

Evaluación Técnico y Ambiental de un Sistema de Refrigeración Usando CO₂ como alternativa
al Sistema de Refrigeración Convencional para la Conservación de Productos Cárnicos en un
Cuarto Frio

Sebastian Carreño Montiel y Henry Yesid Franco Pachón

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Carlos Fidel Amarís Castilla

Doctor en Tecnologías de Climatización y Eficiencia Energética en Edificios

Codirector

David Alfredo Fuentes Díaz

Doctor en Tecnología Energética

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Programa de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Desde el inicio hasta el final, fue un camino difícil de recorrer; no fue fácil, pero se logró. Tuve una pérdida que me dejó roto por dentro, pero en su memoria seguí adelante y no me rendí. Dedico este trabajo, que representa una etapa de mi vida, a mis padres, quienes, a pesar de las dificultades, siempre dieron todo de sí para que llegara este momento; a mi hermano mayor, por ser esa persona que me motiva a querer ser alguien importante y por la valiosa frase que implantó en mí: "La disciplina algún día vencerá a la inteligencia"; a mi perrita Luna, que en paz descansa, cuya partida dejó un gran vacío en mi corazón. Pero a pesar de todo, por ella y por todos los que hicieron posible que llegara hasta acá, dedico este libro, que es la culminación de todos mis esfuerzos. "Un ganador es un perdedor que nunca se rindió."

Sebastian Carreño Montiel.

A Dios, por darme la sabiduría en esas largas noches de estudio. A mis padres y hermanas, por no dejar de creer en mi en ningún momento, por ser la razón de mi lucha y mi mayor orgullo. A Kitty Patitas Suaves, por enseñarme que hasta en la quietud hay compañía. Y a mis compañeros de carrera por ser un gran apoyo en este largo recorrido.

Henry Yesid Franco Pachon

Agradecimientos

Extendemos nuestro más sentido agradecimiento al Doctor Carlos Fidel Amaris Castilla, nuestro director de grado. Su presencia constante, su accesibilidad inmejorable y su firme apoyo fueron pilares sobre los que pudimos construir cada etapa de este trabajo. Más allá de su rigor académico, valoramos enormemente su calidad humana y su disposición a resolver dudas y ofrecer consejos, convirtiendo este proceso en una experiencia enriquecedora. Su confianza en nuestras capacidades fue un motor clave para no desfallecer.

A la Universidad Industrial de Santander (UIS), institución que no solo nos abrió sus puertas, sino que nos brindó el entorno académico y los recursos necesarios para el desarrollo de esta investigación. Valoramos profundamente la educación de calidad, la infraestructura y el constante fomento a la investigación que caracterizan a esta prestigiosa casa de estudios, elementos que fueron fundamentales para nuestra formación profesional y la culminación exitosa de este proyecto de grado. Es un honor ser parte de la comunidad UIS y haber tenido la oportunidad de contribuir, desde sus aulas y laboratorios, al avance del conocimiento.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Planteamiento del Problema	17
1.1 Objetivos	20
1.1.1 Objetivo General	20
1.1.2 Objetivos Específicos	20
1.2 Alcance	21
1.3 Justificación	21
2. Estado del Arte	23
2.1 Marco teórico	23
2.1.1 Cuartos fríos	23
2.1.2 Ciclos de refrigeración	24
2.1.3 El eyector en sistemas de refrigeración	29
2.1.6 Temperatura de condensación	30
2.1.7 Temperatura de evaporación	30
2.1.8 Condiciones ambientales	30
2.1.4 Características principales del Refrigerante R404A	31
2.1.5 Características principales del Refrigerante R744 (CO ₂)	31
2.1.6 Indicador de impacto ambiental, Total Equivalent Warming Impact (TEWI)	32
2.1.7 Productos cárnicos	32
2.2 Marco referencial	33
2.2.1 Referencias a nivel internacional	33

2.2.2 Referencias a nivel nacional	36
2.2.3 Referencias a nivel departamental	38
3. Metodología.....	39
3.1 Descripción de los sistemas	39
3.1.1 Ciclo de refrigeración básico con R404A.....	39
3.1.2 Ciclo de refrigeración básico con R744 (CO ₂)	40
3.1.3 Ciclo de refrigeración tipo cascada R744/R717(NH ₃).....	42
3.1.4 Ciclo de refrigeración con eyector R744	44
3.2 Detalles del modelo.....	45
3.2.1 Balances de energía y masa	45
3.2.3 Impacto ambiental.....	48
3.2.4 Consideraciones y condiciones de funcionamiento	49
3.2.5 Procedimiento de validación de modelos	51
3.3 Detalles de la temperatura ambiente de Bucaramanga	52
4. Resultados y Discusión.....	54
4.1 Resultados de la validación de los modelos.....	54
4.2 Análisis de sensibilidad.....	58
4.2.1 Determinación de la presión intermedia	59
4.2.2 Evaluación de efectividad de los intercambiadores de calor (IHX)	60
4.3 Efecto de la temperatura ambiente sobre el rendimiento.....	63
4.4 Consumo de energía anual	68
4.5 Análisis del impacto ambiental.....	69
5. Conclusiones.....	70

6. Trabajos futuros	72
Referencias.....	73

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Condiciones de operación</i>	50
Tabla 2. <i>Características de los compresores</i>	51
Tabla 3. <i>Datos de temperatura ambiente y frecuencia</i>	53
Tabla 4. <i>Eficiencia global de los compresores</i>	55
Tabla 5. <i>Consumo de energía de los compresores para cada sistema frente a la temperatura amb</i>	67
Tabla 6. <i>Consumo de energía de los sistemas</i>	69

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Diagrama del ciclo básico de refrigeración y grafica de Ph</i>	25
Figura 2. <i>Diagrama sistema booster. Inyección entre pasos</i>	27
Figura 3. <i>Sistema booster en baja temperatura</i>	27
Figura 4. <i>Sistema de refrigeración tipo cascada típico de supermercados</i>	28
Figura 5. <i>Sistema de refrigeración por eyector</i>	29
Figura 6. <i>Diagrama del sistema de refrigeración ciclo básico con R404A</i>	40
Figura 7. <i>Diagrama del sistema de refrigeración ciclo básico con R744 (CO₂)</i>	41
Figura 8. <i>Diagrama del sistema de refrigeración en cascada R744/R717</i>	43
Figura 9. <i>Diagrama del sistema de refrigeración con eyector R744</i>	44
Figura 10. <i>Poder de consumo modelado vs poder de consumo fabricante</i>	58
Figura 11. <i>COP vs presión intermedia</i>	59
Figura 12. <i>COP vs efectividad del IHX</i>	61
Figura 13. <i>W Total vs efectividad del IHX vs DT IHX</i>	62
Figura 14. <i>COP vs Temperatura ambiente</i>	63
Figura 15. <i>W Total vs Temperatura ambiente</i>	64
Figura 16. <i>Comparación del impacto ambiental (TEWI)</i>	70

Glosario

CFC: los Clorofluorocarbonos (CFCs), compuestos por carbono, cloro y flúor, fueron ampliamente utilizados en refrigeración y aerosoles, pero dañan la capa de ozono y fueron prohibidos (1).

CO₂: el CO₂ o R744, refrigerante natural con alta densidad y conductividad térmica, ideal para transferencia de calor, sus propiedades únicas lo hacen atractivo para sistemas modernos de refrigeración, a pesar de requerir altas presiones. (2).

Compresor: en equipos de refrigeración, el compresor es el componente central cuya función principal es elevar la presión del gas refrigerante. Esta compresión genera el diferencial de presión necesario para impulsar el fluido a través de todo el circuito frigorífico (3).

Condensador: es un componente fundamental en el circuito de refrigeración. Su operación consiste en condensar el refrigerante gaseoso, lo que implica un cambio de fase a líquido, permitiendo así la disipación del calor al ambiente (4).

Emisiones directas (TEWI): las emisiones directas del TEWI (Total Equivalent Warming Impact) corresponden a las liberaciones de gases de efecto invernadero originadas directamente por el sistema de refrigeración o aire acondicionado. Estas incluyen principalmente las fugas del refrigerante (5).

Emisiones indirectas (TEWI): las emisiones indirectas del TEWI (Total Equivalent Warming Impact) corresponden a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por la producción y distribución de la electricidad consumida por el sistema de refrigeración, no directamente por su operación intrínseca (6).

Evaporador: el evaporador es el componente del sistema de refrigeración donde se produce el efecto de enfriamiento. El refrigerante se evapora y disminuye la temperatura del espacio a refrigerar al absorber el calor de este (7).

Eyector: un eyector es un dispositivo que utiliza un fluido a alta presión (primario) para arrastrar y comprimir otro fluido a baja presión (secundario). Al mezclar ambos fluidos y recuperar la presión, el eyector funciona como una bomba o un compresor sin partes móviles bajo el principio de Venturi (8).

Gas cooler: los Gas Cooler funcionan enfriando gases sin que estos cambien de estado, a diferencia de los sistemas convencionales (9).

GEI: los Gases de Efecto Invernadero (GEI) son componentes atmosféricos gaseosos con la capacidad de absorber y emitir radiación infrarroja. Este proceso fundamental causa el efecto invernadero, contribuyendo así al calentamiento global al retener el calor en la atmósfera y, potencialmente, elevar la temperatura media del planeta (10).

GWP: el GWP o Potencial de Calentamiento Global (PCG), es una medida que cuantifica el potencial de un gas para contribuir al calentamiento global (11).

HCFC: los HCFC o hidroclorofluorocarbonos, son una mezcla de carbono, hidrógeno, cloro y flúor, fueron concebidos como una alternativa más limpia a los CFC en sistemas de refrigeración (12).

HFC: los HFC o hidrofluorocarbonos son gases artificiales utilizados en diversas aplicaciones, principalmente en la industria de la refrigeración. A pesar de ser eficientes en la refrigeración, estos gases son potentes gases de efecto invernadero y representan una amenaza para el clima (13).

Impacto ambiental: el impacto ambiental es la alteración del equilibrio natural de un ecosistema debido a la acción humana (14).

Intercambiador de calor interno (IHX): un intercambiador de calor es un dispositivo que permite la transferencia de calor entre dos fluidos a diferentes temperaturas (15).

ODP: el Potencial de Agotamiento del Ozono (ODP) es un índice que compara la capacidad de una sustancia de destruir la capa de ozono con la de una sustancia de referencia. Este valor permite clasificar los refrigerantes según su impacto ambiental (16).

R404A: el R404A es un refrigerante sintético, clasificado como hidrofluorocarbono (HFC), que se utiliza comúnmente en sistemas de refrigeración comercial para mantener bajas temperaturas. Es una mezcla de HFC-125 (44%), HFC-143a (52%) y HFC-134a (4%), y presenta un alto Potencial de Calentamiento Global (GWP) de 3922 (17).

Recibidor: la función principal del tanque recibidor es regular la cantidad de líquido refrigerante en el sistema de enfriamiento (18).

Refrigerantes naturales: los refrigerantes naturales, una alternativa ecológica a los sintéticos, incluyen al amoníaco, dióxido de carbono e hidrocarburos. Estos compuestos, presentes en la naturaleza, no agotan la capa de ozono y tienen un bajo impacto en el clima (19).

Refrigerantes sintéticos: los refrigerantes sintéticos son sustancias químicas artificiales ampliamente utilizadas en la industria de la refrigeración y el aire acondicionado. Estos compuestos, creados en laboratorios, ofrecen propiedades de enfriamiento específicas que permiten un control preciso de la temperatura en diversas aplicaciones (20).

Rendimiento energético: el rendimiento energético es un indicador clave que cuantifica la proporción de energía útil respecto a la de entrada en un sistema energético. Nos permite evaluar la eficiencia de diferentes tecnologías y procesos de generación de energía (21).

Sistema de Refrigeración: la refrigeración es un proceso que busca extraer calor de un espacio para mantenerlo a una temperatura por debajo de la temperatura ambiente(22).

Sostenibilidad ambiental: la sostenibilidad ambiental busca lograr un equilibrio entre las necesidades humanas y la protección del medio ambiente. Se trata de utilizar los recursos naturales de manera responsable para garantizar su disponibilidad para las futuras generaciones (23).

Subenfriador de líquido (Subcooler): un subenfriador de líquido (o subcooler) es un dispositivo que reduce la temperatura de un refrigerante líquido por debajo de su punto de ebullición o condensación, sin cambiarlo a estado gaseoso. En sistemas de refrigeración, este proceso, llamado subenfriamiento, es crucial para asegurar que el refrigerante entre en la válvula de expansión únicamente en estado líquido, optimizando el rendimiento del sistema (24).

Válvula de expansión: la válvula de expansión es un componente crucial en los sistemas de refrigeración y aire acondicionado, diseñada para regular el flujo de refrigerante líquido hacia el evaporador. Este control preciso es vital para optimizar la absorción de calor y mantener la temperatura deseada en el espacio refrigerado (25).

Resumen

Título: Evaluación Técnico y Ambiental de un Sistema de Refrigeración Usando CO₂ como Alternativa al Sistema de Refrigeración Convencional para la Conservación de Productos Cárnicos en un Cuarto Frio*

Autor: Sebastian Carreño Montiel y Henry Yesid Franco Pachón

Palabras Clave: CO₂, Sistemas de Refrigeración, R404A, Cuarto frio, TEWI, GEI, ODP, GWP.

Descripción: En este trabajo de grado se presenta la evaluación del consumo energético y las emisiones de CO₂ equivalente (CO₂eq) de sistemas de refrigeración basados en dióxido de carbono (CO₂) en configuraciones básica, en cascada y con eyector, en comparación con un sistema convencional que emplea R404A. Todos los sistemas fueron diseñados para operar en un cuarto frío con una carga térmica de 100 kW, ubicado en Bucaramanga. La metodología se basó en el desarrollo y validación rigurosa de modelos termodinámicos, los cuales alcanzaron una precisión del $\pm 5\%$ en la predicción del consumo de los compresores. Esto permitió analizar el desempeño energético y ambiental de cada configuración bajo diversas condiciones de operación. Se confirmó que la configuración del ciclo es el factor predominante en la determinación del consumo total de energía (WT). Tanto el sistema con Eyector como el Convencional operaron con potencias inferiores a los 50 kW. El consumo energético anual del sistema con Eyector (445.582,69 kWh/año) resultó altamente competitivo frente al del sistema convencional con R404A (431.054,35 kWh/año), superando ampliamente al sistema Básico con CO₂ (590.947,85 kWh/año). El sistema con Eyector basado en CO₂ se destacó como el más eficiente y ambientalmente favorable, al registrar el menor TEWI total (aproximadamente 500,89 toneladas de CO₂eq) y presentar un coeficiente de desempeño (COP) superior o comparable al del sistema convencional a partir de los 26–27 °C de temperatura ambiente.

* Evaluación Técnico y Ambiental de un Sistema de Refrigeración Usando CO₂ como Alternativa al Sistema de Refrigeración Convencional Instalado para la Conservación de Productos Cárnicos en un Cuarto Frio.

Abstract

Title: Technical and environmental evaluation of a refrigeration system that uses CO₂ as an alternative to the conventional refrigeration system for the conservation of meat products in a cold room*

Author(s): Sebastian Carreño Montiel and Henry Yesid Franco Pachon

Key Words: CO₂, Refrigeration system, R404A, Cold room, TEWI, GHG, ODP, GWP.

Description: This thesis presents an evaluation of the energy consumption and CO₂-equivalent (CO₂eq) emissions of refrigeration systems based on carbon dioxide (CO₂) in Basic, Cascade, and Ejector configurations, compared to a conventional system using R404A. All systems were designed to operate in a cold storage room with a thermal load of 100 kW, located in Bucaramanga. The methodology was based on the rigorous development and validation of thermodynamic models, which achieved a prediction accuracy of $\pm 5\%$ in compressor power consumption. This enabled a comprehensive analysis of the energy and environmental performance of each configuration under varying operating conditions. It was confirmed that cycle configuration is the primary factor influencing total energy consumption (WT). Both the Ejector and Conventional systems operated with power levels below 50 kW. The annual energy consumption of the Ejector system (445,582.69 kWh/year) proved highly competitive compared to the R404A-based Conventional system (431,054.35 kWh/year), significantly outperforming the Basic CO₂ system (590,947.85 kWh/year). The CO₂ Ejector system emerged as the most energy-efficient and environmentally favorable option, yielding the lowest total TEWI (approximately 500.89 tons of CO₂eq) and achieving a coefficient of performance (COP) that matches or exceeds that of the conventional system at ambient temperatures above 26–27 °C.

* Technical and environmental evaluation of a refrigeration system that uses CO₂ as an alternative to the conventional refrigeration system installed for the conservation of meat products in a cold room.

Introducción

La refrigeración, una tecnología esencial en la vida moderna, ha evolucionado a lo largo de los años, utilizando una variedad de sustancias como refrigerantes. Sin embargo, muchas de estas sustancias, como los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidrofluorocarbonos (HFC), han demostrado ser altamente perjudiciales para el medio ambiente. El elevado Potencial de Agotamiento de Ozono (ODP) y el Potencial de Calentamiento Global (GWP) inherentes a algunas de estas sustancias han contribuido al deterioro de la capa de ozono y al cambio climático, respectivamente. A diferencia de estos refrigerantes sintéticos, el dióxido de carbono (CO_2) es un refrigerante natural que se ha utilizado desde finales del siglo XIX, mucho antes de que se conocieran los impactos ambientales de los CFC y HFC.

El dióxido de carbono (CO_2) es un componente natural de nuestra atmósfera desde tiempos inmemoriales. Su uso como refrigerante se remonta al siglo XIX, cuando Carl Linde desarrolló la primera máquina de refrigeración que lo empleaba. Sin embargo, a mediados del siglo XX, los refrigerantes sintéticos, como los clorofluorocarbonos (CFC), comenzaron a ganar terreno debido a su mayor eficiencia y menor exigencia en los equipos. Lamentablemente, se descubrió que los CFC dañaban la capa de ozono, lo que llevó a su prohibición y al desarrollo de los hidrofluorocarbonos (HFC). Aunque los HFC son menos dañinos para la capa de ozono, contribuyen al calentamiento global. Ante esta situación, el CO_2 ha vuelto a ser considerado como una alternativa más sostenible y respetuosa con el medio ambiente, gracias a los avances tecnológicos y de seguridad que permiten su uso de manera más eficiente (26).

Los refrigerantes sintéticos, como los HFC y HCFC, han sido ampliamente utilizados en la industria de la refrigeración, pero su impacto negativo en el medio ambiente, especialmente en la capa de ozono y el calentamiento global, ha impulsado la búsqueda de alternativas más

sostenibles. El dióxido de carbono (CO_2) ha resurgido como una opción prometedora debido a su bajo Potencial de Calentamiento Global, particularmente en aplicaciones de refrigeración comercial, como cadenas de supermercados y cuartos fríos. Este trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar y comparar el desempeño de sistemas de refrigeración que utilizan CO_2 (R744) con un sistema convencional que emplea R404A, en el contexto de la conservación de productos cárnicos en un cuarto frío bajo las condiciones ambientales de la ciudad de Bucaramanga, Colombia.

1. Planteamiento del Problema

Durante años, las industrias encargadas de la refrigeración de alimentos han utilizado sistemas que generan un gran impacto ambiental, como es el caso del uso de gases refrigerantes hidrofluorocarbonos (HFC). Por otra parte, la adopción de sistemas de refrigeración basados en dióxido de carbono (CO₂) emerge como una alternativa ambientalmente responsable, en contraste con los refrigerantes convencionales, tales como los hidroclorofluorocarbonos (HCFC) o los hidrofluorocarbonos (HFC).

Los compuestos HFC presentan un elevado potencial de contribución al calentamiento global, mientras que la transición al uso de CO₂ como refrigerante puede generar una notable disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta situación representa una oportunidad de mejora en las ventas para aquellas empresas que buscan fortalecer y sensibilizar su compromiso con la sostenibilidad y el medio ambiente, captando la atención de consumidores conscientes con el cuidado del entorno ambiental.

En la actualidad, el CO₂ como refrigerante se ha consolidado como una opción amigable con el ambiente, demostrando una eficiencia energética superior a la evidenciada en los sistemas de refrigeración convencionales de gases HFC y de amoníaco. El número de sistemas de CO₂ transcrito implementados en Europa para mayo de 2020 fue de 29000 y, a nivel global, esta cifra alcanzaba los 35000 para el 2021 (27).

Colombia está incursionando en la implementación de los sistemas de refrigeración con CO₂, donde uno de sus referentes es Weston SAS. Para el año 2021, esta empresa ya contaba con más de 15 proyectos terminados en las principales ciudades del país. Weston SAS se encarga de la fabricación e instalación de estos sistemas, que son utilizados por supermercados de cadena, lo

cual representa una apuesta por un cambio tecnológico hacia el uso de tecnologías más eficientes y amigables con el medio ambiente (28).

Por otra parte, la Asociación Colombiana del Acondicionamiento del Aire y de la Refrigeración (ACAIRE), para el año 2022, realizó los primeros cursos de capacitación en refrigeración por CO₂, donde los supermercados de cadena más influyentes en el país hicieron presencia (29).

Con base en esto, la presente problemática representa una oportunidad para proponer sistemas de refrigeración alternativos a los convencionales, como los Hidrofluorocarbonos (HFC), los cuales generan un alto costo energético y un impacto ambiental significativo en términos de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Sin embargo, la viabilidad técnica y el impacto ambiental de estos sistemas deben ser evaluadas considerando las características propias del sistema y las condiciones ambientales del lugar donde serán implementados.

Este proyecto evalúa el impacto energético y ambiental de sistemas de refrigeración con CO₂, usados en la conservación de productos cárnicos en cuartos fríos, con el fin de visibilizar y promover la adopción de sistemas amigables con el medio ambiente.

Para ello, se compara el rendimiento técnico y las emisiones de CO₂eq entre un sistema de refrigeración que utiliza CO₂ como alternativa y el sistema convencional usado para conservar productos cárnicos en un cuarto frío, considerando las condiciones ambientales de Bucaramanga.

La selección del sistema de refrigeración más adecuado requiere un equilibrio óptimo entre eficiencia energética y bajo impacto ambiental. En este contexto, se busca una configuración que cumpla con los siguientes requisitos fundamentales: un alto Coeficiente de Rendimiento (COP),

un bajo Impacto de Calentamiento Total Equivalente (TEWI) y un consumo de energía que no sea excesivamente elevado, manteniéndose dentro de los estándares de eficiencia actuales.

De este modo, surge la siguiente pregunta: ¿Cuál es el consumo energético e impacto ambiental de un sistema de refrigeración usando CO₂ como alternativa al sistema de refrigeración convencional instalado para la conservación de productos cárnicos en cuartos fríos a las condiciones ambientales en la ciudad de Bucaramanga?

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Evaluar el consumo energético y emisiones de CO₂eq de un sistema de refrigeración usando CO₂ como alternativa al sistema de refrigeración convencional instalado para la conservación de productos cárnicos considerando un cuarto frío de capacidad de 100 kW.

1.1.2 Objetivos Específicos

Identificar los parámetros operativos de los sistemas de refrigeración convencionales usados para la conservación de productos cárnicos en cuartos fríos.

Desarrollar los modelos termodinámicos para la simulación del rendimiento energético del sistema de refrigeración convencional y alternativo, considerando los requerimientos técnicos de cuartos fríos y las condiciones ambientales de la ciudad de Bucaramanga.

Comparar la eficiencia energética y consumo de energía asociados con los sistemas de refrigeración en estudio para la conservación de productos cárnicos en cuartos fríos en las condiciones ambientales de la ciudad de Bucaramanga.

Estimar las emisiones de CO₂eq directas e indirectas generadas por el sistema de refrigeración convencional y alternativo a lo largo de su ciclo de vida, con el objetivo de determinar el impacto ambiental total de cada sistema y su contribución al cambio climático.

1.2 Alcance

Con una serie de simulaciones utilizando el software EES (Engineering Equation Solver), se llevó a cabo una evaluación comparativa técnica y ambiental para un sistema de refrigeración por CO₂ y por R404A en un cuarto frío, bajo las condiciones climáticas de la ciudad de Bucaramanga.

El estudio incluye la evaluación de cuatro diferentes sistemas de refrigeración: un ciclo de refrigeración básico que utiliza R404A, un ciclo de refrigeración booster básico con CO₂, un ciclo de refrigeración booster en cascada con CO₂, y un ciclo de refrigeración booster con CO₂ que incluye un eyector.

Los datos de los rendimientos de los compresores se obtuvieron y correlacionaron a partir de catálogos de Bock Vap, considerando las condiciones de evaporación, la carga de evaporación y el calor transferido al evaporador.

El estudio buscó concluir sobre el rendimiento y las emisiones de CO₂eq que podrían ofrecer las configuraciones evaluadas para un cuarto frío de productos cárnicos en la ciudad de Bucaramanga.

1.3 Justificación

El deterioro ambiental de las últimas décadas ha hecho que la innovación sea una necesidad, buscando una mejora de los equipos y procesos industriales convencionales. Los refrigerantes tradicionalmente usados en la industria de la refrigeración alimenticia son altamente contaminantes, como los hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y los hidrofluorocarbonos (HFC). El GWP (potencial de calentamiento global) de refrigerantes comúnmente utilizados, como el R404A

(usado en supermercados de cadena y cuartos fríos), contribuye con un gran porcentaje de las emisiones de gases de efecto invernadero (30).

Para el año 2013, la IIR demostró que se deberían haber almacenado 1661 millones de toneladas de comida en el mundo, las cuales se pudieron haber beneficiado de una cadena de frío. Las condiciones de temperatura a las que deben estar expuestos los alimentos perecederos deben cumplir con los requisitos óptimos para no afectar su calidad y ampliar su disponibilidad el mayor tiempo posible (31).

La ONU presentó informes alarmantes donde afirma que las emisiones de gases de efecto invernadero alcanzaron un máximo histórico en el año 2019, llegando a los 52.4 GtCO₂eq. Las emisiones de dióxido de carbono, compuestas por combustibles fósiles y carbonatos, representan un gran porcentaje (65%) de las emisiones totales de GEI (gases de efecto invernadero) (32).

El hecho de poder implementar un sistema de refrigeración con CO₂ nos abre las puertas para alcanzar un futuro más limpio y con políticas amigables con el medio ambiente, lo que se traduce en una mejora de la calidad de vida de las personas. Al comparar la huella de carbono de un sistema de refrigeración por CO₂ con la de un refrigerante convencional como el R134a, se observa que el CO₂ presenta menores emisiones equivalentes vinculadas a su operación, con un -15.2% gracias a su mayor COP unitario anual (33). Cuando se habla de los refrigerantes más comunes usados en el país, el R404A hace parte de esa lista (34), el cual será el refrigerante convencional que usaremos en este estudio junto con el CO₂ (R744). Sin embargo, cada sistema debe evaluarse según sus características propias y las condiciones ambientales locales.

2. Estado del Arte

2.1 Marco teórico

A continuación, se expondrá la teoría base que sustenta esta investigación.

2.1.1 Cuartos fríos

Un cuarto frío es una instalación diseñada para conservar y almacenar productos a temperaturas controladas, siendo fundamental en diversas industrias donde la regulación térmica es clave para garantizar la calidad y seguridad de los productos. Estos espacios pueden operar en rangos de refrigeración (entre 0°C y 10°C) o congelación (por debajo de 0°C), según los requisitos específicos de los artículos almacenados (35).

Los cuartos fríos deben ser fabricados según los requisitos específicos de uso, ya sea para refrigeración, congelación o salas de procesamiento. Están contruidos con materiales aislantes como aserrín, corcho, fibra de vidrio y poliuretano, siendo este último el más utilizado. Dependiendo de la aplicación, el grosor del poliuretano varía entre 2 y 3 pulgadas para refrigeración y entre 4 y 6 pulgadas para congelación (36).

Los sistemas de refrigeración constan de un sistema mecánico que hace circular el gas refrigerante para regular la temperatura mediante cambios de estado, paneles aislantes que mantienen una temperatura estable gracias a su aislamiento térmico, puertas herméticas diseñadas para minimizar la pérdida de frío, y sistemas de control que monitorean y ajustan la temperatura y la humedad para un funcionamiento óptimo. (35).

Los sistemas de refrigeración de los cuartos fríos incluyen evaporadores y unidades condensadoras, seleccionadas en función de la carga térmica y el espacio disponible. Las unidades pueden variar desde compresores herméticos de ¼ de HP hasta sistemas de gran capacidad con doble compresor (36).

Los evaporadores se eligen según factores como: Tipo de producto almacenado, Humedad relativa, Tiempo de almacenamiento, Presentación del producto (empacado o granel) (36).

Seleccionar un equipo bien balanceado térmicamente garantiza un funcionamiento óptimo bajo las especificaciones requeridas.

Fundamental conocer el tipo de producto que se refrigerará o congelará, ya que la humedad dentro del cuarto frío debe ajustarse para garantizar la calidad. Dependiendo del contenido, se pueden almacenar semillas, carnes, verduras, quesos, vinos, cervezas o incluso áreas de proceso y pasillos de trabajo, donde es crucial mantener un nivel de humedad adecuado para evitar impactos en la salud del personal (36).

2.1.2 Ciclos de refrigeración

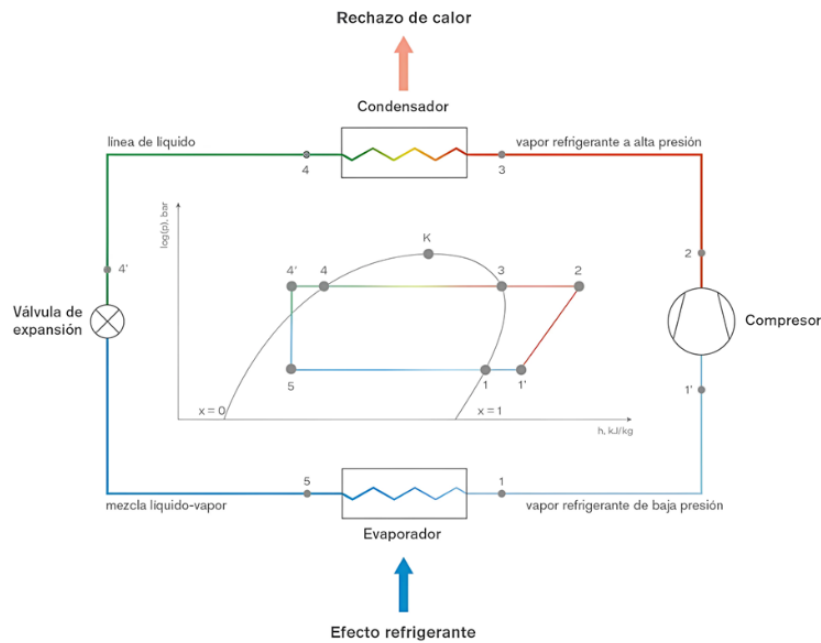
La refrigeración, una aplicación clave de la termodinámica, implica la transferencia de calor de un área de baja temperatura a una de alta temperatura. Los refrigeradores logran esto a través de ciclos de refrigeración, siendo el más común el ciclo de compresión de vapor, donde el refrigerante alterna entre las fases de evaporación y condensación antes de ser comprimido como vapor. Otros ciclos incluyen la refrigeración por gas, la refrigeración en cascada (que utiliza múltiples ciclos) y la refrigeración por absorción (que disuelve el refrigerante en un líquido antes de la compresión). (37).

El ciclo básico de refrigeración, fundamental en sistemas como el que se muestra en la Figura 1, se compone de cuatro etapas esenciales: compresión, condensación, expansión y evaporación. Cada etapa ocurre en un componente específico del sistema: el compresor, el condensador, la válvula de expansión y el evaporador, respectivamente. La unidad condensadora,

que agrupa la compresión y la condensación del refrigerante, es el elemento central del proceso. Este ciclo, que puede representarse en un diagrama Ph (Figura 1), se conoce como circuito teórico de Linde y sirve como referencia para los sistemas de refrigeración por compresor reales (38).

Figura 1.

Diagrama del ciclo básico de refrigeración y grafica de Ph



Nota. La figura representa un diagrama de un ciclo básico de refrigeración con una gráfica de presión entalpía. Tomado de *Areacademy* (38).

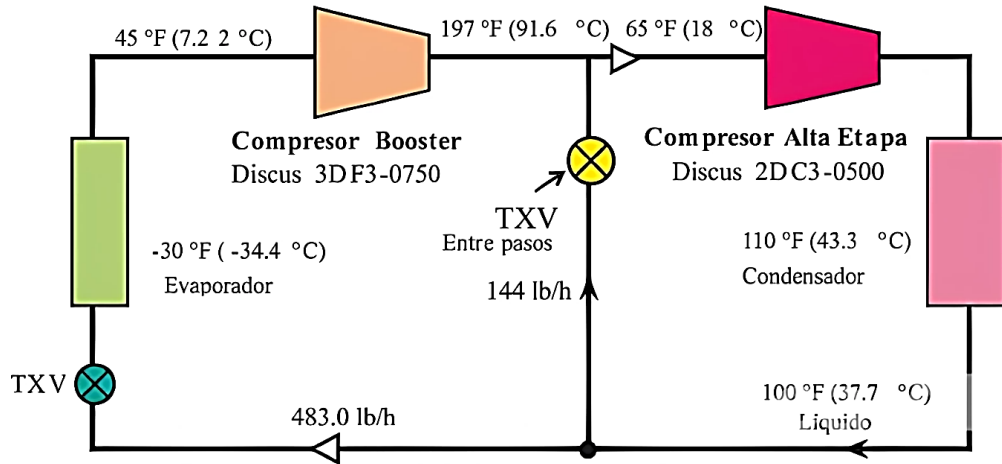
El ciclo básico de refrigeración se inicia con la compresión del vapor refrigerante sobrecalentado en el compresor, lo que aumenta su presión, temperatura y energía. Luego, durante la condensación, el vapor sobrecalentado se enfría y se transforma gradualmente en líquido saturado, liberando calor. Para optimizar el rendimiento, el líquido refrigerante se subenfía antes de pasar por la válvula de expansión, donde su presión disminuye, generando una mezcla de

líquido y vapor. Finalmente, durante la evaporación, el refrigerante absorbe calor del entorno a enfriar, evaporándose y completando el ciclo al regresar al compresor como vapor sobrecalentado (38).

En sistemas de refrigeración de dos etapas, los boosters son los compresores de baja presión conectados en serie con los de alta presión para lograr la compresión del gas refrigerante en dos fases, lo que permite alcanzar temperaturas de hasta -65°C de manera eficiente, especialmente con refrigerante R22. Los sistemas booster de CO_2 transcrito son una solución prometedora para usar refrigerantes naturales en el sector retail, sobre todo en climas templados (39). Estos sistemas se dividen en cuatro secciones según el nivel de presión: alta (hasta 130 bares), intermedia (hasta 90 bares), media (hasta 60 bares) y baja (hasta 45 bares). Durante la compresión en la etapa booster, la presión del gas aumenta hasta un nivel intermedio, y luego la etapa de alta presión alcanza la presión final, optimizando el rendimiento del sistema al no exceder los límites de compresión (40).

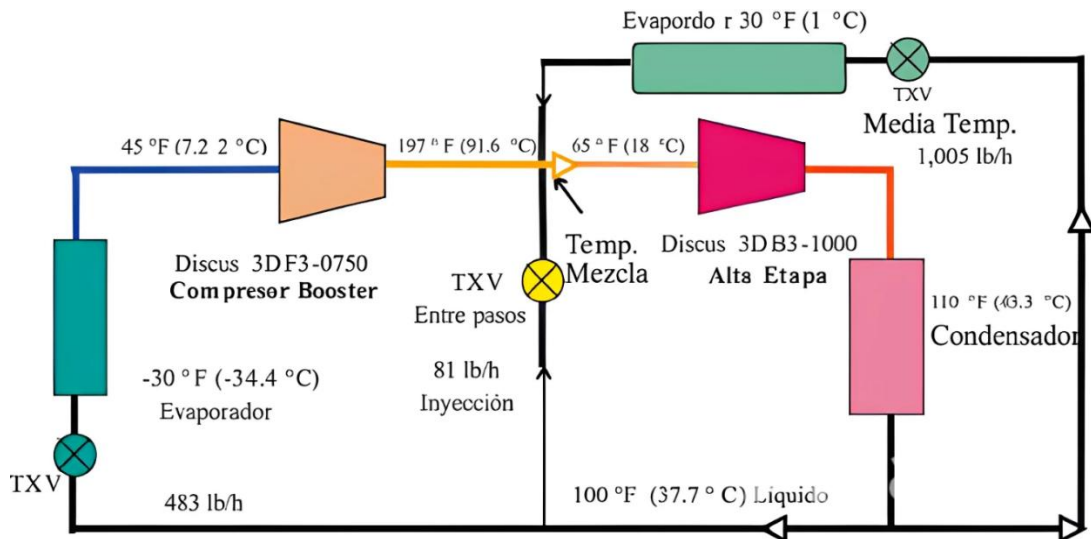
El sobrecalentamiento significativo del gas refrigerante en la descarga del booster requiere interenfriamiento, lográndose mediante la inyección de refrigerante líquido con un dispositivo de expansión. Los diagramas de sistemas booster en las Figuras 2 y 3 muestran estas configuraciones (39).

Figura 2.
Diagrama sistema booster. Inyección entre pasos



Nota. La figura representa el sistema booster con inyección entre pasos. Tomado de *Mundo HVACR (39)*.

Figura 3.
Sistema booster en baja temperatura

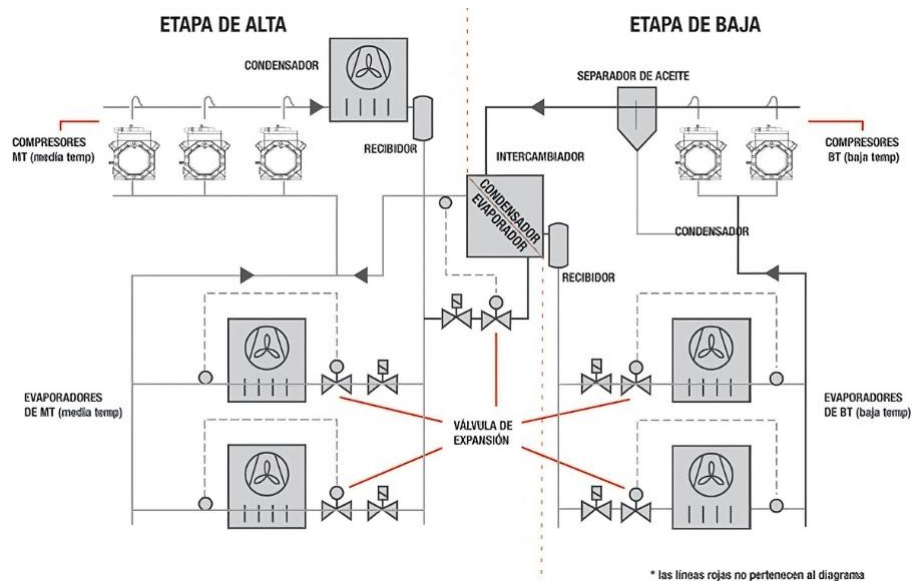


Nota. La figura representa un sistema booster en baja temperatura con aplicación en refrigeración de media temperatura. Tomado de *Mundo HVACR (39)*.

Un sistema de refrigeración en cascada (ver Figura 4) combina dos ciclos de refrigeración independientes (alta y baja temperatura) para alcanzar temperaturas ultrabajas (-70°C). El circuito de alta temperatura enfría al de baja temperatura, optimizando la eficiencia en aplicaciones que requieren gran estabilidad térmica. Este sistema aprovecha la compresión de vapor cuando la diferencia de temperatura entre condensador y evaporador es grande, transfiriendo calor del condensador al evaporador del segundo sistema. Los refrigerantes varían según el circuito. El sistema opera en dos etapas: la primera (alta temperatura) comprime y condensa el refrigerante, liberando calor y subenfriándose para luego enfriar el refrigerante del circuito de baja temperatura. La segunda etapa (baja temperatura) usa el condensador como intercambiador, enfriando el refrigerante a través del evaporador de la etapa alta, donde se subenfía antes de alcanzar las temperaturas ultrabajas en el evaporador de la etapa baja. (41).

Figura 4.

Sistema de refrigeración tipo cascada típico de supermercados



Nota. La figura representa un sistema de refrigeración, con sistemas de baja y media temperatura.

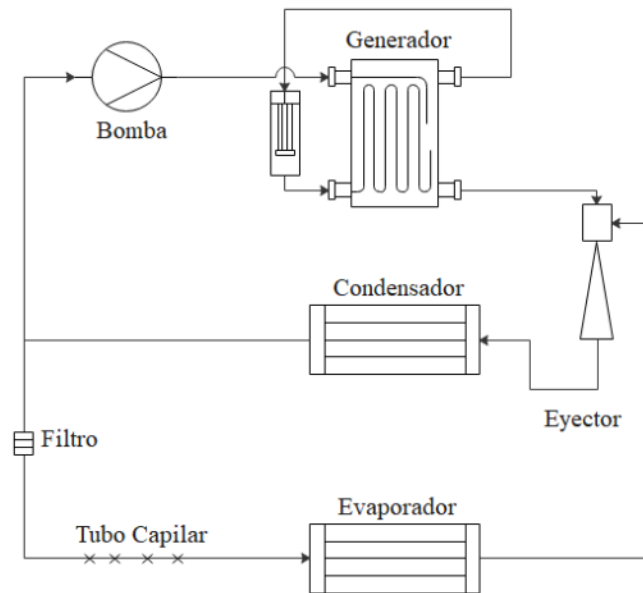
Tomado de *Mundo HVACR* (42).

2.1.3 El eyector en sistemas de refrigeración

Los eyectores tienen diversas aplicaciones en sistemas de refrigeración, como la reducción de la relación de compresión en sistemas de compresión de vapor, el aumento de la capacidad frigorífica en ciclos combinados de absorción con eyector y el logro de temperaturas más bajas en ciclos eyector-absorbedor (ver Figura 5.). La mayoría de los estudios se centran en simulaciones numéricas de eyectores de vapor con refrigerantes como R-134a y R-744, aplicados en refrigeración y aire acondicionado a temperaturas medias, incluyendo sistemas para automóviles compactos. Sin embargo, aún faltan estudios sobre su uso en equipos domésticos (43).

Figura 5.

Sistema de refrigeración por eyector



Nota. La figura representa un esquema de un sistema de refrigeración por eyector. Tomado de *Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica* (43).

2.1.6 Temperatura de condensación

La temperatura de condensación se refiere a la temperatura en que el refrigerante se transforma en líquido dentro del condensador, generando una presión de vapor que se denomina presión de condensación. En los condensadores enfriados por agua, esta temperatura suele estar entre 3 y 5 °C por encima de la del agua de refrigeración. Se trata de uno de los parámetros operativos más críticos en el ciclo de refrigeración, ya que, debido a la limitada variabilidad de otros parámetros de diseño en equipos prácticos, la temperatura de condensación influye directamente en el rendimiento del efecto refrigerante, así como en la seguridad, confiabilidad y consumo energético del sistema (44).

2.1.7 Temperatura de evaporación

La temperatura de evaporación es la que se alcanza cuando el refrigerante se transforma en vapor y hierve en el evaporador, lo cual está directamente relacionado con la presión de evaporación. Este parámetro es crucial en el funcionamiento del sistema de refrigeración, ya que generalmente se sitúa entre 2 y 3 °C por debajo de la temperatura del agua requerida. En condiciones ideales, la temperatura de evaporación debería coincidir con la temperatura de refrigeración; Sin embargo, en la práctica, el refrigerante suele evaporarse a una temperatura de 3 a 5 °C menor que la de refrigeración (44).

2.1.8 Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales en el sector de la refrigeración se refieren al conjunto de factores externos como la calidad del aire (incluyendo la presencia de polvo y gases agresivos), las temperaturas mínimas y máximas, la humedad, la altitud y la ubicación geográfica que influyen

en el rendimiento, la eficiencia y la vida útil de los equipos de refrigeración y aire comprimido. Estos factores determinan aspectos críticos como la capacidad operativa, la presión de trabajo, las necesidades de refrigeración y el consumo eléctrico, y requieren la adopción de medidas específicas (por ejemplo, filtración, ventilación, protección anticongelación y anticorrosión) para asegurar que los sistemas funcionen dentro de los parámetros establecidos en sus fichas técnicas (45).

2.1.4 Características principales del Refrigerante R404A

El refrigerante R-404A, un hidrofluorocarbono (HFC) compuesto por R-125, R-134a y R-143a, reemplaza al R-502 y R-22 en refrigeración comercial. No inflamable, de baja toxicidad e incoloro, con un punto de ebullición de $-46,45\text{ }^{\circ}\text{C}$, es seguro y clasificado como ASHRAE A1. Aprobado internacionalmente, es ideal para aplicaciones de baja y media temperatura, tanto en equipos nuevos como existentes. Ampliamente usado en supermercados, restaurantes, transporte refrigerado y más, es compatible con aceites de poliéster (POE), mejorando la durabilidad del compresor. Con excelente estabilidad química y termodinámica, ofrece alta capacidad y eficiencia similar al R-502. Debe almacenarse en recipientes herméticos, en lugares ventilados y lejos del calor. Aunque tiene un GWP de 3920, es un refrigerante confiable en el ámbito comercial e industrial. (46).

2.1.5 Características principales del Refrigerante R744 (CO₂)

El R-744 (CO₂) es un refrigerante natural, eficiente y sostenible, con un impacto ambiental mínimo y un GWP de 1. Es incoloro, inodoro, insípido, no inflamable y no tóxico, lo que le confiere una gran seguridad en su manejo. Su alta densidad y capacidad de transferencia de calor

le confieren una gran eficiencia energética, con un COP comparable o incluso superior al de otros refrigerantes. Se utiliza en diversas aplicaciones, desde refrigeradores comerciales hasta agricultura sostenible, y su fácil reciclaje lo convierte en una opción ideal para la economía circular. Además, su compatibilidad con energías renovables lo posiciona como el refrigerante del futuro. (47).

2.1.6 Indicador de impacto ambiental, Total Equivalent Warming Impact (TEWI)

El TEWI (Total Equivalent Warming Impact) es un indicador clave para evaluar el impacto total de un sistema de refrigeración en el calentamiento global. Se calcula sumando el impacto directo (emisiones de refrigerante) e indirecto (emisiones por consumo de energía). El TEWI considera todo el sistema y varía según factores como el tiempo de operación y la eficiencia. Aunque el GWP mide el impacto directo del refrigerante, el TEWI también incluye el consumo energético, que puede ser más determinante que el refrigerante en sí. Para reducir el TEWI, se busca optimizar la eficiencia energética del sistema, reducir fugas y la cantidad de refrigerante, y mejorar la recuperación y regeneración de los fluidos (48).

2.1.7 Productos cárnicos

La conservación de la carne se basa en inhibir su deterioro, principalmente por causas microbiológicas, oxidación de lípidos y autólisis enzimática. Para ello, se utilizan métodos de control de temperatura. El enfriamiento, crucial tras el sacrificio, reduce la temperatura del canal a 4°C en 4 horas, logrando mejor calidad microbiológica mediante inmersión en agua fría (0-4°C) o convección de aire. La refrigeración conserva la carne fresca a 0-4°C por 5-7 días. La congelación, ideal para largo plazo, transforma el agua en hielo a -18°C o menos, aunque no

detiene completamente las reacciones enzimáticas y oxidativas, siendo crucial la velocidad de congelación. El superenfriado, enfriando a 1-2 grados por debajo del punto de congelación, logra cristalización parcial del hielo, extendiendo la vida útil hasta cuatro veces al combinarse con una congelación inicial a -15°C (49).

2.2 Marco referencial

A continuación, se expondrán investigaciones relacionadas que sustentan esta investigación.

2.2.1 Referencias a nivel internacional

Beniwal & Tyagi (50) analizaron termodinámicamente un ciclo transcrito de CO_2 . Con el fin de optimizar el desempeño del sistema de CO_2 , se integró un sistema de refrigeración por absorción de vapor, impulsado por el calor generado a la salida del compresor. Además, para mitigar los efectos de las altas temperaturas en el contexto climático de la India, se incorporó un sistema de enfriamiento evaporativo por punto de rocío para disipar el calor del enfriador de gas.

Se llevó a cabo un análisis termodinámico y económico del sistema integrado propuesto. Se evaluó el efecto de diversos parámetros de rendimiento, como la temperatura ambiente de bulbo seco, la humedad relativa y la temperatura del evaporador, sobre el desempeño global del sistema. Comparado con el caso base, el coeficiente de rendimiento de los sistemas híbridos mejoró entre un 40% y un 270%, dependiendo de las condiciones climáticas. Además, el sistema propuesto logró un costo operativo de aproximadamente 0.024 $\$/\text{kWh}$, significativamente menor que los 0.05 $\$/\text{kWh}$ del caso base.

Jiang et al. (51) desarrollaron un modelo termodinámico para analizar la influencia de diversos parámetros operativos y se comparó con un sistema de refrigeración básico de refuerzo (BRC) y con un sistema de compresión en paralelo (PRC). Además, se examinó el impacto de los parámetros de inyección de vapor en el desempeño del sistema propuesto. Los resultados indicaron que la presión intermedia tiene un impacto limitado en el BRC, mientras que tanto el PRC como el SRC presentan valores óptimos para este parámetro. La eficiencia de los tres sistemas puede mejorarse significativamente mediante la optimización de la presión de descarga y la presión intermedia. Se observó que el valor óptimo de la presión relativa para la inyección de vapor se mantiene constante en aproximadamente 1.15. El coeficiente de rendimiento máximo (COP_{max}) del SRC mostró una mejora significativa del 23.99% al 32.14% en comparación con el BRC, y del 14.44% al 20.07% frente al PRC, bajo las condiciones de trabajo evaluadas. En conclusión, este estudio confirma el potencial del ciclo propuesto para mejorar el rendimiento y proporciona una base teórica para su aplicación práctica.

Li et al. (52) presentaron un modelo teórico de estado estable para sistemas de refrigeración con refuerzo de CO₂, validado mediante mediciones de campo realizadas en tres supermercados del Reino Unido. Se utilizaron al máximo los datos disponibles para mejorar tanto la precisión como la interpretabilidad física del modelo. Entre los métodos propuestos para inferir variables no medidas se incluyen la temperatura de salida del condensador, la temperatura de evaporación, la eficiencia isentrópica del compresor y el caudal másico del compresor. Los resultados revelan que estos métodos de inferencia aumentan significativamente la capacidad del modelo al garantizar la integridad de los datos, respetar las leyes termodinámicas y mejorar la precisión al reflejar valores reales en tiempo real, en lugar de depender de aproximaciones. El modelo propuesto demostró una

precisión satisfactoria, validada mediante mediciones de alta resolución realizadas a lo largo de un año en tres supermercados reales.

Dai et al. (53) realizaron una evaluación integral del ciclo de vida, considerando la exergía, la huella de carbono y el costo, para los sistemas de refrigeración propuestos. Se compararon con un sistema de refrigeración de refuerzo de CO₂ de referencia (BASE) y con un sistema tradicional que emplea R404A. Los resultados muestran que la eficiencia exergética anual del sistema TS-DMS (subenfriamiento mecánico dedicado de triple etapa) es entre un 11.92% y un 18.48% superior a la del sistema BASE. Además, el desempeño climático del ciclo de vida (LCCP) mejora significativamente, reduciendo las emisiones de carbono en un 6.87% en Haikou en comparación con el sistema BASE. Desde el punto de vista económico, el costo del ciclo de vida (LCC) del TS-DMS se reduce en un 6.8% frente al sistema BASE. Estos resultados confirman que los sistemas MS-DMS son más adecuados para regiones cálidas, ya que logran una mayor reducción de emisiones y un menor costo operativo en comparación con el BASE. Se analizaron ocho ciudades representativas ubicadas en diversas zonas climáticas de China para validar el desempeño de los sistemas, concluyendo que el uso de MS-DMS reduce de manera eficiente las pérdidas irreversibles y optimiza el rendimiento en términos de sostenibilidad y costos.

Con el aumento de la conciencia ambiental y la implementación de regulaciones más rigurosas, Brasil se ha propuesto adoptar tecnologías que fomenten la eficiencia energética y reduzcan la cantidad de amoníaco en circulación en los sistemas de refrigeración. En este contexto, una empresa multinacional francesa del sector alimenticio ha contratado a Mayekawa de Brasil para desarrollar el sistema de refrigeración de su nueva fábrica en Brasil. Esta fábrica prioriza

instalaciones con baja carga de refrigerantes y el uso de refrigerantes naturales. Durante los últimos dos años, el Grupo Mayekawa se ha enfocado en el desarrollo de sistemas de refrigeración indirecta que emplean CO₂ Brine para enfriar, congelar productos y climatización. En esta configuración, la carga de amoníaco se reduce al utilizar CO₂ como refrigerante líquido secundario (Brine), lo que resulta en una optimización de la eficiencia energética y una disminución en el nivel de toxicidad. Esto, a su vez, mejora la seguridad operativa del sistema de refrigeración (54).

2.2.2 Referencias a nivel nacional

Pardo et al. (55) analizaron las características y el uso de gases refrigerantes en los sectores cárnico, lácteo y hortofrutícola en Colombia. Los datos provienen de diversas fuentes primarias, recopiladas mediante encuestas realizadas a empresas de estas tres cadenas productivas en diferentes departamentos del país. Los resultados muestran que el manejo y uso de los refrigerantes es similar en los tres sectores, predominando el uso de gases como R22, R404A, R507 y R134a. Se encontró que el 80% de los refrigerantes utilizados son tradicionales, mientras que el 20% corresponde a refrigerantes naturales, especialmente en grandes empresas que han adoptado tecnologías más sostenibles y de menor impacto ambiental. El sector cárnico es el mayor consumidor de gases refrigerantes, seguido por el lácteo y el hortofrutícola. En la mayoría de los casos, excepto en la cadena hortofrutícola, la carga de refrigerante utilizada es menor a 100 kilogramos, y los cambios de refrigerante se realizan en periodos de entre seis y doce meses. Se concluyó que el mantenimiento preventivo y la detección temprana de fugas son esenciales para garantizar un uso eficiente y racional de los refrigerantes. Sin embargo, la reutilización de los refrigerantes no es una práctica común en estos sectores. Los hallazgos de este estudio son relevantes para evaluar cómo las empresas del sector alimentario han implementado prácticas más

sostenibles en sus procesos de refrigeración, esenciales para la conservación y procesamiento de productos. Además, destacan la importancia de establecer controles y prácticas de mantenimiento que fomenten el uso de tecnologías más limpias y reduzcan el impacto ambiental.

Moreno M (56) realizó una investigación para Supermercados La Vaquita, específicamente en el área de refrigeración industrial. Se identificó la necesidad de implementar un plan de mejora en los sistemas de refrigeración de la compañía, que llevan operando más de 15 años de manera continua sin actualizaciones tecnológicas ni renovación de equipos. El trabajo se basa en una metodología de investigación mixta y exploratoria, recopilando datos primarios y secundarios, con la asesoría de expertos en refrigeración industrial del país. Estos especialistas, que asesoran a múltiples supermercados, proporcionaron información sobre los sistemas de refrigeración que ofrecen mayores beneficios económicos, como el ahorro de energía y la protección del medio ambiente. Los resultados obtenidos revelaron hallazgos significativos que podrían beneficiar tanto a Supermercados La Vaquita como al medio ambiente. La implementación de sistemas de refrigeración con tecnologías modernas, utilizando refrigerantes como CO₂ y R290, permitiría reducir el consumo de energía entre un 25% y un 35%. Además, al adoptar sistemas de refrigeración sostenibles, la empresa podría aprovechar beneficios como la exención del IVA en los equipos adquiridos para la instalación de la cadena de frío, lo que representa un incentivo económico adicional proporcionado por el gobierno nacional.

Londoño P (57) concluyó que el uso de gases naturales en los sistemas de refrigeración representa una de las principales alternativas para mitigar el impacto industrial de la refrigeración en el medio ambiente, siendo una faceta fundamental en la lucha contra el cambio climático. Estos

gases naturales son sustancias que afectan muy poco la capa de ozono y no contribuyen significativamente al cambio climático. Además, son mucho más económicos en comparación con los refrigerantes convencionales.

2.2.3 Referencias a nivel departamental

Vergara et al. (58) evaluaron el desempeño de cuatro configuraciones de sistemas de refrigeración tipo booster con CO₂ bajo las condiciones climáticas de Bucaramanga, Colombia. Las configuraciones analizadas incluyen el sistema convencional, con compresor en paralelo, basado en eyector y en cascada con NH₃/CO₂. Mediante un análisis detallado de energía, exergía y el impacto ambiental (utilizando el Índice Total Equivalente de Calentamiento, TEWI), se determinó que la configuración basada en eyector es la más eficiente energéticamente, logrando una reducción del 13.2% en el consumo anual de energía frente al sistema convencional. Por su parte, el sistema en cascada mostró la menor destrucción de exergía a temperaturas superiores a 26 °C, lo que destaca su efectividad en climas cálidos. Asimismo, el sistema basado en eyector presentó consistentemente la mayor eficiencia de la segunda ley en todo el rango de temperaturas analizado. En términos de impacto ambiental, esta configuración también destacó al registrar el TEWI más bajo, con una disminución del 14.36%. Estos resultados resaltan la importancia de seleccionar configuraciones de refrigeración óptimas que se ajusten a las condiciones climáticas locales para maximizar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental.

3. Metodología

3.1 Descripción de los sistemas

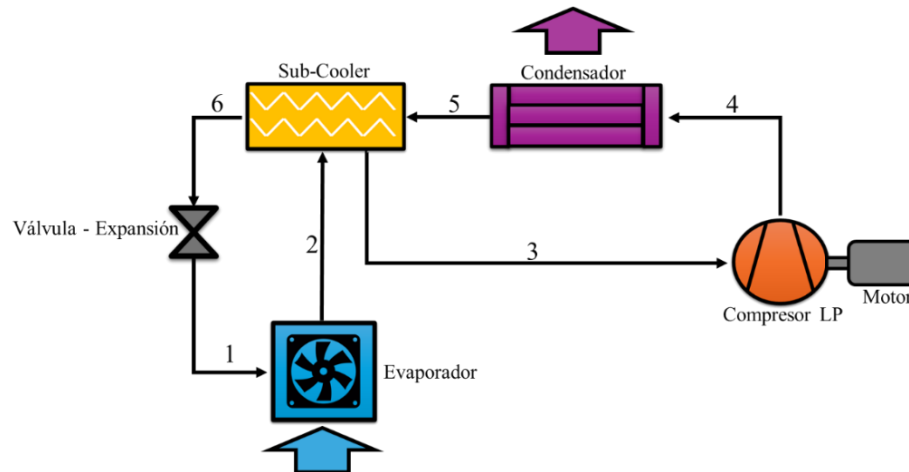
Se analizaron y compararon cuatro sistemas de refrigeración distintos. Se estudió un ciclo básico de refrigeración con el refrigerante convencional R404A, ampliamente utilizado en la industria, para establecer una línea base de comparación. Posteriormente, se evaluó un ciclo básico de refrigeración utilizando el refrigerante natural R744 (CO₂), buscando comprender el potencial de esta alternativa ecológica en un esquema de refrigeración tradicional. Además, se analizó un ciclo de refrigeración en cascada R744/R717, combinando las ventajas de ambos refrigerantes en un sistema de dos etapas, buscando un alto rendimiento en aplicaciones de baja temperatura. Finalmente, se estudió un innovador sistema de refrigeración con eyector y refrigerante natural R744 (CO₂), con el objetivo de determinar las posibles mejoras en eficiencia que este componente podía aportar al ciclo.

3.1.1 Ciclo de refrigeración básico con R404A

El ciclo de refrigeración básico que emplea el refrigerante R404A (ver figura 6) está compuesto por varios elementos fundamentales que trabajan en conjunto para garantizar un adecuado enfriamiento. Entre estos componentes se encuentran el evaporador, el enfriador subcooler, el condensador, el compresor y la válvula de expansión. Cada uno de estos elementos desempeña un papel clave en el proceso de refrigeración, permitiendo el cambio de fase y la transferencia de calor necesaria para mantener la eficiencia del sistema.

Figura 6.

Diagrama del sistema de refrigeración ciclo básico con R404A



El refrigerante entra al evaporador (1) como mezcla líquido-vapor a baja presión, absorbe calor del ambiente y se evapora completamente, saliendo como vapor saturado (2). Luego es aspirado por el compresor de baja presión (3), donde se incrementan su presión y temperatura, saliendo como vapor sobrecalentado (4). Este vapor entra al condensador (5), donde se cede calor al ambiente y el refrigerante se condensa a líquido a alta presión. Posteriormente, pasa por un subenfriador (6), donde se reduce su temperatura por debajo del punto de saturación, aumentando la eficiencia y evitando formación de vapor prematuro. Finalmente, el líquido subenfriado atraviesa una válvula de expansión, disminuyendo bruscamente su presión y temperatura, reingresando al evaporador como mezcla bifásica y repitiendo el ciclo.

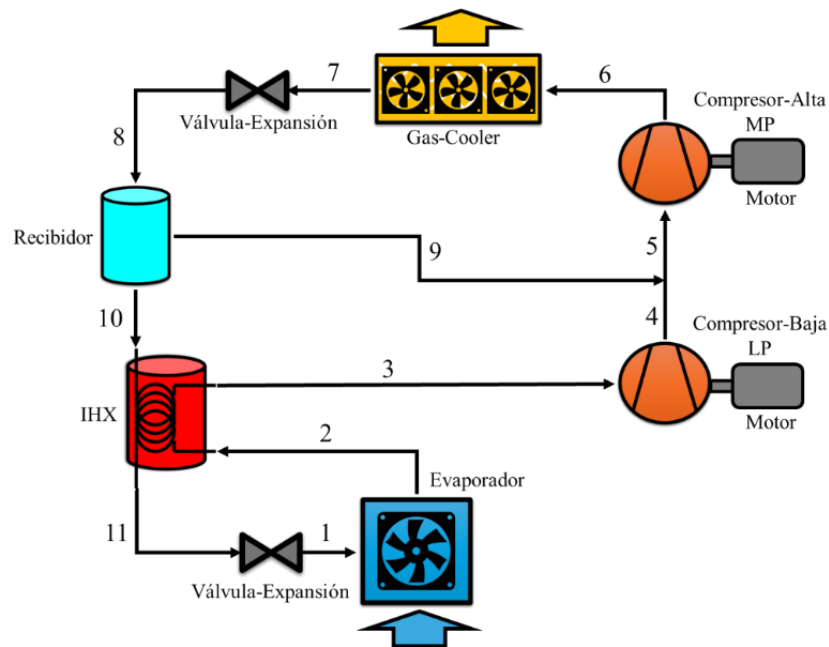
3.1.2 Ciclo de refrigeración básico con R744 (CO₂)

El ciclo de refrigeración básico que utiliza el refrigerante R744 (CO₂) (ver figura 7) está conformado por una serie de componentes esenciales que trabajan en conjunto para garantizar un

adecuado enfriamiento y eficiencia térmica. Entre estos elementos se encuentran el evaporador, el gas cooler, el intercambiador de calor (IHX), el compresor de alta, el compresor de baja, el recibidor y dos válvulas de expansión. Cada uno de estos elementos cumple una función específica dentro del proceso, asegurando el correcto funcionamiento del sistema de refrigeración.

Figura 7.

Diagrama del sistema de refrigeración ciclo básico con R744 (CO₂)



En este ciclo transcítico con CO₂ y compresión en dos etapas en serie, el refrigerante sale del evaporador como vapor a baja presión (1→2), entra al IHX donde el vapor de succión se sobrecalienta al tomar calor del líquido de alta (2→3 y 10→11), y ese líquido se subenfria; el vapor sobrecalentado es comprimido por el compresor de baja (LP) hasta presión intermedia (3→4) y, en el colector interetapa (5), se mezcla con el vapor que viene del recibidor (9); el compresor de alta (MP) eleva ese caudal a la presión de descarga transcítica (5→6), el gas-cooler rechaza calor

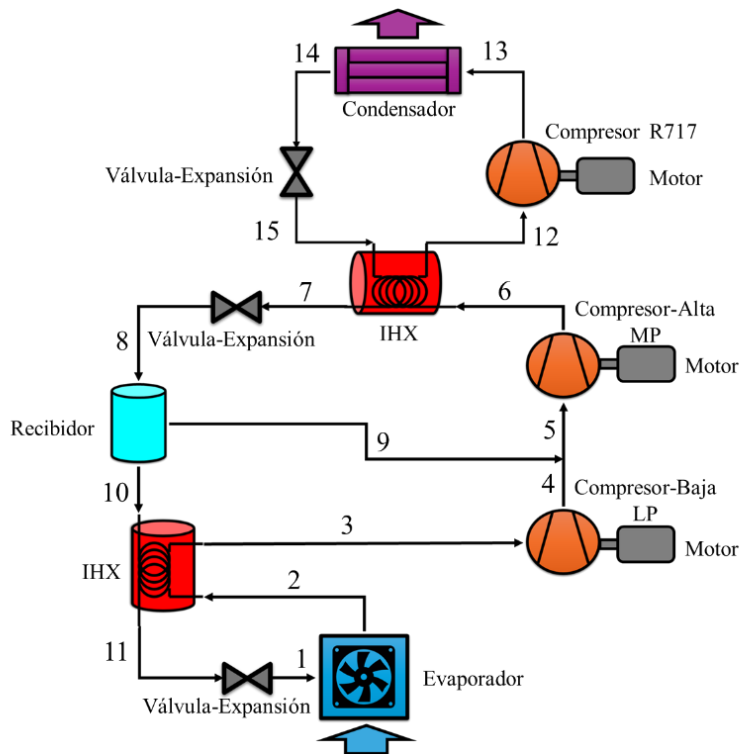
al ambiente (6→7), y luego una válvula de alta expande isoentálpicamente hasta la presión del receptor (7→8), generando mezcla bifásica que se separa (vapor arriba, líquido abajo); el vapor del receptor se envía a la succión interetapa (9) para ser comprimido por MP, mientras el líquido se conduce al IHX para subenfriarse (10→11) y, tras la válvula de baja, se expande hasta la presión de evaporación (11→1) entrando al evaporador donde absorbe carga térmica, cerrando el ciclo.

3.1.3 Ciclo de refrigeración tipo cascada R744/R717(NH₃)

El ciclo de refrigeración en cascada R744/R717 (ver figura 8) es un sistema avanzado que combina dos ciclos de refrigeración interconectados para mejorar la eficiencia térmica y el rendimiento en aplicaciones de baja temperatura. Este sistema está compuesto por diversos componentes fundamentales, entre ellos un evaporador, un condensador, dos intercambiadores de calor (IHX), un compresor de alta presión para CO₂, un compresor de baja presión para CO₂, un compresor para NH₃, un receptor y tres válvulas de expansión. La combinación de estos elementos permite que el ciclo de CO₂ se conecte de manera eficiente con el ciclo de NH₃, facilitando un proceso de transferencia de calor que maximiza el aprovechamiento energético y mejora la estabilidad térmica del sistema.

Figura 8.

Diagrama del sistema de refrigeración en cascada R744/R717



El ciclo de refrigeración en cascada combina dos ciclos básicos, uno de CO_2 y otro de Amoníaco (NH_3), para lograr un enfriamiento eficiente. El ciclo inicia en el evaporador, donde el CO_2 absorbe calor y se evapora. Luego, el gas caliente pasa por un intercambiador de calor (IHX) antes de ser comprimido en dos etapas (compresor de baja y alta presión). El CO_2 a alta presión cede calor al ciclo de NH_3 en otro IHX, condensándose y pasando por una válvula de expansión. Simultáneamente, el NH_3 se comprime, condensa y se expande antes de mezclarse con el CO_2 condensado en el primer IHX. Finalmente, el CO_2 evaporado regresa al primer IHX y al evaporador, repitiendo el ciclo. En esencia, el ciclo en cascada une los ciclos básicos de NH_3 y

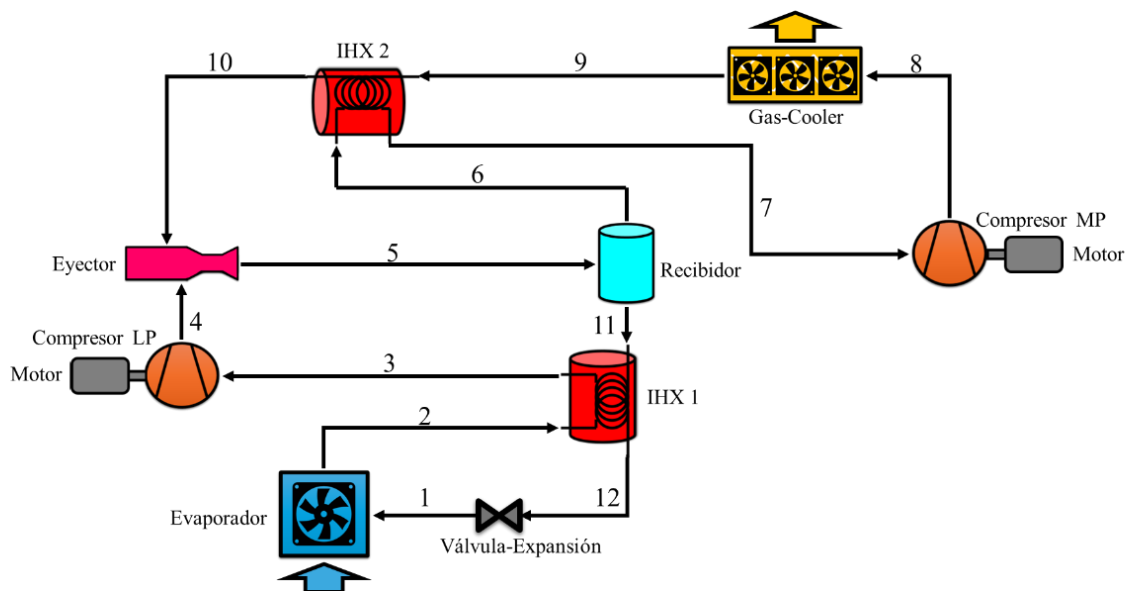
CO₂, reemplazando el evaporador del NH₃ y el gas-cooler(condensador) del CO₂ por intercambiadores de calor (IHX).

3.1.4 Ciclo de refrigeración con eyector R744

El ciclo de refrigeración con eyector (ver figura 9) es un sistema avanzado que optimiza el rendimiento energético mediante la integración de un eyector en su configuración. Este sistema está compuesto por diversos elementos clave, entre los que destacan el evaporador, una válvula de expansión, dos intercambiadores de calor (IHX), un recipiente, dos compresores, un gas cooler y el eyector, que desempeña un papel crucial en la mejora de la eficiencia del ciclo. La combinación de estos componentes permite que el refrigerante circule de manera controlada a lo largo del sistema, garantizando un proceso de refrigeración eficiente y estable.

Figura 9.

Diagrama del sistema de refrigeración con eyector R744



El ciclo de enfriamiento inicia en el evaporador, donde el refrigerante absorbe calor y se evapora. Este vapor pasa por un intercambiador de calor (IHX) antes de ser comprimido. El refrigerante comprimido se dirige al eyector, un dispositivo termodinámico que permite recuperar parte de la energía del flujo a alta presión proveniente del Gas-Cooler para succionar refrigerante a baja presión desde el evaporador, reduciendo así la carga de trabajo del compresor de alta presión y mejorando la eficiencia global del ciclo. El eyector canaliza el flujo primario desde el IHX2 (10) y lo expande para generar un efecto de succión que mezcla con el flujo secundario del evaporador.

3.2 Detalles del modelo

A continuación, describe el proceso seguido para desarrollar el modelo de simulación de los sistemas analizados. Se incluyen los cálculos de balances de energía y masa para cada componente involucrado en el ciclo correspondiente, así como el balance de exergía. Además, se detallan las condiciones de operación y los criterios utilizados para la validación del modelo.

3.2.1 Balances de energía y masa

Los cuatro modelos de los sistemas, previamente definidos, fueron elaborados utilizando la versión 11.8 del software Engineering Equation Solver (EES). Las propiedades termofísicas del CO₂ fueron determinadas utilizando la base de datos del software EES. Los balances de energía para cada componente del sistema se calcularon y se presentan a continuación.

El flujo másico se determinó a partir de los cálculos de energía en el evaporador, utilizando la ecuación 1.

$$\dot{m}_{ent} * h_{ent} + \dot{Q}_{Evap} = \dot{m}_{sal} * h_{sal} \quad (1)$$

El flujo de calor disipado en el condensador/gas cooler se estimó con la ecuación 2.

$$\dot{m}_{ent} * h_{ent} = \dot{m}_{sal} * h_{sal} + \dot{Q}_{Conden/Gas\ Cooler} \quad (2)$$

La potencia ideal de los compresores se calculó con la ecuación 3, mientras que el consumo de energía eléctrica se obtuvo considerando la eficiencia global en la ecuación 4.

$$\dot{m}_{ent} * h_{ent} + \dot{W}_{Comp,s} = \dot{m}_{sal} * h_{sal,s} \quad (3)$$

$$\dot{W}_{Comp,e} * \eta_{Global} = \dot{W}_{Comp,s} \quad (4)$$

Además, las ecuaciones 5, 6 y 7 muestran los cálculos de energía en las válvulas de expansión, los puntos de mezcla y los receptores, respectivamente.

$$\dot{m}_{ent} * h_{ent} = \dot{m}_{sal} * h_{sal} \quad (5)$$

$$\dot{m}_{1,ent} * h_{1,ent} + \dot{m}_{2,ent} * h_{2,ent} = \dot{m}_{sal} * h_{sal} \quad (6)$$

$$\dot{m}_{ent} * h_{ent} = \dot{m}_{1,sal} * h_{1,sal} + \dot{m}_{2,sal} * h_{2,sal} \quad (7)$$

Las ecuaciones 8 y 9 corresponden al flujo de calor transferido en los intercambiadores de calor internos, y la ecuación 10 se utiliza para calcular la temperatura de salida del flujo frío en el IHX de los ciclos básico de CO₂ y Eyector.

$$\dot{m}_{c,ent} * h_{c,ent} + \dot{Q}_{IHX} = \dot{m}_{c,sal} * h_{c,sal} \quad (8)$$

$$\dot{m}_{h,ent} * h_{h,ent} = \dot{Q}_{IHX} + \dot{m}_{h,sal} * h_{h,sal} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{IHX} = \frac{\dot{Q}_{IHX}}{\dot{Q}_{IHX,max}} \quad (10)$$

Donde el flujo de calor máximo se calcula teniendo en cuenta el delta máximo de temperatura entre la corriente caliente y fría, teniendo en cuenta el flujo másico y el calor específico del fluido con menor capacidad calorífica. Para determinar las condiciones de salida del eyector, se utilizó un modelo propuesto por Köhler (59) y Elbel y Hrnjak (60) en la ecuación 11. Estos autores definieron la eficiencia del eyector como la relación entre la energía de expansión

recuperada y la máxima energía de expansión posible, una definición que concuerda entre ambos estudios.

$$\eta_{Ejector} = \varphi * \frac{h(P_{diff(sal),Ssec(ent)}) - h_{sec(ent)}}{h_{pri(ent)} - h(P_{diff(sal),Spri(ent)})} \quad (11)$$

En la ecuación 12, la variable φ representa la relación entre el flujo del fluido primario y el flujo del fluido secundario que circulan a través del eyector.

$$\varphi = \frac{\dot{m}_{secundario}}{\dot{m}_{primario}} \quad (12)$$

El rendimiento de los sistemas y el consumo total de energía se calcularon utilizando las ecuaciones 13 y 14, respectivamente.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{MT} + \dot{Q}_{LT}}{\dot{W}_{Total}} \quad (13)$$

$$\dot{W}_{Total} = \sum \dot{W}_{Comp,e} + \sum \dot{W}_{Ventiladores,Luces,Otros} \quad (14)$$

En las ecuaciones mencionadas, m representa el flujo másico, h la entalpía del fluido, \dot{Q}_{Ev} la capacidad de enfriamiento, $\dot{Q}_{Cond/Cooler}$ el flujo de calor disipado, $\dot{W}_{Comp,s}$ el consumo de energía ideal del compresor, $\dot{W}_{Comp,e}$ el consumo de energía eléctrica y η_{Global} la eficiencia global del compresor.

Las eficiencias generales de los compresores de baja presión (LP), media presión (MP), y de amoníaco (NH₃), tanto en condiciones subcríticas como supercríticas, se establecieron en función de la relación de presión y la temperatura de entrada, tal como se detalla en la Tabla 4.

Adicionalmente, \dot{Q}_{IHx} representa el flujo de calor intercambiado en los intercambiadores de calor internos presentes en los sistemas correspondientes. En cuanto al modelo de eyector

empleado en la Ecuación 11, $h(P_{diff(sal),Ssec(ent)})$ denota la entalpía específica a la salida del eyector, asumiendo un proceso isentrópico desde la entrada del flujo secundario. $h_{sec(ent)}$ es la entalpía del fluido secundario a la entrada del eyector. $h(P_{diff(sal),Spri(ent)})$ es la entalpía específica a la salida del eyector, considerando un proceso isentrópico desde la entrada del flujo primario, y $h_{pri(ent)}$ es la entalpía del fluido primario a la entrada del eyector.

Por otra parte, \dot{Q}_{MT} y \dot{Q}_{LT} representan las cargas térmicas de media y baja temperatura en los evaporadores respectivos. El consumo energético total de los sistemas \dot{W}_{Total} abarca tanto el consumo de energía de los compresores como el consumo estimado de ventiladores, iluminación y otros componentes. En cada elemento, el flujo másico total se ajusta a la ley de conservación de la masa, lo que se expresa como la igualdad entre la suma de los flujos másicos entrantes $\sum \dot{m}_{ent}$ y la suma de los flujos másicos salientes $\sum \dot{m}_{sal}$.

3.2.3 Impacto ambiental

La evaluación de la configuración se realizó mediante el cálculo del Impacto Total Equivalente al Calentamiento (TEWI). El TEWI total se compone del TEWI directo y el TEWI indirecto. El TEWI directo considera el efecto de las fugas de refrigerante, mientras que el TEWI indirecto se relaciona con las emisiones generadas por el consumo de energía del sistema de refrigeración, específicamente del sector de generación eléctrica del país en cuestión (61). El TEWI directo se calcula sumando los resultados obtenidos de las ecuaciones 25 y 26, mientras que el TEWI indirecto se determina mediante la ecuación 27.

$$[GWP * L * m * n] \quad (15)$$

$$[GWP * m * (1 - \alpha_{Recuperado})] \quad (16)$$

$$[n * E_{anual} * \beta] \quad (17)$$

En estas ecuaciones, L representa el porcentaje de fugas, m indica la cantidad de refrigerante, n es la vida útil del sistema en años, $\alpha_{Recuperado}$ es el factor de recuperación (un valor entre 0 y 1), E_{anual} es el consumo anual de energía del sistema, y β es el factor de emisión indirecta expresado en kilogramos de CO₂ por kWh. En este análisis, se consideró una tasa de fuga (L) del 15% (61). La cantidad de refrigerante se determinó como 1,2 kg por cada kW de capacidad de enfriamiento del sistema (62) el cual en este caso son 100 kW. Se asumió una vida útil (n) de 10 años (63), (64), una tasa de recuperación ($\alpha_{Recuperado}$) del 0.95 (62), (61) y un factor de emisión (β) de 0,112378 kg de CO₂ por kWh para Colombia (65).

3.2.4 Consideraciones y condiciones de funcionamiento

Los modelos se desarrollaron asumiendo las siguientes condiciones:

Los modelos operan en estado estacionario.

Las diferencias de energía potencial y cinética son despreciables.

Las caídas de presión se consideran despreciables.

Los tubos de conexión son adiabáticos.

Los procesos de los dispositivos de expansión son isoentálpicos.

Los eyectores son adiabáticos.

Para el desarrollo de los modelos, se consideraron diversas condiciones de operación y parámetros específicos. La Tabla 1 resume las condiciones de operación utilizadas.

Tabla 1.

Condiciones de operación

	Convencional R404A	Básico CO₂	Cascada CO₂	Eyector CO₂
Q_{evap} [kW]	100	100	100	100
DT IHX [°C]	7,14	7,028	7,028	7,104
Temp Amb [°C]	25	25	25	25
e IHX	0,14	0,47	0,47	0,2

Nota. Condiciones de operación que se usaron para realizar los cálculos.

La eficiencia del eyector se fijó en 0,3 (66). Para asegurar una evaluación uniforme de todos los sistemas, se asumió una temperatura ambiente de 25°C.

Como se observa en la Tabla 1, en cuanto al diferencial de los intercambiadores de calor se tomó 7,14 para el convencional, 7,028 para el básico y cascada, 7,104 para el eyector. Se variaron manualmente las eficiencias de los IHX con el fin de obtener un delta de temperatura de aproximadamente 7 °C, esto para asegurar un sobrecalentamiento. La capacidad de evaporación se unificó en 100 kW para todos los sistemas analizados.

La efectividad de los intercambiadores de calor internos (IHX) también varió según el tipo de sistema. Para los sistemas básico y en cascada, se empleó una efectividad de 0,47; para el sistema convencional, fue de 0,14; y para ambos IHX del sistema con eyector, se estableció en 0,2. Finalmente, se distribuyó el consumo de energía de los componentes, asignando el 85% a los compresores y el 15% restante a los ventiladores (67).

3.2.5 Procedimiento de validación de modelos

La validez de estos modelos radica principalmente en la precisión con la que calculan el gasto energético de las configuraciones para satisfacer la demanda de refrigeración. Por ello, se validaron mediante la creación de modelos de eficiencia integral que consideraron las necesidades de enfriamiento, el consumo de energía y el COP informado por diversos compresores comerciales (68). La selección de los distintos compresores, presentados en la Tabla 2, se fundamentó en la capacidad de enfriamiento requerida y el sobrecalentamiento detallado en la Tabla 1.

Tabla 2.

Características de los compresores

Modelo	Tipo	Refrigerante
(a) HGX88e/2400-4	Semihermético	R404A
(b) UL-HGX34e/210 S 10 CO ₂	Semihermético	R744
(c) HGX24/70-4 ML CO ₂ T	Semihermético	R744
(d) UL-HGX24e/90 S 5 CO ₂ LT	Semihermético	R744
(e) HGX22e/130-4 S CO ₂	Semihermético	R744
(f) F4NH ₃	Abierto	R717

Nota. Características de los compresores. Tomado del catálogo de VAP (68).

Como se aprecia en la Tabla 2, para el sistema básico convencional de R404A, se optó por el compresor (a), que presenta una capacidad de refrigeración de 47,50 kW y opera en condiciones subcríticas a una temperatura de evaporación de -28°C; en el sistema básico de CO₂ y su variante con eyector, se seleccionó el compresor (b), que presenta una capacidad de refrigeración de 52,10 kW y opera en condiciones subcríticas a una temperatura de evaporación de -28°C como compresor de baja presión LP, y el compresor (c), que presenta una capacidad de refrigeración de 21,30 kW y opera en condiciones subcríticas y transcricas a una temperatura de evaporación de

0°C como compresor de alta presión MP; para el sistema tipo cascada de CO₂, se eligieron el compresor (e), que presenta una capacidad de refrigeración de 27,7 kW y opera en condiciones subcríticas a una temperatura de evaporación de -25,0°C como compresor de baja presión LP, y el compresor (d), que presenta una capacidad de refrigeración de 28,20 kW y opera en condiciones subcríticas a una temperatura de evaporación de -12°C como compresor de alta presión MP; finalmente, el sistema auxiliar de NH₃ integrado en el sistema cascada empleó el compresor (f), que presenta una capacidad de refrigeración de 39,6 kW y opera a una temperatura de evaporación de 5°C.

3.3 Detalles de la temperatura ambiente de Bucaramanga

Se recopilaron datos de temperatura en Bucaramanga durante un período de 24 horas para cada mes del año 2023. La fuente de estos datos fue la estación meteorológica de la Universidad Industrial de Santander, la cual registró la temperatura de bulbo seco y otros parámetros cada 10 minutos desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre. Este registro exhaustivo permitió un análisis detallado de las variaciones térmicas en la ciudad, cuyos resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.*Datos de temperatura ambiente y frecuencia*

T. Amb	# Datos	# Horas/Año	% Tiempo
19	31	6,13	0,07%
20	615	121,63	1,39%
21	1898	375,38	4,29%
22	4711	931,73	10,64%
23	6800	1344,89	15,35%
24	6487	1282,99	14,65%
25	5458	1079,47	12,32%
26	4359	862,12	9,84%
27	3625	716,95	8,18%
28	3363	665,13	7,59%
29	3150	623,00	7,11%
30	2234	441,84	5,04%
31	1099	217,36	2,48%
32	402	79,51	0,91%
33	55	10,88	0,12%
34	5	0,99	0,01%
Total	44292	8760,0	100%

Nota. Datos de temperatura ambiente y frecuencia. Tomado de Revista UIS Ingeniería (58)

Según los datos presentados en la Tabla 3, la temperatura más común en Bucaramanga durante el año 2023 fue de 23 °C, registrándose durante 1344,89 horas, lo que representa un 15,35% del tiempo total. Le siguen en frecuencia las temperaturas de 24 °C y 25 °C, con un 14,65% y un 12,32% de frecuencia respectivamente. Esta información será utilizada para analizar cómo la temperatura ambiente influye en el rendimiento y el consumo energético de los sistemas seleccionados.

4. Resultados y Discusión

A continuación, se detallan los resultados generados por la metodología aplicada, comenzando por la validación de los modelos o datos fundamentales, para luego proceder a su análisis y discusión en profundidad.

4.1 Resultados de la validación de los modelos

Para asegurar la precisión de los modelos desarrollados, la fase de validación fue crucial y se llevó a cabo a través de la creación y aplicación de correlaciones. Estas correlaciones se diseñaron específicamente para un propósito fundamental: estimar con alta precisión el consumo energético de cada uno de los compresores seleccionados e implementados en las diversas configuraciones de sistemas de refrigeración que fueron objeto de estudio. El detalle exhaustivo de cómo estas correlaciones fueron formuladas y los parámetros que contemplan para cada compresor y sistema se presenta de manera clara y estructurada en la Tabla 4, proporcionando una base transparente para la evaluación del rendimiento energético del sistema.

Tabla 4.

Eficiencia global de los compresores

Compresor	Condiciones	Modelos Globales de Eficiencia
R404A Comp	Subcríticas	(a) $\eta_{comp} = 4,73837812E-01 + 8,51447845E-02 * R_p - 5,95823382E-03 * R_p^2 + 1,32666112E-04 * R_p^3 - 4,66717449E-04 * T[3] - 1,22739755E-04 * T[3]^2 + 3,98979451E-07 * T[3]^3$
CO ₂ Comp. MP	Subcríticas	(b) $\eta_{comp_alta} = 5,40824253E-01 + 8,56506189E-02 * R_p_alta - 1,30828952E-02 * R_p_alta^2 + 2,07881816E-03 * T[5] - 4,85996151E-05 * T[5]^2$
	Supercrítico	(c) $\eta_{comp_alta} = 7,64335433E-01 - 3,75571799E-02 * R_p_alta + 3,27763298E-04 * R_p_alta^2 + 6,83625386E-04 * T[5] - 1,25581598E-05 * T[5]^2$
	Subcríticas	(d) $\eta_{Comp_alta} = 5,03912023E-01 + 1,96308677E-01 * R_p_alta - 5,91576205E-02 * R_p_alta^2 + 5,15202362E-03 * R_p_alta^3 + 2,71720087E-03 * T[5] + 4,15274387E-05 * T[5]^2 + 1,16629917E-06 * T[5]^3$
CO ₂ Comp. LP	Subcríticas	(e) $\eta_{Comp_baja} = 5,29710729E-01 + 1,93352520E-01 * R_p_baja - 6,37759905E-02 * R_p_baja^2 + 5,60663801E-03 * R_p_baja^3 + 4,46227601E-03 * T[3] + 1,75435487E-04 * T[3]^2 + 1,86119427E-06 * T[3]^3$
	Subcríticas	(f) $\eta_{Comp_baja} = -1,35785146E-01 + 9,28077331E-01 * R_p_baja - 3,83416794E-01 * R_p_baja^2 + 6,62230324E-02 * R_p_baja^3 - 4,17898143E-03 * R_p_baja^4 - 4,12170770E-03 * T[3] - 2,50761410E-04 * T[3]^2 - 5,08992735E-06 * T[3]^3 - 2,72749232E-08 * T[3]^4$
NH ₃ Comp		(g) $\eta_{comp} = -3,17688386E-01 + 7,29671553E-01 * R_{pc} - 1,76357287E-01 * R_{pc}^2 + 1,39961834E-02 * R_{pc}^3 + 6,29443155E-03 * T[12] + 2,03370711E-05 * T[12]^2 - 3,22976045E-07 * T[12]^3$

Estas correlaciones determinan la eficiencia global de los compresores en función de dos variables clave: la relación de presión (R_p) y la temperatura de entrada del refrigerante al compresor. Específicamente, para el sistema convencional que utiliza R404A, se desarrolló una correlación (a) diseñada para operar en condiciones subcríticas.

Para los compresores de media presión (MP) de CO₂, se obtuvieron tres correlaciones distintas: las correlaciones (b) y (c) son a los sistemas básico y con eyector. La correlación (b) se utiliza cuando la temperatura ambiente es inferior a 26,8°C, lo que implica condiciones subcríticas. Si esta condición no se cumple, el sistema opera bajo condiciones supercríticas y se aplica la correlación (c). También se desarrolló la correlación (d) para el sistema en cascada, operando también en condiciones subcríticas.

En lo que respecta a los compresores de baja presión (LP) de CO₂, se generaron dos correlaciones: la correlación (e) para los sistemas básico y de eyector en condiciones subcríticas, y la correlación (f) para el sistema en cascada, también en condiciones subcríticas. Finalmente, para el amoníaco (NH₃), que actúa como refrigerante auxiliar en el sistema en cascada, se estableció una correlación específica (g).

El proceso para desarrollar estas correlaciones de eficiencia global comenzó con la determinación de la eficiencia ideal del compresor, comparándola con el consumo de energía real proporcionado por el fabricante para una capacidad de refrigeración específica. Una vez obtenida la eficiencia global, esta se correlacionó, como se mencionó anteriormente, en función de la relación de presión y la temperatura de entrada del refrigerante al compresor.

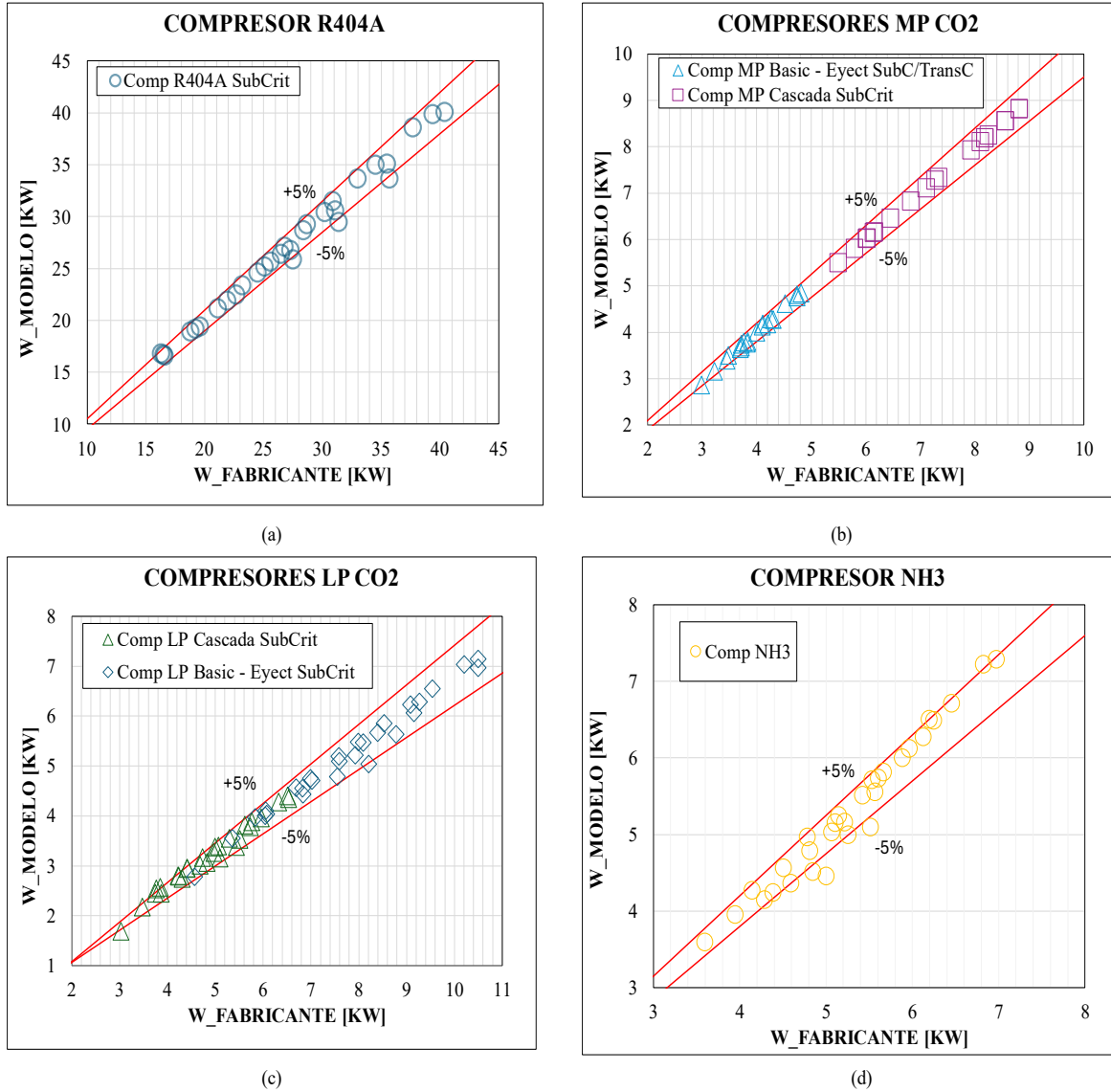
Las cuatro gráficas en la Figura 10 ilustran la validación de los modelos computacionales diseñados para estimar el consumo de energía de los compresores. En cada una, se compara el consumo por el modelo (W_{MODELO}) con los datos proporcionados por los fabricantes ($W_{\text{FABRICANTE}}$). Todas las gráficas demarcan una banda de error del $\pm 5\%$.

La gráfica (a) muestra una excelente correlación para el compresor de R404A en condiciones subcríticas, con la mayoría de los puntos dentro del margen del $\pm 5\%$. Esto valida con alta confianza la precisión del modelo para predecir su consumo energético. Las gráficas (b) y (c) revelan una muy buena precisión para los compresores de media y baja presión de CO_2 , respectivamente, tanto para sistemas Básico/Eyector como en Cascada Subcrítico. A pesar de una ligera dispersión en rangos de alta potencia, los modelos se mantienen consistentemente dentro del $\pm 5\%$, lo que subraya su fiabilidad para estimar el consumo en estas etapas críticas de compresión. Finalmente, la gráfica (d) confirma una excelente precisión para el compresor de amoníaco (NH_3) en el sistema en cascada. Sus puntos se ajustan sobresalientemente a la línea central y se mantienen dentro del $\pm 5\%$, lo que es crucial dada la importancia del amoníaco en la condensación del CO_2 y su impacto en la eficiencia económica del sistema.

El conjunto de gráficas demuestra de manera positiva que los modelos desarrollados para predecir el consumo de energía de todos los compresores evaluados son altamente precisos y fiables. La consistencia de los datos modelados con los proporcionados por los fabricantes, manteniéndose predominantemente dentro del margen de error del $\pm 5\%$, valida robustamente las correlaciones empleadas. Esto permite utilizar dichos modelos con plena confianza para el análisis, optimización y comparación rigurosa de los diversos sistemas de refrigeración propuestos.

Figura 10.

Poder de consumo modelado vs poder de consumo fabricante



4.2 Análisis de sensibilidad

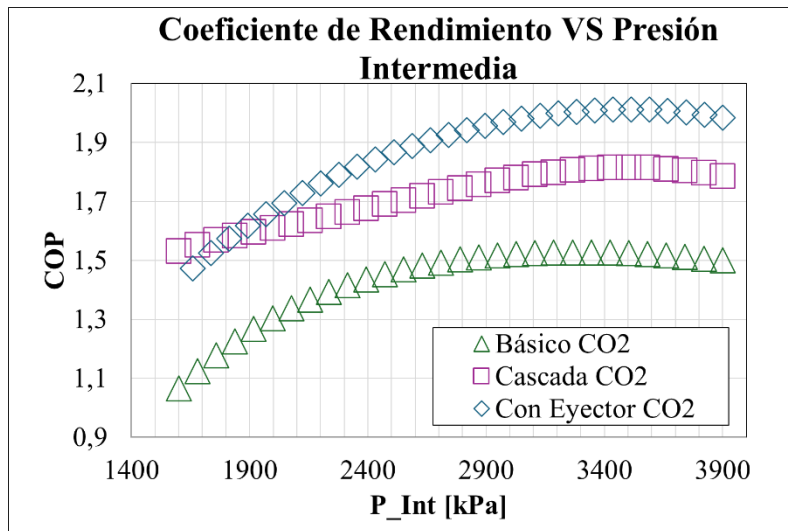
Para la determinación de la presión intermedia y la evaluación de la efectividad de los intercambiadores de calor, el análisis de sensibilidad se llevó a cabo con una temperatura ambiente constante de 25°C.

4.2.1 Determinación de la presión intermedia

Como se aprecia en la Figura 11, un COP más elevado se traduce en una mayor eficiencia energética del sistema. Se observa una tendencia general consistente en los tres sistemas: el COP tiende a aumentar a medida que la presión intermedia se incrementa, lo que indica un rango óptimo de operación donde la eficiencia se maximiza, aunque en el sistema con eyector, el COP parece estabilizarse en las presiones intermedias más elevadas. Después de la presión intermedia de alrededor de 3400 kPa, el COP tiende a iniciar su descenso. Lo anterior indica que el COP es maximizado cuando la presión intermedia es alrededor de 3400 kPa.

Figura 11.

COP vs presión intermedia



Al analizar el rendimiento comparativo, el sistema con eyector destaca consistentemente como el más eficiente, logrando los valores de COP más altos en todo el rango de presiones intermedias evaluadas, incluso superando 2,0 en un punto. Este rendimiento superior se atribuye a la capacidad del eyector para recuperar energía del flujo de alta presión, reduciendo la carga del compresor. El sistema de cascada se posiciona en un nivel intermedio de eficiencia, superando al

básico, pero quedando por debajo del sistema con eyector, lo cual es esperable debido a la optimización de los dos ciclos que componen el sistema en cascada. Por último, el sistema básico muestra el COP más bajo de los tres, manteniéndose por debajo de 1,6 lo que lo convierte en la opción menos eficiente energéticamente.

4.2.2 Evaluación de efectividad de los intercambiadores de calor (IHX)

Al observar el comportamiento individual en la Figura 12, en el ciclo convencional con R404A, aumentar la efectividad del IHX al inicio mejora el subenfriamiento del líquido y el sobrecalentamiento de la succión, lo que aumenta el efecto refrigerante y reduce parcialmente el trabajo específico del compresor. Esto se traduce en un aumento del COP hasta un punto óptimo. Después de ese punto, el sobrecalentamiento en exceso incrementa la temperatura de descarga y la entalpía de succión, aumentando el trabajo del compresor más de lo que se gana en capacidad frigorífica, por lo que el COP empieza a disminuir. Este comportamiento genera la curva cóncava hacia abajo.

En el ciclo eyector, este componente recupera trabajo y reduce pérdidas en la expansión, por lo que el COP es alto incluso sin IHX. El subenfriamiento interno no tiene un impacto notable, porque el principal aumento de rendimiento viene de la recuperación de presión que realiza el eyector, y no del aumento del efecto refrigerante por subenfriamiento. Además, un exceso de sobrecalentamiento podría afectar negativamente el caudal másico que el eyector puede inducir, lo que limita el beneficio de incrementar e_{IHX} . Como resultado un COP alto y estable, prácticamente independiente de la efectividad del IHX.

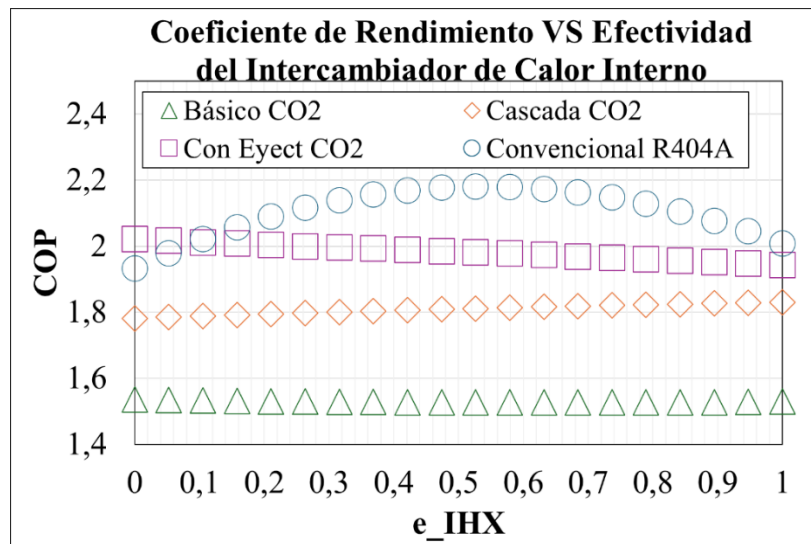
En el ciclo cascada, aunque el IHX interno en el lazo de CO₂ produce subenfriamiento del líquido y sobrecalentamiento de la succión, la presión de descarga del CO₂ no es tan alta como en

el transcrito puro, y está limitada por la temperatura de condensación del refrigerante del lazo de alta. El beneficio del subenfriamiento se traduce en pequeñas mejoras en el efecto frigorífico, pero al igual que en el básico, el sobrecalentamiento extra eleva el trabajo del compresor. COP moderado y poco sensible a eIHX, porque el ciclo ya está condicionado por la transferencia de calor en la etapa de acoplamiento.

En el ciclo básico el sobrecalentamiento adicional que introduce el IHX tiende a aumentar la temperatura de succión y la entalpía de entrada al compresor, lo que incrementa el trabajo específico casi en la misma proporción que la ganancia en capacidad frigorífica.

Figura 12.

COP vs efectividad del IHX

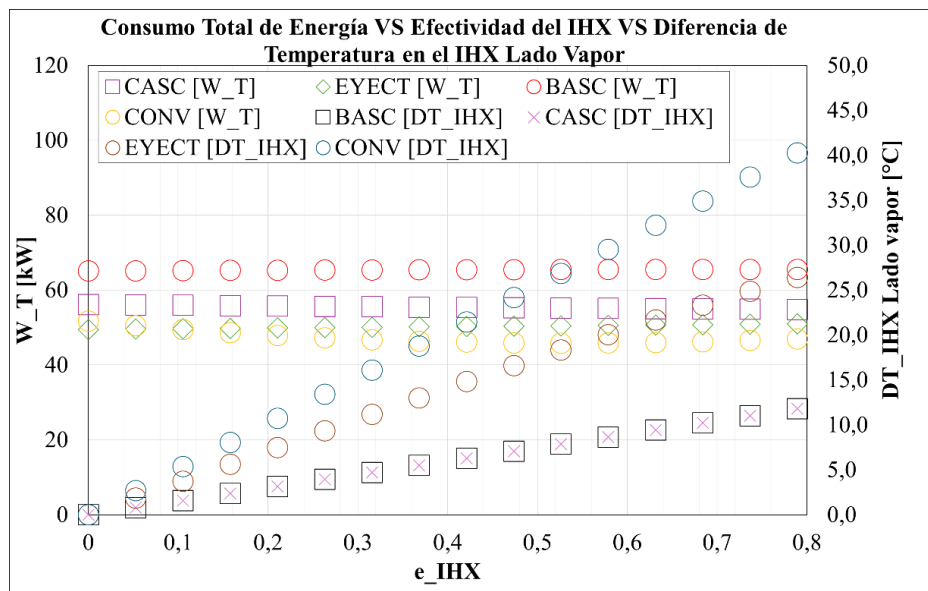


Al analizar la Figura 13, el consumo total de energía (WT), representado en el eje Y izquierdo, se observa una tendencia crucial para todas las configuraciones de sistemas evaluadas (Básico, Cascada, Eyector y Convencional), el WT permanece notablemente constante e inalterado ante las variaciones en la efectividad del IHX. Esto subraya que la arquitectura fundamental del

ciclo de refrigeración es el factor determinante en el gasto energético global, más allá de la optimización del intercambiador interno. En términos comparativos, el sistema básico exhibe el mayor consumo energético, manteniéndose consistentemente por encima de los 55 kW. El sistema cascado se posiciona en un nivel intermedio (50–55 kW), mientras que los sistemas convencional y evector se muestran como los más eficientes, ambos operando generalmente por debajo de los 50 kW y demostrando una fuerte competitividad entre sí.

Figura 13.

W Total vs efectividad del IHX vs DT IHX



En contraste, el comportamiento de la diferencia de temperatura en el IHX del lado del vapor, varía significativamente con la efectividad IHX. El sistema básico presenta una DT_IHX relativamente constante y alta, alrededor de 25–28°C, indicando poca o nula influencia de la efectividad del IHX en esta variable. Por otro lado, los sistemas Cascada, Evector y Convencional (este último con la serie de puntos más alta y creciente) exhiben una clara tendencia ascendente en

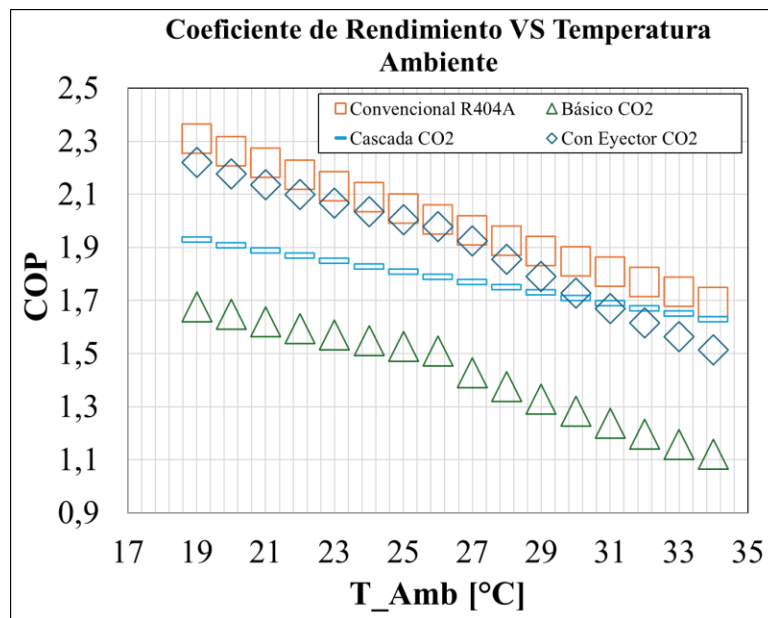
su DT_{IHX} a medida que la efectividad del IHX aumenta. Esta correlación sugiere que, para estas configuraciones, un IHX más eficiente facilita una transferencia de calor más efectiva en el lado del vapor, resultando en una mayor diferencia de temperatura a través del intercambiador.

4.3 Efecto de la temperatura ambiente sobre el rendimiento

La temperatura ambiente de Bucaramanga, consignada en la Tabla 3, sirvió como el criterio principal para la evaluación de los resultados presentados a continuación.

Figura 14.

COP vs Temperatura ambiente



En el ciclo convencional R404A, mantiene el COP más alto en todo el rango de temperaturas, con una caída progresiva a medida que aumenta la temperatura ambiente. Opera en régimen subcrítico, por lo que el aumento de presión de condensación eleva el trabajo del compresor, pero de forma moderada gracias a las propiedades termodinámicas estables del R404A.

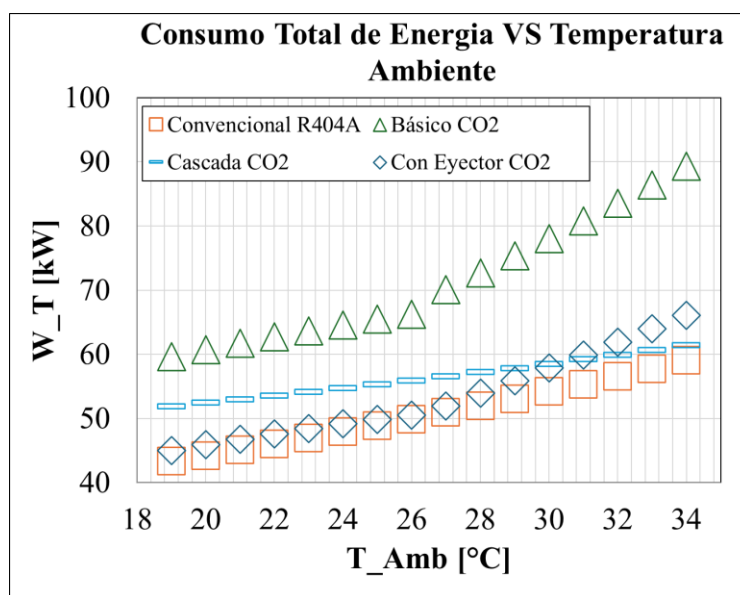
En el ciclo de cascada con CO₂, presenta un COP intermedio y una disminución más suave que el CO₂ básico, ya que el lazo de baja con CO₂ trabaja acoplado a un refrigerante superior que limita la presión de alta. Esta configuración evita la operación transcrítica a temperaturas moderadas, reduciendo el impacto negativo del calor ambiente.

Para el ciclo con eyector CO₂, este logra un COP superior al CO₂ básico y cercano al de la cascada, con caída más lenta ante el aumento de temperatura. El eyector recupera parte de la energía de expansión y eleva la presión de succión, reduciendo la relación de compresión y el consumo específico de energía incluso en condiciones transcríticas.

Para finalizar el ciclo básico CO₂, presenta el COP más bajo y la caída más pronunciada con el aumento de la temperatura ambiente. Al superar los 26–27 °C, entra completamente en régimen transcrítico, donde la presión óptima de alta se incrementa rápidamente, aumentando el trabajo del compresor y provocando una fuerte pérdida de rendimiento.

Figura 15.

W Total vs Temperatura ambiente



En la Figura 15, el ciclo básico CO₂ es el que presenta el mayor consumo energético en todo el rango de temperaturas, incrementándose de forma pronunciada a medida que la temperatura ambiente supera los 26–27 °C. Esto se debe a que en régimen transcrito la presión óptima de alta aumenta rápidamente, elevando considerablemente el trabajo de compresión y penalizando la eficiencia. En el ciclo de cascada con CO₂ mantiene un consumo energético intermedio y más estable, con un aumento moderado al subir la temperatura ambiente. Esto ocurre porque el lazo de CO₂ opera acoplado a otro refrigerante que limita la presión de alta, evitando las penalizaciones severas del transcrito y reduciendo la carga de trabajo de los compresores. Para el ciclo con eyector CO₂ se registra un consumo energético superior al R404A pero inferior al CO₂ básico, con una pendiente de aumento más suave. El eyector aprovecha la energía de expansión para elevar la presión de succión, reduciendo la relación de compresión y parte del trabajo requerido, especialmente en temperaturas medias. Para finalizar, el ciclo convencional R404A presenta el menor consumo energético en todo el rango de temperaturas evaluadas, con un incremento gradual a medida que sube la temperatura ambiente. Su operación subcrítica evita los aumentos bruscos de presión de alta, lo que permite mantener un trabajo de compresión relativamente bajo y estable.

La Tabla 5 desglosa el consumo de cada compresor (MP y LP, o MP y NH₃ según el sistema) y muestra cómo la temperatura ambiente afecta de forma diferente a cada sistema. El Ciclo Convencional R404A presenta el consumo total más bajo en casi todo el rango de temperaturas analizado, partiendo de 36.8 kW a 19°C y alcanzando los 50.17 kW a 34°C. Su curva de aumento es moderada porque opera en un régimen subcrítico, lo que significa que el incremento en la temperatura ambiente solo eleva la presión de condensación sin provocar un salto drástico en la presión óptima, a diferencia de los ciclos transcritos de CO₂. Esta estabilidad y

comportamiento predecible lo establecen como un referente de comparación para los demás sistemas.

Por otro lado, el ciclo básico CO₂ exhibe el consumo más elevado en todo el rango de temperaturas, comenzando en 50.64 kW a 19°C y llegando a casi 68.4 kW a 34°C. Su consumo se dispara de manera mucho más pronunciada a partir de los 26–27°C, cuando el sistema entra en pleno régimen transcrito. En estas condiciones, la presión óptima de alta se incrementa significativamente con la temperatura ambiente, lo que eleva drásticamente el trabajo de compresión. Este aumento es particularmente notorio en el compresor de media presión (MP), mientras que el de baja presión (LP) mantiene un consumo estable en torno a 17.6 kW, lo que indica que el problema principal reside en la etapa de descarga.

El ciclo en cascada CO₂ mantiene un consumo moderado y muy estable en sus compresores de LP y MP. Esto se debe a que la etapa de alta, que utiliza NH₃ o R404A, evita que el CO₂ trabaje en condiciones transcricas extremas. Aunque su consumo a bajas temperaturas (19–24°C) es similar al del R404A, a medida que la temperatura ambiente aumenta, la diferencia con el sistema convencional se amplía. A pesar de ser más estable que el ciclo básico de CO₂, su ventaja de consumo frente al sistema convencional es casi nula; de hecho, consume más en casi todo el rango de temperaturas.

Para concluir, en el ciclo con eyector CO₂ muestra un consumo significativamente menor que el ciclo básico de CO₂, especialmente en el rango de 19–27°C. Esto es resultado de la recuperación de energía que el eyector realiza, lo que aumenta la presión de succión del compresor

de baja presión y optimiza el ciclo. A bajas temperaturas, su consumo se acerca al del R404A. Sin embargo, a temperaturas más altas (por encima de 30°C), su consumo aumenta más rápido que el del sistema convencional, aunque nunca llega a los niveles del ciclo básico. Esto demuestra que, si bien el eyector mitiga las pérdidas inherentes al ciclo transcrito, no las elimina por completo.

Tabla 5.

Consumo de energía de los compresores para cada sistema frente a la temperatura ambiente

Temp Amb [°C]	Convencional	Básico		Cascada			Eyector	
	R404A [kW]	MP [kW]	LP [kW]	MP [kW]	LP [kW]	NH ₃ [kW]	MP [kW]	LP [kW]
19	36,82	33,07	17,6	10,43	17,9	18,6	18,1	20,2
20	37,57	33,99	17,6	10,43	17,9	19,2	18,9	20,2
21	38,33	34,87	17,6	10,43	17,9	19,7	19,6	20,2
22	39,11	35,71	17,6	10,43	17,9	20,3	20,3	20,2
23	39,9	36,52	17,6	10,43	17,9	20,9	20,9	20,3
24	40,71	37,3	17,6	10,43	17,9	21,4	21,5	20,3
25	41,55	38,03	17,6	10,43	17,9	22	22,1	20,3
26	42,4	38,72	17,6	10,43	17,9	22,6	22,6	20,3
27	43,27	41,96	17,6	10,43	17,9	23,3	23,8	20,4
28	44,17	44,16	17,6	10,43	17,9	23,9	25,4	20,4
29	45,1	46,41	17,6	10,43	17,9	24,6	27	20,5
30	46,05	48,7	17,6	10,43	17,9	25,2	28,7	20,5
31	47,03	51,03	17,6	10,43	17,9	25,9	30,3	20,6
32	48,04	53,4	17,6	10,43	17,9	26,6	32	20,6
33	49,09	55,83	17,6	10,43	17,9	27,4	33,7	20,7
34	50,17	58,3	17,6	10,43	17,9	28,1	35,4	20,8

4.4 Consumo de energía anual

En la Tabla 6 se presentan los datos de consumo energético horario a lo largo de un año para obtener el consumo energético anual total (kWh/año), tomando en cuenta la frecuencia con la que cada temperatura ambiente se presenta.

En el análisis anual, el sistema R404A se destaca como el más eficiente, con un consumo de 431.054 kWh/año. Esto se atribuye a su operación en régimen subcrítico, que resulta en una variación de consumo menos drástica ante los cambios de temperatura ambiente. Por otro lado, el sistema Con Eyector CO₂ se posiciona como una alternativa altamente competitiva, con un consumo de 445.582 kWh/año, lo que representa un sobreconsumo muy bajo del 3,37% respecto al R404A. Este resultado demuestra la efectividad de la tecnología del eyector para mitigar en gran medida la penalización energética del ciclo transcrito.

El sistema En Cascada CO₂ presenta un consumo intermedio, con 486.110 kWh/año, lo que supone un 12,8% más que el R404A. A pesar de beneficiarse de no operar en régimen transcrito extremo, el acoplamiento con otro refrigerante y las pérdidas inherentes al sistema hacen que sus ahorros no sean suficientes para superar la eficiencia del R404A o del sistema con eyector. Finalmente, el sistema Básico CO₂ es, con diferencia, el menos eficiente, con un consumo anual de 590.947 kWh/año (+37,1% respecto al R404A). Esto se debe a que, a lo largo del año, opera con frecuencia en condiciones donde el gas cooler y la alta presión demandan un trabajo de compresión muy elevado, impactando especialmente al compresor de media presión.

Algo que resaltar en el análisis del kWh de los sistemas es esa variación de menor consumo al inicio (19 °C), luego en un rango intermedio un aumento exponencial (23 – 24 °C), y al final una disminución muy notable (34°C), estas variaciones estaban dadas por el porcentaje de tiempo en que se trabaja a esas temperaturas consignadas en la Tabla 3.

Tabla 6.

Consumo de energía de los sistemas

Temp Amb [°C]	Convencional		Básico		Cascada		Eyector	
	[kW]	[kWh]	[kW]	[kWh]	[kW]	[kWh]	[kW]	[kWh]
19	43,32	265,59	59,64	365,65	51,87	318,01	45,04	276,14
20	44,2	5376,22	60,71	7384,40	52,42	6376,05	45,93	5586,65
21	45,1	16929,77	61,75	23179,90	52,98	19887,79	46,8	17567,92
22	46,01	42869,08	62,74	58456,99	53,55	49894,36	47,62	44369,17
23	46,94	63129,28	63,69	85656,24	54,12	72785,61	48,41	65106,27
24	47,9	61455,13	64,6	82881,02	54,7	70179,44	49,16	63071,69
25	48,88	52764,69	65,47	70673,16	55,3	59694,91	49,87	53833,37
26	49,88	43002,35	66,28	57141,05	55,91	48200,91	50,54	43571,34
27	50,91	36499,77	70,09	50250,82	56,53	40529,01	51,97	37259,74
28	51,97	34566,75	72,68	48341,58	57,17	38025,42	53,91	35857,10
29	53,05	33050,26	75,32	46924,51	57,82	36021,98	55,88	34813,35
30	54,18	23938,73	78,01	34467,70	58,5	25847,46	57,87	25569,11
31	55,33	12026,42	80,76	17553,83	59,19	12865,42	59,88	13015,40
32	56,52	4493,74	83,55	6642,81	59,91	4763,26	61,93	4923,87
33	57,75	628,20	86,4	939,86	60,65	659,75	64	696,19
34	59,02	58,37	89,31	88,33	61,41	60,73	66,1	65,37
Total	[kWh/Año]	431054,35	[kWh/Año]	590947,85	[kWh/Año]	486110,14	[kWh/Año]	445582,69

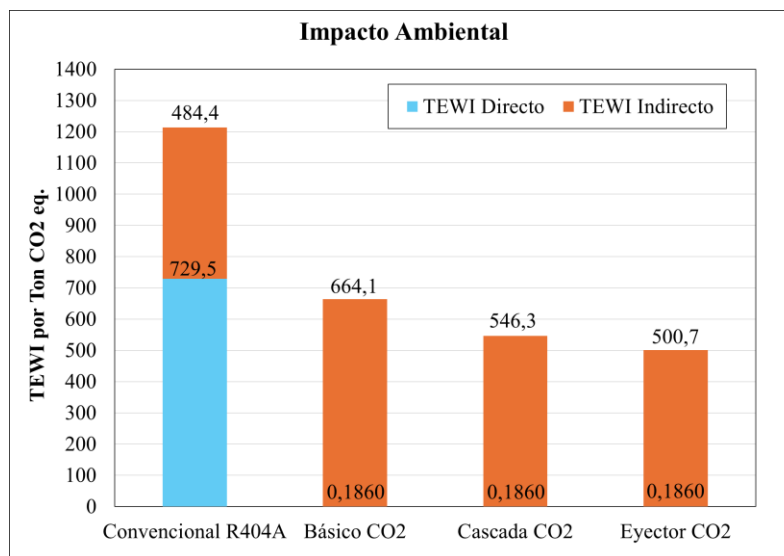
4.5 Análisis del impacto ambiental

La Figura 16 evidencia que el sistema convencional con R404A presenta el mayor impacto ambiental total (≈ 1.214 t CO₂-eq) debido principalmente a su altísimo TEWI directo, resultado del elevado GWP del refrigerante y las emisiones por fugas, lo que contrarresta su ventaja como sistema de menor consumo eléctrico anual. En contraste, todas las configuraciones con CO₂ tienen un impacto directo casi nulo ($\approx 0,186$ t CO₂-eq) y su TEWI total está determinado casi por completo por el componente indirecto asociado al consumo energético: el ciclo básico CO₂ es el menos eficiente y por tanto el de mayor TEWI entre los CO₂, el ciclo en cascada reduce significativamente este valor al evitar la penalización del régimen transcrito, y el ciclo con eyector CO₂ logra el

mejor desempeño ambiental ($\approx 500,9$ t CO₂-eq) gracias a la recuperación de trabajo que disminuye la relación de compresión, combinando así bajo consumo eléctrico con emisiones directas despreciables y superando ampliamente al R404A en términos de sostenibilidad.

Figura 16.

Comparación del impacto ambiental (TEWI)



5. Conclusiones

El desarrollo de modelos termodinámicos precisos y su validación rigurosa, que mostró una precisión del $\pm 5\%$ al comparar el consumo de los compresores modelados con datos de fabricante, asegura la fiabilidad de todas las simulaciones y los resultados obtenidos. Esta validación permite que las comparaciones y conclusiones sobre el rendimiento energético y el impacto ambiental de los sistemas sean utilizadas con plena confianza para la toma de decisiones informadas en el diseño y la implementación de futuras aplicaciones de refrigeración industrial.

El rendimiento energético de los sistemas, evaluado tanto bajo las condiciones de temperatura ambiente de Bucaramanga como en función de la efectividad del IHX, posiciona al sistema con eyector como una alternativa superior y robusta. Si bien el sistema convencional con R404A puede alcanzar un COP máximo elevado (pico de $\sim 2,2$ con IHX optimizado), el eyector mantiene consistentemente valores de COP superiores a 1,9 (frecuentemente por encima de 2,0) y demuestra ser comparable o incluso superior al convencional a partir de temperaturas ambiente moderadas a altas (26–27°C). Esta capacidad de mantener una alta eficiencia de forma estable, incluso con variaciones en la efectividad del IHX, lo convierte en una solución particularmente adecuada para climas cálidos.

Un hallazgo para resaltar del análisis es que el consumo total de energía (WT) de los sistemas de refrigeración está determinado predominantemente por la configuración del ciclo y no por la efectividad del intercambiador de calor interno (e_{IHX}), la cual mostró un impacto mínimo en la potencia consumida para todas las configuraciones. Esta insensibilidad subraya la importancia fundamental de la elección del tipo de ciclo para la eficiencia energética global. Cuantitativamente, los sistemas Convencional R404A y con eyector se perfilaron como los más eficientes en términos de WT, operando consistentemente por debajo de los 50 kW, mientras que el sistema Básico fue el de mayor consumo, superando los 55 kW.

El estudio de los sistemas de refrigeración ha revelado una ventaja ambiental decisiva en aquellos que utilizan CO₂ (R744) como refrigerante, al reducir significativamente las emisiones directas. Esto se evidencia en un TEWI Directo de 0,1860 Ton CO₂eq para CO₂, notablemente inferior a los 729,5 Ton CO₂eq del R404A convencional. En consecuencia, el impacto ambiental

total de los sistemas con CO₂ se concentra principalmente en las emisiones indirectas derivadas del consumo de energía. Dentro de las configuraciones de CO₂, el sistema con eyector se destaca como la opción más favorable desde el punto de vista ambiental, registrando el TEWI total más bajo (aproximadamente 500,89 Ton CO₂eq), en contraste con los 1213,9 Ton CO₂eq del sistema convencional.

6. Trabajos futuros

Complementar este estudio con un análisis económico exhaustivo que incluya los costos de inversión inicial (CAPEX), costos operativos (OPEX) a lo largo de la vida útil (considerando costos de energía y mantenimiento), y el cálculo de periodos de retorno de la inversión para cada sistema. Esto proporcionaría una visión completa de la viabilidad de implementar estas alternativas de refrigeración con CO₂ en el contexto colombiano.

Llevar a cabo una fase experimental mediante la implementación de un prototipo a escala o la monitorización de un sistema real en la ciudad de Bucaramanga. Esto permitiría validar los resultados de las simulaciones bajo condiciones operativas reales y obtener datos empíricos que refuercen la confianza en los modelos y las conclusiones del estudio.

Investigar la optimización del diseño y las estrategias de control de estos sistemas para diferentes perfiles de carga térmica, no solo la capacidad nominal de 100 kW. La demanda de refrigeración en cuartos fríos puede variar significativamente, y entender el comportamiento de los sistemas bajo cargas parciales es crucial para maximizar su eficiencia estacional.

Ampliar el alcance del estudio para incluir la evaluación de otros refrigerantes naturales como hidrocarburos o amoniaco en ciclos básicos y compararlos con las configuraciones de CO₂. Adicionalmente, explorar sistemas híbridos que combinen las ventajas de múltiples refrigerantes o tecnologías (por ejemplo, refrigeración por absorción combinada con CO₂) para identificar soluciones aún más sostenibles y eficientes.

Referencias

1. Helloauto. CFC [Internet]. 2024 [cited 2025 Jan 12]. Available from: <https://helloauto.com/es-es/glosario/cfc/>
2. Intarcon. Refrigerante R744 [Internet]. 2022 [cited 2025 Jan 18]. Available from: <https://www.intarcon.com/en/r744-refrigerant/>
3. Intarcon. Compresores de refrigeración industrial o comercial [Internet]. 2022 [cited 2025 May 28]. Available from: <https://www.intarcon.com/compresores-de-refrigeracion-industrial-o-comercial/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20un%20compresor%20de,lo%20largo%20del%20circuito%20frigor%C3%ADfico.>
4. Ferroviál. ¿Qué es una condensadora? [Internet]. 2023 [cited 2025 May 28]. Available from: <https://www.ferrovial.com/es/stem/condensadora/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20una%20condensadora%3F,que%20circula%20en%20su%20interior.>
5. Keyter. TEWI (TOTAL EQUIVALENT WARMING IMPACT) – Impacto total equivalente sobre el calentamiento atmosférico [Internet]. 2021 [cited 2025 May 28].

- Available from: <https://www.keyter.com/es/glossary/tewi-total-equivalent-warming-impact-impacto-total-equivalente-sobre-el-calentamiento-atmosferico/>
6. CAREL industries. Cómo utilizar TEWI para comparar el impacto ambiental de un sistema de refrigeración [Internet]. 2020 [cited 2025 May 28]. Available from: <https://www.carel.com/blog/-/blogs/how-to-use-tewi-to-compare-the-environmental-impact-of-a-refrigeration-system>
 7. Quimobásicos. Condensador y Evaporador: Los corazones del Sistemas de Refrigeración [Internet]. 2017 [cited 2025 Jan 5]. Available from: <https://blogquimobasicos.com/2017/10/25/condensador-y-evaporador-los-corazones-del-sistemas-de-refrigeracion/>
 8. Chen J, Jarall S, Havtun H, Palm B. A review on versatile ejector applications in refrigeration systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015 Sep 1;49:67–90.
 9. Inditer. Gas Coolers 2019-20 [Internet]. Inditer, editor. 2019; 2019 [cited 2025 Jan 7]. Available from: https://inditer.es/info/GAMA_GAS_COOLER.pdf
 10. WWF. Glosario ambiental: ¿Qué son los Gases de Efecto Invernadero (GEI)? [Internet]. 2018 [cited 2025 Jan 20]. Available from: <https://www.wwf.org.co/?325754/Que-son-los-Gases-de-Efecto-Invernadero-GEI>
 11. Murphy F, Devlin G, McDonnell K. Miscanthus production and processing in Ireland: An analysis of energy requirements and environmental impacts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013 Jul 1;23:412–20.
 12. Area Cooling Solutions SAU. HCFC [Internet]. 2023 [cited 2025 Jan 13]. Available from: <https://areacooling.com/es/glosario-de-terminos-hvac/hcfc/>

13. Climate & Clean Air Coalition. Hidrofluorocarbonos [Internet]. 2023 [cited 2025 Jan 12]. Available from: <https://www.ccacoalition.org/es/short-lived-climate-pollutants/hydrofluorocarbons-hfcs>
14. Gestión en recursos naturales. Impacto Ambiental [Internet]. 2015 [cited 2025 Jan 18]. Available from: <https://www.grn.cl/impacto-ambiental.html>
15. Cofrico. Intercambiadores de calor. Cómo funcionan [Internet]. 2024 [cited 2025 Jan 7]. Available from: <https://www.cofrico.com/consejos-tecnicos/intercambiadores-de-calor/#:~:text=A%20grandes%20rasgos%2C%20un%20intercambiador,transferencia%20de%20calor%20entre%20ambos.>
16. Cold World. ODP - Potencial de agotamiento de la capa de ozono del refrigerante. 2018 Apr 9 [cited 2025 Jan 20]; Available from: <https://cold.world/know-how/odp-ozone-depletion-potential-refrigerant>
17. Gefrieren. R-404A GAS REFRIGERANTE FICHA TÉCNICA [Internet]. 2021 Aug [cited 2025 Jan 18]. Available from: <https://gefrieren-gas.com/wp-content/uploads/2021/08/FICHA-R404A-2.pdf>
18. Freeo. Tanque Recibidor de Refrigeración [Internet]. 2020 [cited 2025 Jan 7]. Available from: <https://freeo.com.mx/tanque-recibidor-de-refrigeracion/>
19. Arnabat I. Refrigerantes naturales, ventajas y desventajas - Infografía [Internet]. 2018 [cited 2025 Jan 18]. Available from: <https://www.caloryfrio.com/refrigeracion-frio/refrigerantes-naturales-caracteristicas-ventajas-desventajas-uso-infografia.html>
20. Química industrial.cl. Refrigerantes Sintéticos [Internet]. 2021 [cited 2025 Jan 12]. Available from: <https://quimicaindustrial.cl/producto/refrigerantes-sinteticos/>

21. WTS Energy. ¿Qué significa rendimiento en el sector energético? [Internet]. 2024 [cited 2025 Jan 18]. Available from: <https://www.wtsenergy.com/es/glosario/rendimiento-en-el-sector-energetico/>
22. Arnabat I. Sistemas de refrigeración y aire acondicionado: compresión y absorción [Internet]. 2023 [cited 2025 Jan 5]. Available from: <https://www.caloryfrio.com/aire-acondicionado/aire-instalaciones-componentes/sistemas-de-refrigeracion-compresion-absorcion.html>
23. Fundación WIESE. Sostenibilidad ambiental: qué es, importancia y beneficios [Internet]. 2024 [cited 2025 Jan 20]. Available from: <https://www.fundacionwiese.org/blog/es/que-es-la-sostenibilidad-ambiental-y-como-impacta-en-nuestras-vidas/>
24. Grundfos. Subenfriador de líquido [Internet]. 2022 [cited 2025 Jan 6]. Available from: <https://www.grundfos.com/mx/learn/research-and-insights/liquid-sub-cooler>
25. Velásquez E. Válvulas de Expansión Funcionamiento y Selección de la Adecuada [Internet]. 2014 [cited 2025 Jan 5]. Available from: <https://www.mundohvacr.com/2008/02/valvulas-de-expansion-funcionamiento-y-seleccion-de-la-adecuada/>
26. Intarcon. Refrigeración con CO2 [Internet]. 2020 [cited 2024 Nov 9]. Available from: <https://www.intarcon.com/refrigeracion-con-co2/>
27. Cofrico. El CO2 en refrigeracion en Europa [Internet]. 2022 [cited 2024 Mar 13]. Available from: <https://www.cofrico.com/consejos-tecnicos/co2-en-refrigeracion/>
28. ACR Latinoamérica. Weston estrena dos nuevos proyectos de CO2 [Internet]. 2021 [cited 2024 Mar 14]. Available from:

- <https://www.acrlatinoamerica.com/2021113010149/noticias/empresas/weston-estrena-dos-nuevos-proyectos-de-co2.html?ssp=1&darkschemeovr=1&setlang=es-mx&cc=CO&safesearch=moderate>
29. Acaire. ACAIRE INICIÓ FORMACIÓN EN SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN CON CO2 TRANSCRÍTICO CON LA UNIDAD MÓVIL DE CO2 ÚNICA EN SUDAMÉRICA. [Internet]. 2022 [cited 2024 Mar 14]. Available from: <https://acaire.org/2022/03/26/acaire-inicio-formacion-en-sistemas-de-refrigeracion-con-co2-transcritico-con-la-unidad-movil-de-co2-unica-en-sudamerica/>
 30. Mitsopoulos G, Syngounas E, Tsimpoukis D, Bellos E, Tzivanidis C, Anagnostatos S. Annual performance of a supermarket refrigeration system using different configurations with CO2 refrigerant. *Energy Conversion and Management: X* [Internet]. 2019 Jan 1 [cited 2024 Mar 23];1:100006. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174519300042>
 31. Sarr J, Dupont J, Guilpart J. The carbon footprint of the cold chain, 7th Informatory Note on Refrigeration and Food. 2021 Apr [cited 2024 Mar 23]; Available from: <https://iifir.org/fr/fridoc/1-empreinte-carbone-de-la-chaine-du-froid-7-lt-sup-gt-e-lt-sup-gt-note-143457>
 32. ONU. Informe sobre la brecha en las emisiones del 2020. 2020 [cited 2024 Mar 23]; Available from: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34438/EGR20ESS.pdf>
 33. Fabris F, Fabrizio M, Marinetti S, Rossetti A, Minetto S. Evaluation of the carbon footprint of HFC and natural refrigerant transport refrigeration units from a life-cycle perspective. *International Journal of Refrigeration*. 2024 Mar 1;159:17–27.

34. Arrieta P, Trujillo J, Arrieta A. Análisis cuantitativo de emisiones de gases refrigerantes en el sector Los Ángeles de la ciudad de Montería (Colombia). 2018 Nov 11 [cited 2024 Apr 1]; Available from: <https://es.revistaespacios.com/cited2017/cited2017-14.pdf>
35. Reinco. ¿Qué es un cuarto frío y para qué se utiliza? [Internet]. 2024 [cited 2025 Jan 28]. Available from: <https://reinco.com.co/que-es-un-cuarto-frio-y-para-que-se-utiliza/>
36. Vázquez J. Conoce todo sobre cuartos fríos BOHN [Internet]. 2021 [cited 2025 Jan 28]. Available from: https://www.bohn.com.mx/BOHN-Cuartos-frios.html#&as_qdr=y15
37. Cengel Y, Boles M. Termodinámica Octava Edición. 8th ed. McGraw-Hill Interamericana de España S.L, editor. 2015.
38. Areacademy. Ciclo básico de refrigeración [Internet]. 2023 [cited 2025 Feb 2]. Available from: <https://areacooling.com/areacademy/es/ciclo-basico-de-refrigeracion/>
39. mundo HVACR. Compresión en Dos Etapas y Boosters [Internet]. 2014 [cited 2025 Feb 4]. Available from: <https://www.mundohvacr.com/2006/05/65-2/>
40. Carel. Ciclo transcrito [Internet]. 2024 [cited 2025 Feb 4]. Available from: <https://www.carel.es/transcritical-cycle>
41. Area cooling. Sistema en cascada [Internet]. 2023 [cited 2025 Feb 5]. Available from: <https://areacooling.com/es/glosario-de-terminos-hvac/sistema-en-cascada/#:~:text=Un%20sistema%20en%20cascada%20es,se%20acumula%20en%20el%20mismo.>

42. Mundo HVACR. Sistema en Cascada y sus Aplicaciones [Internet]. 2010 [cited 2025 Feb 5]. Available from: <https://www.mundohvacr.com/2010/12/sistema-en-cascada-y-sus-aplicaciones/>
43. Pérez V, Ramírez H, Sánchez F, Morales A, Martínez S, González J, et al. Análisis teórico de un sistema de refrigeración por eyector para un refrigerador doméstico. Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica [Internet]. 2022 Sep [cited 2025 Feb 8];249–249. Available from: https://www.researchgate.net/publication/366921473_Analisis_teorico_de_un_sistema_de_refrigeracion_por_eyector_para_un_refrigerador_domestico
44. Hero Tech Industrial Chiller. ¿COMO SE DETERMINA LA TEMPERATURA DE EVAPORACION Y CONDENSACION? [Internet]. 2019 [cited 2025 Feb 8]. Available from: <https://www.herotechchiller.com/es/news/how-do-you-determine-the-evaporation-and-condensation-temperature/>
45. Atlas copco. Instalación de aire y las condiciones ambientales [Internet]. 2023 [cited 2025 Feb 8]. Available from: <https://www.atlascopco.com/es-es/compressors/air-compressor-blog/instalacion-aire-comprimido-condiciones-ambientales>
46. Química industrial.cl. Gas Refrigerante R-404 A [Internet]. 2022 [cited 2025 Feb 10]. Available from: <https://quimicaindustrial.cl/producto/gas-refrigerante-r-404-a/>
47. Intarcon. El futuro sostenible de la refrigeración ¿Por qué R744 o CO2? [Internet]. 2023 [cited 2025 Feb 10]. Available from: <https://www.intarcon.com/el-futuro-sostenible-de-la-refrigeracion-por-que-r744-o-co2/>
48. Torrington Refrigerantes. ¿Qué significa TEWI? [Internet]. 2020 [cited 2025 Jan 18]. Available from: <https://torrington.com.ar/blog/buenaspracticass/que-significa-tewi/>

49. Sandoval A. Conservación de la Carne y Productos Cárnicos (básico) [Internet]. 2022 [cited 2025 Feb 10]. Available from: <https://intotheingredientverse.com/2022/08/15/conservacion-de-la-carne-y-productos-carnicos-basico/>
50. Beniwal R, Tyagi H. Performance analysis of sub-cooled transcritical CO2 refrigeration system using vapour absorption refrigeration system and dew point evaporative cooling. *Energy*. 2024 Nov 30;310:133219.
51. Jiang J, Yang Q, Yin T, Zheng Z, Zhao Y, Liu G, et al. Comparative thermodynamic study of CO2 transcritical supermarket booster refrigeration system combined with vapor injection and parallel compression. *International Journal of Refrigeration*. 2025 Feb 1;170:70–84.
52. Li W, Korolija I, Tang R, Mumovic D. High-fidelity model development of CO2 booster refrigeration systems in supermarkets using field measurements. *International Journal of Refrigeration*. 2025 Jan 1;169:152–65.
53. Dai B, Cao Y, Zhou X, Liu S, Fu R, Li C, et al. Exergy, carbon footprint and cost lifecycle evaluation of cascade mechanical subcooling CO2 commercial refrigeration system in China. *J Clean Prod*. 2024 Jan 1;434:140186.
54. ACR Latinoamérica. Implementan sistema industrial de CO2 Brine en fábrica de alimentos [Internet]. 2019 [cited 2024 Mar 17]. Available from: <https://www.acrlatinoamerica.com/201906048744/noticias/empresas/implementan-sistema-industrial-de-co2-brine-en-fabrica-de-alimentos.html>

55. Pardo Martínez CI, Cotte Poveda A, Torralba Barreto DR. Diagnosis and baseline refrigerant use in the Colombian meat, dairy, and fruit and vegetable industries. *International Journal of Refrigeration*. 2021 Nov 1;131:448–58.
56. Moreno M. Modernización e instalación de nuevos sistemas de refrigeración en Supermercados La Vaquita. 2023 Jul 6 [cited 2024 Mar 17]; Available from: <https://dspace.tdea.edu.co/bitstream/handle/tdea/3370/Plan%20de%20Mejora%20mauricio%20moreno%20version%20final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
57. Londoño P. CO2: el futuro del sistema de refrigeración. 2023 [cited 2024 Mar 18]; Available from: <https://www.uninorte.edu.co/web/ceimun/home/-/blogs/co2-el-futuro-del-sistema-de-refrigeracion>
58. Vergara-Teran D, Aranda-Gil G, Amaris C. Evaluación técnica y ambiental de sistemas de refrigeración tipo booster con CO2. *Revista UIS Ingenierías* [Internet]. 2024 Sep 10;23(3):99–116. Available from: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/15454>
59. Köhler J, Richter C, Tegethoff W, Tischendorf C. Experimental and theoretical study of a CO2 ejector refrigeration cycle. in *Vortrag, VDA Winter Meeting*. 2007;
60. Tsamos KM, Ge YT, Santosa Id, Tassou SA, Bianchi G, Mylona Z. Energy analysis of alternative CO2 refrigeration system configurations for retail food applications in moderate and warm climates. *Energy Convers Manag*. 2017 Oct 15;150:822–9.
61. AIRAH. Methods of calculating Total Equivalent Warming Impact (TEWI) 2012. 2012 Jun [cited 2025 Feb 28]; Available from: https://airah.org.au/Common/Uploaded%20files/Archive/Resources/Best_Practice_Guideline/Best_Practice_Tewi_June2012.pdf

62. Tsamos KM, Ge YT, Santosa Id, Tassou SA, Bianchi G, Mylona Z. Energy analysis of alternative CO₂ refrigeration system configurations for retail food applications in moderate and warm climates. *Energy Convers Manag*. 2017 Oct 15;150:822–9.
63. ADK Kooling. 15 señales de que tu refrigerador se está muriendo (y qué hacer al respecto) [Internet]. 2022 [cited 2025 May 27]. Available from: https://adk-co-uk.translate.google.com/ways-tell-fridge-might-dying-needs-replaced/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge#:~:text=How%20often%20should%20a%20fridge,about%2080%25%20of%20the%20time.
64. CRYO Systems. Mantenimiento diario de la cámara frigorífica [Internet]. 2017 [cited 2025 May 27]. Available from: <https://cryo-systems.com/es/mantenimiento-diario-de-la-camara-frigorifica/#:~:text=Por%20supuesto%2C%20la%20larga%20vida,1.>
65. XM. Noticias del mercado. 2023 [cited 2025 Feb 28]. Resultado de cálculo de Factor de Emisión del Sistema Interconectado Nacional, para inventario de Gases de Efecto Invernadero. Available from: <https://www.xm.com.co/noticias/5548-resultado-de-calculo-de-factor-de-emision-del-sistema-interconectado-nacional-para>
66. Liu F. Review on Ejector Efficiencies in Various Ejector Systems. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference* [Internet]. 2014 Jan 1 [cited 2025 May 24]; Available from: <https://docs.lib.purdue.edu/iracc/1533>
67. Lamb R. Improving the Energy Efficiency of Cooling Systems. *Star Refrigeration* [Internet]. 2017 Jan 18 [cited 2025 May 24]; Available from: <https://www.star-ref.co.uk/smart-thinking/improving-the-energy-efficiency-of-cooling-systems/>
68. BOCK VAP. BOCK VAP| Stationary applications [Internet]. 2025 [cited 2025 May 7]. Available from: <https://vap.bock.de/stationaryapplication/Pages/Index.aspx>

