



**ESTIMACIÓN DE CURVAS DE COSTO DE ABATIMIENTO DE EMISIONES DE CO₂
PARA UNA EMPRESA DEL SECTOR DE PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS EN FRÍO
EN COLOMBIA QUE PRODUCE 3MM DE KG DE PRODUCTO ANUAL**

Johan Manuel Cuéllar Buriticá

11481525374

Johan Steaven Talero Alfonso

11481617869

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecatrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá D.C., Colombia

2023

**ESTIMACIÓN DE CURVAS DE COSTO DE ABATIMIENTO DE EMISIONES DE CO₂
PARA UNA EMPRESA DEL SECTOR DE PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS EN FRÍO
EN COLOMBIA QUE PRODUCE 3MM DE KG DE PRODUCTO ANUAL**

Johan Manuel Cuéllar Buriticá

Johan Steaven Talero Alfonso

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Mecatrónico

Director:

I.M. Nicolás Giraldo Peralta Ph.D.

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecatrónica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá D.C., Colombia

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

“Estimación de curvas de costo de abatimiento de emisiones de CO₂ para una empresa del sector de producción de alimentos en frío en Colombia que produce 3mm de kg de producto anual”

Cumple con los requisitos para optar

Al título de Ingeniero Mecatrónico

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá D. C., 27 de julio de 2023

Resumen

Se presenta una investigación sobre la estimación de curvas de costo marginal de abatimiento (MACC) de emisiones de CO₂, en una empresa de producción de alimentos en frío colombiana. El objetivo principal es mejorar la eficiencia energética de los almacenes frigoríficos y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Se inicia con una revisión bibliográfica sobre el sector de producción, la conservación de la cadena de frío y sus datos de emisiones de GEI. Posteriormente se identifican y seleccionan las medidas de mitigación; se realiza una evaluación basada en la norma ISO14001 y se establecen sus ventajas y desventajas.

Se presentan los resultados del Costo Promedio de Abatimiento y la Reducción Acumulada para cada medida de mitigación. Se destaca que el uso de refrigerantes naturales y la adopción de compresores más eficientes, muestra un comportamiento negativo en la curva MACC, lo que indica que estas opciones conllevan ahorros significativos a mediano y/o largo plazo.

A través de la modelación de las diferentes medidas, se han calculado los costos de inversión (CAPEX) y los costos fijos de operación y mantenimiento (OPEX). Los resultados indican que el monto necesario para implementar todas las medidas asciende a \$1.122.926 USD.

El resultado de la curva MACC, establece una mitigación de emisiones de GEI correspondiente a 20,8 (Miles de tCO₂) anuales, que proviene principalmente del descenso de consumo de energía eléctrica, la implementación de las medidas propuestas favorece la economía de la empresa y representa una importante disminución en la necesidad energética nacional.

Palabras clave

Gases de efecto invernadero, CO₂, cadena de frío, eficiencia energética, MACC, medidas de mitigación.

Abstract

Research is presented on the estimation of marginal cost of abatement (MACC) curves of CO₂ emissions in a Colombian cold food production company. The main objective is to improve the energy efficiency of cold stores and reduce greenhouse gas (GHG) emissions.

It begins with a literature review on the production sector, cold chain conservation and its GHG emissions data. Mitigation measures are then identified and selected; an assessment based on ISO14001 is made and its advantages and disadvantages are established.

Results of the Average Abatement Cost and Cumulative Reduction are presented for each mitigation measure. It is noted that the use of natural refrigerants and the adoption of more efficient compressors, shows a negative behavior in the MACC curve, which indicates that these options entail significant savings in the medium and/or long term.

Through the modeling of the different measures, investment costs (CAPEX) and fixed operating and maintenance costs (OPEX) have been calculated. The results indicate that the amount needed to implement all measures amounts to \$1,122,926 USD.

The result of the MACC curve, establishes a mitigation of GHG emissions corresponding to 20.8 (Thousands of tCO₂) annually, which comes mainly from the decrease in electricity consumption, the implementation of the proposed measures favors the economy of the company and represents a significant decrease in the national energy need.

Keywords

Greenhouse gases, CO₂, cold chain, energy efficiency, MACC, mitigation measures.

Contenido

Resumen	IV
Abstract.....	V
CAPÍTULO 1.....	1
1 Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Objetivos.....	7
1.3 Justificación	8
CAPÍTULO 2.....	10
2 Marco teórico.....	10
2.1 La física del helado.....	10
2.1.1 Depresión del punto de congelación.....	12
2.2 Conceptos relevantes	14
2.2.1 Eficiencia energética.....	14
2.2.2 Cadena de frío.....	15
2.2.3 Calentamiento global.....	16
2.2.4 Productores de emisión de CO ₂	19
2.2.5 Consumo energético	20
2.2.6 Curvas de costo marginal de abatimiento.....	22
2.3 Medidas de mitigación de emisiones de CO ₂	23
CAPÍTULO 3.....	30
3 MAGNUS ICE	30
3.1 Elementos estructurales de la empresa MAGNUS ICE, en términos de la producción de CO ₂	30
3.1.1 Línea de operación de la empresa.....	31
3.1.2 Procesos potenciales, consumo energético y nivel de producción	33
3.1.3 Uso de maquinarias y/o herramientas que contribuyen a la producción de CO ₂ ..	37
3.1.4 Estadístico de consumo de energía y su impacto en la huella de carbono	40
3.1.5 Huella de carbono.....	42
3.2 Medidas de mitigación de emisiones de CO ₂ acordes a la empresa MAGNUS ICE	43
CAPÍTULO 4.....	48
4. Evaluación de las medidas de mitigación.....	48
4.1. Enfoque de evaluación.....	48
4.1.1. Eficiencia energética.....	49
4.1.2. Sostenibilidad ambiental.....	49

4.1.3. Durabilidad	49
4.2. Clasificación de las medidas de mitigación de la empresa.....	49
4.3. Medidas de mitigación.....	50
CAPÍTULO 5	67
5. Curvas de abatimiento para MAGNUS ICE.....	67
5.1. Cálculos efectuados	67
5.1.1. Análisis Financiero y Método de Financiación	67
5.1.1. Costos y emisiones de CO ₂ reducidas	69
5.2. Modelación de las medidas de mitigación.....	70
CAPÍTULO 6.....	75
6. Análisis de datos	75
6.1. Estrategia implementada.....	75
6.1.1. En términos de los costos	78
6.1.2. Cálculo del costo de inversión acumulado	80
6.1.3. En términos de las ventajas y desventajas	81
6.1.4. En términos de emisiones de GEI ahorrado	81
CONCLUSIONES	84
BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXO A.....	92
ANEXO B.....	126

Lista de Figuras

Figura 2.1. Formación de cristales en el proceso de disminución de la temperatura	12
Figura 2.2. Logística y cadena de frío	15
Figura 3.1. Procesos MAGNUS ICE.....	31
Figura 3.2. Flujograma de proceso general para el helado.....	32
Figura 4.1. Clasificación de las medidas de mitigación para MAGNUS ICE.....	50

Lista de Gráficos

Gráfico 1.1. Costos marginales de abatimiento de GEI en los sectores industriales en México a 2023	4
Gráfico 1.2. Curvas MACC de GEI asociado a totalidad de proyectos de eficiencia energética en molienda y clasificación de CMDIC.	5
Gráfico 1.3. Curva de costo de abatimiento de gases de efecto invernadero.	6
Gráfico 2.1. Diagrama de fase del cloruro de sodio (NaCl) y agua (H ₂ O).....	11
Gráfico 2.2. Diagrama de fases de la sacarosa en agua con las líneas trazadas para la concentración.	13
Gráfico 2.3. Curva MACC ilustrativa.	22
Gráfico 3.1. Potencial de ahorro	34
Gráfico 3.2. Producción (kg), Consumo de energía (kW/año).....	36
Gráfico 3.3. Razón de cambio entre potencia consumida y número de equipos disponibles.....	39
Gráfico 3.4. Huella de carbono corporativa para MAGNUS ICE en 2021	42
Gráfico 5.1. Construcción de curva de costo marginal de abatimiento	74
Gráfico 6.1. Medidas de mitigación de ahorro en costo marginal.....	77
Gráfico 6.2. Medidas de mitigación de mayor costo marginal.....	78
Gráfico 6.3. Razón de cambio entre los costos de inversión inicial y las reducciones de emisiones de CO ₂	79
Gráfico 6.4. Relación porcentual de costos por cada medida de mitigación.....	80
Gráfico 6.5. Relación porcentual de emisión de CO ₂ por cada medida de mitigación	82

Lista de tablas

Tabla 2.1. Medidas de control.	24
Tabla 2.2. Medidas asociadas al uso de refrigerantes.....	24
Tabla 2.3. Medidas asociadas al calor.	25
Tabla 2.4. Medidas de mantenimiento.....	26
Tabla 2.5. Medidas asociadas al uso de tecnología avanzada	26
Tabla 2.6. Medidas asociadas al uso de equipos.	27
Tabla 2.7. Medidas asociadas a la energía solar.....	27
Tabla 2.8. Medidas asociadas a materiales y edificación.	28
Tabla 2.9. Medidas asociadas a la gestión de energía,	28
Tabla 2.10. Medidas asociadas a la implementación de sistemas	29
Tabla 3.1. Precio del dólar al cierre de cada año en Colombia	35
Tabla 3.2. Costos de energía en pesos y dólares	36
Tabla 3.3. Variación porcentual para producción y consumo.	37
Tabla 3.4. Resumen de equipos de la planta de MAGNUS ICE.....	38
Tabla 3.5 Portafolio de BPOs propuestas en 2020.	40
Tabla 3.6. Factor de emisión por energía eléctrica para uso industrial	41
Tabla 3.7. Emisión de gases de efecto invernadero CO ₂ respecto al consumo eléctrico	41
Tabla 3.8. Medidas de mitigación seleccionadas para MAGNUS ICE.....	46
Tabla 4.1. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la recuperación de calor residual.....	51
Tabla 4.2. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en la recuperación de calor residual.....	51
Tabla 4.3. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la recuperación de calor residual	51
Tabla 4.4. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la utilización de paneles solares.....	52
Tabla 4.5. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en la utilización de paneles solares.....	52
Tabla 4.6. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la utilización de paneles solares.	53
Tabla 4.7. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la utilización de sistemas de cogeneración.....	53
Tabla 4.8. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad en la utilización de sistemas de cogeneración.	53
Tabla 4.9. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la utilización de sistemas de cogeneración.	54
Tabla 4.10. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la utilización de técnicas de refrigeración adiabática.	54
Tabla 4.11. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en la utilización de técnicas de refrigeración adiabática.	55

Tabla 4.12. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la utilización de técnicas de refrigeración adiabática.....	55
Tabla 4.13. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en el uso de compresores más eficientes.....	55
Tabla 4.14. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en el uso de compresores más eficientes.....	56
Tabla 4.15. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en el uso de compresores más eficientes.....	56
Tabla 4.16. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en el uso de refrigerantes naturales.....	57
Tabla 4.17. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en el uso de refrigerantes naturales.....	57
Tabla 4.18. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en el uso de refrigerantes naturales.....	57
Tabla 4.19. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la implementación de sistemas de gestión de energía.....	58
Tabla 4.20. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en la implementación de sistemas de gestión de energía.....	59
Tabla 4.21. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la implementación de sistemas de gestión de energía.....	59
Tabla 4.22. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en el diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia.....	60
Tabla 4.23. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en el diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia.....	60
Tabla 4.24. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en el diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia.....	61
Tabla 4.25. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la mejora del aislamiento de los equipos de refrigeración.....	61
Tabla 4.26. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en la mejora del aislamiento de los equipos de refrigeración.....	62
Tabla 4.27. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la mejora del aislamiento de los equipos de refrigeración.....	62
Tabla 4.28. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la utilización de tecnologías avanzadas de control.....	63
Tabla 4.29. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en la utilización de tecnologías avanzadas de control.....	64
Tabla 4.30. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la utilización de tecnologías avanzadas de control.....	64
Tabla 4.31. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la optimización del mantenimiento y servicio de equipos.....	65
Tabla 4.32. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en la optimización del mantenimiento y servicio de equipos.....	65
Tabla 4.33. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la optimización del mantenimiento y servicio de equipos.....	66

Tabla 5.1. Modelación realizada para la utilización de paneles solares	70
Tabla 5.2. Modelación realizada para la recuperación de calor residual.....	71
Tabla 5.3. Modelación realizada para el diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia...	71
Tabla 5.4. Modelación realizada para el uso de compresores más eficientes	71
Tabla 5.5. Modelación realizada para la implementación de programas de gestión de la energía	72
Tabla 5.6. Modelación realizada para la utilización de sistemas de cogeneración	72
Tabla 5.7. Modelación realizada para la utilización de técnicas de refrigeración adiabática.....	72
Tabla 5.8. Modelación realizada para la mejora del aislamiento térmico de los equipos de refrigeración	72
Tabla 5.9. Modelación realizada para el uso de refrigerantes naturales (a base de amoníaco, propano y/o dióxido de carbono)	73
Tabla 5.10. Modelación realizada para la utilización de tecnologías avanzadas de control	73
Tabla 5.11. Modelación realizada para la optimización del mantenimiento y servicio de equipos	73
Tabla 6.1. Costo promedio y reducción acumulada para cada medida de mitigación.....	76
Tabla 6.2. Costo de inversión	81

Lista de abreviaturas

ABREVIATURA	TÉRMINO
BPO	Buenas prácticas operativas
CAPEX	Capital expenditure
CFC	Clorofluorocarbonos
CH₄	Metano
CMDIC	Compañía minera doña Inés de Collahuasi
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
COV	Compuestos orgánicos volátiles
FE	Factor de emisión
GEI	Gases de efecto invernadero
GJ	Gigajulios
GLP	Gas licuado del petróleo
HFCS	Hidrofluorocarbonos
HFO	Hidrofluorolefinas
IPCC	Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático
ISO	International organization for standardization
kWh	Kilovatio hora
MACC	Marginal abatement cost curves
N₂O	Óxido nitroso
NaCl	Cloruro de sodio
NO_x	Óxidos de nitrógeno
ONG	Organización no gubernamental
ONU	Organización de las naciones unidas
OPEX	Operational expenditure
PAO	Potencial de agotamiento de ozono
PCG	Potencial de calentamiento global
PFCS	Perfluorocarbonos
R-134	Gas refrigerante HFC puro
R290	Refrigerante a base de propano
R-404	Refrigerante de hidrofluorocarbono
R-404	Refrigerante de hidrofluorocarbono (HFC) mezclado
R-407	Mezcla de gases refrigerantes HFC
R717	Refrigerante a base de amoníaco
R744	Refrigerante a base de dióxido de carbono
RFID	Identificación por radio frecuencia
ROI	Retorno de inversión
SEE	Superintendencia eficiencia energética
SF₆	Hexafluoruro de azufre
SGE	Sistema de gestión de energía
SIN	Sistema interconectado nacional
SO_x	Óxidos de azufre
TCO₂EQ	Tonelada CO ₂ equivalente
UNEP	Programa de las naciones unidas para el medio ambiente
UPME	Unidad de planeación minero-energética
USD	Dólar estadounidense
VPN	Valor presente neto

Dedicatoria

*A mis padres,
Jairo y Leonor; por el apoyo,
la inspiración y todo el amor.*

Johan Manuel Cuéllar Buriticá

*«Fuimos la gota de agua viajando en el meteorito
cruzamos galaxias, vacíos, milenios
buscábamos oxígeno y encontramos sueños».*

Jorge Drexler

Agradecimientos

A Dios por permitirme llegar hasta este punto además de su infinita bondad, ayuda y amor.

A mis padres y familiares que merecen todo por su apoyo incondicional día y noche, por poner su fe y su confianza en mí que me han influenciado para seguir adelante.

A la universidad Antonio Nariño por su buen recibimiento desde un principio y por permitirme lograr dar un paso más hacia el éxito y mis sueños y por poder convertirme en un profesional competitivo, lleno de conocimientos y grandes expectativas.

A todas y cada una de las personas que de alguna manera contribuyeron grandemente a que lograra esta meta, por su inspiración, apoyo moral y perseverancia que me han permitido crecer intelectualmente como persona y ser humano.

Johan Steaven Talero Alfonso

CAPÍTULO 1

1 Introducción

Uno de los problemas que más ha afectado a todo el planeta es el calentamiento global, el cual se ha convertido en una de las mayores amenazas para la humanidad. Los gases de efecto invernadero son la causa y las actividades humanas han aumentado considerablemente estos gases [1]

Un informe hecho por la Universidad Libre de Berlín, menciona que desde que comenzó la Revolución Industrial no ha dejado de incrementar el daño acumulativo a la atmósfera de nuestro planeta [2], donde temas como el crecimiento de la población, una demanda mucho más activa y la necesidad de producir mayor cantidad de energía (que generalmente se extrae de los combustibles fósiles) acrecentando la producción y el consumo, provocaron un aumento en la temperatura como nunca se había visto. En la actualidad, el IPCC (Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático), se encarga de hacer estudios sobre el calentamiento global y dentro de sus informes se indica que un calentamiento de más de 1,5 °C lograría generar perturbaciones climáticas sin precedentes, traería consigo fenómenos climáticos frecuentes e intensos teniendo así repercusiones graves en el medio ambiente [3].

La variabilidad interanual de la temperatura media mundial provocada por las circunstancias climáticas naturales se ve ahora ampliamente superada por la crisis agravada del cambio climático causada por el aumento de las concentraciones de GEI [4]. Un aumento de fenómenos meteorológicos como inundaciones, huracanes, ciclones e incendios forestales, sin contar las temperaturas altas registradas, generando que el año 2021 haya sido uno de los años más calurosos en diferentes lugares del planeta.

Para que haya un cambio importante, se tienen que implementar compromisos realmente ambiciosos para poder reducir las emisiones de GEI. A través de planes climáticos entre las

naciones, donde se comprometan a la eliminación gradual de la energía del carbón y de los combustibles fósiles y con ello, lograr alcanzar el objetivo de tener un incremento inferior a 1,5 °C en el planeta.

El acuerdo de París ha sido una de las estrategias que ya están gestionando acciones climáticas. Una de sus principales fortalezas, es la implementación de conocimiento, tecnologías y financiación necesaria para ejecutar eficazmente estas acciones por tiempo prolongado de cinco años y con esto ir informando, e ir innovando para lograr los objetivos requeridos [5].

Dentro de las posibilidades de mejora, se encontraron las curvas de abatimiento, que son una herramienta crucial en virtud de que brindan un marco cuantitativo para debatir la mejor forma de reducir las emisiones GEI y lo que pueden llegar a costar. Se genera un mapa global con oportunidades o estrategias más eficientes y rentables que permitan hacer la reducción de estos gases, evaluando también los costos de reemplazar una tecnología en uso por una alternativa que logre generar cada vez menos emisiones [6]. Estas curvas resumen las oportunidades técnicas para poder reducir las emisiones, mostrar la variedad de valores que ofrecen un alto nivel de seguridad en cuanto a su potencial.

La potencia de cada oportunidad para reducir las emisiones anualmente está representada por la anchura de cada barra. El potencial de cada oportunidad no indica una previsión de cómo evolucionará cada oportunidad, sino que implica una acción enérgica a escala mundial con un año inicial para aprovechar esa oportunidad concreta. El punto más alto de cada barra representa el coste típico de aprovechar esa oportunidad para evitar la emisión de una tonelada de CO₂ equivalente durante el año siguiente [6].

Esta estrategia crea un gran resumen global de todas aquellas oportunidades para la reducción de GEI, al igual que la curva de costo que permite visualizar un campo de acción económico para poder conseguir con la tecnología actual y un alto nivel de seguridad en cuanto a su potencial, dentro de un plazo anual específico.

El costo marginal de reducción de emisiones es un indicador importante en la planificación de la reducción de CO₂, ya que integra los rendimientos técnicos, económicos y del ciclo de vida

útil de diferentes tecnologías. Cada dato se caracteriza por la economía (costo específico de la captura de CO₂) y el impacto ambiental (emisiones secundarias de la captura de CO₂) del proceso de captura correspondiente. El impacto ambiental se caracteriza por la eficiencia de limitación de todo el proceso, donde estas curvas permiten la representación de diferentes opciones de restricción para proporcionar un análisis profundo del costo y la potencia, donde su finalidad es determinar la capacidad de reducción de CO₂ de las diferentes opciones priorizando las vías más económicas.

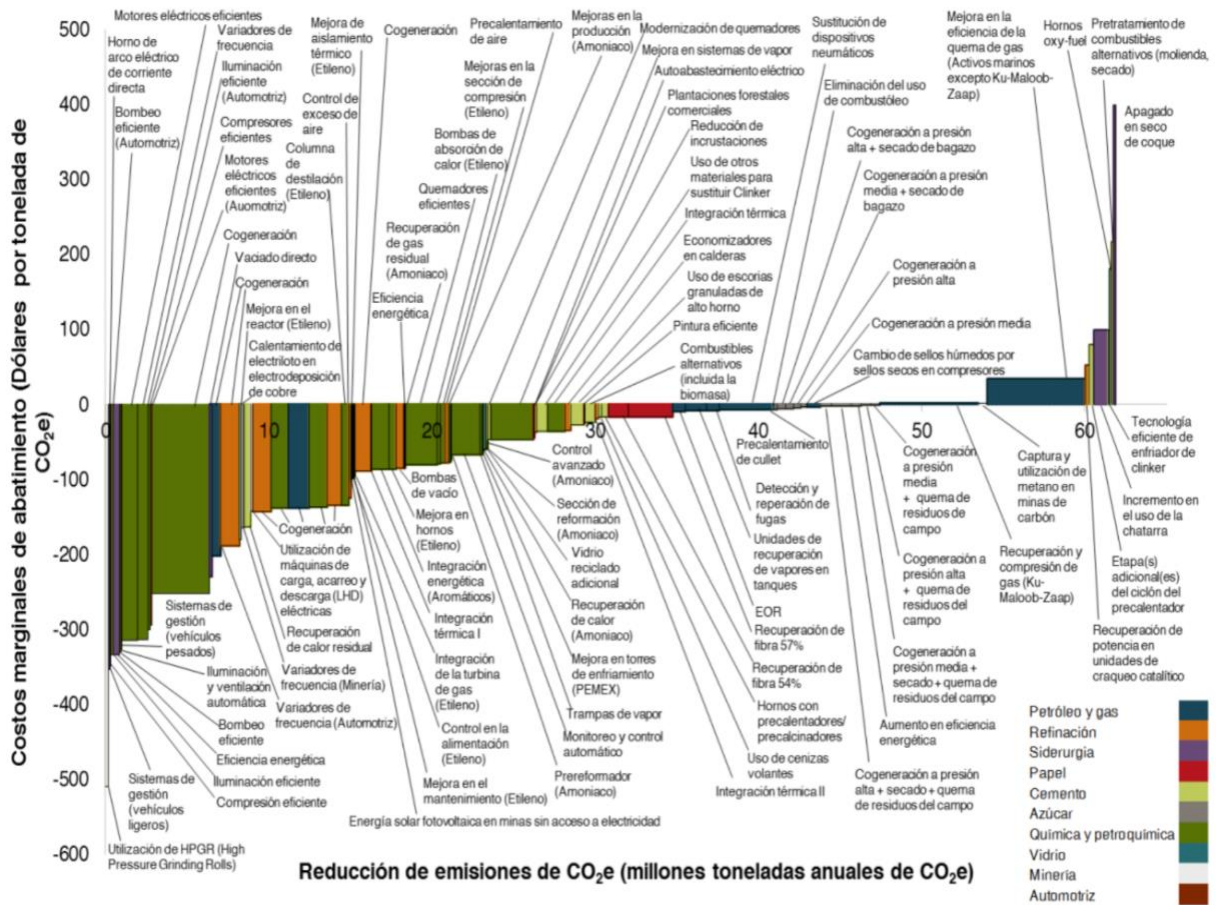
Con base a la información suministrada y descrita anteriormente, la empresa *MAGNUS ICE* requiere una estrategia idónea para lograr disminuir la emisión de GEI por la metodología de curvas MACC, con el fin de planear una ejecución y de manera efectiva disminuir las mencionadas emisiones.

1.1 Antecedentes

En el contexto de la presente investigación, resulta relevante realizar una revisión exhaustiva de los antecedentes relacionados con el desarrollo de curvas MACC en diversos escenarios. En consecuencia, se presentará en este apartado los trabajos previos que han abordado este tema, analizar las metodologías empleadas, los resultados obtenidos y las aplicaciones prácticas derivadas de dichas investigaciones. Esta revisión permitirá establecer un marco teórico sólido y comprender la evolución de las curvas MACC en diferentes contextos, sentar así las bases para el presente estudio.

En este estudio “Evaluación de costos marginales de abatimiento de (GEI) en los sectores industriales en México” se examinan las industrias seleccionadas y sus procesos a escala mundial y nacional, junto con proyecciones del uso de la energía y las emisiones de CO₂ para el año 2030; en la Gráfico 1.1 el ancho mostrado para cada una de las barras representa la cantidad de CO₂ que se llegaría a reducir anualmente por medio de esta estrategia, mientras que la altura representa el costo medio de evitar una tonelada de CO₂ con este planeamiento. Sobre la base de lo anterior, se realizó un análisis de las distintas opciones tecnológicas y su estado del arte, lo cuales podrían aplicarse de aquí a 2030 y se evaluaron sus costes marginales de reducción [7].

Gráfico 1.1. Costos marginales de abatimiento de GEI en los sectores industriales en México a 2023



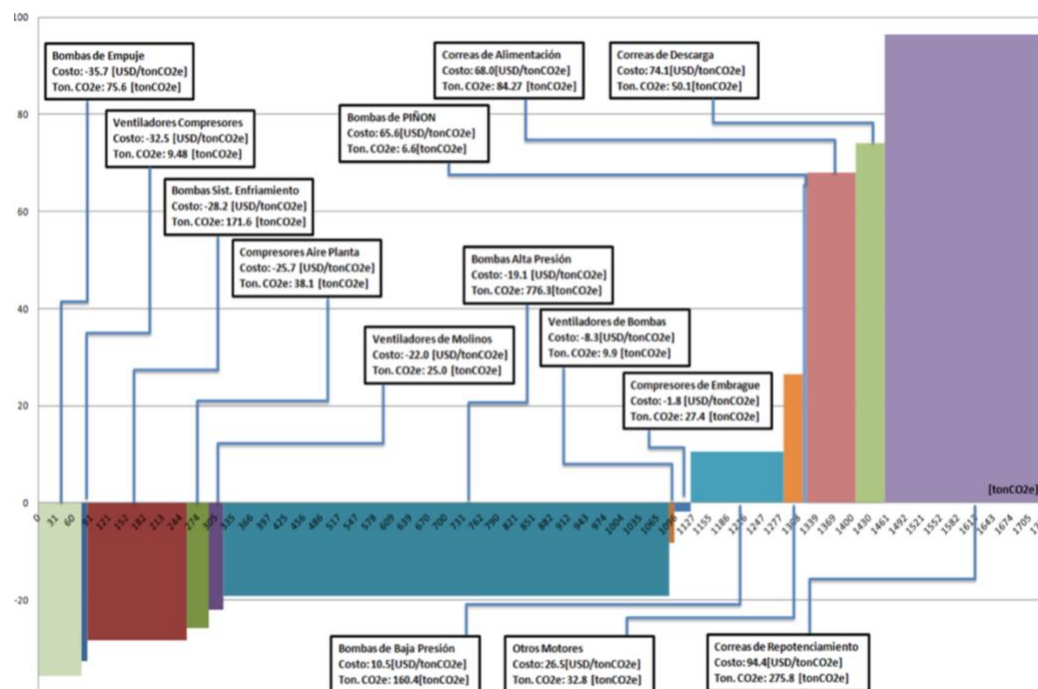
Fuente: imagen tomada de [7]

La fabricación de productos químicos y petroquímicos, la minería, el vidrio y los automóviles fueron algunas de las industrias examinadas en este estudio. Cada barra representa un sector industrial diferente, incluyendo la producción y distribución de petróleo y gas, refino de petróleo, hierro, acero, cemento, pulpa, papel, y azúcar. En conjunto, estas industrias consumen el 95% de la energía industrial utilizada en México.

Se han publicado diversos estudios relacionados con el uso de curvas de abatimiento para la reducción de GEI, incluyendo investigaciones cuyo objetivo es la evaluación y discriminación de proyectos destinados a reducir las emisiones de GEI y el consumo de energía a lo largo del proceso minero, tomando acciones que sean efectivas para la reducción de emisiones de GEI y

eficiencia energética para la empresa *Minera Escondida Ltda.* Esta evaluación se centró en 12 proyectos a los cuales se les hizo una indagación sobre su situación actual, el análisis de datos de cálculos de disminución de consumo específicos, la cantidad de energía ahorrada, medida en Gigajulios (GJ), su eficacia en la reducción de estos gases contaminantes de CO₂ y una evaluación económica para reducir costos, obteniendo así el valor de costo de abatimiento para cada proyecto siendo generado en la curva e incluyendo los valores de las reducciones antes mencionadas. Como finalidad, la empresa consciente de la problemática mundial sobre la contaminación puso a disposición el uso de la herramienta de las curvas MACC de GEI y eficiencia energética, para así poderse apoyar en la toma de decisiones medioambientales a la hora de llevar a cabo el proyecto idóneo para la causa [8].

Gráfico 1.2. Curvas MACC de GEI asociado a totalidad de proyectos de eficiencia energética en molienda y clasificación de CMDIC.

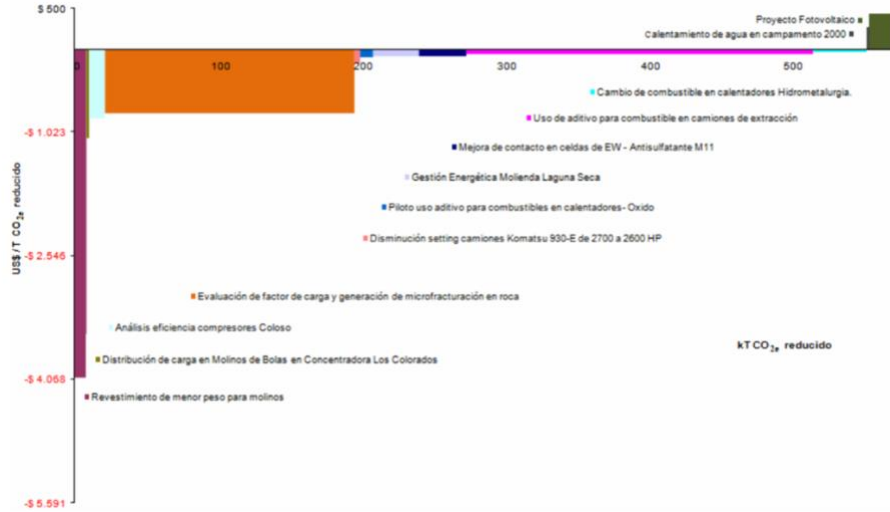


Fuente: imagen tomada de [8]

En la misma línea se demuestra la construcción de las curvas de costos de abatimiento para el área de molienda de la *Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC)*, cuyo objetivo principal fue evaluar el potencial que se podría alcanzar de ahorro de CO₂ a través de proyectos

de eficiencia energética. La implementación del Sistema de Gestión Energética (SGE), basado en la norma ISO50001, desarrollado durante 2013 por la Superintendencia de Eficiencia Energética, sirvió de base para la construcción de estas curvas. La empresa afirma que, de esta forma, será posible crear una línea de base para el uso de la electricidad mediante la obtención de un perfil energético muy detallado para cada pieza de maquinaria y área de fabricación [9].

Gráfico 1.3. Curva de costo de abatimiento de gases de efecto invernadero.



Fuente: imagen tomada de [9]

En el presente proyecto, se aborda la problemática de la emisión de GEI en la empresa MAGNUS ICE (llamada así por temas de confidencialidad) de producción de alimentos de la industria de frío colombiana. Esta empresa, que cuenta con más de cien empleados, una capacidad de almacenamiento de más de tres millones de producto anual y un consumo de energía en su planta de producción aproximado de tres millones de vatios por año; requiere una estrategia idónea para lograr disminuir la emisión de GEI por la metodología de curvas MACC, con el fin de planear una ejecución para disminuir las mencionadas emisiones y tener más eficiencia energética.

El objetivo principal de este proyecto es construir curvas de costo de abatimiento de emisiones de CO₂ específicas para la empresa MAGNUS ICE. Para ello, se realiza un análisis detallado de la infraestructura, los equipos, la operación y el uso de la energía en la empresa. Con base en

información de consumos históricos de energía eléctrica, producción e inventario de equipos. Este proyecto permitirá a partir de las curvas MACC; planear medidas de mitigación a corto, mediano y largo plazo, ver las dimensiones de los esfuerzos asociados, y la estimación de costos y beneficios sobre el proyecto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estimar curvas de costo de abatimiento de emisiones de CO₂ mediante medidas que permitan contribuir a la reducción de gases de efecto invernadero para una empresa del sector de producción de alimentos en frío en Colombia.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar los aspectos técnicos necesarios para determinar las emisiones de CO₂ como nivel de producción, consumo de energía, las áreas, zonas potenciales y procesos potenciales.
- Compilar la información oficial disponible que permita establecer las medidas de mitigación aplicables dependiendo de los productores de emisiones hallados.
- Estimar las curvas de costo de abatimiento de emisiones de CO₂ con base en las medidas de mitigación planteadas, a fin de poder proyectar sus características de costo - potencia para efectuar la elección de las mejores opciones analizadas que pondrá en marcha la empresa MAGNUS ICE a futuro.
- Explicar mediante un estudio estratégico las pautas de evaluación que permitirán conocer mejor los diferentes escenarios analizados en base a las medidas de mitigación estudiadas.
- Proporcionar las ventajas, desventajas, estrategias y balances de costo del presupuesto por cada alternativa del proyecto.
- Desarrollar los procedimientos necesarios para la creación de las curvas de costo de abatimiento, mediante la implementación de tecnologías o estrategias de control y mejoramiento en la administración de la eficiencia energética.

- Analizar los resultados obtenidos identificando las estrategias necesarias que permitan en un futuro la implementación de las opciones más viables para contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

1.3 Justificación

La contribución a la predicción de las medidas que sean más relevantes, eficientes y rentables como iniciativa para la ayuda a la reducción de emisiones de GEI es de suma importancia para facilitar acciones que permitan evaluar varios casos que logren tener una perspectiva clara sobre qué métodos son mejores para maximizar la producción y eficiencia.

El poder implementar y hacer uso de nuevas tecnologías limpias que sean eficientes con bajas emisiones tiene que ser un objetivo claro dentro del país, donde se demuestren las exigencias que se tienen al ver la afectación del cambio climático y la disposición del gobierno para agilizar el proceso de búsqueda y establecer estrategias de desarrollo de bajo carbono para el beneficio del planeta [10].

Desde una perspectiva económica, hay una gran influencia en el costo - beneficio que se puede aprovechar al implementar esta estrategia que la hace tan atractiva, debido a que permite ahorrar tiempo en la toma de decisiones para la puesta en funcionamiento de un mejor sistema que permita el ahorro de energía, costos de ejecución y reducción de procesos industriales.

A nivel mundial se ha generado esta preocupación en poder reducir la temperatura del planeta, a un nivel adecuado para que pueda estabilizarse por sí sola al no seguir generando cantidades medidas en gigatoneladas de CO₂ y así, las empresas podrán cambiar a fuentes de energía renovables. Sin embargo, para realizar esa transformación con la rapidez suficiente para cumplir los objetivos climáticos mundiales, las empresas deberán equilibrar sus iniciativas y crear tecnologías completamente nuevas. Sea cual sea el plan, las empresas deben ser capaces de modificar sus objetivos, medidas de rendimiento y procedimientos de toma de decisiones para garantizar que se anima y apoya a todos los miembros de la organización a cumplir los nuevos objetivos de emisiones. Esto, es fundamental dentro del contexto de la sociedad.

Siendo así, la empresa MAGNUS ICE de producción de alimentos de la industria de frío, ha tenido el interés de poder tomar soluciones al problema del cambio climático y contribuir a la renovación ecológica, por medio de opciones que permitan hacer un cambio positivo tanto

para ella, como para el ambiente, con un estudio que permita ver las medidas claras por medio de las curvas MACC, se pueden planear medidas de mitigación a corto, mediano y largo plazo, ver las dimensiones de los esfuerzos asociados, y la estimación de costos y beneficios sobre el proyecto, con el fin de contribuir a disminuir las emisiones y tener más eficiencia energética. Es por ello que, la empresa MAGNUS ICE se posiciona como una de las pocas en Colombia en contribuir a la protección del ambiente por medio de las curvas de abatimiento.

CAPÍTULO 2

2 Marco teórico

El objeto de estudio de este documento se centra en la producción de CO₂ de la empresa MAGNUS ICE y las alternativas de control de emisiones que pueden ser implementadas para disminuir su impacto ambiental.

MAGNUS ICE es una empresa dedicada a la producción de helados, por lo que este capítulo inicia con una explicación conceptual de los fenómenos físicos asociados a la elaboración del helado, posteriormente, se procede a realizar una extensa revisión bibliográfica que contiene los conceptos básicos a ser abordados a lo largo de todo el documento. Finalmente, se presentan las medidas de mitigación, por medio de una amplia búsqueda bibliográfica que permite dar un contexto a las medidas implementadas en este documento.

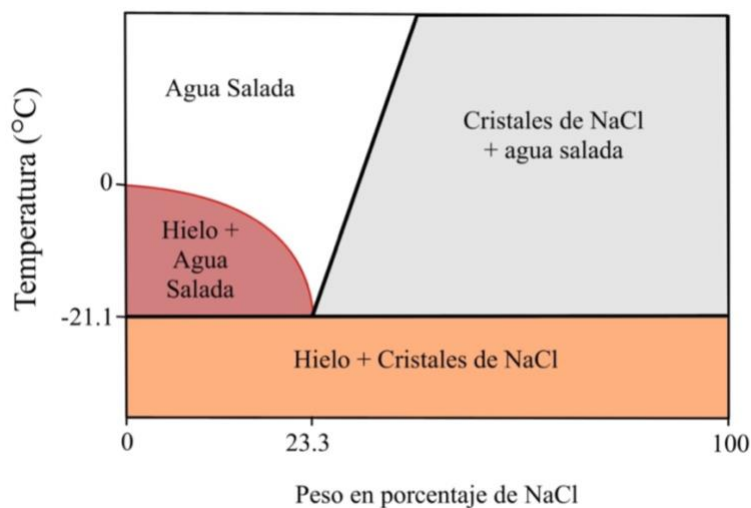
2.1 La física del helado

La física del helado involucra la congelación y fusión de los ingredientes, la transferencia de calor, la emulsión y la aireación, así como la cristalización, además del tamaño de los cristales de hielo. Estos aspectos fundamentales determinan la textura, la suavidad y la calidad general del helado que se disfruta. El proceso de fabricación de helado implica poner jarabe y agua en una taza o bolsa pequeña, luego se coloca hielo y sal en una taza o bolsa grande, y se introduce la bolsa más pequeña en la bolsa más grande. Se agita la mezcla hasta que los ingredientes en la bolsa más pequeña se congelen [11].

La sal desempeña un papel crucial en este proceso, ya que disminuye el punto de congelación. Las moléculas de sal rompen el equilibrio descrito anteriormente y aunque las moléculas de sal se disuelven en agua, no se adhieren fácilmente al hielo. Esto significa que la cantidad de moléculas de agua que pueden ser capturadas por el hielo disminuye, reduciendo así el ritmo de congelación. Al mismo tiempo, la tasa de derretimiento del hielo no se ve afectada, lo que provoca que el derretimiento ocurra más rápido que el congelamiento. Para restablecer el

equilibrio, es necesario reducir la temperatura para que las moléculas de agua se desaceleren y se adhieran más al hielo. Cuanto mayor sea la concentración de sal, menor será el punto de congelación, lo que afectará que el hielo y el agua estén equilibrados [11].

Gráfico 2.1. Diagrama de fase del cloruro de sodio (NaCl) y agua (H₂O)



Fuente: Imagen tomada y adaptada de [11]

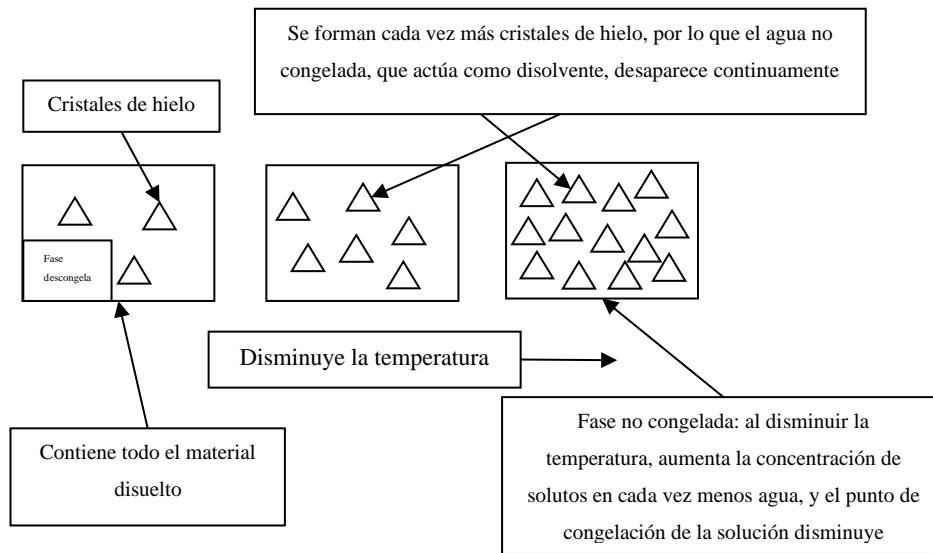
En el gráfico 2.1 en el eje horizontal se encuentra la concentración de sal (NaCl). El extremo derecho representa el 100% de sal, mientras que el extremo izquierdo representa el 100% de agua. El eje vertical representa la temperatura. Las cuatro áreas de diferentes colores representan las fases presentes en una temperatura y concentración específicas [11].

El interior del recipiente más grande se ve directamente afectado por la reducción de temperatura que se produce en él. El agua del recipiente se congela al bajar la temperatura, pero el azúcar permanece en el agua y no se mezcla con el hielo. La solución de azúcar sobrante se concentra a medida que el agua se congela, lo que dificulta la cristalización del agua en estado puro. El equilibrio se ve alterado por el descenso de la temperatura y el cambio en la concentración de la solución, lo que disminuye el punto de congelación, proceso que se observa en la Figura 2.1[11].

En la curva de congelación de los helados, es importante destacar que no toda el agua se encuentra congelada. Una parte del agua se mantiene en forma de una solución de azúcar altamente concentrada, mientras que el resto se ha convertido en hielo. Esta concentración de

azúcar en la solución afecta el punto de congelación, lo cual explica por qué los helados no se solidifican completamente a 0 °C. Esta característica es fundamental para lograr la textura y consistencia adecuadas en los helados, porque les permite mantener su suavidad y cremosidad a temperaturas inferiores al punto de congelación del agua pura [11].

Figura 2.1. Formación de cristales en el proceso de disminución de la temperatura



Fuente: Imagen tomada y adaptada de [11]

2.1.1 Depresión del punto de congelación

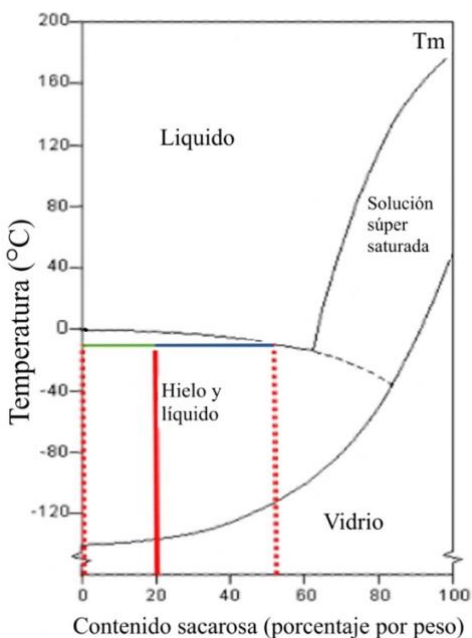
La depresión del punto de congelación es un fenómeno que ocurre cuando se agregan solutos a un solvente, como azúcares o sales, lo que disminuye la temperatura a la que dicho solvente se congela. Esta disminución se debe a que la presencia de los solutos interfiere con la formación de los cristales de hielo, impidiendo que el solvente se solidifique a su temperatura de congelación original. En el caso del helado, los azúcares y otros ingredientes presentes en la mezcla contribuyen a la depresión del punto de congelación, lo que permite que el helado tenga una textura suave y cremosa incluso a temperaturas muy frías. Este fenómeno es fundamental para garantizar que el helado sea fácilmente manipulable y disfrutable para los consumidores [11].

$$\Delta T_f = K_f m \quad (2.1)$$

Donde la variación de la temperatura (ΔT_f), medida en ($^{\circ}\text{C}$); es directamente proporcional a la constante de depresión del punto de congelación (K_f), medida en unidades de ($^{\circ}\text{C}/\text{mol}$); y la cantidad de moles (m), medida en (mol). Estos elementos se consideran al momento de elaborar un diagrama de fases para la mezcla de helado elaborada. A continuación, se presenta un ejemplo de diagrama de fases para la solución de agua y azúcar [11].

En el Gráfico 2.2 se representa un ejemplo de una solución con un 20% de azúcar a una temperatura aproximada de -10°C (línea roja continua). A partir de este punto, se trazan dos líneas horizontales que se extienden hasta los límites más cercanos. Estas líneas representan la proporción de la fase líquida y la fase de hielo. La línea verde indica la cantidad de líquido presente, mientras que la línea azul representa la fracción de hielo [12].

Gráfico 2.2. Diagrama de fases de la sacarosa en agua con las líneas trazadas para la concentración.



Fuente: Imagen tomada y adaptada de [12]

La elaboración de un diagrama de fases para la mezcla de helado resulta sumamente compleja, ya que implica tener en cuenta no solo la sal y el azúcar, sino también otros ingredientes como las proteínas añadidas. Cada mezcla tendrá un diagrama de fases único, que permitirá determinar la

temperatura de congelación ideal para lograr un producto suave y agradable al paladar del público consumidor. [12]

Como uno de los procesos fundamentales que la empresa MAGNUS ICE realiza en su actuar productivo, se encuentra la fase de endurecimiento (congelación) en la cual el producto se debe llevar a una temperatura de -30°C , con el fin de tenerlo completamente congelado y se debe conservar en este estado en lo posible hasta que llega al cliente; proceso que se analiza con mayor profundidad en el capítulo 3.

2.2 Conceptos relevantes

2.2.1 Eficiencia energética

Eficiencia energética es el término utilizado para describir el buen uso de la energía con el fin de disminuir los gastos, las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de energía. Esto se consigue poniendo en marcha tecnologías y procedimientos que reduzcan el uso de energía sin degradar la productividad o la calidad de vida. La eficiencia energética puede utilizarse en diversos ámbitos, como la industria, el transporte, la construcción y el hogar. Puede implicar acciones como el aumento de la eficiencia de los equipos, la implantación de sistemas de gestión de la energía y la promoción de un uso responsable de la energía [13]

En el contexto de la eficiencia energética de los helados, se pueden adoptar una serie de medidas para reducir el consumo de energía en la fabricación, el almacenamiento y la distribución de helados. Se pueden utilizar materiales de cambio de fase (PCM) en los sistemas de refrigeración, aumentar la eficiencia de los equipos de refrigeración, reducir las pérdidas de calor en la producción y el almacenamiento, optimizar la temperatura de almacenamiento e implantar sistemas de gestión energética. Estas acciones pueden mejorar la calidad del producto, reducir el impacto de la fabricación de helados en el medio ambiente y minimizar el uso de energía y los gastos asociados [13]

Para crear bienes y servicios de forma más eficiente, se utilizan estrategias de gestión energética, tecnologías de alto rendimiento, mejora de procesos y comportamiento ético. La utilización de

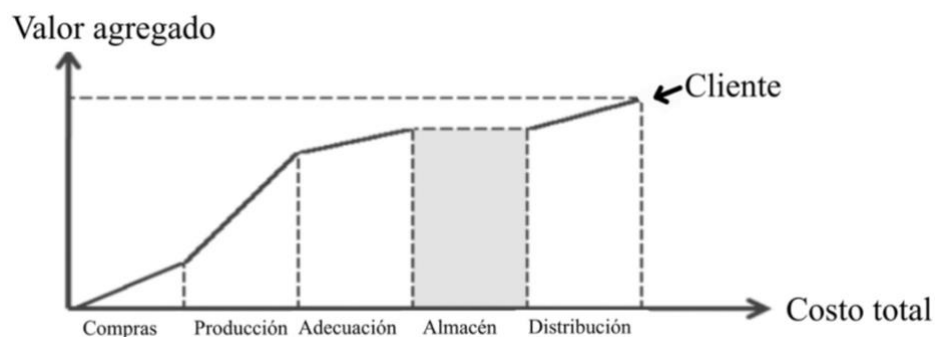
fuentes de energía renovables la complementa aumentando su porcentaje en la matriz energética y reduciendo los gastos. Al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, se contribuye a disminuir los efectos del cambio climático [14].

2.2.2 Cadena de frío

El objetivo principal de la industria alimentaria es aumentar la vida útil de los alimentos mediante el uso de tratamientos adecuados, lo que permite planificar el suministro tanto en condiciones estables como de emergencia. La "cadena de frío" es un componente importante de las operaciones de la cadena de suministro utilizadas en la industria alimentaria. Este componente, que incluye diversas formas, procedimientos, tecnologías, procesos y técnicas destinados a garantizar la durabilidad y la vida útil de los alimentos, es crucial en una industria tan grande y compleja. Estos avances han permitido desarrollar técnicas de conservación que dependen del control exacto de la temperatura [15]

Dentro de las instalaciones de almacenamiento en frío, se destina entre el 60% y el 70% de la energía eléctrica al proceso de refrigeración, lo que motiva a los usuarios de cámaras frigoríficas a buscar formas de reducir su consumo energético. A lo largo de la cadena de frío, hay variables como la temperatura, la humedad, las prácticas de mantenimiento y los parámetros de control de los equipos que intervienen en el proceso [16].

Figura 2.2. Logística y cadena de frío



Fuente: Tomado y adaptado de [15]

El concepto de logística es cada vez más relevante y crucial para el crecimiento de los procesos en todas las áreas de la economía. Por lo general, la cadena de frío adquiere importancia en la etapa de fabricación, donde se emplean diversas máquinas en las distintas etapas del proceso de producción. El almacenamiento, mediante cámaras de congelación y sistemas de control de temperatura, se suma a este proceso productivo. Por último, el proceso de distribución se encarga de garantizar que el producto se mantenga en las mismas condiciones de temperatura en las que salió de la fabricación, preservando su inocuidad y asegurando su llegada al consumidor final [15].

En el control de las condiciones de almacenamiento, se emplean técnicas como la medición manual de parámetros seleccionados a lo largo de la cadena de frío, como la humedad y la temperatura en puntos específicos. También se utilizan tecnologías como el seguimiento basado en radiofrecuencia (RFID), ZigBee y GPRS para monitorear las condiciones de almacenamiento y transporte del producto [16].

Además, se calcula que la cadena de frío contribuye directa e indirectamente al 2,5% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, principalmente como consecuencia de las elevadas necesidades energéticas de las cámaras frigoríficas [17].

2.2.3 Calentamiento global

El cambio climático es un proceso resultante de la actividad humana, como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, que eleva la temperatura de la Tierra. El resultado son condiciones meteorológicas extremas, como veranos más calurosos, modificación de los regímenes de precipitaciones y más sequías. También, se prevé el deshielo de los glaciares, lo que provocaría la subida del nivel del mar y pondría en peligro las regiones costeras. Para salvaguardar nuestros recursos naturales y promover un crecimiento sostenible, es imperativo abordar este problema [18].

2.2.3.1 Efecto invernadero

El objetivo principal de cualquier empresa es lograr rentabilidad al producir bienes y/o servicios, asegurando que los ingresos sean mayores o iguales a los costos. En este sentido, es crucial

obtener ganancias para preservar el patrimonio de la empresa. Sin embargo, alcanzar altas ganancias puede ser una tarea desafiante debido a los posibles efectos en la producción, el medio ambiente y las condiciones laborales, entre otros aspectos. Es fundamental buscar un equilibrio que permita incrementar los ingresos sin comprometer otros factores [18].

Como es bien sabido, toda empresa que produce bienes y/o servicios emite contaminantes al medio ambiente, siendo los GEI los más destacados. Estos GEI incluyen el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre (SF₆). Estos gases se generan a partir de diversas actividades, como la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas), procesos químicos en la industria (producción de cemento y acero), cambios en el uso de la tierra (deforestación), descomposición de materia orgánica (cultivo de arroz, manejo de residuos), extracción de minerales y petróleo, producción y uso de fertilizantes nitrogenados, procesos industriales que utilizan hidrofluorocarbonos y perfluorocarbonos como refrigerantes, y el uso de hexafluoruro de azufre como fluido dieléctrico, entre otros [18].

2.2.3.2 Huella de carbono

La Plataforma Financiera Latinoamericana describe la huella de carbono como un indicador que pretende cuantificar la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero -directas e indirectas- que son causadas por la actividad humana y se expresan como emisiones equivalentes de CO₂. Cuando este indicador se aplica específicamente a la industria de producción de alimentos, por ejemplo, trata todas las emisiones producidas a lo largo del ciclo de vida de un producto -desde la obtención de materias primas hasta su eliminación- como residuos, convirtiéndolo en un indicador de rendimiento medioambiental. [19]

La creación, entrega, almacenamiento, uso y eliminación de todos los bienes y servicios tienen un efecto sobre el medio ambiente y liberan gases de efecto invernadero. Esta situación, se ha convertido en un eslogan en el discurso público sobre el cambio climático, acaparando el interés de clientes, empresas, gobiernos, organizaciones no gubernamentales y organizaciones internacionales. Aunque el término “huella de carbono” se utiliza con frecuencia, la bibliografía admite la ausencia de una definición precisa y ampliamente reconocida [20].

La huella de carbono puede ayudar a una empresa al crear transparencia en la cadena de valor en términos de procesos y partes interesadas; sensibilizar sobre los gases de efecto invernadero e identificar las mejores prácticas para las emisiones, identificando quiénes son los responsables; identificar áreas con potencial para reducir emisiones y mejorar la eficiencia y el costo; disponer de una herramienta eficaz para mejorar la energía de la empresa y el medio ambiente a través de la adecuada gestión de las emisiones de CO₂ equivalente; tener el conocimiento para contar las políticas futuras; evaluar el valor de los gases de efecto invernadero en comparación con otros impactos ambientales del producto; y finalmente fortalecer el entorno competitivo a través de la comunicación, redacción o reporte continuo de la empresa a los grupos de interés: empleados, clientes, proveedores, accionistas, bancos, ambientalistas, gobiernos u otros grupos que puedan beneficiar o perjudicar a la corporación [20].

Como resultado del análisis de huella de carbono se obtiene información que puede ser utilizada como indicador ambiental global de las actividades de la organización. La huella de carbono se establece como referencia básica para reducir el consumo energético, utilizar recursos y materiales más respetuosos con el medio ambiente [20].

Las emisiones directas y las emisiones indirectas son dos tipos diferentes de emisiones relacionadas con las operaciones de una organización. Las **emisiones directas de GEI** proceden de fuentes que la organización posee o gestiona. Pueden conceptualizarse como emisiones que se emiten en el lugar donde se produce la actividad, como las emisiones del sistema de calefacción que si utiliza combustibles fósiles. Las **emisiones indirectas de GEI** son las producidas por las operaciones de una organización, pero en fuentes que son propiedad o están bajo el control de otra entidad. Las emisiones procedentes de la electricidad que utiliza una empresa, producidas en las instalaciones donde se produjo la electricidad, son un ejemplo de emisión indirecta [21].

Para facilitar la detección de las emisiones de GEI directas e indirectas, se establecen en primer lugar tres alcances:

El **Alcance 1** son emisiones de GEI directas. Por ejemplo, las emisiones procedentes de la combustión en calderas, hornos, automóviles y otros equipos que la entidad en cuestión posee o controla. También incluye las emisiones fugitivas, como las fugas de aires acondicionados y

conductos que liberan CH₄. El **Alcance 2** hace referencia a las emisiones indirectas de GEI relacionadas con las compras y el consumo de energía de la organización. Otras emisiones indirectas se incluyen en el **Alcance 3**. La extracción y producción de materiales que la organización adquiere, los viajes de negocios en transporte externo, el transporte de materias primas, combustibles y productos (como las actividades logísticas) o la utilización de bienes o servicios proporcionados por terceros son ejemplos de actividades de alcance 3. La aplicación de la siguiente fórmula da como resultado las emisiones indirectas de GEI relacionadas con las compras y el consumo de energía de la organización [21].

Aplicando la siguiente fórmula se obtiene el cálculo de la huella de carbono:

$$\text{Huella de carbono} = \text{Dato actividad} \times \text{Factor emisión} \quad (2.2)$$

En donde el “factor de emisión” es dado por la UPME anualmente y su unidad de medida es tCO₂e/MWh, la variable “dato actividad” corresponde al parámetro que mide el consumo energético generador de emisiones y se mide en unidades de MWh, al realizar la operación el valor de la huella de carbono calculado tiene unidades de medida de tCO₂e (Tonelada de Dióxido de Carbono equivalente)

El parámetro que describe la intensidad o escala de la actividad que produce las emisiones de GEI es el dato de actividad kWh de gas natural, por ejemplo, es la cantidad de gas natural utilizado para calefacción. La cantidad de GEI emitida por unidad del parámetro "dato de actividad" se conoce como factor de emisión (FE) y son publicados como valores de referencia a nivel nacional por las entidades estatales asociadas a la actividad que se está analizando [21].

2.2.4 Productores de emisión de CO₂

El ciclo global del carbono, que implica la transferencia de carbono de la atmósfera a los mares, la tierra, las plantas y los animales, hace que el dióxido de carbono exista de forma natural en la atmósfera. Las actividades humanas alteran el ciclo del carbono aumentando el CO₂ atmosférico, reduciendo la capacidad de los sumideros naturales (como los bosques) para absorber el CO₂ atmosférico y disminuyendo la capacidad del planeta para almacenar carbono. Aunque hay

muchas fuentes naturales diferentes de emisiones de CO₂, la mayor parte del aumento estimado de las emisiones atmosféricas debido al desarrollo industrial se debe a las emisiones creadas por los seres humanos.

La quema de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo) para la producción de electricidad y el transporte es la principal actividad humana que contribuye a las emisiones de CO₂, aunque también influyen otras actividades industriales y los cambios en el uso del suelo.

2.2.5 Consumo energético

2.2.5.1 Consumo energético de un proceso de helado continuo

En la fabricación de helados se utiliza un intercambiador de calor de superficie raspada (ICSR), también conocido como "congelador". Este dispositivo emplea un fluido refrigerante que se evapora constantemente para enfriar la mezcla de helado que circula en su interior. El fluido refrigerante es impulsado por un sistema de refrigeración de ciclo de compresión de etapa única, utilizando refrigerantes como NH₃, R22 u otros, para lograr temperaturas de 10 a 25 °C mediante la vaporización. La temperatura de extracción del helado se elige entre 5 y 6 °C para asegurar una congelación adecuada y una viscosidad óptima para el moldeado y envasado. En la actualidad, los fabricantes de helados buscan mejorar la calidad del producto final y reducir el consumo de energía en sus plantas de producción, donde aproximadamente el 60% de la energía total se destina a los sistemas de refrigeración. El consumo de energía en un congelador tradicional se distribuye principalmente entre la bomba de mezcla, el sistema mecánico del agitador y el compresor del sistema de refrigeración [22]

Uno de los desafíos en la optimización del congelador radica en la falta de información sobre el consumo de energía específico de los congeladores de helado. Se sabe que reducir la temperatura de evaporación aumenta el consumo de energía en la bomba, la mezcla y la raspadora del helado debido al mayor contenido de hielo. Además, una temperatura de evaporación más baja afecta el rendimiento del ciclo del sistema de refrigeración basado en el ciclo de compresión de vapor. Estas consideraciones pueden influir en la calidad del producto. Es necesario adaptar la capacidad del sistema de refrigeración a las condiciones de operación, ya que el proceso de congelación de

helados es continuo. Esto se logra mediante una válvula de expansión flotante y una válvula de control piloto en la salida del evaporador, que limitan el flujo de refrigerante y reducen la capacidad de refrigeración. En este caso, el compresor funciona de manera constante a su velocidad nominal. Otra opción para controlar la capacidad de refrigeración es utilizar un compresor de velocidad variable, que permite ajustar el flujo de refrigerante y, por lo tanto, modificar la capacidad de refrigeración. Esta tecnología, aunque más reciente, está disponible para diferentes tipos de compresores y capacidades de refrigeración [22].

2.2.5.2 Combustión de combustibles fósiles

Como es ampliamente reconocido, el uso creciente de combustibles fósiles a lo largo de los siglos es la causa principal del cambio climático que se observa actualmente. Según el último informe de evaluación 2022 del IPCC, se estima que las emisiones de metano (18%), CO₂ y cambio de uso del suelo (11%), óxido nitroso (4%) y gases fluorados (2%), junto con otros factores, contribuyeron a la parte restante del calentamiento global en 2019. Incluso si las emisiones de la fabricación de cemento no se incluyen en el primer grupo, los combustibles fósiles siguen siendo responsables de más del 60% del cambio climático [23].

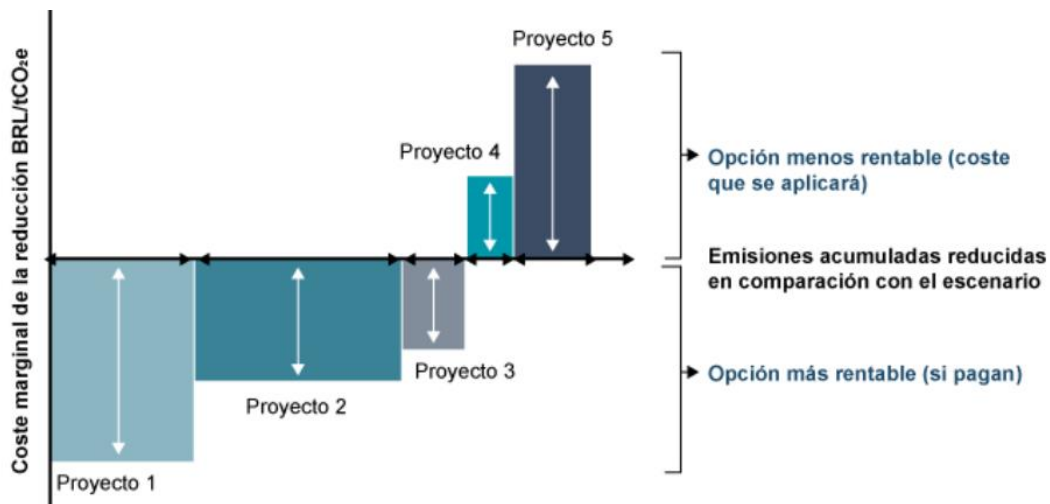
El combustible es un recurso no renovable limitado, especialmente aquellos que son fácilmente disponibles y económicos de producir de manera ambiental y económicamente racional. A largo plazo, se puede afirmar que la etapa histórica del consumo humano de combustibles fósiles será una etapa pequeña y distinta a la de otros siglos. Sin embargo, desde el punto de vista ambiental, los combustibles fósiles, incluso si se limitan a lo que se consideran actualmente como recursos probados y económicos, representan un peligro significativo, ya que su combustión completa puede dar lugar a desastres catastróficos [23].

La concentración en el carbón también está justificada porque, en comparación con el petróleo y el gas, suele generar menos déficit de capital en el sector energético y ofrece más ventajas medioambientales en cuanto a otros residuos. La mejor manera de crear un camino para la reducción de emisiones es la eliminación progresiva del carbón, que se perfila como una estrategia clara y asequible [23].

2.2.6 Curvas de costo marginal de abatimiento

La curva de costo marginal de reducción (MACC) muestra el nivel óptimo de costo marginal de reducción para alcanzar cualquier objetivo de emisiones totales cuando se sigue un enfoque de minimización de costos. Para que refleje el nivel eficiente de costo marginal de reducción, es necesario incluir todas las oportunidades de reducción disponibles en todos los sectores y ubicaciones en la curva [24]

Gráfico 2.3. Curva MACC ilustrativa.



Fuente: Tomado de [25]

En el eje vertical del Gráfico 2.3 se indica el costo marginal de corrección de una tonelada de CO₂ (R\$/t CO₂e). En el eje horizontal se muestra la capacidad de reducción de emisiones (t CO₂e) de cada uno de los proyectos considerados. Como resultado, al examinar el eje vertical, se observa que los proyectos con un costo marginal de corrección negativo (situados por debajo del eje horizontal) corresponden a aquellos que ofrecen a la empresa algún beneficio financiero, ya sea a través de la reducción de costos o de la generación de ingresos adicionales (es decir, el proyecto 1 es el más rentable en comparación con los demás). Las opciones que requieren un gasto neto de capital se muestran mediante proyectos con un costo marginal de corrección positivo (situados por encima del eje horizontal) [25]

Las curvas MACC representan el cambio en los costos totales asociados con la reducción de las emisiones contaminantes o la cantidad de contaminación en el medio ambiente. Estos costos varían según el tipo de desechos o emisiones que se estén abordando. Por ejemplo, el costo de reducir las emisiones de CO₂ de las centrales eléctricas será diferente al costo de reducir las emisiones tóxicas de las plantas químicas. Estos costos incluyen todos los métodos utilizados para reducir las emisiones, como cambios tecnológicos, sustitución de equipos, reciclaje de residuos, métodos de mantenimiento y disposición adecuada en el suelo, entre otros. [26].

Las curvas de costo marginal de abatimiento muestran cómo cambian los costos de reducción por cada unidad adicional de reducción en el nivel de emisiones. En otras palabras, indican cuánto se debe invertir para lograr una reducción adicional en las emisiones. Estas curvas son útiles para evaluar la eficiencia económica de las medidas de reducción de emisiones y ayudan a determinar la mejor asignación de recursos para lograr los objetivos ambientales de manera rentable [26].

2.3 Medidas de mitigación de emisiones de CO₂

Se presentan a continuación medidas de control de emisiones que pueden ser implementadas para reducir la producción de CO₂. Se describen las principales tecnologías y prácticas utilizadas para reducir la emisión de gases de efecto invernadero, tales como la mejora en la eficiencia energética, la implementación de tecnologías limpias, la utilización de fuentes de energía renovable, entre otras. Se pretende un abordaje bibliográfico amplio que permita tener suficientes elementos para la selección de las medidas a implementar con base en la identificación realizada previamente y la información adicional que arroje la construcción de las curvas de abatimiento.

En el contexto de la mitigación del CO₂ en la industria, se han establecido diez categorías de clasificación para abordar de manera integral este desafío. Estas categorías son: control; refrigerantes; calor; mantenimiento; tecnología avanzada; equipos; energía solar; materiales y edificación; gestión de energía e implementación de sistemas. Cada una de estas categorías representa un conjunto de medidas específicas diseñadas para reducir las emisiones de CO₂ y promover prácticas sostenibles en el ámbito industrial.

A continuación, se presentan de forma general las medidas de mitigación estudiadas. La descripción de cada una con su respectiva bibliografía podrá leerse en el anexo A de este documento.

2.3.1 Medidas asociadas al control

Las medidas asociadas al control juegan un papel fundamental en la eficiencia energética y la reducción de emisiones de CO₂ en los sistemas de refrigeración. La utilización de tecnologías avanzadas de control ofrece soluciones innovadoras para optimizar el funcionamiento de estos sistemas.

Tabla 2.1. Medidas de control.

Utilización de tecnologías avanzadas de control

- Sistemas de control adaptativo

Utilización de tecnologías de control inteligente

- Inteligencia artificial y aprendizaje automático

Optimización del control de temperatura y humedad

- Condiciones de temperatura y humedad dentro de rangos óptimos.

Fuente: Elaboración propia, con información tomada de [27], [25], [29]

2.3.2 Medidas asociadas al uso de refrigerantes

Una posibilidad importante para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la industria de la refrigeración es la adopción de medidas relacionadas con el uso de refrigerantes naturales. Estos refrigerantes ofrecen una alternativa más responsable con el medio ambiente y más duradera, contribuyendo a reducir el cambio climático y a salvaguardar el medio ambiente.

Tabla 2.2. Medidas asociadas al uso de refrigerantes

Utilización de refrigerantes naturales

- Amoníaco, dióxido de carbono e hidrocarburo propeno

Utilización de refrigerantes naturales de bajo impacto ambiental

- R744, propano y el butano

Uso de refrigerantes naturales R717, R290 y R744

- R744, R-290, R717

Fuente: Elaboración propia, con información tomada de, [30], [31], [32]

Las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la industria de la refrigeración se reducen considerablemente cuando se utilizan estos refrigerantes naturales en lugar de los refrigerantes sintéticos habituales. Para garantizar la protección de los empleados y del medio ambiente, es crucial subrayar que su uso seguro y adecuado exige una formación especializada y el cumplimiento de una serie de normas y reglamentos.

2.3.3 Medidas asociadas al calor

La implementación de medidas asociadas al calor en los sistemas de refrigeración juega un papel crucial en la reducción del consumo de energía y las emisiones de CO₂ en diversos sectores. La recuperación de calor es una estrategia efectiva que busca aprovechar el calor generado por los sistemas de refrigeración y utilizarlo para otros propósitos, como el calentamiento del agua o del aire. Esto tiene un impacto significativo en la reducción de la cantidad de energía necesaria para calentar estos elementos, lo que a su vez conlleva una disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Tabla 2.3. Medidas asociadas al calor.

Recuperación de calor <ul style="list-style-type: none">• Capturar calor residual y canalizarlo hacia aplicaciones útiles
Recuperación de calor residual <ul style="list-style-type: none">• Utilización de intercambiadores de calor
Utilización de sistemas de recuperación de calor <ul style="list-style-type: none">• Capturar y reutilizar el calor residual

Fuente: Elaboración propia con información tomada de [33], [34], [35]

2.3.4 Medidas asociadas al mantenimiento

El mantenimiento adecuado de los sistemas de refrigeración desempeña un papel fundamental en la mejora de la eficiencia energética y la reducción de las emisiones de CO₂ asociadas. La optimización del mantenimiento garantiza que estos sistemas funcionen de manera eficiente, evitando el desperdicio de energía y promoviendo un uso más sostenible de los recursos.

Tabla 2.4. Medidas de mantenimiento.

Optimización del mantenimiento

- Mejorando la eficiencia energética y reduciendo las emisiones de CO₂,

Mantenimiento y servicio de equipos

- Prolongando la vida útil y reduciendo las emisiones de CO₂ asociadas

Fuente: Elaboración propia con información tomada de [36], [37]

Una medida clave en la optimización del mantenimiento es llevar a cabo tareas regulares, como la limpieza de las bobinas del condensador y la verificación de la carga de refrigerante. Estas acciones aseguran que los sistemas de refrigeración operen de manera óptima, evitando obstrucciones que puedan comprometer su funcionamiento eficiente. Al garantizar que los componentes estén limpios y en buen estado, se reduce la resistencia al flujo de aire y se minimiza la necesidad de consumir más energía de la necesaria. Es igualmente importante proporcionar un servicio adecuado a los equipos de refrigeración. Esto implica realizar revisiones periódicas y ajustes necesarios para mantener su rendimiento óptimo y prolongar su vida útil. Al maximizar la eficiencia de los equipos existentes, se reduce la necesidad de producir y desechar nuevos equipos, lo que a su vez disminuye las emisiones de CO₂ asociadas con su fabricación y eliminación.

2.3.5 Medidas asociadas al uso de tecnología avanzada

Tabla 2.5. Medidas asociadas al uso de tecnología avanzada

Utilización de tecnologías avanzadas

- Electrónica de potencia, tecnología de compresores de velocidad variable y recuperación de energía.

Desarrollo de materiales y tecnologías avanzadas

- Materiales de cambio de fase y sistemas de enfriamiento termoeléctrico.

Fuente: Elaboración propia con información tomada de [38], [39]

La adopción de tecnologías avanzadas desempeña un papel fundamental en la mejora de la eficiencia energética y la reducción de las emisiones de CO₂ en los sistemas de refrigeración. Estas medidas se centran en el uso de tecnologías innovadoras y en el desarrollo de materiales que permitan un funcionamiento más eficiente y sostenible.

2.3.6 Medidas asociadas al uso de equipos

La implementación de medidas asociadas a los equipos de refrigeración es fundamental para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de CO₂ en este sector. Estas medidas se enfocan en la utilización de equipos de alta eficiencia energética, la mejora de la eficiencia de los equipos existentes y el fortalecimiento del aislamiento térmico.

Tabla 2.6. Medidas asociadas al uso de equipos.

Utilización de equipos de refrigeración de alta eficiencia energética

- Menos energía eléctrica para proporcionar la misma cantidad de enfriamiento

Mejora de la eficiencia energética de los equipos de refrigeración

- Reducir consumo de energía

Mejora del aislamiento térmico de los equipos de refrigeración

- Reducción de pérdidas de energía

Fuente: Elaboración propia con información tomada de [28], [40], [41]

2.3.7 Medidas asociadas a la energía solar

Una estrategia importante para reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂ en los sistemas de refrigeración es el uso de la energía solar como recurso renovable. En términos de reducción del cambio climático y fomento de la sostenibilidad, el uso de paneles solares para suministrar energía limpia y sostenible tiene muchas ventajas.

Tabla 2.7. Medidas asociadas a la energía solar

Utilización de paneles solares

- Instalación de paneles solares en techos

Utilización de energía solar

- Uso de energía solar para generación de sistemas de refrigeración

Fuente: Elaboración propia con información tomada de [42], [43]

2.3.8 Medidas asociadas a materiales y edificación

En la búsqueda de soluciones sostenibles y amigables con el medio ambiente, se han desarrollado medidas asociadas a los materiales de construcción y al diseño de edificios para mejorar su

eficiencia energética. Estas medidas buscan reducir el consumo de energía necesario para enfriar los edificios y, como resultado, disminuir las emisiones de CO₂.

Tabla 2.8. Medidas asociadas a materiales y edificación.

Utilización de materiales de construcción de alta eficiencia energética

- Vidrios de baja emisividad y aislamiento térmico avanzado

Diseño de edificios eficientes

- Reducción de la carga de refrigeración necesaria

Fuente: Elaboración propia con información tomada de [44], [45]

2.3.9 Medidas asociadas a la gestión de energía

En la búsqueda de soluciones que promuevan la eficiencia energética y la reducción de emisiones de CO₂, se han implementado diversas medidas asociadas a la gestión de la energía en los sistemas de refrigeración. Estas medidas se centran en la implementación de programas y sistemas que permiten monitorear, controlar y mejorar el consumo de energía de manera eficiente.

Tabla 2.9. Medidas asociadas a la gestión de energía,

Implementación de programas de gestión de la energía

- Monitorización del consumo de energía, identificación de áreas de mejora e implementación de medidas de eficiencia energética

Implementación de sistemas de gestión de energía

- Monitoreo y control del consumo de energía en los sistemas de refrigeración

Fuente: Elaboración propia con información tomada de [46], [47]

2.3.10 Medidas asociadas a la implementación de sistemas

Tabla 2.10. Medidas asociadas a la implementación de sistemas

Diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia
• Recuperación de calor, tecnología de compresores de velocidad variable y control automatizado
Utilización de sistemas de cogeneración
• Producción simultánea de electricidad y calor útil a partir de una misma fuente de energía
Implementación de sistemas de enfriamiento evaporativo
• Utilizar agua para enfriar el aire
Implementación de sistemas de refrigeración descentralizados
• Reducir la distancia entre la fuente de refrigeración y el punto de uso
Utilización de energía renovable para alimentar los sistemas de refrigeración
• Uso de energía solar o eólica
Utilización de técnicas de refrigeración adiabática
• Reducción de energía adicional
Uso de sistemas de refrigeración adiabática
• Utilización de la evaporación de agua para enfriar el aire, lo que reduce la necesidad de energía eléctrica
Implementación de sistemas de enfriamiento de adsorción
• Utilización de materiales adsorbentes para enfriar el aire

Fuente: Elaboración propia con información tomada de , [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56]

En la búsqueda de soluciones que promuevan la eficiencia energética y la reducción de emisiones de CO₂ en los sistemas de refrigeración, se han desarrollado diversas medidas asociadas a la implementación de sistemas avanzados y sostenibles. Estas medidas se centran en el diseño y utilización de tecnologías innovadoras que permiten reducir significativamente el consumo de energía y las emisiones de CO₂.

CAPÍTULO 3

3 MAGNUS ICE

Elaborar helados gourmet y premium, junto con bebidas derivadas y postres helados, así como producir diversas salsas dulces y frutales, es la actividad principal de la empresa de productos en frío. La compañía lleva a cabo un proceso completo que abarca desde la extracción de sabores de frutas naturales hasta el empaque y almacenamiento de los productos para su posterior distribución a nivel local, nacional e internacional. La capacidad de producción mensual de la empresa supera los 600.000 kg de producto. En este capítulo, se describe de manera más detallada los siguientes procesos: producción, operación y consumo energético.

La empresa de productos en frío es llamada “MAGNUS ICE” por cuestiones de confidencialidad.

3.1 Elementos estructurales de la empresa MAGNUS ICE, en términos de la producción de CO₂

El enfoque del proyecto específicamente es optimizar el uso de la energía usada para refrigeración dentro de la planta y disminuir emisiones de gas de efecto invernadero CO₂ por medio de la metodología de curvas MACC y métodos estratégicos que permitan la implementación adecuada del mismo.

Dentro de estos métodos posibles se encuentra la importancia del reconocimiento de la infraestructura, los equipos, operación y uso de la energía, la solicitud de información de consumos históricos de la energía eléctrica, inventario de equipos, dimensionamiento de los espacios, especificaciones técnicas por cada línea de producción y tiempos de medición de temperatura que permiten recopilar los datos de una manera ordenada para poder entender el estado actual de la empresa.

3.1.1 Línea de operación de la empresa

La empresa de productos alimenticios MAGNUS ICE realiza los procesos que se describen a continuación con los datos de variables importantes para la optimización del uso de la energía usada para refrigeración:

Producción, Apilamiento, Endurecimiento (congelación), Mantenimiento (almacenamiento), Alistamiento y Despacho.

Figura 3.1. Procesos MAGNUS ICE



Fuente: Tomado y adaptado de [68]

Dentro del esquema que se puede observar en la Figura 3.1 se muestran las fases del proceso de producción de la empresa, los cuales inician con la producción de helado a temperatura ambiente, una vez empacado en sus diferentes presentaciones se organiza en canastillas plásticas y se transporta a la zona de apilamiento utilizando una banda transportadora. Las canastillas entran a la zona de apilamiento a través de una cortina aislante, en donde se organizan sobre estibas de madera que se ubican en grúas bajas para facilitar el transporte hacia la zona de congelación. Allí son encerrados y sometidos a corrientes de frío durante 6 horas en el proceso de endurecimiento a una temperatura de -30°C, aproximadamente, dato que no es verificado, debido a la falta de displays de temperatura.

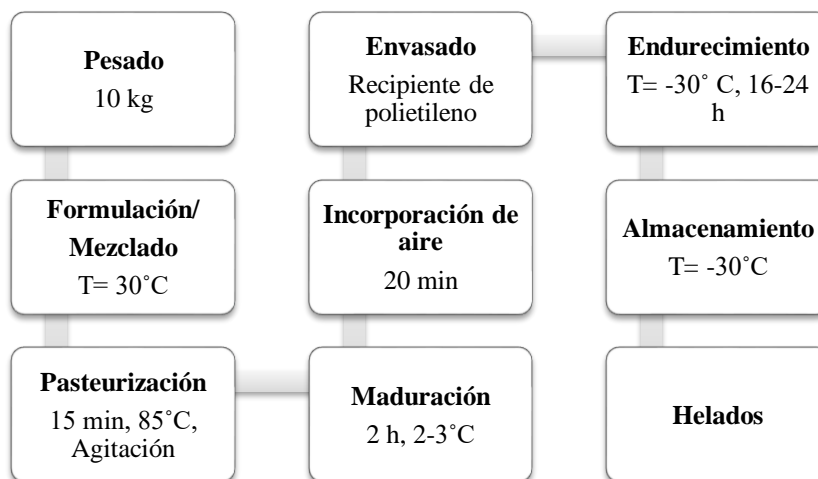
Una vez el helado ya se encuentra congelado, es transportado a la zona de almacenamiento, la cual se encuentra a una temperatura de -19°C , en donde se organiza el producto en función de las listas de distribución que serán cargadas en los camiones, las órdenes listas se organizan en los pasillos de alistamiento y finalmente se llevan a despacho.

Generalmente, los datos de consumo de energía para la planta de producción de alimentos en frío, tienen una gran variabilidad puesto que, no hay un solo factor que contribuya a reducir el consumo, por lo tanto, no es una forma factible y es difícil identificar uno o un pequeño número de factores que influyen en el uso de energía.

3.1.1.1 Producción de helados

“La producción es la actividad económica que se encarga de transformar los insumos para convertirlos en productos.” Así pues, la producción se refiere a cualquier actividad que utilice recursos y materias primas para crear o fabricar cosas y servicios que se utilizarán para satisfacer la demanda de los consumidores [69].

Figura 3.2. Flujograma de proceso general para el helado



Fuente: Tomado y adaptado de [71]

El proceso de producción del helado consta de varias etapas, representadas en la Figura 3.2. Estas etapas incluyen la preparación y el pesado de la mezcla en mezcladoras de acero inoxidable, manteniendo la temperatura a 2°C . A continuación, se lleva a cabo la pasteurización para eliminar las bacterias, utilizando placas de acero inoxidable y agua caliente. Luego, se procede a

la maduración de la mezcla y a la incorporación de aire para obtener la textura deseada. Posteriormente, se realiza el envasado del helado y se somete a un proceso de endurecimiento. Finalmente, se almacena el helado en condiciones adecuadas hasta su distribución [70].

En MAGNUS ICE, el proceso de producción se centra en la elaboración de helados gourmet, premium y diversas salsas, expresados en kg. La empresa se enfrenta al desafío de un mayor consumo energético en la producción de salsas debido a los diferentes procesos involucrados, desde el tratamiento de la materia prima hasta la obtención del producto final. El consumo de energía que se presenta en este capítulo tiene como objetivo indicar el nivel de producción general en la empresa y está asociado al consumo de energía eléctrica durante cada uno de los procesos previamente descritos.

3.1.2 Procesos potenciales, consumo energético y nivel de producción

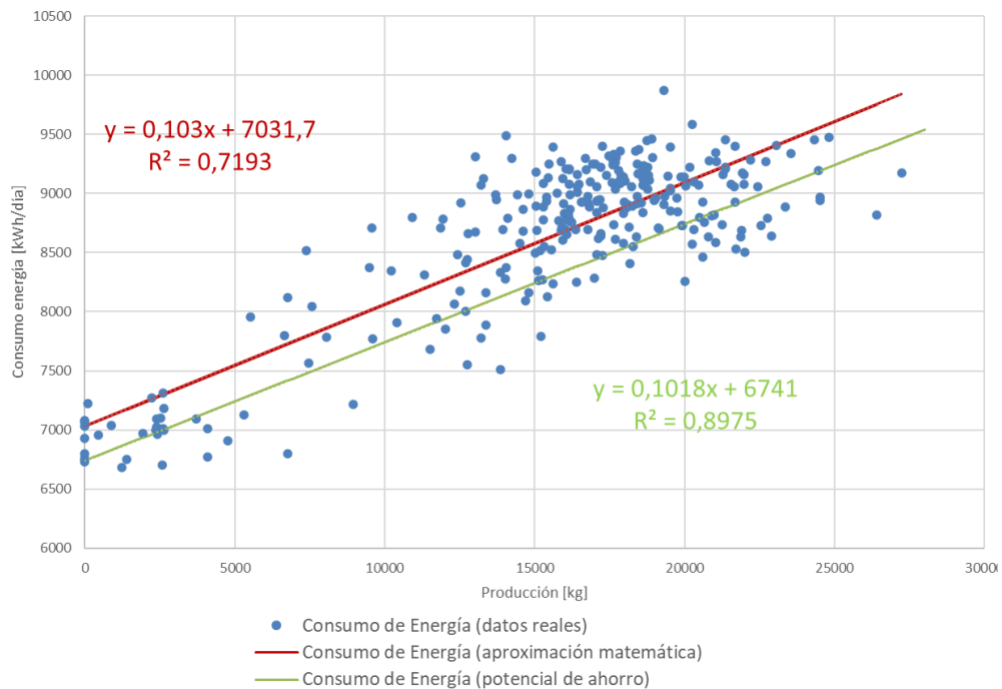
El análisis del potencial de ahorro se realiza utilizando los datos del año 2019. Al contar con una base de datos que incluye el consumo y la producción, junto con un modelo matemático de consumo energético, se lleva a cabo un análisis de ahorro potencial basado en las mejores prácticas. En este enfoque, se establece que los días en los que se haya registrado un menor consumo energético en comparación con el modelo matemático representan una producción más eficiente. Por ejemplo, si en un día se produjeron 18,000 kg de producto y se consumieron 8,600 kWh, mientras que en otro día se consumieron 8,800 kWh para la misma producción, se considera que se aplicaron mejores prácticas en el primer día, lo que resultó en una reducción del consumo de 200 kWh [68]. Actualmente según la UPME en el sector industrial, “el potencial de ahorro para este sector es de 256 PJ en el periodo 2022-2030” [72].

Con los datos proporcionados por la empresa, se establece una relación entre la producción y el consumo energético para obtener la línea base de trabajo. En un estudio realizado por [68] se muestra que se puede establecer una relación proporcional del consumo de energía eléctrica en términos de la producción, realizando una regresión matemática que para el año 2019 está representada por la ecuación (3.1) En donde E representa la energía eléctrica medida en kWh/día y P la cantidad de producto fabricado en kg.

$$E = 0,1030 P + 7.031,7 \quad (3.1)$$

Con base en este modelo de regresión se establece el gráfico 3.1 en donde se muestra en azul los datos reales de consumo, en rojo el consumo actual de la empresa aplicando la regresión y en verde el potencial de ahorro posible al implementar buenas prácticas operativas. Esta cifra demuestra que existe un 3,7% de posibilidad de ahorrar dinero en esta situación utilizando prácticas inteligentes.

Gráfico 3.1. Potencial de ahorro



Fuente: Tomado de [68]

Para la situación de referencia, descrita anteriormente, que presenta un ahorro del 3,7% en comparación con la situación actual, se obtiene la siguiente ecuación (3.2) al analizar el potencial de ahorro, representado en la gráfica 3,1 con la línea de color verde. [68].

$$E = 0,1018 P + 6741 \quad (3.2)$$

Dónde la variable P corresponde a los kilogramos de producto fabricado y E a la energía eléctrica en unidades de kWh/día.

La cantidad total de energía necesaria para completar una actividad es el consumo energético. La eficiencia energética y la idea de consumo de energía están inversamente relacionadas, por lo que a medida que aumenta el consumo de energía por servicio prestado, disminuye la eficiencia energética.

La cantidad de energía utilizada durante el proceso de producción en una fábrica puede utilizarse para calcular la cantidad total de energía consumida, por lo que no se trata solo de la cantidad de energía que procede de una fuente.

El consumo de electricidad se mide en kWh, lo que significa kilovatios-hora. Entonces, un kilovatio-hora (kWh) significa que se usan 1,000 vatios de energía por hora. El equivalente a este dispositivo serían en realidad diez lámparas o dispositivos de 100 vatios que se pueden encender al mismo tiempo.

Las empresas pueden utilizar esta unidad de medida para determinar el consumo de la fábrica y ajustar sus prácticas de facturación en consecuencia. Se refiere específicamente al volumen de energía utilizado en un lugar durante un tiempo determinado.

Por otra parte, se realizan diferentes correlaciones, a partir de los datos suministrados por MAGNUS ICE correspondientes a los últimos 6 años, donde se consideran diversas medidas de producción (en kg) y consumo de energía (en kW/año), así como los costos de energía generados anualmente en pesos colombianos y su conversión a dólares. Asimismo, se incluye la Tabla 3.1 que refleja el valor del dólar al finalizar cada año, con el fin de realizar el estudio de la manera más precisa posible.

Tabla 3.1. Precio del dólar al cierre de cada año en Colombia

Año	Precio dólar
2017	\$2984
2018	\$3285
2019	\$3277
2020	\$3432
2021	\$3743
2022	\$4810

Fuente: Elaboración propia

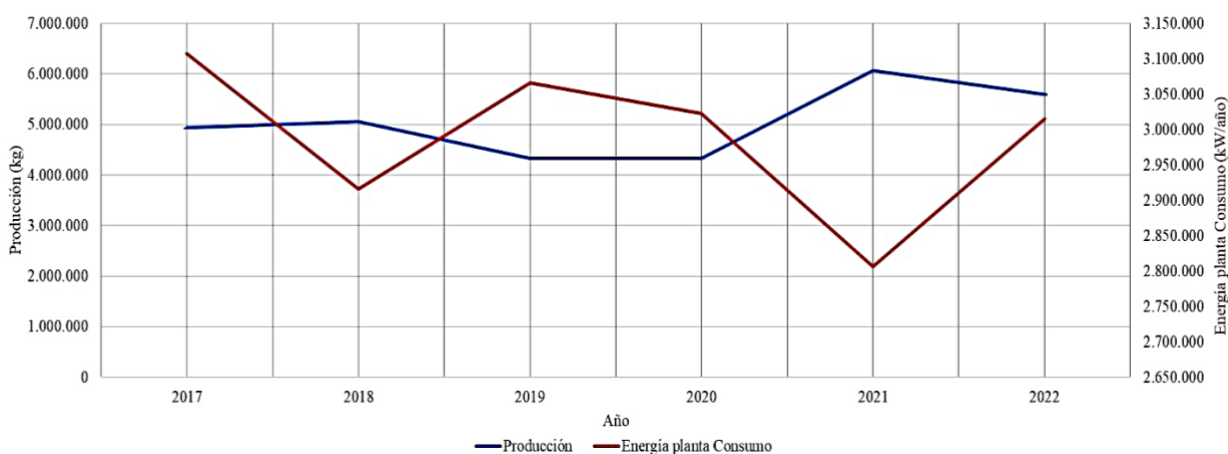
Entre los datos recopilados se encuentran la producción y el consumo energético desde el año 2017, desglosados mes a mes, hasta el año 2022. Se realizan sumatorias anuales en la Tabla 3.2, incluyendo los costos totales de energía anuales.

Tabla 3.2. Costos de energía en pesos y dólares

Año	Producción (kg)	Energía planta Consumo (kW/año)	Costo Energía (pesos)	Costo Energía (dólar)
2017	4.932.630,4	3.107.556,0	\$1.374.704.139	\$460.692
2018	5.053.633,2	2.915.924,8	\$1.304.048.458	\$396.909
2019	4.333.253,2	3.066.111,2	\$1.224.334.157	\$373.598
2020	4.334.293,1	3.022.810,4	\$1.343.457.880	\$391.393
2021	6.066.370,3	2.806.047,2	\$1.263.535.881	\$337.565
2022	5.597.436,7	3.015.271,6	\$1.472.347.260	\$306.089

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.2. Producción (kg), Consumo de energía (kW/año)



Fuente: Elaboración propia

Se presentan en el gráfico 3.2 las cantidades de producción y consumo de energía, compararlas año tras año,. En este se observa la distribución anual desde el año 2017 hasta el 2022 para la producción y el consumo de energía en la planta. De aquí se obtiene que, para la producción (azul), la variación porcentual máxima ocurre en el año 2021 con un crecimiento del 40% con respecto al año 2020, donde la producción fue de 6,06 MM de kg de producto anual. La variación porcentual mínima

ocurre en el 2020 con un 0.02%, donde se registran 4,3 MM de kg de producto anual. El promedio anual para la variación porcentual de la producción es de 3,4%.

En el caso del consumo de energía en planta (rojo), la variación porcentual máxima ocurre en el año 2022 con un aumento del 7.5% con respecto al año 2021. La variación porcentual mínima ocurre en el 2021 con un decrecimiento del -7.2% en relación con el año 2020. El promedio anual es de -0,4% para la variación porcentual del consumo energético, indicando una disminución en relación con los valores anuales y esto debido a la pandemia mundial COVID19.

Tabla 3.3. Variación porcentual para producción y consumo.

Año	Variación porcentual producción	Variación porcentual energía planta consumo	Porcentaje de crecimiento anual compuesto producción	Porcentaje de crecimiento anual compuesto energía planta consumo	Tasa anual de crecimiento acumulativa producción	Tasa anual de crecimiento acumulativa consumo energético
2017	0	0	-10%	3%	3%	-1%
2018	2,5%	-6,2%				
2019	-14,3%	5,2%				
2020	0,02%	-1,4%				
2021	40,0%	-7,2%				
2022	-7,7%	7,5%				
Promedio anual	3,4%	-0,4%				

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente a los valores dados, en la t

Tabla 3.3 se muestran el porcentaje de crecimiento anual compuesto y la tasa anual de crecimiento acumulativa. En dicha tabla, se puede observar que el porcentaje de crecimiento para la producción es de -10%, mientras que para el consumo de energía es de 3%. La tasa anual de crecimiento acumulativa en la producción es de 3%, mientras que para el consumo de energía es de -1%.

3.1.3 Uso de maquinarias y/o herramientas que contribuyen a la producción de CO₂

Se presenta a continuación, un resumen de los equipos con los que cuenta la planta de MAGNUS ICE, la Tabla 3.4 contiene el nombre de los principales equipos, la cantidad de equipos

disponibles y la potencia de consumo. Es importante resaltar que para este análisis no se discrimina por la marca o el modelo de cada equipo, sino por el total de funcionamiento.

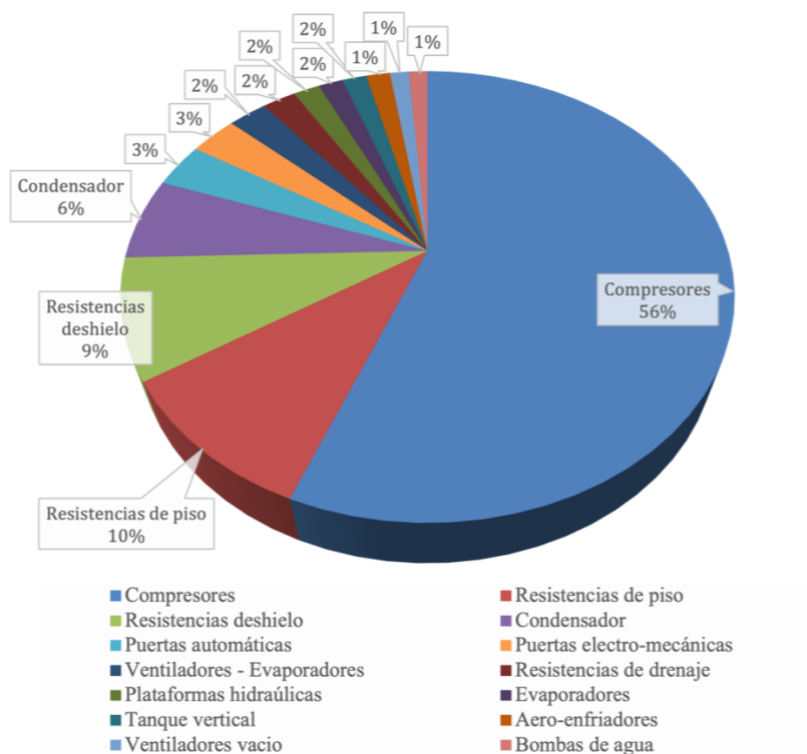
Tabla 3.4. Resumen de equipos de la planta de MAGNUS ICE

Nombre de equipo	Cantidad	Potencia kW
Compresores	6	298,4
Resistencias deshielo	36	274,3
Resistencias de piso	15	131,4
Ventiladores - Evaporadores	54	117,2
Resistencias de drenaje	28	52,8
Puertas automáticas	8	23,2
Condensador	3	15,7
Ventiladores vacío	8	8,6
Puertas electro-mecánicas	3	7,9
Evaporadores	4	5,5
Plataformas hidráulicas	3	4,5
Bombas de agua	4	4,2
Puertas seccionales	8	2,9
Aero-enfriadores	2	2,7
Cortinas de aire	6	1,7
Abrigos hinchables	6	1,5
Tanque vertical	1	1,3
TOTAL POTENCIA EQUIPOS		954,3

Fuente: Elaboración propia

Para ejecutar un análisis más cercano a la Tabla 3.4 hay que considerar la cantidad de equipos que están generando el consumo, pues no es lo mismo pensar que seis compresores requieren una potencia de 298,4 kW en comparación con los ventiladores que requieren 117,2 kW de potencia para 54 unidades, para visualizar esta razón de cambio entre potencia y cantidad de equipos se presenta la relación porcentual del Gráfico 3.3, en donde se visualiza que los equipos que requieren mayor porcentaje del total de potencia son los compresores, seguidos de las resistencias y los condensadores.

Gráfico 3.3. Razón de cambio entre potencia consumida y número de equipos disponibles.



Fuente: Elaboración propia

Esta información permite identificar que necesariamente se debe incluir una medida relacionada con la eficiencia energética en compresores, la que a su vez, permite regular el consumo de los condensadores, ejecutando un sistema de refrigeración de alta eficiencia; por otra parte, se observa en la figura que las resistencias de piso y deshielo también requieren una considerable potencia para su funcionamiento, lo que se traduce en consumo de energía en función del tiempo en que se operan, así que se debe tener en cuenta medidas de abatimiento en términos del mantenimiento de estos equipos y es viable realizar una recuperación del calor residual generado por estas resistencias.

Por otra parte, es importante resaltar que en el informe proporcionado por Eficiencia Energética Estratégica (2020), se establece como conclusión un listado de buenas prácticas operativas sugeridas a la empresa, en su mayoría con prioridad de implementación muy alta y que presentan a continuación en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Portafolio de BPOs propuestas en 2020.

Descripción	Ahorro esperado	Prioridad
Reevaluar el tiempo de congelación y mantenimiento de los productos	10-15%	Muy Alta
Reposicionar sensor de temperatura en cuartos de congelación	2-3%	Muy Alta
Optimizar los puntos de calibración de los evaporadores	2% por cada °C	Alta
Control de ventiladores en el espacio de mantenimiento	1-3%	Muy Alta
Reducción de las caídas de presión en el sistema de refrigeración	5-15%	Muy Alta
Mejorar la disposición y el tipo de canastillas de producto dentro de los cuartos de congelación	1-3%	Muy Alta
Optimizar el flujo del aire refrigerado dentro de los cuartos de congelación	1-5%	Alta
Capacitación de los operarios e Instalación de displays de temperatura	2-10%	Muy Alta
Automatización del encendido de los ventiladores y luces en los cuartos de congelación	5-19%	Muy Alta
Revisar aislamiento tubería y puertas de los cuartos refrigerados	1-6%	Muy Alta
Control de ventiladores de evaporadores a conmutados electrónicamente	5-19%	Alta
Control de ventiladores de condensador a conmutados electrónicamente	3-8%	Muy Alta
Minimizar la entrada de aire exterior sin tratar a las áreas refrigeradas	6-10%	Muy Alta
Asegurar hermeticidad de zonas de bajas temperaturas en todos los procesos	1-6%	Muy Alta
Control sobre el inventario y ubicación de estantes de almacenamiento Alistamiento		Alta
Mejorar el método de alistamiento		Muy Alta
Aprovechar el uso de grúas de movilidad para las estibas		Muy Alta

Fuente: Tomado y adaptado de [68]

Este portafolio será retomado más adelante en el presente documento para evaluar la elección de las medidas de mitigación para la construcción de la curva MACC.

3.1.4 Estadístico de consumo de energía y su impacto en la huella de carbono

El factor de emisión indica el volumen de emisiones causadas por la producción de electricidad durante un período de doce meses. Este factor de emisión se emplea para calcular el ahorro de emisiones indirectas de GEI relacionado con las iniciativas que aumentan o disminuyen la entrega de energía al Sistema Interconectado Nacional (SIN). El margen combinado (MC), que es el resultado de un promedio ponderado de emisiones, produce este elemento, [72] que es la masa

estimada en toneladas de dióxido de carbono que se libera a la atmósfera por cada MWh de energía eléctrica producida quemando combustibles fósiles [73]. Se determina la emisión de GEI para MAGNUS ICE con respecto al consumo eléctrico (Tabla 3.7) con base en los factores de emisión anuales publicados por la UPME (Tabla 3.6).

Tabla 3.6. Factor de emisión por energía eléctrica para uso industrial

Año	tCO₂eq/MWh
2017	0,11
2018	0,13
2019	0,166
2020	0,203
2021	0,126
2022	0,126

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3.6 se puede apreciar que los factores más altos de emisión para Colombia según la información brindada [72], se dieron en los años 2019 y 2020, que fueron durante el transcurso de la pandemia mundial por COVID19, el aislamiento y el teletrabajo trajo consigo una alta demanda de energía a nivel nacional y mundial, situación que, entre otras variables, afectó considerablemente estos factores y también, la cantidad de emisiones totales de todas las empresas a nivel nacional.

Tabla 3.7. Emisión de gases de efecto invernadero CO₂ respecto al consumo eléctrico

Año	Energía planta consumo (MWh)	Emisiones totales tCO₂eq
2017	3107,6	341,8
2018	2915,9	379,1
2019	3066,1	508,9
2020	3022,8	613,6
2021	2806,0	353,6
2022	3015,3	379,9

Fuente: Elaboración propia

En el caso de MAGNUSICE, los valores de las emisiones totales en t CO₂eq se obtienen en la Tabla 3.7 mediante el producto del consumo energético año a año en MWh por el factor de

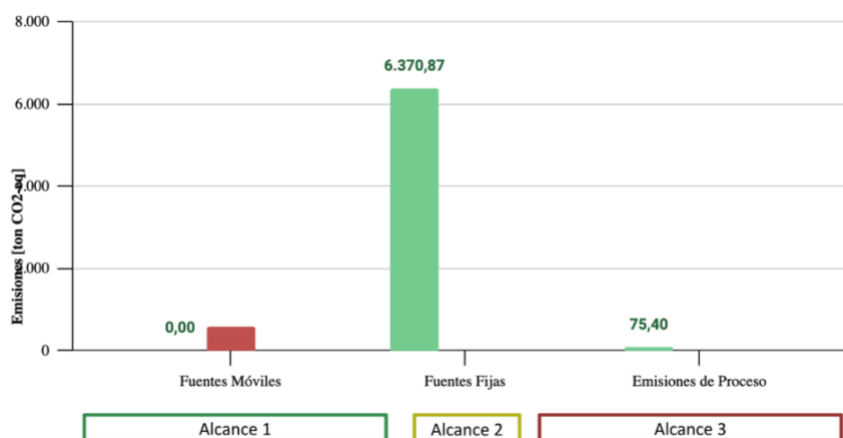
emisión por energía eléctrica para uso industrial, tal como se muestra en la Tabla 3.6. Se observa que los años 2019 y 2020 presentaron las mayores emisiones, a pesar de que, según se indica en la Tabla 3.2, no fueron años de alto consumo energético para la empresa, a diferencia del año 2017.

3.1.5 Huella de carbono

Para el año 2021 MAGNUS ICE publica la estimación de la huella de carbono de su empresa (Gráfico 3.4), encontrando que el porcentaje de toneladas emitidas corresponde a actividades de alcance 1, es decir, las que se refieren a su emisión directa por su actividad industrial. Al respecto, realizan el siguiente análisis.

La cantidad total de gases de efecto invernadero liberados durante el proceso industrial, ya sea directa o indirectamente, son generadas o controladas por la empresa, el 91% (5898,27 Ton CO₂eq/año) está dado por las emisiones producidas de contaminantes directos para efecto invernadero como CO₂, CH₄ y N₂O, generados por el uso y compras de refrigerantes, donde el 73% lo tiene el R-404, seguido de R-407 con 20%. Así las cosas, el área de mantenimiento está evaluando alternativas para el cambio de refrigerantes en los equipos de PDV, puesto que el 90% de equipos actualmente trabajan con R-134 y R-404. Desde finales de 2021, iniciaron pruebas piloto para cambiar estos refrigerantes por el R-290 [74].

Gráfico 3.4. Huella de carbono corporativa para MAGNUS ICE en 2021



Fuente: Tomado de [74]

Este análisis refiere que, si el uso de refrigerantes es el principal factor para considerar en la huella de carbono, es necesario considerar una medida de mitigación relacionada con el uso de refrigerantes naturales, en donde además del R-290 también se considere el R-744 y el R717 [74].

El análisis realizado a MAGNUS ICE permite visualizar necesidades principales a bordar para realmente lograr una reducción en el consumo eléctrico de la planta y por ende contribuir a la disminución de la emisiones producidas. Como conclusión se tiene que son necesarias las medidas de mitigación en el uso de compresores más eficientes, al ser los equipos que mayor consumo eléctrico generan en la planta; la recuperación del calor residual para optimizar la energía suministrada a las resistencias de piso y de deshielo; y el uso de refrigerantes naturales para minimizar la huella de carbono corporativa.

3.2 Medidas de mitigación de emisiones de CO₂ acordes a la empresa MAGNUS ICE

En el capítulo 2 se propone una amplia lista de medidas de abatimiento que pueden implementarse, sin embargo, algunas resultan repetitivas o muy difíciles de implementar en el contexto de la cadena de frío. El objetivo de esta sección es realizar una selección inicial bajo dos criterios: en primer lugar, determinar si hay medidas contempladas que sean más amplias que otras y puedan abarcar a otras; y en segundo lugar, evaluar si la propuesta presentada puede implementarse en Colombia, considerando la disponibilidad de tecnología o industria que brinden dichos servicios.

3.2.1 Medidas asociadas al control

Se considera que la utilización de tecnologías avanzadas de control implica de alguna manera la posibilidad del uso de inteligencia artificial. Sin embargo, es importante mencionar que la empresa MAGNUS ICE no cuenta al día de hoy con desarrollos en IA y la implementación tomaría una cantidad de tiempo considerable. Por este motivo, se descarta la medida "utilización de control inteligente". Además, la optimización del control y la temperatura también se contemplan dentro de las tecnologías avanzadas de control. Por tanto, se selecciona únicamente la medida "utilización de tecnologías avanzadas de control".

3.2.2 Medidas asociadas al uso de refrigerantes

Los refrigerantes naturales más utilizados a nivel mundial y que, al mismo tiempo, tienen un bajo impacto ambiental son el amoníaco (NH₃), el propano (R290) y el dióxido de carbono (R744). Existe amplia bibliografía al respecto y estos tres refrigerantes son considerados en las medidas de abatimiento. Por lo tanto, la medida seleccionada "Uso de refrigerantes naturales R717, R290 y R744" engloba las demás opciones consideradas y es viable en el contexto colombiano.

3.2.3 Medidas asociadas al calor

La recuperación del calor es fundamental para la construcción de la curva de abatimiento. Esta acción puede llevarse a cabo mediante intercambiadores de calor y conlleva la recuperación de energía térmica. Dado que las tres medidas propuestas son bastante similares, se opta por elegir la opción más amplia: "Recuperación de calor residual" que a la vez permite realizar la mitigación del alto consumo generado por las resistencias.

3.2.4 Medidas asociadas al mantenimiento

Como se menciona anteriormente, la empresa MAGNUS ICE cuenta con un amplio inventario de equipos. Por ende, es fundamental velar por prolongar la vida útil de los mismos, con el fin de reducir los costos de implementación. En consecuencia, se selecciona la medida de "mantenimiento y servicio de equipos".

3.2.5 Medidas asociadas al uso de tecnología avanzada

El uso de tecnología avanzada en Colombia es costoso y no está ampliamente difundido, lo que implica que su adquisición no es sencilla. Por ello, se considera que no es viable continuar con esta categoría para el caso puntual de la empresa MAGNUS ICE.

3.2.6 Medidas asociadas al uso de equipos

Dado el amplio inventario de equipos con el que cuenta la empresa, se prioriza la mejora en la eficiencia por encima de la adquisición de equipos de refrigeración con alta eficiencia energética. Con respecto a la mejora en el aislamiento térmico, esto podría abordarse desde la medida de

recuperación de calor residual. Asimismo, se considera fundamental mejorar la eficiencia energética de los equipos de refrigeración para disminuir el consumo de energía.

3.2.7 Medidas asociadas a la energía solar

La energía solar puede convertirse en energía eléctrica gracias al uso de celdas fotovoltaicas, que son una aplicación tecnológica del efecto fotoeléctrico en el cual los fotones de luz inciden sobre un material, liberando electrones y generando corriente eléctrica. Cuando la radiación solar alcanza las celdas fotovoltaicas, los fotones de luz interactúan con los átomos del material semiconductor, lo que provoca la liberación de electrones. Estos electrones, al moverse a través de la estructura de la celda, generan una corriente eléctrica que puede ser aprovechada para alimentar sistemas eléctricos o almacenarse en baterías.

La energía solar como medida de abatimiento se refiere al uso de la energía solar como una estrategia para reducir la dependencia de fuentes de energía convencionales y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Al utilizar paneles solares para generar electricidad, se reduce la necesidad de utilizar combustibles fósiles, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y la protección del medio ambiente.

3.2.8 Medidas asociadas a materiales y edificación

Considerando que la empresa MAGNUS ICE ya cuenta con amplias instalaciones, se considera que la construcción de una nueva planta elaborada con materiales de alta eficiencia energética o la implementación de la infraestructura de un edificio inteligente podría ser posible. Sin embargo, debido al costo que puede generar y al nivel de afectación en términos de producción, por el momento no se considera viable esta categoría.

3.2.9 Medidas asociadas a la gestión de energía

La información ofrecida por [46] en cuanto a la monitorización del consumo de energía implica el control de consumo, y se considera que es una medida más amplia a tener en cuenta para la implementación de un sistema de gestión de energía. Por tanto, la decisión es optar por la medida más amplia.

3.2.10 Medidas asociadas a la implementación de sistemas

En esta categoría, se contemplaron inicialmente nueve medidas de abatimiento, las cuales pueden organizarse en cuatro subcategorías: sistemas de refrigeración de alta eficiencia, sistemas de refrigeración alternativos, energía renovable y sistemas de cogeneración.

Para determinar las medidas que serán evaluadas en términos de costo y potencia para la empresa, se determina que el diseño de un sistema de generación de alta eficiencia contempla la descentralización. Por ende, es una medida más amplia que abarca la descentralización y se opta por priorizarla.

Con respecto a los sistemas de refrigeración alternativos, se considera que la técnica de refrigeración adiabática propuesta por [53] contempla un camino específico que es acorde a la empresa para su implementación y además, es viable en el contexto colombiano. En cuanto a la utilización de energías renovables, se considera que esta perspectiva ya se aborda en el uso de paneles solares, por lo tanto sería redundante.

3.2.11 Medidas de mitigación de combustibles fósiles

Considerando que la principal incidencia de MAGNUS ICE en la producción de CO₂ es el consumo de energía eléctrica, se prioriza la medida de mitigación de uso de compresores eficientes, puesto que implica directamente una reducción del consumo energético. Se aclara que se analiza puntualmente para el caso del uso de compresores en equipos de refrigeración, lo que implica que esta medida pasa a formar parte de la categoría “equipos” mencionada anteriormente.

En el contexto de la mitigación del CO₂ en MAGNUS ICE, se decide finalmente optar por once medidas de mitigación previamente explicadas, de las cuarenta y uno propuestas en el capítulo anterior, reduciendo las categorías de clasificación a ocho. Estas categorías incluyen el control, los refrigerantes, el calor, el mantenimiento, los equipos, la energía solar, la gestión de energía y la implementación de sistemas.

Tabla 3.8. Medidas de mitigación seleccionadas para MAGNUS ICE.

Medidas de control

- Utilización de tecnologías avanzadas de control

Medidas asociadas al uso de refrigerantes

- Uso de refrigerantes naturales R717, R290 y R744

Medidas asociadas al calor

- Recuperación de calor residual

Medidas de mantenimiento

- Mantenimiento y servicio de equipos

Medidas asociadas al uso de equipos.

- Mejora de la eficiencia energética de los equipos de refrigeración

Medidas asociadas a la energía solar

- Utilización de paneles solares

Medidas asociadas a la gestión de energía

- Implementación de programas de gestión de la energía

Medidas asociadas a la implementación de sistemas

- Diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia
- Utilización de sistemas de cogeneración
- Utilización de técnicas de refrigeración adiabática

Medidas de mitigación de gases GLP petróleo y gas natural.

- Uso de compresores más eficientes

Fuente: Elaboración propia con información tomada de [27], [32], [34], [35], [36], [37], [40], [42], [46], [47], [48], [49], [53], [55], [65]

CAPÍTULO 4

4. Evaluación de las medidas de mitigación

La evaluación de las medidas de mitigación para la empresa MAGNUS ICE es el tema principal de este capítulo, que también abarca la definición de los criterios de evaluación, su utilización y un análisis de las tácticas de aplicación de las medidas de mitigación.

En primer lugar, se determina la técnica de evaluación, para lo cual se definen los criterios de evaluación y se eligen los más prácticos y eficaces. Los criterios de evaluación hacen hincapié en la reducción de las emisiones; la viabilidad técnica y financiera; la viabilidad de la aplicación y el efecto sobre la huella de carbono de la empresa.

Luego, se aplican los criterios de evaluación a la empresa MAGNUS ICE, analizando las diferentes medidas de mitigación disponibles. Se evalúan aspectos como la eficiencia energética, el uso de energías renovables, la captura y almacenamiento de carbono, entre otros.

Posteriormente, dentro del mismo informe se lleva a cabo una evaluación detallada de las medidas de mitigación seleccionadas, analizando las ventajas, desventajas y costos asociados a cada una de ellas. Se identifican las estrategias de implementación más adecuadas y se evalúa su impacto en la reducción de emisiones y en la huella de carbono de la empresa.

Finalmente, se presenta un esquema de síntesis que permite visualizar las medidas de mitigación seleccionadas, su impacto en la reducción de emisiones y su factibilidad de implementación. Este esquema permite a los tomadores de decisiones tener una visión general de las estrategias de mitigación más efectivas y viables para la empresa.

4.1. Enfoque de evaluación

Se utiliza el enfoque de Evaluación del Desempeño Ambiental [75], estableciendo una línea de base ambiental que refleja la situación actual de la empresa en términos de tres criterios de evaluación principales: Eficiencia energética, Sostenibilidad ambiental y Durabilidad. Esta línea de base corresponde a la etapa inicial del enfoque de evaluación propuesto por la ISO14001.

4.1.1. Eficiencia energética

Entendida como la capacidad de utilizar la menor cantidad de energía posible para llevar a cabo cada etapa de producción de la empresa. Se busca maximizar la producción, el rendimiento y la utilidad, minimizando al mismo tiempo el consumo de energía y reduciendo las pérdidas innecesarias. Esto implica la optimización de los sistemas, equipos y procesos para lograr un uso más efectivo de la energía.

4.1.2. Sostenibilidad ambiental

Entendida como la capacidad de utilizar los recursos naturales de manera responsable y equilibrada, asegurando la preservación y regeneración de los ecosistemas, así como la protección del medio ambiente a largo plazo. Implica la adopción de prácticas y medidas que minimicen el impacto en términos de las toneladas de CO₂ anuales emitidas.

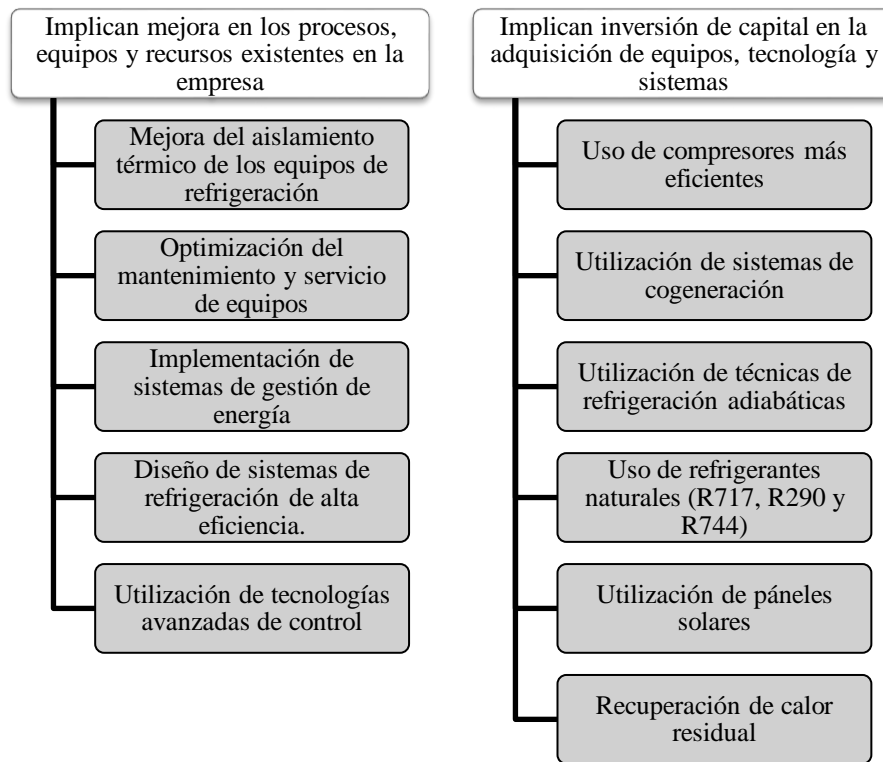
4.1.3. Durabilidad

Entendida como la capacidad de equipos y sistemas para mantener su funcionamiento y rendimiento a lo largo del tiempo, sin degradarse prematuramente o volverse obsoletos. Implica la resistencia a la depreciación, la obsolescencia y el desgaste, y se relaciona con la calidad, la confiabilidad y la vida útil de los productos o activos. La durabilidad se busca tanto en términos de rendimiento técnico como en la capacidad de adaptarse a cambios en las condiciones o necesidades.

4.2. Clasificación de las medidas de mitigación de la empresa

Con base en las necesidades de implementación de MAGNUS ICE, se establecen dos grandes categorías de clasificación de las medidas de mitigación más oportunas para la empresa; por una parte las que implican mejora en los procesos, equipos y recursos existentes en la empresa; y las que implican inversión de capital en la adquisición de equipos, tecnología y sistemas. Esta organización puede observarse en la Figura 4.1.

Figura 4.1. Clasificación de las medidas de mitigación para MAGNUS ICE



Fuente: Elaboración propia

4.3. Medidas de mitigación

Se inicia con las medidas de implican inversión de capital en la adquisición de equipos, tecnología y sistemas, realizando la correspondiente evaluación en términos de los criterios de eficiencia energética, sostenibilidad ambiental y durabilidad antes mencionados.

4.3.1. Recuperación de calor residual

4.3.1.1. Eficiencia energética

Escenario: Todo proceso de refrigeración implica la generación de calor residual, con un sistema de intercambiadores de calor y un generador eléctrico se puede transformar esa energía calórica en energía eléctrica.

Tabla 4.1. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la recuperación de calor residual

Ventajas	Desventajas
Uso de la energía calórica residual de los sistemas de refrigeración. Generación adicional de energía eléctrica. Alimentación de ventiladores y evaporadores de la planta, desde el generador. Reducción de costos operativos asociados al suministro de energía adicional.	Implica una inversión económica grande inicial.

Fuente: Elaboración propia

4.3.1.2. Sostenibilidad ambiental

Escenario: Generación de energía eléctrica a partir de energía calórica para reducir la emisión de CO₂.

Tabla 4.2. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en la recuperación de calor residual

Ventajas	Desventajas
Alto porcentaje en mitigación de toneladas de CO ₂ . Posibilidad de implementar generadores de alta tecnología que minimicen el uso de combustibles fósiles.	El generador utiliza un sistema de combustión, que tendrá que contar con un buen sistema de control para que la emisión de subproductos a la atmósfera sea mínimo. Se debe considerar la ubicación de los generadores, para que el nivel de ruido no afecte al personal de la planta.

Fuente: Elaboración propia

4.3.1.3. Durabilidad

Escenario: Tiene vida útil entre los diez y veinte años, dependiendo de las prácticas operacionales de la empresa.

Tabla 4.3. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la recuperación de calor residual

Ventajas	Desventajas
El costo invertido en el sistema es recuperable en un término de uno a tres años.	Requiere mantenimiento preventivo frecuente.

Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Utilización de paneles solares

4.3.2.1. Eficiencia energética

Escenario: Uso de paneles solares para alimentar la mayor parte de procesos de la planta.

Tabla 4.4. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la utilización de paneles solares.

Ventajas	Desventajas
Disminución considerable en los costos mensuales de energía provenientes de la red nacional. Genera un potencial de almacenamiento de energía aprovechable.	Uso de equipo adicional y necesario para la implementación e instalación del sistema de paneles solares. Inversión económica inicial grande.

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.2. Sostenibilidad ambiental

Escenario: Generación de energía eléctrica a partir de celdas fotovoltaicas.

Tabla 4.5. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en la utilización de paneles solares.

Ventajas	Desventajas
Disminución en los factores de emisión de CO ₂ y la huella de carbono asociados a la actividad industrial de la empresa. Se reduce la dependencia de combustibles fósiles y se contribuye a la mitigación del cambio climático. Proporciona mayor independencia energética y reduce la exposición a interrupciones en el suministro eléctrico. Demuestra el compromiso con la protección del medio ambiente y puede ser un factor positivo en la percepción de los clientes, proveedores y la comunidad en general.	Dependencia de la radiación solar, considerando que para Bogotá es de 4,15kWh/m ² /día. La instalación de paneles solares puede requerir un espacio considerable.

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.3. Durabilidad

Escenario: Vida útil de veinticinco a treinta años

Tabla 4.6. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la utilización de paneles solares.

Ventajas	Desventajas
Los paneles solares tienen una vida útil prolongada y el sistema requiere un mantenimiento mínimo, lo que también contribuye a la reducción de costos a lo largo del tiempo.	Para aumentar el aprovechamiento energético será necesario realizar limpieza periódica a los paneles.

Fuente: Elaboración propia

4.3.3. Utilización de sistemas de cogeneración

4.3.3.1. Eficiencia energética

Escenario: Instalación de un sistema de cogeneración de energía eléctrica y térmica

Tabla 4.7. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la utilización de sistemas de cogeneración.

Ventajas	Desventajas
<p>Uso de la energía térmica para aumentar la eficiencia de los compresores del sistema de refrigeración.</p> <p>Disminución considerable en los costos mensuales de energía provenientes de la red nacional.</p> <p>Alta demanda en energía térmica por parte de los compresores.</p> <p>Puede mejorar en un 20% la eficiencia eléctrica</p>	<p>Inversión inicial considerable en equipos y sistemas de cogeneración.</p> <p>Requiere capacitar al personal que estará dedicado para garantizar su funcionamiento eficiente y seguro.</p> <p>Puede implicar cambios en la infraestructura de la planta que deben considerarse.</p>

Fuente: Elaboración propia

4.3.3.2. Sostenibilidad ambiental

Escenario: Generación de energía eléctrica y térmica a partir de una única fuente de energía primaria.

Tabla 4.8. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad en la utilización de sistemas de cogeneración.

Ventajas	Desventajas
Reducción de la huella de carbono y al menos 30% en las emisiones de CO ₂	Requiere el uso de una energía primaria que comúnmente es un combustible fósil, si bien se puede implementar un sistema para minimizar su impacto, no se trata de una energía renovable.

Fuente: Elaboración propia

4.3.3.3. Durabilidad

Escenario: Vida útil de quince a veinte años

Tabla 4.9. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la utilización de sistemas de cogeneración.

Ventajas	Desventajas
Mejora el rendimiento de los equipos de refrigeración al disminuir los ciclos de encendido y apagado, esto evita desgaste y prolonga su vida útil.	Los motores o turbinas del sistema requieren mantenimiento o reemplazo durante la vida útil del sistema.

Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Utilización de técnicas de refrigeración adiabática

4.3.4.1. Eficiencia energética

Escenario: Proceso de refrigeración que no requiere el uso de compresores ni refrigerantes químicos.

Tabla 4.10. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la utilización de técnicas de refrigeración adiabática.

Ventajas	Desventajas
Menor consumo de energía al no requerir los compresores. Reduce la carga térmica para aumentar la eficiencia energética. El tiempo de endurecimiento del producto se reduce entre un 10% a 30%, lo que implica mayor productividad. El sistema puede implementarse haciendo uso de los equipos existentes en la empresa, lo que puede reducir los costos de inversión.	La eficiencia del sistema depende de la humedad relativa del espacio. Requiere inversión en infraestructura que garantice un aislamiento adiabático de la zona de congelación de los productos. Requiere suministro constante de agua, lo que implica un bombeo permanente que también consume energía.

Fuente: Elaboración propia

4.3.4.2. Sostenibilidad ambiental

Escenario: Almacenes con sistemas de refrigeración adiabática implementados.

Tabla 4.11. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en la utilización de técnicas de refrigeración adiabática.

Ventajas	Desventajas
Al no utilizar refrigerantes químicos dañinos, los sistemas adiabáticos presentan una menor huella ambiental y contribuyen a la reducción de GEI y al cambio climático.	El agua utilizada en el proceso de puede acumular minerales, sedimentos y otros contaminantes. Si no se realiza un adecuado tratamiento y mantenimiento del sistema, esto puede afectar la calidad del agua, incluyendo posibles problemas de corrosión y formación de algas.

Fuente: Elaboración propia

4.3.4.3. Durabilidad

Escenario: Vida útil de diez a quince años.

Tabla 4.12. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la utilización de técnicas de refrigeración adiabática.

Ventajas	Desventajas
El uso de agua como refrigerante en lugar de refrigerantes químicos corrosivos puede contribuir a una mayor vida útil del equipo de refrigeración, reduciendo los costos de mantenimiento y reemplazo a largo plazo.	Elementos como los medios de enfriamiento evaporativo o los sistemas de control pueden requerir un reemplazo o revisión periódica durante su vida útil.

Fuente: Elaboración propia

4.3.5. Uso de compresores más eficientes

4.3.5.1. Eficiencia energética

Escenario: Uso de compresores de tornillo lubricado.

Tabla 4.13. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en el uso de compresores más eficientes.

Ventajas	Desventajas
<p>Utilizan tecnología avanzada y están diseñados para minimizar las pérdidas de energía, traducido en un menor consumo de electricidad y costos operativos reducidos.</p> <p>Pueden manejar cargas de trabajo más grandes y proporcionar una refrigeración eficiente.</p> <p>Requieren un mantenimiento relativamente menor en comparación con otros tipos de compresores. Tienen menos piezas móviles y no necesitan cambios frecuentes de aceite, lo que reduce los costos y el</p>	<p>Requieren la utilización de un lubricante para el correcto funcionamiento de los rotores. Esto implica la necesidad de un suministro continuo de lubricante y un mantenimiento regular para reemplazar el lubricante gastado.</p> <p>Pueden requerir energía auxiliar, como motores eléctricos adicionales para la</p>

<p>tiempo dedicados al mantenimiento.</p> <p>Están equipados con sistemas de control avanzados que permiten una gestión más eficiente de la energía</p>	<p>lubricación o sistemas de enfriamiento, o en su defecto será necesario destinar un presupuesto más amplio para adquirir compresores más eficientes.</p>
---	--

Fuente: Elaboración propia

4.3.5.2. Sostenibilidad ambiental

Escenario: Reducción del consumo de energía y uso de refrigerantes naturales.

Tabla 4.14. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en el uso de compresores más eficientes.

Ventajas	Desventajas
<p>Reducir el consumo de energía disminuye la demanda de electricidad, lo que a su vez reduce las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO₂.</p> <p>Se pueden adaptar para utilizar refrigerantes naturales.</p>	<p>Pueden generar emisiones de gases de escape. Estas emisiones pueden contener sustancias nocivas, como óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV), que contribuyen a la contaminación del aire y a la formación de smog.</p>

Fuente: Elaboración propia

4.3.5.3. Durabilidad

Escenario: Vida útil de quince a veinte años.

Tabla 4.15. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en el uso de compresores más eficientes.

Ventajas	Desventajas
<p>Son conocidos por su durabilidad y vida útil prolongada. Esto significa que se requieren menos reemplazos y menos residuos generados a partir de compresores desechados</p>	<p>Requieren un mantenimiento regular para asegurar un rendimiento óptimo y prolongar su vida útil. Esto implica la necesidad de personal capacitado y de los recursos adecuados.</p>

Fuente: Elaboración propia

4.3.6. Uso de refrigerantes naturales (R717, R290 Y R744)

4.3.6.1. Eficiencia energética

Escenario: Utilizar amoníaco, propano y dióxido de carbono para los sistemas de refrigeración

Tabla 4.16. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en el uso de refrigerantes naturales.

Ventajas	Desventajas
<p>Son refrigerantes altamente eficientes, con excelentes propiedades de transferencia de calor, que garantizan un mejor rendimiento del sistema de refrigeración</p> <p>Son gases abundantes, disponibles y de bajo costo.</p> <p>Son totalmente compatibles con los compresores de tornillo lubricado propuestos.</p>	<p>Requieren realizar modificaciones en los sistemas existentes para garantizar una operación segura.</p> <p>Se necesita de un óptimo manejo, pues el amoniaco es tóxico, el propano inflamable y el CO₂ requiere altas presiones.</p>

Fuente: Elaboración propia

4.3.6.2. Sostenibilidad ambiental

Escenario: Los refrigerantes naturales generan menos contaminación.

Tabla 4.17. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en el uso de refrigerantes naturales.

Ventajas	Desventajas
<p>Tiene un bajo potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP) y un bajo potencial de calentamiento global (GWP)</p> <p>Coincide con sugerencias realizadas previamente a la planta.</p>	<p>Su uso requiere una gestión adecuada para minimizar cualquier impacto negativo en el medio ambiente. Esto implica seguir las mejores prácticas de manejo, mantenimiento y recuperación de refrigerantes</p>

Fuente: Elaboración propia

4.3.6.3. Durabilidad

Escenario: Vida útil de quince a veinte años.

Tabla 4.18. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en el uso de refrigerantes naturales.

Ventajas	Desventajas
<p>La vida útil del sistema es similar a la de los sistemas convencionales, lo que no implicaría cambios significativos.</p> <p>La vida útil puede extenderse si se tiene un manejo adecuado, debido a la menor corrosividad de estos refrigerantes.</p>	<p>El mantenimiento de equipos de refrigeración pueden requerir más recursos y energía en comparación con los sistemas convencionales, en especial las válvulas de expansión.</p>

Fuente: Elaboración propia

A continuación se evalúan las medidas que implican inversión en la mejora de los procesos, equipos y recursos existentes en la empresa, realizando la correspondiente evaluación en términos

de los criterios de eficiencia energética, sostenibilidad ambiental y durabilidad antes mencionados.

4.3.7. Implementación de sistemas de gestión de energía

4.3.7.1. Eficiencia energética

Escenario: Optimización del consumo energético y reducción de costos operativos.

Tabla 4.19. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la implementación de sistemas de gestión de energía.

Ventajas	Desventajas
<p>Permiten medir y controlar el consumo de energía en tiempo real, ofreciendo una imagen detallada de las tendencias de uso y los puntos conflictivos. Esto facilita la detección de áreas problemáticas y la rápida aplicación de medidas correctivas para reducir el consumo innecesario de energía.</p>	<p>Requiere una inversión inicial en gestión de energía y tecnologías de monitoreo y control.</p>
<p>Promueven la eficiencia energética al proporcionar datos y análisis detallados sobre el rendimiento de los equipos y sistemas energéticos.</p>	<p>Requiere capacitación de personal y recursos adicionales para mantener e implementar los programas de manera efectiva.</p>
<p>Señalan las áreas que pueden mejorarse, como el aumento del rendimiento de los equipos, la implantación de procedimientos de mantenimiento sensatos y el despliegue de tecnologías más eficaces.</p>	<p>Dependiendo de la infraestructura existente y la disponibilidad de tecnología, puede haber limitaciones en la capacidad de recopilación de datos en tiempo real, integración de sistemas y análisis avanzado. Estas limitaciones pueden afectar la precisión y eficacia.</p>
<p>Ayudan a reducir los costos operativos asociados con el consumo energético al identificar y corregir problemas de ineficiencia.</p>	
<p><u>En cuanto a las sugerencias hechas a la empresa por [68]</u></p>	
<p>Permite la reevaluación del tiempo de congelación y mantenimiento de los productos.</p>	
<p>Permite regular la gestión de los inventarios para evitar pérdidas de energía al abrir los sistemas de refrigeración más veces de las necesarias.</p>	

Fuente: Elaboración propia

4.3.7.2. Sostenibilidad ambiental

Escenario: Reducción en emisiones de CO₂.

Tabla 4.20. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en la implementación de sistemas de gestión de energía.

Ventajas	Desventajas
<p>Proporcionan la capacidad de generar informes y documentación necesarios para demostrar el cumplimiento de las normas energéticas nacionales.</p> <p>Demuestra la dedicación de la empresa a la sostenibilidad y la eficiencia energética. Esto puede mejorar la reputación y fomentar la confianza entre clientes, proveedores y otras partes interesadas, lo que puede mejorar la imagen de la empresa.</p>	<p>La implementación del sistema requiere una inversión inicial en tecnologías, equipos y sistemas de monitorización y control. La fabricación y adquisición de estos componentes pueden generar una huella de carbono inicial debido a la energía y los recursos necesarios para su producción. Sin embargo, esta huella de carbono inicial puede ser compensada a largo plazo mediante la eficiencia energética y la reducción de emisiones logradas.</p>

Fuente: Elaboración propia

4.3.7.3. Durabilidad

Escenario: No hay una duración específica para la vida útil de un sistema de gestión de energía, se espera que sea una herramienta a largo plazo que se mantenga y se adapte con el tiempo para ayudar a la organización a lograr una gestión energética eficiente y sostenible.

Tabla 4.21. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la implementación de sistemas de gestión de energía.

Ventajas	Desventajas
<p>Tiene una vida útil a largo plazo, y que está diseñado para ser una herramienta continua de mejora y optimización energética en una organización.</p>	<p>Su implementación implica una planificación detallada, la recopilación de datos y la configuración de sistemas de medición y monitoreo. Este proceso puede ser complejo y llevar tiempo.</p>

Fuente: Elaboración propia

4.3.8. Diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia

4.3.8.1. Eficiencia energética

Escenario: Diseño de un sistema de refrigeración que al ser de alta eficiencia garantice un menor consumo de energía eléctrica.

Tabla 4.22. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en el diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia.

Ventajas	Desventajas
<p>Un sistema de refrigeración eficiente consume menos energía para lograr la misma capacidad de refrigeración en comparación con sistemas convencionales.</p> <p>Permite un control exacto de la temperatura y la humedad, mejorando la conservación de los productos refrigerados. Esto se traduce en una mayor calidad y vida útil de los productos, menos residuos y mayores niveles de satisfacción de los clientes.</p> <p>Permite la inclusión de otras medidas propuestas, como el cambio de compresores, el uso de refrigerantes naturales y el aislamiento térmico de los equipos de refrigeración.</p> <p><u>En cuanto a las sugerencias hechas a la empresa por [68]:</u></p> <p>Permite optimizar el flujo de aire refrigerado dentro de los cuartos de congelación.</p> <p>Permite regular las caídas de presión en el sistema de refrigeración.</p>	<p>Suelen implicar un mayor costo de adquisición e instalación en comparación con los sistemas convencionales. Esto se debe a la utilización de tecnologías más avanzadas, componentes de alta calidad y sistemas de control sofisticados</p> <p>Al tratarse de tecnologías más avanzadas y menos comunes, los repuestos específicos para los sistemas de refrigeración de alta eficiencia pueden ser más difíciles de encontrar y tener un costo más elevado.</p> <p>Suelen requerir un diseño y una instalación más complejos en comparación con los sistemas convencionales. Esto implica una planificación detallada, cálculos precisos y consideraciones adicionales en términos de configuración del sistema, distribución de tuberías y cables, y requerimientos de espacio</p>

Fuente: Elaboración propia

4.3.8.2. Sostenibilidad ambiental

Escenario: Reducción en emisiones de CO₂

Tabla 4.23. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en el diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia.

Ventajas	Desventajas
<p>Al reducir el consumo de energía, un sistema de refrigeración de alta eficiencia contribuye a la disminución de las emisiones de GEI.</p> <p>Al utilizar tecnologías y refrigerantes más eficientes y respetuosos con el medio ambiente, se puede cumplir con las normativas y estándares ambientales nacionales, evitando sanciones y mejorando la imagen corporativa en términos de sostenibilidad.</p>	<p>Los sistemas de refrigeración de alta eficiencia pueden requerir el uso de ciertos recursos naturales durante su fabricación, instalación y operación. Por ejemplo, la producción de componentes y materiales puede requerir la extracción de recursos como metales, plásticos y otros materiales.</p>

Fuente: Elaboración propia

4.3.8.3. Durabilidad

Escenario: Se espera que el sistema tenga una vida útil de al menos quince a veinte años, y posiblemente más, si se siguen las prácticas adecuadas de mantenimiento y servicio.

Tabla 4.24. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en el diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia.

Ventajas	Desventajas
Menos tiempo de inactividad debido a fallas o averías, lo que a su vez se traduce en una operación más fluida y reducción de costos de mantenimiento.	Pueden requerir un mantenimiento más especializado y periódico, debido a la complejidad de los componentes y tecnologías utilizadas. Esto implica contar con personal capacitado y experimentado, así como con un programa de mantenimiento adecuado.

Fuente: Elaboración propia

4.3.9. Mejora del aislamiento térmico de los equipos de refrigeración

4.3.9.1. Eficiencia energética

Escenario: Aumentar la eficiencia y reducir las pérdidas de calor en el sistema, por medio del uso de materiales aislantes de alta calidad y espesor adecuado en las paredes, puertas y otros componentes del equipo de refrigeración.

Tabla 4.25. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la mejora del aislamiento de los equipos de refrigeración.

Ventajas	Desventajas
<p>La necesidad de que el sistema de refrigeración trabaje más para mantener la temperatura requerida disminuye al reducirse las pérdidas de calor. Como resultado, disminuye el consumo de energía y los gastos relacionados.</p> <p>El equipo de refrigeración puede alcanzar y mantener más fácilmente la temperatura deseada, lo que mejora su rendimiento y eficiencia general.</p> <p>Ayuda a mantener una temperatura más estable en el interior del equipo, lo que contribuye a preservar la calidad y frescura de los productos refrigerados.</p> <p>Puede aplicarse como una medida de mejora en equipos existentes</p> <p><u>En cuanto a las sugerencias hechas a la empresa por [68]:</u></p> <p>Minimiza la entrada de aire exterior sin tratar a las áreas refrigeradas.</p> <p>Garantiza un debido aislamiento en tuberías y puertas de los cuartos de refrigeración.</p> <p>Asegura la hermeticidad de zonas de bajas temperaturas en todos los procesos.</p>	<p>Los materiales de aislamiento de calidad suelen ser más caros, lo que puede aumentar los costos de adquisición y instalación de los equipos de refrigeración. Sin embargo, este costo adicional puede compensarse a largo plazo con ahorros en consumo de energía y costos operativos.</p> <p>Es posible que los equipos de refrigeración se vuelvan más voluminosos y pesados. Esto puede plantear desafíos en términos de espacio y transporte, especialmente en instalaciones existentes que no están diseñadas para acomodar equipos de mayor tamaño</p>

Fuente: Elaboración propia

4.3.9.2. Sostenibilidad ambiental

Escenario: Reducción en emisiones de CO₂

Tabla 4.26. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en la mejora del aislamiento de los equipos de refrigeración.

Ventajas	Desventajas
<p>Se reduce la necesidad de consumir grandes cantidades de energía. Esto se traduce en una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero</p> <p>Menor generación de residuos asociados a la producción y distribución de energía, así como a la eliminación de los equipos de refrigeración obsoletos.</p> <p>Se alinea con los principios de sostenibilidad al promover un uso más eficiente de los recursos, reducir las emisiones contaminantes y preservar el equilibrio de los ecosistemas.</p>	<p>Los materiales utilizados para mejorar el aislamiento térmico, como espumas y paneles aislantes, pueden contener sustancias químicas que son dañinas para el medio ambiente. Algunos de estos materiales pueden liberar gases contaminantes durante su fabricación o contener componentes que son difíciles de desechar adecuadamente al final de su vida útil.</p> <p>Es posible que se generen residuos adicionales durante el proceso de instalación, como restos de materiales aislantes antiguos o desechos de demolición</p>

Fuente: Elaboración propia

4.3.9.3. Durabilidad

Escenario: El tiempo de vida útil de los equipos de refrigeración puede oscilar entre diez y veinte años, e incluso más, dependiendo de la calidad de fabricación y la capacidad para mantener un funcionamiento eficiente a lo largo del tiempo.

Tabla 4.27. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la mejora del aislamiento de los equipos de refrigeración.

Ventajas	Desventajas
<p>Al reducir las fluctuaciones de temperatura y minimizar el estrés en los componentes del sistema, se puede aumentar la vida útil de los equipos de refrigeración.</p>	<p>Requiere un mantenimiento adecuado para mantener su eficacia a lo largo del tiempo. El sellado y la integridad del aislamiento deben ser monitoreados y se deben realizar inspecciones regulares para detectar posibles daños o desgastes.</p>

Fuente: Elaboración propia

4.3.10. Utilización de tecnologías avanzadas de control

4.3.10.1. Eficiencia energética

Escenario: Uso de sistemas inteligentes y algoritmos sofisticados para monitorear y regular de manera precisa el funcionamiento de los equipos de refrigeración.

Tabla 4.28. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la utilización de tecnologías avanzadas de control.

Ventajas	Desventajas
<p>Permite optimizar el rendimiento de los equipos de refrigeración al ajustar de manera automática los parámetros operativos, como la temperatura, la presión y el flujo.</p> <p>Cuenta con sistemas de monitoreo en tiempo real y diagnóstico, los que pueden detectar anomalías, fallas o problemas en el sistema de refrigeración y generar alertas tempranas. Esto permite una respuesta rápida y la posibilidad de realizar mantenimientos preventivos, evitando tiempos de inactividad no planificados y reduciendo los costos de reparación.</p> <p>Pueden integrarse con el sistema de gestión de energía, permitiendo una mayor eficiencia y optimización en toda la instalación. Esto facilita la coordinación y supervisión centralizada de múltiples sistemas de refrigeración, lo que resulta en un mejor control y una mayor eficiencia energética en general.</p> <p>Es altamente flexible y adaptable, puede ajustarse a diferentes tipos de equipos de refrigeración, actualizarse y mejorar a medida que avanza la tecnología, lo que garantiza un sistema de control de vanguardia a lo largo del tiempo.</p> <p><u>En cuanto a las sugerencias hechas a la empresa por [68]:</u></p> <p>Considera el control de los ventiladores de condensadores, evaporadores y espacios de almacenamiento de manera electrónica.</p> <p>Permite automatizar el encendido de los ventiladores y luces en los cuartos de congelación.</p> <p>Considera la instalación de displays de temperatura.</p> <p>Optimiza los puntos de calibración de los evaporadores.</p>	<p>Implica una inversión inicial significativa. Estos sistemas suelen ser más complejos y requieren equipos especializados, sensores y dispositivos de control adicionales.</p> <p>Dependencia de la disponibilidad y el funcionamiento adecuado de la tecnología. Si se producen fallas o interrupciones en los sistemas de control, podría afectarse el rendimiento del sistema de refrigeración y su eficiencia energética.</p> <p>El sistema requiere actualizaciones o mejoras periódicas para mantenerse al día con las últimas innovaciones. Esto implica un costo adicional y la necesidad de asegurarse de que las actualizaciones sean compatibles con el sistema existente.</p> <p>Se requiere capacitación adicional para el personal encargado de operar el sistema. La complejidad del sistema puede implicar una curva de aprendizaje más pronunciada y un tiempo adicional para adaptarse a las nuevas funcionalidades y características del sistema.</p>

Fuente: Elaboración propia

4.3.10.2. Sostenibilidad ambiental

Escenario: Reducción en emisiones de CO₂

Tabla 4.29. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en la utilización de tecnologías avanzadas de control.

Ventajas	Desventajas
Al reducir el consumo de electricidad, se disminuye la necesidad de generación de energía, lo que a su vez reduce las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de electricidad.	Aumento en la huella de carbono debido al consumo adicional de energía eléctrica necesario para operar estos sistemas.
Uso más eficiente de los recursos, como la energía y el agua, lo que reduce la huella ambiental del sistema de refrigeración.	Da lugar a la generación de residuos electrónicos adicionales.

Fuente: Elaboración propia

4.3.10.3. Durabilidad

Escenario: El tiempo de vida útil del puede oscilar entre diez y veinte años, e incluso más, dependiendo del mantenimiento, y el avance de la tecnología.

Tabla 4.30. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la utilización de tecnologías avanzadas de control.

Ventajas	Desventajas
Es esencial llevar a cabo un mantenimiento regular y adecuado de los equipos de control para garantizar un funcionamiento óptimo y prolongar su vida útil. Esto implica seguir las recomendaciones del fabricante, realizar inspecciones periódicas, limpiar y reemplazar los componentes según sea necesario, y abordar cualquier problema o falla de manera oportuna.	Los avances tecnológicos y las innovaciones continuas pueden influir en la vida útil de las tecnologías de control. A medida que se desarrollan nuevos sistemas y componentes más eficientes y duraderos, es posible que se desee actualizar o reemplazar los equipos existentes para aprovechar los beneficios adicionales.

Fuente: Elaboración propia

4.3.11. Optimización del mantenimiento y servicio de equipos

4.3.11.1. Eficiencia energética

Escenario: Estrategia que busca mejorar la eficiencia y confiabilidad de los sistemas, reducir los tiempos de inactividad no planificados y minimizar los costos asociados al mantenimiento.

Tabla 4.31. Ventajas y desventajas del criterio de eficiencia energética en la optimización del mantenimiento y servicio de equipos.

Ventajas	Desventajas
<p>Mediante un mantenimiento regular y adecuado, se pueden prevenir problemas y desgastes prematuros en los componentes de los equipos de refrigeración, lo que contribuye a prolongar su vida útil.</p> <p>Un mantenimiento óptimo permite detectar y corregir posibles fallos o problemas en los equipos de manera temprana, evitando costosas reparaciones o reemplazos inesperados.</p> <p>La optimización del servicio ayuda a minimizar el tiempo de inactividad, lo que se traduce en una mayor productividad y menor impacto económico.</p> <p>Un mantenimiento adecuado de los equipos de refrigeración garantiza que estén funcionando de manera óptima, lo que reduce el consumo energético.</p> <p>Al programar y gestionar de manera eficiente las actividades de mantenimiento, se pueden optimizar los recursos disponibles, como el personal técnico, las herramientas y los repuestos. Esto permite maximizar la eficiencia en la ejecución de las tareas y minimizar los tiempos muertos.</p> <p><u>En cuanto a las sugerencias hechas a la empresa por [68]:</u></p> <p>Mejora la disposición y el tipo de canastillas utilizadas para los productos dentro de los cuartos de congelación.</p> <p>Aprovechar el uso de grúas de movilidad para las estibas.</p> <p>Reposicionar sensores de temperatura, para tener información en tiempo real del proceso de congelación del producto.</p>	<p>Implementar el programa puede requerir una inversión inicial significativa en capacitación, herramientas y tecnologías especializadas.</p> <p>Requiere personal capacitado y experimentado en el manejo de equipos de refrigeración. La contratación y retención de personal calificado puede ser un desafío, especialmente en áreas donde la demanda de técnicos especializados es alta.</p> <p>Realizar actividades de mantenimiento puede requerir períodos de tiempo de inactividad planificado. Durante estos períodos, es posible que los equipos no estén operativos, lo que puede afectar temporalmente la capacidad de refrigeración y la continuidad de las operaciones.</p>

Fuente: Elaboración propia

4.3.11.2. Sostenibilidad ambiental

Escenario: Reducción en emisiones de CO₂

Tabla 4.32. Ventajas y desventajas del criterio de sostenibilidad ambiental en la optimización del mantenimiento y servicio de equipos.

Ventajas	Desventajas
<p>Se pueden detectar y reparar posibles fugas de refrigerantes, que pueden tener un impacto negativo en la capa de ozono o contribuir al calentamiento global.</p> <p>Aseguramiento de que los equipos de refrigeración estén funcionando de manera eficiente, lo que se traduce en un menor consumo de energía.</p> <p>Disminución en CO₂ proporcionales a las disminuciones de</p>	<p>En el proceso de mantenimiento y servicio de los equipos de refrigeración, se pueden generar residuos, como aceites usados, filtros o componentes defectuosos. La correcta gestión y disposición de estos residuos es crucial para evitar impactos ambientales negativos y cumplir con las regulaciones correspondientes.</p> <p>Durante el mantenimiento y servicio, puede</p>

<p>consumo energético.</p> <p>Al minimizar los tiempos de inactividad no planificados y mejorar la confiabilidad de los equipos, se reduce la necesidad de transportar y desechar componentes o equipos defectuosos. Esto disminuye la generación de residuos y el impacto ambiental asociado a su disposición final.</p> <p>La realización de un mantenimiento regular y la correcta atención a los equipos de refrigeración contribuyen a garantizar su funcionamiento seguro, evitando posibles riesgos para los trabajadores y minimizando la posibilidad de fugas de refrigerantes u otros problemas relacionados</p>	<p>haber un consumo adicional de recursos naturales, como energía y agua. Por ejemplo, la limpieza de los equipos puede requerir el uso de agua, mientras que el uso de herramientas y equipos de diagnóstico puede consumir energía adicional.</p> <p>Algunas actividades de mantenimiento, como el uso de equipos de soldadura o el funcionamiento de vehículos de servicio, pueden generar emisiones de gases de efecto invernadero.</p>
--	---

Fuente: Elaboración propia

4.3.11.3. Durabilidad

Escenario: Se trata de un proceso continuo en el tiempo y dinámico que busca mejorar la eficiencia y la vida útil de los equipos y sistemas de la planta, por lo tanto, no tiene caducidad.

Tabla 4.33. Ventajas y desventajas del criterio de durabilidad en la optimización del mantenimiento y servicio de equipos.

Ventajas	Desventajas
La optimización del mantenimiento y servicio de equipos de refrigeración permite prolongar la vida útil de los equipos, evitando su reemplazo prematuro.	Requiere un equipo de profesionales siempre atento a las dinámicas empresariales y que tome decisiones en función de la optimización de procesos.

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 5

5. Curvas de abatimiento para MAGNUS ICE

El presente capítulo se enfoca en la creación de curvas de abatimiento para la empresa MAGNUS ICE, con el objetivo de evaluar la efectividad de las medidas de mitigación seleccionadas en términos de reducción de emisiones de GEI.

En primer lugar, se describen los cálculos efectuados para la creación de las curvas de abatimiento, incluyendo el análisis de la línea base económica, así como su correspondiente análisis financiero, método de financiación de la empresa y la identificación de las alternativas de mitigación seleccionadas.

Luego, se evalúa la vida útil del proyecto, incluyendo los costos de inversión y los costos operativos. Se analizan los ahorros esperados y se calcula el volumen de emisiones de GEI que se espera ahorrar con la implementación de cada alternativa.

A continuación, se muestra la curva del coste marginal, que ilustra la relación entre el costo de abatimiento y la cantidad de emisiones de GEI que reduce cada estrategia de alternativa. Esta curva es una herramienta útil para evaluar la eficacia de las distintas opciones de mitigación y elegir las que ofrecen la mayor reducción de emisiones de GEI al menor coste.

5.1. Cálculos efectuados

5.1.1. Análisis Financiero y Método de Financiación

Como desarrollo de los procedimientos para la creación de las curvas de costo de abatimiento, es necesaria la formulación y análisis de los elementos de inversión, gasto y ahorro para cada medida de mitigación. La evaluación del capital que se requiere invertir es conocido como CAPEX (capital expenditure), el cual representa los gastos de capital necesarios para diseñar e implementar un proyecto, estos costos en las medidas de mitigación son representados en USD. El OPEX (operational expenditure) comprende los gastos operativos continuos del proyecto a lo largo de su vida útil. Entre los que se encuentran: salarios, gastos administrativos, costos fijos de

operación y mantenimiento, entre otros. El elemento de ahorro de cada medida de mitigación presentada es reflejado principalmente en las emisiones de CO₂ reducidas, expresadas en toneladas/año.

Una vez que se disponga de los ahorros, los gastos de capital (CAPEX) y los gastos operativos (OPEX), se lleva a cabo una evaluación mediante el cálculo del Valor Presente Neto (VPN), el cual es una herramienta matemática utilizada para evaluar la rentabilidad de un proyecto. Se expresa en USD actuales y permite determinar si los beneficios económicos del proyecto superan sus costos. El cálculo del Valor Presente Neto (VPN) se lleva a cabo utilizando el procedimiento matemático de la ecuación (5.1) [76]:

$$VPN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} \quad (5.1)$$

Donde la variable I_0 representa la inversión inicial y siempre se ingresa en negativo, la variable t es la unidad de la sumatoria, que va en función del número de años para los que se evalúa el VPN, siendo n en este caso diez años. Por otra parte, está F_t que expresa el Flujo neto de Efectivo, el que corresponde a la diferencia entre los ingresos, los gastos y los impuestos anuales. Finalmente, está la variable r que indica la tasa de descuento [76].

Adicional al anterior cálculo matemático, es posible calcular el VPN utilizando una fórmula incorporada “VNA” en Microsoft Excel, la cual “Devuelve el valor neto presente de una inversión a partir de una tasa de descuento y una serie de pagos futuros (valores negativos) y entradas (positivos)” [77]. El cálculo del Valor Presente Neto (VPN) en este proyecto se realiza mediante el uso de Microsoft Excel, debido a su capacidad para realizar cálculos financieros de manera precisa y eficiente.

El Tiempo de vida de la curva MACC para la empresa MAGNUS ICE se toma con una proyección de diez años, ya que es el periodo en el cual se espera que el proyecto esté en funcionamiento y genere resultados. En tanto al tiempo estimado para el retorno de inversión (ROI) de las medidas de mitigación se plantea un rango de uno a cinco años.

Además de la información suministrada, se debe conocer la tasa de interés que se aplica para calcular el valor actual de los flujos de efectivo futuros. En las curvas MACC, la tasa de descuento desempeña un papel crucial al comparar los costos y beneficios de diferentes opciones para mitigar el cambio climático. Cuando la tasa de descuento es alta, se le da menos importancia al futuro, lo que hace que se prioricen las opciones que presenten menores costos iniciales, pero mayores beneficios a largo plazo. Para la empresa MAGNUS ICE el crédito se espera asumir con una tasa de interés de **13,25%** efectivo anual (extraído de la tasa de colocación otorgada para créditos comerciales por el banco de la república) [78].

El VPN no proporciona información sobre los beneficios relativos de reducción de gases de efecto invernadero. Para abordar esto, se utiliza el Costo Marginal de Abatimiento, que es el costo promedio de reducir una tonelada de dióxido de carbono equivalente. Se expresa en dólares por tonelada de CO₂eq. Para calcular el costo por tonelada de CO₂eq reducida se emplea la ecuación (5.2)

$$$/tCO_2e = \frac{VPN}{tCO_2eq \text{ reducidas}} \quad (5.2)$$

5.1.1. Costos y emisiones de CO₂ reducidas

Los costos de capital de las diversas medidas de mitigación se evalúan en función del consumo promedio de energía eléctrica de la empresa, que es aproximadamente 3019 MWh anuales o 250 MWh mensuales según se muestra en la Tabla 3.2. Costos de energía en pesos y dólares. Estas estimaciones se obtienen a través de la literatura, informes y/o proveedores especializados en los diferentes sistemas, equipos o estrategias para la reducción de GEI, que es el enfoque principal de este proyecto. Estos costos pueden variar según las tecnologías utilizadas, las condiciones de instalación u otros factores que pueden influir en el valor inicial de la inversión.

Los costos fijos de operación y mantenimiento se expresan en dólares estadounidenses y se calculan mediante la derivación de los costos de inversión y abarcan gastos como, costos operativos, monitoreo del rendimiento de los sistemas, mantenimiento preventivo y posibles reparaciones menores, entre otros.

En cuanto a las emisiones de CO₂ reducidas, se calculan teniendo en cuenta el factor de emisión de la red para los inventarios de GEI proporcionado por la entidad responsable (Tabla 3.6. Factor de emisión), y la emisión de gases de efecto invernadero CO₂ en relación con el consumo eléctrico de la empresa (Tabla 3.7. Emisión de gases de efecto invernadero CO₂ respecto al consumo eléctrico) así como la reducción lograda para la misma cantidad de GEI en cada una de las diferentes medidas de mitigación abordadas en el proyecto.

5.2. Modelación de las medidas de mitigación

Las medidas de mitigación seleccionadas para el proyecto se clasifican según el costo de abatimiento por tonelada de CO₂eq, desde el más bajo (más deseable) hasta el más alto. Los proyectos que presentan ahorros (costos marginales de abatimiento negativos) se sitúan por debajo del eje horizontal y deben ser priorizados para su implementación. Aquellos que se encuentran por encima del eje horizontal deben evaluarse cuidadosamente en comparación con el costo marginal de otras opciones de cumplimiento [79]. “De acuerdo con las recomendaciones de Morgan y Henrion (1990), es necesaria la incorporación del análisis de incertidumbre cuando hay que combinar información incierta de diversas fuentes” [80].

En las siguientes tablas se proporciona un resumen de la modelación realizada para cada una de las medidas de mitigación de CO₂ seleccionadas para la empresa MAGNUS ICE a lo largo de los capítulos anteriores. Para obtener información más detallada sobre cada medida, se han elaborado fichas descriptivas que se encuentran disponibles en el anexo B.

Tabla 5.1. Modelación realizada para la utilización de paneles solares

Análisis económico de mitigación del cambio climático	Resultados
Costo de Inversión	\$101.888
Costos Fijos de operación y mantenimiento	\$2.038
Emisiones de CO ₂ reducidas (t/año)	348
Tiempo de vida del proyecto (años)	10
VPN	\$90.941
Costo Promedio de Abatimiento (\$/t CO₂)	26,1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.2. Modelación realizada para la recuperación de calor residual.

Análisis económico de mitigación del cambio climático	Resultados
Costo de Inversión	\$500.000
Costos Fijos de operación y mantenimiento	\$15.000
Emisiones de CO ₂ reducidas (t/año)	2.400
Tiempo de vida del proyecto (años)	10
VPN	\$419.413
Costo Promedio de Abatimiento (\$/t CO₂)	17,5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.3. Modelación realizada para el diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia

Análisis económico de mitigación del cambio climático	Resultados
Costo de Inversión	\$125.000
Costos Fijos de operación y mantenimiento	\$3.750
Emisiones de CO ₂ reducidas (t/año)	900
Tiempo de vida del proyecto (años)	10
VPN	\$104.853
Costo Promedio de Abatimiento (\$/t CO₂)	11,7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.4. Modelación realizada para el uso de compresores más eficientes

Análisis económico de mitigación del cambio climático	Resultados
Costo de Inversión	\$12.000
Costos Fijos de operación y mantenimiento	\$2.400
Emisiones de CO ₂ reducidas (t/año)	1.200
Tiempo de vida del proyecto (años)	10
VPN	\$-894
Costo Promedio de Abatimiento (\$/t CO₂)	-0,1

Fuente: Elaboración propia

El valor de costo de inversión de los compresores más eficientes puede variar en un amplio rango, la modelación se realiza a partir del valor más económico disponible en el mercado, siendo este 12.000 dólares, sin embargo, el costo puede alcanzar valores de 200.000 dólares por unidad, y esta variación implica reducciones en el costo promedio de abatimiento. Se presenta la información de esta manera para que la empresa pueda tener un amplio espectro de consideración en su toma de decisiones.

Tabla 5.5. Modelación realizada para la implementación de programas de gestión de la energía

Análisis económico de mitigación del cambio climático	Resultados
Costo de Inversión	\$10.000
Costos Fijos de operación y mantenimiento	\$500
Emisiones de CO ₂ reducidas (t/año)	600
Tiempo de vida del proyecto (años)	10
VPN	\$7.314
Costo Promedio de Abatimiento (\$/t CO₂)	1,2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.6. Modelación realizada para la utilización de sistemas de cogeneración

Análisis económico de mitigación del cambio climático	Resultados
Costo de Inversión	\$125.000
Costos Fijos de operación y mantenimiento	\$6.250
Emisiones de CO ₂ reducidas (t/año)	633
Tiempo de vida del proyecto (años)	10
VPN	\$91.422
Costo Promedio de Abatimiento (\$/t CO₂)	14,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.7. Modelación realizada para la utilización de técnicas de refrigeración adiabática

Análisis económico de mitigación del cambio climático	Resultados
Costo de Inversión	\$25.000
Costos Fijos de operación y mantenimiento	\$2.500
Emisiones de CO ₂ reducidas (t/año)	150
Tiempo de vida del proyecto (años)	10
VPN	\$11.569
Costo Promedio de Abatimiento (\$/t CO₂)	7,7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.8. Modelación realizada para la mejora del aislamiento térmico de los equipos de refrigeración

Análisis económico de mitigación del cambio climático	Resultados
Costo de Inversión	\$25.000
Costos Fijos de operación y mantenimiento	\$2.500
Emisiones de CO ₂ reducidas (t/año)	150
Tiempo de vida del proyecto (años)	10
VPN	\$11.569
Costo Promedio de Abatimiento (\$/t CO₂)	7,7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.9. Modelación realizada para el uso de refrigerantes naturales (a base de amoníaco, propano y/o dióxido de carbono)

Análisis económico de mitigación del cambio climático	Resultados
Costo de Inversión	\$125.000
Costos Fijos de operación y mantenimiento	\$25.000
Emisiones de CO ₂ reducidas (t/año)	2.250
Tiempo de vida del proyecto (años)	10
VPN	\$-9.311
Costo Promedio de Abatimiento (\$/t CO₂)	-0,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.10. Modelación realizada para la utilización de tecnologías avanzadas de control

Análisis económico de mitigación del cambio climático	Resultados
Costo de Inversión	\$10.000
Costos Fijos de operación y mantenimiento	\$1.000
Emisiones de CO ₂ reducidas (t/año)	180
Tiempo de vida del proyecto (años)	10
VPN	\$4.628
Costo Promedio de Abatimiento (\$/t CO₂)	2,6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.11. Modelación realizada para la optimización del mantenimiento y servicio de equipos

Análisis económico de mitigación del cambio climático	Resultados
Costo de Inversión	\$5.000
Costos Fijos de operación y mantenimiento	\$100
Emisiones de CO ₂ reducidas (t/año)	12.000
Tiempo de vida del proyecto (años)	10
VPN	\$4.463
Costo Promedio de Abatimiento (\$/t CO₂)	0,037

Fuente: Elaboración propia

Después de llevar a cabo el proceso de modelación correspondiente y presentar los resultados de las diferentes medidas de mitigación, se procede a la construcción de la curva MACC específica para la empresa MAGNUS ICE. El análisis técnico y económico, que incluye las estrategias implementadas y los resultados obtenidos, los cuales se exponen en detalle en el capítulo 6 de este proyecto.

CAPÍTULO 6

6. Análisis de datos

El presente capítulo se enfoca en el análisis de datos relacionados con las alternativas de mitigación evaluadas para la empresa MAGNUS ICE. El análisis se divide en varios aspectos: estrategia; costos; ventajas y desventajas; y volumen de emisiones de GEI ahorrado.

En términos de la estrategia, se analizan los datos relacionados con la selección de las alternativas de mitigación y se evalúa su efectividad para reducir las emisiones de GEI de la empresa. También, se evalúa la coherencia de las alternativas de mitigación con las metas y objetivos de sostenibilidad de la empresa.

En términos de los costos, se analizan los datos relacionados con los costos de inversión y los costos operativos de cada alternativa de mitigación.

En términos de las ventajas y desventajas, se analizan los datos relacionados con los beneficios y desventajas de cada alternativa de mitigación. Se evalúa si los beneficios de cada alternativa superan a las desventajas y se determina si las alternativas seleccionadas proporcionan la mejor combinación de beneficios y desventajas.

Por último, en términos del volumen de emisiones de GEI ahorrado, se analizan los datos relacionados con la reducción de emisiones de GEI esperada con cada alternativa de mitigación. Se determina si las alternativas seleccionadas proporcionan la mayor reducción de emisiones de GEI al menor costo.

6.1. Estrategia implementada

El enfoque adoptado se ha basado en el continuo seguimiento de las medidas de mitigación de MAGNUS ICE. Esta observación incluye la identificación de aspectos técnicos de la generación de GEI, la recopilación de datos oficiales y la consideración de pautas evaluadas respecto a factores como el consumo de energía y la huella de carbono, así como la exploración de diversos

escenarios y el análisis de las ventajas y desventajas de cada medida. A partir de los resultados de esta minuciosa investigación, cada medida de mitigación se modela en función de los factores mencionados, lo que permite construir la curva MACC correspondiente.

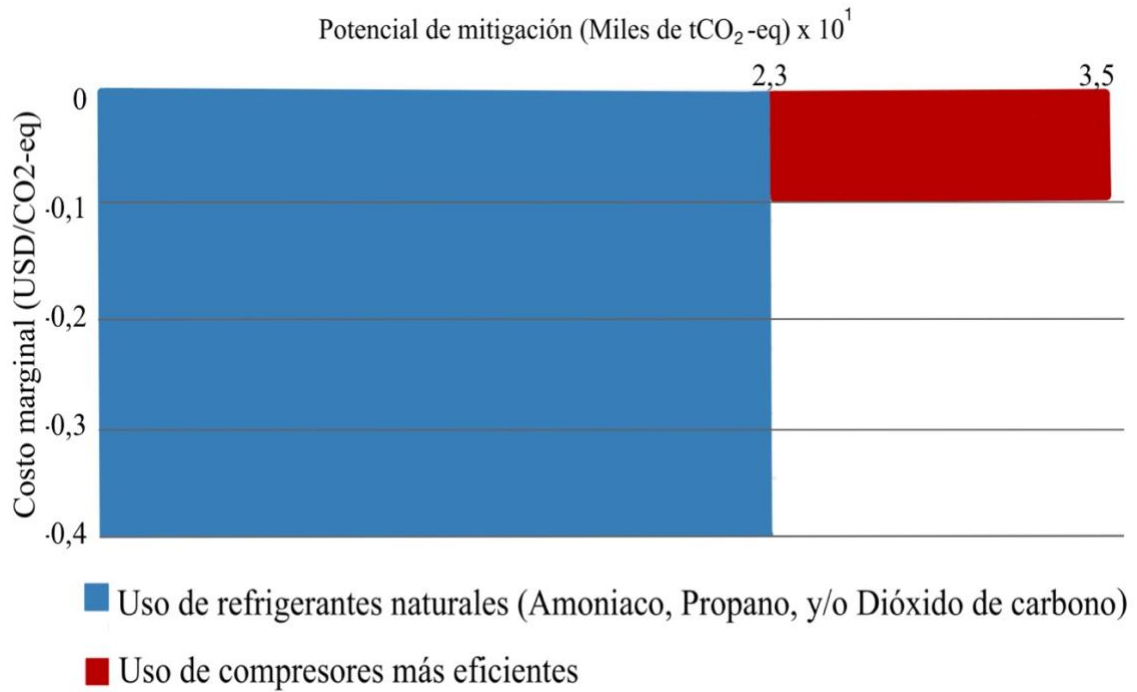
Tabla 6.1. Costo promedio y reducción acumulada para cada medida de mitigación

Medidas de mitigación MAGNUS ICE	Costo promedio de abatimiento (\$/t CO₂)	Reducción acumulada (miles de toneladas/año)
Uso de refrigerantes naturales (R 717, R 290 y/o R 744)	-0,4	2,3
Uso de compresores más eficientes	-0,1	3,5
Optimización del mantenimiento y servicio de equipos	0,037	15,5
Implementación de programas de gestión de la energía	1,2	16,1
Utilización de tecnologías avanzadas de control	2,6	16,2
Utilización de técnicas de refrigeración adiabática	7,7	16,4
Diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia	11,7	17,3
Utilización de sistemas de cogeneración	14,4	17,9
Recuperación de calor residual	17,5	20,3
Mejora del aislamiento térmico de los equipos de refrigeración	24,8	20,4
Utilización de paneles solares	26,1	20,8

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de este estudio, elabora la Tabla 6.1 que presenta los resultados generales del Costo Promedio de Abatimiento (expresados en \$/t CO₂) y la Reducción Acumulada (en miles de toneladas/año) para cada medida de mitigación evaluada en el proyecto, donde el uso de refrigerantes naturales (como el amoníaco, propano y/o dióxido de carbono) y el uso de compresores más eficientes, se encuentran en la zona negativa, siendo las principales medidas a implementar en la empresa ya que resultan en un ahorro a mediano plazo y/o largo plazo, como se observa en el Gráfico 6.1.

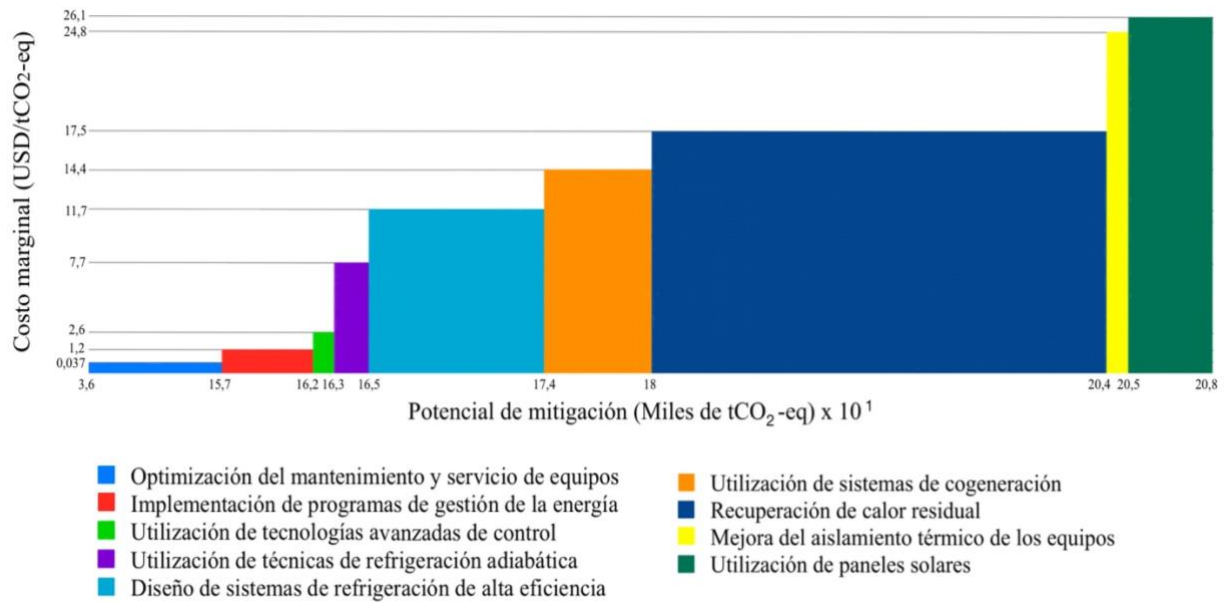
Gráfico 6.1. Medidas de mitigación de ahorro en costo marginal.



Fuente: Elaboración propia

Las siguientes alternativas se encuentran sobre el eje x de la gráfica, ordenadas de menor a mayor costo marginal en unidades de dólares por tonelada de CO₂-equivalente (USD/t CO₂-eq). Estas alternativas abarcan diversas medidas, desde la optimización del mantenimiento y servicio de equipos hasta la utilización de paneles solares. Se destaca que la medida de implementación de paneles solares muestra el mayor costo marginal entre las opciones evaluadas, tal como se ilustra en el Gráfico 6.2.

Gráfico 6.2. Medidas de mitigación de mayor costo marginal.

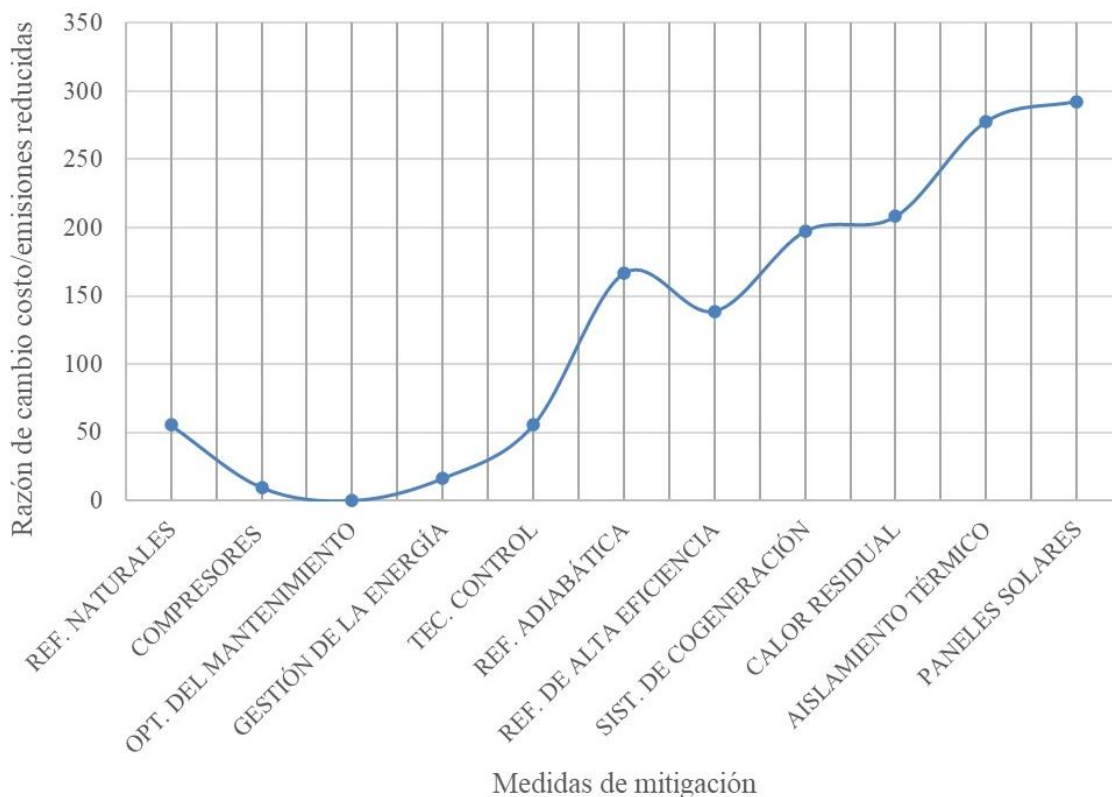


Fuente: Elaboración propia, el ajuste horizontal de la primera medida de mitigación no está a escala para facilitar la observación del lector.

6.1.1. En términos de los costos

Se lleva a cabo un análisis de la razón de cambio en relación con los costos de inversión inicial y las reducciones de emisiones de CO₂ para cada medida de mitigación, tal como se visualiza en el gGráfico 6.3 Se puede observar que a medida que aumenta el Costo Marginal [USD/t CO₂-eq], también se incrementa el costo asociado a las emisiones reducidas. Esta relación de cambio indica que la optimización del mantenimiento y servicio de equipos presenta una interacción más baja, en contraste con la utilización de paneles solares que muestra una interacción más significativa.

Gráfico 6.3. Razón de cambio entre los costos de inversión inicial y las reducciones de emisiones de CO₂

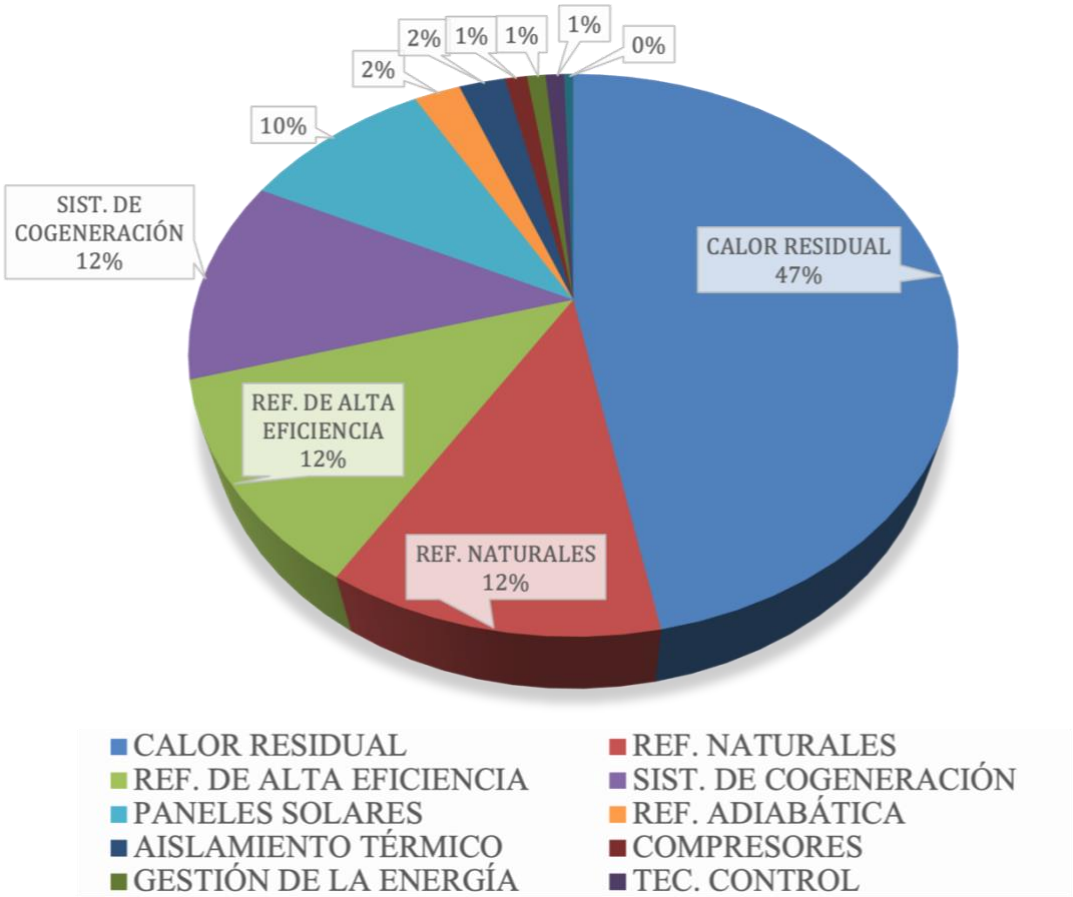


Fuente: Elaboración propia

El análisis porcentual basado en los costos de inversión (CAPEX) se realiza como se muestra en el Gráfico 6.4 En dicho gráfico, se evidencia que la recuperación de calor residual representa el mayor porcentaje de inversión de capital, y esto se debe a los elevados costos asociados con la implementación de los sistemas necesarios para llevar a cabo esta medida de mitigación. A continuación, le siguen en importancia el uso de refrigerantes naturales (amoníaco, propano y/o dióxido de carbono), el diseño de sistemas de refrigeración altamente eficientes y la utilización de sistemas de cogeneración con un 12% de inversión, ya que en términos de costos resultan ser inferiores en comparación con la medida mencionada anteriormente. Finalmente, se incluyen las

demás medidas de mitigación seleccionadas para la implementación del proyecto en la empresa MAGNUS ICE.

Gráfico 6.4. Relación porcentual de costos por cada medida de mitigación



Fuente: Elaboración propia

6.1.2. Cálculo del costo de inversión acumulado

Como resultado de la modelación para las respectivas medidas de mitigación, se logran obtener los costos de inversión (CAPEX), los costos fijos de operación y mantenimiento (OPEX) y los costos totales anuales en los dos aspectos anteriormente mencionados, como se muestra en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Costo de inversión

Costos inversión (CAPEX)	Costos de operación y mantenimiento (OPEX)	Costos totales
\$1.063.888,4	\$59.038	\$1.122.926,1

Fuente: Elaboración propia

6.1.3. En términos de las ventajas y desventajas

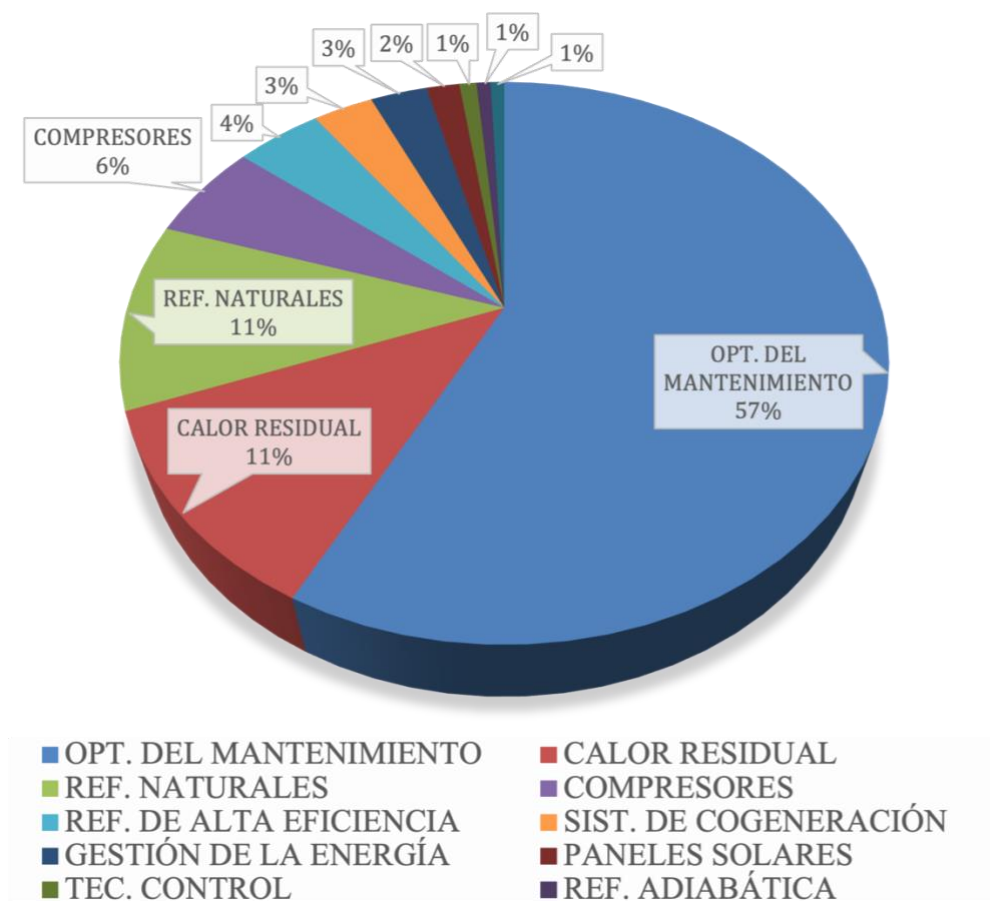
Tras la generación de la curva MACC, se insta a la empresa a llevar a cabo una comparación de las ventajas y desventajas expuestas en el capítulo 4 en función de su actual estado financiero. A través de este análisis comparativo, se pueden identificar relaciones objetivas que contribuyen a la priorización de la implementación de determinadas medidas de mitigación. Dichas relaciones se basan en diversos factores, como los costos de inversión iniciales, los costos anuales de mantenimiento, los requisitos de equipamiento necesario para la ejecución de las medidas y la facilidad de implementación de los sistemas correspondientes. La consideración de estos aspectos proporciona un marco objetivo que facilita la toma de decisiones en la selección y priorización de las medidas de mitigación más apropiadas.

6.1.4. En términos de emisiones de GEI ahorrado

Se genera el Gráfico 6.5 para realizar el análisis de las emisiones de CO₂ reducidas en t/año. En dicho gráfico, se puede observar que la optimización del mantenimiento y servicio de equipos representa la medida con el mayor porcentaje de reducción de CO₂. Este análisis se basa en un amplio potencial de disminución de estas emisiones, debido a la proyección de implementar un gran número de medidas de mitigación en la empresa MAGNUS ICE. A continuación, se encuentran la recuperación de calor residual y el uso de refrigerantes naturales (amoníaco, propano y/o dióxido de carbono), que también muestran un porcentaje significativo de reducción de emisiones de CO₂. Las demás medidas presentan un menor porcentaje de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), pero siguen siendo de gran importancia en términos de ahorro de emisiones de GEI.

Al observar los costos, se destaca que la recuperación de calor residual y el uso de refrigerantes naturales (amoníaco, propano y/o dióxido de carbono) son medidas que implican una mayor inversión. Sin embargo, también se evidencia que son de las medidas con una mayor reducción porcentual de emisiones de GEI.

Gráfico 6.5. Relación porcentual de emisión de CO₂ por cada medida de mitigación



Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar el análisis y la creación de la curva MACC específica para la empresa MAGNUS ICE, se obtienen resultados significativos en términos de la reducción de emisiones de

gases de efecto invernadero. Se determina que la implementación de las medidas de mitigación seleccionadas permite un ahorro anual de 20,8 (Miles de t CO₂) de emisiones de GEI.

Estos resultados reflejan el impacto positivo de las estrategias de mitigación aplicadas en el sector de la refrigeración. La curva MACC, al considerar diferentes opciones y tecnologías para reducir las emisiones, proporciona una visión clara de las medidas más efectivas y eficientes en términos de la reducción de GEI. Esto permite a la empresa tomar decisiones informadas y priorizar aquellas acciones que ofrecen los mayores beneficios en cuanto a la reducción de emisiones.

Potencial de mitigación de 20,8 (Miles de t CO₂) de GEI anuales es un logro significativo para la empresa, puesto que contribuye a su compromiso con la sostenibilidad ambiental y alineación con los objetivos globales de mitigación del cambio climático. Estos resultados demuestran la importancia de implementar medidas de mitigación efectivas en la industria de la refrigeración y su impacto positivo en la reducción de las emisiones de GEI.

CONCLUSIONES

Tras un análisis exhaustivo del modelo de operación de la empresa MAGNUS ICE en términos de su nivel de producción se encuentra entre 3MM y 6MM de producto anual, destacando la presentación de helados tipo Gourmet, De aquí se obtiene que, para la producción la variación porcentual máxima ocurre en el año 2021 con un crecimiento del 40% con respecto al año 2020, donde la producción fue de 6,06 MM de kg de producto anual. Un consumo de energía de 3000 MWh anual, realizando una regresión matemática la cual muestra que, $E=0,1030 P+7.031,7$, En donde E representa la energía eléctrica medida en kWh/día y P la cantidad de producto fabricado en kg; En el caso del consumo de energía en planta, la variación porcentual máxima ocurre en el año 2022 con un aumento del 7.5% con respecto al año 2021. Las áreas, zonas y procesos potenciales que van desde la producción, apilamiento, endurecimiento (-30 °C), almacenamiento (-19 °C), alistamiento (5 °C) y despacho (5 °C).

Se identifica un conjunto de aproximadamente 40 medidas de mitigación, y posteriormente filtradas a 11 medidas, las cuales son clasificadas en términos de la mejora a sus sistemas actuales y/o la implementación de unos nuevos, estas medidas seleccionadas con base en la extensa búsqueda documental que se presenta en el anexo A, demuestran ser efectivas en la reducción de las emisiones de GEI., y dispuestas en una línea de base desde el enfoque de evaluación de desempeño ambiental de la ISO140001, que permite establecer criterios como la eficiencia energética, la sostenibilidad ambiental y la durabilidad, que resultan ser los adecuados para confirmar las medidas de mitigación que se usan en la construcción de la curva MACC responden a las necesidades de la empresa.

Se logran estimar las curvas MACC por medio de un análisis financiero y un correspondiente método de financiación. como desarrollo de los procedimientos para la creación de las curvas de costo de abatimiento, es necesaria la formulación y análisis de los elementos de inversión, gasto y ahorro para cada medida de mitigación; entre estos destacan los CAPEX (cotizaciones y/o bibliografía pertinente), los OPEX (derivados de las inversiones de capital), las emisiones de CO2 reducidas en toneladas/año, el tiempo de vida del proyecto (10 años), el VPN o valor

presente neto donde se resalta una tasa de interés implementada de 13,25%, y finalmente el costo por tonelada de CO₂eq (derivado de la división del VPN/tCO₂eq reducidas).

El presente estudio ofrece los resultados generales del Costo Promedio de Abatimiento y la Reducción Acumulada, para cada medida de mitigación evaluada en el proyecto. Se destaca que el uso de refrigerantes naturales, como el amoníaco (R717), propano (R290) y/o dióxido de carbono (R744), con un costo marginal de -0,4 USD/CO₂-eq y un potencial de mitigación de 2,3 (miles de tCO₂-eq), junto con la adopción de compresores más eficientes con un costo marginal de -0,1 USD/CO₂-eq y un potencial de mitigación de 1,2 (miles de tCO₂-eq). Estas medidas muestran un comportamiento negativo en la curva MACC, lo que indica que son las medidas más relevantes para implementar en la empresa. Estas opciones conllevan ahorros significativos a mediano y/o largo plazo.

Como resultado de implementar los criterios de evaluación en las medidas de mitigación seleccionadas se presentan amplias tablas detalladas con las ventajas y desventajas (capítulo 4) de la implementación de estas, además de los costos asociados a cada una (anexo B), en términos de costos se realiza una razón de cambio entre los costos de inversión inicial y las reducciones de emisiones de CO₂, donde se destaca la medida de utilización de paneles solares. Esta información proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas y estratégicas por parte de la empresa, que les permite tomar en consideración su estado financiero actual, y al ser presentadas en dólares estadounidenses, tendrá vigencia para el momento en que la empresa tome sus decisiones, en función de la tasa de cambio a peso colombiano.

A través de la modelación de las diferentes medidas de mitigación, se han calculado los costos de inversión (CAPEX) y los costos fijos de operación y mantenimiento (OPEX). Los resultados obtenidos indican que el monto total necesario para implementar todas las medidas evaluadas asciende a \$1.122.926 USD.

En el análisis basado en los costos de inversión (CAPEX), se observa que la recuperación de calor residual constituye el componente más significativo con un 47% del total de la inversión de capital. Esto se debe a los costos elevados asociados con la implementación de los sistemas necesarios para llevar a cabo esta medida de mitigación. A continuación, se encuentran en orden

de importancia el uso de refrigerantes naturales, el diseño de sistemas de refrigeración altamente eficientes, y la utilización de sistemas de cogeneración, representando cada uno un 12% de la inversión total.

El resultado de la curva MACC para MAGNUS ICE, establece una mitigación de emisiones de GEI correspondiente a 20,8 (Miles de tCO₂) anuales, donde destaca con un 57% la optimización del mantenimiento y servicio de equipos; que proviene principalmente del descenso de consumo de energía eléctrica, la implementación de las medidas propuestas además de favorecer la economía de la empresa, representa una importante disminución en la necesidad energética nacional y contribuye en la devaluación de los factores de emisión para la red de inventario de huella de carbono anuales expedidos por la UPME , lo que fortalece la posición de la empresa en términos de su responsabilidad ambiental y se muestra como un ejemplo a nivel nacional para posicionar al país con su compromiso en reducción de las GEI.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ONU, «Noticias ONU», *N. U.*, ago. 2021, [En línea]. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2021/08/1495262>.
- [2] El Universal, «Calentamiento global inició hace 180 años», *EL Univers.*, ago. 2016, [En línea]. Disponible en: <https://www.eluniversal.com.mx/articulo/ciencia-y-salud/ciencia/2016/08/22/la-revolucion-industrial-origino-el-calentamiento-global>.
- [3] IPCC, «Intergovernmental panel on climate change», abr. 2016, [En línea]. Disponible en: https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml.
- [4] Semana, «El 2021 fue uno de los siete años más calurosos jamás registrados: ONU», *Semana*, ene. 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.semana.com/sostenible/medio-ambiente/articulo/el-2021-fue-uno-de-los-siete-anos-mas-calurosos-jamas-registrados-onu/202237/>.
- [5] C. B. Marinkovic De la Cruz, «Análisis y selección de medidas de mitigación al cambio climático para el sector agricultura mediante proceso analítico jerárquico», nov. 2021, [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/63686>.
- [6] P. Valenzuela Pacheco, «Curvas de abatimiento de CO₂», 2010, [En línea]. Disponible en: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/InformeCurva.pdf>.
- [7] Centro Mario Molina, «Rutas tecnológicas para el desarrollo de bajo carbono en la Industria Nacional», 2018, [En línea]. Disponible en: http://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2019/05/1.-Resumen-ejecutivo-Rutas-tecnol%C3%B3gicas-para-el-desarrollo-de-bajo-carbono-en-la-Industria_2018.pdf.
- [8] R. B. Zavala Hormaechea, «Elaboración de curvas de costo de abatimiento de emisiones de gases de efecto invernadero y eficiencia energética en Minera Escondida», 2010, [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ucv.cl/handle/10.4151/91508>.
- [9] S. A. Almendra Pérez, «Construcción de curvas de abatimiento de gases de efecto invernadero asociadas a proyectos de eficiencia energética en molienda y clasificación de la compañía minera Doña Inés de Collahuasi», may 2014, [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/117043>.
- [10] L. A. Herrera Castro, «Estimación de curvas de costo de abatimiento de emisiones de CO₂ a partir de la modificación del tipo de iluminarias utilizadas en el sector vivienda en Colombia», 2018, [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/39090?show=full>.
- [11] U. Harvard, «Science Cooking». <https://sciencecooking.seas.harvard.edu/>
- [12] Foodcrumbles, «Phase Diagrams Explained – Demystifying Ice Cream», 2016. [En línea]. Disponible en: <https://foodcrumbles.com/phase-diagrams/>
- [13] P. Schalbart, D. Leducq, y G. Alvarez, «Ice-cream storage energy efficiency with model predictive control of a refrigeration system coupled to a PCM tank», *Int. J. Refrig.*, vol. 52, pp. 140-150, abr. 2015, [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140700714002035>
- [14] «Área metropolitana Valle de Aburrá», *Área metropolitana Valle de Aburrá*, 12 de junio de 2023. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/eficiencia-energetica.aspx>
- [15] D. A. Ariza Arevalo, «Establecimiento de un Modelo de Gestión de la Cadena de Frío Colombia», 2015, [En línea]. Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13984/Establecimiento%20de%20un%20Modelo%20de%20Gestion%20de%20la%20Cadena%20de%20Frio%20en%20una%20Industria%20de%20Alimentos.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [16] V. Rodríguez, I. Amorrortu, y M. J. Álvarez, «Ajuste de parámetros en la cadena de frío», ago. 2011, [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2011000300008
- [17] J. A. Evans *et al.*, «Initiatives to reduce energy use in cold stores», [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/17707491/Initiatives_to_reduce_energy_use_in_cold_stores
- [18] C. M. Curiel Anaya, «Estrategias Óptimas de Abatimiento de Emisiones Contaminantes.», *Universidad Autónoma Metropolitana*, 2011.
- [19] MINAMBIENTE, «Huella de Carbono», 2023. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/mitigaci/huella-de-carbono>

- [20] J. O. Valderrama, C. Espíndola, y R. Quezada, «Huella de Carbono, un Concepto que no puede estar Ausente en Cursos de Ingeniería y Ciencias», 2011, [En línea]. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50062011000300002
- [21] MITECO, «GUÍA PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO Y PARA LA ELABORACIÓN DE UN PLAN DE MEJORA DE UNA ORGANIZACIÓN», *Minist. Para Transic. Ecológica El Reto Demográfico*, jun. 2013, [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia_huella_carbono_tcm30-479093.pdf
- [22] J. E. González Ramirez, M. Leducq a, G. Arellano, y A. Alvarez, «Energy consumption optimization of a continuous ice cream process», *Energy Convers. Manag.*, vol. 70, pp. 230-238, jun. 2013, [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413001581>
- [23] J. Roca Jusmet, «La política climática y los combustibles fósiles: una perspectiva desde la oferta», *Asoc. Cult. Econ. Crítica*, n.º 34, pp. 9-25, dic. 2022, [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2445/192004>
- [24] D. Loughlin, K. Kaufman, y B. Keaveny, «Marginal abatement cost curves for NOx incorporating both controls and alternative measures», *CMAS Conf. Chap. Hill*, oct. 2015, [En línea]. Disponible en: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=311553
- [25] R. Miranda, G. Herédia, y F. Perucci, «Curva MAC: ¿qué es y cómo puede ayudar en la estrategia de reducción de emisiones?», abr. 2022, [En línea]. Disponible en: <https://blog.waycarbon.com/es/2022/04/ques-curva-mac/>
- [26] M. E. Mejía Giraldo y I. D. Oviedo Restrepo, «Estimación de las funciones de costo marginal de abatimiento de material particulado para fuentes fijas en el Valle de Aburrá*», *Ens. Econ.*, dic. 2006.
- [27] T. F. Gondwe y E. Chikuni, «A review of advanced HVAC control systems for energy-efficient buildings», *Energy Build.*, p. 224, 2020.
- [28] S. Li, Y. Li, T. Ma, y Q. Cui, «A review on intelligent control technology for refrigeration systems», *Appl. Therm. Eng.*, p. 183, 2021.
- [29] L. Yang y R. Wang, «Energy-efficient temperature and humidity control for air-conditioning systems», *Appl. Energy*, p. 240, 2019.
- [30] United Nations Environment Programme (UNEP), «Natural Refrigerants - Opportunities for Climate Friendly Cooling», [En línea]. Disponible en: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27120/natural_refrigerants_opportunities_for_climate_friendly_cooling_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [31] H. Singh y A. Kumar, «A review of natural refrigerants for sustainable refrigeration systems.», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, p. 139, 2021.
- [32] R. Cabello, F. Sánchez-Seco, y E. Torrella, «Review of the use of natural refrigerants in refrigeration and air-conditioning systems.», *Appl. Therm. Eng.*, p. 166, 2020.
- [33] Y. Tao, Y. Wang, y J. Zeng, «Research progress on heat recovery technologies for refrigeration systems: A review», *Energy Convers. Manag.*, n.º 114370, p. 246, 2021.
- [34] D. Li, Y. Li, C. Yu, y M. Li, «Review on the utilization of waste heat from air conditioning systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, n.º 110229, p. 133, 2020.
- [35] A. S. Fung y T. T. Chow, «A review of energy recovery technologies for vapour compression refrigeration systems.», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, n.º 103, pp. 13-24, 2019.
- [36] R. K. Sharma, S. K. Tyagi, y C. R. Chen, «A review on optimization techniques for energy efficient operation of HVAC systems in buildings.», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, n.º 76, pp. 963-989, 2017.
- [37] N. Giri y A. Rakshit, «Recent development in energy-efficient technologies for sustainable air conditioning system: A review.», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, pp. 1318-1334, 2017.
- [38] A. A. Shah, A. Tariq, y M. H. Kim, «Impact of variable-speed compressor technology on energy efficiency and CO₂ emission reduction in refrigeration systems: A review.», *Energy Convers. Manag.*, n.º 114028, p. 236.
- [39] P. Eslami-Nejad, M. Maerefat, y M. A. Rosen, «A review of novel energy-efficient technologies for cooling and refrigeration applications.», *Appl. Energy*, vol. 242, pp. 112-133, 2019.
- [40] J. Wu, R. Wang, y Y. Zhang, «Recent advances in energy-efficient and sustainable refrigeration technologies: A review.», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, n.º 109610, p. 119, 2020.
- [41] H. Zhou, W. Shi, C. Zhang, y J. Li, «A comprehensive review of insulation materials for refrigeration systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, n.º 1100682, p. 139, 2021.

- [42] A. Kumar y S. C. Kaushik, «A review of solar-powered absorption refrigeration systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, n.º 60, pp. 337-353, 2016.
- [43] D. Kaya y M. A. Çolak, «A review of solar-driven air conditioning systems.», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, n.º 101, pp. 119-136, 2019.
- [44] R. Al-Shannaq y G. M. Zaki, «Building envelope materials and systems for energy efficiency in buildings: A review», *Energy Build.*, n.º 109872, p. 213, 2020.
- [45] S. Schiavon, y F. Bauman, «A review of research on energy use in buildings: An analysis of topics, methodologies and research outputs.», *Energy Build.*, n.º 198, pp. 205-218, 2019.
- [46] A. Al-Karaghoulí y Y. Ren, «Energy management programs for HVAC systems: A review.», *Energy Build.*, n.º 195, pp. 304-316, 2019.
- [47] J. Sánchez Lopez y J. Ortiz Vidal, «Energy management systems applied to HVAC systems: A literature review», *Energy Build.*, n.º 185, pp. 31-45, 2019.
- [48] A. Lashgari, A. Yavari, y M. A. Rosen, «A review of CO₂-based refrigeration systems and applications.», *Appl. Therm. Eng.*, n.º 114920, p. 168, 2020.
- [49] M. M. Alam y R. Saidur, «A review on cogeneration systems for sustainable energy production in buildings.», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, n.º 104, pp. 478-488, 2019.
- [50] G. R. Roshan y M. A. Rosen, «A review of evaporative cooling technologies.», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, n.º 109494, p. 118, 2020.
- [51] M. Rivas Valdivia y F. J. Perales Palacios, «A review on decentralized refrigeration systems for cold storage applications.», *Appl. Therm. Eng.*, n.º 116578, p. 190, 2021.
- [52] S. P. Jang, H. J. Kim, y J. W. Jeong, «A review on renewable energy-driven cooling technologies: State of the art and future directions.», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, n.º 109515, p. 118, 2020.
- [53] A. K. Athienitis y J. D. Mondol, «Solar thermal cooling systems for residential applications: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, n.º 60, pp. 337-346, 2016.
- [54] X. Gao, R. Wang, y Y. Zhang, «A review on adiabatic cooling: Technologies, applications, and future prospects.», *Appl. Energy*, n.º 220, pp. 242-259, 2018.
- [55] K. H. Kim y J. W. Jeong, «A review of adiabatic cooling systems for energy-efficient buildings.», *Appl. Energy*, n.º 115372, p. 275, 2020.
- [56] A. Kumar, S. C. Kaushik, y M. Goyal, «Review of adsorption cooling systems and materials for sustainable development.», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, n.º 109740, p. 123, 2020.
- [57] G. P. Barbose y E. Mills, «Cooling the planet: Opportunities for deployment of super-efficient room air conditioners.», *Lawrence Berkeley Natl. Lab.*, 2018, [En línea]. Disponible en: <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/lbnl-1007334.pdf>
- [58] F. Sánchez Ochoa y A. Aranda Usón, «Techno-economic analysis of an industrial cooling and heat recovery system.», *Energy Convers. Manag.*, n.º 116, pp. 21-29, 2016.
- [59] E. Ercan y S. Kakaç, «Natural refrigerants: A review», *Appl. Therm. Eng.*, n.º 114910, p. 168, 2020.
- [60] P. Lundqvist y X. Zhang, «Refrigeration and heat pump technologies for decarbonization.», *Appl. Energy*, n.º 194, pp. 291-305, 2017.
- [61] C. E. Carrión Flores y E. T. Romero Guzmán, «Energy analysis of the refrigeration and air conditioning systems», *Appl. Therm. Eng.*, n.º 148, pp. 1237-1248, 2019.
- [62] J. T. Kim y S. Park, «Comparative study on refrigerant properties of CFCs, HCFCs, HFCs, and natural refrigerants.», *J. Mech. Sci. Technol.*, n.º 32(1), pp. 59-68, 2018.
- [63] A. Al-Mahdawi y H. Zaman, «Performance evaluation of refrigeration system with refrigerant recovery», *Int. J. Refrig.*, n.º 116, pp. 372-382, 2020.
- [64] M. Al-Hajjaji y Y. S. Najjar, «The impact of refrigerant leakage on the performance of air conditioning systems: A review.», *Int. J. Refrig.*, n.º 78, pp. 91-101, 2017.
- [65] International Energy Agency, «The Potential for LPG to Mitigate Climate Change». [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-gas-in-todays-energy-transitions>
- [66] United Nations Environment Programme and International Energy Agency, «Cooling Emissions and Policy Synthesis Report.», *UNEP IEA*, p. 2020, [En línea]. Disponible en: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/33094/CoolRep.pdf>

- [67] M. S. M. Corado Barillas, «Diseño de un plan de procedimientos técnicos para el manejo ambiental de gases refrigerantes instalados en sistemas de refrigeración en contenedores ubicados en la aduana de Puerto Quetzal, Escuintla, Guatemala», *Dr. Diss. Univ. San Carlos Guatem.*, 2021.
- [68] Eficiencia Energética Estratégica S.A.S., «Informe final programa fábricas de productividad», *Bogotá DC*, 2020.
- [69] M. Quiroa, «Economipedia», 4 de diciembre de 2019. <https://economipedia.com/definiciones/produccion.html>
- [70] «¿cómo se hace el helado industrial?», *Gominoteca*, 2023. <https://gominoteca.com/helado/como-se-hace>
- [71] A. Chacon y M. L. Pineda Castro, «Características fisicoquímicas y sensoriales de helados de leche caprina y bovina con grasa vegetal», *Univ. Costa Rica*, dic. 2015, [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/286451828_Caracteristicas_fisicoquimicas_y_sensoriales_de_helados_de_leche_caprina_y_bovina_con_grasa_vegetal
- [72] UPME, «CÁLCULO DEL FACTOR DE EMISIONES DE LA RED DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA PARA 2021», *Unidad Planeac. Min. Energética*, 2021, [En línea]. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/calculo-factor-de-emision-de-CO2-del-SIN.aspx>
- [73] CTFE, «FACTOR DE EMISIÓN DE CO₂ DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE ECUADOR», *Com. Téc. Determinación Factores Emis. Gases Ef. Invernadero*, 2019, [En línea]. Disponible en: https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/11/factor_de_emision_de_CO2_del_sistema_nacional_interconectado_de_ecuador_-_informe_2019.pdf
- [74] C. Quintero, «CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO CORPORATIVA», 2021.
- [75] ISO14001, «ISO 14001:2015». https://www.isotools.us/normas/medio-ambiente/iso-14001/?__hstc=2903087.ee1caeded3d0c2678799d0a537b87723.1687655932976.1687655932976.1687655932976.1&__hssc=2903087.1.1687655932976&__hsfp=1269133998
- [76] A. F. Robledo Gómez, «Estudio de factibilidad técnicoeconómica del uso de un sistema de cogeneración para la recuperación de calor en una planta cementera en Colombia.», *Inst. Tecnológico Metrop.*, 2019, [En línea]. Disponible en: http://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/1385/Rep_Itm_mae_Robledo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [77] Microsoft, «Soporte técnico de Microsoft 365», *Función NPV*. <https://support.microsoft.com/es-es/office/funci%C3%B3n-npv-8672cb67-2576-4d07-b67b-ac28acf2a568>
- [78] Banco de la República, «Tasas de colocación», *Portal Corp. Colomb.*, jun. 2023, [En línea]. Disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/tasas-colocacion#:~:text=Tasa%20actual%3A%2013%2C25%25>
- [79] UQx CARBON101x Essential tools for the low carbon economy, «UQx Carbon101x 4.2.1.3 Marginal abatement cost curves», *Youtube*, 6 de febrero de 2017. https://www.youtube.com/watch?v=eukIpgfyKB0&list=PLMYycNmoWZAUpEmiHKfXFbwNqYzOU_MWG&index=5
- [80] CATIE, «Elaboración de curvas de costo marginal de abatimiento para tecnologías del nama ganadería Costa Rica», *Cent. Agronómico Trop. Investig. Enseñ.*, 2017, [En línea]. Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/79952>
- [81] TMEIC, «TMEIC We drive industry», 2023. <https://www.tmeic.com/es/industry-solution/sistema-de-recuperacion-de-calor-residual>
- [82] J. Arango Vásquez, «Estrategias energéticas aplicables a la administración de edificaciones residenciales y comerciales en Colombia.», 2018, [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63908>
- [83] D. E. Schwartz, «Thermodynamic cycles and electrical charge recovery in high-efficiency electrocaloric cooling systems», *Int. J. Refrig.*, vol. 131, pp. 970-979, nov. 2021, [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140700721000566>
- [84] ATLAS, «Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia». <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- [85] SEIA, «Solar energy industries association». <https://www.seia.org/>
- [86] ANES, «Asociación nacional de energía solar». <https://anes.org.mx/>
- [87] AUTO SOLAR, «AUTO SOLAR». <https://autosolar.co/paneles-solares-24v/panel-solar-ja-solar-455w-24v-monocristalino-perc>

- [88] M. Quintero Ríos, «Modelo de integración de sistemas de gestión de la energía en la industria colombiana», *Repos. Inst. UN*, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/82726?show=full>
- [89] I. Negro Torres, «Análisis comparativo de las tecnologías de producción de energía eléctrica: Costes de inversión, Operación y Mantenimiento, de producción y emisiones específicas.», *Dpto Ing. Energética Esc. Téc. Super. Ing. Univ. Sevilla*, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/101319/TFG-2846-NEGRO%20TORRES.pdf?sequence=1>
- [90] ENEL, «¿Qué son los sistemas de cogeneración y cuáles son sus ventajas?» <https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/what-are-cogeneration-systems#:~:text=La%20cogeneraci%C3%B3n%20es%20un%20sistema,dos%20fuentes%20de%20producci%C3%B3n%20separadas>
- [91] L. G. Redelinghuys, M. C. Tshamala, y T. M. Hans, «Performance of an adiabatic pre-cooling system for concentrating solar power plants in arid areas», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 231, p. 120819, 2023, [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431123008487>
- [92] MECALUX, «El aislamiento térmico en las cámaras frigoríficas», 2017. <https://www.mecalux.com.co/articulos-de-logistica/aislamiento-termico-camaras-frigorificas#:~:text=El%20aislamiento%20t%C3%A9rmico%20es%20la,energ%C3%ADa%20calor%C3%ADfica%20entre%20espacios%20contiguos>
- [93] «AISLAMIENTOS TÉRMICOS INDUSTRIALES», *Sanitarias e Hidráulicas S.A.*, 2023. https://marketing.sanitariasehidraulicassa.com/datacrm/sanitariaseh/landingv2/public/campaigns/aislamientos-termicos-industriales-general?gclid=CjwKCAjw-b-kBhB-EiwA4fvKrGdNxK8CeGTaqWVWkocIlktOW9EA2oky-MMumMvG1ryaPHY1NxNnBihoCh_4QAvD_BwE
- [94] Danfoss, «Industrial Refrigeration Ammonia and CO₂ Application», 2022, [En línea]. Disponible en: <https://assets.danfoss.com/documents/209503/AB137786416217en-000704.pdf>
- [95] M. Chasserot y M. Garry, «GUIDE TO NATURAL REFRIGERANTS AT THE 2015 AHR EXPO», *Accel. Mag.*, [En línea]. Disponible en: http://publication.shecco.com/upload/file/org/1421242907385080_887201.pdf
- [96] J. Barea Rey, «Control avanzado de un sistema de refrigeración», *Univ. Politécnica Valencia*, 2019, [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/129040/Barea%20-%20Control%20avanzado%20de%20un%20sistema%20de%20refrigeraci%C3%B3n.pdf>
- [97] Correa y Cárdenas, «Diagnóstico de equipos de refrigeración para optimización. Bogotá», *Refrigeración Correa y Cárdenas*, 2023. <https://www.refrigeracioncyc.com/diagnostico-equipos-refrigeracion-para-optimizacion-bogota/>
- [98] A. F. Rendón Marín, «PROCEDIMIENTOS DE MANTENIMIENTO PARA SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN EN CUARTOS FRÍOS», *Univ. TECNOLÓGICA PEREIRA*, 2014, [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/35a2f075-de88-430a-b89d-259336a48242/content>
- [99] ICONTEC, «SEGURIDAD DE ARTEFACTOS ELECTRODOMÉSTICOS Y ARTEFACTOS SIMILARES. PARTE 2: REQUISITOS PARTICULARES PARA REFRIGERADORES, FABRICADORES DE HELADO Y FABRICADORES DE HIELO», 2016, [En línea]. Disponible en: <https://www.mincit.gov.co/minindustria/temas-de-interes/reglamentos-tecnicos-en-el-mcit/documentos/anexo-8.aspx>
- [100] Froztec, «Cómo elegir tus equipos de refrigeración industrial», *Froztec*, 2022. <https://www.froztec.com/es-mx/como-elegir-tus-equipos-de-refrigeracion-industrial>

ANEXO A

A.1. Medidas de mitigación de emisiones de CO₂

A.1.1. Medidas asociadas al control

Las medidas asociadas al control juegan un papel fundamental en la eficiencia energética y la reducción de emisiones de CO₂ en los sistemas de refrigeración. La utilización de tecnologías avanzadas de control ofrece soluciones innovadoras para optimizar el funcionamiento de estos sistemas.

Utilización de tecnologías avanzadas de control

- Sistemas de control adaptativo

Utilización de tecnologías de control inteligente

- Inteligencia artificial y aprendizaje automático

Optimización del control de temperatura y humedad

- Condiciones de temperatura y humedad dentro de rangos óptimos.

Fuente: Elaboración propia

A.1.1.1. Utilización de tecnologías avanzadas de control

Las tecnologías avanzadas de control, como los sistemas de control adaptativo, pueden mejorar la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración y reducir las emisiones de CO₂ asociadas [27].

Los sistemas de control adaptativo permiten monitorear y ajustar de manera automática los parámetros de operación de los sistemas de refrigeración, optimizando su funcionamiento en tiempo real. Estos sistemas utilizan algoritmos y sensores avanzados para detectar y responder a cambios en las condiciones ambientales y de carga, ajustando de forma precisa la demanda de energía y evitando el consumo innecesario.

A.1.1.2. Utilización de tecnologías de control inteligente

La inteligencia artificial y las tecnologías de control inteligente basadas en el aprendizaje automático pueden utilizarse para optimizar el rendimiento de los sistemas de refrigeración y reducir el consumo de energía y, en consecuencia, las emisiones de CO₂. [28]

La inteligencia artificial y el aprendizaje automático permiten a los sistemas de refrigeración adaptarse y aprender de forma autónoma a partir de datos históricos y en tiempo real. Estas tecnologías avanzadas pueden analizar patrones, identificar oportunidades de mejora y ajustar de manera óptima los parámetros de funcionamiento en función de las condiciones ambientales y de carga.

Al emplear tecnologías de control inteligente, los sistemas de refrigeración pueden ajustar dinámicamente la demanda de energía, optimizar la eficiencia operativa y minimizar los desperdicios. Esto se traduce en un menor consumo de energía y, en última instancia, en una reducción considerable de las emisiones de CO₂ asociadas a las operaciones de refrigeración industrial.

Además, la inteligencia artificial y el aprendizaje automático también permiten la detección temprana de anomalías y la anticipación de fallos en los sistemas de refrigeración, lo que ayuda a prevenir costosas interrupciones y a mejorar la confiabilidad y el mantenimiento de los equipos.

A.1.1.3. Optimización del control de temperatura y humedad

La optimización del control de temperatura y humedad en los sistemas de refrigeración puede reducir el consumo de energía y, por lo tanto, las emisiones de CO₂ asociadas. [29]

Un control preciso de la temperatura y la humedad permite evitar el funcionamiento innecesario de los equipos de refrigeración, evitando así un consumo excesivo de energía. Al mantener las condiciones de temperatura y humedad dentro de los rangos óptimos requeridos para los procesos industriales, se evita el desperdicio de energía y se optimiza la eficiencia de los sistemas de refrigeración. La optimización del control de temperatura y humedad también contribuye a minimizar la formación de condensación y la acumulación de humedad en los equipos y las

instalaciones. Esto no solo ayuda a reducir el consumo energético, sino que también previene problemas de corrosión y deterioro de los equipos, prolongando su vida útil y reduciendo la necesidad de mantenimiento.

A.1.2. Medidas asociadas al uso de refrigerantes

La adopción de medidas asociadas al uso de refrigerantes naturales representa una oportunidad clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la industria de la refrigeración. Estos refrigerantes ofrecen una opción más sostenible y respetuosa con el medio ambiente, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y a la protección de nuestro planeta.

La utilización de estos refrigerantes naturales en lugar de los refrigerantes sintéticos convencionales permite reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la industria de la refrigeración. Sin embargo, es importante resaltar que su uso seguro y adecuado requiere capacitación especializada y el cumplimiento de normas y regulaciones específicas para garantizar la seguridad de los trabajadores y del entorno.

A.1.2.1 Utilización de refrigerantes naturales

La huella de carbono de la industria de la refrigeración puede reducirse en gran medida mediante el uso de refrigerantes naturales como el amoníaco, el dióxido de carbono y el hidrocarburo de propeno. Comparados con los refrigerantes sintéticos convencionales, tienen un potencial nulo o mínimo de calentamiento global. Además, su uso puede hacer que los sistemas de refrigeración sean más eficientes desde el punto de vista energético.

El UNEP presenta en este informe un análisis exhaustivo de los refrigerantes naturales y su contribución a la reducción de la huella de carbono de la industria de la refrigeración. Se examina la utilidad de varios refrigerantes naturales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la eficiencia energética, entre ellos el amoníaco, el dióxido de carbono y los hidrocarburos. Además, el documento ofrece estudios de casos que ilustran el buen funcionamiento de los refrigerantes naturales en diversas aplicaciones de refrigeración y climatización., y presenta recomendaciones para su adopción y uso efectivo en la industria de refrigeración. [30]

Utilización de refrigerantes naturales

- Amoníaco, dióxido de carbono e hidrocarburo propeno

Utilización de refrigerantes naturales de bajo impacto ambiental

- R-744, propano y el butano

Uso de refrigerantes naturales R717, R290 y R744

- R-744, R-290, R717

Fuente: Elaboración propia

A.1.2.2. Utilización de refrigerantes naturales de bajo impacto ambiental

La utilización de refrigerantes naturales de bajo impacto ambiental es una medida fundamental en la mitigación del CO₂ en la industria de la refrigeración. Estos refrigerantes naturales, como el dióxido de carbono (CO₂) y los hidrocarburos (HC), ofrecen una alternativa más sostenible y respetuosa con el medio ambiente en comparación con los refrigerantes sintéticos tradicionales [31].

Los refrigerantes naturales son sustancias que se encuentran de forma natural en el entorno y tienen propiedades refrigerantes adecuadas para su uso en sistemas de refrigeración. El dióxido de carbono (CO₂) es un ejemplo de refrigerante natural ampliamente utilizado, conocido como R-744. Los hidrocarburos (HC), como el propano y el butano, también son opciones comunes como refrigerantes naturales.

La ventaja clave de los refrigerantes naturales es que tienen un impacto mínimo en el agotamiento del ozono y un bajo potencial de calentamiento global en comparación con los refrigerantes sintéticos convencionales, como los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC). Esto significa que, al utilizar refrigerantes naturales, se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y se contribuye a la mitigación del cambio climático.

A.1.2.3. Uso de refrigerantes naturales R717, R290 y R744

El uso de refrigerantes naturales, como el amoníaco, el propano y el dióxido de carbono (CO_2), es una opción cada vez más popular como alternativa ecológica a los refrigerantes sintéticos convencionales en la industria de la refrigeración y el aire acondicionado. Estos refrigerantes naturales ofrecen numerosos beneficios en términos de sostenibilidad y reducción de las emisiones de GEI.

El dióxido de carbono (CO_2), también conocido como R-744, es un refrigerante natural ampliamente utilizado debido a sus propiedades favorables para la refrigeración. A diferencia de los refrigerantes sintéticos, el CO_2 no contribuye al agotamiento de la capa de ozono y tiene un impacto de calentamiento global mucho menor. Además, el CO_2 es un subproducto natural de muchos procesos industriales, lo que lo convierte en una opción atractiva desde el punto de vista medioambiental.

El hidrocarburo propano (R290) es otro refrigerante natural que ha ganado popularidad en la industria de la refrigeración. Es un compuesto orgánico que tiene un impacto de calentamiento global insignificante y un bajo potencial de agotamiento del ozono. El propano se utiliza en sistemas de refrigeración y aire acondicionado, ofreciendo un rendimiento eficiente y una reducción significativa en las emisiones de CO_2 [32].

El amoníaco (NH_3) es un refrigerante natural ampliamente reconocido por su eficiencia y bajo impacto ambiental. Tiene un potencial de calentamiento global prácticamente nulo y no contribuye al agotamiento de la capa de ozono. Además, el amoníaco es altamente eficiente en términos de transferencia de calor, lo que lo convierte en una opción atractiva para aplicaciones de refrigeración industrial y comercial.

Al utilizar refrigerantes naturales como el amoníaco, el propano y el dióxido de carbono, se logra reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la industria de la refrigeración. Estos refrigerantes ofrecen una alternativa más ecológica y sostenible, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y a la protección del medio ambiente. Sin embargo, es importante destacar que el uso seguro y adecuado de estos refrigerantes naturales

requiere una capacitación especializada y el cumplimiento de normas y regulaciones específicas para garantizar la seguridad tanto de los trabajadores como del entorno (Rademacher & Klein, 2018).

A.1.3. Medidas asociadas al calor

La implementación de medidas asociadas al calor en los sistemas de refrigeración juega un papel crucial en la reducción del consumo de energía y las emisiones de CO₂ en diversos sectores. La recuperación de calor es una estrategia efectiva que busca aprovechar el calor generado por los sistemas de refrigeración y utilizarlo para otros propósitos, como el calentamiento del agua o del aire. Esto tiene un impacto significativo en la reducción de la cantidad de energía necesaria para calentar estos elementos, lo que a su vez conlleva una disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Recuperación de calor

- Capturar calor residual y canalizarlo hacia aplicaciones útiles

Recuperación de calor residual

- Utilización de intercambiadores de calor

Utilización de sistemas de recuperación de calor

- Capturar y reutilizar el calor residual

Fuente: Elaboración propia

A.1.3.1. Recuperación de calor

La recuperación de calor en los sistemas de refrigeración puede ayudar a reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂ al aprovechar el calor generado por el sistema para otros fines, como el calentamiento del agua o del aire. Esto puede reducir la cantidad de energía necesaria para calentar el agua o el aire y, por lo tanto, disminuir la emisión de gases de efecto invernadero. [33]

La recuperación de calor es una estrategia eficiente y sostenible que puede aplicarse en los sistemas de refrigeración para aprovechar el calor residual y utilizarlo en otros procesos, lo que conduce a una reducción significativa en el consumo de energía y las emisiones de CO₂. Esta

práctica se basa en la idea de que el calor generado por el sistema de refrigeración no debe ser considerado como un desperdicio, sino como una valiosa fuente de energía térmica que puede ser reutilizada de manera provechosa.

Cuando los sistemas de refrigeración operan, se produce una transferencia de calor desde el entorno hacia el sistema, permitiendo mantener bajas temperaturas en el espacio o equipo refrigerado. Sin embargo, durante este proceso, se genera calor residual que normalmente se disipa al medio ambiente. La recuperación de calor busca capturar este calor residual y canalizarlo hacia aplicaciones útiles, como el calentamiento de agua o aire.

A.1.3.2. Recuperación de calor residual

La recuperación de calor residual de los sistemas de refrigeración puede utilizarse para calentar otros procesos, lo que puede reducir la necesidad de energía adicional y, por lo tanto, las emisiones de CO₂ asociadas [34].

La recuperación de calor residual es una medida eficiente y sostenible que se puede implementar en los sistemas de refrigeración para aprovechar el calor residual generado durante el proceso de enfriamiento. En lugar de desperdiciar este calor y disiparlo en el entorno, se puede capturar y utilizar para calentar otros procesos, lo que ofrece numerosos beneficios.

El calor residual se refiere al calor que se genera como subproducto durante el funcionamiento de los sistemas de refrigeración. En muchos casos, este calor se desecha y se considera una pérdida de energía. Sin embargo, mediante la implementación de sistemas de recuperación de calor residual, es posible canalizar este calor hacia otras aplicaciones que requieren calor, como sistemas de calefacción, agua caliente sanitaria o procesos industriales.

La clave para la recuperación de calor residual reside en la utilización de intercambiadores de calor, que son dispositivos diseñados para transferir eficientemente el calor de un fluido a otro sin mezclarlos. Estos intercambiadores capturan el calor residual del sistema de refrigeración, transfiriéndolo al fluido que se utilizará en otro proceso. De esta manera, se puede aprovechar el calor que de otra manera se perdería, reduciendo la necesidad de energía adicional para calentar los procesos y, en consecuencia, disminuyendo las emisiones de CO₂ asociadas.

La recuperación de calor residual tiene una serie de ventajas significativas. En primer lugar, ayuda a optimizar la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración al utilizar el calor que se produce de forma natural. Esto conduce a un menor consumo de energía y a una reducción en los costos operativos. Además, al reducir la necesidad de energía adicional para calentar otros procesos, se disminuye la dependencia de fuentes de energía convencionales y se promueve el uso de fuentes de energía más limpias y sostenibles.

Asimismo, la recuperación de calor residual contribuye a la reducción de las emisiones de CO₂ y al impacto ambiental asociado con la generación de energía. Al utilizar eficientemente el calor residual, se evita la necesidad de quemar combustibles adicionales para calentar los procesos, lo que se traduce en una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente el CO₂, principal responsable del cambio climático.

A.1.3.3. Utilización de sistemas de recuperación de calor

Los sistemas de recuperación de calor pueden utilizarse para recuperar la energía térmica generada durante el proceso de refrigeración y utilizarla para otros fines, lo que puede reducir la necesidad de energía adicional y, por lo tanto, las emisiones de CO₂ asociadas. [29].

La utilización de sistemas de recuperación de calor es una estrategia efectiva para aprovechar la energía térmica que se genera durante el proceso de refrigeración y utilizarla de manera productiva en otros procesos. Estos sistemas, diseñados específicamente para capturar y reutilizar el calor residual, ofrecen una solución eficiente y sostenible que puede contribuir significativamente a la reducción de la demanda de energía adicional y, como resultado, a la disminución de las emisiones de CO₂ asociadas.

Durante el proceso de refrigeración, los sistemas de refrigeración absorben el calor de su entorno y lo transfieren hacia un medio refrigerante, lo que permite mantener temperaturas bajas en el espacio o el equipo que se está enfriando. Sin embargo, este proceso no es completamente eficiente y se genera una cantidad considerable de calor residual que normalmente se desperdicia.

Los sistemas de recuperación de calor están diseñados para interceptar este calor residual y canalizarlo hacia otros fines útiles. Utilizan tecnologías como intercambiadores de calor, que

permiten transferir el calor desde el sistema de refrigeración hacia otros fluidos o procesos que requieren calor. De esta manera, el calor que de otro modo se perdería se convierte en una fuente valiosa de energía térmica para su uso en calefacción de agua, calentamiento de espacios, procesos industriales u otras aplicaciones que requieren calor.

La utilización de sistemas de recuperación de calor proporciona una serie de beneficios importantes. En primer lugar, permite aprovechar una fuente de energía que de otro modo se desperdiciaría, lo que conduce a una mayor eficiencia energética y ahorro de recursos. Al reutilizar el calor residual, se reduce la necesidad de consumir energía adicional para calentar agua u otros procesos térmicos, lo que a su vez disminuye las emisiones de CO₂ generadas por la producción y el consumo de energía.

A.1.4. Medidas asociadas al mantenimiento

El mantenimiento adecuado de los sistemas de refrigeración desempeña un papel fundamental en la mejora de la eficiencia energética y la reducción de las emisiones de CO₂ asociadas. La optimización del mantenimiento garantiza que estos sistemas funcionen de manera eficiente, evitando el desperdicio de energía y promoviendo un uso más sostenible de los recursos.

Una medida clave en la optimización del mantenimiento es llevar a cabo tareas regulares, como la limpieza de las bobinas del condensador y la verificación de la carga de refrigerante. Estas acciones aseguran que los sistemas de refrigeración operen de manera óptima, evitando obstrucciones que puedan comprometer su funcionamiento eficiente. Al garantizar que los componentes estén limpios y en buen estado, se reduce la resistencia al flujo de aire y se minimiza la necesidad de consumir más energía de la necesaria. Es igualmente importante proporcionar un servicio adecuado a los equipos de refrigeración. Esto implica realizar revisiones periódicas y ajustes necesarios para mantener su rendimiento óptimo y prolongar su vida útil. Al maximizar la eficiencia de los equipos existentes, se reduce la necesidad de producir y desechar nuevos equipos, lo que a su vez disminuye las emisiones de CO₂ asociadas con su fabricación y eliminación.

Optimización del mantenimiento

- Mejorando la eficiencia energética y reduciendo las emisiones de CO₂,

Mantenimiento y servicio de equipos

- Prolongando la vida útil y reduciendo las emisiones de CO₂ asociadas

Fuente: Elaboración propia

A.1.4.1. Optimización del mantenimiento

La optimización del mantenimiento de los sistemas de refrigeración puede mejorar su eficiencia energética y reducir las emisiones de CO₂. El mantenimiento regular y adecuado de los sistemas de refrigeración, incluyendo la limpieza de las bobinas del condensador y la verificación de la carga de refrigerante, puede garantizar que funcionen de manera eficiente y eviten el desperdicio de energía [36].

La optimización del mantenimiento de los sistemas de refrigeración es fundamental para garantizar su eficiencia energética y contribuir a la reducción de las emisiones de CO₂. Un mantenimiento regular y adecuado de estos sistemas puede marcar la diferencia en términos de su rendimiento y consumo energético. Al implementar prácticas de mantenimiento óptimas, como la limpieza de las bobinas del condensador y la verificación de la carga de refrigerante, se asegura que los sistemas de refrigeración funcionen de manera eficiente y eviten el desperdicio de energía innecesario.

La limpieza regular de las bobinas del condensador es esencial para mantener el buen funcionamiento de los sistemas de refrigeración. Con el tiempo, las bobinas pueden acumular suciedad y polvo, lo que reduce su capacidad de intercambio de calor y disminuye la eficiencia del sistema. Al limpiar las bobinas de manera periódica, se eliminan los obstáculos que impiden una transferencia de calor efectiva, lo que permite que el sistema funcione de manera más eficiente y reduzca su consumo de energía. Además, una bobina limpia ayuda a evitar la necesidad de un mayor esfuerzo del compresor, lo que puede prolongar la vida útil del equipo y reducir los costos asociados con reparaciones o reemplazos prematuros.

Otra medida importante para optimizar el mantenimiento es verificar regularmente la carga de refrigerante de los sistemas. Un nivel inadecuado de refrigerante puede afectar negativamente el

rendimiento y la eficiencia del sistema de refrigeración, lo que puede resultar en un mayor consumo de energía y mayores emisiones de CO₂. La carga de refrigerante debe estar dentro de los rangos recomendados por el fabricante para asegurar un funcionamiento óptimo. Si se detecta una carga insuficiente o excesiva de refrigerante, es necesario corregirlo de inmediato para evitar pérdidas de eficiencia y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

A.1.4.2. Mantenimiento y servicio de equipos

Un mantenimiento adecuado y un servicio regular de los equipos de refrigeración pueden mejorar su eficiencia energética y prolongar su vida útil, lo que puede reducir las emisiones de CO₂ asociadas con la producción y eliminación de equipos nuevos. [37]

La optimización del mantenimiento, un servicio adecuado y regular de los equipos de refrigeración es esencial para mejorar su eficiencia energética y prolongar su vida útil. El mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos no solo contribuye a su rendimiento óptimo, sino que también ayuda a reducir las emisiones de CO₂ asociadas con la producción y eliminación de equipos nuevos.

El mantenimiento adecuado incluye la revisión y limpieza de componentes clave, como los evaporadores, compresores y condensadores, así como la verificación de las conexiones eléctricas y mecánicas. Estas actividades de mantenimiento garantizan un funcionamiento eficiente y confiable de los equipos de refrigeración, lo que resulta en un menor consumo de energía y, en consecuencia, en una disminución de las emisiones de CO₂. Al realizar un mantenimiento adecuado, también se pueden identificar y corregir posibles problemas antes de que se conviertan en fallas mayores, lo que ayuda a evitar tiempos de inactividad innecesarios y la necesidad de reemplazar los equipos prematuramente.

Un servicio regular de los equipos de refrigeración, realizado por personal capacitado y especializado, contribuye a su eficiencia y vida útil. Este servicio puede incluir la calibración de los controles, la verificación del funcionamiento de los sensores y el monitoreo del rendimiento general del sistema. Al realizar un servicio regular, se pueden detectar y corregir problemas

potenciales, como fugas de refrigerante o componentes desgastados, antes de que causen un deterioro significativo en la eficiencia energética del sistema.

A.1.4.3. Medidas asociadas al uso de tecnología avanzada

La adopción de tecnologías avanzadas desempeña un papel fundamental en la mejora de la eficiencia energética y la reducción de las emisiones de CO₂ en los sistemas de refrigeración. Estas medidas se centran en el uso de tecnologías innovadoras y en el desarrollo de materiales que permitan un funcionamiento más eficiente y sostenible.

Utilización de tecnologías avanzadas

- Electrónica de potencia, tecnología de compresores de velocidad variable y recuperación de energía.

Desarrollo de materiales y tecnologías avanzadas

- Materiales de cambio de fase y sistemas de enfriamiento termoeléctrico.

Fuente: Elaboración propia

A.1.5. Utilización de tecnologías avanzadas

La utilización de tecnologías avanzadas como la electrónica de potencia, la tecnología de compresores de velocidad variable y la recuperación de energía pueden mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de CO₂ en los sistemas de refrigeración. Estas tecnologías pueden reducir el consumo de energía y la emisión de gases de efecto invernadero al controlar la velocidad de los compresores y optimizar el uso de la energía [38].

A.1.5.1. Desarrollo de materiales y tecnologías avanzadas

El desarrollo de materiales y tecnologías avanzadas, como materiales de cambio de fase y sistemas de enfriamiento termoeléctrico, puede mejorar la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración y reducir las emisiones de CO₂ asociadas [39].

A.1.6. Medidas asociadas al uso de equipos

La implementación de medidas asociadas a los equipos de refrigeración es fundamental para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de CO₂ en este sector. Estas medidas se

enfocan en la utilización de equipos de alta eficiencia energética, la mejora de la eficiencia de los equipos existentes y el fortalecimiento del aislamiento térmico.

Utilización de equipos de refrigeración de alta eficiencia energética

- Menos energía eléctrica para proporcionar la misma cantidad de enfriamiento

Mejora de la eficiencia energética de los equipos de refrigeración

- Reducir consumo de energía

Mejora del aislamiento térmico de los equipos de refrigeración

- Reducción de pérdidas de energía

Fuente: Elaboración propia

A.1.6.1. Utilización de equipos de refrigeración de alta eficiencia energética

Los equipos de refrigeración de alta eficiencia energética utilizan menos energía eléctrica para proporcionar la misma cantidad de enfriamiento, lo que reduce las emisiones de CO₂ asociadas [28].

Los equipos de refrigeración de alta eficiencia energética son una solución clave para reducir las emisiones de CO₂ asociadas con el enfriamiento. Estos equipos utilizan tecnologías avanzadas y diseños optimizados que les permiten proporcionar la misma cantidad de enfriamiento con un consumo de energía eléctrica significativamente menor en comparación con los equipos convencionales.

Al utilizar equipos de refrigeración de alta eficiencia energética, se logra un rendimiento óptimo con un consumo de energía reducido. Esto se traduce en una disminución directa de las emisiones de CO₂, ya que se requiere menos energía para el funcionamiento de los equipos. Estos sistemas incorporan compresores, motores y componentes de alta eficiencia, así como sistemas de control avanzados que minimizan el consumo energético durante el enfriamiento. Además, el uso de tecnologías como la recuperación de calor residual y la optimización de los ciclos de refrigeración contribuyen aún más a la eficiencia energética y a la reducción de las emisiones.

A.1.6.2. Mejora de la eficiencia energética de los equipos de refrigeración

La mejora de la eficiencia energética de los equipos de refrigeración puede reducir el consumo de energía y, por lo tanto, las emisiones de CO₂ asociadas [40].

La mejora de la eficiencia energética de los equipos de refrigeración desempeña un papel crucial en la reducción de las emisiones de CO₂ y en la búsqueda de una mayor sostenibilidad. Esta mejora implica la adopción de diversas medidas y tecnologías que buscan optimizar el rendimiento y minimizar el consumo de energía de los sistemas de refrigeración.

Uno de los enfoques clave para mejorar la eficiencia energética es la optimización de los componentes y sistemas del equipo de refrigeración. Esto implica la selección de compresores y motores eficientes, el uso de intercambiadores de calor de alta eficiencia y la implementación de sistemas de control avanzados que regulen el funcionamiento del equipo de manera óptima. Además, el uso de tecnologías de variación de velocidad y ciclos de refrigeración optimizados permite adaptar la capacidad de refrigeración según la demanda, lo que evita el funcionamiento innecesario del equipo y reduce el consumo energético.

A.1.6.3. Mejora del aislamiento térmico de los equipos de refrigeración

La mejora del aislamiento térmico de los equipos de refrigeración puede reducir las pérdidas de energía y, por lo tanto, las emisiones de CO₂ asociadas [41].

Un aislamiento térmico eficiente evita que el calor del entorno ingrese al interior del equipo, lo que minimiza la necesidad de enfriamiento adicional y reduce el consumo energético.

La incorporación de materiales aislantes de alta calidad y diseños de sellado adecuados son elementos clave para mejorar el aislamiento térmico de los equipos de refrigeración. Al reducir las fugas de calor y mantener la temperatura interior de manera más constante, se disminuye la

carga de trabajo del sistema de refrigeración, lo que se traduce en un menor consumo de energía y una reducción en las emisiones de CO₂.

A.1.7. Medidas asociadas a la energía solar

El uso de energía solar como fuente renovable se presenta como una medida clave para reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂ en los sistemas de refrigeración. La utilización de paneles solares para generar energía limpia y sostenible ofrece múltiples beneficios en términos de mitigación del cambio climático y promoción de la sostenibilidad.

Utilización de paneles solares

- Instalación de paneles solares en techos

Utilización de energía solar

- Uso de energía solar para generación de sistemas de refrigeración

Fuente: Elaboración propia

A.1.7.1. Utilización de paneles solares

La utilización de paneles solares como fuente de energía renovable es una estrategia efectiva para reducir las emisiones de CO₂ en los sistemas de refrigeración. Los paneles solares convierten la radiación solar en electricidad, lo que proporciona una fuente limpia y sostenible de energía para alimentar los sistemas de refrigeración.

Al instalar paneles solares en los techos de los edificios o en áreas cercanas, se puede aprovechar la luz solar disponible y convertirla en electricidad para alimentar los sistemas de refrigeración. Esto reduce la dependencia de la red eléctrica convencional, que a menudo se basa en fuentes de energía no renovables, y disminuye las emisiones de CO₂ asociadas con la generación de electricidad.

La generación de electricidad, la energía solar también puede utilizarse para generar calor útil para los sistemas de refrigeración. Mediante el uso de colectores solares térmicos, se captura el calor solar y se utiliza para calentar el agua o el aire requerido en los procesos de refrigeración. Esto reduce aún más la necesidad de energía convencional y, por lo tanto, disminuye las emisiones de CO₂ [42].

A.1.7.2. Utilización de energía solar

La energía solar ofrece un enfoque sostenible y respetuoso con el medio ambiente para la refrigeración, al permitir la generación de electricidad y calor utilizando una fuente renovable e inagotable: el sol. Al aprovechar esta energía limpia, se reduce la dependencia de combustibles fósiles y se disminuyen las emisiones de CO₂, contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

La generación de electricidad mediante energía solar fotovoltaica proporciona una forma eficiente y rentable de alimentar los sistemas de refrigeración. Los paneles solares convierten la luz solar en electricidad de corriente continua, que luego puede ser transformada en corriente alterna para alimentar los equipos de refrigeración. Este enfoque reduce la demanda de energía de la red eléctrica convencional, que a menudo se basa en fuentes no renovables, y disminuye las emisiones de CO₂ generadas por la generación de electricidad.

Por otro lado, la utilización de la energía solar térmica para la refrigeración implica el uso de colectores solares que capturan el calor solar y lo transfieren al sistema de refrigeración. Este calor puede ser utilizado para alimentar los ciclos de refrigeración, reduciendo así la necesidad de energía convencional y las emisiones de CO₂ asociadas [43].

A.1.8. Medidas asociadas a materiales y edificación

En la búsqueda de soluciones sostenibles y amigables con el medio ambiente, se han desarrollado medidas asociadas a los materiales de construcción y al diseño de edificios para mejorar su eficiencia energética. Estas medidas buscan reducir el consumo de energía necesario para enfriar los edificios y, como resultado, disminuir las emisiones de CO₂.

A.1.8.1. Utilización de materiales de construcción de alta eficiencia energética

La utilización de materiales de construcción de alta eficiencia energética es una estrategia clave para reducir las emisiones de CO₂ en los edificios. Al incorporar vidrios de baja emisividad y aislamiento térmico avanzado en la estructura de los edificios, se puede minimizar la

transferencia de calor a través de las paredes, techos y ventanas, lo que resulta en una reducción significativa en la carga de enfriamiento requerida. Estos materiales de construcción mejorados actúan como barreras eficaces para mantener la temperatura interior y reducir la dependencia de los sistemas de refrigeración, lo que a su vez disminuye las emisiones de CO₂ asociadas con el consumo de energía [44].

A.1.8.2. Diseño de edificios eficientes

El diseño de edificios eficientes desde el punto de vista energético es esencial para mitigar las emisiones de CO₂ y optimizar el rendimiento de los sistemas de refrigeración. Al adoptar un enfoque integral en el diseño arquitectónico, se pueden implementar estrategias que reduzcan la carga de enfriamiento, como la orientación adecuada del edificio para maximizar la luz solar natural y minimizar la ganancia de calor, la incorporación de sistemas de sombreado eficientes y la ventilación natural para mejorar la circulación del aire.

El uso de tecnologías avanzadas de control y gestión del edificio, como sistemas de automatización y monitoreo, permite optimizar el funcionamiento de los sistemas de refrigeración en respuesta a las condiciones climáticas cambiantes y a las necesidades de los ocupantes. Esto garantiza un uso eficiente de la energía y contribuye a la reducción de las emisiones de CO₂ [45].

A.1.9 Medidas asociadas a la gestión de energía

En la búsqueda de soluciones que promuevan la eficiencia energética y la reducción de emisiones de CO₂, se han implementado diversas medidas asociadas a la gestión de la energía en los sistemas de refrigeración. Estas medidas se centran en la implementación de programas y sistemas que permiten monitorear, controlar y mejorar el consumo de energía de manera eficiente.

Implementación de programas de gestión de la energía

- Monitorización del consumo de energía, identificación de áreas de mejora e implementación de medidas de eficiencia energética

Implementación de sistemas de gestión de energía

- Monitoreo y control del consumo de energía en los sistemas de refrigeración

Fuente: Elaboración propia

A.1.9.1. Implementación de programas de gestión de la energía

La implementación de programas de gestión de la energía se presenta como una solución efectiva para mejorar la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración y reducir las emisiones de CO₂. Estos programas se centran en la monitorización del consumo de energía de los sistemas de refrigeración, lo que permite identificar áreas de mejora y tomar medidas concretas para optimizar su rendimiento.

Mediante la monitorización continua del consumo de energía, es posible identificar patrones de uso ineficiente, detectar desviaciones y establecer objetivos de eficiencia energética. Los datos recopilados proporcionan información valiosa para evaluar el rendimiento de los sistemas de refrigeración y diseñar estrategias de mejora específicas. Estas medidas pueden incluir la optimización de la configuración de los equipos, la implementación de controles inteligentes y el uso de tecnologías avanzadas de gestión de energía [46].

A.1.9.2. Implementación de sistemas de gestión de energía

Los sistemas de gestión de energía desempeñan un papel crucial en la mejora de la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración. Estos sistemas permiten monitorear y controlar de manera precisa el consumo de energía, así como ajustar y optimizar el funcionamiento de los equipos en tiempo real.

Los sistemas de gestión energética recopilan datos en tiempo real sobre el rendimiento de los sistemas de refrigeración, incluidos elementos como la temperatura, la presión y el caudal, utilizando una sofisticada tecnología de supervisión y control. Al analizar estos datos y utilizarlos para orientar las decisiones y modificar los parámetros de funcionamiento de los equipos, se garantiza el mejor rendimiento y la mayor eficiencia energética.

Gracias a los sistemas de gestión de la energía pueden aplicarse técnicas de demanda y respuesta, como horarios de funcionamiento, control de la carga e integración con fuentes de energía

renovables. Estos esfuerzos contribuyen a reducir el consumo de energía y, en consecuencia, las emisiones de CO₂ asociadas a los sistemas de refrigeración [47].

A.1.10 Medidas asociadas a la implementación de sistemas

En la búsqueda de soluciones que promuevan la eficiencia energética y la reducción de emisiones de CO₂ en los sistemas de refrigeración, se han desarrollado diversas medidas asociadas a la implementación de sistemas avanzados y sostenibles. Estas medidas se centran en el diseño y utilización de tecnologías innovadoras que permiten reducir significativamente el consumo de energía y las emisiones de CO₂.

Diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia

- Recuperación de calor, tecnología de compresores de velocidad variable y control automatizado

Utilización de sistemas de cogeneración

- Producción simultánea de electricidad y calor útil a partir de una misma fuente de energía

Implementación de sistemas de enfriamiento evaporativo

- Utilizar agua para enfriar el aire

Implementación de sistemas de refrigeración descentralizados

- Reducir la distancia entre la fuente de refrigeración y el punto de uso

Utilización de energía renovable para alimentar los sistemas de refrigeración

- Uso de energía solar o eólica

Utilización de técnicas de refrigeración adiabática

- Reducción de energía adicional

Uso de sistemas de refrigeración adiabática

- Utilización de la evaporación de agua para enfriar el aire, lo que reduce la necesidad de energía eléctrica

Implementación de sistemas de enfriamiento de adsorción

- Utilización de materiales adsorbentes para enfriar el aire

Fuente: Elaboración propia

A.1.10.1. Diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia

El diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia juega un papel fundamental en la reducción del consumo de energía y las emisiones de CO₂. Al implementar tecnologías y estrategias avanzadas, es posible optimizar el rendimiento de los sistemas de refrigeración y

minimizar su impacto ambiental. La incorporación de características como la recuperación de calor, la tecnología de compresores de velocidad variable y el control automatizado permite maximizar la eficiencia energética de estos sistemas.

La recuperación de calor es una técnica que aprovecha el calor residual generado durante el proceso de refrigeración para otros fines útiles, como el calentamiento del agua o del aire. Al utilizar este calor residual, se evita el desperdicio de energía y se reduce la necesidad de utilizar combustibles adicionales para satisfacer las demandas de calefacción. Esto conduce a una disminución significativa en las emisiones de CO₂ y a un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos.

Además, la tecnología de compresores de velocidad variable permite adaptar la capacidad de los sistemas de refrigeración según las necesidades reales de enfriamiento, lo que evita el funcionamiento innecesario a plena carga y mejora la eficiencia energética. Estos compresores ajustan su velocidad de operación en función de la carga térmica requerida, lo que permite un funcionamiento más preciso y eficiente, reduciendo así el consumo de energía y las emisiones de CO₂.

El control automatizado de los sistemas de refrigeración también desempeña un papel clave en la eficiencia energética. Mediante la utilización de sensores y algoritmos inteligentes, se puede monitorear y controlar de manera precisa los parámetros operativos de los sistemas de refrigeración, como la temperatura y la presión. Esto garantiza un funcionamiento óptimo en todo momento, evitando condiciones de operación ineficientes y reduciendo el consumo energético [48].

A.1.10.2. Utilización de sistemas de cogeneración

La cogeneración es una solución eficiente que permite la producción simultánea de electricidad y calor útil a partir de una misma fuente de energía. Al utilizar sistemas de cogeneración en los procesos de refrigeración, se puede mejorar significativamente la eficiencia energética y reducir las emisiones de CO₂ asociadas.

Se basa en el principio de aprovechar el calor residual generado durante la producción de electricidad para usos térmicos, como la generación de vapor o agua caliente. Al utilizar este calor residual para las necesidades de calentamiento de los sistemas de refrigeración, se evita la generación adicional de calor mediante combustibles fósiles, lo que reduce la demanda de energía y las emisiones de CO₂.

Los sistemas de cogeneración pueden ser especialmente beneficiosos en aplicaciones donde se requiere tanto refrigeración como calor, como en instalaciones industriales o comerciales. Al integrar la producción de electricidad y calor en un solo sistema, se evita la duplicación de equipos y se mejora la eficiencia global del sistema.

Es importante destacar que la elección adecuada de la fuente de energía utilizada en los sistemas de cogeneración también juega un papel crucial en la reducción de las emisiones de CO₂. La utilización de fuentes de energía renovable, como la energía solar o la biomasa, en combinación con la cogeneración, puede contribuir aún más a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la transición hacia un sistema energético más sostenible. [49]

A.1.10.3. Implementación de sistemas de enfriamiento evaporativo

Los sistemas de enfriamiento evaporativo se han convertido en una opción cada vez más popular para reducir la carga de refrigeración necesaria y disminuir las emisiones de CO₂ asociadas. Estos sistemas aprovechan el principio básico de la evaporación del agua para enfriar el aire de manera eficiente y sostenible.

En este, el agua se evapora al entrar en contacto con el aire caliente, lo que provoca una disminución significativa de la temperatura del aire. Este proceso de evaporación requiere energía térmica, que se extrae del aire circundante, lo que resulta en un enfriamiento efectivo sin la necesidad de compresores o refrigerantes químicos.

Al implementar sistemas de enfriamiento evaporativo, se puede reducir considerablemente la carga de refrigeración necesaria en comparación con los sistemas de aire acondicionado convencionales. Esto se debe a que el enfriamiento se logra mediante el uso de agua y la evaporación, en lugar de depender únicamente de la compresión y condensación de refrigerantes.

Como resultado, se reduce la cantidad de energía eléctrica requerida para enfriar el aire, lo que a su vez reduce las emisiones de CO₂ y el impacto ambiental; también pueden proporcionar un entorno más saludable y confortable, ya que el aire enfriado por evaporación retiene la humedad necesaria para evitar la sequedad excesiva del ambiente, lo que puede beneficiar a las personas y a los procesos industriales [50].

A.1.10.4. Implementación de sistemas de refrigeración descentralizados

Los sistemas de refrigeración descentralizados han ganado popularidad como una solución eficiente para reducir las pérdidas de energía y las emisiones de CO₂ asociadas con el transporte de calor desde una fuente centralizada a los puntos de uso. Estos sistemas implican la instalación de unidades de refrigeración cerca de los puntos de demanda, lo que elimina la necesidad de transferir calor a través de largas distancias.

Al descentralizar los sistemas de refrigeración, se reducen las pérdidas de energía asociadas con el transporte de calor a través de tuberías o conductos extensos. Al tener unidades de refrigeración en lugares estratégicos cerca de donde se requiere el enfriamiento, se minimiza la pérdida de calor y se mejora la eficiencia del sistema en general.

Los sistemas de refrigeración descentralizados también ofrecen beneficios en términos de flexibilidad y control. Al tener unidades de refrigeración independientes en diferentes ubicaciones, es posible adaptar la capacidad de enfriamiento según las necesidades específicas de cada área o espacio. Esto permite un uso más eficiente de la energía y evita el desperdicio asociado con la operación de sistemas centralizados a plena carga, incluso cuando la demanda de enfriamiento es variable en diferentes zonas [51].

A.1.10.5. Utilización de energía renovable para alimentar los sistemas de refrigeración

Una forma viable y eficaz de reducir las emisiones de CO₂ es alimentar los sistemas de refrigeración con fuentes de energía renovables, como la solar o la eólica. La utilización de

recursos naturales limpios reduce la dependencia de los combustibles fósiles y la huella de carbono asociada a la producción de electricidad.

La energía solar se ha destacado como una opción prometedora en este contexto. Mediante la instalación de paneles solares fotovoltaicos, se puede generar electricidad a partir de la radiación solar y utilizarla directamente para alimentar los sistemas de refrigeración. Esto contribuye a reducir el consumo de energía proveniente de fuentes convencionales y, por lo tanto, las emisiones de CO₂ relacionadas [53].

Del mismo modo, la energía eólica ofrece otra alternativa viable. Aprovechando la fuerza del viento, los aerogeneradores pueden convertir la energía cinética en electricidad, que puede utilizarse para alimentar los sistemas de refrigeración de manera más sostenible. Al integrar la energía eólica en el suministro energético, se disminuye la demanda de energía convencional y se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero [52].

A.1.10.6. Utilización de técnicas de refrigeración adiabática

Las técnicas de refrigeración adiabática pueden utilizarse para reducir la temperatura de entrada del aire en los sistemas de refrigeración, lo que puede reducir la necesidad de energía adicional y, por lo tanto, las emisiones de CO₂ asociadas [54].

A.1.10.7. Uso de sistemas de refrigeración adiabática

Las técnicas de refrigeración adiabática son una solución eficiente para reducir la temperatura de entrada del aire en los sistemas de refrigeración y, por ende, reducir la necesidad de energía adicional y las emisiones de CO₂ asociadas.

En los sistemas de refrigeración adiabática, se aprovecha el principio de enfriamiento evaporativo para disminuir la temperatura del aire que ingresa al sistema. Mediante la pulverización de agua o la utilización de paneles de enfriamiento evaporativo, se logra enfriar el aire a través de la evaporación del agua, sin necesidad de compresores o refrigerantes químicos.

Esta técnica de enfriamiento adiabático permite reducir la carga de refrigeración necesaria, ya que el aire que ingresa al sistema ya está a una temperatura más baja. Como resultado, se reduce

el consumo de energía eléctrica y se disminuyen las emisiones de CO₂ relacionadas con la operación de los sistemas de refrigeración.

Además de su eficiencia energética, las técnicas de refrigeración adiabática también ofrecen ventajas en términos de confort y calidad del aire. Al introducir aire enfriado por evaporación, se puede mejorar el ambiente interior al mantener una humedad adecuada y evitar la sequedad excesiva que a menudo se asocia con los sistemas de refrigeración convencionales [55].

A.1.10.8. Implementación de sistemas de enfriamiento de adsorción

Los sistemas de enfriamiento de adsorción se presentan como una alternativa prometedora para reducir la necesidad de energía eléctrica en los procesos de refrigeración, lo que a su vez contribuye a la disminución de las emisiones de CO₂ asociadas. Estos sistemas aprovechan los principios de la adsorción para enfriar el aire de manera eficiente y sostenible.

En los sistemas de enfriamiento de adsorción, se utilizan materiales adsorbentes, como zeolitas o sílices porosas, que tienen la capacidad de retener moléculas de vapor de agua cuando se encuentran en un entorno húmedo y liberarlas cuando se exponen a condiciones más secas. Este proceso de adsorción y desorción se utiliza para generar un enfriamiento efectivo.

El ciclo de refrigeración de adsorción comienza con la etapa de adsorción, donde el material adsorbente absorbe el vapor de agua presente en el aire, lo que provoca una disminución de la temperatura. A continuación, se aplica calor al material adsorbente para liberar el vapor de agua adsorbido, lo que genera un enfriamiento adiabático del aire circundante. Este proceso se repite en un ciclo continuo para mantener la temperatura baja y lograr el enfriamiento deseado.

La implementación de sistemas de enfriamiento de adsorción ofrece varias ventajas significativas. En primer lugar, reduce la dependencia de la energía eléctrica, ya que no se requiere compresor ni consumo de energía para generar el enfriamiento. Esto se traduce en una disminución directa de las emisiones de CO₂, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y la reducción de la huella de carbono.

Estos sistemas son particularmente eficientes en regiones con altas temperaturas y baja humedad relativa, donde los sistemas de refrigeración convencionales pueden requerir un consumo de energía significativo para mantener una temperatura confortable. Al utilizar materiales adsorbentes adecuados y optimizar el diseño del sistema, es posible lograr un rendimiento óptimo incluso en condiciones ambientales desfavorables.

Cabe mencionar que la implementación de sistemas de enfriamiento de adsorción aún se encuentra en etapas de desarrollo y mejora continua. Se están realizando investigaciones y avances tecnológicos para mejorar la eficiencia de los materiales adsorbentes, reducir los costos de fabricación y optimizar los ciclos de enfriamiento. A medida que estos avances se materialicen, se espera una mayor adopción y aplicación de esta tecnología en diversos sectores, como la industria de la refrigeración comercial, la climatización de edificios y la refrigeración de procesos industriales [56].

A.1.11 Medidas de mitigación de CH₄ (metano)

La mitigación de las emisiones de metano (CH₄) en los sistemas de refrigeración es esencial para combatir el cambio climático y reducir el impacto ambiental de esta industria. Se han desarrollado diversas medidas que permiten abordar este desafío y minimizar las emisiones de metano asociadas.

Reducción de fugas de refrigerantes

- Implementación de prácticas de mantenimiento adecuadas y selección de refrigerantes con menor potencial de calentamiento global

Utilización de sistemas de recuperación de calor

- Capturar el calor generado por los sistemas de refrigeración y utilizarlo para otros fines, como la calefacción de edificios o la producción de agua caliente.

Implementación de tecnologías de refrigeración natural

- Refrigeración evaporativa o absorción.

Uso de sistemas de refrigeración alimentados por energía renovable

- Utilización de energías renovables, como la energía solar o eólica, para alimentar los sistemas de refrigeración

Fuente: Elaboración propia

A.1.11.1. Reducción de fugas de refrigerantes

La reducción de fugas de refrigerantes se ha convertido en un objetivo crucial para minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero en la industria de refrigeración. Las fugas de refrigerantes, especialmente aquellos que contienen hidrofluorocarbonos (HFC) y clorofluorocarbonos (CFC), son una fuente significativa de emisiones de metano (CH_4), un gas de efecto invernadero mucho más potente que el dióxido de carbono (CO_2).

Para abordar este problema, se requiere la implementación de prácticas de mantenimiento adecuadas en los sistemas de refrigeración. Esto implica realizar inspecciones periódicas, detectar y reparar fugas de manera oportuna, y garantizar una manipulación adecuada de los refrigerantes durante las operaciones de mantenimiento. Al llevar a cabo estas acciones, se puede reducir de manera significativa la cantidad de refrigerante que se escapa al medio ambiente y, por lo tanto, las emisiones de CH_4 asociadas.

La selección de refrigerantes con menor potencial de calentamiento global (PCG) también desempeña un papel fundamental en la reducción de fugas. Los refrigerantes de bajo PCG, como los hidrofluorolefinas (HFO) y los refrigerantes naturales como el amoníaco (NH_3) y el dióxido de carbono (CO_2), tienen una menor capacidad para contribuir al calentamiento global en comparación con los HFC y CFC. Al utilizar refrigerantes con menor PCG, se puede mitigar el impacto de las fugas y reducir las emisiones de CH_4 de manera significativa [57].

A.1.11.2. Utilización de sistemas de recuperación de calor

La utilización de sistemas de recuperación de calor es una estrategia efectiva para reducir las emisiones de metano (CH_4) asociadas con los sistemas de refrigeración. Estos sistemas tienen la capacidad de capturar el calor residual generado por los sistemas de refrigeración y utilizarlo de manera eficiente para otros fines, como la calefacción de edificios o la producción de agua caliente.

Cuando los sistemas de refrigeración operan, generan una cantidad considerable de calor que normalmente se disipa en el ambiente. Sin embargo, mediante la implementación de sistemas de recuperación de calor, es posible capturar ese calor y canalizarlo hacia aplicaciones útiles. Esto

reduce la necesidad de energía adicional para calentar agua o espacios, lo que a su vez reduce las emisiones de CH₄ asociadas con la generación de energía.

Los sistemas de recuperación de calor se pueden diseñar de diversas formas, como sistemas de intercambio de calor y sistemas de bomba de calor de absorción. Estos sistemas permiten aprovechar el calor residual del sistema de refrigeración y transferirlo a otros medios, como agua o aire, para su uso en aplicaciones de calefacción. Al hacerlo, se reduce la demanda de energía y se minimiza la emisión de CH₄ relacionada con la producción de calor adicional [58].

A.1.11.3. Implementación de tecnologías de refrigeración natural

La implementación de tecnologías de refrigeración natural ofrece una forma efectiva de reducir las emisiones de metano (CH₄) asociadas con los sistemas de refrigeración convencionales. Estas tecnologías aprovechan los principios de la naturaleza para lograr un enfriamiento eficiente sin depender en gran medida de compresores y refrigerantes sintéticos.

Una de las tecnologías más destacadas en este campo es la refrigeración evaporativa. Este método utiliza la evaporación del agua para enfriar el aire circundante. Al pasar el aire caliente a través de un medio húmedo, como almohadillas de enfriamiento o paneles evaporativos, el agua se evapora y extrae el calor del aire, reduciendo su temperatura. Este enfoque de enfriamiento natural puede ser especialmente beneficioso en áreas con climas cálidos y secos, ya que no solo proporciona un enfriamiento efectivo, sino que también consume menos energía en comparación con los sistemas de refrigeración convencionales. Al reducir la cantidad de energía requerida, se disminuye la necesidad de utilizar combustibles fósiles y, por lo tanto, se reducen las emisiones de CH₄.

Otra tecnología de refrigeración natural es la refrigeración por absorción. En lugar de utilizar compresores mecánicos, este método utiliza un proceso de absorción para eliminar el calor del espacio refrigerado. En general, implica la utilización de un par de líquidos, como el agua y un refrigerante absorbente, que interactúan en un ciclo de absorción. A medida que el refrigerante se evapora, absorbe calor del ambiente, y luego se condensa y se disuelve nuevamente en el líquido absorbente. La principal ventaja de esta tecnología es que puede ser alimentada por energía

térmica, lo que permite la integración con fuentes de energía renovable, como la energía solar o la biomasa. Al utilizar energías limpias y renovables para alimentar los sistemas de refrigeración, se reducen drásticamente las emisiones de CH₄ y se promueve la sostenibilidad ambiental [59].

A.1.11.4. Uso de sistemas de refrigeración alimentados por energía renovable

El uso de sistemas de refrigeración alimentados por energía renovable ofrece una solución efectiva para reducir las emisiones de metano (CH₄) asociadas con los sistemas de refrigeración convencionales. La implementación de fuentes de energía renovable, como la energía solar o eólica, para alimentar los sistemas de refrigeración ayuda a reducir la dependencia de combustibles fósiles y, por lo tanto, disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero.

La energía solar puede ser aprovechada mediante la instalación de paneles solares fotovoltaicos, que convierten la luz solar en electricidad. Esta electricidad puede utilizarse directamente para alimentar los sistemas de refrigeración, eliminando la necesidad de utilizar energía proveniente de fuentes convencionales. Además, la energía solar también se puede utilizar para generar calor útil a través de colectores solares térmicos, que pueden ser empleados en sistemas de refrigeración de absorción o en sistemas de compresión con tecnología de bomba de calor.

De manera similar, la energía eólica puede ser aprovechada mediante la instalación de aerogeneradores que convierten la energía cinética del viento en electricidad. Esta electricidad puede ser utilizada para alimentar los sistemas de refrigeración, permitiendo un funcionamiento más sostenible y reduciendo las emisiones de CH₄ asociadas.

La combinación de sistemas de refrigeración eficientes y la utilización de energía renovable para alimentarlos constituye una estrategia poderosa para reducir las emisiones de CH₄ y mitigar el impacto ambiental de la refrigeración. Al aprovechar fuentes de energía limpia y sostenible, se contribuye a la transición hacia un futuro más sostenible y se promueve la reducción de gases de efecto invernadero [60].

A.1.12. Medidas de mitigación de N₂O (óxido nitroso)

La mitigación de las emisiones de óxido nitroso (N₂O) en los sistemas de refrigeración desempeña un papel fundamental en la protección del medio ambiente y la lucha contra el cambio climático. Para lograrlo, se han implementado diversas medidas que buscan reducir las emisiones de N₂O asociadas a estos sistemas y mejorar su eficiencia energética.

Mejora en la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración

- Reducir la necesidad de refrigerante y, por lo tanto, las emisiones de N₂O asociadas.

Uso de refrigerantes con menor potencial de agotamiento de ozono (PAO)

- Los hidrofluorocarbonos (HFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), tienen menor potencial de emisiones de N₂O

Implementación de sistemas de recuperación de refrigerante

- Reducir la cantidad de refrigerante que se libera a la atmósfera

Implementación de prácticas de mantenimiento adecuadas

- Reducir las fugas de refrigerante

Fuente: Elaboración propia

A.1.12.1. Mejora en la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración

La mejora en la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración es fundamental para reducir las emisiones de óxido nitroso (N₂O) asociadas. Al implementar medidas y tecnologías que permitan un uso más eficiente de la energía, se reduce la necesidad de refrigerante y se minimiza el impacto ambiental.

Existen diversas estrategias para mejorar la eficiencia energética de los sistemas de refrigeración. Una de ellas es la optimización de los componentes y equipos utilizados. Por ejemplo, el uso de compresores de alta eficiencia y motores de velocidad variable puede reducir significativamente el consumo de energía de los sistemas de refrigeración. Asimismo, la mejora en el aislamiento térmico de los equipos y tuberías puede minimizar las pérdidas de calor y frío, lo que resulta en un funcionamiento más eficiente y en una menor necesidad de refrigerante.

La implementación de sistemas de control avanzados y la monitorización continua del rendimiento permiten ajustar y optimizar el funcionamiento de los sistemas de refrigeración en tiempo real. Mediante la recopilación de datos sobre variables como la temperatura, la presión y el flujo de refrigerante, se pueden identificar oportunidades de mejora y aplicar ajustes precisos para maximizar la eficiencia energética [61].

A.1.12.2. Uso de refrigerantes con menor potencial de agotamiento de ozono (PAO)

El uso de refrigerantes con menor potencial de agotamiento de ozono (PAO) es una estrategia efectiva para reducir las emisiones de óxido nitroso (N_2O) en los sistemas de refrigeración. Los refrigerantes tradicionales, como los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), tienen un alto potencial de agotamiento de la capa de ozono y contribuyen al cambio climático.

En contraste, los refrigerantes más modernos, como los hidrofluorocarbonos (HFC), presentan un menor PAO y son más respetuosos con el medio ambiente. Estos refrigerantes, que se utilizan ampliamente en la industria de la refrigeración, tienen propiedades físicas y químicas que les permiten ofrecer un rendimiento eficiente sin dañar la capa de ozono.

La investigación y el desarrollo continúan avanzando en la búsqueda de refrigerantes con un potencial de agotamiento de ozono aún menor y un impacto climático reducido. Se están investigando alternativas más sostenibles, como los refrigerantes naturales y los refrigerantes de bajo potencial de calentamiento global (PCG), que tienen una influencia mínima en el cambio climático y contribuyen a la mitigación de las emisiones de N_2O [62].

A.1.12.3. Implementación de sistemas de recuperación de refrigerante

La implementación de sistemas de recuperación de refrigerante es una medida clave para reducir las emisiones de óxido nitroso (N_2O) asociadas con los sistemas de refrigeración. Estos sistemas están diseñados para capturar y reciclar el refrigerante que de otro modo se liberaría a la

atmósfera durante el mantenimiento, la reparación o el desmantelamiento de los equipos de refrigeración.

Al utilizar sistemas de recuperación de refrigerante, se evita la liberación directa de N₂O, un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global significativo. En lugar de desechar el refrigerante, se recoge y se procesa adecuadamente para su reutilización o reciclaje. Esto no solo reduce las emisiones de N₂O, sino que también contribuye a la conservación de recursos y evita la producción de nuevos refrigerantes [63].

A.1.12.4. Implementación de prácticas de mantenimiento adecuadas

La implementación de prácticas de mantenimiento adecuadas es esencial para reducir las fugas de refrigerante y, por consiguiente, las emisiones de óxido nitroso (N₂O) asociadas. El mantenimiento regular y adecuado de los sistemas de refrigeración, incluyendo la inspección, el sellado de fugas y el reemplazo de componentes desgastados, ayuda a mantener la integridad del sistema y a prevenir la pérdida de refrigerante.

Mediante la implementación de programas de mantenimiento adecuados, se pueden identificar y corregir las fugas de refrigerante de manera oportuna. Esto no solo reduce las emisiones de N₂O, sino que también mejora la eficiencia y el rendimiento del sistema de refrigeración. Además, el mantenimiento adecuado garantiza que el equipo funcione de manera segura y eficiente, lo que prolonga su vida útil y evita costosas reparaciones o reemplazos prematuros.

Es importante destacar que las prácticas de mantenimiento adecuadas deben incluir la capacitación del personal encargado del mantenimiento, el uso de herramientas y equipos adecuados, y la implementación de procedimientos de inspección y reparación rigurosos. Asimismo, es fundamental cumplir con las regulaciones y normativas ambientales relacionadas con el manejo de refrigerantes y las emisiones de gases de efecto invernadero [64].

A.1.13 Medidas de mitigación de gases GLP petróleo y gas natural

La mitigación de los gases de petróleo y gas natural es de suma importancia para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático. Para lograrlo, se han implementado diversas medidas que buscan reducir las emisiones asociadas a estos gases y promover un uso más eficiente y responsable de los recursos energéticos.

Uso de compresores más eficientes

- Compresores más eficientes que utilizan menos combustible para funcionar

Prevención y detección de fugas

- Programa de prevención y detección de fugas para minimizar emisiones

Recuperación y reciclado de refrigerantes

- Cuando se desconecta un sistema de refrigeración, el refrigerante debe recuperarse y reciclarse.

Fuente: Elaboración propia

A.1.13.1. Uso de compresores más eficientes

El uso de compresores más eficientes es una estrategia efectiva para reducir las emisiones de gases licuados de petróleo (GLP) en los sistemas de refrigeración. Estos compresores están diseñados para maximizar la eficiencia energética y minimizar el consumo de combustible durante su funcionamiento. Al requerir menos combustible, se reduce la quema de combustibles fósiles y, por lo tanto, se disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los estudios han demostrado que reemplazar un compresor convencional por uno accionado por inversor puede generar una reducción de hasta el 50% en las emisiones de GLP. Esta mejora significativa se debe a la capacidad de los compresores accionados por inversor de ajustar su velocidad de operación de manera inteligente según las necesidades de refrigeración en cada momento. Esto evita el funcionamiento innecesario a plena capacidad y optimiza el consumo de combustible.

La adopción de compresores más eficientes no solo reduce las emisiones de GLP, sino que también conlleva beneficios adicionales, como la reducción de los costos de operación y un

mayor rendimiento del sistema de refrigeración. A medida que se avanza en el desarrollo de tecnologías más eficientes, se espera que los compresores continúen mejorando su desempeño y reduciendo aún más las emisiones de gases de efecto invernadero [65].

A.1.13.2. Prevención y detección de fugas

La prevención y detección de fugas de GLP es una medida fundamental para minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero en los sistemas de refrigeración. Las fugas pueden ocurrir en distintos puntos del sistema, como tuberías, conexiones y equipos. Cuando se produce una fuga, grandes cantidades de GLP pueden escapar a la atmósfera y contribuir al calentamiento global.

Para prevenir y detectar fugas, es esencial implementar un programa de gestión adecuado. Esto implica la realización regular de inspecciones, pruebas de hermeticidad y mantenimiento de los sistemas de refrigeración. Al identificar y reparar las fugas de manera oportuna, se evita la liberación continua de gases de efecto invernadero y se asegura un funcionamiento más eficiente y seguro del sistema.

Es importante capacitar al personal encargado del mantenimiento y operación de los sistemas de refrigeración en la identificación de fugas y en las mejores prácticas para prevenirlas. Asimismo, se deben seguir las directrices y regulaciones establecidas por los organismos ambientales y de seguridad para garantizar un manejo adecuado de los refrigerantes y la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero [66].

A.1.13.2. Recuperación y reciclado de refrigerantes

Cuando se desconecta un sistema de refrigeración, es fundamental realizar un adecuado proceso de recuperación y reciclaje del refrigerante. Esta práctica es esencial para prevenir la liberación de refrigerantes a la atmósfera y minimizar el impacto ambiental.

La recuperación del refrigerante consiste en extraerlo de manera segura del sistema de refrigeración antes de su desconexión. Este proceso se lleva a cabo utilizando equipos especializados que garantizan la captura eficiente del refrigerante sin que se escape a la

atmósfera. Es importante destacar que los refrigerantes son sustancias químicas que tienen un potencial significativo para contribuir al calentamiento global, por lo que su liberación puede tener consecuencias ambientales negativas.

Una vez que el refrigerante ha sido recuperado, se procede al reciclaje. Este proceso implica someter el refrigerante a un tratamiento adecuado para eliminar impurezas y contaminantes, y luego restituirlo al sistema de refrigeración o utilizarlo en otros sistemas compatibles. El reciclaje permite aprovechar nuevamente el refrigerante, reduciendo la necesidad de producir nuevos refrigerantes y evitando la generación de residuos adicionales.

La recuperación y reciclaje de refrigerantes no solo tiene beneficios ambientales, sino también económicos. Al recuperar y reciclar el refrigerante, se evita la necesidad de adquirir grandes cantidades de nuevos refrigerantes, lo que se traduce en ahorros significativos a largo plazo. Además, al promover una gestión responsable de los refrigerantes, se contribuye a la protección de la capa de ozono y se cumple con las regulaciones y normativas ambientales vigentes.

Es importante destacar que la recuperación y el reciclaje del refrigerante deben llevarse a cabo por personal capacitado y autorizado. Estos profesionales deben seguir los protocolos y directrices establecidos por los organismos ambientales y de seguridad para garantizar un manejo seguro de los refrigerantes y prevenir cualquier riesgo asociado [67].

ANEXO B

B.1. Modelación de cada medida en términos de costos

B.1.1. Recuperación de calor residual

Modelación	
Principales supuestos y Elementos de costos	Los gastos de inversión pueden oscilar entre 500.000 y 1.500.000 dólares, según la tecnología empleada y las circunstancias particulares de la instalación. Por cada MWh de calor recuperado, los sistemas de recuperación de calor residual implementados en la empresa pueden reducir las emisiones de CO ₂ en una media de 0,2 a 0,4 toneladas. Entre el 1% y el 3% del coste de inversión anual podría encontrarse en los gastos fijos de funcionamiento y mantenimiento [81].

Fuente: Elaboración propia

B.1.2. Diseño de sistemas de refrigeración de alta eficiencia

Modelación	
Principales supuestos y elementos de costos	Se puede utilizar un sistema de refrigeración de alta eficiencia con una inversión media de 500 a 1.500 dólares por kW de capacidad instalada. Una capacidad instalada de 250 kW equivale a un consumo mensual de 250.000 kWh. Por consiguiente, el coste de inversión típico podría situarse entre 125.000 y 375.000 dólares de media. Los costes fijos de funcionamiento y mantenimiento de los sistemas de refrigeración de alta eficiencia pueden oscilar entre el 1% y el 3% del coste de inversión anual, según los cálculos y las referencias bibliográficas [82]. El uso de sistemas de refrigeración de alta eficiencia permite ahorrar hasta un 30% de electricidad [83].

Fuente: Elaboración propia

B.1.3. Utilización de paneles solares

Modelación	
Principales supuestos y elementos de costos	El precio unitario de un panel solar de 455W es de \$803,639 COP. Para cubrir la necesidad eléctrica mensual de la empresa de 250 MWh, se requiere una inversión aproximada de \$91,888.4 USD y aproximadamente \$10,000 en costos de instalación y equipos. Se estima que los costos fijos y de mantenimiento anuales representan el 2% de la inversión. La producción anual de CO ₂ se estima en 31.53 toneladas por año, con una reducción esperada de 348.4 toneladas por año. [84], [85], [86], [87].

Fuente: Elaboración propia

B.1.4. Implementación de programas de gestión de la energía

Modelación	
Principales supuestos y elementos de costos	Dependiendo del tamaño y el alcance del programa, los gastos medios de inversión para programas de gestión energética en empresas de refrigeración pueden oscilar entre 10.000 y 100.000 dólares. Los costes fijos de funcionamiento y mantenimiento pueden suponer entre el 1% y el 5% del ahorro energético total obtenido por el programa de gestión energética, según las investigaciones y referencias bibliográficas. Las empresas del sector de la refrigeración pueden ahorrar hasta un 20% de energía utilizando soluciones de gestión energética (Yigeng et al., 2023), [88].

Fuente: Elaboración propia

B.1.5. Utilización de sistemas de cogeneración

Modelación	
Principales supuestos y elementos de costos	El coste medio de inversión de los sistemas de cogeneración en la industria de la refrigeración puede oscilar entre 500 y 1.500 dólares por kilovatio (kW) instalado, según investigaciones y referencias bibliográficas. En los sistemas de cogeneración, los gastos fijos de funcionamiento y mantenimiento suelen oscilar entre el 2% y el 5% de los costes de inversión iniciales. Por megavatio-hora (MWh) de energía producida, las emisiones de CO ₂ de los sistemas de cogeneración pueden reducirse entre 0,3 y 0,7 toneladas. Por megavatio-hora (MWh) de energía producida, las emisiones de CO ₂ de los sistemas de cogeneración pueden reducirse entre 0,3 y 0,7 toneladas [89], [90].

Fuente: Elaboración propia

B.1.6. Utilización de técnicas de refrigeración adiabática

Modelación	
Principales supuestos y elementos de costos	El coste medio de inversión de un sistema de refrigeración adiabático puede oscilar entre 100 y 300 dólares por kilovatio (kW) instalado. En los sistemas de refrigeración adiabática, los gastos fijos de funcionamiento y mantenimiento pueden representar entre el 5% y el 10% de los costes de inversión iniciales. Por megavatio-hora (MWh) de energía ahorrada, el empleo de técnicas de refrigeración adiabática puede reducir las emisiones de CO ₂ entre 0,2 y 0,5 toneladas de CO ₂ [91], (La razón, 2021).

Fuente: Elaboración propia

B.1.7. Mejora del aislamiento térmico de los equipos de refrigeración

Modelación	
Principales supuestos y elementos de costos	El coste de inversión típico por equipo para aumentar el aislamiento térmico de los equipos de refrigeración puede oscilar entre 100 y 500 dólares. Los gastos fijos de funcionamiento y mantenimiento pueden suponer entre el 2% y el 5% de los costes de la inversión inicial. Un aumento del aislamiento térmico puede reducir las emisiones de CO ₂ entre 0,1 y 0,3 toneladas por cada MWh de energía ahorrada [92], [93].

Fuente: Elaboración propia

B.1.8. Uso de refrigerantes naturales R717, R290, R744)

Modelación	
Principales supuestos y elementos de costos	El coste medio de inversión de los sistemas de refrigeración con refrigerantes naturales puede situarse entre 500 y 2.500 dólares por kW de capacidad de refrigeración instalada. Para los sistemas de refrigeración que utilizan refrigerantes naturales, los gastos fijos de funcionamiento y mantenimiento pueden suponer entre el 10% y el 20% de los costes de inversión iniciales. Teniendo en cuenta un ahorro energético del 10%, las reducciones de CO ₂ pueden oscilar entre 0,5 y 1,5 toneladas por MWh de electricidad ahorrada [94], [95].

Fuente: Elaboración propia

B.1.9. Utilización de tecnologías avanzadas de control

Modelación	
Principales supuestos y elementos de costos	Los gastos medios de inversión para poner en práctica tecnologías de control avanzadas pueden situarse entre 10.000 y 50.000 dólares. Los costes fijos de funcionamiento y mantenimiento pueden suponer entre el 5% y el 10% del precio de la inversión inicial, según investigaciones y referencias bibliográficas. Teniendo en cuenta un ahorro energético del 10%, las reducciones de CO ₂ pueden oscilar entre 0,5 y 1,5 toneladas por MWh de electricidad ahorrada [96], [94].

Fuente: Elaboración propia

B.1.10. Optimización del mantenimiento y servicio de equipos

Modelación	
Principales supuestos y elementos de costos	En función de las exigencias particulares de la empresa y de la envergadura del proyecto, la instalación de programas de optimización del mantenimiento puede costar entre 5.000 y 50.000 dólares. Los gastos fijos de funcionamiento y mantenimiento pueden suponer entre un 2% y un 5% de los costes de la inversión inicial. El consumo de energía de los sistemas de refrigeración eficientes puede reducir las emisiones de CO ₂ entre un 5% y un 20% [97], [98].

Fuente: Elaboración propia

B.1.11. Uso de compresores más eficientes

Modelación	
Principales supuestos y elementos de costos	Un compresor más eficiente puede requerir una inversión media de entre 2.000 y 10.000 dólares por unidad. De acuerdo con (Tabla 3.4. Resumen de equipos de la planta de MAGNUS ICE) la empresa dispone de 6 compresores que costarían 12.000 dólares más y que, gracias a su eficiencia del 80%, supondrían una disminución del 40% de las emisiones de CO ₂ [99], [100].

Fuente: Elaboración propia