3 (no tóxico, altamente inflamable).

La tabla 3 muestra los datos de rendimiento y características ambientales de cuatro refrigerantes distintos, con una temperatura de 28 °C, en términos de eficiencia energética

y bajo impacto ambiental, el refrigerante R600a (Isobutano) se destaca como la mejor opción debido a su alto COP y extremadamente bajo GWP, pero debido a su alta inflamabilidad (A3) se lo descartaría ya que requiere un manejo cuidadoso y puede ser peligroso. Los refrigerantes R22 y R134a, aunque seguros y relativamente eficientes, presentan desventajas ambientales significativas debido a sus altos valores de GWP y, en el caso de R22, también su ODP. Por lo tanto, la selección del refrigerante debe equilibrar la eficiencia energética y el impacto ambiental con las consideraciones de seguridad, dependiendo del contexto y las aplicaciones específicas. Así, **R22** sería la recomendación principal basada en los datos proporcionados y consideraciones actuales de sostenibilidad y eficiencia. [9]

2.2.5 Proceso de enfriamiento de la residencia

A continuación, se elabora el código correspondiente para simular computacionalmente el control de este sistema de aire acondicionado, como se muestra en el ANEXO 2. La estructura de este sistema tiene como entrada la potencia del aire acondicionado ($Potq$) y la salida es el cambio de temperatura (ΔT), como se ilustra en la Figura 20. Este script simula el comportamiento del sistema de aire acondicionado en una residencia con las características mencionadas con anterioridad, utilizando modelos para calcular el tiempo de enfriamiento inicial, la eficiencia del enfriamiento, y el control en lazo abierto y cerrado. [1]



Figura. 20. Entradas y salidas. Fuente propia.

Se procede a analizar los coeficientes del modelo utilizando y posteriormente, se introduce el modelo matemático en forma de espacio de estados, que comprende las cuatro matrices del modelo ya mencionadas. Utilizando este modelo de espacio de estados para sistemas cerrados, se obtiene la representación en espacio de estados y la función de transferencia G_p que describe la relación existente entre la potencia y el cambio de temperatura. [6]

$$G_{P_1} = \frac{1.955e - 06}{s + 0.0001206}$$

2.2.6 Enfriamiento inicial del aire acondicionado

Para entender cómo el sistema de aire acondicionado enfría, se simula en modo de lazo abierto usando una entrada tipo step o una entrada tipo impulse. La señal step se utiliza para alcanzar y mantener el máximo rendimiento del compresor gradualmente, asegurando que no se dañen los equipos mientras se alcanza la temperatura de enfriamiento deseada. [4] Con una potencia de aire acondicionado de 36 000 BTU \approx 10550,56 W y un tiempo de funcionamiento de 286 segundos, se muestran los resultados en la Figura 31.

2.2.7 Control de temperatura en lazo abierto con uso de termostato

El método de control de temperatura en lazo abierto con termostato en un sistema de aire acondicionado involucra la utilización de un dispositivo termostático para fijar y mantener una temperatura específica en el entorno, sin la intervención automática para corregir las fluctuaciones reales de temperatura. [4] Para un aire acondicionado de 36 000 BTU, el régimen de funcionamiento del termostato se toma de alrededor de 10 minutos, esto depende del equipo y del fabricante. Así obtenemos la gráfica de la figura 32.

```
% CONTROL EN LAZO ABIERTO CON TERMOSTATO
regimen = 600; % Normalmente régimen en s (10 minutos)
%Termostato ajustado de 1 a 2 °C
step(potq * Gp1, regimen);
```

Figura. 21. Control temperatura del termostato. Fuente propia.

Para llevar a cabo esta implementación en un sistema real, se requiere integrar un termostato al PLC (Controlador Lógico Programable) y programarlo para gestionar la activación o desactivación de los componentes, como compresores o válvulas, en función al termostato y los parámetros predefinidos. [6]

2.2.8 Control de enfriamiento del aire acondicionado en lazo cerrado

El control de modulación del enfriamiento en el código (Figura 34) ajusta automáticamente la potencia de enfriamiento para mantener constante la temperatura deseada en la residencia. Un controlador PID, optimiza los parámetros P, I y D para adaptarse eficazmente a las variaciones de temperatura. [6]

El sistema de lazo cerrado garantiza que cualquier desviación respecto a la temperatura confort se corrija y se ajuste a la salida del controlador. La función step simula la respuesta

del sistema ante cambios repentinos, como la apertura de las puertas en la residencia, y luego se estabiliza nuevamente en el valor deseado.

Este código automatiza el proceso de enfriamiento de la residencia, manteniendo la temperatura de la constante y optimizando el consumo de energía.

```
% CONTROL EN LAZO CERRADO (MODULACIÓN DE ENFRIAMIENTO)
consigna = -0.1; % consigna de modulación
Gp1 = GP(1, 1);
[Gc, info] = pidtune(Gp1, 'PID');
H = feedback(Gp1 * Gc, 1);
step(consigna * H);
```

Figura. 22. Control PID. Fuente propia.

2.2.9 Potencia requerida para el compresor

Para el cálculo de la potencia y energía necesarias para el compresor se hace uso del COP y Potq requeridos para mantener una temperatura de confort en la residencia, los cuales fueron obtenidos previamente (tabla 1.3), para ello se hace uso de la siguiente ecuación:

$$P_{otq\ comp} = \frac{P_{otq}}{COP}$$

$$P_{otq\ comp} = \frac{10550.56 [W]}{4.5}$$

$$P_{otq\ comp} \approx 2344.568889 [W]$$

La potencia del compresor de aire acondicionado es una medida crucial para entender tanto su consumo energético como su capacidad de enfriamiento. Es parte integral del funcionamiento eficiente y efectivo de tu sistema de climatización, y puede influir en tus decisiones sobre el uso y mantenimiento del mismo.

2.3 Diseño Lógico y Simulación del Control del aire acondicionado.

Una vez identificados los requerimientos del sistema de control del aire acondicionado como la temperatura de confort, la temperatura a la que debe ajustarse el termostato y el tiempo de enfriamiento del aire acondicionado, se procede a desarrollar la lógica de control basada en los requerimientos ya definidos.

2.3.1 Asignación de variables.

A continuación, se puede visualizar en la Tabla 4 las entradas y salidas utilizadas para la programación y simulación del control del sistema.

Tabla 4. Asignación de variables para la simulación.

VARIABLE	TIPO	VALOR	Entrada/Salida	Comentario
AI_T	INT	3750	Entrada Analógica	Sensor de Temperatura
AUX	REAL			
KM	EBOOL		Salida Digital	Aire Acondicionado
LI	EBOOL			
LIT	REAL	20.4		Límite inferior Temperatura Termostato
LS	EBOOL			
LST	REAL	23.6		Límite superior Temperatura Termostato
Permisivo	EBOOL			
PM	EBOOL		Entrada Digital	Pulsante de Marcha
PP	EBOOL		Entrada Digital	Pulsante de Paro
SP	REAL	22.0		Set Point de Temperatura
TT	REAL			Temperatura del ambiente Actual

Como se observa en la Tabla 4 existen 3 tipos de variables que se van a usar en la programación la real, Ebool y la INT:

- La variable tipo real, se utiliza para guardar parámetros numéricos que tengan decimales. En este caso la temperatura.
- La variable tipo INT, por el contrario, es usada para guardar números enteros.
- Finalmente, la variable tipo Booleana o Ebool, se usa para indicar estados binarios como activar o desactivar funciones, o para definir el estado de dispositivos

(encendido/apagado, abierto/cerrado, etc.), como los pulsadores y el aire acondicionado.

2.3.2 Control del sistema de aire acondicionado

Para realizar la automatización del aire acondicionado se hace uso del software EcoStruxure Control Expert (Unity Pro XL), en el cual se va a realizar la programación del PLC mediante diagramas de escalera más conocido como lenguaje Ladder como se muestra en la Fig. 23.

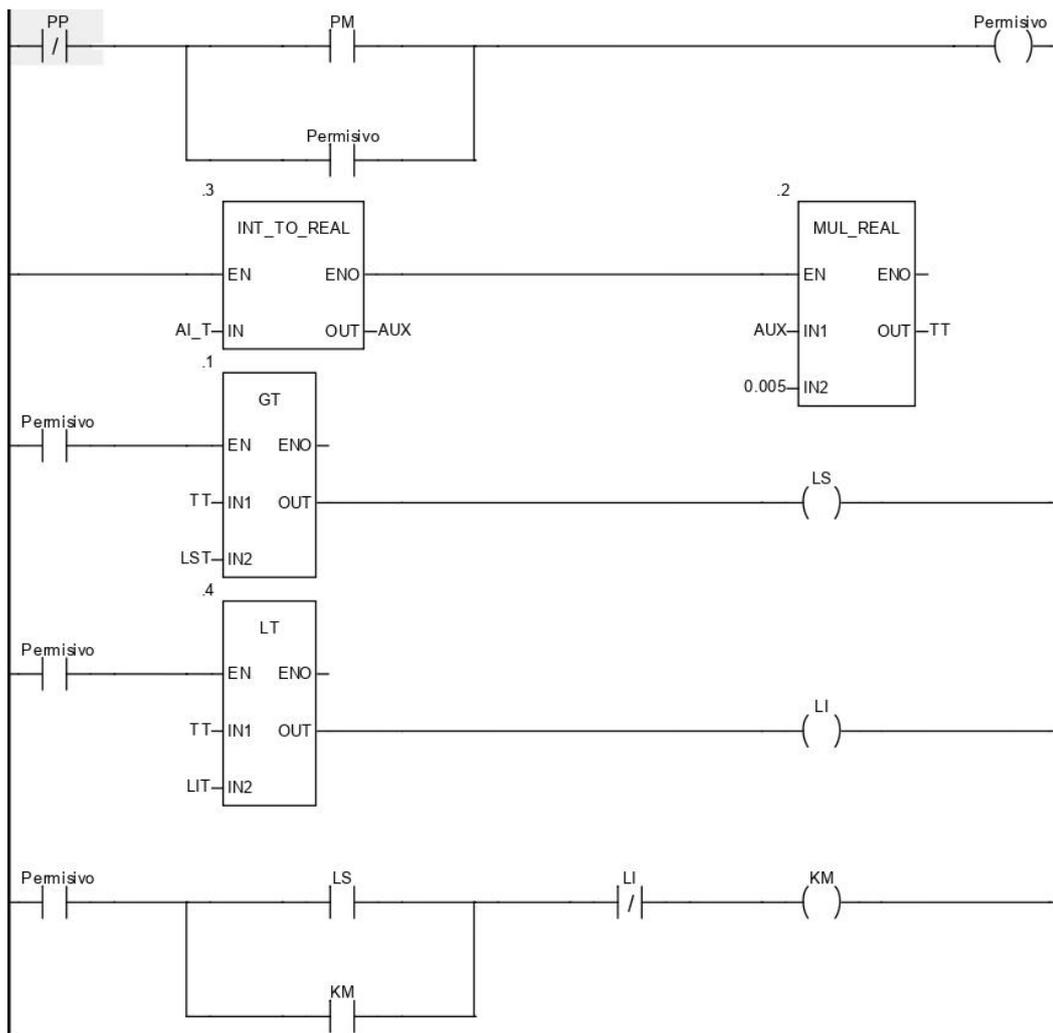


Figura. 23. Ladder del control del aire acondicionado. Fuente propia.

El funcionamiento de este programa comienza con un pulsador de marcha para empezar el control, el cual va a activar una bobina (permisivo), siempre y cuando esté activo y el pulsador de paro inactivo.

A continuación, se observa 4 bloques funcionales para realizar operaciones aritméticas y lógicas con las que se va a configurar al PLC, en este caso se van a utilizar 4 bloques ya que ayudan a simplificar la programación en Ladder.

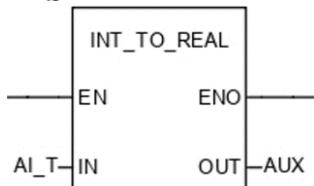


Figura. 24. Bloque int.

En primer lugar, tenemos al bloque “INT_TO_REAL”, que convierte un valor entero en un valor real para poder operar aritméticamente entre valores reales.

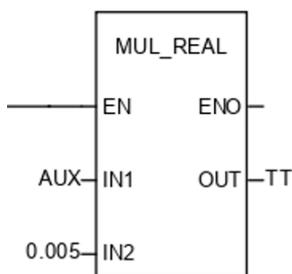


Figura. 25. Bloque Mul.

Luego tenemos al bloque “MUL_REAL”, que multiplica valores reales dándonos un resultado real como salida. En este caso se saca la ecuación de la recta para transformar lo que entra en el sensor a temperatura. Para ello se usa la siguiente expresión.

$$(TT - 0) = \frac{50 - 0}{10\ 000 - 0} \times (AI_T - 0)$$

$$TT = 0,005 AI_T$$

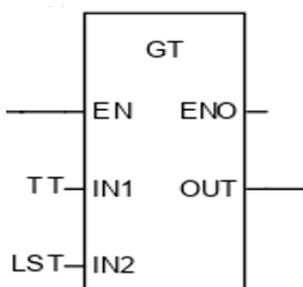


Figura. 26. Bloque Gt.

El bloque “GT” (mayor que), compara dos valores, la salida es verdadera si el primer valor es mayor que el segundo, caso contrario es falso, por lo tanto, cuando la temperatura de la residencia sea mayor que el límite superior de temperatura “LST”, entonces se activa la bobina y el aire acondicionado enfría el ambiente.

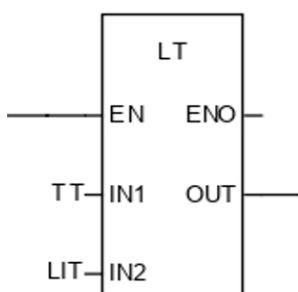


Figura. 27. Bloque Lt,

El bloque “LT” (menor que), compara dos valores, la salida es verdadera si el primer valor es menor que el segundo, caso contrario es falso, por lo tanto, cuando la temperatura de la residencia sea menor que el límite inferior de temperatura “LIT”, entonces se activa la bobina y el aire acondicionado calienta el ambiente.

En resumen, con la histéresis realizada al termostato (diferencia entre el punto de activación y el punto de desactivación), en este caso de 1.6 °C el aire acondicionado no está frecuentemente encendido, mejorando la eficiencia y prolongando la vida útil del aire acondicionado. Por lo tanto, el termostato que mide la temperatura ambiente de manera constante mediante un sensor, compara esa medida con el set-point y manda una señal para que el aire acondicionado, dependiendo de las salidas de los bloques verdadero o falso se va a activar el aire acondicionado ya sea para enfriar o calentar el ambiente.

2.3.3 Simulación del sistema de aire acondicionado

Para la simulación del aire acondicionado se dispusieron de los elementos de la figura 28, como pulsadores, un sensor de temperatura que en la práctica va interno en el termostato en la figura es el nivel, dos dispositivos que simulan el encendido o apagado del aire acondicionado y una pantalla digital donde se puede visualizar la temperatura del ambiente.

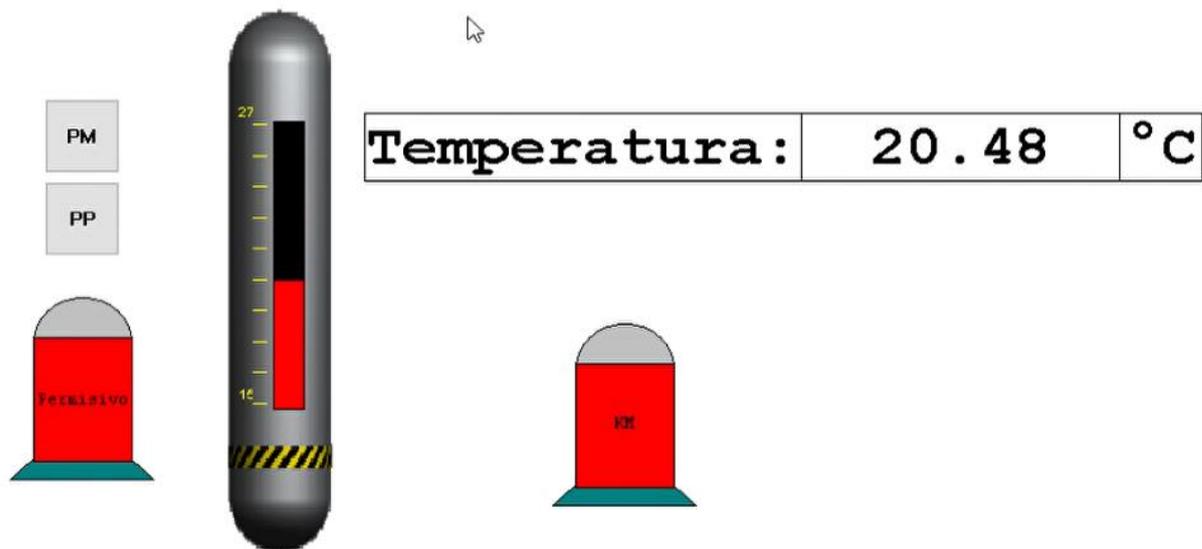


Fig. 28. Simulación del sistema de aire acondicionado. Fuente Propia.

3 RESULTADOS

De acuerdo a los parámetros obtenidos en la metodología se elaboraron gráficas en MATLAB como resultado del control del aire acondicionado y del control del sensor de temperatura en el termostato, datos que sirven de referencia para incluirlos en el software utilizado para programar el PLC.

3.1 Análisis de gráficas del Control del Sistema en Matlab

El proceso de enfriamiento en lazo abierto del aire acondicionado de 36 000 BTU expresado en la figura 29, con ayuda de la librería “XSteam” se visualiza el delta T correspondiente a la diferencia de la temperatura ambiente y la temperatura timbre.

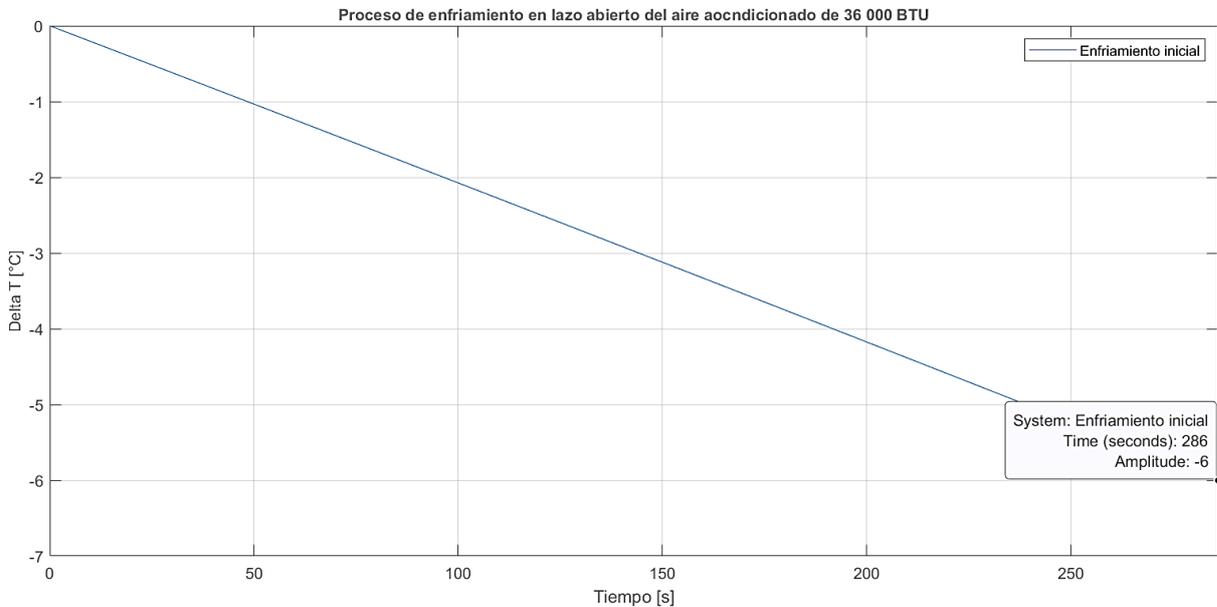


Figura. 29. Proceso enfriamiento aire acondicionado. Fuente propia

En la Figura 29, el proceso de enfriamiento muestra que se alcanza un ΔT de 6°C en un tiempo de 286 segundos, equivalente a aproximadamente a 4.8 minutos de funcionamiento, gracias al valor del coeficiente global de transferencia de calor (U), que se establece en 0.33 W/(m²·K), después de varias iteraciones se alcanza el valor óptimo que permite mantener una diferencia de temperatura de entrada de 28°C y alcanzar una temperatura de confort de 22°C.

Por otro lado, se presenta la función de transferencia a partir de la cual se obtiene la gráfica de la figura 29, dicha gráfica se genera utilizando la ecuación en espacio de estado para sistemas cerrados en MATLAB, a través de la siguiente función de transferencia.

$$GP_1 = \frac{1.955e - 06}{s + 0.0001206}$$

El correcto funcionamiento del aire acondicionado depende en gran manera de la eficiencia de enfriamiento, como se indicó anteriormente, con la ayuda de MATLAB se hace iteraciones hasta hallar un valor adecuado de U (coeficiente global de calor) para nuestro aire acondicionado de 36 000, así se definió un valor de $0,33 \pm 0,02$ [$W/K \cdot m^2$].

La respuesta para el control de temperatura en lazo abierto en el termostato se observa en la gráfica de la figura 30.

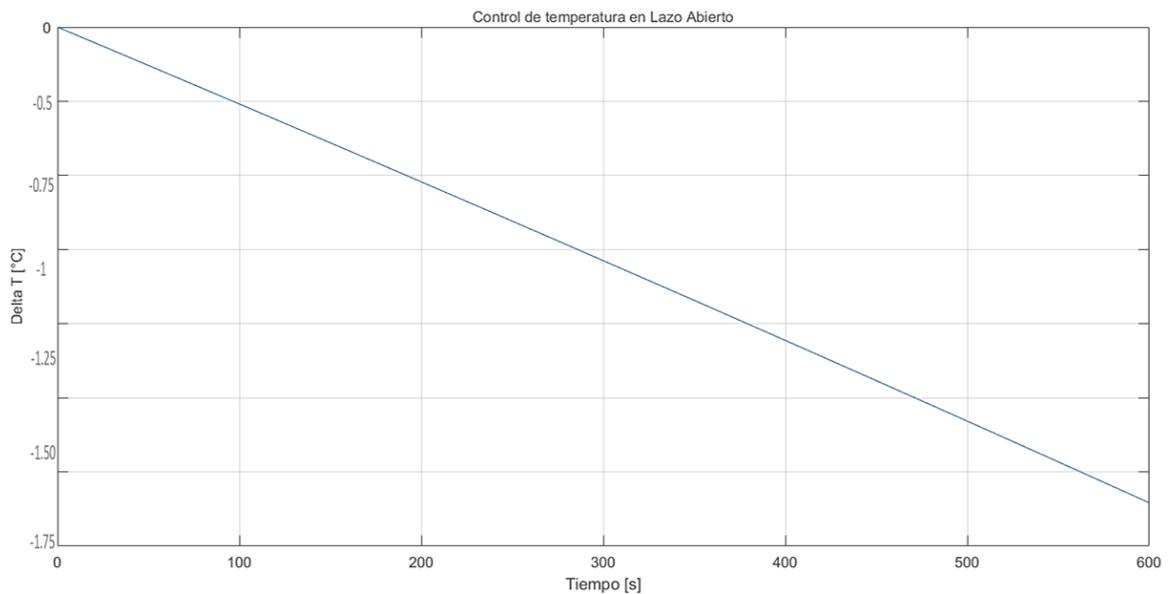


Figura. 30. Control temperatura del termostato. Fuente propia.

En la Figura 30, se aprecia que el termostato se debe ajustar con un delta T de -1.60°C . Esto significa que cuando el termostato alcanza la temperatura de disparo, que en este caso es 23.6°C , el termostato reduce la temperatura en -1.6°C hasta alcanzar la temperatura de confort de 22°C . Este ajuste se realiza durante el tiempo de régimen, que para esta configuración es de 10 minutos, equivalente a 600 segundos. [9]

Es decir, el tiempo en el cual el termostato mantiene a la temperatura deseada. La función step (potq*Gp, régimen) simula la respuesta del sistema al aplicar una potencia calórica constante (definida por potq) durante los 600 segundos.

En la tabla 5 se muestra el límite superior e inferior de temperaturas de ajuste del sensor del termostato, si se sobrepasan estas temperaturas se manda una señal y se enciende el aire acondicionado ya sea para enfriar el ambiente o calentarlo.

Tabla 5. Temperaturas de ajuste del termostato.

Temperaturas de ajuste	° C
Temperatura límite superior	23.6
Temperatura límite inferior	20.4

La respuesta del control en lazo cerrado para modular el enfriamiento del ambiente, viene dado por la gráfica de la figura 31.

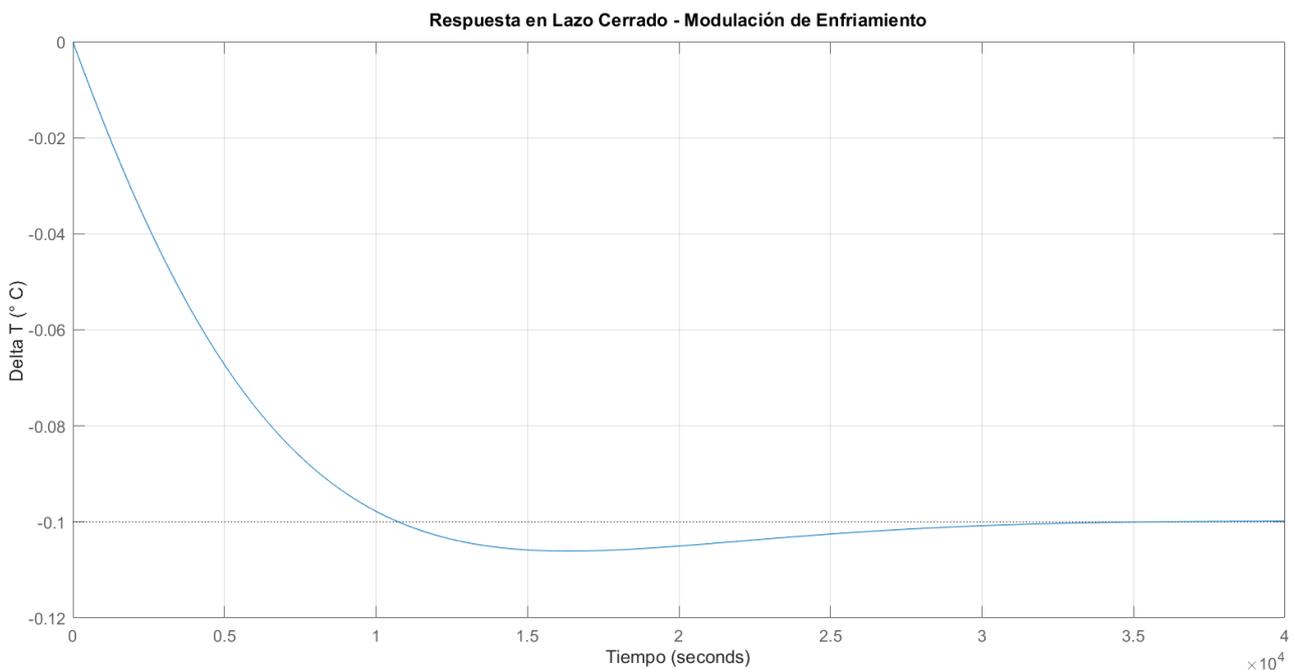


Fig. 31. Control Enfriamiento del aire acondicionado. Fuente propia.

En la gráfica 31, se observa que el ΔT se estabiliza en 0,1 °C en un tiempo de 4 segundos, la estabilidad de la curva sugiere que la temperatura para enfriar el ambiente permanece constante y no experimenta fluctuaciones que puedan comprometer la eficiencia del proceso.

3.2 Resultados de Simulación en EcoStruxure Control Expert.

Una vez terminado el Ladder y la distribución de elementos para la simulación, se realiza la simulación en el software EcoStruxure Control Expert, para ello se debe activar 5 opciones en la barra opciones del programa, la opción 1 transfiere el proyecto desde el ordenador al PLC, para ello debe estar activa la opción 2 que conectada el PCL, la opción 3 es para animar la pantalla, la opción 4 nos permite activar o desactivar los elementos de

la simulación y finalmente la opción 5 run para correr. La figura 32 contiene el menú de opciones del software.

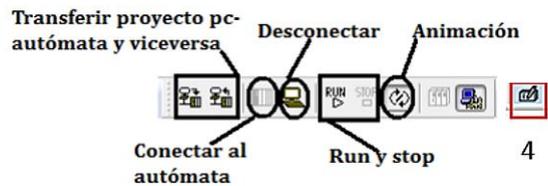


Figura. 32. Barra de herramientas Api de EcoStruxure Control Expert. [10]

Después de ejecutar el programa se da clic en el pulsador de marcha PM para empezar la simulación, para estar seguro de que no hay errores en la simulación se puede observar el cuadro inferior el cual nos indica si el proceso es satisfactorio y si posee errores o advertencias como se visualiza en la figura 33, con los elementos descritos previamente en la metodología.

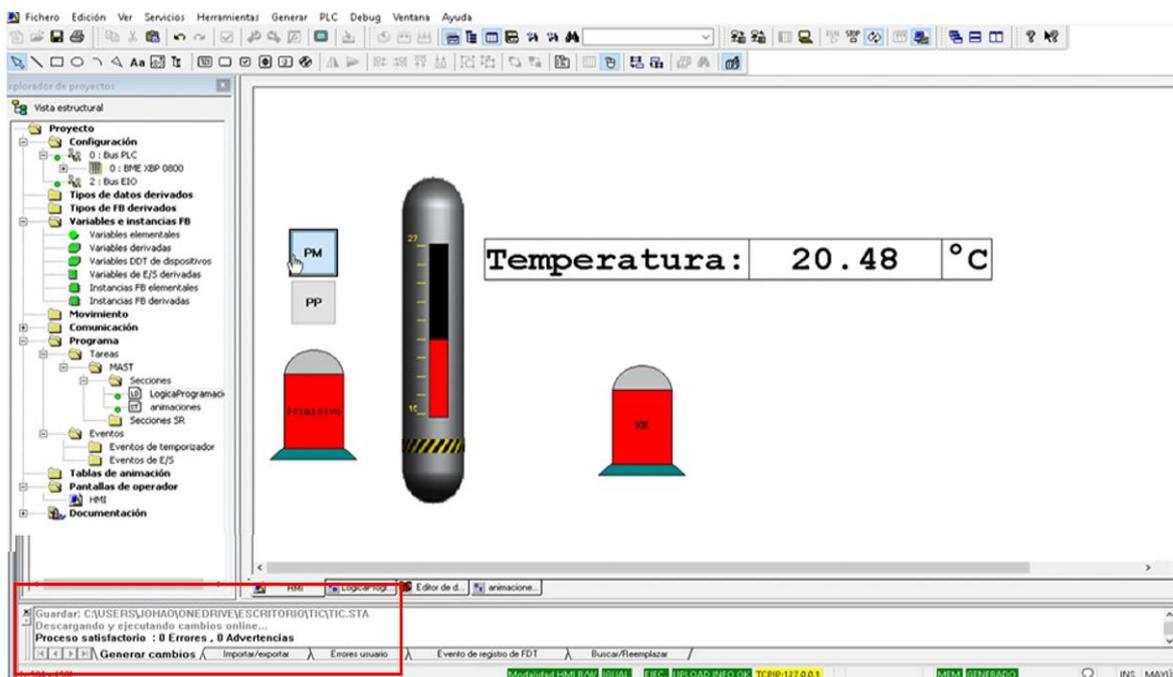


Figura. 33. Simulación del aire acondicionado. Fuente propia.

Una vez que se pulsa el botón de marcha se activa el termostato y su sensor representados por el indicador “Permisivo” y por el nivel que constantemente está registrando la temperatura del ambiente de la residencia, si los valores de temperatura que registra el termostato están dentro del rango de ajuste de este, es decir $22\text{ °C} \pm 1.6\text{ °C}$, el aire acondicionado representado por el indicador “KM” esta inactivo. Los indicadores se

pintarán de verde o rojo dependiendo su actividad activa o inactiva. Como se puede observar en las figuras 34 y 35.

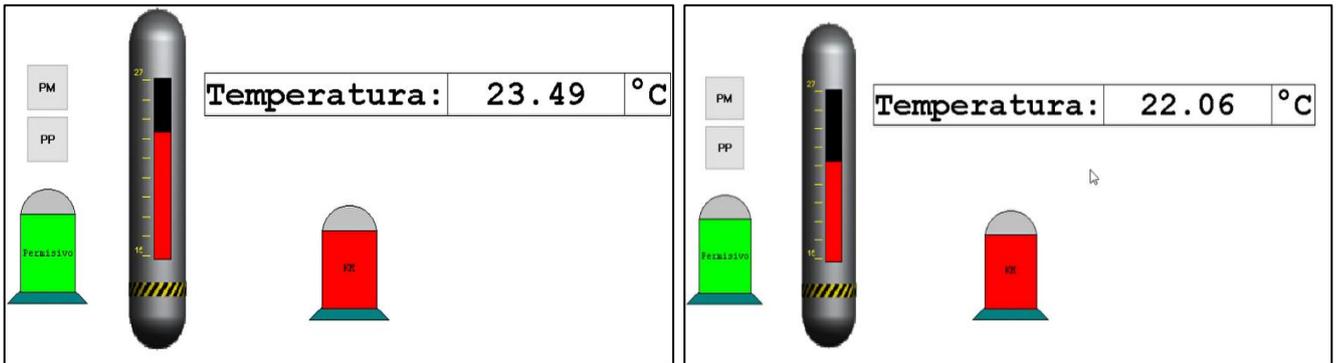


Figura. 34. Simulación del aire acondicionado – Activación Termostato. Fuente propia.

Se puede observar en la figura 35, que la temperatura está en los límites permitidos del termostato por lo que el aire acondicionado sigue inactivo.

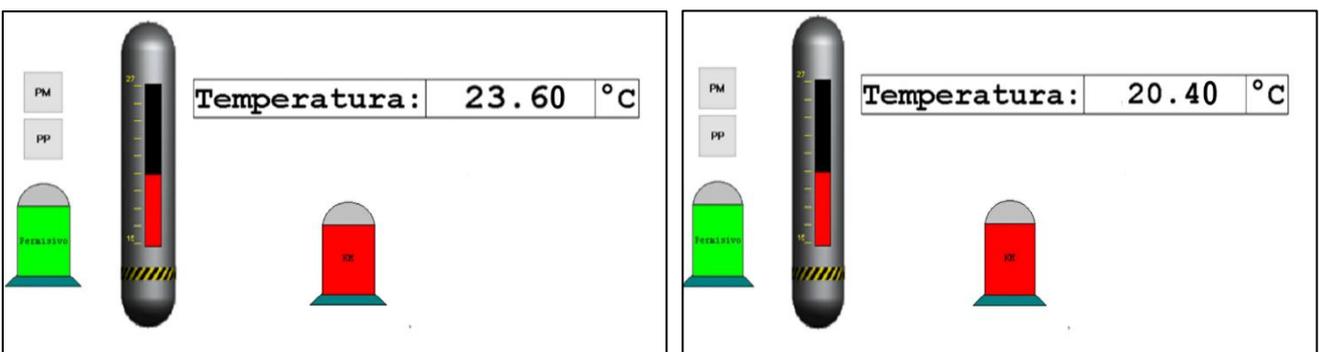


Figura. 35. Simulación del aire acondicionado – Activación Termostato. Fuente propia.

Por otro lado, si el termostato registra valores que exceden los límites inferiores y superiores de ajuste del termostato, se va a dar una señal para que se active el aire acondicionado “KM” y enfrie o caliente el ambiente. Como se puede observar en las figuras 36 y 37. Para la figura 36 el aire acondicionado se activa y calienta el ambiente hasta llegar a la temperatura de confort de 22 ° C.

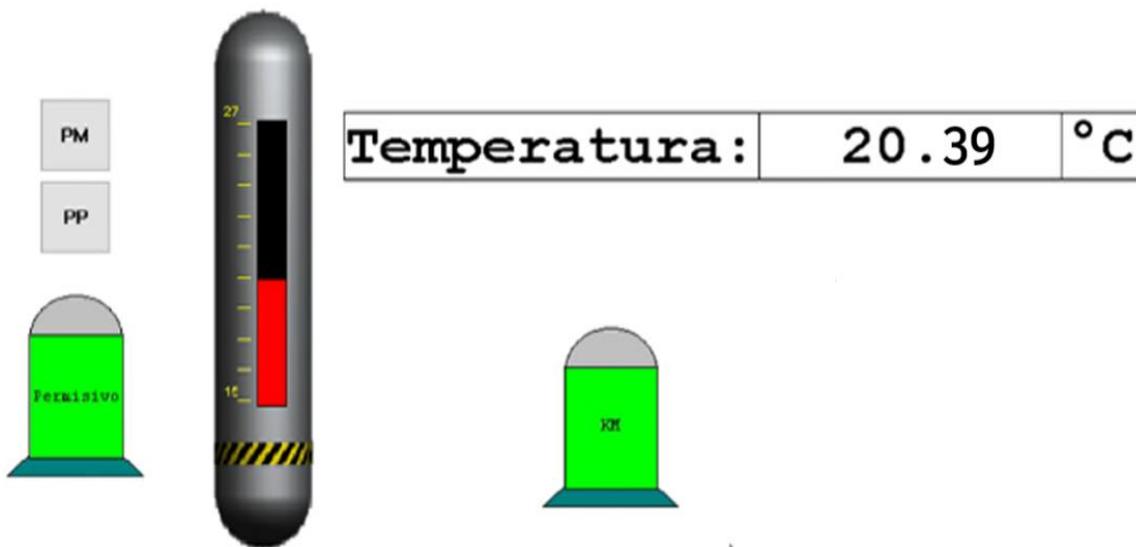


Figura. 36. Encendido de aire acondicionado en valores menores a los mínimos de temperatura.
Fuente propia.

Para la figura 37 el aire acondicionado se activa y enfría el ambiente hasta llegar a la temperatura de confort de 22 ° C.

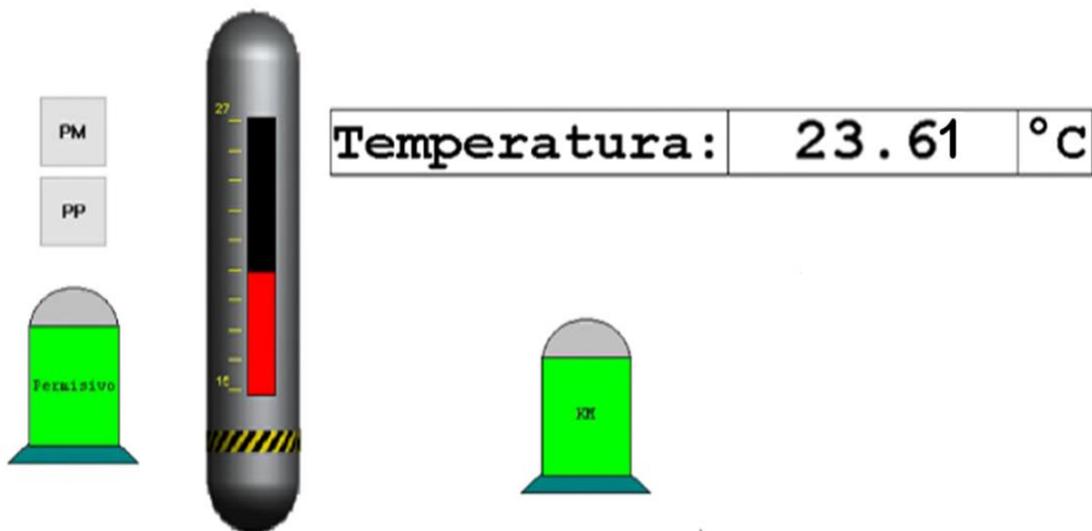


Figura. 37. Encendido de aire acondicionado en valores mayores a los máximos de temperatura.
Fuente propia.

4 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1 Conclusiones

- La automatización y simulación de un sistema de aire acondicionado de 36,000 BTU con ayuda de herramientas como MATLAB, EcoStruxure Control Expert, entre otros, aportan una significativa mejora en la eficiencia y precisión operativa del sistema. La aplicación del control automático asegura que el sistema de aire acondicionado mantenga una temperatura constante y adecuada de confort en la residencia, optimizando el rendimiento y reduciendo el consumo energético.
- La integración de las herramientas MATLAB para simulación y análisis, EcoStruxure Control Expert para el control lógico programable del PLC y CoolProp para las propiedades termodinámicas garantiza un monitoreo y control más preciso de los parámetros operativos del aire acondicionado de 36 000 BTU, asegurando su funcionamiento óptimo.
- La automatización y control del sistema de aire acondicionado de conlleva una disminución significativa de los costos operativos. Para ello se debe tener en cuenta la importancia de la eficiencia energética y el mantenimiento preventivo para reducir los gastos asociados al consumo de energía y a las reparaciones.
- La mejora en la eficiencia energética del sistema de aire acondicionado también tiene un impacto positivo en el medio ambiente. Al reducir el consumo de energía, se disminuye la huella de carbono asociada al funcionamiento del aire acondicionado, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental, además, la elección del refrigerante contribuye en gran manera al impacto ambiental, como se ve en la tabla 3 el R600a (Isobutano) se destaca como la mejor opción debido a su alto COP y extremadamente bajo GWP, pero su uso es peligroso, por lo que el refrigerante R22 sería la recomendación principal.
- Las representaciones gráficas obtenidas a través del uso de MATLAB, desempeñan un papel fundamental al establecer los valores máximos y mínimos de los parámetros controlados por el sensor de temperatura del termostato, incluyendo la consideración de la histéresis realizada para evitar daños en el equipo. Estas curvas proporcionan una visualización clara y precisa que facilita la configuración óptima del sistema, asegurando un funcionamiento eficiente y estable del dispositivo.

4.2 Recomendaciones

- Es fundamental recibir capacitación continua en el uso de las herramientas utilizadas en el trabajo. Esto asegura el uso correcto de estas tecnologías y así optimizar el rendimiento del sistema y solucionar problemas de manera mucho más eficiente.
- Emplear las capacidades de simulación y control de estas herramientas para crear un sistema de mantenimiento que sea predictivo. Para identificar problemas potenciales y solucionarlos antes de que se conviertan en fallas irreparables, mejorando la fiabilidad y la vida útil del aire acondicionado.
- Instaurar un régimen de monitoreo que sea continuo con los datos generados por las herramientas utilizadas, así se harán ajustes basados en datos confiables para mantener la eficiencia operativa del sistema de aire acondicionado y adaptarlo a las variaciones tanto ambientales como de uso.
- Mantener el software que se va a utilizar actualizado, para aprovechar las mejoras y funciones de los mismos manteniendo el sistema operativo y en óptimas condiciones de funcionamiento.

4.3 Trabajos Futuros

- Implementar algoritmos predictivos uso y condiciones ambientales con inteligencia artificial y aprendizaje automático para mejorar el control y la eficiencia del sistema de aire acondicionado.
- Explorar cómo integrar el sistema de aire acondicionado automatizado en sistemas más amplios de gestión energética. Esto nos permitirá optimizar completamente el consumo de energía, asegurándonos de coordinar el aire acondicionado con otros sistemas como iluminación, calefacción y ventilación para mejorar el confort y la eficiencia energética.
- Investigar la implementación de sensores mucho más avanzados para facilitar y optimizar el proceso, como sensores de calidad del aire y humedad, con el propósito de proporcionar datos más precisos y en tiempo real al sistema de control. Mejorando el confort y la calidad del aire interior.

- Explorar y evaluar nuevas tecnologías en el campo de la refrigeración, como sistemas de refrigeración por absorción. Estas tecnologías pueden ofrecer alternativas para reducir costos, el consumo energético y su impacto.
- Realizar la instalación física del PLC en el sistema de aire acondicionado de 36 000 BTU, adecuado los sensores y actuadores al PLC, para verificar que el control realizado sea aplicable en la práctica.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. & C. D. Aguinaga, Control Automático, Quito: EPN, 2008.
- [2] C. F. D. & N. J. Close, Modeling and analysis of dynamic systems, 3a ed ed., John Wiley & Sons., 2002.
- [3] K. Ogata, System dynamics, 4a ed ed., Pearson Education S.A, 2004.
- [4] W. Bolton, Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario (5a ed.), Alfaomega Grupo Editor., 2013.
- [5] A. I. University, Automatización y control, [En línea]. Available: <https://cursos.aiu.edu/Automatizacion%20y%20Control/PDF/Tema%203.pdf>.
- [6] M. A. B. Yunus A. Çengel, Termodinámica (7a ed.), México D.F.: McGraw-Hill, 2011.
- [7] B. Velázquez Martí, Cargas térmicas en refrigeración, Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- [8] Clark, "Manual del Usuario: Sistema de Aire Acondicionado Modelo CCF-36HRE,", 2017.
- [9] I. Bell et al., "CoolProp: Open-Source Thermophysical Property Library,", [En línea]. Available: <http://www.coolprop.org..> [Último acceso: 20 5 2024].
- [10] INHAMI, "Anuario Meteorológico 2017,", Quito: INHAMI, 2017.
- [11] Control systems simulation using MATLAB and Simulin, 2002.
- [12] E. & M. F. Pinto, Fundamentos de control con MATLAB, Pearson Education S.A., 2010.
- [13] D. E. Tomorrow, Danfoss Engineering Tomorrow, [En línea]. Available: <https://www.danfoss.com/es-mx/products/dcs/electronic-controls/electronic-temperature-control/optyma-control-ak-rc-101103/#tab-overview>.
- [14] L. Carvajal, Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.
- [15] Á. P. M. I. Aguinaga, Aprovechamiento holístico de la mecatrónica en los procesos de manufactura industriales, Quito: EPN, 2009.
- [16] R. Especificar. Soluciones para agua, energía y sustentabilidad, 2024. [En línea]. Available: <https://especificarmag.com.mx/todo-sobre-los-actuadores-html/>.

- [17] D. P. Solutions, Danfoss Power Solutions, [En línea]. Available: <https://frigoristas.wordpress.com/camaras-frigorificas-1/>.
- [18] IMEPI, Automatización Industrial, [En línea]. Available: <https://imepi.com.mx/que-es-un-plc-una-introduccion-a-los-controladores-logicos-programables-y-su-papel-en-la-automatizacion-industrial/>.

6 ANEXOS

ANEXO I

Aspectos técnicos CCF-36HRE [8]

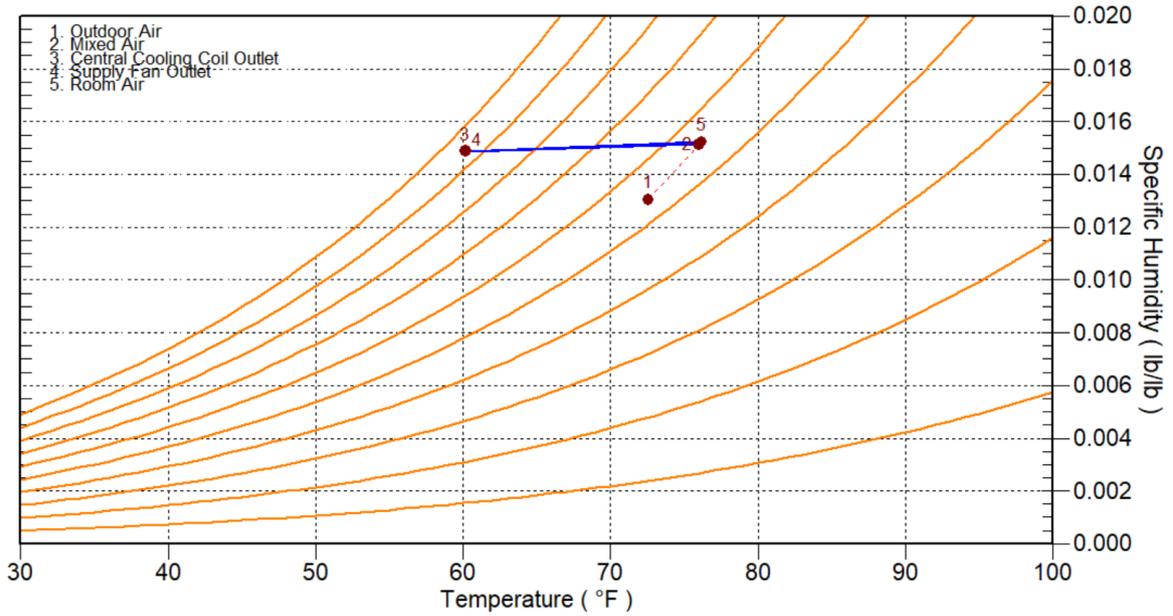
MODELO		CCF-24HRE	CCF-36HRE	CCF-48HRE	CCF-60HRE
Voltaje, Fase y Frecuencia		V / Ph / Hz	220 / 1 / 50	380 / 3 / 50	380 / 3 / 50
FRIO	Capacidad Total	W	7.200	10.600	14.000
		BTU/HR	24.000	36.000	48.000
	Potencia Absorbida	W	2.180	3.770	4.870
	Corriente Absorbida	A	10,09	6,76	8,88
CALOR	Capacidad Total	W	8.100	11.700	15.500
		BTU/HR	27.500	40.000	53.000
	Potencia Absorbida	W	2.500	3.500	5.130
	Corriente Absorbida	A	11,59	6,28	9,33
Potencia Máxima Absorbida	W	3.250	4.810	7.000	
Corriente Máxima Absorbida	A	15,4	7,3	10,6	
Tipo Compresor		Rotativo	Scroll	Scroll	Scroll
Caudal de Aire	m ³ /h	1.200	1.500	1.800	
Nivel de Ruido (Alta-Media-Baja)	dB(A)	46 / 43 / 38	50 / 47 / 41	51 / 48 / 42	
Carga Refrigerante	gr	2.360	2.830	2.890	
Tipo Termostato		Control Remoto	Control Remoto	Control Remoto	Control Remoto
Tuberías	Gas	pulgadas	5/8	5/8	3/4
	Líquido	pulgadas	3/8	3/8	3/8
Longitud Máxima de Tuberías	mm	30	50	50	
Máxima Diferencia entre U/I y U/E	mm	15	30	30	
Dimensiones (W x D x H)	Unidad Interior	mm	1.280 x 660 x 205	1.280 x 660 x 205	1.631 x 660 x 205
	Unidad Exterior	mm	800 x 300 x 690	903 x 354 x 857	945 x 340 x 1.255
Peso Neto	Unidad Interior	kg	32	33	44
	Unidad Exterior	kg	49	90	100

Temperatura en Quito. [10]

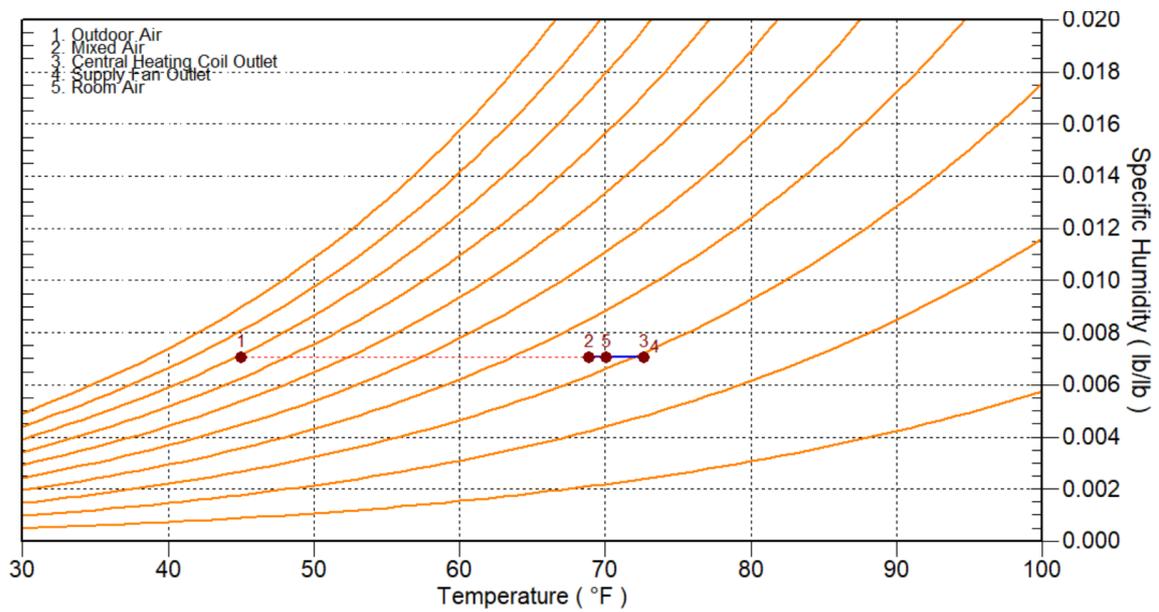
M0024		QUITO INAMHI-INAQUITO										INAMHI							
MES	HELIOFANIA (Horas)	TEMPERATURA DEL AIRE A LA SOMBRA (°C)						HUMEDAD RELATIVA (%)			PUNTO DE ROCIO (°C)	TENSION DE VAPOR (hPa)	PRECIPITACION(mm)		Número de días con precipitación				
		ABSOLUTAS		M E D I A S		Mensual	Máxima día	Mínima día	Máxima	Mínima			Media	Suma		Máxima en 24hrs			
ENERO	191.1		7.4	19	22.9						10.9	16.4				73	11.0	13.2	43.0
FEBRERO	91.6	23.7	1	9.2	16	20.1	10.8	14.8	97	4	45	21	78	10.7	12.9	196.4	49.6	10	16
MARZO	144.9	25.5	10	9.2	30	21.7	11.3	15.8	96	20	43	31	74	10.8	13.0	83.1	26.2	19	16
ABRIL	130.2	25.5	16	7.4	25	22.0	10.9	15.7	98	3	27	24	72	10.3	12.6	111.0	25.7	21	14
MAYO	120.1	23.5	2	9.9	31	20.8	11.1	14.9	98	16	46	19	78	10.9	13.0	115.4	25.1	30	21
JUNIO	194.8	25.0	22	9.0	6	22.8	10.5	16.1	94	12	43	16	65	9.0	11.6	0.3	0.2	30	2
JULIO	202.9	24.8	20	7.9	3	22.4	10.6	15.8	100	30	33	28	62	8.2	11.0	0.1	0.1	1	1
AGOSTO	196.6		8.9	25	22.7	10.7	15.8				9.0	11.6	18.2	9.7	8	11			
SEPTIEMBRE	185.1	27.2	21	7.8	21	23.5	10.5	16.3	97	18	36	21	65	9.3	11.8	31.8	13.1	30	7
OCTUBRE	140.3	24.8	1	6.8	19	22.0	10.4	15.2	94	14	43	26	75	10.4	12.6	141.7	27.4	29	19
NOVIEMBRE	139.1	24.2	10	7.4	3	21.6	9.9	14.8	98	24	44	10	77	10.4	12.7	48.0	13.2	18	11
DICIEMBRE	175.9	23.6	30		21.6	10.5	15.3		96	6	48	31	76	10.7	12.9	46.6	14.8	7	9
VALOR ANUAL	1912.6				22.0	10.7	15.6			71	10.1	12.4	835.6	49.6					

MES	EVAPORACION (mm)		NUBOSIDAD MEDIA (Octas)	VELOCIDAD MEDIA Y FRECUENCIAS DE VIENTO												Vel Mayor Observada (m/s)	VELOCIDAD MEDIA (Km/h)								
	Suma Mensual	Máxima en 24hrs		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALMA	Nro OBS												
ENERO	120.0		5	1.0	1	2.3	41	2.4	13	2.3	3	1.7	3	2.7	3	0.0	0	1.9	8	28	93	7.0	E	2.3	
FEBRERO	66.6		7	1.0	2	2.3	35	1.6	6	0.0	0	1.7	4	1.3	5	3.0	2	1.0	1	45	84	6.0	NE	1.7	
MARZO	93.2	7.6	9	0.0	0	2.4	37	1.9	10	2.0	4	2.0	1	1.7	3	1.8	7	1.0	2	37	93	7.0	NE	1.9	
ABRIL	84.9	5.0	24	6	3.5	2	2.4	32	1.8	6	1.8	6	2.5	9	1.9	8	2.0	1	0.0	0	37	90	5.0	S	2.0
MAYO	82.4	5.2	5	6	2.0	1	2.9	32	2.4	10	1.7	3	2.3	7	2.5	4	0.0	0	1.0	1	42	93	6.0	NE	1.8
JUNIO	140.4	9.3	25	5																					2.5
JULIO	141.1	6.2	27	5	3.0	2	4.0	22	4.2	19	5.2	7	3.5	9	3.5	14	0.0	0	3.0	2	26	93	8.0	S	3.0
AGOSTO	132.9		5	3.0	2	4.1	30	4.0	14	4.1	10	3.3	4	4.6	9	0.0	0	4.0	1	30	93	8.0	NE	2.8	
SEPTIEMBRE	118.9	8.4	22	5	0.0	0	2.6	23	3.0	19	2.2	10	3.0	13	4.1	20	0.0	0	2.0	2	12	90	8.0	S	2.9
OCTUBRE	103.4	6.1	8	6	3.0	3	3.6	31	3.0	8	2.1	8	2.6	5	4.3	4	0.0	0	5.0	1	40	93	8.0	E	2.1
NOVIEMBRE	92.6	5.9	13	6	1.3	3	3.7	27	3.4	11	3.4	6	1.8	6	1.7	7	2.0	1	2.0	1	39	90	8.0	NE	1.9
DICIEMBRE	103.5	6.5	28	6	1.0	1	3.1	34	3.3	16	1.0	1	2.2	7	2.0	9	0.0	0	2.0	2	30	93	8.0	E	2.5
VALOR ANUAL	1279.9		6																						2.0

System Psychrometrics. Design cooling. [10]



System Psychrometrics. Design heating.[12]



ANEXO II

Código en Matlab del control del aire acondicionado

```
% CONTROL DE AIRE ACONDICIONADO
clear all;

% COEFICIENTES
ancho = 7; % ancho de la habitación en m
largo = 8; % largo de la habitación en m
alto = 2.5; % alto de la habitación en m
Ac = 2 * (ancho * largo + ancho * alto + largo * alto); % área de las paredes, techo y piso en m²
m = 509; % masa total de toda la carga viva dentro de la residencia kg
Cp = 1005; % calor específico del aire J/(kg*K)
TM = 28; % temperatura ambiente en °C
Tset = 22; % temperatura de confort deseada en °C
deltaT = (Tset - TM); % delta temperatura de enfriamiento en °C
tiempoenfriamiento = 286; % tiempo de enfriamiento (s) referencial
U = 0.33; % coeficiente global de transferencia de calor W/(°C*m²)
perd = U * Ac; % pérdidas por deltaT unitario
perdidas = U * Ac * deltaT; % cálculo de las pérdidas totales W
potq = -10550.56; % potencia calórica en W (36 000 BTU convertido a W)
eficienciaenfriamiento = (potq - perdidas) * 100 / potq; % eficiencia de enfriamiento

% MODELO EN ESPACIO DE ESTADOS
A = [perd / (m * Cp)];
B = [1 / (m * Cp)];
C = [1];
D = [0];
SS = ss(A, B, C, D);
GP = tf(SS);
Gp1 = GP(1, 1);

% ENFRIAMIENTO INICIAL
step(potq * Gp1, tiempoenfriamiento);
pause;

% CONTROL EN LAZO ABIERTO CON TERMOSTATO
regimen = 1200; % Normalmente régimen en s (20 minutos)
step(potq * Gp1, regimen);
pause;

% CONTROL EN LAZO CERRADO (MODULACIÓN DE ENFRIAMIENTO)
consigna = -0.1; % consigna de modulación
Gp1 = GP(1, 1);
[Gc, info] = pidtune(Gp1, 'PID');
H = feedback(Gp1 * Gc, 1);
step(consigna * H);

% POTENCIA Y ENERGÍA DEL COMPRESOR
COP = 4.5; % coeficiente de rendimiento del aire acondicionado
potqkw = -potq / 1000 / COP; % potencia del compresor en kW
MJ = potqkw * tiempoenfriamiento / 1000; % energía en MJ
kwh = MJ / 3.6; % energía en kWh
```

ANEXO III

Código para la selección del Refrigerante en Jupyter y CoolProp

```
import numpy as np
import CoolProp.CoolProp as CP

# Definir condiciones y capacidades del aire acondicionado
refrigerants = ['R22', 'R134a', 'IsoButane']
T_ambiente = 28 # Temperatura ambiente [°C]
T_evaporator = 5 + 273.15 # Temperatura del evaporador en Kelvin
DT = 24 # Diferencia de temperatura del condensador [°C]
T_condensador = T_ambiente + DT + 273.15 # Temperatura del condensador en Kelvin (40)
capacidad_btus = 36000 # Capacidad del aire acondicionado en BTU/h

def analyze_air_conditioner(refrigerant):
    # Convertir capacidad a Watts para cálculos
    capacidad_watts = capacidad_btus / 3.412141633

    # Obtener presiones de evaporación y condensación
    P_evap = CP.PropsSI('P', 'T', T_evaporator, 'Q', 1, refrigerant)
    P_cond = CP.PropsSI('P', 'T', T_condensador, 'Q', 0, refrigerant)

    # Obtener entalpías en puntos clave del ciclo
    h1 = CP.PropsSI('H', 'T', T_evaporator, 'Q', 1, refrigerant) # Vapor saturado
    h2 = CP.PropsSI('H', 'P', P_cond, 'S', CP.PropsSI('S', 'T', T_evaporator, 'Q',
    h3 = CP.PropsSI('H', 'T', T_condensador, 'Q', 0, refrigerant) # Líquido saturado
    h4 = h3 # Después de la válvula de expansión (entalpía constante)

    # Calcular COP
    COP = (h1 - h4) / (h2 - h1)

    # Mostrar resultados
    print(f"Refrigerante: {refrigerant}")
    print(f"Presión de evaporación: {P_evap / 1e5:.2f} bar")
    print(f"Presión de condensación: {P_cond / 1e5:.2f} bar")
    print(f"Entalpía en puntos clave: h1={h1:.2f} J/kg, h2={h2:.2f} J/kg, h3={h3:.2f} J/kg, h4={h4:.2f} J/kg")
    print(f"COP: {COP:.2f}")
    print("-" * 40)

    return {
        'refrigerant': refrigerant,
        'P_evap': P_evap,
        'P_cond': P_cond,
        'h1': h1,
        'h2': h2,
        'h3': h3,
        'h4': h4,
        'COP': COP
    }

# Analizar cada refrigerante y almacenar resultados
results = [analyze_air_conditioner(ref) for ref in refrigerants]

# Comparar resultados de COP
print("Comparación de refrigerantes:")
for res in results:
    print(f"{res['refrigerant']}: COP={res['COP']:.2f}")
```

ANEXO IV

Tabla de variables y programación lógica del PLC en EcoStruxure Control Expert

Nombre	Tipo	Dirección	Valor	Comentario
AI_T	INT		3750	Entrada Analógica del sensor
AUX	REAL			
KM	EBOOL			Aire Acondicionado
LI	EBOOL			
LIT	REAL		20.4	Limite inferior Temperatura
LS	EBOOL			
LST	REAL		23.6	Limite superior Temperatura
Permisivo	EBOOL			
PM	EBOOL			Pulsante de Marcha
PP	EBOOL			Pulsante de Paro
SP	REAL		22.0	Set Point de temperatura
TT	REAL			Temperatura Actual

Logica Programacion

