

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 UNA CÁMARA FRIGORÍFICA**

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

DAVID ISRAEL YANDÚN URCUANGO

david.yandun@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. OSCAR IVÁN ZAMBRANO OREJUELA MSc.

ivan.zambrano@epn.edu.ec

DMQ, julio 2024

CERTIFICACIONES

Yo, DAVID ISRAEL YANDÚN URCUANGO 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.

DAVID ISRAEL YANDÚN URCUANGO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por DAVID ISRAEL YANDÚN URCUANGO, 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.

DAVID ISRAEL YANDÚN URCUANGO

OSCAR IVÁN ZAMBRANO OREJUELA

DEDICATORIA

A mi familia, por su amor incondicional y apoyo constante a lo largo de este viaje académico. Sin su paciencia y comprensión, este logro no habría sido posible.

A mis amigos del colegio, de la universidad, y de la vida, quienes siempre estuvieron ahí para ofrecerme su aliento y compañía en los momentos más difíciles.

A mis roomies, por su constante apoyo, paciencia, cariño y compañía en momentos de mi vida complicados.

A mis profesores y mentores, por su guía y sabiduría, que han sido fundamentales en mi formación y desarrollo profesional.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco profundamente a mi asesor, el Ing. Iván Zambrano, por su invaluable guía y apoyo constante. Su experiencia y paciencia fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A mis profesores y mentores, quienes me brindaron su conocimiento y sabiduría a lo largo de mi formación académica. Sus enseñanzas han sido una fuente de inspiración y motivación.

A mis compañeros de estudio, por su colaboración y amistad. Compartir este camino con ustedes ha sido una experiencia enriquecedora y memorable.

A mi familia, por su amor incondicional y su apoyo inquebrantable. Gracias por creer en mí y por estar siempre a mi lado, incluso en los momentos más difíciles.

Finalmente, agradezco a la prestigiosa Universidad Escuela Politécnica Nacional por la oportunidad brindada para mi formación profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
INDICE DE FIGURAS.....	VII
INDICE DE TABLAS.....	VII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
1. APLICACIÓN DE UN PROGRAMADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC) PARA CÁMARAS FRIGORÍFICAS.....	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcance	3
1.4. Marco Teórico.....	3
1.4.1. Dinámica De Sistemas Mecánicos.....	3
1.4.1.1. Modelación matemática de sistemas dinámicos	4
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	8
1.4.2.1. Tipos de entradas de control	8
1.4.2.2. Formas de controlar un sistema de control.....	9
1.4.3. Simulación Computacional	12
1.4.3.1. Tipos de control	13
1.4.4. Control de Cámaras Frigoríficas	17
1.4.4.1. Sistemas de refrigeración.....	17
1.4.4.2. Componentes de un sistema de refrigeración.	18
1.4.4.3. Mecanismos de transferencia de calor en una cámara frigorífica	20
1.4.4.4. Primera Ley De La Termodinámica para sistemas de enfriamiento	21
2. METODOLOGÍA	22
2.1. Aspectos fundamentales.....	22

2.2.	Condiciones de Diseño	23
2.3.	Cálculo estándar de la potencia frigorífica	24
2.4.	Modelo matemático en espacio de estado	26
2.5.	Proceso de enfriamiento	27
2.6.	Enfriamiento inicial (congelamiento)	27
2.7.	Control de temperatura en lazo abierto con termostato	28
2.8.	Control de temperatura en lazo cerrado (modulación de enfriamiento) ..	28
2.9.	Selección del refrigerante:	29
2.10.	Simulación computacional	30
3.	RESULTADOS	37
3.1.	Potencia frigorífica	37
3.2.	Selección del equipo frigorífico	38
3.2.	Potencia del compresor:	39
3.3.	Gráficas de control en MATLAB y análisis	40
3.3.1.	Enfriamiento inicial (congelamiento)	40
3.3.2.	Control de temperatura en lazo abierto con termostato	41
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
4.1.	Conclusiones:	43
4.2.	Recomendaciones	43
4.3.	Trabajos Futuros:	44
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
	ANEXOS	47
	ANEXO 1. Resultados de sistemas de enfriamiento	47
	ANEXO 2. Ficha técnica equipo frigorífico compacto, modelo BCH-NF-2136 INTARCON.	48
	ANEXO 3. Características adicionales equipo frigorífico modelo BCH-NF-2136 INTARCON	49
	ANEXO 4. Script de la simulación computacional para la cámara frigorífica	49
	ANEXO 5. Esquema eléctrico general del sistema de control de una cámara frigorífica	51
	ANEXO 6. Diagrama en escalera del sistema de control de una cámara frigorífica	51

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema gráfico de un sistema dinámico	4
Figura 2. Esquema gráfico – Modelación en espacio de estado	5
Figura 3. Esquema gráfico – Modelación en función de transferencia	7
Figura 4. Esquema gráfico general del control automático en lazo abierto	9
Figura 5. Esquema gráfico resumido del control automático en lazo abierto	9
Figura 6. Esquema gráfico general del control automático en lazo cerrado.....	10
Figura 7. Esquema gráfico resumido del control automático en lazo cerrado	10
Figura 8. Elementos de un sistema de control en lazo cerrado o retroalimentado	11
Figura 9. PLC Optyma Control (AK-RC 101/103)	12
Figura 10. Señal analógica vs Señal Digital	16
Figura 11. Ciclo de refrigeración Cámara frigorífica	18
Figura 12. Compresor Frigorífico.....	18
Figura 13. Unidad Condensadora SAMSUNG	19
Figura 14. Válvula de estrangulación.....	19
Figura 15. Evaporadores cúbicos	20
Figura 16. Condiciones de diseño.	24
Figura 17. Parámetros del producto a conservar.....	25
Figura 18. Ventilaciones de la cámara frigorífica.....	25
Figura 19. Cargas térmicas adicionales.	26
Figura 20. Planta de un sistema térmico.....	27
Figura 21. Entrada Step para control de enfriamiento inicial.....	27
Figura 22. Entrada Step para control de temperatura con termostato:	28
Figura 23. Función step para Control de temperatura en lazo cerrado (Modulación de enfriamiento). Fuente: Propia	29
Figura 24. Esquema eléctrico del circuito de potencia.	31
Figura 25. Esquema eléctrico del circuito de control.	32
Figura 26. Simulación N°1 ciclo de refrigeración	35
Figura 27. Simulación N°2 ciclo de refrigeración	36
Figura 28. Resultados obtenidos de las necesidades frigoríficas.	38
Figura 29. Selección de equipo frigorífico.	39
Figura 30. Proceso de enfriamiento en lazo abierto de cámara frigorífica de 7541W de potencia.....	40
Figura 31. Control de temperatura en el termostato en lazo abierto.....	41

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de entradas de control	8
Tabla 2. Tipos de sensores.	13

Tabla 3. Tipos de actuadores:	14
Tabla 4. Tipos de controladores	15
Tabla 5. Clasificación de refrigerantes	30
Tabla 6. Señales de entrada y salida, analógicas y digitales	33
Tabla 7. Necesidades frigoríficas para un período de cálculo de 10 horas.	37
Tabla 8. Potencia frigorífica necesaria.	37

RESUMEN

El siguiente trabajo se centra en la modelación, programación y simulación del control automático de una cámara frigorífica industrial utilizando un Controlador Lógico Programable (PLC), cuyo objetivo principal se centra en optimizar el funcionamiento de la cámara frigorífica, garantizando la conservación adecuada de los productos almacenados.

El primer paso es la modelación de la cámara frigorífica. Se consideran variables relevantes como la temperatura y humedad. A continuación, se realiza la programación del PLC. Se utilizan lenguajes de programación específicos para PLCs, como Ladder o Structured Text, para implementar algoritmos de control que regulen las variables modeladas.

La simulación permite validar el funcionamiento del sistema antes de su implementación real, para ello se utilizan softwares de simulación que permiten recrear el comportamiento de la cámara frigorífica y del PLC. De esta manera, se pueden detectar y corregir posibles fallos en las etapas de modelación y programación.

El PLC será el encargado de regular las variables de la cámara de acuerdo con los algoritmos de control programados, asegurando así el funcionamiento óptimo de la cámara frigorífica.

De esta manera se demuestra la importancia del trabajo en conjunto de la modelación, programación y simulación en el control automático de sistemas industriales, y cómo esta integración puede conducir a la optimización de los procesos industriales.

PALABRAS CLAVE: modelación, programación, simulación, PLC.

ABSTRACT

The following curricular integration work focuses on the modeling, programming, and simulation of the automatic control of an industrial refrigeration chamber using a Programmable Logic Controller (PLC), whose main objective is to optimize the operation of the refrigeration chamber, ensuring the proper preservation of the stored products.

The first step is the modeling of the refrigeration chamber. Variables such as temperature, humidity, and air flow are considered. Next, the PLC is programmed. Specific programming languages for PLCs, such as Ladder or Structured Text, are used to implement control algorithms that regulate the modeled variables.

Simulation allows the system's operation to be validated before its real implementation, for this, simulation software is used that allows recreating the behavior of the refrigeration chamber and the PLC. In this way, possible failures in the modeling and programming stages can be detected and corrected.

The PLC will be in charge of regulating the chamber's variables according to the programmed control algorithms, thus ensuring the optimal operation of the refrigeration chamber.

In this way, the importance of integrating modeling, programming, and simulation in the automatic control of industrial systems is demonstrated, and how this integration can lead to the optimization of industrial processes.

KEYWORDS: modeling, programming, simulation, PLC.

1. APLICACIÓN DE UN PROGRAMADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC) PARA CÁMARAS FRIGORÍFICAS

La modelación, programación y simulación del control automático de una cámara frigorífica industrial es un componente de gran importancia en el diseño y desarrollo eficiente de sistemas de refrigeración. En este proyecto, se aborda la automatización de una cámara frigorífica, que se utiliza para almacenar y conservar productos perecederos como alimentos, medicamentos y otros materiales sensibles a la temperatura.

A continuación, se explica de una manera detallada los temas que se desarrollan en este proyecto

Modelación del Sistema:

- La modelación implica desarrollar una expresión matemática que represente el comportamiento de una cámara frigorífica. El objetivo, es mediante ecuaciones diferenciales describir como variables importantes a considerar como la temperatura y humedad cambian con el tiempo.

Programación del PLC (Controlador Lógico Programable):

- Al ser el PLC el centro de mando del sistema de control, se lo debe programar para tomar decisiones en función de las entradas (sensores) y activar las salidas (actuadores) según las necesidades de la planta
- Se desarrolla códigos de programación para PLC (como Ladder Logic o Structured Text) que controle los compresores, ventiladores, válvulas y otros dispositivos dentro de la cámara frigorífica.
- El programa debe considerar la lógica de control, los algoritmos de regulación de temperatura y las secuencias de arranque y parada.

Simulación del Sistema:

- La simulación permite probar el sistema antes de implementarlo físicamente. Se utilizan herramientas de software (como MATLAB/Simulink o software específico de PLC) para simular el comportamiento del sistema.

- Durante la simulación, se evalúan diferentes escenarios, como cambios en la carga térmica, fallas en los sensores o actuadores, y variaciones en las condiciones ambientales.
- La simulación ayuda a optimizar los parámetros de control y a identificar posibles problemas antes de la implementación real.

Consideraciones de Seguridad y Eficiencia:

- Se deben incorporar medidas de seguridad para evitar situaciones peligrosas, como sobrecalentamiento o congelamiento excesivo.
- La eficiencia energética es fundamental. El control automático debe minimizar el consumo de energía sin comprometer la calidad de la conservación.

Generar, la modelación, programación y simulación del control automático mediante PLC en una cámara frigorífica industrial es un proceso multidisciplinario que combina conocimientos de ingeniería mecánica, electrónica y control automático. El resultado final es un sistema confiable, eficiente y seguro que garantiza la óptima conservación

1.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema integral de modelación, programación y simulación del control automático de una cámara frigorífica industrial mediante el uso de controladores lógicos programables (PLC), con el fin de optimizar la eficiencia operativa, garantizar la preservación de productos sensibles a la temperatura y mejorar la gestión energética en entornos industriales.

1.2. Objetivos específicos

1. Sintetizar la literatura científica y técnica relacionada con el control automático de cámaras frigoríficas industriales, con especial énfasis en identificar los métodos y estrategias más eficientes para el control de temperatura y otros parámetros relevantes, a fin de establecer una guía de información importante para el diseño y desarrollo de un sistema de control.
2. Programar un controlador lógico programable PLC de una cámara frigorífica industrial, aplicando principios termodinámicos y de transferencia de calor, con el fin de considerar variables relevantes para su implementación dentro del control automático

3. Simular el funcionamiento del programa del mecanismo de control desarrollado de la cámara frigorífica industrial realizando pruebas exhaustivas bajo diferentes condiciones operativas.
4. Evaluar la respuesta del programa del sistema de control, ante modificaciones en la carga térmica y otros factores externos, con el propósito de garantizar su eficacia en entornos industriales.

1.3. Alcance

En este proyecto de integración curricular, se aborda la modelación, programación y simulación de un sistema de control automático para una cámara frigorífica utilizando un PLC (Controlador Lógico Programable). El objetivo principal es diseñar e implementar un sistema que regule ciertos parámetros como la temperatura y humedad dentro de una cámara frigorífica de manera eficiente y precisa.

Para lograrlo, se realiza un estudio detallado de los componentes involucrados, como sensores de temperatura y humedad, actuadores (como válvulas y compresores), y el propio PLC. Además, se desarrolla un software de control que permita ajustar los parámetros de funcionamiento y simular diferentes escenarios para evaluar su desempeño. El resultado final es un sistema robusto y confiable que garantice condiciones óptimas de almacenamiento para productos sensibles a la temperatura.

1.4. Marco Teórico

1.4.1. Dinámica De Sistemas Mecánicos

El control de sistemas industriales necesita de varias ingenierías como, mecánica, eléctrica, informática, entre otras, así como también de ciencias fundamentales de la ingeniería como: física, matemática, química y otras, para poder desarrollar los diferentes procesos de análisis y síntesis de una manera estructurada de la dinámica de los sistemas de control de acuerdo con cada especialización.

Hoy en día la gran mayoría de sistemas dinámicos son automatizados, y la complejidad para entender su funcionamiento es aún mayor. Por ello es importante que la ingeniería debe incluir el enfoque holístico y sinérgico de la mecatrónica para analizar y sintetizar los problemas de manera sistémica y cooperativa en grupos multidisciplinarios; lo que es el único camino actual y futuro para que la ingeniería pueda proyectar, diseñar y controlar;

productos y procesos industriales de alta precisión, sofisticación y complejidad. (Aguinaga Á. P., 2009)

1.4.1.1. Modelación matemática de sistemas dinámicos

Se entiende por sistema industrial o “planta”, aquella entidad compuesta por una serie de subsistemas, componentes partes y elementos que interactúan entre sí con el objetivo de producir, ya sea de manera total o parcial, un producto o un proceso de manera industrial. (Aguinaga Á. , 2008)

La operación y funcionamiento de la planta se determinan por la interacción de sus componentes y flujos. La planta tiene entradas y salidas que representan variables de movimiento, cuyo número depende del tipo de planta que se vaya a analizar, como se puede observar en la siguiente figura (Figura 1)



Figura 1. Esquema gráfico de un sistema dinámico

Fuente: Aguinaga, A., & Cruz, D. (2008). Control automático

Es necesario tomar en consideración, que las plantas se clasifican de acuerdo con el número de entradas y salidas que tengan.

Ahora bien, la modelación matemática correspondiente al comportamiento dinámico de una planta obedece a un sistema de ecuaciones diferenciales de cualquier orden, dependiendo del número de entradas y salidas que tenga la planta. Actualmente el control automático moderno plantea dos modelos matemáticos de gran ayuda para el análisis del diseño de control. (Aguinaga Á. , 2008)

1.4.1.2. Modelación en espacio de estado.

Los modelos de espacio de estados son esenciales en la ingeniería para analizar sistemas dinámicos complejos. Se describen mediante ecuaciones diferenciales y matriciales, representando un sistema físico en términos de variables de estado y entradas. (Aguinaga Á. , 2008)

El método de modelación del espacio de estado presenta las siguientes ventajas:

- Los modelos permiten trabajar de una manera directa en el dominio del tiempo
- Evita la necesidad de extensos desarrollos analíticos, ya que está estructurado en forma de matrices y vectores para su resolución mediante simulación computacional.

A continuación, se presenta el esquema gráfico de una planta con m entradas (u) y n salidas (x):



Figura 2. Esquema gráfico – Modelación en espacio de estado
Fuente: Aguinaga, A., & Cruz, D. (2008). Control automático

Donde:

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

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

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

De esta manera, la representación general del modelo matemático del comportamiento dinámico de la planta está dado por la siguiente expresión matricial:

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

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

Es decir:

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

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

Donde:

\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 $n \times n$

D : matriz estéreo $n \times m$

Estos modelos matemáticos se rigen a ciertos parámetros y condiciones necesarias en cualquier diseño de control:

Condiciones:

- Condiciones iniciales: se considera que el tiempo es igual a cero; $t = 0$.
- Condiciones de borde: se considera ciertos tiempos específicos.

Parámetros:

- Tiempo de subida donde se presenta un cambio mayor de estado, dependiendo la variable que se esté analizando como temperatura, flujo de aire, humedad.
- Error permitido
- Máximos sobre picos
- Estabilidad del sistema

Por lo tanto, este método de modelación se alinea perfectamente con el enfoque holístico de la mecatrónica, lo que hace que su uso sea altamente recomendado.

1.4.1.3. Modelación en función de transferencia

La modelación en función de transferencia se lo va a definir como una expresión matemática que establece una relación entre la respuesta (x_i) de un sistema y una señal de entrada (u_j). Esta relación se representa mediante un cociente de dos polinomios en el dominio de la frecuencia (s), uno correspondiente a la salida y el otro a la entrada. En la ecuación que representa esta relación, $G(s)$ denota la función de transferencia para esta correspondencia uno a uno. (Aguinaga Á. , 2008)

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

A diferencia del método de modelamiento de espacio de estados, el método de función de transferencia propone que el análisis y síntesis tanto del comportamiento dinámico, como del control de la planta se lo debe realizar de forma biunívoca, es decir, donde a cada entrada se la debe relacionar con una única salida de la planta y viceversa. (Aguinaga Á. , 2008)

Este método de sistemas como función de transferencia se caracteriza por tener las siguientes ventajas:

- Permite la aplicación eficiente del uso de técnicas numéricas y módulos visuales para obtener respuestas a las señales de control
- Comúnmente los sistemas tienen una única salida, existen casos en los que pueden presentarse múltiples salidas y entradas, representadas por vectores de dimensiones específicas. En estos casos, la función de transferencia se determina a través de matrices.

Es importante tomar en cuenta que no necesariamente debe haber el mismo número de entradas con el número de salidas.

A continuación, se tiene una representación de una planta genérica con m entradas y n salidas, para que el comportamiento de la planta cumpla con la combinación biunívoca es decir para cada salida i -ésima x_i le corresponda una entrada j -ésima u_j



Figura 3. Esquema gráfico – Modelación en función de transferencia
Fuente: Aguinaga, A., & Cruz, D. (2008). Control automático

1.4.2. Simulación Computacional

1.4.2.1. Tipos de entradas de control

Tras definir la función de transferencia, se selecciona una señal de entrada unitaria. Mediante la simulación computacional, se ajusta esta señal para obtener la salida deseada. Las señales de entrada específicas permiten evaluar el comportamiento y control del sistema. En esencia, se usa la simulación para ajustar las entradas y mejorar la salida del sistema. Los principales tipos de señales de entrada se las resume en la siguiente tabla:

Tabla 1. Tipos de entradas de control

Fuente: (Aguinaga, A., & Cruz, D. (2008). Control automático.

Tipo de Señal	Características	Representación matemática y gráfica
Señal tipo impulso unitario	<ul style="list-style-type: none"> • Acción rápida • Anulación instantánea • Útil en la simulación computacional y control automático. • Importante en escenarios críticos 	<p> $f(t) = 0$ si $t > 0$ $f(t) = 1$ si $t = 0$ </p>
Señal tipo escalón unitario	<ul style="list-style-type: none"> • Acción instantánea, hasta alcanzar el valor unitario. • Una vez alcance el valor unitario, se mantiene constante con el tiempo • Útil en la simulación computacional y control automático. • Útil en escenarios críticos 	<p> $f(t) = 0$ si $t < 0$ $f(t) = 1$ si $t ≥ 0$ </p>
Señal tipo rampa	<ul style="list-style-type: none"> • Acción rápida sobre las entradas de la planta • Actúa de manera progresiva sobre la entrada de la planta • Adecuada para el control automático de plantas mecánicas. • De gran ayuda para simulación y pruebas de control 	<p> $f(t) = 0$ si $t ≤ 0$ $f(t) = t - m$ si $t > 0$ </p> <p>Donde m es la pendiente de la rampa</p>
Señal tipo frecuencial o vibratoria	<ul style="list-style-type: none"> • Actúa sobre la entrada de la planta en forma sinusoidal. • Tiene como respuesta una salida frecuencial con amplitud mayor, menor o igual a la entrada • Advierte y previene posibles fallos en plantas. 	<p> Señal de entrada Respuesta de mayor amplitud Respuesta de menor amplitud Fase </p>

1.4.2.2. Formas de controlar un sistema de control.

Existen dos maneras esenciales de poder controlar un proceso o un sistema, ya sea el control en lazo abierto como en lazo cerrado o retroalimentado. A continuación, se detalla cada una de las formas:

a) LAZO ABIERTO:

En estos sistemas de control, la señal de salida no influye en la señal de entrada. En otras palabras, estos sistemas no realizan una comparación entre la señal de salida y la señal de referencia establecida

Este tipo de control se lo puede definir mediante el siguiente esquema:

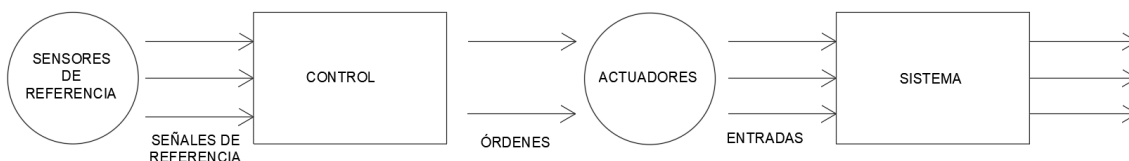


Figura 4. Esquema gráfico general del control automático en lazo abierto

Fuente: Aguinaga, A., & Cruz, D. (2008). Control automático.

De una manera más resumida, el esquema queda definido de la siguiente manera:

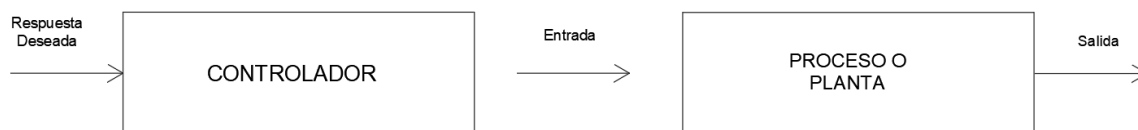


Figura 5. Esquema gráfico resumido del control automático en lazo abierto

Fuente: Aguinaga, A., & Cruz, D. (2008). Control automático.

Es importante mencionar, que los sistemas de lazo abierto presentan ciertas ventajas, como, ser sencillos, tener un bajo costo y contar con una confiabilidad relativamente buena. Sin embargo, son imprecisos debido a que no hay corrección de errores. (Bolton, 2013)

b) Lazo cerrado o retroalimentado:

En un sistema de control con retroalimentación, la señal de salida afecta a la señal de entrada., es decir, utiliza la retroalimentación de la medida real de la salida para comparar

con una referencia deseada, determinando el error entre la salida real con la salida de referencia y en base a este error, realiza los ajustes necesarios para poder disminuir rápidamente el error, con la finalidad de garantizar la confiabilidad del sistema. (Aguinaga Á. , 2008)

Este tipo de control se lo puede definir mediante el siguiente esquema:

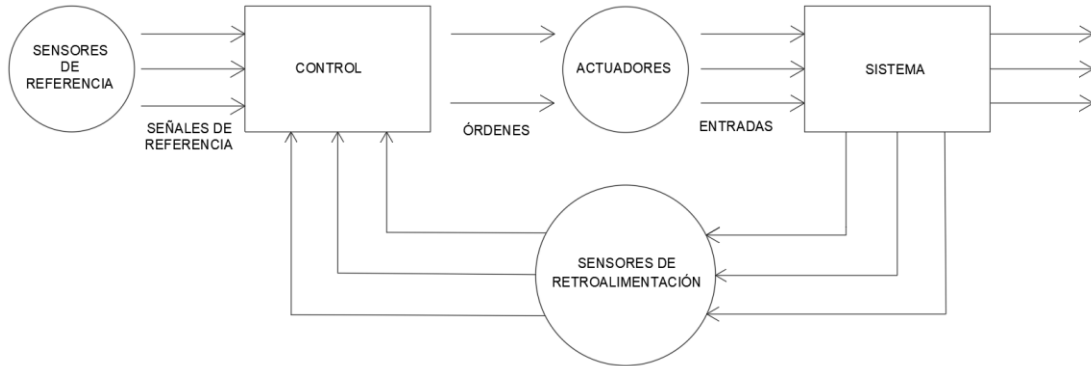


Figura 6. Esquema gráfico general del control automático en lazo cerrado

Fuente: Aguinaga, A., & Cruz, D. (2008). Control automático.

De una manera más resumida, el esquema queda definido de la siguiente manera:

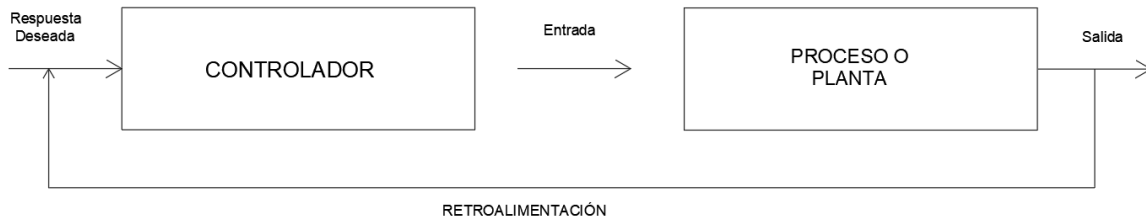


Figura 7. Esquema gráfico resumido del control automático en lazo cerrado

Fuente: Aguinaga, A., & Cruz, D. (2008). Control automático.

Cabe destacar que estos sistemas de retroalimentación tienen la ventaja de ser precisos al igualar el valor real con el valor objetivo, sin embargo, presentan un cierto grado de complejidad, por tanto, resultan ser más costosos y requieren de un mayor número de componentes. (Bolton, 2013)

Ahora bien, este tipo de sistema de control está compuesto por los siguientes elementos:

- Comparador: La función principal de este elemento es comparar la señal de referencia con la señal medida de la variable controlada. Si estos valores difieren, se genera una señal de error para que el controlador tome medidas al respecto.

- Controlador: es un elemento que se encarga de llevar a cabo acciones que corrijan la señal de error emitida por el comparador
- Elemento corrector o actuador: encargado de realizar un cambio en el proceso, con la finalidad de corregir, controlar o modificar la condición de medición.
- Planta o elemento de proceso: es el proceso o sistema que se desea controlar
- Medidor o elemento de medición: es el elemento encargado de traducir el valor actual de la variable controlada para que el controlador pueda interpretarla.
- Señales de referencia: son las señales que se deben calibrar en base a los valores de salida deseados del sistema.
- Señales controladas: son las variables de salida del proceso, controladas por los sistemas de retroalimentación. (Bolton, 2013)

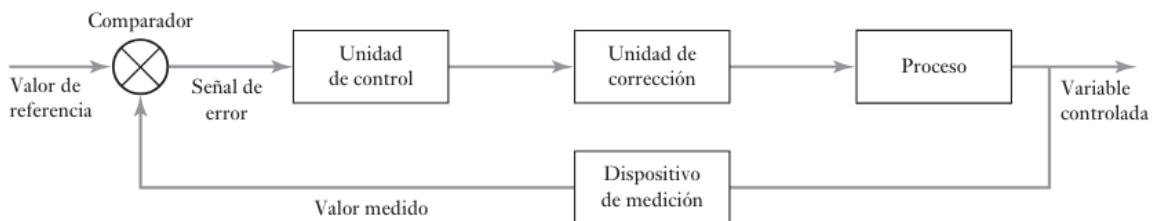


Figura 8. Elementos de un sistema de control en lazo cerrado o retroalimentado

Fuente: Bolton, W. (2013). Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica.

Control lógico programable (PLC)

Los Controladores Lógicos Programables (PLC) son dispositivos electrónicos diseñados para operar, controlar y regular procesos industriales y maquinarias, estos sistemas utilizan memorias programables para almacenar instrucciones que ejecutan tareas específicas como control lógico, secuenciación, temporización y cálculos aritméticos. Estas funciones facilitan la gestión de entradas y salidas, tanto digitales como analógicas, para controlar diversos equipos y procesos. (Bolton, 2013)



Figura 9. PLC Optima Control (AK-RC 101/103)

Fuente: Danfoss Power Solutions

Características:

- **Diseño Robusto:** computadoras industriales diseñadas para funcionar de manera confiable en diferentes escenarios críticos, como soportar temperaturas altas y bajas, exposición a climas húmedos, golpes y vibraciones.
- **Programabilidad:** emplean el uso de lenguajes especiales de programación como Ladder Logic o el Diagrama de bloques.
- **Flexibilidad y adaptabilidad:** puede ser nuevamente reprogramado para ser utilizado en la automatización de nuevos procesos, facilitando que las empresas se adapten rápidamente a nuevas demandas de producción.
- **Resiliencia** operan durante períodos extensos de tiempo, sin ningún tipo de mantenimiento previo.
- **Fiabilidad:** tienen la capacidad de actuar rápidamente, ante cualquier tipo de problema que pare la producción, como el corte del suministro eléctrico. (IMEPI)

1.4.3. Simulación Computacional

El control de un sistema se refiere a la capacidad de regular el comportamiento de dicho sistema. En el campo de la ingeniería y la tecnología, esto implica el uso de dispositivos y algoritmos para ajustar las variables de un sistema con el objetivo de lograr un rendimiento o comportamiento deseado. Por ejemplo, la regulación de la temperatura y de la humedad en una cámara frigorífica, la velocidad en un vehículo, o la posición de un brazo robótico, entre otros. El control de sistemas es un componente esencial en muchas áreas, incluyendo la automatización industrial, la robótica, y los sistemas de transporte.

1.4.3.1. Tipos de control

- Control Manual: todas las acciones necesarias para controlar el sistema son realizados por un operador humano.
- Control Automático: las acciones encargadas del control del sistema son ejecutadas por elementos artificiales, en este control no interviene el operador humano
- Control Semiautomático: las acciones encargadas del control del sistema son ejecutadas tanto de manera automática como de manera manual. (México, 2018)

Componentes de la automatización

- a) **Sensores:** son elementos cruciales que captan y miden variables físicas, transmitiendo esta información al controlador. A partir de estos datos, el controlador toma decisiones para mantener o modificar el comportamiento del sistema. (Leonel Corona, 2014)

Características de los sensores:

- Sensibilidad: Capacidad para detectar pequeños cambios en la magnitud medida.
- Rango de medición: Rango de valores que puede medir el sensor.
- Precisión: Grado de exactitud con el que el sensor mide la magnitud.
- Linealidad: Relación proporcional entre la magnitud medida y la señal de salida del sensor.
- Repetibilidad: Capacidad del sensor para dar la misma salida para la misma magnitud medida en diferentes mediciones.
- Ruido: Señales no deseadas que afectan la medición del sensor. (Industrial, 2022)

Tipos de sensores:

Tabla 2. Tipos de sensores.
Fuente: (Leonel G. Corona Ramírez, 2014)

TIPO DE SENSOR	FUNCIÓN	EJEMPLOS
Sensores de posición	Detectan la ubicación o el desplazamiento de un objeto	Potenciómetros, sensores de proximidad

Sensores de fuerza	Miden la fuerza aplicada a un objeto	Células de carga, sensores de presión
Sensores de temperatura	Detectan cambios de temperatura	Termistores, termopares
Sensores de luz	Miden la intensidad o la presencia de luz	Fotodiodos, fototransistores
Sensores de humedad	Detectan la cantidad de vapor de un fluido en el aire	Higrómetros

b) Actuadores: son dispositivos que transforman la energía en movimiento, son los componentes encargados de realizar las acciones necesarias para controlar el sistema, reciben las órdenes por parte del controlador. En la industria se utilizan para controlar válvulas, motores, cilindros y otros dispositivos mecánicos (Especificicar, 2024)

Características de los actuadores

- Fuerza: Fuerza máxima que puede generar el actuador.
- Velocidad: Velocidad máxima a la que el actuador puede mover una carga.
- Precisión: Grado de exactitud con el que el actuador puede posicionar una carga. Carrera: Distancia máxima que el actuador puede mover una carga.
- Eficiencia: Relación entre la energía de entrada al actuador y la energía útil en la salida. (Leonel G. Corona Ramírez, 2014)

Tipos de controladores:

Tabla 3. Tipos de actuadores:
Fuente: (Revista Especificar, 2024)

TIPO DE ACTUADOR	FUNCIÓN	EJEMPLOS
Actuadores neumáticos	Utilizan aire comprimido para generar movimiento	Cilindros neumáticos, válvulas neumáticas
Actuadores hidráulicos	Utilizan un fluido a presión para generar movimiento.	Cilindros y motores hidráulicos
Actuadores eléctricos	Utilizan energía eléctrica para generar movimiento	Motores de corriente continua, motores de inducción, servomotores.
Actuadores piezoeléctricos	Utilizan el efecto piezoeléctrico para generar movimiento	Actuadores piezoeléctricos Micro mecanismos

c) **Controlador:** es el cerebro del sistema de control, captura los datos de los sensores, los procesa y envía instrucciones a los actuadores para que operen el sistema según las condiciones establecidas. (Brotons, 2004)

Características de los controladores:

- Capacidad de procesamiento: Velocidad y potencia de procesamiento del controlador.
- Memoria: Cantidad de memoria disponible para almacenar programas y datos.
- Entradas y salidas: Número y tipo de entradas y salidas disponibles para conectar sensores y actuadores.
- Facilidad de programación: Nivel de dificultad para programar y configurar el controlador. Comunicación: Capacidad para comunicarse con otros dispositivos y sistemas

Tipos de Controladores

Tabla 4. Tipos de controladores

Fuente: (Industrial, SDI Industrial - Controladores, 2022)

TIPO DE CONTROLADOR	DESCRIPCIÓN
Controladores lógicos programables (PLCs)	Controladores basados en microprocesadores programables para realizar tareas de control lógico
Controladores basados en microcontroladores	Controladores integrados en un solo chip que combinan un procesador, memoria y otros componentes periféricos
Controladores PID	Controladores que utilizan un algoritmo proporcional-integral-derivativo para regular una variable de proceso
Controladores basados en sistemas de control distribuido (DCS)	Sistemas de control que utilizan múltiples controladores conectados en red para controlar un proceso complejo
Controladores basados en inteligencia artificial	Controladores que utilizan técnicas de IA como redes neuronales o algoritmos genéticos para tomar decisiones de control.

Señales y componentes analógicos y digitales

- Señales analógicas: Representan valores continuos que varían en el tiempo, como la temperatura, humedad o presión. Se transmiten y procesan mediante circuitos electrónicos analógicos.
- Señales digitales: Representan valores discretos que solo pueden tomar dos estados, comúnmente representados como 0 y 1. Se transmiten y procesan mediante circuitos electrónicos digitales. (Leslie Monter, 2024)

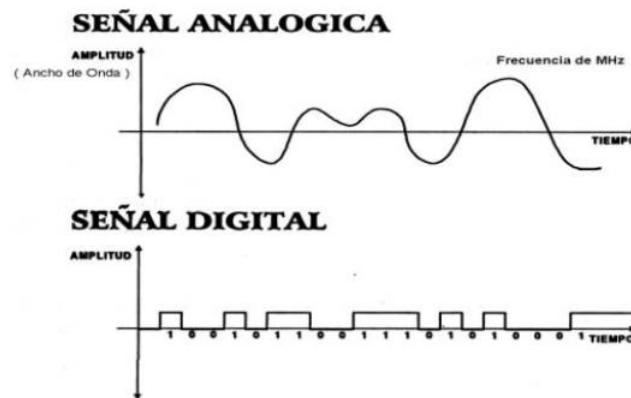


Figura 10. Señal analógica vs Señal Digital
Fuente: (Hidalgo, 2024)

Componentes analógicos

- Sensores analógicos
- Actuadores analógicos
- Amplificadores: Aumentan la magnitud de una señal analógica.
- Filtros: Eliminan componentes no deseados de una señal analógica

Componentes digitales

- Sensores digitales
- Convertidores analógico-digitales (ADC): Convierten señales analógicas en señales digitales.
- Convertidores digital-analógicos (DAC): Convierten señales digitales en señales analógicas.
- Microcontroladores: Procesan señales digitales, ejecutan instrucciones y controlan actuadores digitales.

- Buses de comunicación: Permiten la transmisión de datos entre componentes digitales.

1.4.4. Control de Cámaras Frigoríficas

Las cámaras frigoríficas industriales representan un componente crítico en la cadena de suministro de productos perecederos, donde la precisión en el control de temperatura y humedad es esencial para garantizar la calidad y seguridad del producto. El control automático de estas cámaras se ha convertido en un estándar en la industria, permitiendo una gestión eficiente y confiable de las condiciones ambientales.

El control automático de una cámara frigorífica industrial se basa en la retroalimentación continua de datos, obtenidos a través de sensores estratégicamente ubicados que monitorean variables como la temperatura, la humedad y la presión. Estos datos son procesados por un controlador lógico programable (PLC), que ajusta los actuadores para mantener las condiciones deseadas dentro de la cámara.

1.4.4.1. Sistemas de refrigeración

Los sistemas de refrigeración son fundamentales en la vida moderna, ya que permiten 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.

El ciclo de refrigeración en una cámara frigorífica se repite continuamente para mantener la temperatura interna deseada y poder preservar el producto. Este ciclo incluye cuatro componentes principales: el compresor, el condensador, la válvula de expansión y el evaporador, como se ilustra en el siguiente esquema. (Yunus A. Çengel, 2011)

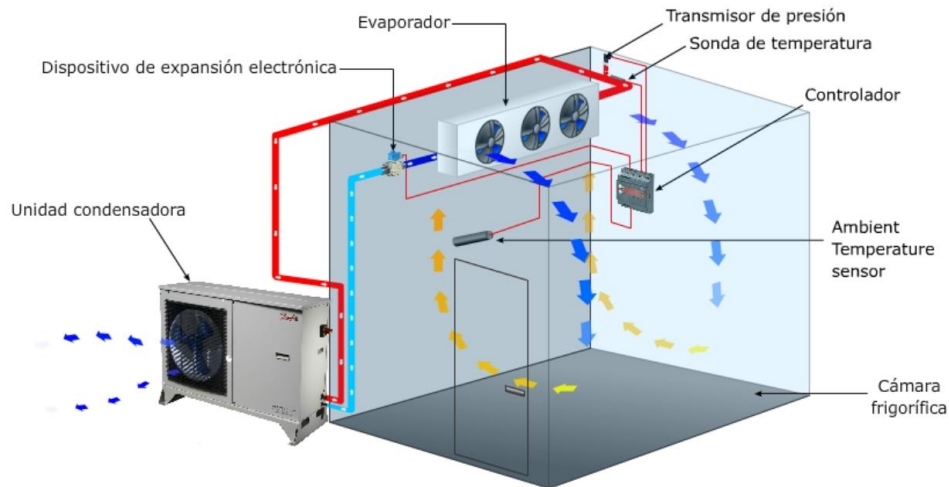


Figura 11. Ciclo de refrigeración Cámara frigorífica
Fuente (Solutions, 2024)

1.4.4.2. Componentes de un sistema de refrigeración.

- a) **Compresor:** Considerado el corazón del sistema, el compresor tiene la función vital de incrementar la presión del refrigerante, facilitando así su flujo a través del sistema. Al comprimir el gas refrigerante, el compresor no solo aumenta su presión sino también su temperatura, preparándolo para la transferencia de calor que ocurre en las etapas siguientes. En el compresor se da un proceso adiabático (Air-Frisco, 2020)



Figura 12. Compresor Frigorífico
Fuente: Cooling Solutions Frascold

- b) **Condensador:** Este componente actúa como el punto de liberación de calor para el refrigerante que ha sido comprimido y calentado por el compresor. Al pasar por el condensador, el refrigerante cede el calor absorbido al medio ambiente, condensándose de un gas a un líquido. Este proceso es crucial para la disipación

de calor y la continuación eficiente del ciclo de refrigeración. En el condensador se da un proceso isobárico, es decir la presión es constante. (Air-Frisco, 2020)



Figura 13. Unidad Condensadora SAMSUNG

Fuente: (Primos, 2020)

- c) Válvula de expansión: La válvula de expansión ajusta con precisión el flujo de refrigerante líquido hacia el evaporador. Este elemento es esencial para controlar la cantidad de refrigerante que ingresa al evaporador, garantizando que el proceso de absorción de calor se lleve a cabo de manera eficiente. En la válvula de expansión ocurre un proceso isoentálpico (Air-Frisco, 2020)



Figura 14. Válvula de estrangulación

Fuente: (Controls, 2024)

- d) Evaporador: Ubicado inmediatamente después de la válvula de expansión, el evaporador es el sitio donde el refrigerante, ya en estado de baja presión y temperatura debido a la expansión, absorbe el calor del entorno. Este proceso resulta en la refrigeración del espacio deseado, ya sea aire o líquido circundante. De igual manera que, en el condensador, en el evaporador se da un proceso isobárico. (Air-Frisco, 2020)



Figura 15. Evaporadores cúbicos

Fuente: (Rodríguez, 2017)

Estos elementos trabajan en conjunto para formar un ciclo cerrado en el que el refrigerante es comprimido, calentado, condensado, expandido y enfriado, permitiendo así la transferencia de calor de un lugar a otro, lo que resulta en la refrigeración deseada.

1.4.4.3. Mecanismos de transferencia de calor en una cámara frigorífica

Conducción:

- La conducción es el proceso mediante el cual el calor se transfiere a través de un material sólido. En una cámara frigorífica, esto ocurre a través de las paredes y el suelo, sin embargo, se la considera despreciable. (Velázquez Martí, 2022)
- Para reducir la conducción, se utilizan materiales aislantes como poliuretano o poliestireno expandido en las paredes y techos de la cámara.

Convección:

La convección implica el movimiento del fluido (como el aire) para transferir calor. En una cámara frigorífica:

- Convección natural: El aire frío más denso tiende a descender, mientras que el aire caliente asciende, creando una corriente de convección.
- Convección forzada: Se utiliza un ventilador para empujar aire dentro de la cámara y distribuir uniformemente la temperatura.

Radiación:

- La radiación es la forma de transferencia de calor a través de ondas electromagnéticas (como la luz de iluminarias). En una cámara frigorífica, esto ocurre entre las superficies y los productos almacenados.
- Las superficies más calientes emiten radiación hacia las más frías.

1.4.4.4. Primera Ley De La Termodinámica para sistemas de enfriamiento

La primera ley de la termodinámica indica que la variación en la energía interna de un sistema cerrado (ΔE) es equivalente a la suma del trabajo efectuado sobre o por el sistema (W), junto con la transferencia de calor hacia o desde el sistema (ΔQ). Es decir, equivale a:

$$\Delta E = W + \Delta Q \quad (4)$$

Dado que un sistema de refrigeración no genera trabajo ($W = 0$), se tiene:

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

$$\Delta E = m * C_p * \Delta T \quad (6)$$

Donde:

ΔE : variación de la energía interna

C_p : calor específico de la subsistencia

ΔT : variación de la temperatura

Ahora bien, haciendo un balance de energía, todo lo que entra es igual a todo lo que sale, por ende:

$$\Delta E = E_{entra} - E_{sale} \quad (7)$$

Derivando en función del tiempo a la ecuación (6) y (7) se tiene:

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

$$\frac{d(\Delta E)}{dt} = \dot{m} * C_p * \frac{d(\Delta T)}{dt} \quad (9)$$

Igualando las ecuaciones (8) y (9) se concluye que:

$$\dot{m}_{sale} = \dot{m}_{entra} \quad (10)$$

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la metodología del presente proyecto se plantean 4 etapas que se encuentran organizadas de la siguiente manera.

En la primera etapa, se realiza una investigación acerca de los aspectos fundamentales relacionados con el funcionamiento y las condiciones operativas de una cámara frigorífica industrial.

En la segunda etapa, se plantea un ejemplo de cálculo, donde se especifican ciertas condiciones de diseño, que van a permitir realizar el cálculo de la potencia frigorífica que se necesita para conservar un producto, mediante la ayuda de un software online de libre acceso, que permite al usuario realizar cálculos de sistemas de enfriamiento, en base a normas de simulación propuestas por ASHRAE y fundamentos termodinámicos. En base a ello, se selecciona un equipo que satisfaga las necesidades planteadas.

En la tercera etapa, se desarrolla el modelado matemático que regirá el sistema y que va a permitir el control de los componentes de la planta, estos modelos matemáticos desarrollados se los integra en el software Matlab mediante la librería Control System Toolbox, para poder analizar el comportamiento de las variables analógicas y digitales, tanto en lazo abierto, como en lazo retroalimentado.

En la cuarta etapa, se ejecuta la simulación de la automatización de una cámara frigorífica en el software PC-SIMU y CADE-SIMU. En esta etapa se lleva a cabo el control digital y analógico de la temperatura, de los termostatos y presostatos.

2.1. Aspectos fundamentales

Las características esenciales que debe tener una cámara frigorífica para su correcto funcionamiento y eficiencia son:

- Capacidad y dimensiones: Evaluar la capacidad de almacenamiento requerida y el espacio disponible para la instalación.

- Rango de temperatura: Determinar el rango de temperatura necesario según los productos a almacenar, asegurando condiciones óptimas.
- Aislamiento térmico: Verificar que la cámara tenga un buen aislamiento térmico para evitar fugas de frío y mantener un control eficiente de la temperatura.
- Sistemas de refrigeración: Evaluar los sistemas de refrigeración, como compresores y evaporadores, para un rendimiento óptimo.

Además, es importante considerar:

- Paneles: Estructuras modulares con materiales aislantes que mantienen la temperatura controlada.
- Puertas herméticas: Para evitar filtraciones de aire del exterior y garantizar un sellado óptimo.
- Compresores de aire: Para el correcto flujo y circulación del aire frío.
- Evaporadores y condensadores: Para la adecuada transformación de los gases refrigerantes.
- Sistemas de ventilación: Para la extracción de aire y mantener la calidad del ambiente interno.

2.2. Condiciones de Diseño

Se va a determinar el comportamiento termodinámico y el control automático de una cámara frigorífica para mantener congelado bloques de mariscos con las siguientes características:

- Capacidad de 3000 kg de marisco.
- Temperatura de congelamiento -20°C .
- Temperatura ambiente 15°C .
- Dimensiones de 2x3x3 m.
- La cámara se instalará en el interior de una nave industrial.
- El espesor del aislamiento interior de la cámara, incluyendo en el piso 200 mm.

- Referencialmente se considera que el congelamiento inicial de toda la carga de mariscos se realiza en aproximadamente 10 horas.
- La puerta se abre un promedio de 12 veces al día, para lo cual se considera un caudal de ventilación de $150 \text{ m}^3 / \text{h}$.

2.3. Cálculo estándar de la potencia frigorífica

Para determinar las características de la cámara frigorífica, cuya función principal es mantener congelado bloques de mariscos a $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, se utiliza un software online de libre acceso, que permite al usuario realizar cálculos de sistemas de enfriamiento, en base a normas de simulación propuestas por ASHRAE y fundamentos termodinámicos, que consiste en una calculadora que permite obtener diferentes opciones de cámaras frigoríficas que se adecuen a las necesidades requeridas, para eso se introducen todos los datos que se proporcionan en el software.

En primera instancia tenemos que indicar las dimensiones en metros de la cámara frigorífica las cuales son de 3x2x3 (largo, fondo y alto respectivamente), indicar la dimensión del espesor de aislamiento de 200 [mm], indicar la temperatura de la cámara de -20°C e indicar la localización de estudio, la cual corresponde a la ciudad de Quito con una temperatura ambiente de 15°C , los datos mencionados se encuentran en la figura 16.


Tipo de cámara	Cámara frigorífica modular	
Esesor de aislamiento:	200 mm	
Aislamiento del suelo:	<input checked="" type="radio"/> sí <input type="radio"/> no	
Largo (interior):	3,00 m	
Fondo (interior):	2,00 m	
Alto (interior):	3,00 m	Volumen interior: 18,00 m ³
Aplicación	Conservación a temperatura negativa	Temperatura de cámara: $-20,0 \text{ }^\circ\text{C}$
Localización	QUITO	Temperatura ambiente: $15,0 \text{ }^\circ\text{C}$

Figura 16. Condiciones de diseño.

Fuente: INTARCON

Posteriormente se selecciona el tipo de producto que para este caso corresponde a MARISCO CONGELADO, en donde el software indica las propiedades de este producto en donde la más significativa es el Calor específico cuyo valor corresponde a $3,7 \text{ [kJ/kg-K]}$,

luego se indica la carga del producto que es de 3000 [kg] y una temperatura de entrada de 15°C. Finalmente se indica la presentación del producto que para este caso corresponde a bloques de marisco congelado, el resto de parámetros se indican en la Fig. 17.

Tipo de producto	Tipo de producto:	MARISCO CONGELADO	Temperatura de conservación:	-20,0 °C
	Humedad de conservación:	90 %	Punto de congelación:	-2.2 °C
	Contenido en agua:	84 %	Calor específico:	3.7 kJ/kg·K
	Calor de respiración:	0.0 kJ/kg	Calor específico congelado:	1.9 kJ/kg·K
Embalaje	Tipo de embalaje:	a granel	Peso del embalaje:	0.00 kg/kg
Carga de producto	Carga total:	3000 kg	Tasa de rotación diaria:	12 %/24h
	Temperatura de entrada:	15,0 °C		
Enfriamiento del producto	Forma del producto:	bloque	Peso por pieza:	0,10 kg
	Largo del producto:	100 mm	Ancho del producto:	100 mm
	Espesor del producto:	11 mm	Densidad:	936 kg/m³
	Conductividad:	1.4 W/m·K	Velocidad del aire:	0.1 m/s
	Temperatura final en el centro del producto:	-20.0 °C	Tiempo de enfriamiento:	10,00 h
	Temperatura del aire:	-20,0 °C		

Figura 17. Parámetros del producto a conservar.

Fuente: INTARCON

Luego se indica las aperturas diarias de la puerta, cuyo valor corresponde a 12 aperturas diarias, este valor indica la ventilación natural que tiene el producto y los valores se muestran en la figura 18.

Ventilación natural	Temperatura del aire exterior:	15.0 °C	Humedad del aire exterior:	50 %
	Alto de puerta:	1.8 m	Ancho de puerta:	0.8 m
	Tiempo de apertura:	1.3 min	Aperturas diarias de puerta:	12,0 /24h
	Renovaciones diarias:	12,0 /24h		

Figura 18. Ventilaciones de la cámara frigorífica.

Fuente: INTARCON

Finalmente se indica el caudal de aire necesario para refrigerar adecuadamente el producto el cual corresponde a 150 [m³ /h], este caudal será suministrado por ventiladores al interior de la cámara, los valores indicados se indican en la figura 19.

Ocupación de personal	Potencia unitaria:	<input type="text" value="392"/> W/pers	Nº personas:	<input type="text" value="0"/> pers
Iluminación	Potencia unitaria:	<input type="text" value="0"/> W/m²	Superficie:	<input type="text" value="6.0"/> m²
Resistencia de puerta	Potencia unitaria:	<input type="text" value="10"/> W/m	Perímetro:	<input type="text" value="5.2"/> m
Desescarche	Tipo de desescarche:	<input type="text" value="eléctrico"/>		
Ventiladores	Caudal de aire:	<input type="text" value="150"/> m³/h	Presión estática total:	<input type="text" value="150"/> Pa
	Eficiencia:	<input type="text" value="27"/> %	Potencia eléctrica:	<input type="text" value="0.023"/> kW
Otras cargas térmicas	Potencia eléctrica:	<input type="text" value="0.00"/> kW	horas diarias:	<input type="text" value="8.0"/> h/24h

Figura 19. Cargas térmicas adicionales.

Fuente: INTARCON

En el siguiente capítulo de Resultados, se muestra las necesidades frigoríficas calculadas para esta cámara frigorífica con las dimensiones, cargas y el tiempo de funcionamiento previamente establecido

2.4. Modelo matemático en espacio de estado

Para cámaras frigoríficas se aplica la primera ley de la termodinámica (Ecuación 10) para sistemas cerrados donde se obtiene el siguiente modelo matemático:

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = \frac{1}{m * Cp} * Potq - \frac{1}{m * Cp} * perd * \Delta T$$

Y el modelo en espacio de estado da como resultado:

$$[\dot{\Delta T}] = \left[-\frac{perd}{m * Cp} \right] * [\Delta T] + \left[\frac{1}{m * Cp} \right] * [Potq]$$

$$[y] = [1] * [\Delta T] + [0] + [Potq]$$

$$A = \left[\frac{perd}{m * Cp} \right]$$

$$B = \left[\frac{1}{m * Cp} \right]$$

$$C = 1$$

$$D = 0$$

2.5. Proceso de enfriamiento

Se procede a realizar el script con el código correspondiente a la simulación computacional para el control de esta cámara frigorífica, mismo que se presenta en el ANEXO 4. La entrada de la planta de este sistema corresponde a la potencia de la cámara frigorífica ($Potq$) y la salida al delta de Temperatura (ΔT), el esquema de la planta se observa en la Figura 20.



Figura 20. Planta de un sistema térmico

Fuente: Aguinaga, A., & Cruz, D. (2008). Control automático

Se evalúan los coeficientes del modelo utilizando unidades del Sistema Internacional (SI), luego se desarrolla el modelo matemático en espacio de estados, es decir, las 4 matrices del modelo, a partir del modelo en espacio de estado, se obtiene la función de transferencia $Gp1$ entre la Potencia y el delta de temperatura. Cabe mencionar que este modelo de espacio de estados corresponde para sistemas cerrados.

$$Gp1 = \frac{9.009e - 08}{s - 1.892e - 05}$$

2.6. Enfriamiento inicial (congelamiento)

Para determinar el proceso de enfriamiento de la cámara frigorífica, se parte de la simulación en lazo abierto con señal de entrada tipo step, aunque también podría utilizarse señal de entrada tipo impulso. La entrada tipo step se utiliza para alcanzar su máximo valor y mantenerlo en ese valor, en este caso es que el compresor alcance un máximo valor, pero esto no significa un daño en los equipos, debido a que es un proceso lento hasta alcanzar la temperatura de congelamiento.

```
% ENFRIAMIENTO INICIAL (CONGELAMIENTO)
% EN LAZO ABIERTO (TERMOSTATO)
step(potq*Gp1,tiempoenfriamiento);
pause;
```

Figura 21. Entrada Step para control de enfriamiento inicial

Fuente: Propia

2.7. Control de temperatura en lazo abierto con termostato

El control de temperatura en las cámaras frigoríficas solo se logra solo con termostato en donde se alcanza la temperatura de timbre (T_{timbre}) donde se prende el compresor, y entra en funcionamiento el termostato.

Una manera más resumida de entender el control del termostato en lazo abierto es la siguiente manera:

- Establecimiento del régimen: Se define un régimen de tiempo, régimen=1200 segundos; que es el intervalo durante el cual el termostato mantendrá la cámara frigorífica a la temperatura deseada.
- Simulación de la respuesta: La función `step(potq*Gp1,regimen)`; simula la respuesta del sistema al aplicar una potencia calórica constante (definida por `potq`) durante el tiempo de régimen establecido. Esto representa el termostato encendiendo y apagando el sistema de refrigeración para mantener la temperatura.
- Calibración del termostato: Normalmente, se calibra el termostato para activarse dentro de un rango de temperatura específico.

```
% CONTROL EN LAZO ABIERTO CON TERMOSTATO
regimen=1200;% Normalmente regimen en s
% Normalmente termostato se calibra en -1 a -3oC en régimen
step(potq*Gp1,regimen);
pause;
```

Figura 22. Entrada Step para control de temperatura con termostato:

Fuente: Propia

Para implementar este control en un sistema real, se debe conectar un termostato al PLC y programar el PLC para activar o desactivar los componentes de refrigeración (como compresores o válvulas) basándose en las lecturas del termostato y los parámetros establecidos.

2.8. Control de temperatura en lazo cerrado (modulación de enfriamiento)

La modulación del enfriamiento en el código desarrollado (Figura 23.) se refiere al ajuste automático de la intensidad del enfriamiento para mantener la temperatura deseada dentro de la cámara frigorífica. El controlador PID, que se sintoniza automáticamente con `pidtune`,

ajusta los parámetros de control proporcional (P), integral (I) y derivativo (D) para responder a las variaciones de temperatura y mantener la consigna establecida.

El sistema de lazo cerrado asegura que cualquier desviación de la temperatura objetivo sea corregida ajustando la salida del controlador, que puede estar conectada a elementos como válvulas o compresores en el sistema de refrigeración. La función `step` simula cómo el sistema responde a un cambio repentino (como abrir la puerta de la cámara), mostrando cómo el sistema regresa a la consigna después de la perturbación.

Este código ayuda a automatizar el proceso de enfriamiento, asegurando que la cámara frigorífica mantenga una temperatura constante y eficiente energéticamente.

```
% 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 23. Función `step` para Control de temperatura en lazo cerrado (Modulación de enfriamiento).

Fuente: Propia

2.9. Selección del refrigerante:

Para seleccionar el refrigerante más adecuado para esta aplicación, se va a considerar los siguientes parámetros:

- Dado que la cámara debe mantener congelados 3000 kg de mariscos, se necesita un refrigerante que pueda manejar esta carga térmica.
- La temperatura objetivo es -20°C . Algunos refrigerantes son más eficientes a temperaturas más bajas que otros.
- La eficiencia del sistema también depende del tamaño de la cámara y del espesor del aislamiento. Un buen aislamiento minimiza las pérdidas de calor.
- La cantidad de veces que se abre la puerta afecta la carga térmica. Un refrigerante con una rápida recuperación después de la apertura va a ser beneficioso

- Dado que algunos refrigerantes contribuyen al calentamiento global y agotan la capa de ozono, debemos considerar opciones más sostenibles.

En función de estos factores se presentan algunos refrigerantes idóneos que puedan cumplir con los parámetros ya mencionados (Tabla 5):

Tabla 5. Clasificación de refrigerantes

Fuente: (SL, 2020)

Tipo de refrigerante	Eficiencia Energética (COP)	Impacto Ambiental	Características Generales
R290 (Propano)	Alto	Bajo (es un refrigerante natural)	Refrigerante natural, buena eficiencia a bajas temperaturas y adecuado para aplicaciones de congelación
CO ₂ (Dióxido de carbono)	Moderado	Respetuoso con el medio ambiente	Refrigerante natural, requiere sistemas más complejos
R134a, R404a	Aceptable	Menor impacto ambiental que otros HFC	Utilizado en sistemas de aire acondicionado y refrigeración comercial
R22	Bajo	Potencial de agotamiento de la capa de ozono	Ampliamente utilizado en el pasado debido a su eficiencia y capacidad de enfriamiento

Entre los refrigerantes mencionados, considerando la eficiencia, el impacto ambiental y las características específicas de la cámara frigorífica, se opta por cualquiera de los dos refrigerantes el R290 (propano) o el CO₂ (dióxido de carbono):

Ambos son opciones sólidas. El R290 es más fácil de implementar, mientras que el CO₂ es más sostenible.

2.10. Simulación computacional

En la automatización de cámaras frigoríficas industriales, los Controladores Lógicos Programables (PLC) desempeñan un papel importante, ya que estos dispositivos procesan señales de entrada y generan salidas para regular la temperatura, la humedad y otros parámetros.

De esta manera haciendo uso en conjunto de un lenguaje de programación Ladder, y una herramienta de software utilizada para crear simulaciones de circuitos eléctricos sin

componentes físicos como es la aplicación CADE SIMU, se desarrolló un esquema eléctrico que se encuentra dividido en dos secciones que se detallan a continuación:

i) **Circuito de potencia**

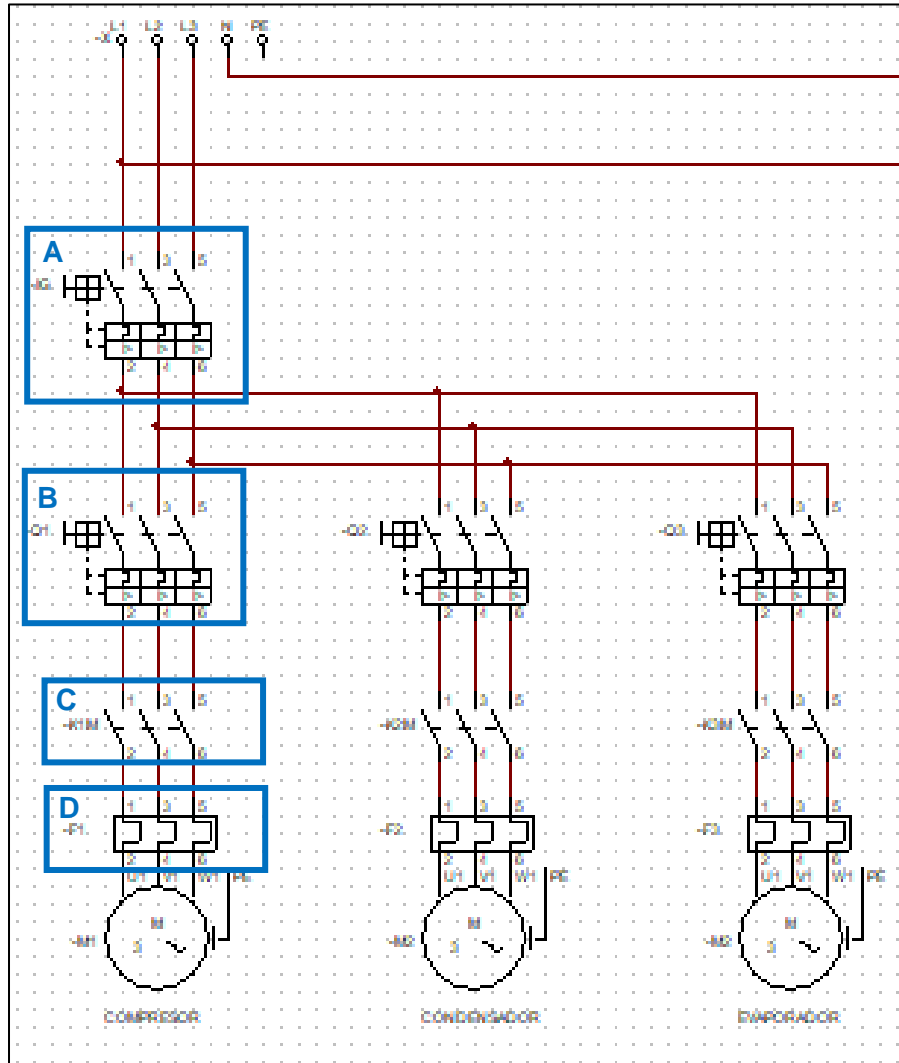


Figura 24. Esquema eléctrico del circuito de potencia.

Fuente: Propia

El esquema gráfico representa el circuito de potencia del sistema de control de la cámara frigorífica donde los componentes clave son los siguientes:

- A. Interruptor principal:** es el dispositivo encargado de proteger el sistema de una sobre corriente, es una medida de seguridad para evitar cualquier tipo de daños.
- B. Termomagnéticos:** son componentes electrónicos, cuya función principal será detectar el sistema de corrientes elevadas como cortocircuitos o sobrecargas, y

desconectar el sistema para protegerlo de condiciones anormales de funcionamiento.

C. Contactores: encargados de conmutar los motores eléctricos que hacen funcionar el compresor, el evaporador y el condensador

D. Relés térmicos: son los dispositivos encargados de desconectar el circuito si existe sobrecalentamiento en los motores eléctricos debido a corrientes elevadas o un funcionamiento prolongado

ii) **Circuito de control**

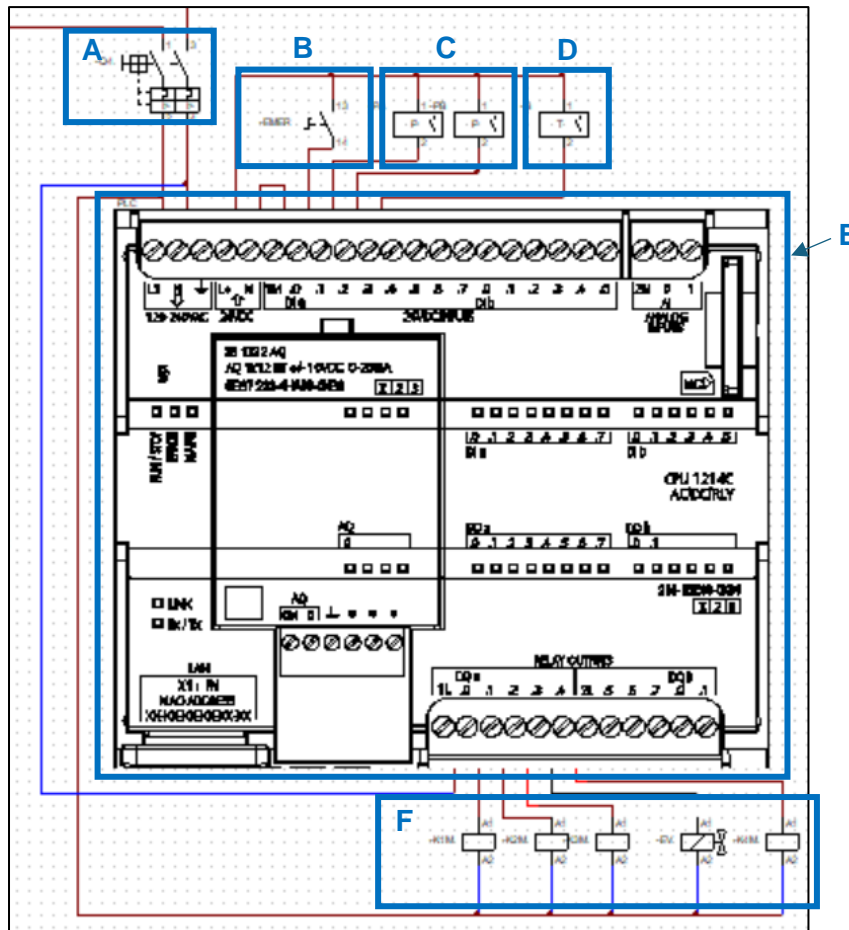


Figura 25. Esquema eléctrico del circuito de control.

Fuente: Propia

El siguiente esquema gráfico representa el circuito de control de la cámara frigorífica donde los componentes clave son los siguientes:

- A. Interruptor secundario:** encargado de suministrar energía eléctrica al PLC, este interruptor se va a encargar de interrumpir el flujo de corriente en caso de emergencia.
- B. Parada de emergencia:** su función es garantizar la seguridad de apagar rápidamente el sistema en caso de situaciones críticas
- C. Presostatos:** controlan la presión del refrigerante
- D. Termostato:** encargado de mantener y regular la temperatura deseada, dentro de los rangos establecidos, activando y desactivando el compresor.
- E. PLC:** encargado de interpretar las señales de los sensores, tanto de temperatura, humedad, presión y ajustar el funcionamiento del sistema para mantener las condiciones deseadas.
- F. Salidas:** controla el compresor, condensador, evaporador, deshumificador, válvula de expansión, para mantener las condiciones deseadas dentro de la cámara frigorífica.

iii) Entradas y salidas

A continuación, se detallan las variables de las entradas y salidas, tanto de temperatura, humedad y presión, que se emplearon para desarrollar el diagrama de escalera del sistema de control cámara frigorífica. (Ver Anexo 5)

Tabla 6. Señales de entrada y salida, analógicas y digitales

Fuente: Propia

ENTRADAS		
PARADA DE EMERGENCIA	EMERG	I0.0
PRESOSTATO DE ALTA	PA	I0.1
PRESOSTATO DE BAJA	PB	I0.2
TERMOSTATO	TEMP	I0.3

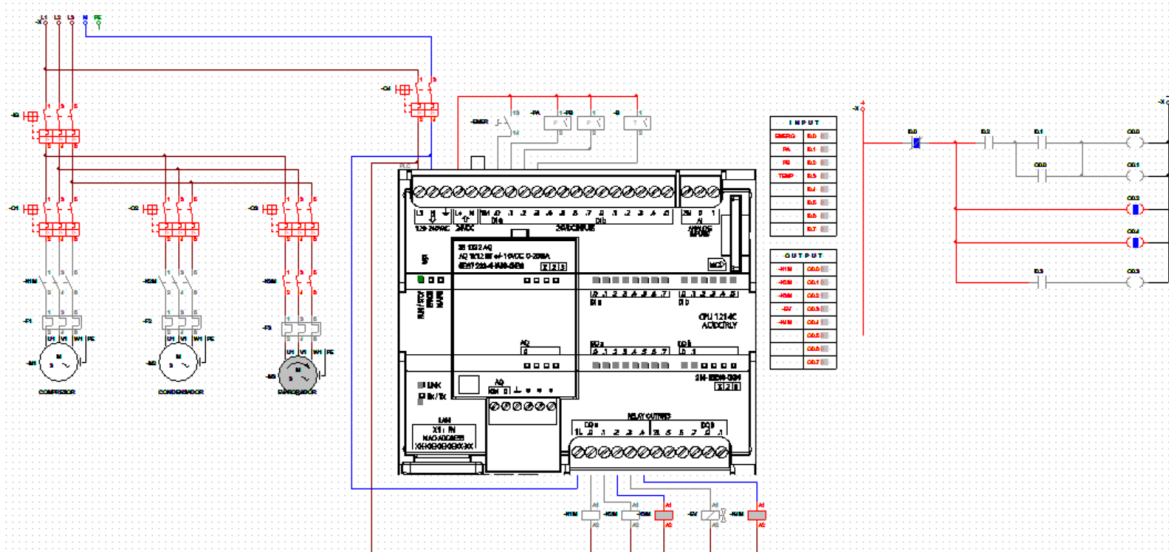
SALIDAS		
COMPRESOR	(-K1M)	Q0.0
CONDENSADOR	(-K2M)	Q0.1
EVAPORADOR	(-K3M)	Q0.2
VÁLVULA DE EXPANSIÓN	(-EV)	Q0.3
DESHUMIFICADOR	(-K4M)	Q0.4

iv) Simulación

Una vez se conecten todos los elementos de la cámara frigorífica a la línea principal de la fuente de energía, y activando tanto el interruptor principal del circuito de potencia, como el interruptor secundario que conecta el PLC, entra en funcionamiento el deshumidificador y el condensador.

El hecho de que el condensador y el deshumidificador permanezcan conectados una vez que se energiza el sistema, se debe a que el condensador es responsable de extraer el calor que hay dentro de la cámara frigorífica. Por otro lado, el deshumidificador se encarga de reducir la humedad dentro de la cámara. Si permanece conectado, se debe a que debe estar funcionando continuamente para mantener la humedad relativa dentro de los límites deseados.

Esto es especialmente importante en aplicaciones donde la humedad excesiva podría afectar la calidad de los productos almacenados como en este caso el marisco congelado.



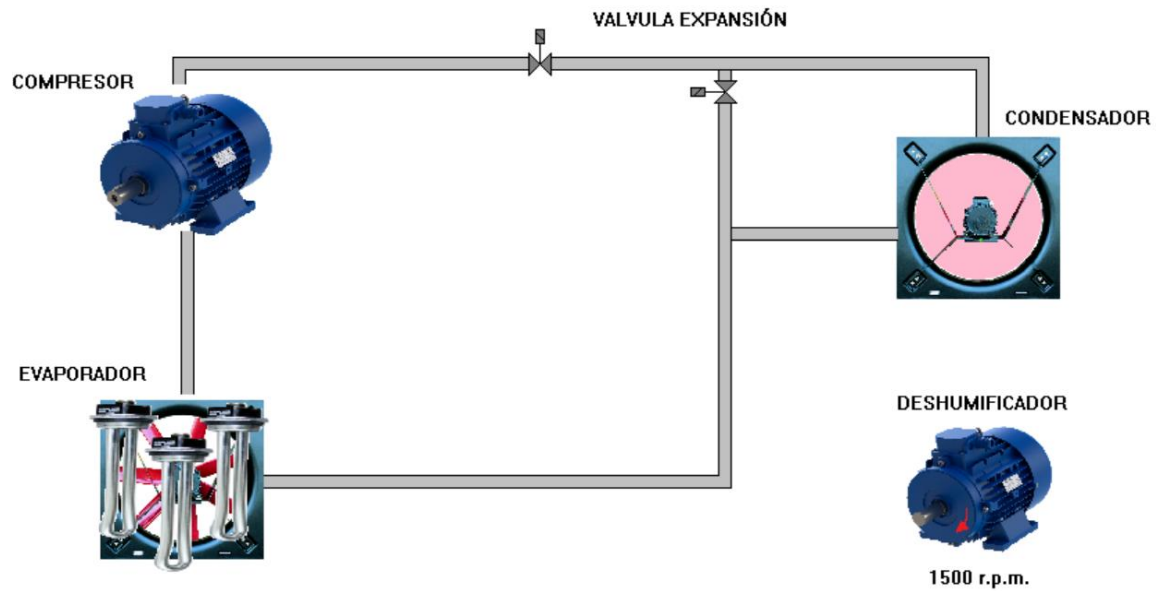


Figura 26. Simulación N°1 ciclo de refrigeración
Fuente: Propia

Por otra parte, el compresor tiene la tarea más importante del ciclo de refrigeración de hacer circular el refrigerante dentro del sistema. Aquí aparecen los presostatos, tanto de alta, como de baja presión.

El presostato de alta presión desactiva el compresor cuando la presión del refrigerante es alta, esto se da después de la compresión donde el refrigerante se encuentra en estado gaseoso y está listo para liberar calor en el condensador

El presostato de baja presión enciende al compresor cuando la presión del refrigerante es baja, esto se da debido a que el refrigerante absorbe el calor del entorno y se evapora para enfriar los productos dentro de la cámara frigorífica.

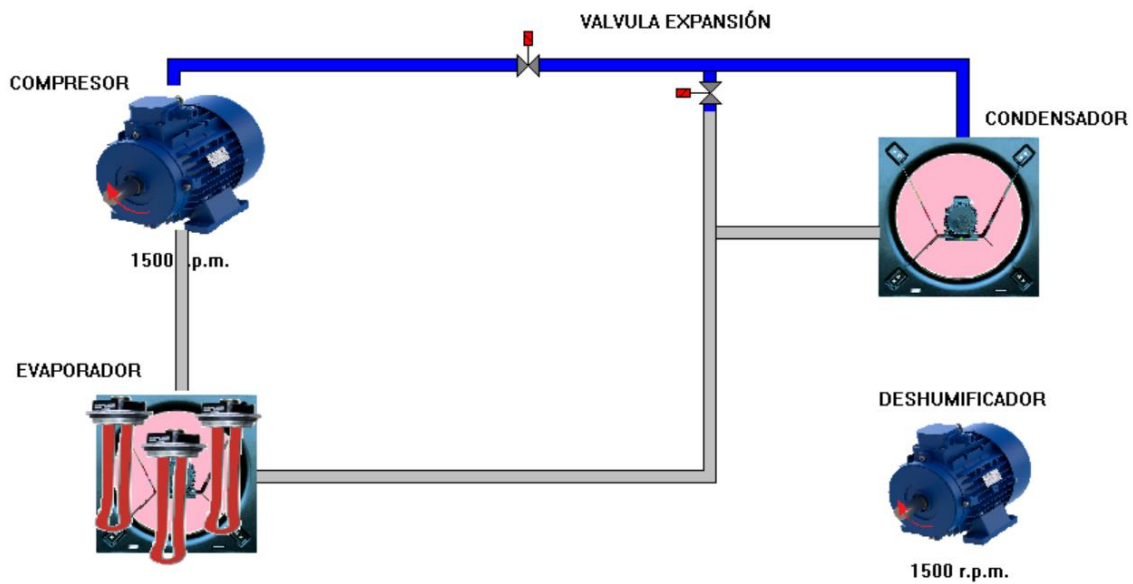
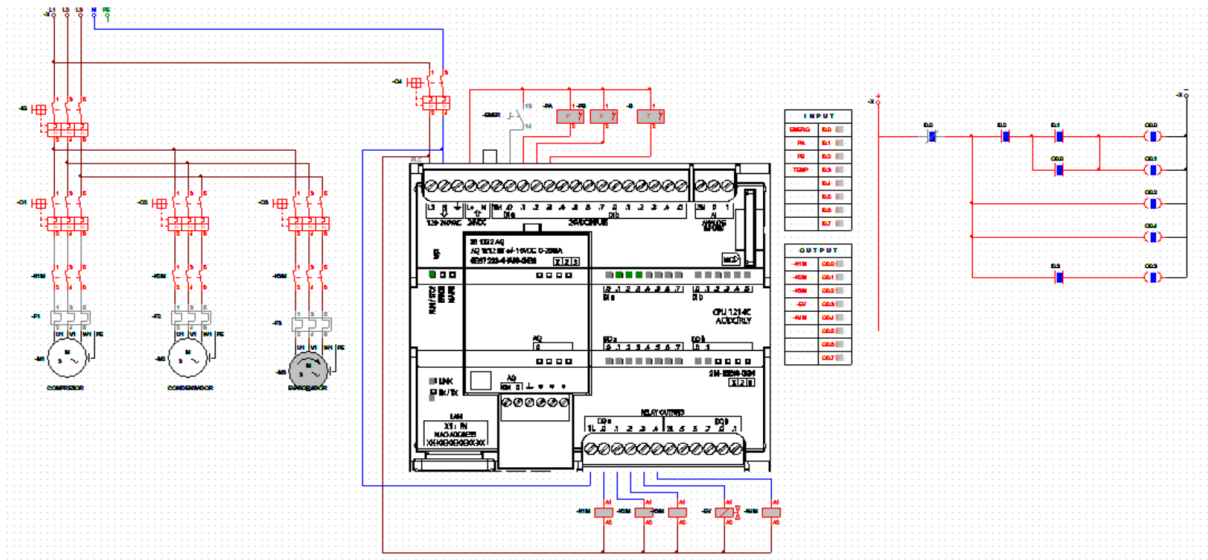


Figura 27. Simulación N°2 ciclo de refrigeración

Fuente: Propia

Una vez encendido el compresor, el termostato será el encargado de monitorear constantemente la temperatura dentro de la cámara frigorífica. Si la temperatura aumenta por encima del límite establecido, el termostato envía una señal al compresor, para activarlo y que se encargue de remover el calor que hay dentro de la cámara frigorífica. Por otro lado, una vez se haya alcanzado la temperatura de congelamiento del marisco, que para este caso es -20°C , el compresor automáticamente se apaga.

3. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de los cálculos realizados. Luego, se interpreta la información recopilada y se analiza para determinar si es necesario modificar o mejorar los procesos y/o el modelo matemático desarrollado.

3.1. Potencia frigorífica

Aquí se indican los resultados obtenidos de las necesidades frigoríficas con las dimensiones, cargas mencionadas y el tiempo de funcionamiento establecido que es de 10 horas, posteriormente se muestra que la potencia frigorífica necesaria para congelar el marisco es **de 4434 [W]**, además se indica en la Tabla 7. las necesidades frigoríficas de cada una de las cargas que influyen en el comportamiento de la cámara frigorífica.

Tabla 7. Necesidades frigoríficas para un período de cálculo de 10 horas.

Fuente: INTARCON

NECESIDADES FRIGORÍFICAS	
Refrigeración del producto (kJ)	125158
Transmisión de calor (kJ)	18634
Renovación de aire (kJ)	10536
Cargas térmicas (kJ)	5315
TOTAL (kJ)	159640

Tabla 8. Potencia frigorífica necesaria.

Fuente: INTARCON

POTENCIA FRIGORÍFICA NECESARIA	
Potencia frigorífica para conservación del producto (W)	958
Potencia frigorífica total (W)	4434

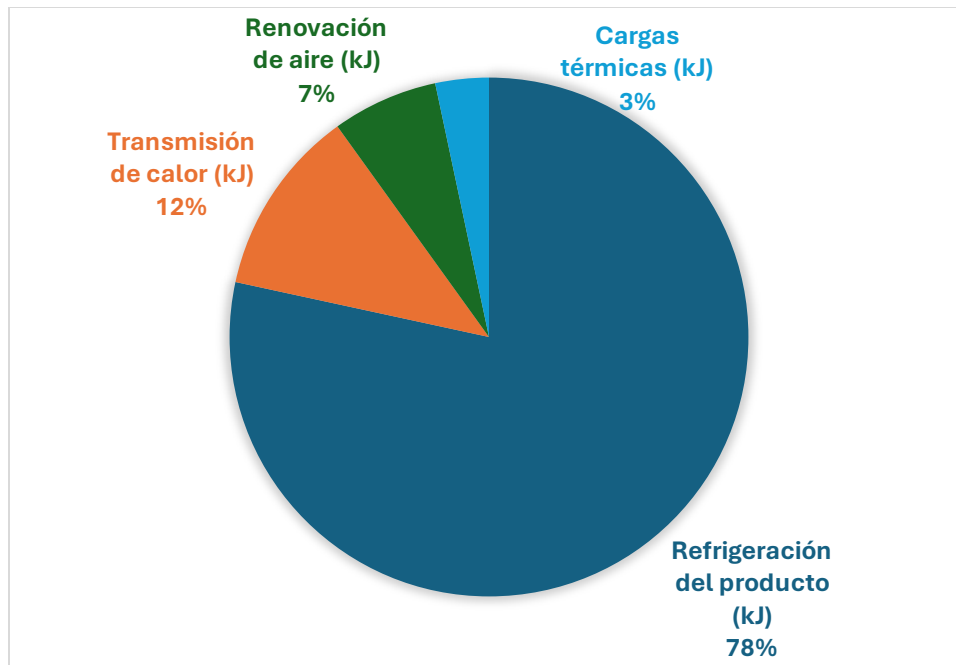


Figura 28. Resultados obtenidos de las necesidades frigoríficas.

Fuente: INTARCON

Es necesario conocer el valor del calor específico (C_p) del producto a congelar que es el marisco, que tiene un valor de $3.7 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$. Una vez obtenido la potencia frigorífica total, y con el mismo software, se determina el equipo que se adecue a las necesidades requeridas, sabiendo que la conexión que se maneja en el país es de 60 Hz. Con estos datos, de entre todas las opciones de equipos que nos proporciona INTERCON, se escoge el equipo que mejor se adapte a las necesidades de construcción y refrigeración.

3.2. Selección del equipo frigorífico

El proceso de selección de equipos frigoríficos en donde con las condiciones de diseño mencionadas y con una alimentación eléctrica de 60Hz correspondiente a la zona de Ecuador, se obtiene un modelo **BCH-NF-2136+B4** el cual usa un refrigerante R404A y tiene una potencia calorífica de 7541 [W] y un COP de 1,58, los valores mencionados se muestran en la figura 29.


Parámetros de selección	Temperatura interior:	<input type="text" value="-20,0"/> °C	Humedad relativa interior:	<input type="text" value="90,0"/> %												
	Temperatura ambiente:	<input type="text" value="15,0"/> °C	Potencia frigorífica:	<input type="text" value="4434"/> W												
Filtro de selección	Régimen de temperatura:	<input type="text" value="baja (-30...-10°C)"/>														
	Construcción:	<input type="text" value="EQUIPOS COMPACTOS"/>														
	Versión:	<input type="text" value="estándar"/>														
	Alimentación eléctrica:	<input type="text" value="60Hz"/>														
	Refrigerante:	<input type="text" value="todos"/>														
Modelos	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Modelo</th> <th>Refrigerante</th> <th>Potencia frigorífica</th> <th>Potencia absorbida</th> <th>COP</th> <th>Dim.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>BCH-NF-2136+B4</td> <td>R404A</td> <td>7541 W</td> <td>4.77 kW</td> <td>1.58</td> <td>170%</td> </tr> </tbody> </table>	Modelo	Refrigerante	Potencia frigorífica	Potencia absorbida	COP	Dim.	BCH-NF-2136+B4	R404A	7541 W	4.77 kW	1.58	170%			
Modelo	Refrigerante	Potencia frigorífica	Potencia absorbida	COP	Dim.											
BCH-NF-2136+B4	R404A	7541 W	4.77 kW	1.58	170%											

Figura 29. Selección de equipo frigorífico.

Fuente: INTARCON

De la Figura 29, se puede observar que la potencia frigorífica es de 7541 W. Por lo cual se selecciona un equipo que mejor se adapte a los requerimientos de energía, debido a que otros equipos no alcanzaban la potencia requerida de 4434 W. Por ejemplo, de la ficha técnica, se sabe que el consumo anual de electricidad es de 25625 kWh, y en el país el costo es de 0.0858 USD/kWh, entonces el costo de operar el equipo es de 2198 USD al mes.

Entonces, los datos que se necesitan para la simulación del proceso de enfriamiento y el control de temperatura son:

$$Potq = 7541 \text{ W}$$

$$COP = 1.58$$

3.2. Potencia del compresor:

Finalmente, se calcula la potencia y energía necesarias para el compresor basándose en el Coeficiente de Performance (COP) y la potencia calórica requerida para mantener las condiciones deseadas dentro de la cámara.

$$Potq_{compresor} = \frac{Potq}{COP} \quad (11)$$

Conociendo el valor de la potencia de la cámara frigorífica que es de -7541 W y el COP, según el fabricante es de 1.58, da como resultado lo siguiente:

$$Potqcompresor = \frac{-7451W}{1.58} = 4772.78 W$$

$$Potqcompresor \approx 4.77 KW$$

Entonces, se necesitaría un compresor con una potencia de 4.77 kW para cumplir con los requerimientos de congelamiento de la cámara. Este valor de COP mayor que 1 significa que la máquina tiene la capacidad de poder generar más energía de la que consume. Sin embargo, se consume mucha energía eléctrica debido a los grandes requerimientos de bajas temperaturas para la conservación del marisco.

3.3. Gráficas de control en MATLAB y análisis

3.3.1. Enfriamiento inicial (congelamiento)

Como ya se seleccionó una cámara frigorífica con una potencia de 7541 W, y en donde el tiempo de funcionamiento es de 10 horas, se obtiene los resultados mostrados en la Figura 30.

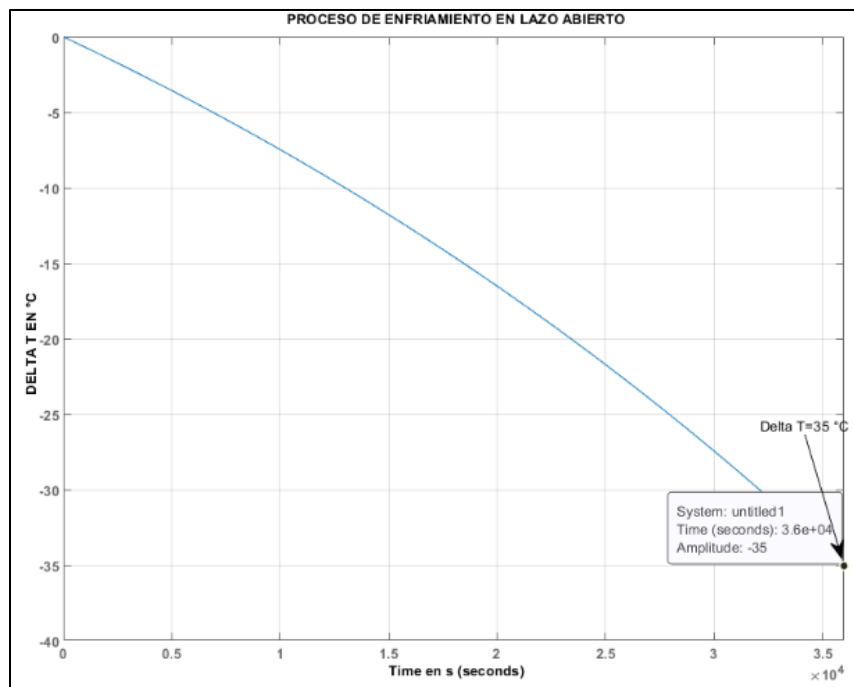


Figura 30. Proceso de enfriamiento en lazo abierto de cámara frigorífica de 7541W de potencia

Fuente: Propia

De la Figura 30, el proceso de enfriamiento muestra que se alcanza el valor de $\Delta T = 35^{\circ}C$ en un tiempo de 35000 segundos, es decir en unas 10 horas de funcionamiento, esto se logra sintonizando el valor del coeficiente global de transferencia de calor (U) que es de

$5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, esto se logra después de varias iteraciones hasta alcanzar el valor adecuado para lograr la diferencia de temperatura de entrada de 15°C y la temperatura de congelamiento de -20°C .

Para el sistema de cámaras frigoríficas no es necesario sintonizar la potencia debido que esta potencia se obtiene del fabricante, que en este caso es INTARCON. Este valor de U de $5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ muestra que en esta cámara frigorífica se tiene un buen aislamiento térmico de la cámara, lo que significa que será más eficiente en la retención de temperaturas frías en el interior para mantener el marisco congelado en bloques y en la prevención de la entrada de calor desde el exterior. Sin embargo, este valor bajo de U significa que el equipo tiene un costo elevado.

3.3.2. Control de temperatura en lazo abierto con termostato

En esta cámara frigorífica de 7541 W de potencia y tomando en cuenta que el régimen de funcionamiento de los termostatos de las cámaras frigoríficas es de alrededor de una vez por hora (alrededor de 25 min), se debe tener en cuenta que cada fabricante puede proporcionar un tiempo de régimen de funcionamiento. Con lo mencionado anteriormente, se obtienen los resultados mostrados en la Figura 31.

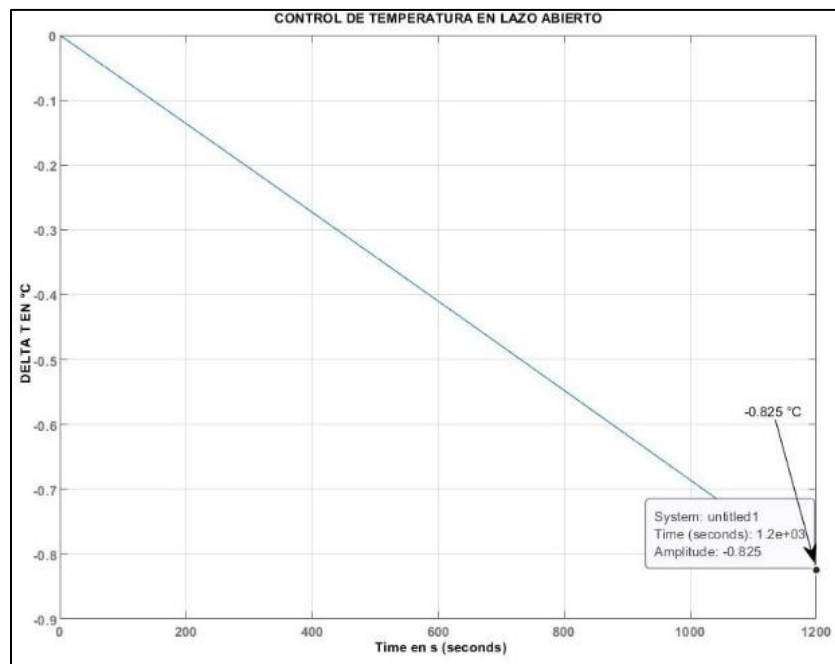


Figura 31. Control de temperatura en el termostato en lazo abierto

Fuente: Propia

De la Figura 31, se puede observar que el termostato se calibraría en un $\Delta T = -0.825^{\circ}\text{C}$, esto quiere decir que cuando el termostato alcance la temperatura de timbre, que en este caso es $T_{timbre} = -19.175^{\circ}\text{C}$, el termostato baja la temperatura un $\Delta T = -0.825^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar la temperatura de operación $T_{op} = -20^{\circ}\text{C}$, todo esto se lo hace en el tiempo de régimen que para esta cámara es de 1200 s, es decir 7,20 minutos cada hora de funcionamiento. Como se puede observar, el termostato se calibraría con una temperatura menor a -1°C , por lo que se necesita de un control preciso del termostato, ya que cualquier falla haría que se pierda eficiencia de congelamiento y no se lograría congelar el producto.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones:

- La revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica es fundamental para identificar los métodos y estrategias más eficientes en el control de cámaras frigoríficas industriales. Esto proporciona una base sólida para el diseño y desarrollo del sistema de control.
- La automatización mejora la calidad, la eficiencia y la seguridad en las cámaras frigoríficas, lo que es fundamental para mantener la cadena de frío y garantizar la frescura de los productos almacenados
- La simulación del programa de control es esencial. Realizar pruebas bajo diferentes condiciones operativas permitirá evaluar su funcionamiento y ajustar parámetros según sea necesario.
- Para obtener una diferencia de temperatura mayor dentro de la cámara frigorífica se necesita aumentar el coeficiente de transferencia de calor, pero dicho aumento en el ΔT implica el uso de un equipo que ocupa mayor cantidad de energía para su funcionamiento
- El régimen de funcionamiento de una cámara frigorífica en el transcurso de una 1 hora es de 20 minutos esto es equivalente al tiempo de encendido del compresor, por ello un mayor COP implica un compresor que aporta menor energía para alcanzar las condiciones de temperatura interior.
- El refrigerante R290 (propano) es la opción más eficiente desde el punto de vista energético, debido a que tiene un Coeficiente de Desempeño (COP) alto y requiere menos carga para lograr el mismo enfriamiento que otros refrigerantes, sin embargo, el refrigerante R404A a pesar de ser muy dañino con el medio ambiente es ampliamente utilizado en sistemas de refrigeración comercial e industrial.

4.2. Recomendaciones

- Validar el sistema de control de la cámara frigorífica en un entorno controlado antes de la implementación real. Asegurarse de que el PLC regule correctamente las variables y garantice la conservación de los productos almacenados.

- Realiza pruebas iterativas durante todas las etapas del proyecto, tanto como para modelación matemática, la programación y la simulación del sistema de control desarrollado.
- Cada vez que se abre la puerta de la cámara frigorífica, se produce un desequilibrio de temperatura. Para mitigar esto, considerar instalar sistemas de apertura y cierre rápido. Estos sistemas ayudan a reducir las pérdidas de frío y a mantener la eficiencia energética.

4.3. Trabajos Futuros:

- Desarrollar sistemas de control de automatización modulares y adaptables para cámaras frigoríficas. Esto permitiría una implementación más rápida y ajustes más sencillos a medida que cambien las necesidades
- Explorar sistemas de enfriamiento más eficientes, como enfriadores de agua o glicol con cargas bajas de refrigerante.
- Desarrollar sistemas de trazabilidad automatizados para rastrear y monitorear productos dentro de la cámara frigorífica. De esta manera se podrá llevar a cabo, un registro de los productos que ingresan o salen de la cámara, así como también se podrá acceder a un historial completo de los productos almacenados, lo que es útil para auditorías y seguimiento de estos.
- Automatizar los flujos de productos dentro de las cámaras frigoríficas para reducir la dependencia de la intervención manual, como por ejemplo utilizar bandas transportadoras para mover productos dentro de la cámara, de igual manera desarrollar un almacenamiento inteligente, de tal manera que se pueda organizar y apilar productos de manera eficiente, maximizando el espacio disponible.
- Automatizar los sistemas de iluminación automáticos con sensores de presencia y temporizadores. Hoy en día la iluminación LED ha reducido significativamente el consumo de energía en comparación con sistemas de iluminación tradicionales.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguinaga, Á. (2008). *Control Automático*. Quito: EPN.
- Aguinaga, Á. P. (2009). *Aprovechamiento holístico de la mecatrónica en los procesos de manufactura industriales*. Quito: EPN.
- Air-Frisco*. (2020). Obtenido de <https://airfrisco.es/como-funciona-el-sistema-de-refrigeracion-y-cuales-son-sus-partes/>
- Bolton, W. (2013). *Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario (5a ed.)*. Alfaomega Grupo Editor.
- Brotons, A. (2004). *Sistemas de Control*. Obtenido de https://www.google.com/search?q=que+es+un+controlador+en+un+sistema+de+control&sca_esv=d312657b286d9ff2&rlz=1C1CHBF_esEC1089EC1089&sxsrf=ADLYWIJFCe-JxHi4rs9tx6RQGleW-4-fdQ%3A1716401831955&ei=pzZOZo_UOYWFwbkPkayzmAc&oq=que+es+un+controlador+en+control&gs_l
- Controls, K. (2024). *Danfoss*. Obtenido de <https://www.kempstoncontrols.ae/067N2305/Danfoss/sku/941972>
- Especificar, R. (2024). *ESPECIFICAR, Soluciones para agua, energía y sustentabilidad*. Obtenido de <https://especificarmag.com.mx/todo-sobre-los-actuadores-html/>
- Hidalgo, U. A. (2024). *Comunicaciones en redes. Tipos de señales Analógica-Digital*. Obtenido de http://cidecame.uaeh.edu.mx/lcc/mapa/PROYECTO/libro27/133_tipos_de_seales_analgicadigital.html
- IMEPI. (s.f.). *Automatización Industrial*. Obtenido de <https://imepi.com.mx/que-es-un-plc-una-introduccion-a-los-controladores-logicos-programables-y-su-papel-en-la-automatizacion-industrial/>
- Industrial, S. (2022). *SDI Industrial - Controladores*. Obtenido de <https://sdindustrial.com.mx/blog/que-es-un-controlador-industrial/>
- Industrial, S. (2022). *SDI Industrial - Sensores*. Obtenido de <https://sdindustrial.com.mx/blog/sensores/>
- Leonel Corona, G. A. (2014). *Sensores y actuadores. Aplicaciones con arduino*. México: Patria. Obtenido de <https://cursos.aiu.edu/Automatizacion%20y%20Control/PDF/Tema%203.pdf>
- Leonel G. Corona Ramírez, G. S. (2014). *Sensores y Actuadores*. México D.F. : Grupo Editorial Patria.
- Leslie Monter, D. R. (2024). *Comunicaciones en Redes - Tipos de señales (Analógica-Digital)*. Obtenido de http://cidecame.uaeh.edu.mx/lcc/mapa/PROYECTO/libro27/133_tipos_de_seales_analgicadigital.html

- México, U. N. (2018). *Control Electromecánico*.
- Primos, I. (2020). *IPR Partes y Repuestos* . Obtenido de <https://iprpartesyrepuestos.com/producto/a-a-samsung-multi-condensadora-inverter/>
- Rodriguez, Ó. (2017). *Isotermia soluciones térmicas*. Obtenido de <https://www.camarasfrigorificas.es/blog/como-elegir-evaporadores-camara-frigorifica/>
- SL, C. A. (2020). *Comercial Asiscra SL - Clasificación y tipo de gases refrigerantes* . Obtenido de https://www.google.com/search?sca_esv=ee2ba981cbde4aa8&rlz=1C1CHBF_esEC1089EC1089&sxsrf=ADLYWIKESbKJc6_ScSYqXYtxX9GkAjDzA:1721270004182&q=clasificaci%C3%B3n+de+los+refrigerantes&source=Inms&fbs=AEQNm0CbCVgAZ5mWEJDg6aoPVcBgWizR0-0aFOH11Sb5tINhd7L9QFIHbGCC
- Solutions, D. P. (2024). *Danfoss Power Solutions*. Obtenido de <https://frigoristas.wordpress.com/camaras-frigorificas-1/>
- Velázquez Martí, B. (2022). *Cargas térmicas en refrigeración*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- Yunus A. Çengel, M. A. (2011). *Termodinámica (7a ed.)*. México D.F.: McGraw-Hill.

ANEXOS

ANEXO 1. Resultados de sistemas de enfriamiento

9/9/23, 16:10		Calculadora frigorífica				
<h3>Cámara frigorífica</h3>						
Tipo de cámara	Cámara frigorífica modular					
	Espesor de aislamiento:	200 mm				
	Aislamiento del suelo:	sí				
	Largo (interior):	3.00 m				
	Fondo (interior):	2.00 m				
	Alto (interior):	3.00 m				
	Volumen interior:	18.00 m³				
Aplicación	Conservación a temperatura negativa		Temperatura de cámara:	-20.0 °C		
Tipo de producto	MARISCO CONGELADO			Temperatura de conservación:	-20.0 °C	
	Humedad de conservación:	90 %		Punto de congelación:	-2.2 °C	
	Contenido en agua:	84 %		Calor específico:	3.7 kJ/kg K	
	Calor de respiración:	0.0 kJ/kg		Calor específico congelado:	1.9 kJ/kg K	
Carga de producto	Densidad de carga:	167 kg/m³		Carga total:	3000 kg	
	Tasa de rotación diaria:	12 %/24h		Rotación diaria:	360 kg/24h	
	Temperatura de entrada:	15.0 °C				
Enfriamiento del producto	Forma del producto:	bloque		Peso por pieza:	0.10 kg	
	Largo del producto:	100 mm		Ancho del producto:	100 mm	
	Espesor del producto:	11 mm		Densidad:	936 kg/m³	
	Conductividad:	1.4 W/m-K		Velocidad del aire:	0.1 m/s	
	Temperatura final en el centro del producto:	-20.0 °C		Tiempo de enfriamiento:	24.00 h	
	Temperatura del aire:	-20.0 °C				
Emplazamiento	en interior de edificio		Altitud:	2812 m		
	Temperatura ambiente:	15.0 °C		Humedad relativa ambiente:	39 %	
Aislamiento térmico	Pared:	Poliuretano inyectado [0.025 W/mK]	área:	34.6 m²	espesor:	200 mm
	Techo:	Poliuretano inyectado [0.025 W/mK]	área:	7.0 m²	espesor:	200 mm
	Suelo:	Poliuretano inyectado [0.025 W/mK]	área:	7.0 m²	espesor:	200 mm
	Puerta:	Poliuretano inyectado [0.025 W/mK]	área:	2.0 m²	espesor:	150 mm
Ventilación natural	Aperturas diarias de puerta:		12.0 /24h		Renovaciones diarias:	12.0 /24h
Resistencia de puerta	Potencia unitaria:		10 W/m		Perímetro:	5.2 m
Desescarche	Tipo de desescarche:		eléctrico			
Ventiladores	Caudal de aire:		150 m³/h		Potencia eléctrica:	0.023 kW

ANEXO 2. Ficha técnica equipo frigorífico compacto, modelo BCH-NF-2136 INTARCON.

Ficha técnica: BCH-NF-2136+B4				
Selección	Marca de equipos:	INTARCON		
	Modelo de equipo:	BCH-NF-2136+B4		
	Descripción:	Equipo frigorífico compacto de temperatura negativa en construcción horizontal .		
				
Condiciones de cálculo	Temperatura interior:	-20.0 °C	Humedad relativa interior:	90.0 %
	Temperatura ambiente:	15.0 °C	Altitud:	0 m
Prestaciones	Potencia frigorífica:	7541 W	Potencia absorbida:	4,77 kW
	Intensidad nominal:	7,5 A	Intensidad máxima:	14,0 A
	Caudal de aire evaporador:	7000 m³/h	Caudal de aire condensador:	4000 m³/h
	Refrigerante:	R404A	Carga de refrigerante:	2,5 kg
	Alimentación eléctrica:	460V.3.60	Rendimiento COP total:	1,58 W/W
Dimensiones del condensador				
	Largo:	1560 mm	Ancho:	1350 mm
	Alto:	1150 mm	Peso:	323 kg
	Nivel de presión sonora a 10m:	47 dB(A)		
Parámetros de Ecodiseño	Temperatura interior:	-20 °C	Humedad relativa interior:	90.0 %
	Consumo anual de electricidad (Q):	25625 kWh	Factor de rendimiento energético estacional (SEPR):	1,07
Parámetros a plena carga y temp. ambiente de 32°C	Potencia de refrig. nominal (P_A):	3,69 kW		
	COP nominal (COP_A):	0,83	Potencia utilizada nominal (D_A):	4,44 kW

ANEXO 3. Características adicionales equipo frigorífico modelo BCH-NF-2136 INTARCON

Descripción

Equipos para refrigeración de cámaras a temperatura negativa para la conservación de productos congelados.



CH

Características especiales

- Desescarche por gas caliente en batería y bandeja, y resistencia de desagüe.

Tabla de características

400V-III-50 Hz

REFRIGERANTE	COMPRESOR	COMPRESOR		POTENCIA FRIGORÍFICA (W) ⁽¹⁾				POTENCIA ABSORB. NOMINAL (kW) ⁽¹⁾	INTENS. MÁXIMA ABSORB. (A)	EVAPORADOR			CONDENSADOR		CARGA R-404A (kg)	PESO (kg)	SPL dB(A) ⁽²⁾	
		SERIE / MODELO	CV	MODELO	TEMPERATURA DE CÁMARA					VENTILADOR Ø mm	CAUDAL (m3/h)	ALCANCE (m)	VENTILADOR Ø mm	CAUDAL (m3/h)				
					-20°C	-25°C	-30°C											-35°C
1x hermético		BCH-NF-1096	3 1/2	NTZ96	3.370	2.550	1.830	1.200	3,1	11	1x Ø450	5.250	22	1x Ø450	3.700	2,0	273	36
		BCH-NF-1108	4 1/3	NTZ108	3.940	3.070	2.270	1.550	3,6	13	1x Ø450	5.250	22	1x Ø450	3.700	2,0	273	34
		BCH-NF-1136	5	NTZ136	4.650	3.770	2.850	2.010	4,6	16	1x Ø450	5.250	22	1x Ø450	3.700	2,0	273	29
		BCH-NF-2136	5	NTZ136	5.110	3.940	2.920	2.010	5,0	16	1x Ø500	7.500	26	1x Ø450	4.000	2,5	325	29
		BCH-NF-2215	7 1/2	NTZ215	6.910	5.600	4.200	2.990	6,7	24	1x Ø500	7.500	26	1x Ø450	4.000	3,0	356	36
		BCH-NF-2271	10	NTZ271	8.650	7.180	5.790	4.310	8,4	29	1x Ø500	7.500	26	2x Ø450	6.500	4,0	363	36

ANEXO 4. Script de la simulación computacional para la cámara frigorífica

% CONTROL DE CÁMARA FRIGORÍFICA PARA CARNE CONGELADA

clear all;

% COEFICIENTES

ancho=2; % ancho de cámara frigorífica en m

largo=3; % largo de cámara frigorífica en m

alto=2; % alto de cámara frigorífica en m

Ac=2*ancho*largo+2*ancho*alto+2*largo*alto; % area lateral m2

m=2000; % masa del producto kg

Cp=3100; % calor específico del producto J/(oK*kg)

Tambiente=15; % temperatura de entrada del agua líquida oC

Tcamara=-15; % temperatura de salida del vapor saturado oC

deltaT=Tcamara-Tambiente % delta temperatura de enfriamiento oC

tiempoenfriamiento=3600*4.2; % tiempo de enfriamiento 8 horas ref.

U=5; % coeficiente global de transferencia de calor W/(oK*m2)

perd=U*Ac; % pérdidas por deltaT unitario

perdidas=U*(Ac)*deltaT % cálculo de las pérdidas totales W

potq=-10140 % potencia calórica W

eficienciaenfriamiento=(potq-perdidas)*100/potq % eficiencia 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 (CONGELAMIENTO)

% EN LAZO ABIERTO (TERMOSTATO)

step(potq*Gp1,tiempoenfriamiento);

pause;

% CONTROL EN LAZO ABIERTO CON TERMOSTATO

regimen=1200;% Normalmente regimen en s

% Normalmente termostato se calibra en -1 a -3 °C en régimen

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=1.58;

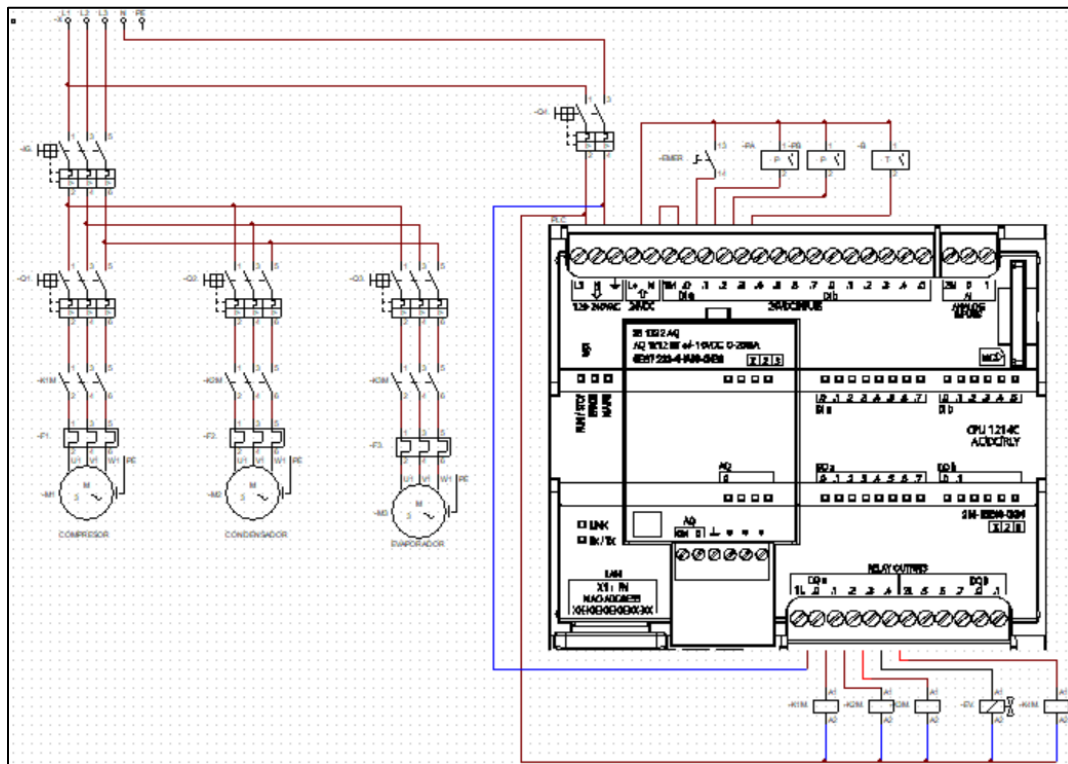
potqkW=-potq/1000/COP %potencia del compresor

MJ=potqkW*tiempo

enfriamiento/1000

kWh=MJ/3.6

ANEXO 5. Esquema eléctrico general del sistema de control de una cámara frigorífica



ANEXO 6. Diagrama en escalera del sistema de control de una cámara frigorífica

