

**INCORPORACIÓN DE CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES PARA  
LA RACIONALIZACIÓN DE LOS COSTOS ASOCIADOS A EQUIPOS DE  
REFRIGERACIÓN INDUSTRIAL**

**KAROL VANESSA AGUIRRE MEZA**

**UNIVERSIDAD EAN  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
BOGOTÁ  
2024**

**INCORPORACIÓN DE CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES PARA  
LA RACIONALIZACIÓN DE LOS COSTOS ASOCIADOS A EQUIPOS DE  
REFRIGERACIÓN INDUSTRIAL**

**KAROL VANESSA AGUIRRE MEZA**

**Directora:**

**LUISA FERNANDA CARVAJAL DÍAZ, PhD**

**Trabajo presentado como requisito parcial para obtener el título de Ingeniera  
Mecatrónica**

**UNIVERSIDAD EAN  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
BOGOTÁ  
2024**

## AGRADECIMIENTOS:

DEDICATORIA:

## Tabla de contenido

	Pág.
1. Introducción .....	11
2. Objetivos .....	12
2.1. Objetivo general .....	12
2.2. Objetivos específicos .....	13
3. Definición del problema .....	13
4. Justificación .....	15
5. Análisis de Requerimientos .....	18
6. Marco Teórico.....	18
6.1. Sistemas de refrigeración industrial.....	18
6.2. Controladores Lógicos Programables – PLCs .....	21
6.3. Costos de operación .....	22
6.4. Costos de mantenimiento.....	26
7. Metodología .....	28
8. Análisis de las Restricciones.....	30
9. Factores generadores de costos en la operación y mantenimiento de equipos de refrigeración industrial .....	32
9.1. Factores operativos .....	32
9.2. Factores de mantenimiento .....	36
10. Experiencias internacionales en la aplicación de PLCs para optimizar la operación y el mantenimiento de sistemas industriales.....	40
11. Opciones para racionalizar los costos operativos de sistemas de refrigeración industrial 46	
12. Análisis de costos de la implementación .....	52
13. Conclusiones .....	59
Referencias Bibliográficas.....	61

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Rubros a incluir en los costos de operación de un proceso industrial .....	25
Tabla 2. Análisis PESTAL del trabajo .....	30
Tabla 3. Participación de los costos de refrigeración según el sector industrial .....	55
Tabla 4. Reducción de costos de refrigeración mediante implementación de PLC .....	58

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Sistemas de refrigeración .....	19
Figura 2. Fases de la investigación.....	29
Figura 3. Imagen esquemática y real de un sistema experimental de refrigeración por compresión de vapor y puntos de medición. ....	47
Figura 4. Captura de datos del sistema de refrigeración para la detección y el diagnóstico de fallas.....	48
Figura 5. Sistema de gestión de energía basado en PLC para una instalación de fabricación .....	49
Figura 6. Actualización de los controles para mejorar los procesos en planta de refrigeración industrial .....	50
Figura 7. Programador de consumo de energía óptimo en tiempo real en microrred inteligente .....	52

## **RESUMEN EJECUTIVO**

A través de este documento se presenta la propuesta de la investigación a realizar como requisito para acceder al título de Ingeniera Mecatrónica en la Universidad EAN. El tema del trabajo es la racionalización de los costos generados por los equipos de refrigeración industrial, mediante el empleo de Controladores Lógicos Programables (PLC). El documento consta de ocho secciones que proporcionan un marco completo para la investigación. En primer lugar, se presenta una introducción detallada sobre el tema en cuestión, contextualizando su relevancia y estableciendo las bases para el desarrollo del estudio. Luego, se formulan los objetivos que serán abordados a lo largo del documento, delineando las metas que se pretende alcanzar.

Posteriormente, se procede a precisar el problema objeto de investigación, identificando sus aspectos clave y delimitando su alcance para una comprensión más precisa. Asimismo, se exponen las razones fundamentales que justifican la necesidad de llevar a cabo esta investigación, subrayando su importancia y contribución al conocimiento en el campo. Además, se detallan los requerimientos específicos que surgen del desarrollo de este trabajo, tanto en términos metodológicos como técnicos. También se presenta un marco de referencia teórico que abarca los conceptos fundamentales relacionados con los objetivos planteados, para mejor análisis y la comprensión del tema.

Para complementar y respaldar el contenido expuesto, se proyecta la metodología que se empleará para el desarrollo de los objetivos y se analizan las restricciones que se presentan para el desarrollo del trabajo. En este avance se desarrolla el primer objetivo específico, correspondiente a los factores generadores de costos en la operación y mantenimiento de equipos de refrigeración industrial

**Palabras claves:** manual, costos, PLC, refrigeración, mantenimiento, operación.

## ABSTRACT

Through this document, the research proposal is presented as a requirement to obtain the title of Mechatronic Engineer at Universidad EAN. The topic of the work is the rationalization of costs generated by industrial refrigeration equipment, through the use of Programmable Logic Controllers (PLC). The document consists of eight sections that provide a comprehensive framework for the research. Firstly, a detailed introduction to the topic at hand is presented, contextualizing its relevance and establishing the basis for the study's development. Then, the objectives to be addressed throughout the document are formulated, outlining the goals to be achieved.

Subsequently, the research problem is specified, identifying its key aspects and delimiting its scope for a more precise understanding. Additionally, the fundamental reasons justifying the need to carry out this research are exposed, highlighting its importance and contribution to knowledge in the field. Furthermore, specific requirements arising from the development of this work are detailed, both in methodological and technical terms. A theoretical framework is also presented, covering the fundamental concepts related to the stated objectives, for better analysis and understanding of the topic.

To complement and support the content presented, the methodology to be used for the development of the objectives is outlined, and the constraints encountered in the development of the work are analyzed. In this advance, the first specific objective is developed, corresponding to the cost-generating factors in the operation and maintenance of industrial refrigeration equipment.

**Keywords:** manual, costs, PLC, refrigeration, maintenance, operation.

## **1. Introducción**

Existen diversas razones por las cuales algunas empresas pueden descuidar la racionalización de los costos asociados con la operación y el mantenimiento de equipos de refrigeración industrial. Algunas empresas pueden no estar plenamente conscientes del impacto que los costos asociados con la operación y el mantenimiento de equipos de refrigeración tienen en su rentabilidad general, lo que puede llevarlas a subestimar la importancia de optimizar estos costos y priorizar otras áreas de gasto.

En otros casos, las empresas pueden carecer de los recursos financieros, humanos o técnicos necesarios para implementar estrategias efectivas de racionalización de costos en sus equipos de refrigeración, dado que el mantenimiento adecuado de los equipos a menudo requiere inversiones iniciales significativas y la asignación de personal cualificado. Así mismo, algunas empresas pueden estar más enfocadas en obtener ganancias a corto plazo y pueden descuidar la inversión en la optimización de los costos operativos a largo plazo. Esto puede deberse a presiones financieras inmediatas o a una falta de visión a largo plazo por parte de la dirección.

La falta de conocimientos técnicos y capacitación en el personal responsable de la gestión de los equipos de refrigeración puede llevar a prácticas ineficientes de operación y mantenimiento. Sin una comprensión adecuada de cómo funcionan los equipos y cómo optimizar su rendimiento, es probable que se pasen por alto oportunidades para reducir costos. También es posible que exista una cultura organizativa que no prioriza la eficiencia operativa o que no fomenta la innovación en la gestión de costos, lo que puede deberse a la falta de liderazgo que promueva un enfoque proactivo hacia la optimización de costos.

Igualmente, en mercados altamente competitivos, algunas empresas pueden estar más enfocadas en reducir los precios de sus productos para mantener su posición en el mercado, lo que puede llevar a recortes de costos en áreas como el mantenimiento de equipos de refrigeración. En resumen, las empresas pueden descuidar la racionalización de los costos asociados con la operación y el mantenimiento de equipos de refrigeración industrial debido a una variedad de factores, que van desde la falta de conciencia hasta presiones financieras y culturales dentro de la organización. Sin embargo, es fundamental que las empresas reconozcan la importancia de optimizar estos costos para mejorar su rentabilidad a largo plazo.

En este trabajo se aborda una investigación tendiente a incorporar los Controladores Lógicos Programables - PLCs – para racionalizar los costos asociados a la operación y mantenimiento de los equipos de refrigeración industrial.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general**

Elaborar una guía a con las medidas a implementar para la racionalización de los costos asociados a la operación y el mantenimiento de equipos de refrigeración industrial mediante la incorporación de PLCs.

## **2.2. Objetivos específicos**

1. Establecer los factores que generan los costos más representativos de la operación y mantenimiento de equipos de refrigeración industrial.
2. Describir experiencias internacionales exitosas en la aplicación de PLCs para la optimización de la operación y el mantenimiento de sistemas industriales.
3. Definir opciones concretas para racionalizar los costos que se generan por la operación de sistemas de refrigeración industrial.

## **3. Definición del problema**

Con frecuencia los equipos de refrigeración industrial no logran racionalizar los costos asociados con la operación y el mantenimiento de equipos, pueden enfrentar diversas situaciones desafiantes. La falta de estrategias eficientes puede llevar a un aumento en los costos operativos, incluyendo el consumo excesivo de energía, reparaciones frecuentes y pérdida de productos debido a fallos en el equipo. De acuerdo con las cifras presentadas por Gómez (2021), la optimización de la gestión energética en las empresas industrial puede llegar a representar ahorros energéticos y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de más del 10 % y en algunos casos extremos puede llegar hasta el 20 %, mientras que a nivel macroeconómico se verá reflejado de forma significativa en términos de PIB y empleo.

Tales situaciones pueden presentarse en un supermercado que no realiza un mantenimiento adecuado de sus equipos de refrigeración, que puede experimentar un

aumento significativo en su factura de energía. Por ejemplo, los refrigeradores y congeladores que no sellan correctamente o tienen juntas desgastadas pueden requerir más energía para mantener las temperaturas adecuadas. Así mismo, una planta de procesamiento de alimentos que utiliza sistemas de refrigeración obsoletos o mal ajustados puede consumir más energía de la necesaria para mantener los productos a temperaturas seguras.

Los equipos de refrigeración mal mantenidos o mal operados pueden también generar una huella ambiental mayor y la falta de mantenimiento adecuado puede provocar fallos en los equipos de refrigeración, lo que podría resultar en la pérdida de productos perecederos debido a un almacenamiento inadecuado; tales equipos tienen más probabilidades de experimentar fallas repentinas de sus diferentes componentes, lo que puede provocar interrupciones en la producción y retrasos en las entregas.

A su vez, la incapacidad para mantener la cadena de frío adecuada puede afectar la calidad de los productos y, por lo tanto, la reputación de la empresa ante los clientes y consumidores. En algunos sectores, como la industria alimentaria y farmacéutica, el incumplimiento de las normativas de almacenamiento y transporte puede tener consecuencias legales graves, incluyendo multas y cierre de operaciones. Debe recordarse, además, que la falta de mantenimiento puede acortar la vida útil de los equipos de refrigeración, lo que obliga a inversiones más frecuentes en reemplazos y actualizaciones.

El problema que se busca contribuir a resolver mediante el desarrollo del presente trabajo se puede formular mediante el siguiente interrogante: ¿qué alternativas técnicas permiten la racionalización de los costos asociados a la operación y el mantenimiento de equipos de refrigeración industrial mediante la incorporación de PLCs?

#### **4. Justificación**

La revisión preliminar de literatura relacionada con los Controladores Lógicos Programables PLCs indica que existen varias razones que justifican el desarrollo de este trabajo para identificar alternativas que permitan la racionalización de los costos asociados a la operación y mantenimiento de equipos de refrigeración industrial mediante la incorporación de PLCs.

En primer lugar, está la creación de unas condiciones de eficiencia energética, dado que, de acuerdo con Mo et al. (2023) los PLCs pueden optimizar el funcionamiento de equipos, reduciendo el consumo de energía y, por lo tanto, disminuyendo los costos operativos a largo plazo. Así mismo, está la opción de automatizar procesos que anteriormente requerían intervención manual, lo que puede reducir errores humanos y mejorar la eficiencia operativa. En cuanto al mantenimiento predictivo, estos dispositivos pueden emplearse para recopilar datos en tiempo real sobre el rendimiento de los equipos, lo que facilita la detección temprana de problemas y la implementación de acciones correctivas antes de que ocurran fallas costosas, como lo describen García et al. (2022).

A lo anterior se agrega la opción de reducir los tiempos de inactividad, pues al mejorar la capacidad de monitoreo y control de los equipos, los PLCs pueden ayudar a reducir los tiempos de inactividad no planificados (Vizcaíno, 2023), lo que a su vez minimiza las pérdidas de producción y los costos asociados.

La adaptabilidad y la flexibilidad son beneficios que también pueden generarse con el desarrollo de este trabajo, dado que los PLCs ofrecen la posibilidad de ajustar fácilmente los parámetros de funcionamiento de los equipos para adaptarse a cambios en las condiciones operativas o requisitos de producción (Ashiwal et al., 2022), lo que puede mejorar la capacidad de respuesta de la planta industrial.

De otro modo, en algunos casos el cumplimiento normativo es una razón adicional que motiva el desarrollo de esta investigación. La implementación de tecnologías avanzadas como los PLCs, puede ayudar a cumplir con regulaciones ambientales y de seguridad más estrictas, como lo muestra el trabajo de Restrepo (2022), lo que a su vez puede evitar multas y sanciones regulatorias.

En resumen, la incorporación de PLCs puede ofrecer una serie de beneficios significativos que justifican el desarrollo de un trabajo para identificar alternativas que permitan la racionalización de los costos asociados a su operación y mantenimiento. Esos beneficios que se asocian a los PLCs como contribuir a la eficiencia energética, la automatización de procesos, la incorporación de técnicas de mantenimiento predictivo, la reducción de los tiempos de inactividad no planificados, al igual que la adaptabilidad, la flexibilidad y la facilidad de poder cumplir normas ambientales y de seguridad son de especial interés cuando se trata de equipos de refrigeración industrial. En la medida en que una empresa logre asegurar esos beneficios, puede lograr la reducción significativa de sus costos operativos (Negirla et al., 2020), además de que puede optimizar los recursos utilizados en la operación de los equipos de refrigeración, para destinarlos a otros recursos más valorados por los clientes y/o para mejorar su utilidad.

La implementación de tecnologías avanzadas y prácticas de operación eficientes de sus equipos de refrigeración puede mejorar la competitividad de una empresa al reducir los costos de producción y mejorar la calidad y confiabilidad de los productos, mientras que la incorporación de técnicas de mantenimiento predictivo y la reducción de tiempos de inactividad no planificados aumentan la confiabilidad y disponibilidad de los equipos de refrigeración (Molęda et al., 2023), lo que garantiza una producción continua y minimiza las interrupciones costosas.

A lo anterior se agrega que la adaptabilidad y flexibilidad de los equipos de refrigeración industrial permiten ajustar rápidamente los procesos de producción para adaptarse a cambios en la demanda del mercado, variaciones en las materias primas o nuevas regulaciones gubernamentales, mientras que cumplir con las normas ambientales y de seguridad no solo evita posibles sanciones y multas, sino que también demuestra el compromiso de la empresa con la responsabilidad social y el cuidado del medio ambiente, lo que puede mejorar su reputación y relaciones con los stakeholders. Estos beneficios son resaltados en el trabajo de Nanclares y Gómez (2022)

En resumen, todas estas razones contribuyen a mejorar la eficiencia operativa, la rentabilidad y la sostenibilidad a largo plazo de una empresa que opera equipos de refrigeración industrial. Las empresas que no hagan uso de esos beneficios, necesariamente estarán en una posición de desventaja con respecto a las que sí lo hagan.

## **5. Análisis de Requerimientos**

Teniendo en cuenta que el objetivo general del presente trabajo consiste en elaborar una guía a con las medidas a implementar para la racionalización de los costos asociados a la operación y el mantenimiento de equipos de refrigeración industrial mediante la incorporación de PLCs, su desarrollo requiere acceso a literatura y bases de datos internacionales de publicaciones académicas, científicas y recursos en línea para la investigación y revisión de literatura relevante.

Esas publicaciones deben contener información vigente tanto en el campo de la refrigeración industrial, como en controladores lógicos programables, y tanto a nivel teórico como empírico, dado que dentro de los objetivos específicos se incluye la descripción de experiencias internacionales exitosas en la aplicación de PLCs para racionalizar la operación y el mantenimiento de sistemas industriales. Así mismo se requiere acceso a internet y licencias de software para el procesamiento de la información.

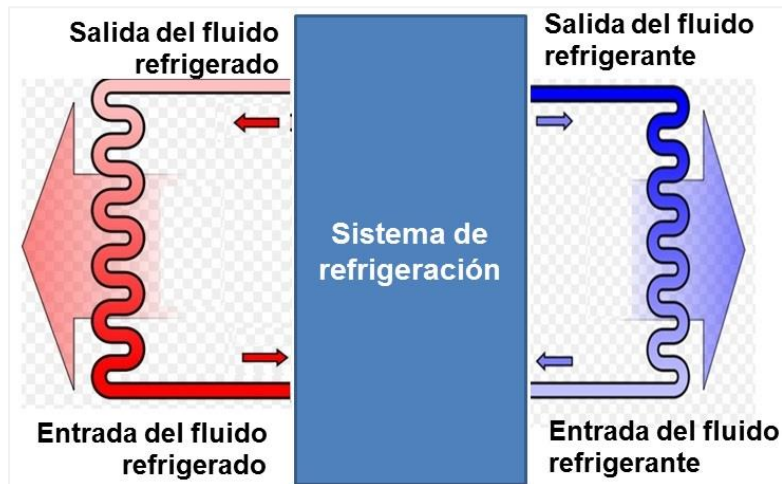
## **6. Marco Teórico**

### **6.1. Sistemas de refrigeración industrial**

Un sistema de refrigeración es un conjunto de elementos cuya función es la retirar el exceso de calor que es generado por otro sistema principal, como una nevera, un sistema de aire acondicionado, un motor de combustión interna, una central nuclear o cualquier otro sistema que genere calor (Muñoz et al., 2023). Las dimensiones, materiales y características

del sistema de refrigeración dependen básicamente de la cantidad de calor que se requiera remover y de las condiciones en las cuales deba operar (ver Figura 1).

**Figura 1. Sistemas de refrigeración**



*Nota: tomado de Froztec (2024)*

De manera general, en sistemas de refrigeración se presenta transferencia de calor del fluido refrigerado hacia el fluido refrigerante; el primero ingresa al sistema a una temperatura más alta y sale a una temperatura más baja, mientras que el fluido refrigerante ingresa a una temperatura y se calienta como consecuencia del calor que le retira al fluido refrigerando (Oudah y otros, 2021).

En el caso de un motor de combustión interna como el que utilizan los vehículos automotores, el fluido refrigerado es el aceite que circula por el motor y el fluido refrigerante es el agua que al circular por el bloque del motor retira el calor del aceite y posteriormente pasa al radiador para ser enfriado por aire. Así mismo, en una nevera el fluido refrigerante es un gas que circula por las paredes del congelador de la nevera y retira calor de los alimentos; ese gas sale entonces caliente y pasa por el radiador localizado en la parte posterior de la

nevera, así como por una válvula de expansión para reducir su temperatura antes de volver a ingresar a las paredes del congelador (Alklaibi & Lior, 2021).

El fluido refrigerante requiere de un equipo de bombeo o compresión que lo haga circular a lo largo del circuito; en el caso de que se trate de un gas el equipo debe ser un compresor (como en el caso de la nevera) o de una bomba (como en el caso del motor de combustión interna). El fluido refrigerante debe ser a su vez enfriado por otro fluido, que puede ser aire (Peñaloza et al., 2022).

Los sistemas de refrigeración pueden operar en un circuito abierto o cerrado; los primeros son aquellos en los cuales se utiliza el contacto directo del fluido refrigerante con el aire atmosférico para enfriarlo y normalmente se utiliza una torre de enfriamiento. Esas torres de enfriamiento se utilizan en grandes instalaciones como plantas eléctricas industriales; las instalaciones más pequeñas utilizan radiadores (Herrera, 2021).

Ahora bien, un sistema de refrigeración industrial es un conjunto de equipos y componentes diseñados para enfriar grandes espacios o procesos industriales. Estos sistemas son utilizados en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la conservación de alimentos, la refrigeración de procesos químicos y la climatización de grandes instalaciones (Wu et al., 2021).

Los sistemas de refrigeración industrial pueden incluir compresores, condensadores, evaporadores, válvulas de expansión, intercambiadores de calor y otros componentes. Estos trabajan en conjunto para transferir el calor desde el espacio o proceso que se desea enfriar hacia el exterior, utilizando un refrigerante que circula a través del sistema.

Existen diferentes tipos de sistemas de refrigeración industrial, como los sistemas de compresión de vapor, los sistemas de absorción y los sistemas de refrigeración por aire o agua. La elección del sistema adecuado depende de factores como la capacidad de enfriamiento requerida, el tipo de aplicación y las condiciones ambientales.

## **6.2. Controladores Lógicos Programables – PLCs**

Los Controladores Lógicos Programables (PLC por sus siglas en inglés, Programmable Logic Controllers) son dispositivos electrónicos utilizados en automatización industrial para controlar maquinaria y procesos. Los PLCs son especialmente útiles en entornos industriales debido a su capacidad para operar en ambientes hostiles y manejar tareas complejas de control y monitoreo (Quinatoa & Guano, 2021).

Un PLC consiste en un hardware modular que incluye una unidad central de procesamiento (CPU), módulos de entrada, módulos de salida y módulos de comunicación. Estos componentes se conectan entre sí mediante una estructura de bus, lo que permite la expansión y personalización del sistema según las necesidades específicas de la aplicación.

La programación de un PLC se realiza mediante un software especializado que permite definir la lógica de control utilizando un lenguaje de programación específico, como el lenguaje de escalera (ladder logic) o lenguajes de bloques funcionales (Function Block Diagram, FBD), entre otros. Estos lenguajes permiten a los ingenieros de control diseñar y desarrollar secuencias de control, interbloqueos, temporizadores, contadores y otras funciones necesarias para automatizar un proceso industrial (Fronchetti et al., 2022).

Los PLCs ofrecen una gran flexibilidad y confiabilidad en el control de procesos industriales, lo que los convierte en una herramienta fundamental en la automatización de fábricas y plantas de producción. Además, de acuerdo con Palma (2023), su capacidad para comunicarse con otros dispositivos y sistemas de control, como sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) o sistemas de gestión de producción, los hace indispensables en entornos industriales modernos.

Dentro de una instalación industrial, un PLC puede cumplir diferentes funciones, como controlar la lógica de funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales, procesar y recibir señales digitales y analógicas o aplicar estrategias de control, como controladores PID (Proporcional, Integral y Derivativo).

Esa multifuncionalidad hace que un PLC se pueda aplicar para automatización de maquinaria en control de robots, transportadores, grúas, etc., control de variables como temperatura, presión, velocidad o flujo, entre otros, en procesos industriales, sistemas de control distribuido en redes de dispositivos, así como para comunicación por red, mediante la interconexión con otros sistemas y dispositivos de control (Kaltjob, 2020).

### **6.3. Costos de operación**

Los costos de operación de una instalación industrial son todos los gastos asociados con la ejecución de las actividades diarias necesarias para mantener en funcionamiento la planta o fábrica. Estos costos representan los desembolsos financieros continuos requeridos para producir bienes o servicios, mantener la infraestructura, y garantizar la eficiencia y la

rentabilidad de las operaciones industriales (Preston et al., 2020). Los costos de operación de una instalación industrial incluyen todos los gastos recurrentes y variables que se requieren para mantener y operar la planta de manera eficiente y segura.

A nivel general, los costos de operación de un proceso industrial pueden variar según el tipo de industria y el proceso específico, aunque usualmente incluyen los siguientes rubros, de acuerdo con la propuesta de Cusati et al. (2021):

- **Materiales:** costos asociados con la compra de materias primas, productos químicos, materiales de empaque, entre otros, necesarios para la producción.
- **Mano de obra:** salarios y beneficios para los trabajadores directamente involucrados en la operación del proceso industrial, incluyendo operadores de maquinaria, técnicos, supervisores, etc.
- **Energía:** costos de electricidad, gas natural, combustibles u otras formas de energía necesarias para alimentar el proceso y las máquinas involucradas.
- **Depreciación:** costos asociados con la depreciación de activos fijos utilizados en el proceso industrial, como maquinaria, equipos y edificios.
- **Costos administración:** gastos generales relacionados con la gestión y operación del proceso, como alquiler de instalaciones, seguros, impuestos, servicios públicos, entre otros.

- Calidad y control de calidad: gastos relacionados con la implementación y mantenimiento de sistemas de control de calidad, pruebas de productos, inspección y certificación.
- Eliminación de desechos y tratamiento de efluentes: costos asociados con la gestión y tratamiento de residuos sólidos, líquidos y gases generados durante el proceso industrial, así como el cumplimiento de regulaciones ambientales.
- Transporte y logística: costos relacionados con el transporte de materias primas hacia la planta y el envío de productos terminados hacia los clientes o almacenes.
- Costos financieros: intereses sobre préstamos, arrendamientos financieros u otras formas de financiamiento utilizadas para adquirir activos o financiar operaciones.

Estos son algunos de los principales rubros que pueden incluirse en los costos de operación de un proceso industrial, aunque la lista puede variar dependiendo de la naturaleza específica de la industria y las prácticas de gestión de cada empresa.

Los costos de operación de un proceso industrial se pueden clasificar en dos categorías principales: costos directos e indirectos. Los primeros incluyen la materia prima y la mano de obra directa, mientras que los costos indirectos incluyen la mano de obra indirecta y los gastos generales de operación; la mano de obra indirecta es la mano de obra que no se utiliza directamente en la producción del producto, como la mano de obra de supervisión y administración, mientras que los gastos generales de fabricación son aquellos que no se pueden asignar directamente a un producto específico, como el alquiler, la energía, los seguros y los impuestos (Flores & Blanco, 2021).

A continuación, se presenta una lista de algunos de los rubros que se pueden incluir en los costos de operación de un proceso industrial:

**Tabla 1. Rubros a incluir en los costos de operación de un proceso industrial**

Grupo de costo de operación	Rubros que incluye
Materia prima	Materiales principales Materiales secundarios Empaques
Mano de obra	Mano de obra directa Mano de obra indirecta Horas extras Salarios Prestaciones sociales
Gastos generales de fabricación	Alquiler Energía Agua Gas Seguros Impuestos Reparaciones Depreciación Amortización Otros
Costos de calidad	Control de calidad Pruebas Inspecciones Rechazos Reembolsos
Costos de investigación y desarrollo	Investigación Desarrollo Patentes Licencias

*Nota:* elaboración propia con base en Cusati et al. (2021).

Es importante tener en cuenta que esta lista no es exhaustiva y que los costos específicos que se incluyen en los costos de operación de un proceso industrial pueden variar según la empresa y el tipo de industria. Adicionalmente, el tamaño de la operación también

es decisivo en los costos de operación de un proceso industrial, dado que, como lo explica Castro (2023), las empresas grandes tienen la oportunidad de acceder a economías de escala que son restrictivos para las empresas pequeñas, además de que pueden presentarse diferentes niveles de eficiencia en el uso de los recursos de empresas de diversos tamaños, así como mayor capacidad de negociación de las empresas grandes frente a sus proveedores.

#### **6.4. Costos de mantenimiento**

Los costos de mantenimiento en una instalación industrial incluyen todos los gastos asociados con la preservación, reparación y mantenimiento de los activos físicos de la planta industrial (Medina, 2022). Estos costos son esenciales para garantizar que los equipos, maquinaria y sistemas operen de manera eficiente y segura, con lo cual se evitan tiempos de inactividad no planificados y maximizando la vida útil de los activos; los costos de mantenimiento son necesarios para asegurar la continuidad de la producción, la seguridad de los trabajadores y la calidad de los productos (Sánchez, 2023).

De acuerdo con la clasificación propuesta por Guo et al. (2020), los costos de mantenimiento pueden incluir lo siguiente:

- **Mantenimiento preventivo:** actividades programadas regularmente para inspeccionar, limpiar y ajustar equipos y sistemas con el fin de prevenir fallas y garantizar un funcionamiento óptimo.
- **Mantenimiento correctivo:** reparaciones necesarias para corregir fallas o problemas identificados durante el funcionamiento normal de la planta.

- Mantenimiento predictivo: son los costos asociados con las tareas de mantenimiento que se realizan para predecir cuándo un equipo va a fallar y tomar medidas para evitarlo.
- Repuestos y materiales: costos asociados con la compra de repuestos, materiales y suministros necesarios para llevar a cabo las actividades de mantenimiento.
- Mano de obra: salarios y beneficios para el personal técnico y de mantenimiento encargado de realizar las tareas de mantenimiento.
- Herramientas y equipos: costos asociados con la compra, mantenimiento y reparación de herramientas y equipos utilizados para realizar actividades de mantenimiento.
- Servicios externos: gastos relacionados con la contratación de servicios externos, como servicios de inspección, mantenimiento especializado o reparaciones realizadas por contratistas externos.
- Capacitación: costos asociados con la capacitación del personal de mantenimiento para garantizar que estén actualizados en las mejores prácticas de mantenimiento y seguridad.
- Tecnología de mantenimiento: gastos relacionados con la implementación y mantenimiento de sistemas de gestión de mantenimiento asistido por computadora (CMMS) u otras tecnologías de mantenimiento predictivo.

Los costos de mantenimiento son una parte importante del presupuesto operativo de una instalación industrial y su gestión eficaz es fundamental para garantizar la confiabilidad

y la eficiencia de los procesos de producción. Un programa de mantenimiento bien diseñado puede ayudar a minimizar los costos a largo plazo al prevenir fallas costosas y prolongar la vida útil de los activos industriales.

## **7. Metodología**

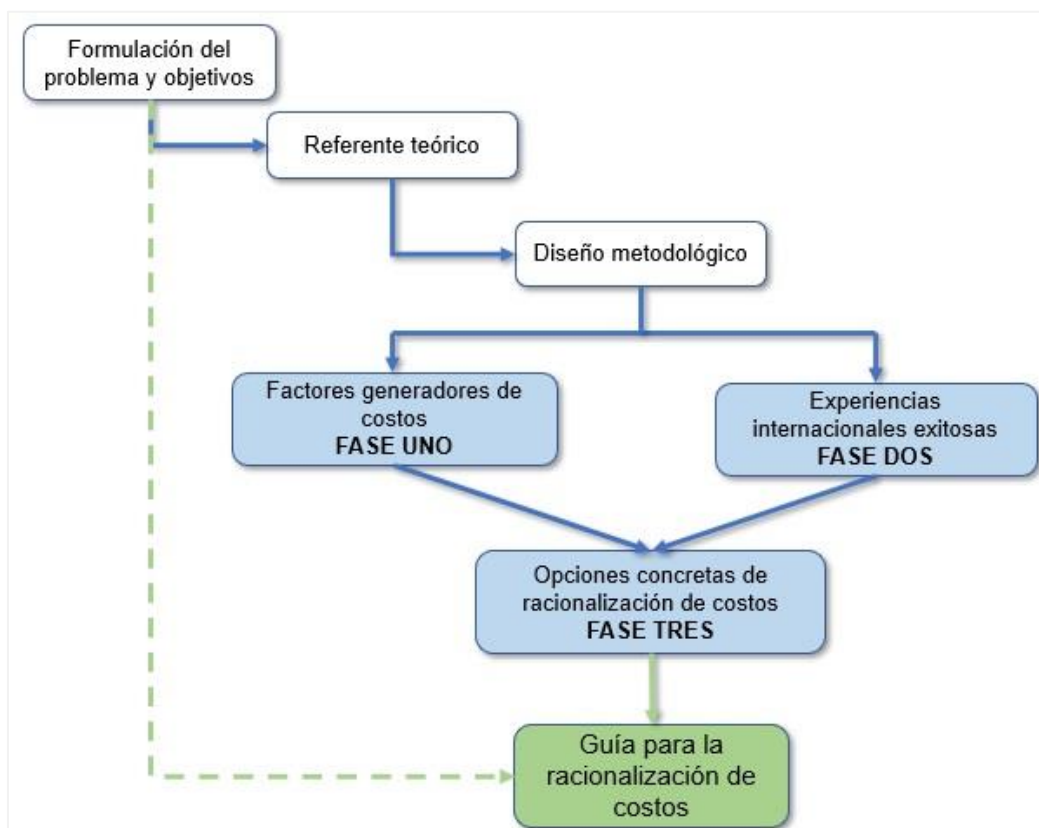
El análisis de esta investigación se efectúa desde el enfoque cualitativo, el cual se según Hernández, Fernández & Baptista (2014) se direcciona en comprender los fenómenos, explorándolos desde las cualidades que los caracterizan. Se escoge este enfoque cuando el fin del estudio es analizar la manera en que los diferentes factores inciden en los costos asociados a los equipos de refrigeración. Lo anterior teniendo en cuenta que, a diferencia de la metodología cuantitativa, en este caso no se pretende demostrar ninguna hipótesis o documentar la existencia de un fenómeno de correlación entre variables independientes y variables independientes (Jiménez, 2020).

Esta investigación también se puede clasificar como exploratoria (Galarza, 2020), debido a que no existen investigaciones previas sobre la implementación de PLC en la racionalización de costos de sistemas de refrigeración, clasificación que también concuerda con los planteamientos de Sabino (2014); por esa razón, carece de hipótesis dado que el objetivo es tener conocimiento de la situación analizada (p. 45).

El desarrollo de los objetivos planteados implica fases sucesivas (ver Figura 2). En primer lugar, el estudio de la literatura sobre los costos de las industrias asociados a los equipos de refrigeración, permitirá cumplir el primer objetivo de establecer los factores

generadores de esos costos. Para la descripción de experiencias internacionales exitosas en la aplicación de PLCs para la optimización de la operación y el mantenimiento de sistemas industriales, se realizará una búsqueda sistemática de literatura (Paul et al., 2021), tanto en idioma español como en inglés, para identificar publicaciones especializadas y/o académicas en las que se dé cuenta de buenas prácticas aplicadas en diferentes países para ese propósito. Esta búsqueda se centrará en publicaciones realizadas durante los últimos cinco años, con el propósito de garantizar la vigencia de los hallazgos y se incluirán solamente documentos en los que se sustenten con cifras los resultados obtenidos, con el fin de asegurar la efectividad de los aportes de este objetivo al cumplimiento del objetivo general planteado.

**Figura 2. Fases de la investigación**



*Nota:* elaboración propia

A su vez, para la definición de las opciones concretas para racionalizar los costos que se generan por la operación de sistemas de refrigeración industrial, se realizará una triangulación con los resultados generados en los objetivos previamente desarrollados, dado que esas opciones se seleccionarán con base en la consideración sobre los factores generadores de costos más representativos y sobre la forma en que las experiencias internacionales pueden resultar efectivas para mitigar esos factores. Los hallazgos de ese proceso de triangulación serán los que finalmente se reflejarán en la guía que será el producto final del presente trabajo.

## 8. Análisis de las Restricciones

Con el propósito de seguir un proceso de análisis meticuloso, en la Tabla 2 se presenta el correspondiente análisis PESTAL del mismo, es decir, la evaluación frente a las dimensiones Política, Económica, Social, Tecnológica Ambiental y Legal.

**Tabla 2. Análisis PESTAL del trabajo**

Dimensión	Situación
Política	Teniendo en cuenta que el proyecto busca la racionalización de costos de operación y mantenimiento de equipos de refrigeración industrial mediante la incorporación de PLCs, no existen restricciones legales que dificulten o restrinjan su desarrollo.
Económica	En cuanto a los factores económicos como tasas de crecimiento económico, inflación, tasas de interés, cambio de divisas y desempleo, no existen restricciones para el desarrollo del trabajo. Los costos asociados a su desarrollo serán asumidos por la autora, tanto en especie como en efectivo.
Social	Esta dimensión analiza tendencias demográficas, culturales, de estilo de vida y valores sociales que pueden influir en el desarrollo del trabajo; puede afirmarse que el desarrollo del trabajo no solamente no presenta restricciones en este terreno, sino que además favorece estos aspectos.
Tecnológica	En esta dimensión se examina el impacto de la tecnología en el desarrollo del trabajo, incluyendo avances tecnológicos, innovaciones disruptivas, desarrollo de infraestructuras y patentes. En este aspecto puede identificarse que la diversidad de

Dimensión	Situación
	industrias y de tipos de sistemas de refrigeración que existen puede hacer complejo el cumplimiento del objetivo general del trabajo. Debajo de la presente tabla se explica la forma como se gestionará esta restricción.
Ambiental	Esta dimensión se refiere a consideraciones ambientales como el cambio climático, la sostenibilidad, la legislación ambiental y la responsabilidad social corporativa. El desarrollo de este trabajo no presenta restricciones en esta dimensión, y, en cambio, contribuye a que las empresas puedan mejorar su gestión en estos aspectos.
Legal	Analiza el marco legal en el que opera la empresa, incluyendo regulaciones laborales, normativas de competencia, leyes de propiedad intelectual y cualquier otra legislación relevante. Dado que el trabajo cumplirá con las regulaciones en materia de derechos de autor, no se presentan restricciones en esta dimensión.

*Nota:* elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 2, las principales restricciones relacionadas con el presente trabajo se derivan de la diversidad de industrias y de tipos de sistemas de refrigeración que existen. Esas dos diversidades combinadas pueden ocasionar que las soluciones u opciones disponibles para racionalizar los costos asociados a los equipos de refrigeración sean muy variadas, al menos en principio; adicionalmente, también existen diversos tipos de PLCs, por lo cual la elaboración del manual que se presentará como producto final se tomarán las siguientes precauciones.

En primer lugar, se hará una investigación exhaustiva sobre los diferentes tipos de empresas que utilizan sistemas de refrigeración industrial y los tipos de sistemas de refrigeración más comunes. Esto ayudará a comprender las necesidades y desafíos específicos de cada sector. Así mismo, se buscarán patrones comunes y mejores prácticas que se puedan aplicar en diferentes industrias y sistemas de refrigeración, lo cual puede incluir estrategias para mejorar la eficiencia energética, reducir los costos de mantenimiento y optimizar el rendimiento de los equipos de refrigeración.

Así mismo, la guía incluirá recomendaciones específicas para diferentes industrias y tipos de sistemas de refrigeración. Igualmente, la guía se diseñará de manera que sea flexible y adaptable a diferentes contextos y requisitos. Dado que la eficiencia energética y la reducción de costos de mantenimiento son objetivos comunes en la racionalización de costos de equipos de refrigeración, se hará especial énfasis en estos aspectos dentro de la guía.

## **9. Factores generadores de costos en la operación y mantenimiento de equipos de refrigeración industrial**

Existen diversos factores que generan costos en la operación y mantenimiento de equipos de refrigeración industrial. Estos factores se pueden clasificar en dos categorías principales, factores operativos y factores de mantenimiento.

### **9.1. Factores operativos**

El primero es el consumo de energía. Los equipos de refrigeración industrial son grandes consumidores de energía eléctrica, especialmente en el proceso de compresión del refrigerante. El principio fundamental de la refrigeración se basa en un ciclo de compresión-expansión de un gas refrigerante. En este ciclo, el gas se comprime, lo que aumenta su presión y temperatura. Luego, el gas se expande, lo que reduce su presión y temperatura. La expansión del gas es lo que produce el efecto de enfriamiento. El compresor es el componente principal de un sistema de refrigeración industrial. Se encarga de comprimir el gas refrigerante. La compresión del gas requiere una gran cantidad de energía eléctrica,

especialmente en sistemas de gran tamaño o que operan a bajas temperaturas (Selvnes et al., 2021).

Por otro lado, los sistemas de refrigeración industrial no son 100% eficientes. Siempre hay pérdidas de calor en el sistema, lo que reduce la eficiencia general del proceso de refrigeración. Estas pérdidas de calor se deben a factores como la transferencia de calor a través de las paredes del equipo, las fugas de refrigerante y la fricción en los componentes del sistema. Así mismo, estos sistemas suelen operar en condiciones exigentes, como temperaturas ambientales o cargas térmicas elevadas (He et al., 2021). Estas condiciones de operación pueden reducir la eficiencia del sistema y aumentar el consumo de energía.

Debe tenerse en cuenta que la tecnología utilizada en los equipos de refrigeración industrial también puede afectar su consumo de energía, por lo que los equipos más antiguos suelen ser menos eficientes que los equipos nuevos. Además, las nuevas tecnologías, como los refrigerantes de bajo potencial de calentamiento global (GWP) y los sistemas de control más eficientes, pueden ayudar a reducir el consumo de energía (Sanguri et al., 2021). Algunos sistemas de refrigeración industrial utilizan refrigerantes con altas capacidades de refrigeración, como los refrigerantes sintéticos de fluorocarbono. Aunque estos refrigerantes son eficaces para mantener bajas temperaturas, también requieren una mayor cantidad de energía para operar en comparación con refrigerantes menos potentes.

El consumo de energía depende de varios factores, como el tamaño del equipo, la temperatura de operación, la eficiencia del equipo y las condiciones ambientales. Un consumo energético elevado puede incrementar significativamente los costos operativos.

Existen diversas estrategias que se pueden implementar para reducir el consumo de energía en los sistemas de refrigeración industrial. Se recomienda implementar un programa de mantenimiento preventivo adecuado para mantener el equipo en óptimas condiciones de funcionamiento, utilizar refrigerantes de bajo potencial de calentamiento global, instalar sistemas de control más eficientes, mejorar el aislamiento térmico del equipo y reducir las cargas térmicas del sistema. La implementación de estas estrategias puede ayudar a las empresas a reducir significativamente el consumo de energía en sus sistemas de refrigeración industrial, lo que se traduce en ahorros económicos y un menor impacto ambiental (Prabakaran et al., 2023).

Debe tenerse en cuenta que, en entornos industriales, los sistemas de refrigeración a menudo deben enfriar grandes volúmenes de aire, líquidos o productos. Esto puede requerir sistemas de refrigeración de gran escala que operen constantemente para mantener las condiciones de temperatura requeridas. En muchas aplicaciones industriales, los sistemas de refrigeración deben funcionar de forma continua para mantener las condiciones de temperatura necesarias para la producción o el almacenamiento de productos sensibles al calor (Alba et al., 2021). Esta operación constante contribuye significativamente al consumo total de energía.

También pueden ser significativos los costos por desgaste y rotura de componentes. Los equipos de refrigeración industrial están sujetos a un desgaste natural por su uso continuo, que puede provocar roturas y fallos que requieren reparaciones costosas (Touaibi & Kotten, 2021). La frecuencia de las reparaciones depende de la calidad del equipo, la intensidad de su uso y el mantenimiento que reciba.

Como ya se mencionó, los equipos de refrigeración industrial suelen funcionar de forma continua durante largos periodos de tiempo, lo que somete a sus componentes a un estrés mecánico constante. Este funcionamiento continuo provoca fricción, vibraciones y desgaste en las piezas móviles del equipo, como el compresor, los ventiladores y las bombas. Se trata de equipos que deben operar en ambientes con temperaturas extremas, ya sea frías o calientes. Estas temperaturas extremas pueden provocar dilataciones y contracciones en los materiales del equipo, lo que a su vez puede generar grietas, deformaciones y otros tipos de daños.

Adicionalmente, los componentes de estos equipos están expuestos a diversos agentes corrosivos, como la humedad, los productos químicos y los gases. La corrosión puede provocar el desgaste y deterioro de los materiales, lo que reduce la vida útil del equipo y aumenta el riesgo de fallos. El funcionamiento normal de los equipos de refrigeración industrial también puede generar vibraciones, las cuales pueden ser perjudiciales para los componentes del equipo. Las vibraciones excesivas pueden aflojar tornillos, dañar soldaduras y provocar roturas en piezas frágiles (Alamri, 2020).

En algunos ambientes industriales, los equipos de refrigeración están expuestos a la suciedad, el polvo y otros contaminantes que pueden ingresar al sistema y provocar daños en los componentes; esa suciedad puede obstruir filtros, afectar el flujo de refrigerante y generar desgaste abrasivo en las piezas móviles. De otro lado, en el caso de los equipos de refrigeración industrial, la fatiga de materiales puede afectar componentes como el compresor, las tuberías y los intercambiadores de calor.

## 9.2. Factores de mantenimiento

El mantenimiento preventivo es esencial para prolongar la vida útil de los equipos de refrigeración industrial y prevenir fallos costosos. El mantenimiento preventivo incluye tareas como la limpieza, la lubricación, la inspección y el ajuste de los componentes del equipo. El costo del mantenimiento preventivo depende del tamaño y la complejidad del equipo, la frecuencia del mantenimiento y la empresa que lo realiza.

En los sistemas de refrigeración industrial, todos los componentes requieren cierto grado de mantenimiento preventivo, incluyendo limpieza, lubricación, inspección y ajuste. Sin embargo, la frecuencia y el alcance de estas tareas varían según el componente específico y las recomendaciones del fabricante (Mourtzis et al., 2021).

- **Compresor.** El exterior del compresor debe limpiarse periódicamente para eliminar la suciedad y el polvo; también es importante limpiar las rejillas de ventilación para asegurar un flujo de aire adecuado. El compresor debe lubricarse de acuerdo con las recomendaciones del fabricante, con el fin de reducir la fricción y el desgaste, y prolongar la vida útil del compresor. Se debe inspeccionar periódicamente el compresor para detectar signos de desgaste, fugas o daños. También es importante verificar el nivel de aceite y la presión del refrigerante. El compresor también puede requerir ajustes periódicos para mantener su funcionamiento óptimo. Estos ajustes pueden incluir la tensión de las correas, la alineación de los ejes y la calibración de los controles.
- **Condensador.** Las bobinas del condensador deben limpiarse periódicamente para eliminar la suciedad, el polvo y los desechos. La obstrucción de las bobinas puede

reducir la eficiencia del condensador y aumentar el consumo de energía. Se debe inspeccionar periódicamente el condensador para detectar signos de corrosión, daños o fugas de refrigerante. Al igual que el compresor, el condensador puede requerir ajustes periódicos para mantener su funcionamiento óptimo. Estos ajustes pueden incluir la tensión de los ventiladores y la calibración de los controles.

- Evaporador. Las bobinas del evaporador también se deben limpiar periódicamente. La obstrucción de las bobinas puede reducir la eficiencia del evaporador y afectar la capacidad de refrigeración del sistema. Se debe inspeccionar periódicamente el evaporador dado que también puede experimentar corrosión y daños que generen fugas de refrigerante. Su ajuste puede incluir labores similares a la que se hace al condensador.
- Válvulas, tuberías y conductos. Estos elementos pueden requerir lubricación periódica según las recomendaciones del fabricante, además de inspección y ajuste. Es importante verificar que el aislamiento de las tuberías y conductos esté en buen estado para evitar pérdidas de calor.
- Controles eléctricos. Los controles también deben ser inspeccionados periódicamente y pueden requerir calibración periódica para asegurar su correcto funcionamiento.
- Refrigerante. Se debe verificar periódicamente el nivel de refrigerante en el sistema y agregar más si es necesario. Se recomienda realizar un análisis del refrigerante periódicamente para detectar la presencia de contaminantes o acidez.

- Dispositivos de seguridad. Además de la inspección periódica, los dispositivos de seguridad deben probarse periódicamente de acuerdo con las normas aplicables (Mourtzis et al., 2021)..

Además del mantenimiento preventivo, también es importante realizar un mantenimiento correctivo cuando se detecte algún problema en el sistema de refrigeración industrial. El mantenimiento correctivo ayuda a prevenir fallos graves y costosos, y a mantener el sistema funcionando de manera eficiente y segura.

El costo del mantenimiento correctivo suele ser más alto que el del mantenimiento preventivo, ya que implica la reparación o el reemplazo de componentes dañados. Las piezas de repuesto para equipos de refrigeración industrial pueden ser costosas, especialmente si se trata de equipos especializados o de marcas poco comunes. El costo de las piezas de repuesto depende del tipo de pieza, la marca del equipo y el proveedor.

Además de estos factores, otros aspectos que pueden afectar los costos de operación y mantenimiento de equipos de refrigeración industrial incluyen la edad del equipo, dado que los equipos más antiguos suelen ser menos eficientes y más propensos a fallos que los equipos nuevos. Las condiciones ambientales extremas, como temperaturas muy altas o muy bajas, pueden acortar la vida útil de los equipos de refrigeración industrial y aumentar los costos de mantenimiento.

Por otro lado, si el agua utilizada en el sistema de refrigeración no es de buena calidad, puede provocar corrosiones y otros problemas que aumentan los costos de mantenimiento. Esto es especialmente significativo en los sistemas de enfriamiento evaporativo, que requieren cantidades considerables de agua para operar. La eliminación adecuada de los

refrigerantes y otros productos químicos utilizados en los sistemas de refrigeración, así como el cumplimiento de las regulaciones ambientales, pueden generar costos adicionales.

Los factores generadores de costos en la operación y mantenimiento de equipos de refrigeración industrial pueden variar según el tipo de equipo y el entorno en el que opera. La industria de la refrigeración industrial ha experimentado avances significativos en los últimos años, impulsados por la necesidad de mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental. Como ya se mencionó, Los refrigerantes tradicionales, como los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), se han eliminado o están en proceso de eliminación debido a su alto potencial de calentamiento global (GWP). En su lugar, se están utilizando refrigerantes de bajo GWP, como los hidrofluorocarbonos (HFC) y las mezclas de HFC, que tienen un menor impacto en el calentamiento global.

Se han desarrollado nuevas tecnologías de compresores, como compresores de velocidad variable (VSC) y compresores centrífugos, que son más eficientes y consumen menos energía que los compresores tradicionales. Así mismo, el calor residual generado por los sistemas de refrigeración industrial puede ser recuperado y utilizado para otros fines, como calefacción de agua o generación de vapor. La recuperación de calor residual puede mejorar significativamente la eficiencia energética general de una instalación industrial (Ossorio & Navarro, 2023).

La inteligencia artificial (IA) y el análisis de datos se están utilizando para optimizar el funcionamiento de los sistemas de refrigeración industrial. La IA puede identificar patrones en los datos de funcionamiento y predecir posibles fallos, lo que permite un mantenimiento preventivo más efectivo (Yaquib & Ahmad, 2020). También se han

desarrollado nuevos materiales de aislamiento con mayor eficiencia térmica, lo que puede ayudar a reducir el consumo de energía y en otros casos se están utilizando técnicas de diseño optimizado para crear sistemas que sean más eficientes y que cumplan con las necesidades específicas de cada aplicación.

## **10. Experiencias internacionales en la aplicación de PLCs para optimizar la operación y el mantenimiento de sistemas industriales**

El empleo de Controladores Lógicos Programables (PLCs) para optimizar la operación y el mantenimiento de sistemas industriales es una práctica común en diversos sectores. Uno de los ejemplos más destacados es el uso de PLCs en el control de procesos de fabricación en la industria automotriz. En una línea de producción de automóviles, los PLCs se utilizan para coordinar diversas etapas del proceso, como el ensamblaje de piezas, la pintura y el control de calidad (Papulová et al., 2022). Mediante la programación de lógica de control personalizada, los PLCs garantizan que cada paso del proceso se realice de manera precisa y coordinada, minimizando los tiempos de inactividad y optimizando la producción.

Wrobel y Sidzina (2021) propusieron una estructura especial del sistema de control de la línea de producción dividida en tres módulos: un módulo para la producción de mandiles estampados en caliente, una estación de corte por láser y una estación de terminación y soldadura de los subconjuntos de la carrocería de una planta ensambladora de automóviles; esa línea de producción está basada en dispositivos instalados en la línea de producción y equipados con sus propios sistemas de control independientes.

En ese caso, la integración de las señales provenientes de dispositivos individuales fue el principal problema al que se enfrentaron los diseñadores del sistema. La integración se resolvió a nivel central utilizando el controlador PLC principal, denominado “Master”. La tarea de este controlador es recoger señales de todos los dispositivos y decidir qué tareas deben realizarse en un momento determinado; por ejemplo, qué programa de movimiento deben ejecutar los robots individuales. El sistema es tan complicado que conecta muchos actuadores diferentes, comunicándose entre sí a través de varios protocolos de comunicación, como lo describen Wrobel y Sidzina (2021).

La tarea anterior es compleja porque requiere operación en tiempo real. Para ello se utilizó el controlador PLC con sistemas distribuidos de entrada/salida. La centralización del sistema permite recoger vectores de los estados de todas las señales de entrada y salida, y en el futuro permitirá la redundancia de la unidad central. Sin embargo, en el estado actual, la potencia informática de la unidad central permite el control en tiempo real de la línea de producción y del gemelo digital de la línea, diseñado utilizando el software Tecnomatix Process Simulate proveniente de Múnich (Siemens, 2021).

Se está construyendo un mecanismo de comparación de vectores del estado de los dispositivos entre la línea real y el gemelo digital. El objetivo de lo anterior es encontrar errores a partir de diferencias en vectores de los estados de variables seleccionadas. Este análisis permitirá verificar rápidamente los estados de las señales de la línea de producción. Se puede suponer que el gemelo digital, inicialmente en forma simplificada, permitirá localizar rápidamente las señales de anomalías y desarrollará patrones de errores, que serán analizados mediante un sistema analítico especial (Wrobel & Sidzina, 2021).

Otro ejemplo es el empleo de PLCs en sistemas de gestión de energía en plantas industriales. Los PLCs se utilizan para monitorear y controlar el consumo de energía en tiempo real, permitiendo a los operadores identificar áreas de mejora y tomar medidas para reducir costos (Sossenheimer et al., 2021). Por ejemplo, los PLCs pueden optimizar el funcionamiento de equipos como compresores y bombas para minimizar el consumo de energía sin comprometer la producción.

Pat et al. (2021) diseñaron uno de estos sistemas basado en un controlador S7-1200 mediante un lenguaje de programación LAD (lógica de escalera), que es un lenguaje de programación gráfico. Se utiliza un controlador lógico programable para monitorear y controlar el funcionamiento de un sistema de gestión de energía inteligente para una planta de energía. El controlador detecta los parámetros de la batería, la generación solar, el inversor y el consumo de energía de acuerdo con la lógica de control. La alteración de la generación de energía solar se realiza según la señal enviada desde la CPU del PLC. La programación en PLC se desarrolló utilizando la lógica de escalera y el algoritmo de respuesta a la demanda.

Después de recibir la señal del controlador, se ejecuta la operación lógica. En condiciones de máxima demanda se utiliza una generación solar total de 3 kW, que se activa cuando el relé se dispara después de recibir la señal del controlador. Se utiliza un minicomputador Raspberry-pi habilitado para Wi-Fi con el PLC para el sistema de gestión de energía inteligente. Inicialmente, el PLC verifica el estado de la operación, ya sea en condición manual/automática. Si el estado es en modo Automático, entonces el PLC funciona según la lógica de su programación. Cada medidor instalado dentro del sistema

recopila 30 valores de corriente, voltaje, factor de potencia y consumo de energía y los envía al PLC, que está programado para seleccionar la opción de energía óptima para diferentes escenarios.

En el sector de la minería, los PLCs son fundamentales para el control de equipos pesados y la automatización de procesos de extracción y procesamiento de minerales. Por ejemplo, en una mina subterránea, los PLCs pueden controlar la operación de perforadoras, cargadoras y transportadores, garantizando una extracción eficiente y segura. Además, los PLCs pueden monitorear condiciones ambientales como la temperatura y la humedad para asegurar un entorno de trabajo seguro para los operadores (Lv & Wang, 2023).

Podkamenniy et al. (2021) explican que el procesamiento del mineral de diamante tiene algunas particularidades en comparación con otros minerales. Estas características específicas están determinadas por el contenido extremadamente bajo de diamantes en las materias primas (sólo alrededor del 0,000005%), su fragilidad y su alto valor económico. Este último aspecto requiere la aplicación de procesos que garanticen un alto grado de extracción de diamantes de los minerales. En su publicación analizan los principios básicos de la separación luminiscente de rayos X de minerales de diamantes como objeto de automatización y analiza soluciones técnicas utilizando PLCs, cuya solución contribuye a la implementación efectiva de sistemas de control automatizados en la separación de diamantes.

En el ámbito de la agricultura, los PLCs se utilizan para controlar sistemas de riego automatizados que optimizan el uso del agua y mejoran la productividad de los cultivos. Por ejemplo, mediante la programación de PLCs, se puede ajustar automáticamente la cantidad

de agua aplicada en función de factores como la temperatura, la humedad del suelo y las necesidades específicas de cada tipo de cultivo (Hari y otros, 2021). Esto permite ahorrar agua y energía, reduciendo los costos operativos y minimizando el impacto ambiental.

Imam y Francis (2021) explican que la implementación de nuevas tecnologías en la agricultura podría mejorar la eficiencia del riego, promoviendo la conservación del agua y reduciendo los impactos ambientales. A medida que aumenta la demanda de agua, junto con la necesidad de proteger los hábitats acuáticos, las prácticas de conservación del agua para el riego deben ser efectivas y asequibles. El riego de precisión optimiza el riego minimizando el desperdicio de agua y energía, mientras maximiza el rendimiento de los cultivos.

El método más eficaz para determinar las demandas de agua de los cultivos se basa en el monitoreo en tiempo real de la humedad del suelo y la aplicación directa de agua junto con la información sobre las propiedades hidrológicas del suelo y el uso del sensor de humedad del suelo ayuda a reducir el desperdicio de agua y evitando así el riego excesivo de la tierra. El PLC brinda varias ventajas, como la estimulación previa en un computador personal antes de la implementación, puede funcionar en todos los entornos, las entradas y salidas se pueden cambiar o aumentar según los requisitos de cada cultivo, y se pueden programar y reprogramar.

En el sector de la alimentación y bebidas, los PLCs son ampliamente utilizados en el control de procesos de producción, desde la mezcla de ingredientes hasta el envasado y etiquetado de productos (Caldwell, 2023). Por ejemplo, en una fábrica de bebidas, los PLCs pueden controlar la temperatura, presión y tiempo de procesamiento en cada etapa de la producción, garantizando la calidad y seguridad de los productos finales.

Oluseyi et al. (2022) explican que la filosofía del consumo eficiente de energía contribuye a lograr costos de producción rentables en las industrias manufactureras. Esto se debe a que el costo unitario de producción está determinado en gran medida por el costo del suministro unitario de energía, que es bastante más alto que el costo de las materias primas en algunos países. Por ejemplo, en Nigeria el sector industrial es responsable del 8,7% del consumo total de energía del país. De esta porción, la industria de alimentos y bebidas se apropia aproximadamente del 2%. Mientras tanto, se observa que la tendencia del consumo de energía en la mayoría de los motores eléctricos industriales es siempre alta debido al funcionamiento continuo incluso durante el período de inactividad en producción. Por lo tanto, esto está sujeto a un análisis de regresión que ayuda a predecir la tendencia del consumo de energía durante un período de un año.

Además de esto, la capacidad de los principios de control en el consumo eficiente de energía se demuestra mediante la implementación práctica en tiempo real de un ahorro de energía inteligente en las industrias alimentarias utilizando el software PLClogix (Oluseyi et al., 2022). El diagrama de escalera de control lógico programable (PLC) que desarrollaron se diseñó e implementó utilizando control de lógica difusa (FLC), después de una simulación que utilizó la caja de herramientas MATLAB/Simulink.

Ese diseño generó una reducción en el consumo de energía eléctrica del 65,59% en la sección de sellado de cajas de la planta. Finalmente, basándose en los cálculos matemáticos obtenidos a partir de observaciones de procesos de producción típicos en la empresa multinacional de alimentos y bebidas, se estableció que el FLC proporciona una

eficiencia del 99,83% en la optimización del consumo de energía, como lo describen Oluseyi et al. (2022).

Las anteriores son experiencias internacionales exitosas en el empleo de PLCs para mejorar la eficiencia operativa y el mantenimiento de sistemas industriales en una variedad de sectores.

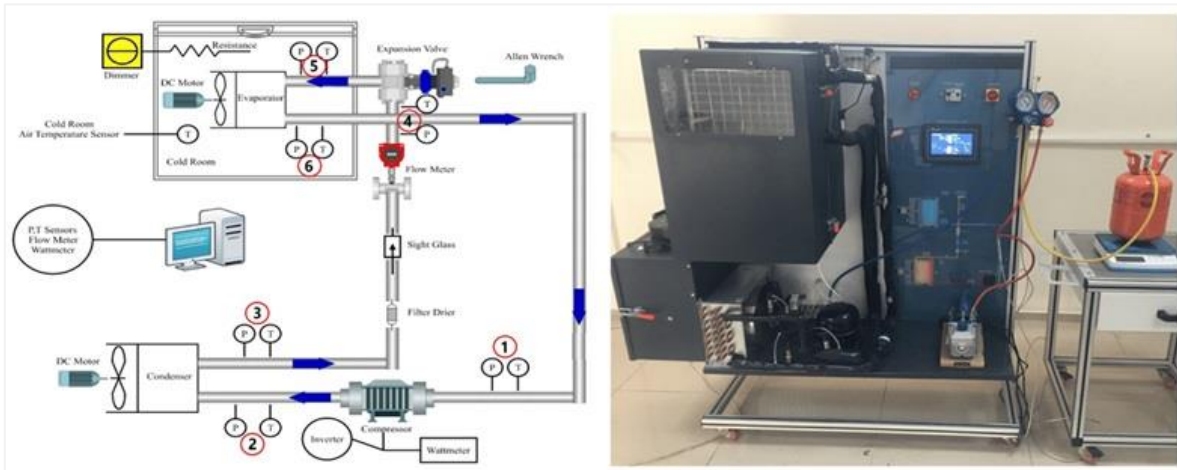
## **11. Opciones para racionalizar los costos operativos de sistemas de refrigeración industrial**

Como se mostró antes, los PLC pueden utilizarse para automatizar y optimizar diversas funciones dentro de un sistema de refrigeración industrial, lo que conduce a una mayor eficiencia energética, reducción de costos de mantenimiento y una operación más sostenible. A continuación, se describen las principales opciones y enfoques para racionalizar los costos operativos aplicando PLCs en sistemas de refrigeración industrial.

En primer lugar, bajo el enfoque consiste de mejorar la eficiencia energética se parte del hecho de que los sistemas de refrigeración industrial consumen una cantidad significativa de energía, y la optimización del uso de esta energía resulta crítica para reducir costos. Los PLCs pueden monitorear y controlar el funcionamiento de compresores, ventiladores y otros componentes críticos, ajustando su operación en tiempo real para mantener la eficiencia máxima. Por ejemplo, pueden regular la velocidad de los compresores según la demanda real de refrigeración, evitando el funcionamiento a plena capacidad cuando no es necesario, como se muestra en la Figura 3. Esto no solo reduce el consumo de energía, sino que también

disminuye el desgaste de los componentes, prolongando su vida útil y reduciendo los costos de mantenimiento.

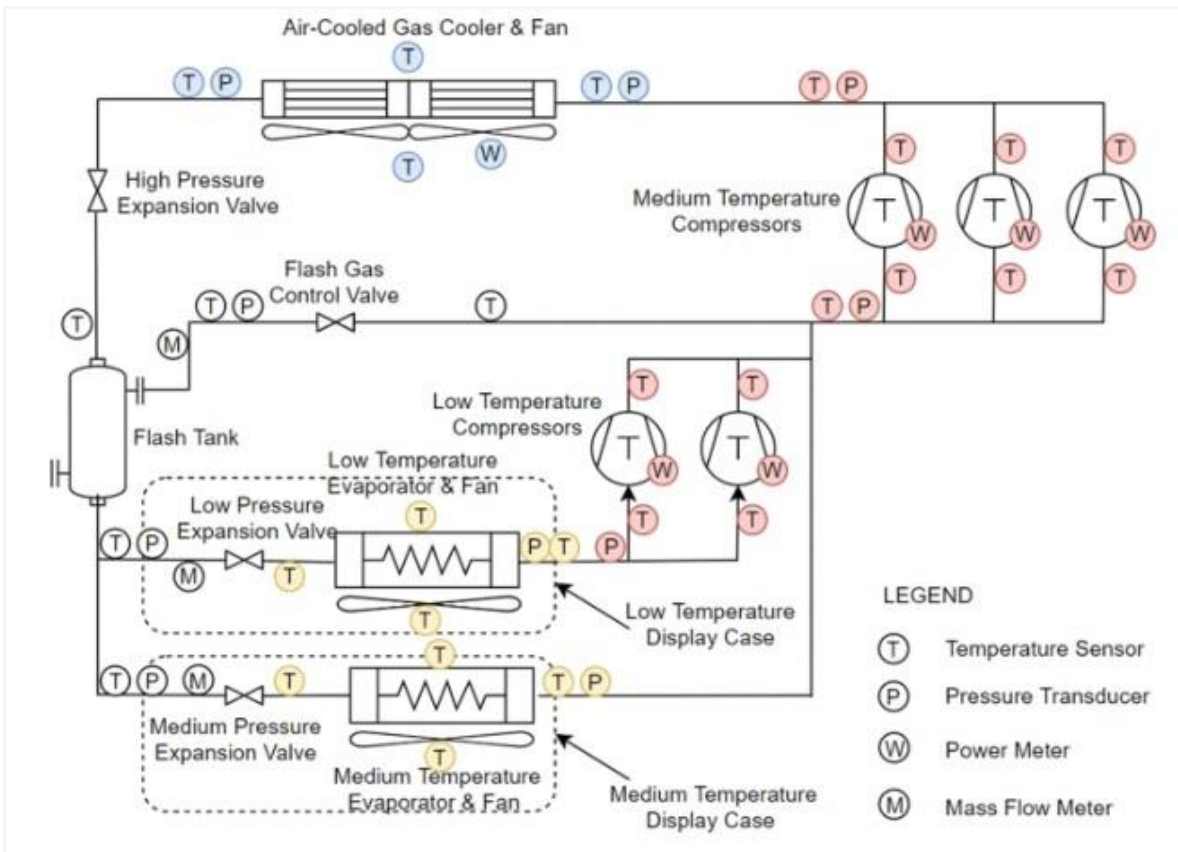
**Figura 3. Imagen esquemática y real de un sistema experimental de refrigeración por compresión de vapor y puntos de medición.**



*Nota:* publicado por Aktyol et al. (2022)

Además de la eficiencia energética, los PLCs permiten una mejor gestión del mantenimiento preventivo. Como se mostró antes, los sistemas de refrigeración están sujetos a desgaste y fallos mecánicos que pueden ser costosos de reparar y que pueden causar interrupciones significativas en la operación. Los PLCs pueden realizar un seguimiento continuo del estado de los componentes del sistema, identificar problemas potenciales antes de que se conviertan en fallos graves y alertar al personal de mantenimiento para que tome las medidas necesarias; un diseño de ese tipo se muestra en la Figura 4. Esta capacidad de diagnóstico y monitoreo en tiempo real permite programar el mantenimiento preventivo de manera más efectiva, evitando paradas no planificadas y reduciendo los costos asociados con las reparaciones de emergencia.

**Figura 4. Captura de datos del sistema de refrigeración para la detección y el diagnóstico de fallas**



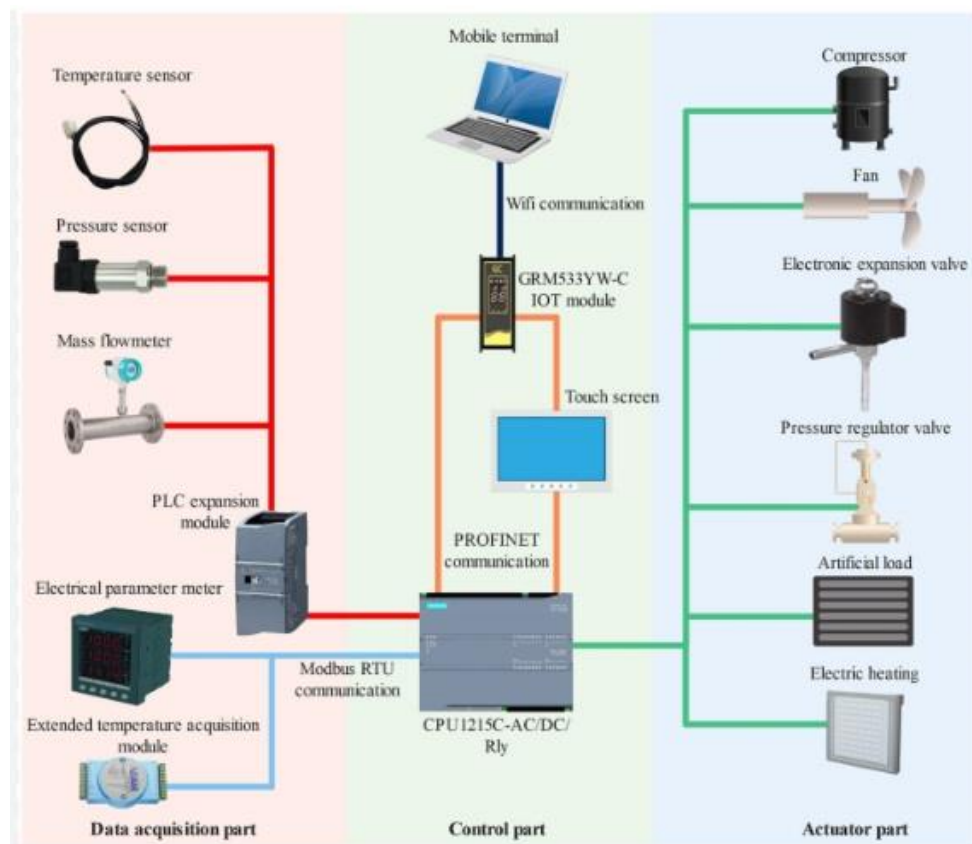
*Nota:* publicado por Sun et al. (2021)

Otra opción para racionalizar los costos operativos es la integración de los PLCs con sistemas de gestión energética. Estos sistemas proporcionan una visión integral del consumo de energía y permiten analizar los patrones de uso para identificar oportunidades de ahorro. Al combinar la información de los PLCs con datos de otros sistemas, como sensores de temperatura y humedad, es posible implementar estrategias avanzadas de control de energía, como se representa en el esquema de la Figura 5 . Por ejemplo, los PLCs pueden ajustar los parámetros de operación de los sistemas de refrigeración en función de las condiciones ambientales externas, optimizando así el uso de energía en todo momento. Esto es



La automatización de procesos mediante PLCs también contribuye a la racionalización de los costos operativos al reducir la necesidad de intervención manual. Los sistemas automatizados pueden realizar ajustes y tomar decisiones basadas en datos en tiempo real, lo que minimiza el riesgo de errores humanos y mejora la consistencia de la operación.

**Figura 6. Actualización de los controles para mejorar los procesos en planta de refrigeración industrial**



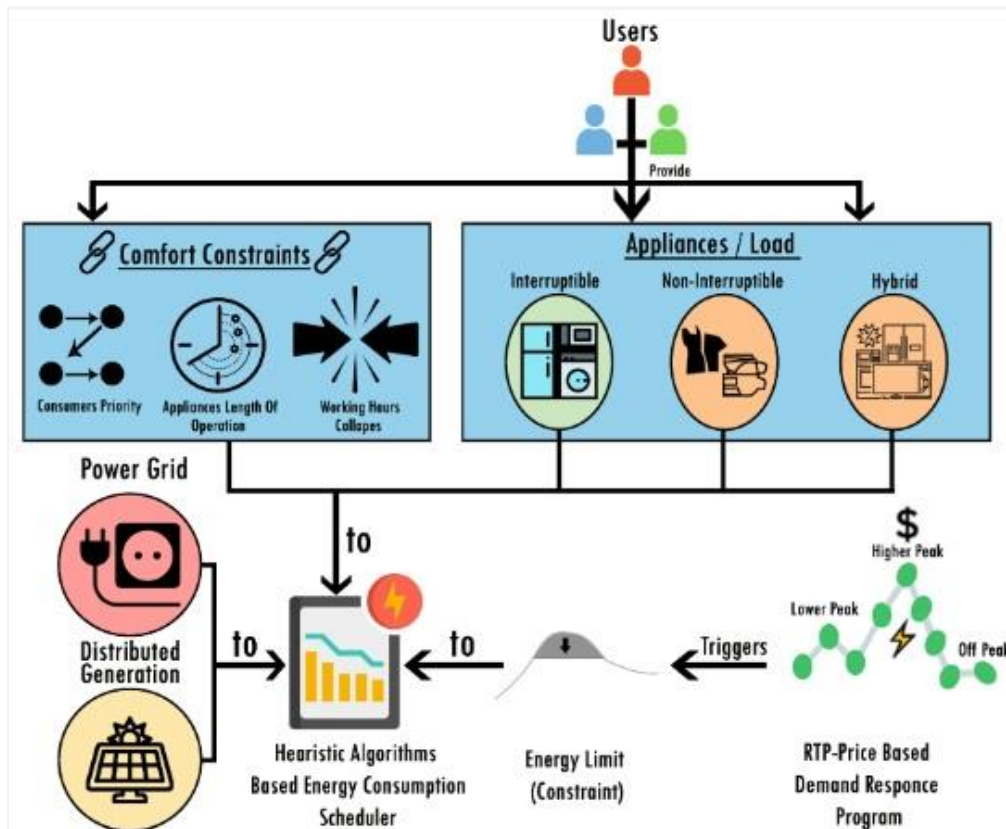
*Nota:* publicado por Gao et al. (2022)

Por ejemplo (ver Figura 6), en un sistema de refrigeración industrial, los PLCs pueden gestionar automáticamente la secuencia de arranque y parada de los compresores, equilibrar la carga entre múltiples unidades y ajustar los parámetros de operación en función de la

demanda. Esto no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también libera al personal para que se concentre en tareas más estratégicas y de mayor valor agregado.

La conectividad y la integración de los PLCs con otros sistemas de gestión también son aspectos importantes para racionalizar los costos operativos. Los PLCs modernos pueden estar equipados con capacidades de comunicación que les permiten integrarse con sistemas de supervisión y adquisición de datos (SCADA), sistemas de gestión de edificios (BMS) y otros sistemas empresariales. Esta integración facilita el intercambio de información y la coordinación entre diferentes sistemas, lo que mejora la eficiencia global y permite una gestión más centralizada y efectiva de los recursos. Por ejemplo, los datos recopilados por los PLCs pueden ser utilizados para optimizar la programación de la producción, ajustar el uso de energía en función de las tarifas horarias y coordinar el mantenimiento con las operaciones de producción. Una opción como esta no solamente tiene incidencia en el sistema de refrigeración, sino que permite optimizar la gestión de todo el proceso productivo de una instalación industrial, como se representa en el esquema de la Figura 7.

**Figura 7. Programador de consumo de energía óptimo en tiempo real en microrred inteligente**



*Nota: publicado por Albogamy (2022)*

Como se puede ver, existen diversas opciones para incorporar los PLC en sistemas de refrigeración industrial que permiten racionar los costos de operación y mantenimiento.

## 12. Análisis de costos de la implementación

Como se observó a lo largo de este trabajo, existen diversas opciones para incorporar PLCs con el objeto de racionalizar los costos asociados a la operación y el mantenimiento de equipos de refrigeración industrial. Adicionalmente, existen diversas industrias que utilizan

sistemas de refrigeración y dentro de cada tipo de industria existen distintos tamaños de empresas. Lo anterior permite concluir que necesariamente existen diversos niveles de inversión inicial para la implementación de los PLCs en los sistemas de refrigeración en esas industrias y, de igual forma, los niveles de reducción de costos que se obtienen varían en relación con esa diversidad de tipos de industrias y de tamaños de las mismas.

Por lo anterior, la evaluación de los porcentajes de participación de los costos de los sistemas de refrigeración dentro del total de costos en diferentes tipos de industrias es una tarea compleja debido a la variabilidad de las necesidades específicas y los procesos operativos de cada sector. Sin embargo, se pueden identificar algunos patrones y tendencias generales que permiten comprender mejor la relevancia de estos costos en el contexto industrial.

En la industria alimentaria, los sistemas de refrigeración son esenciales para la conservación de productos perecederos. Aquí, los costos de refrigeración pueden representar entre el 20% y el 50% del total de costos operativos, dependiendo del tipo de producto y de la cadena de frío requerida (Hart et al., 2021) (Obregón et al., 2021). Por ejemplo, en la producción y almacenamiento de productos lácteos o cárnicos, los sistemas de refrigeración deben funcionar continuamente para mantener la calidad y seguridad alimentaria, lo cual incrementa significativamente los costos energéticos y de mantenimiento. Además, las inversiones iniciales en equipos de refrigeración avanzados también son elevadas, lo que contribuye a un mayor porcentaje de costos fijos.

En la industria farmacéutica, la refrigeración también juega un papel crítico, especialmente para medicamentos y vacunas que requieren condiciones de almacenamiento

controladas para mantener su eficacia. En este sector, los costos de refrigeración pueden llegar a representar hasta un 30% del total de costos operativos (Guerrero et al., 2022) (Li et al., 2021). Los sistemas de refrigeración en esta industria no solo deben ser eficientes energéticamente, sino también altamente fiables y con capacidad de monitoreo constante para evitar cualquier interrupción que podría comprometer la calidad de los productos.

Por otro lado, en la industria química, los sistemas de refrigeración son fundamentales para controlar las reacciones químicas y mantener la estabilidad de ciertos compuestos. Aquí, el porcentaje de participación de los costos de refrigeración varía ampliamente, pero puede estar en un rango del 15% al 40% del total de costos, dependiendo de los procesos específicos y la naturaleza de los productos fabricados (He Fuenzalida et al., 2022) (Osman et al., 2023). En plantas químicas donde se manejan materiales altamente reactivos o sensibles a la temperatura, los sistemas de refrigeración deben ser robustos y capaces de mantener condiciones precisas, lo que incrementa tanto los costos de instalación como los de operación y mantenimiento.

En la industria de la manufactura general, la necesidad de refrigeración puede no ser tan prominente como en los sectores mencionados anteriormente, pero aun así tiene un impacto significativo. En sectores como la fabricación de productos electrónicos o automotrices, la refrigeración es necesaria para el control de calidad en procesos de ensamblaje y prueba de componentes. Aquí, los costos de refrigeración pueden representar alrededor del 10% al 25% del total de costos operativos (Monroy, 2023) (Pimenov et al., 2022). Aunque la proporción puede ser menor, la precisión y la eficiencia de los sistemas de

refrigeración siguen siendo utilizados para evitar fallos en los productos y garantizar la eficiencia de la producción.

La variabilidad en los porcentajes de participación de los costos de refrigeración se debe a múltiples factores, entre ellos, la eficiencia energética de los sistemas utilizados, el clima local, el diseño de las instalaciones y las prácticas de gestión energética adoptadas por cada industria. Las empresas en climas más cálidos, por ejemplo, pueden enfrentar costos de refrigeración más altos debido a la mayor demanda de enfriamiento, mientras que las industrias que invierten en tecnologías de refrigeración más eficientes pueden reducir su consumo energético y, por ende, sus costos operativos.

**Tabla 3. Participación de los costos de refrigeración según el sector industrial**

Sectores industriales	Participación de los costos de refrigeración
Industria alimentaria	20% a 50%
Industria farmacéutica	Hasta 30%
Industria química	15% a 40%
Industria de manufactura en general	10% a 25%
Rango general	10% a 50%

*Nota:* elaboración propia con base Hart et al. (2021), Obregón et al. (2021), Guerrero et al. (2022), Li et al. (2021), He Fuenzalida et al. (2022), Osman et al. (2023), Monroy (2023), Pimenov et al. (2022).

Como se observa, los costos de los sistemas de refrigeración pueden representar una parte significativa del total de costos en diferentes tipos de industrias, variando ampliamente desde un 10% hasta un 50% dependiendo del sector y de las condiciones específicas de operación. La inversión en sistemas de refrigeración eficientes y el monitoreo constante de su desempeño son estrategias clave para gestionar y optimizar estos costos, asegurando la

continuidad y calidad de los procesos productivos. La comprensión de estos porcentajes de participación es esencial para la planificación financiera y la toma de decisiones estratégicas en cualquier industria que dependa de la refrigeración para sus operaciones diarias.

Ahora bien, como se mostró antes, la implementación de Controladores Lógicos Programables (PLCs) en sistemas de refrigeración industrial ha demostrado ser una estrategia efectiva para reducir los costos operativos y de mantenimiento en diversas industrias. Los PLCs permiten una automatización avanzada y un control preciso de los sistemas de refrigeración, optimizando su funcionamiento y eficiencia energética. Estos controladores, al integrarse en la cadena de suministro y en los procesos de mantenimiento, permiten monitorear en tiempo real el rendimiento de los equipos, anticipando fallos y ajustando parámetros operativos de manera automática para maximizar la eficiencia.

En la industria alimentaria, la refrigeración es esencial para preservar la calidad y seguridad de los productos. La implementación de PLCs en estos sistemas puede llevar a una reducción significativa en los costos operativos, aproximadamente del 15% al 30% (Salas & López, 2024), (Konur et al., 2021). Esto se logra a través de la optimización del uso de energía, dado que los PLCs ajustan continuamente la operación de los compresores y otros componentes del sistema de refrigeración según la demanda real, evitando el uso innecesario de energía y prolongando la vida útil de los equipos al reducir el desgaste por operación continua.

En la industria farmacéutica, donde la refrigeración se utiliza para el almacenamiento de medicamentos y vacunas, los PLCs permiten mantener condiciones precisas de temperatura y humedad. Aquí, la reducción en los costos de operación y mantenimiento

puede llegar a ser de hasta un 25%, debido a la capacidad de los PLCs para detectar y corregir anomalías antes de que se conviertan en problemas mayores (Figueroa, 2022), (Kim et al., 2022). Además, la automatización facilita el cumplimiento de las normativas estrictas de almacenamiento, evitando sanciones y pérdidas de producto por fallos en el sistema de refrigeración.

En la industria química, los sistemas de refrigeración controlan las reacciones químicas y mantener la estabilidad de ciertos compuestos. La integración de PLCs en estos sistemas puede resultar en una reducción de costos de alrededor del 20% al 35% (Mata, 2021), (Efe et al., 2021). Los PLCs permiten un control preciso de las temperaturas y flujos, adaptándose rápidamente a los cambios en las condiciones del proceso, lo que reduce el consumo energético y minimiza el riesgo de reacciones no deseadas. Asimismo, al automatizar el monitoreo y diagnóstico de fallos, se pueden evitar costosos tiempos de inactividad y reparaciones de emergencia.

En la manufactura general, la necesidad de refrigeración puede no ser tan crítica como en los sectores antes mencionados, pero sigue siendo importante para procesos específicos como el control de calidad en la fabricación de productos electrónicos o automotrices. En estos casos, los PLCs pueden contribuir a una reducción de costos de aproximadamente el 10% al 20% (Tinoco, 2020), (Kumar et al., 2021). Los sistemas de refrigeración automatizados aseguran que los componentes electrónicos se mantengan a temperaturas óptimas durante las pruebas y ensamblajes, reduciendo el desperdicio y mejorando la eficiencia de producción.

Además de las reducciones directas en costos operativos y de mantenimiento, la implementación de PLCs en sistemas de refrigeración también aporta beneficios adicionales, como la mejora de la sostenibilidad ambiental y la reducción de la huella de carbono. Al optimizar el uso de energía y prolongar la vida útil de los equipos, los PLCs contribuyen a una operación más ecológica y a la disminución de residuos industriales. Esto no solo es beneficioso desde un punto de vista medioambiental, sino que también puede resultar en incentivos y subvenciones por parte de organismos gubernamentales y reguladores interesados en promover prácticas industriales sostenibles.

**Tabla 4. Reducción de costos de refrigeración mediante implementación de PLC**

Tipo de industria	Reducción en costos de refrigeración
Industria alimentaria	15% a 30%
Industria farmacéutica	Hasta 25%
Industria química	20% a 35%
Manufactura en general	10% a 20%
Rango general	10 a 35%

*Nota:* elaboración propia con base en Salas y López (2024), Konur et al. (2021), Figueroa (2022), Kim et al. (2022), Mata (2021), Efe et al. (2021), Tinoco (2020), Kumar et al. (2021)

Como lo muestra esta Tabla 4, la implementación de PLCs en sistemas de refrigeración en diversas industrias puede llevar a una significativa reducción de costos operativos y de mantenimiento, variando entre un 10% y un 35% dependiendo del sector específico y las condiciones de operación. La automatización y el control preciso proporcionados por los PLCs optimizan el uso de energía, prolongan la vida útil de los equipos y mejoran la eficiencia general de los sistemas de refrigeración, resultando en beneficios tanto económicos como ambientales para las empresas.

Por último, al combinar los resultados de la Tabla 3 con la Tabla 4, se puede observar que la implementación de PLCs en los sistemas de refrigeración puede contribuir a una reducción general de los costos de operación de las industrias en general entre un mínimo de 1% y un máximo de 17.5%. Estas cifras resultan significativas, si se tiene en cuenta que los niveles de rentabilidad industrial suelen estar por debajo de 5% (Germán & Marines, 2023), (Sari et al., 2022) y que los costos de operación pueden corresponder aproximadamente al 25% en el sector industrial (Peñaranda et al., 2020).

A las anteriores cifras hay que agregar la reducción en los costos de reposición de equipos de refrigeración debido a su menor desgaste por la implementación de los PLCs. Esa cifra podría asumirse, en términos generales, como comparativa con el costo de esa implementación. Sin embargo, un análisis más preciso puede hacerse en cada caso en particular para cada empresa de forma específica.

### **13. Conclusiones**

Se puede observar que se logró cumplir con los objetivos establecidos al comienzo de esta investigación. En cuanto a los factores que generan los costos más representativos de la operación y mantenimiento de equipos de refrigeración industrial se encontró que el compresor suele ser el componente que usualmente genera la mayor cantidad de costos, especialmente cuando los equipos son antiguos. También se encontró que las nuevas tecnologías, como los refrigerantes de bajo potencial de calentamiento global (GWP) y el empleo de sistemas de control más eficientes, hacen que se reduzcan esos costos, incluyendo

la menor demanda de energía. En los entornos industriales, los sistemas de refrigeración suelen operar de forma continua, por lo que su adecuada gestión puede tener un impacto considerable en los costos generales de operación y en el desgaste de sus componentes. Igualmente es crítico garantizar que estos equipos estén aislados de fuentes de corrosión, humedad, productos químicos y gases que suelen abundar en los entornos industriales.

Por otro lado, se identificaron diversas experiencias internacionales que han sido exitosas en el empleo de PLCs que han ayudado a optimizar la operación y el mantenimiento de sistemas industriales. Concretamente se registraron y se expusieron experiencias en sectores como el automotriz, la gestión de energía en plantas industriales, en la minería, la agricultura y en el sector de alimentos y bebidas.

Así mismo, se definieron opciones concretas para racionalizar los costos que se generan por la operación de sistemas de refrigeración industrial, como son el sistema de refrigeración por compresión de vapor con puntos de medición soportado por PLCs, la captura de datos del sistema de refrigeración para la detección y el diagnóstico de fallas, la gestión de energía basada en PLC para instalaciones industriales, la actualización de controles para el mejoramiento de los procesos en plantas de refrigeración industrial y la programación de consumo de energía óptimo en tiempo real en microrredes inteligentes.

Adicionalmente se realizó el análisis de costo de implementación de sistemas apoyados en PLCs en sistemas de refrigeración, para diferentes sectores industriales. Se encontró que el impacto de los sistemas de refrigeración en el total de costos operativos de las industrias puede variar entre un mínimo de 10% a 25% para la industria manufacturera en general, hasta un máximo de entre 20% y 50% para la industria alimentaria. El empleo de

PLCs en estos sistemas de refrigeración puede lograr ahorros de esos costos operativos en niveles que pueden ir desde un mínimo de 10% a 20% en las empresas industriales dedicadas a la manufactura en general, hasta un máximo de 20% a 35% en la industria química.

Todos los resultados obtenidos se basaron en el empleo de una metodología de enfoque cualitativo, de alcance exploratorio. Las principales restricciones o limitaciones relacionadas con el presente trabajo se derivaron de la diversidad de industrias y de tipos de sistemas de refrigeración que existen. Por lo anterior, si se desea hacer un análisis específico de diseño de un sistema de refrigeración industrial apoyado en PLCs para reducir los costos de operación y mantenimiento, se puede escoger entre las opciones identificadas en este trabajo, de acuerdo con las condiciones específicas del caso objeto de estudio.

En cuanto a los posibles temas de investigación dentro de esta misma línea se puede plantear ¿cómo la integración de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) con PLCs puede proporcionar datos en tiempo real y análisis predictivos para optimizar la operación y mantenimiento de sistemas de refrigeración doméstica? Este tema es de interés especialmente en países con estaciones, debido a la variación de las condiciones externas debido precisamente a los cambios de clima que se presentan a lo largo del año.

### **Referencias Bibliográficas**

Akyol, S., Das, M., & Alatas, B. (2022). Modeling the energy consumption of R600a gas in a refrigeration system with new explainable artificial intelligence methods based on hybrid optimization. *Biomimetics*, 8(5), 39-46.

- Alamri, A. (2020). Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines—An overview. *Engineering failure analysis*, 116, 104-135.
- Alba, C., Alkhatib, I., Llovell, F., & Vega, L. (2021). Assessment of low global warming potential refrigerants for drop-in replacement by connecting their molecular features to their performance. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(50), 17034-17048.
- Albogamy, F. (2022). Optimal Energy Consumption Scheduler Considering Real-Time Pricing Scheme for Energy Optimization in Smart Microgrid. *Energies*, 15(21), 8015, 1-31. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/en15218015>
- Alklaibi, A., & Lior, N. (2021). Waste heat utilization from internal combustion engines for power augmentation and refrigeration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 16-29.
- Ashiwai, V., Gutierrez, A., & Zoitl, A. (2022). Implementing a PLC-Service bus with IEC 61499. *5th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 1-7.
- Caldwell, D. (2023). Automation in Food Manufacturing and Processing. . *Springer Handbook of Automation*, 949-971.
- Castro, H. (2023). *Efectos de la concentración en la industria portacontenedores en conjunto con menores costos de operación: El caso de la importación a Estados Unidos*. Universidad de Chile.

- Cusati, V., Corcione, S., & Memmolo, V. (2021). Impact of structural health monitoring on aircraft operating costs by multidisciplinary analysis. *Sensors*, 21(20), 39-68.
- Efe, E., Özcan, M., & Haki, H. (2021). Building and Cost Analysis of an Industrial Automation System using Industrial Robots and PLC Integration. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 1-10.
- Figueroa, G. (2022). *Diseño de un sistema de automatización en el proceso de llenado de suero para la optimización de recursos, aplicado en una industria farmacéutica ubicada en el municipio de Mixco, Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Flores, L., & Blanco, J. (2021). Determinación de costos operativos y su incidencia en la rentabilidad económica y financiera de las empresas de transportes urbano de pasajeros de la ciudad de Puno–Perú. *Actualidad Contable FACES*, 24(43), 76-92.
- Fronchetti, F., Ritschel, N., Holmes, R., Li, L., Soto, M., Jetley, R., & Shepherd, D. (2022). Language impact on productivity for industrial end users: A case study from Programmable Logic Controllers. *Journal of Computer Languages*, 69, 87-101.
- Froztec. (2024). *Guía básica: Principales componentes y accesorios en la refrigeración industria*. Obtenido de Blog Froztec: <https://blog.froztec.com/guia-basica-principales-componentes-y-accesorios-en-la-refrigeracion-industrial>
- Galarza, C. (2020). Los alcances de una investigación. *CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, 9(3), 1-6.

- Gao, J., Wang, J., & Xie, J. (2022). Application of PLC and HMI in the CO2 transcritical refrigeration experimental platform. *Scientific Reports*, *12*(1), 15199, 1-15.
- Garcia, E., Montés, N., Llopis, J., & Lacasa, A. (2022). Miniterm, a Novel Virtual Sensor for Predictive Maintenance for the Industry 4.0 Era. *Sensors*, *22*(16), 22-62.
- Germán, V., & Marines, A. (2023). Modelando crecimiento y rentabilidad empresarial de la industria de Coahuila. *Ensayos. Revista de economía*, *42*(1), 1-32.
- Gómez, J. (2021). *Eficiencia energética en el sector industrial*. Cuadernos Orkestra.
- Guerrero, K., Martínez, O., & Rosa, J. (2022). *Propuesta de diseño de una cámara de enfriamiento controlado a bajas temperaturas*. Universidad de El Salvador.
- Guo, Z., Zhou, D., Zhou, Q., Zhang, X., Geng, J., Zeng, S., & Hao, A. (2020). Applications of virtual reality in maintenance during the industrial product lifecycle: A systematic review. *Journal of Manufacturing Systems*, *56*, 525-538.
- Hari, I., Rahmarestya, E., & Harsono, H. (2021). Development of IoT Based Smart Irrigation System with Programmable Logic Controller. *International Journal of Agriculture System*, *9*(1), 27-39.
- Hart, M., Austin, W., Acha, S., Le Brun, N., Markides, C., & Shah, N. (2021). Hart, M., Austin, W., Acha, S., Le Brun, N., Markides, C. N., & Shah, N. (2020). A roadmap investment strategy to reduce carbon intensive refrigerants in the food retail industry. *Journal of cleaner production*, *275*, 123039. *Journal of cleaner production*, *275*, 127-139.

- He Fuenzalida, C., Pérez, O., & Espinoza, H. (2022). *Evaluación a la fabricación industrial de pellet a base de residuos generados de la planta productora de aceite de oliva Siracusa SA*. Universidad de Talca.
- He, W., King, M., Luo, X., Dooner, M., Li, D., & Wang, J. (2021). Technologies and economics of electric energy storages in power systems: Review and perspective. *Advances in Applied Energy*, 4, 60-100.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación 6a. ed.* México D.F.: Mc-Graw Hill.
- Herrera, A. (2021). *Diseño de un sistema de refrigeración para un motor de combustión interna*. Universidad de Antioquia.
- Imam, M., & Francis, M. (2021). PLC based automated irrigation system. *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol*, 9, 1519-1525.
- Jiménez, L. (2020). Impacto de la investigación cuantitativa en la actualidad. *Convergence Tech*, 4(IV), 59-68.
- Kaltjob, P. (2020). *Control of mechatronic systems: model-driven design and implementation guidelines*. John Wiley & Sons.
- Kim, Y., Atukeren, E., & Lee, Y. (2022). A new digital value chain model with PLC in biopharmaceutical industry: The implication for open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 8(2), 63-90.

- Konur, S., Lan, Y., Thakker, D., Morkyani, G., Polovina, N., & Sharp, J. (2021). Towards design and implementation of Industry 4.0 for food manufacturing. *Neural Computing and Applications*, 1-13.
- Kumar, R., Patil, O., Nath, K., Sangwan, K., & Kumar, R. (2021). A machine vision-based cyber-physical production system for energy efficiency and enhanced teaching-learning using a learning factory. *Procedia CIRP*, 98, 424-429.
- Li, Y., Bhagwat, S., Cortés, Y., Ki, D., Rao, C., Jin, Y., & Guest, J. (2021). Sustainable lactic acid production from lignocellulosic biomass. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(3), 1341-1351.
- Lv, W., & Wang, C. (2023). Intelligent control of heavy media separation. *International Journal of Global Energy Issues*, 45(1), 86-100.
- Mata, J. (2021). *Proyecto de Recuperación de Polímeros Industriales*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Medina, R. (2022). Tipos de mantenimiento en las unidades de medición de producción de pozos petroleros. *Revista de Investigación en Ciencias de la Administración Enfoques*, 6(21), 37-49.
- Mo, F., Querejeta, M., Hellewell, J., Rehman, H., Rezabal, M., Chaplin, J., & Ratchev, S. (2023). PLC orchestration automation to enhance human-machine integration in adaptive manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 71, 172-187.

- Molęda, M., Małysiak, B., Ding, W., Sunderam, V., & Mrozek, D. (2023). From corrective to predictive maintenance—A review of maintenance approaches for the power industry. *Sensors*, *23*(13), 59-70.
- Monroy, E. (2023). *Evaluación de costos ocultos dentro del proceso de devolución de productos frescos en una empresa de alimentos*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Mourtzis, D., Angelopoulos, J., & Panopoulos, N. (2021). Design and development of an IoT enabled platform for remote monitoring and predictive maintenance of industrial equipment. *Procedia Manufacturing*, *54*, 166-171.
- Muñoz, J., Cedeño, J., Castillo, C., & Minguela, J. (2023). Estudio energético y exergético de un sistema de refrigeración por eyecto-compresión con doble IHX. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, *6*(3), 1-27.
- Nanclares, C., & Gómez, L. (2022). *Emprendimiento Corporativo como impulsor de la agilidad organizacional*. Universidad de Antioquia.
- Negirla, P., Druță, R., & Silea, I. (2020). Availability Improvements through data slicing in PLC smart grid networks. *Sensors*, *20*(24), 56-72.
- Obregón, N., Peñaranda, D., Nieto, C., & Caruso, N. (2021). Implementación de una estrategia para aumentar la productividad de las empresas del sector industrial en el departamento del Atlántico. *Boletín de Innovación, Logística y Operaciones*, 1-13.

- Oluseyi, P., Adeagbo, J., Dinakin, D., & Babatunde, O. (2022). Implementation of Control to Predicted Energy Consumption in a Food and Beverage Industry Using Regression Analysis. *iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 1-15.
- Osman, A., Chen, L., Yang, M., Msigwa, G., Farghali, M., Fawzy, S., & Yap, P. (2023). Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(2), 741-764.
- Ossorio, R., & Navarro, E. (2023). Testing of Variable-Speed Scroll Compressors and their inverters for the evaluation of compact energy consumption models. *Applied Thermal Engineering*, 230, 110-125.
- Oudah, M., Mejbel, M., & Allawi, M. (2021). R134a flow boiling heat transfer (FBHT) characteristics in a refrigeration system. *J. Mech. Eng. Res. Dev*, 44(4), 69-83.
- Pal, P., Parvathy, A., Devabalaji, K., Antony, S., Ocheme, S., Babu, T., & Yuvaraj, T. (2021). IoT-based real time energy management of virtual power plant using PLC for Transactive energy framework. *IEEE Access*, 9, 97643-97660.
- Palma, M. (2023). *Avances Tecnológicos: Hidrógeno Verde, Modernización de Grúas y Control de Procesos en Planta*. Universidad de Salamanca.
- Papulová, Z., Gažová, A., & Šufliarský, Ľ. (2022). Implementation of automation technologies of industry 4.0 in automotive manufacturing companies. *Procedia Computer Science*, 200, 1488-1497.

- Paul, J., Lim, W., O’Cass, A., Hao, A., & Bresciani, S. (2021). Scientific procedures and rationales for systematic literature reviews (SPAR-4-SLR). *International Journal of Consumer Studies*, 45(4), 1-16.
- Peñaloza, L., Rubiano, K., Mendoza, L., Fernández, L., Meza, A., Parra, O., & Ruiz, G. (2022). *Diseño de un sistema de trigeneración para distritos térmicos alimentados por nergía solar/calor residual de un motogenerador a gas natural*. Universidad del Norte.
- Peñaranda, M., Sánchez, C., Flórez, L., & Torres, K. (2020). SLP methodology for plant distribution in glue laminated guadua (GLG) manufacturing companies. *Ingeniería*, 25(2), 103-116.
- Pimenov, D., Mia, M., Gupta, M., Machado, Á., Pintaude, G., Unune, D., & Kuntoğlu, M. (2022). Resource saving by optimization and machining environments for sustainable manufacturing: A review and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 112-135.
- Podkamenniy, Y., Bebikhov, Y., & Semenov, A. (2021). Analysis of X-ray luminescent separation of diamond ores as an automation object. . *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 937, No. 4)*, 42-53.
- Prabakaran, R., Lal, D., & Kim, S. (2023). A state of art review on future low global warming potential refrigerants and performance augmentation methods for vapour compression based mobile air conditioning system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(2), 417-449.

- Preston, N., Maroufmashat, A., Riaz, H., Barbouti, S., Mukherjee, U., Tang, P., & Fowler, M. (2020). How can the integration of renewable energy and power-to-gas benefit industrial facilities? *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(51), 26559-26573.
- Quinatoa, S., & Guano, B. (2021). *Automatización del proceso de control para una máquina selladora de fundas plásticas mediante el uso de un controlador lógico programable en las instalaciones de la industria INPLASTICO*. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Restrepo, M. (2022). *Diseño de un sistema de gestión integral documental a partir de las normas ISO 9001: 2015; 2015, ISO 14001.; ISO 45001: 2018 para la empresa Controlar Equipos Eléctricos de la ciudad de Medellín*. Universidad Santo Tomás.
- Sabino, C. (2014). *El proceso de investigación*. Editorial Episteme.
- Salas, M., & López, L. (2024). *Montaje, optimización y caracterización de un sistema de seguimiento solar de dos ejes con alta precisión y bajo nivel de ruido*. Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- Sánchez, V. (2023). *Aumento de disponibilidad de las máquinas para mejorar la productividad en una planta de fabricación de acero mediante un programa de lubricación con gestión de monitorización y control*. Universidad Técnica de Ambato.
- Sanguri, K., Ganguly, K., & Pandey, A. (2021). Modelling the barriers to low global warming potential refrigerants adoption in developing countries: A case of Indian refrigeration industry. *Journal of cleaner production*, 280, 124-157.

- Sari, D. P., Nabella, S., & Fadlilah, A. (2022). The effect of profitability, liquidity, leverage, and activity ratios on dividend policy in manufacturing companies in the food and beverage industry sector listed on the Indonesia Stock Exchange in the 2016-2020 period. *Jurnal Mantik*, 6(2), 1365-1375.
- Selvnes, H., Allouche, Y., Manescu, R., & Hafner, A. (2021). Review on cold thermal energy storage applied to refrigeration systems using phase change materials. *Thermal Science and Engineering Progress*, 22, 87-100.
- Siemens. (2021). *Tecnomatix Process Simulate Software*. Retrieved from Sw.Siemens: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/pl/products/tecnomatix/>
- Sossenheimer, J., Vetter, O., Stahl, T., Weyand, A., & Weigold, M. (2021). Hybrid virtual metering points—a low-cost, near real-time energy and resource flow monitoring approach for production machines without PLC data connection. *Procedia CIRP*, 98, 452-457.
- Sun, J., Im, P., Bae, Y., Munk, J., Kuruganti, T., & Fricke, B. (2021). Dataset of low global warming potential refrigerant refrigeration system for fault detection and diagnostics. *Scientific Data*, 8(1), 144., 1-10.
- Tinoco, S. (2020). *Gestión del proyecto de transferencia de producto del cliente Rolls-Royce dentro de las pruebas no destructivas pertenecientes a los procesos especiales en la manufactura de piezas aeroespaciales de la empresa CPP Ensenada*. Universidad Cetys.

- Touaibi, R., & Koten, H. (2021). Energy Analysis of Vapor Compression Refrigeration Cycle Using a New Generation Refrigerants with Low Global Warming Potential. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 87(2), 106-117.
- Veregy. (19 de septiembre de 2019). *PLC-based energy management systems for the modern manufacturing facility*. Obtenido de Veregy.com: <https://veregy.com/plc-based-energy-management-systems-for-the-modern-manufacturing-facility/>
- Vizcaíno, J. (2023). *Optimización de una línea de soldadura multimodelo en el sector del automóvil: heurísticas para determinar la secuencia de producción*. Universitat Politècnica de València.
- Wrobel, I., & Sidzina, M. (2021). Design Study for Automatic Production Line of a Sub-Assemblies of New Generation Car Body Structures Compliant with the “Industry 4.0” Concept. *Sensors*, 21(7), 24-34.
- Wu, C., Xu, X., Li, Q., Li, X., Liu, L., & Liu, C. (2021). Performance assessment and optimization of a novel geothermal combined cooling and power system integrating an organic flash cycle with an ammonia-water absorption refrigeration cycle. *Energy Conversion and Management*, 227, 35-62.
- Yaqub, R., & Ahmad, S. (2020). Artificial intelligence assisted consumer privacy and electrical energy management. *Global Journal of Computer Science and Technology*, 20(D1), 25-35.