

Evaluación del Potencial de Enfriamiento de un Sistema de Refrigeración por Absorción
Solar para Acondicionamiento de Aire en un Edificio Universitario

Kevin Daniel Maldonado Moreno

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Carlos Fidel Amarís Castilla

Doctor en tecnologías de climatización y eficiencia energética

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Programa de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Quiero dedicar este logro, primeramente, a Dios, como una ofrenda de gratitud, reconociendo que todo lo puedo alcanzar por medio de Él. Gracias por enseñarme que valió la pena permanecer fiel, confiar en su voluntad y no depender únicamente de mis propias fuerzas, porque es Él quien pone en mí el querer y el hacer conforme a su voluntad.

También me dedico este logro como una muestra de mi capacidad, esfuerzo y perseverancia. Es la evidencia de que cada sacrificio, cada desafío superado y cada momento de dedicación tuvieron un propósito. Cada meta alcanzada representa una realización personal y un recordatorio de que todo lo puedo lograr.

A mis padres, les dedico este triunfo con profundo agradecimiento. Ellos han sido mi mayor ejemplo de esfuerzo y constancia, brindándome las herramientas necesarias para alcanzar este sueño.

A mi hermano, por ser un apoyo fundamental durante este camino, por su compañía y por estar presente en los momentos en los que más lo necesité.

A cada persona que estuvo presente durante este proceso, que me acompañó, me vio crecer como profesional y como persona, y que de alguna manera aportó a la construcción de este sueño. A mis amigos de la vida y de la iglesia, por brindarme su compañía, apoyo y palabras de aliento en los momentos importantes. A mis profesores, quienes con sus conocimientos, orientación y dedicación trazaron una guía que permitió convertir este sueño en una realidad.

Agradecimientos

Agradezco con profundo amor primeramente a Dios Padre Todopoderoso por darme la vida, la salud, la sabiduría, el entendimiento y las capacidades necesarias para alcanzar este logro. A Él doy gracias por sostenerme en cada etapa de este camino, por permanecer fiel y permitirme el cumplimiento de mis estudios.

A mis padres, mi más profundo agradecimiento por cada esfuerzo, cada sacrificio, cada lágrima y cada oración que hicieron por mí. Gracias por pensar siempre en mi bienestar antes que en el de ustedes, por su apoyo económico, emocional y moral, y por brindarme los valores y principios que formaron la persona que soy hoy.

A mi hermano, gracias por acompañarme durante este proceso, por instruirme y enseñarme en muchos aspectos de la vida, por ayudarme en aquellos momentos en los que encontré dificultades académicas y por estar pendiente de mi crecimiento como estudiante de ingeniería.

A mi director de tesis, le expreso mi sincero agradecimiento por su orientación, dedicación y compromiso durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por compartir sus conocimientos, por guiarme en este proceso y por contribuir no solo a la culminación de este documento, sino también a mi formación y crecimiento profesional.

Finalmente, agradezco a todas las personas que hicieron parte de este camino, quienes con sus palabras, apoyo y compañía aportaron de alguna manera a la consecución de este sueño.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Formulación del problema	16
1.1 Planteamiento del Problema.....	16
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo General	18
1.2.2 Objetivos Específicos.....	18
1.3 Alcance.....	19
1.4 Justificación.....	19
2. Estado del Arte	20
2.1 Conceptos.....	20
2.1.1 Acondicionamiento de aire	20
2.1.2 Sistema de refrigeración por absorción solar	21
2.1.3 Solución bromuro de litio y agua (LiBr/H ₂ O).....	21
2.1.4 Carga térmica	22
2.1.5 Potencial de enfriamiento.....	22
2.1.6 Chiller o Unidades enfriadoras de liquido	22
2.1.7 COP	23
2.1.8 Colectores solares.....	23
2.1.9 Recurso solar	24
2.1.10 Radiación solar.....	25
2.2 Antecedentes	25

3. Metodología	29
3.1 Descripción de los Sistemas de Estudio.....	29
3.1.1 Sistema de Compresión Mecánica Instalado.....	29
3.1.2 Sistema de Refrigeración por Absorción Solar.....	32
3.2 Balances de Energía y Masa	36
3.2.1 Sistema de Compresión Mecánica Instalado.....	37
3.2.2 Sistema de Refrigeración por Absorción Solar.....	39
3.3 Consideraciones	43
3.3.1 Sistema de Compresión Mecánica Instalado.....	43
3.3.2 Sistema de Refrigeración por Absorción Solar.....	43
3.4 Condiciones de Operación	44
3.4.1 Sistema de Compresión Mecánica Instalado.....	44
3.4.2 Sistema de Refrigeración por Absorción Solar.....	44
3.5 Condiciones Ambientales.....	46
3.6 Validación de Modelos.....	48
4. Resultados	49
4.1 Validación de los Modelos.....	49
4.1.1 Sistema de Compresión Mecánica Instalada.....	49
4.1.2 Sistema de Refrigeración por Absorción Solar.....	51
4.2 Dimensionamiento Sistema Captación Solar	53
4.3 Evaluación del Desempeño del Sistema de Refrigeración por Absorción.....	57
4.4 Evaluación del Desempeño del Sistema de Refrigeración por Absorción Solar	59
4.5 Consumo de energía anual	64

4.5.1 Sistema de compresión mecánica.....	64
4.5.1 Sistema de refrigeración por absorción solar	65
4.6 Costos de la energía consumida	69
5. Conclusiones	71
Recomendaciones.....	72
Referencias Bibliográficas	74

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Eficiencia térmica para diferente tecnología de colector solar, producción térmica útil y energía solar incidente	35
Tabla 2 Balance de Energía y Masa Sistema Compresión Mecánica	39
Tabla 3 Balance de Energía y Masa Sistema de Refrigeración por Absorción Solar	42
Tabla 4 Condiciones de operación sistema mecánico	44
Tabla 5 Condiciones de operación sistema de absorción solar	44
Tabla 6 Datos de temperatura de bulbo seco en años meteorológicos típicos	47
Tabla 7 Datos de radiación solar horizontal global en años meteorológicos típicos	47
Tabla 8 Dimensionamiento del área del colector solar	56
Tabla 9 Aportes al sistema de absorción solar	63
Tabla 10 Consumo energético mensual de enfriadoras de agua por compresión mecánica	64
Tabla 11 Consumo de energía eléctrico y de gas	65
Tabla 12 Costos de energía eléctrica y de gas natural para cada sistema de refrigeración	69

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Chillers instalados en el edificio de ingeniería mecánica.....	30
Figura 2 Chillers instalados en el edificio de ingeniería mecánica.....	32
Figura 3 Ciclo Modelo Sistema de refrigeración por absorción solar	34
Figura 4 Modelo simplificado del sistema de compresión mecánica	37
Figura 5 Ciclo Sistema de refrigeración por absorción	40
Figura 6 Validación de modelo sistema mecánico ACAH040	49
Figura 7 Validación de modelo sistema mecánico ACAH060	50
Figura 8 Validación de modelo sistema refrigeración por absorción solar	51
Figura 9 Sensibilidad de colectores solares	53
Figura 10 Sensibilidad al flujo de agua fría	57
Figura 11 Desempeño mensual del sistema de absorción solar	59

Glosario

Absorbedor: Componente del sistema de refrigeración por absorción donde el absorbente capta el vapor del refrigerante proveniente del evaporador, liberando calor en el proceso.

Absorbente: Sustancia utilizada en sistemas de refrigeración por absorción cuya función es captar el refrigerante en estado vapor, permitiendo la continuidad del ciclo termodinámico.

Absorción: Proceso fisicoquímico mediante el cual una sustancia (absorbente) incorpora otra (refrigerante), generalmente en estado gaseoso, formando una solución.

Acondicionamiento: Proceso de adecuación de las condiciones ambientales de un espacio, principalmente temperatura, humedad y calidad del aire, para garantizar confort térmico.

Bromuro de litio (LiBr): Sal higroscópica utilizada como absorbente en sistemas de refrigeración por absorción.

Calidad del aire: Conjunto de características físicas, químicas y biológicas del aire que determinan su aptitud para la salud y el confort humano.

Capacidad calorífica: Propiedad de una sustancia que indica la cantidad de calor necesaria para elevar su temperatura en una unidad determinada.

Carga térmica: Cantidad de calor que debe ser removida o suministrada a un espacio para mantener condiciones térmicas adecuadas.

Climatización: Conjunto de técnicas destinadas a controlar las condiciones ambientales de un espacio, incluyendo temperatura, humedad y ventilación.

Clorofluorocarbonos (CFC): Compuestos químicos utilizados como refrigerantes que contienen cloro, flúor y carbono, conocidos por su impacto negativo en la capa de ozono.

Coefficiente de desempeño (COP): Relación entre la energía térmica útil obtenida y la energía consumida por un sistema, utilizada para evaluar su eficiencia.

Condensador: Dispositivo donde el refrigerante en estado vapor libera calor y se transforma en líquido dentro del ciclo de refrigeración.

Condiciones meteorológicas: Conjunto de variables atmosféricas como temperatura, humedad, radiación solar, presión y viento que influyen en el comportamiento de sistemas térmicos.

Eficiencia fototérmica: Medida del rendimiento con el cual un sistema convierte la radiación solar en energía térmica útil.

Evaporador: Componente donde el refrigerante se evapora al absorber calor del entorno, generando el efecto de enfriamiento.

Factibilidad: Evaluación técnica y operativa que determina si un proyecto puede llevarse a cabo con los recursos disponibles.

Generador: Elemento del sistema de absorción donde se suministra energía térmica para separar el refrigerante del absorbente.

Hidroclorofluorocarbonos (HCFC): Compuestos utilizados como refrigerantes con menor impacto que los CFC, pero aún perjudiciales para el medio ambiente.

Humedad: Cantidad de vapor de agua presente en el aire, influyente en el confort térmico y procesos de climatización.

Inocuidad ambiental: Condición en la cual una sustancia o proceso no genera efectos negativos significativos sobre el medio ambiente.

Nanofluidos: Fluidos que contienen nanopartículas suspendidas, diseñados para mejorar propiedades térmicas como la conductividad y transferencia de calor.

Nanomateriales: Materiales con estructura a escala nanométrica que presentan propiedades físicas y químicas mejoradas.

Piranómetros: Instrumentos utilizados para medir la radiación solar global incidente sobre una superficie.

Pirheliómetros: Dispositivos que miden la radiación solar directa proveniente del sol.

Potencial de enfriamiento: Capacidad máxima teórica de un sistema de refrigeración para extraer calor bajo condiciones específicas de operación.

Precipitación: Fenómeno meteorológico que incluye la caída de agua desde la atmósfera en forma de lluvia, nieve o granizo.

Radiación solar: Energía emitida por el sol en forma de ondas electromagnéticas que llega a la superficie terrestre.

Renovable: Característica de una fuente de energía que se regenera de manera natural y continua, como la energía solar.

Sistema de refrigeración por absorción: Tecnología de enfriamiento que utiliza energía térmica en lugar de eléctrica para producir frío mediante un ciclo de absorción.

Sistemas fotovoltaicos: Conjuntos de dispositivos que convierten la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico.

Sostenibilidad: Capacidad de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos de futuras generaciones.

Temperatura: Magnitud física que indica el nivel de energía térmica de un cuerpo o sistema.

Viabilidad: Análisis integral que considera aspectos técnicos, económicos y ambientales para determinar la conveniencia de un proyecto.

Volátil: Propiedad de una sustancia que le permite evaporarse fácilmente a bajas temperaturas.

Resumen

Título: Evaluación del Potencial de Enfriamiento de un Sistema de Refrigeración por Absorción Solar para Acondicionamiento de Aire en un Edificio Universitario*

Autor: Kevin Daniel Maldonado Moreno**

Palabras Clave: Refrigeración, Absorción, Potencial de Enfriamiento, COP, Captadores Solares, Solución LiBr/H₂O.

Descripción: El presente proyecto de grado evalúa el potencial de enfriamiento de un sistema de refrigeración por absorción solar con solución de bromuro de litio-agua (LiBr/H₂O), aplicado al acondicionamiento de aire en un edificio universitario, como alternativa a los sistemas convencionales de compresión mecánica, los cuales presentan altos consumos energéticos y utilizan refrigerantes con impacto ambiental. La propuesta considera el uso de energía solar térmica para accionar un sistema de absorción LiBr/H₂O, donde el agua actúa como refrigerante y el bromuro de litio como absorbente. La metodología incluye la caracterización del sistema existente, el desarrollo de un modelo termodinámico, el análisis del área disponible para la instalación de colectores solares y la comparación de su desempeño con el sistema de compresión mecánica actualmente instalado en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

Los resultados mostraron que los modelos desarrollados reprodujeron adecuadamente el comportamiento de los sistemas analizados, con errores inferiores al 5 %. El análisis de los colectores solares identificó a los colectores de tubos al vacío como la alternativa más eficiente, alcanzando eficiencias superiores al 50 % y permitiendo aprovechar un área disponible de 1.217,9 m² para alimentar dos chillers de absorción de 175,84 kW cada uno. Asimismo, el sistema de absorción solar logró una reducción aproximada del 66,3 % en el consumo de energía eléctrica respecto al sistema de compresión mecánica, cuyo consumo anual fue de 301.310,72 kWh. Sin embargo, debido al requerimiento de gas natural como fuente térmica auxiliar, el costo energético total del sistema de absorción resultó aproximadamente un 34,9 % superior al del sistema convencional.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Carlos Fidel Amarís Castilla. Ingeniero Mecánico, MSc, PhD.

Abstract

Title: Evaluation of the Cooling Potential of a Solar Absorption Refrigeration System for Air Conditioning in a University Building^{*}

Author: Kevin Daniel Maldonado Moreno^{**}

Key Words: Refrigeration, Absorption, Cooling Potential, COP, Solar Collectors, LiBr/H₂O Solution.

Description: This thesis evaluates the cooling potential of a solar absorption refrigeration system using a lithium bromide-water (LiBr/H₂O) solution, applied to air conditioning in a university building, as an alternative to conventional mechanical compression systems, which consume large amounts of energy and use refrigerants that have an environmental impact. The proposal considers the use of solar thermal energy to power a LiBr/H₂O absorption system, where water acts as the refrigerant and lithium bromide as the absorbent. The methodology includes characterizing the existing system, developing a thermodynamic model, analyzing the area available for installing solar collectors, and comparing their performance with the mechanical compression system currently installed at the School of Mechanical Engineering at the Industrial University of Santander.

The results showed that the developed models adequately reproduced the behavior of the analyzed systems, with errors of less than 5%. The analysis of the solar collectors identified evacuated tube collectors as the most efficient alternative, achieving efficiencies exceeding 50% and allowing for the use of an available area of 1,217.9 m² to power two absorption chillers of 175.84 kW each. Likewise, the solar absorption system achieved an approximate 66.3% reduction in electricity consumption compared to the mechanical compression system, whose annual consumption was 301,310.72 kWh. However, due to the requirement for natural gas as an auxiliary heat source, the total energy cost of the absorption system was approximately 34.9% higher than that of the conventional system.

^{*} Degree Work

^{**} Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Advisor: Carlos Fidel Amaris Castilla. Mechanical Engineer, MSc, PhD.

Introducción

El aire acondicionado, aunque esencial en zonas de clima cálido, representa un consumo significativo de energía eléctrica en los edificios, cercano al 20 %. Además, su uso contribuye de manera importante a los impactos relacionados con el cambio climático. Las proyecciones indican que tanto la demanda global de refrigeración como el consumo energético requerido para cubrirla continuarán en aumento durante las próximas décadas (IEA, 2018). Frente a este panorama, la búsqueda de tecnologías más limpias y eficientes se ha convertido en una prioridad para instituciones académicas, industriales y gubernamentales.

Los sistemas de refrigeración convencionales, basados en compresores mecánicos, continúan dominando el mercado global. No obstante, en un contexto de calentamiento global, la dependencia de estos equipos se vuelve insostenible: su funcionamiento intensivo en electricidad incrementa las emisiones de dióxido de carbono, mientras que el uso de refrigerantes como los HFC contribuye al efecto invernadero. Esta situación genera un círculo vicioso en el que el aumento de la demanda de aire acondicionado, motivado por el alza de las temperaturas, a su vez intensifica el cambio climático, reforzando un ciclo de retroalimentación negativa que limita la viabilidad de esta tecnología a largo plazo (UNEP, 2020). Por otro lado, las opciones basadas en fuentes renovables, como la energía solar, no solo permiten disminuir los costos de operación, sino que también representan una oportunidad para mitigar el impacto ambiental del sector.

En Bucaramanga, ciudad con clima monzónico y temperaturas promedio cercanas a los 21,4 °C —con máximas que alcanzan alrededor de 25,5 °C— y precipitaciones anuales de aproximadamente 1189 mm, la demanda de climatización es una constante, especialmente durante los periodos secos que se extienden a lo largo del año (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, s.f.). En Bucaramanga, la demanda de energía eléctrica ha venido

en aumento como resultado del crecimiento de los sectores residencial, comercial e industrial. Durante 2024, el consumo del Operador de Red alcanzó los 3.438 GWh, reflejando tanto la dinámica económica como la ampliación de la infraestructura en la ciudad. El mayor consumo proviene del sector residencial con 1.191 GWh, seguido por el comercial con 490 GWh y el industrial con 203 GWh (ESSA, 2024). Este incremento constante ha llevado a desarrollar proyectos de modernización, reposición y ampliación de subestaciones en Bucaramanga, con el propósito de mantener la confiabilidad del servicio y responder a la creciente presión sobre la red eléctrica local, la cual se intensifica por el uso extendido de sistemas como los chillers convencionales. Si bien las alternativas basadas en absorción solar todavía se encuentran en una etapa temprana de adopción, la ciudad y su entorno cuentan con condiciones favorables para aprovechar este tipo de soluciones. Esto abre la posibilidad de avanzar hacia sistemas de climatización más sostenibles, que no solo reduzcan costos y emisiones, sino que también respondan mejor a las necesidades y características propias del contexto local.

Dentro de estas soluciones, la refrigeración por absorción ha ganado protagonismo al integrar pares de trabajo como bromuro de litio y agua ($\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$). Este sistema se caracteriza por su seguridad, al no emplear sustancias inflamables ni tóxicas, y por su capacidad de adaptarse a fuentes térmicas sostenibles, lo que lo convierte en una tecnología prometedora para regiones con alta radiación solar (Arnabat, 2023).

En la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander se utiliza un chiller de compresión mecánica para la climatización, lo que implica un alto gasto energético. Por ello, este proyecto busca evaluar el desempeño de un sistema de refrigeración solar por absorción con mezcla $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$, valorando su factibilidad como alternativa al equipo actualmente instalado.

1. Formulación del Problema

1.1 Planteamiento del Problema

El uso de los sistemas de refrigeración convencional con compresores mecánicos conlleva un alto consumo de energía eléctrica, lo que impacta significativamente los costos operativos y la huella de carbono de los edificios. Estos sistemas requieren un suministro constante de electricidad para accionar el compresor, lo que puede resultar en costos operativos elevados, especialmente en regiones donde las tarifas eléctricas son altas (Arnabat, 2023). Los refrigerantes comúnmente utilizados en estos sistemas, como los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), tienen un impacto negativo en el medio ambiente, contribuyendo al agotamiento de la capa de ozono y al efecto invernadero (Arnabat, 2023). En regiones con considerables niveles de temperatura y radiación solar, como Bucaramanga los sistemas de aire acondicionado representan un consumo energético significativo en sus edificios.

El aprovechamiento de energía solar térmica mediante sistemas de refrigeración por absorción con $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ representa una alternativa para reducir el consumo energético y mejorar la sostenibilidad del sistema de climatización. Los sistemas de refrigeración por absorción tienen la ventaja de poder ser alimentadas por fuentes de energías renovables o residuales, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. Por otro lado, estos son sistemas que contribuyen a la operación silenciosa debido a que producen menos vibraciones y ruido (Sarachu, 2024). A diferencia de los sistemas de refrigeración por compresión mecánica, que requieren una alta potencia eléctrica para su funcionamiento, la implementación de este enfoque permite reducir significativamente el consumo energético al limitarlo únicamente a los accionamientos de bombas y soplantes. Esta eficiencia energética se vuelve aún más relevante en los días cálidos de verano, cuando la demanda de refrigeración es mayor, ya que el sistema propuesto disminuye el consumo

de electricidad. La mezcla agua y bromuro de litio ($\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$) se distingue por su alta capacidad calorífica y su seguridad, ya que ambas sustancias no son tóxicas ni inflamables, además de que la solución de bromuro de litio no es volátil (Arnabat, 2023). También se destaca su inocuidad ambiental (Medidas y condiciones para prevenir la contaminación ambiental y evitar la contaminación de los alimentos) al ser dos componentes respetuosos con el medio ambiente. El bromuro de litio mejora la absorción y la eficiencia del sistema debido a su alta afinidad por el agua, pero el agua limita la temperatura de operación, no siendo adecuado para aplicaciones por debajo de 0°C (Toledo, 2025).

En la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, el sistema encargado de producir agua fría para la climatización del edificio es un chiller de compresión mecánica, el cual representa un alto consumo energético en el edificio. En este trabajo se propone evaluar el desempeño energético de un sistema de refrigeración por absorción solar para determinar su viabilidad como alternativa o complemento al chiller mecánico instalado en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Lo anterior nos lleva a la siguiente pregunta de investigación ¿Cuál es el desempeño termodinámico de un sistema de refrigeración por absorción solar para el acondicionamiento de aire con la mezcla de $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$, considerando su capacidad para suplir la potencia nominal del chiller de compresión mecánica instalado en un edificio universitario?

Este estudio permitirá establecer la factibilidad técnica de un sistema de refrigeración por absorción solar para una climatización sostenible en la Universidad Industrial de Santander.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo General*

Valorar el desempeño termodinámico de un sistema de refrigeración por absorción solar para el acondicionamiento de aire con la mezcla LiBr/H₂O, considerando su capacidad para suplir la potencia nominal del chiller de compresión mecánica instalado en un edificio universitario.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

Identificar la potencia nominal y características técnicas del chiller de compresión mecánica actualmente instalado en el edificio de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad industrial de Santander.

Desarrollar un modelo termodinámico de un sistema de refrigeración por absorción solar, considerando las condiciones climáticas de la ubicación y la disponibilidad de radiación solar sobre el edificio en estudio.

Determinar el área disponible en la cubierta del edificio de la escuela de ingeniería mecánica y la capacidad térmica máxima que puede aportar al sistema de refrigeración por absorción solar en comparación con el chiller instalado actualmente.

Estimar el desempeño del sistema de refrigeración por absorción y la potencia térmica disponible bajo diferentes condiciones operativas, considerando la capacidad nominal del chiller instalado actualmente, y la variabilidad de las condiciones climáticas de temperatura y radiación solar en la ciudad de Bucaramanga.

1.3 Alcance

Este proyecto aborda la evaluación del potencial de un sistema de refrigeración solar por absorción con solución LiBr/H₂O aplicado al edificio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Su desarrollo se limita a la simulación y análisis del sistema, sin considerar la construcción ni la instalación física del mismo.

El trabajo incluye la caracterización del chiller mecánico existente, el estudio del recurso solar en Bucaramanga, la estimación del área útil disponible para colectores solares y la comparación del desempeño del sistema propuesto frente al actual.

Los resultados permitirán establecer la viabilidad técnica del sistema de absorción solar como alternativa de climatización sostenible, aportando bases académicas y metodológicas para futuros proyectos de implementación en la universidad y en edificaciones similares.

1.4 Justificación

Este proyecto surge como respuesta a la creciente necesidad de reducir el alto consumo energético y la dependencia de sistemas de climatización convencionales dentro del edificio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Aunque la propuesta no se materializa en la instalación física del sistema, la simulación desarrollada permite demostrar la viabilidad técnica y confiabilidad de implementar la refrigeración por absorción solar, aportando evidencia sobre su potencial para compensar el gasto energético generado por el chiller mecánico actualmente en uso.

La investigación tiene un impacto académico directo, ya que fortalece los conocimientos de los estudiantes en áreas clave como climatización, termodinámica, sistemas de refrigeración y aprovechamiento de la energía solar, convirtiéndose en una herramienta formativa para el diseño de soluciones sostenibles. En el ámbito institucional, el proyecto representa una alternativa para

acondicionar los espacios a menor costo operativo y con una significativa reducción de la huella ambiental, alineándose con los objetivos de eficiencia energética y sostenibilidad que demanda el contexto actual.

En el campo social, los beneficios se extienden más allá de la universidad, pues el estudio de tecnologías renovables para climatización contribuye a la formación de profesionales con conciencia ambiental y capacidad de proponer soluciones aplicables a otros sectores de la región. Además, busca motivar el interés estudiantil en proyectos que aborden los desafíos energéticos locales, promoviendo una cultura de innovación sostenible en la misma Escuela de Ingeniería Mecánica.

El enfoque adoptado en esta investigación combina el modelado termodinámico con el análisis del potencial solar de Bucaramanga, lo que permite evaluar la factibilidad del sistema y proyectar su aplicabilidad real. De esta manera, la justificación del proyecto se fundamenta en su aporte teórico, metodológico y práctico, al proponer una alternativa que articula el uso eficiente de la energía con la mitigación de los impactos ambientales asociados a la climatización.

2. Estado del Arte

2.1 Conceptos

2.1.1 *Acondicionamiento de aire*

El acondicionamiento de aire es el proceso mediante el cual se controla y regula la temperatura, humedad, limpieza y distribución del aire en un espacio cerrado, con el objetivo de mejorar el confort y la calidad del aire interior.

2.1.2 Sistema de refrigeración por absorción solar

Es uno de los sistemas más sostenibles para el acondicionamiento de aire. Este utiliza la energía térmica proveniente del sol para generar frío. El funcionamiento del sistema se basa en el intercambio de calor entre cuatro componentes: generador, absorbedor, condensador y evaporador, operando en dos niveles de presión. En alta presión, el generador recibe energía térmica, evaporando parcialmente el refrigerante, cuyo vapor fluye al condensador, mientras que la solución restante vuelve al absorbedor. En baja presión, el evaporador genera frío al reducir la presión del refrigerante líquido, permitiendo su evaporación. El absorbedor, enfriado por un sumidero externo, capta el vapor del evaporador y lo reconcentra para reiniciar el ciclo, asegurando un proceso continuo de enfriamiento. Su principal ventaja es el uso de una fuente de energía renovable mediante colectores solares reemplazando la electricidad (Romero & Carbonell, 2014).

2.1.3 Solución bromuro de litio y agua (LiBr/H₂O)

La mezcla de bromuro de litio y agua es ampliamente utilizada en sistemas de refrigeración por absorción (Jayden, 2024). El agua actúa como refrigerante gracias a su alto calor latente de evaporación, lo que mejora la eficiencia en sistemas de climatización de gran escala. Sin embargo, solo puede operar con temperaturas de evaporación superiores a 0°C (entre 4°C y 10°C), lo que limita su uso en refrigeración. El bromuro de litio (LiBr) es el absorbente, una sal blanca con alta afinidad por el agua, miscible hasta un 75% y con una presión de vapor extremadamente baja. Estos sistemas alcanzan un coeficiente de operación (COP) entre 0.7 y 1.33 y potencias entre 4,5 kW y 5.000 kW. Tanto el agua como el bromuro de litio son sustancias seguras, ya que no son tóxicas ni inflamables (Alexis, 2019).

2.1.4 Carga térmica

La carga térmica es el proceso de determinar la cantidad de calor que debe añadirse o extraerse de un espacio para mantener condiciones de confort térmico. Se mide en unidades de energía, como vatios, frigorías o toneladas de refrigeración, y su cálculo considera diversos factores, como la transferencia de calor a través de las estructuras del edificio, la radiación solar, la ocupación, los equipos internos y la ventilación.

2.1.5 Potencial de enfriamiento

El potencial de enfriamiento, también conocido como potencia nominal, indica la capacidad teórica máxima de un sistema de refrigeración para extraer calor bajo condiciones específicas de operación. Se calcula basándose en las especificaciones técnicas del equipo, incluyendo factores como el coeficiente de rendimiento (COP) y las condiciones de temperatura de entrada y salida. Normalmente medida en kilovatios.

2.1.6 Chiller o Unidades enfriadoras de líquido

Los chillers o unidades enfriadoras de líquido son equipos ideales para procesos industriales, como la manufactura de plásticos y alimentos, así como para sistemas de aire acondicionado. Disponibles en capacidades desde 1,5 hasta más de 2.000 toneladas, existen distintos tipos según su tecnología: tornillo, scroll, pistón, centrífugo y de absorción. Su principal ventaja es la capacidad de transportar agua refrigerada a largas distancias, permitiendo un control preciso de la temperatura en moldes, procesos industriales o unidades de climatización. Sus componentes clave incluyen compresor, condensador, válvula de expansión, evaporador y gas refrigerante, con opciones como R134, R410A y R404A, mientras que el R22 está en desuso. El proceso requiere electricidad para accionar el compresor, lo que puede generar altos costos operativos y aumentar la huella de carbono (Ecochillers, 2024).

2.1.7 COP

Es un indicador de la eficiencia de un sistema de refrigeración o bomba de calor, definido como la relación entre la energía térmica extraída o entregada y la energía eléctrica consumida por el compresor para lograrlo; en otras palabras, mide cuánta refrigeración o calefacción se obtiene por cada unidad de electricidad utilizada. Este valor resulta fundamental en edificaciones como oficinas, centros comerciales o industrias, donde conocer el COP permite seleccionar equipos que ofrezcan un mejor desempeño energético y reduzcan el consumo sin sacrificar resultados. El cálculo se realiza dividiendo la potencia calorífica entre la potencia eléctrica requerida, lo que refleja la cantidad de energía necesaria para producir 1 kW de frío o calor, de manera que cuanto mayor sea el COP, más eficiente será el equipo. Cabe resaltar que este coeficiente varía según las condiciones ambientales, ya que factores como la temperatura del aire o del agua influyen directamente en su valor; por ello, el COP no solo representa un criterio técnico para medir el gasto energético, sino también una referencia clave para valorar la sostenibilidad y el impacto ambiental de los sistemas de climatización (Aguirre, 2024).

2.1.8 Colectores solares

Es un dispositivo diseñado para transformar la radiación del sol en calor útil, empleándose en aplicaciones como la calefacción de espacios, la producción de agua caliente o la refrigeración solar. Existen principalmente dos tipos: los colectores planos, que trabajan a bajas temperaturas (hasta 90 °C con superficie plana y 150 °C con tubos de vacío), y los colectores de concentración, capaces de alcanzar niveles térmicos más elevados (150–500 °C). Su funcionamiento se basa en una superficie absorbente que capta la radiación solar y transfiere la energía al fluido de trabajo, aunque su eficiencia puede verse limitada por pérdidas de calor por conducción, convección y radiación. En respuesta a estas limitaciones, se han desarrollado tecnologías como los colectores

de absorción directa, donde el propio fluido capta la radiación solar, reduciendo la resistencia térmica y mejorando el aprovechamiento energético. Asimismo, la incorporación de nanofluidos (mezclas de líquidos con nanopartículas metálicas, de carbono o combinaciones de estas) ha mostrado un notable incremento en la eficiencia fototérmica, al mejorar la absorción de la radiación en un rango más amplio de longitudes de onda y transferir el calor más rápidamente al fluido. No obstante, estos avances enfrentan desafíos relacionados con el costo, la estabilidad de los nanomateriales y la viabilidad de su aplicación comercial. En conjunto, el captador solar constituye una tecnología clave para la generación de energía limpia y sostenible, con un papel estratégico en la reducción del consumo de combustibles fósiles y la mitigación del impacto ambiental (Guohua, Jinliang, Ting, & Kaiying, 2022).

2.1.9 Recurso solar

Definido como la energía que emite el sol y llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética, siendo una fuente limpia, abundante y renovable que sustenta la vida y puede transformarse en electricidad a través de sistemas fotovoltaicos. Su evaluación es indispensable para determinar el potencial de generación de una planta solar, ya que permite estimar de manera confiable la producción energética a lo largo del tiempo. Para medirlo, se utilizan tanto registros satelitales de largo plazo como estaciones meteorológicas instaladas en el sitio, las cuales registran de manera continua los diferentes componentes de la radiación solar (directa, difusa y global), además de variables como temperatura, humedad, presión, precipitación y velocidad del viento. Este proceso de medición combina herramientas especializadas, como piranómetros y pirheliómetros, con datos de reanálisis satelital, lo que posibilita simular con precisión el comportamiento futuro de la planta y ajustar la rentabilidad esperada de los proyectos fotovoltaicos (Iberdrola, s. f.-a).

2.1.10 Radiación solar

Corresponde a la energía que emite el sol y que se propaga en todas direcciones a través de ondas electromagnéticas, siendo la responsable de múltiples procesos vitales como la fotosíntesis, la regulación térmica del planeta y la formación del viento. Al atravesar la atmósfera, esta radiación puede ser absorbida, dispersada o reflejada, y finalmente llegar a la superficie terrestre en distintas formas: directa, cuando no sufre desviaciones; difusa, tras dispersarse por gases y partículas; y reflejada, producto del albedo de la superficie. Además, se clasifica según el tipo de rayos que la componen: infrarrojos, que transmiten calor; visibles, perceptibles en forma de luz y colores; y ultravioleta, de los cuales los UVA y UVB alcanzan la superficie con efectos significativos en la salud humana. Para cuantificarla, se utilizan piranómetros instalados en lugares libres de sombras, los cuales registran la energía incidente en vatios por metro cuadrado (W/m^2), que posteriormente pueden convertirse en unidades de energía (J/m^2). Esta medición, realizada de manera periódica en estaciones meteorológicas, resulta esencial para analizar la disponibilidad del recurso solar, evaluar riesgos sobre la salud y planificar proyectos de generación renovable (Iberdrola, s.f.).

2.2 Antecedentes

Romero et al (2014) llevaron a cabo un estudio sobre un sistema de refrigeración solar por absorción, diseñado para la comunidad de Kumay en Ecuador, con el propósito de ofrecer una opción sostenible para la climatización de un consultorio médico. El sistema implementado utilizó una máquina de absorción de simple efecto que operaba con la pareja de trabajo cloruro de litio-agua y colectores solares de tubos al vacío, alcanzando una eficiencia promedio del 60 %. Para analizar su desempeño, se realizaron mediciones experimentales de temperatura y eficiencia energética, obteniendo una temperatura de evaporación de 5 °C y un coeficiente de desempeño (COP) de 0,6. Los resultados demostraron que el sistema era capaz de generar una potencia de

enfriamiento cercana a 10 kW, garantizando condiciones térmicas adecuadas en entornos sin acceso a electricidad convencional. Se concluyó que, aunque el sistema es energéticamente viable, su implementación en regiones con fluctuaciones bruscas de radiación solar requiere la incorporación de estrategias de almacenamiento térmico.

López y García (2019) examinaron la incorporación de sistemas de refrigeración por absorción en entornos urbanos con alta demanda energética, enfocándose en edificaciones con uso continuo de aire acondicionado. El estudio evaluó la compatibilidad de estos sistemas con infraestructuras ya existentes, considerando factores como la disponibilidad de espacio, el impacto en la red eléctrica y los costos de instalación. Se compararon distintas configuraciones de colectores solares, tanto planos como de tubos al vacío, determinando que los primeros requieren una menor inversión inicial, aunque su eficiencia disminuye cuando la temperatura de operación es inferior a 80 °C. Los hallazgos mostraron que un sistema de absorción con colectores de tubos al vacío y almacenamiento térmico puede reducir el consumo de electricidad en hasta un 30 % en comparación con sistemas de compresión tradicionales. No obstante, se concluyó que, aunque su eficiencia en términos de coeficiente de desempeño (COP) es similar a la de los sistemas convencionales, su implementación enfrenta desafíos como el alto costo inicial y la necesidad de un área considerable para la instalación de los colectores solares, lo que limita su viabilidad en zonas urbanas con espacio reducido.

Romage et al. (2022) desarrollaron un estudio enfocado en el modelado y la simulación de un sistema de refrigeración solar basado en un ciclo de absorción adiabática, el cual fue alimentado mediante energía solar térmica de baja capacidad. Para evaluar su desempeño, se aplicaron balances de masa y energía en cada uno de los componentes del sistema, permitiendo analizar su comportamiento bajo condiciones específicas de operación. Los resultados evidenciaron que los

colectores solares planos de baja temperatura generaron un aporte térmico de 306 W con una radiación solar de 342 W/m², lo que permitió alcanzar una capacidad de enfriamiento de 150 W y un coeficiente de desempeño (COP) de 0,79. A partir del análisis realizado, se concluyó que este tipo de configuración es viable para la producción de refrigeración, demostrando que los sistemas de absorción adiabática pueden operar eficientemente utilizando colectores solares planos como fuente de energía térmica.

Ibrahim et al. (2024) realizaron una revisión sobre sistemas de refrigeración solar por absorción, enfocándose en la integración con almacenamiento térmico y estrategias de control. El estudio analizó sistemas de simple efecto con pares de trabajo como bromuro de litio-agua, operando a temperaturas del generador entre 75 °C y 95 °C y con coeficientes de desempeño (COP) entre 0,6 y 0,75. Asimismo, se evaluaron tecnologías de almacenamiento como tanques de agua caliente y materiales de cambio de fase, capaces de mantener temperaturas entre 70 °C y 90 °C. Los resultados evidenciaron que la variabilidad de la radiación solar (300–800 W/m²) afecta la estabilidad del sistema, por lo que el uso de almacenamiento térmico mejora la continuidad del enfriamiento y la eficiencia global.

Zacarías et al. (2024) desarrollaron el modelado y la simulación de un refrigerador solar para almacenamiento de medicamentos basado en un sistema de refrigeración por absorción alimentado con energía solar térmica. El análisis se realizó mediante balances de masa y energía en cada componente del sistema. Las condiciones de operación consideradas incluyeron temperaturas de evaporación entre -25 °C y -15 °C, y de condensación entre 25 °C y 35 °C, mientras que la temperatura del generador varió entre 55 °C y 95 °C. Los resultados mostraron que, para una potencia frigorífica de 0,725 kW, se requiere un aporte térmico aproximado de 1,2 kW en el generador, alcanzando coeficientes de desempeño (COP) entre 0,2 y 0,7. Asimismo, se

determinó que el área de colectores solares necesaria para dicha capacidad oscila entre 4,5 m² y 6,2 m². Se concluyó que el sistema es técnicamente viable para aplicaciones de refrigeración médica en zonas con disponibilidad de energía solar.

Zacarías et al. (2024) desarrollaron el modelado y la simulación de un sistema de aire acondicionado continuo basado en refrigeración por absorción de simple efecto, alimentado por energía solar térmica a baja temperatura mediante colectores solares de placa plana, con aplicación en zonas tropicales. El análisis se llevó a cabo mediante balances de masa y energía en cada componente del sistema. Los resultados indicaron que, para una capacidad de enfriamiento de 3,517 kW, se requiere un aporte térmico de 4,8 kW en el generador, operando a una temperatura aproximada de 85 °C. Asimismo, se determinó que el área necesaria de colectores solares es de aproximadamente 16 m². Se concluyó que este tipo de sistema es viable para aplicaciones de climatización en regiones con alta disponibilidad de radiación solar.

Mendoza et al. (2021) evaluaron la operación de un sistema de refrigeración por absorción utilizando energías renovables como la solar fotovoltaica y el biogás. El estudio incluyó una caracterización energética basada en mediciones de radiación solar en la ciudad de Montería y en el análisis del poder calorífico del biogás, cuya composición fue de 58 % de metano y 42 % de dióxido de carbono, alcanzando un valor de 23,05 MJ/kg. Experimentalmente, el sistema operó durante aproximadamente 8 horas con una carga de 1 litro de agua, obteniendo coeficientes de desempeño (COP) de 0,58 para energía eléctrica, 0,27 para energía solar y 0,07 para biogás. Los resultados evidenciaron el potencial de estas fuentes renovables para la generación de frío, concluyendo que su implementación en sistemas de refrigeración por absorción es técnica y energéticamente viable.

Finalmente, Rodríguez et al. (2017), evaluó el desempeño de un sistema de refrigeración solar basado en colectores parabólicos compuestos (CPC) acoplados a un sistema de absorción de simple efecto con bromuro de litio y agua. Se analizaron modelos teóricos y experimentales, comparando la eficiencia de conversión térmica en distintas condiciones de radiación. Se encontró que estos colectores pueden alcanzar temperaturas de hasta 90 °C, suficientes para alimentar un sistema de absorción de simple efecto con una eficiencia térmica del 55 %. Además, los experimentos demostraron que, bajo condiciones de radiación solar superiores a 750 W/m², el sistema logra un COP de 0.65, mientras que en días nublados la eficiencia se reduce significativamente. Sin embargo, se identificaron variaciones en la eficiencia debido a las fluctuaciones de la radiación solar, lo que subraya la necesidad de sistemas de almacenamiento térmico que optimicen su funcionamiento en condiciones meteorológicas variables.

3. Metodología

3.1 Descripción de los Sistemas de Estudio

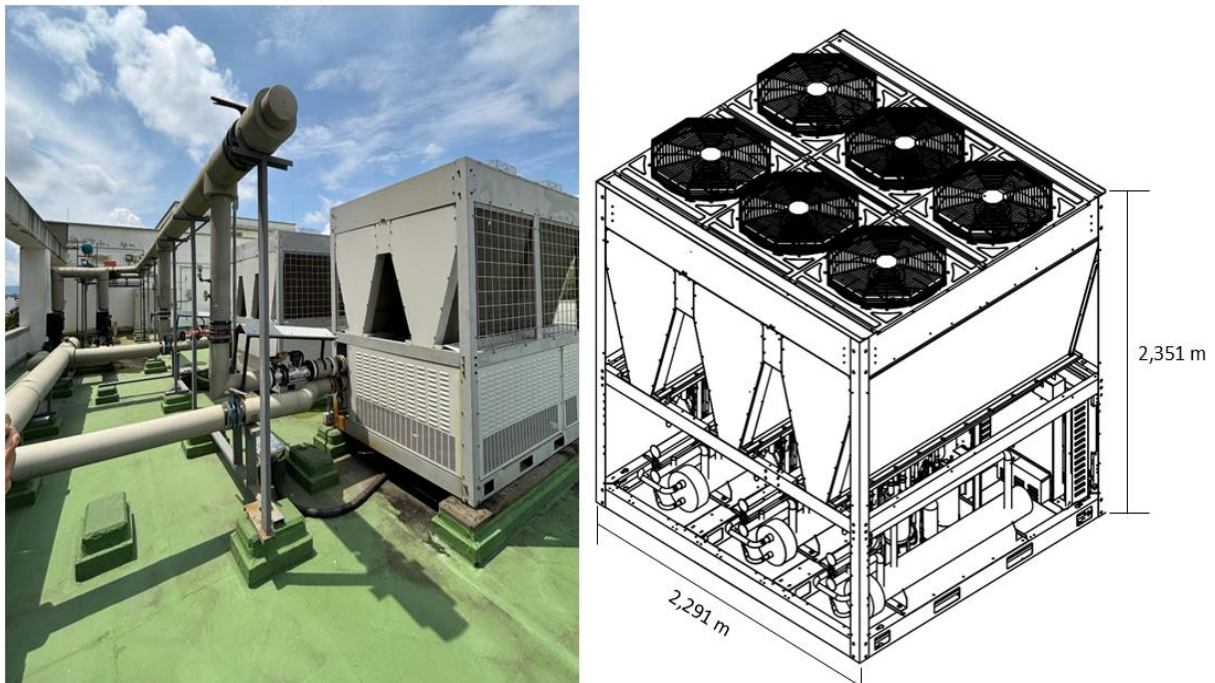
3.1.1 *Sistema de Compresión Mecánica Instalado*

El edificio de Ingeniería Mecánica cuenta con un sistema de acondicionamiento de aire conformado por dos enfriadores tipo scroll refrigerados por aire, modelos ACAH040 y ACAH060, ambos diseñados para operar con el refrigerante ecológico R410A. Estos chillers disponen de condensadores de tubos y aletas cruzadas fabricados en aluminio y cobre, con aletas anchas tipo persiana mejoradas, además de ventiladores axiales con motores de corriente continua sin escobillas. Los evaporadores, de carcasa y tubos, permiten manejar caudales de 373 LPM para el ACAH040 y 560 LPM para el ACAH060, y ambos equipos incorporan válvula de expansión electrónica para un control más preciso. En cuanto a su dimensionamiento, las dos unidades

presentan una altura de 2,351 metros, mientras que el ancho varía según la robustez de la máquina, siendo de 1,528 metros para el ACAH040 y de 2,291 metros para el ACAH060. La Figura 1 muestra ambos chillers ubicados en la azotea del edificio de ingeniería mecánica junto con el sistema de bombeo de agua a cada chiller y el dimensionamiento de la unidad ACAH060.

Figura 1

Chillers instalados en el edificio de ingeniería mecánica



Nota. La figura muestra la ubicación de los chillers ACAH en el edificio de ingeniería mecánica junto con las dimensiones de altura y ancho del chiller ACAH060. Tomado de *Air Cooled Scroll Chiller* (p. 19), por LG HVAC SOLUTION.

Los chillers trabajan bajo el principio de refrigeración por compresión de vapor, extraen el calor del agua que circula por el evaporador para entregarla fría al sistema de climatización. Esta

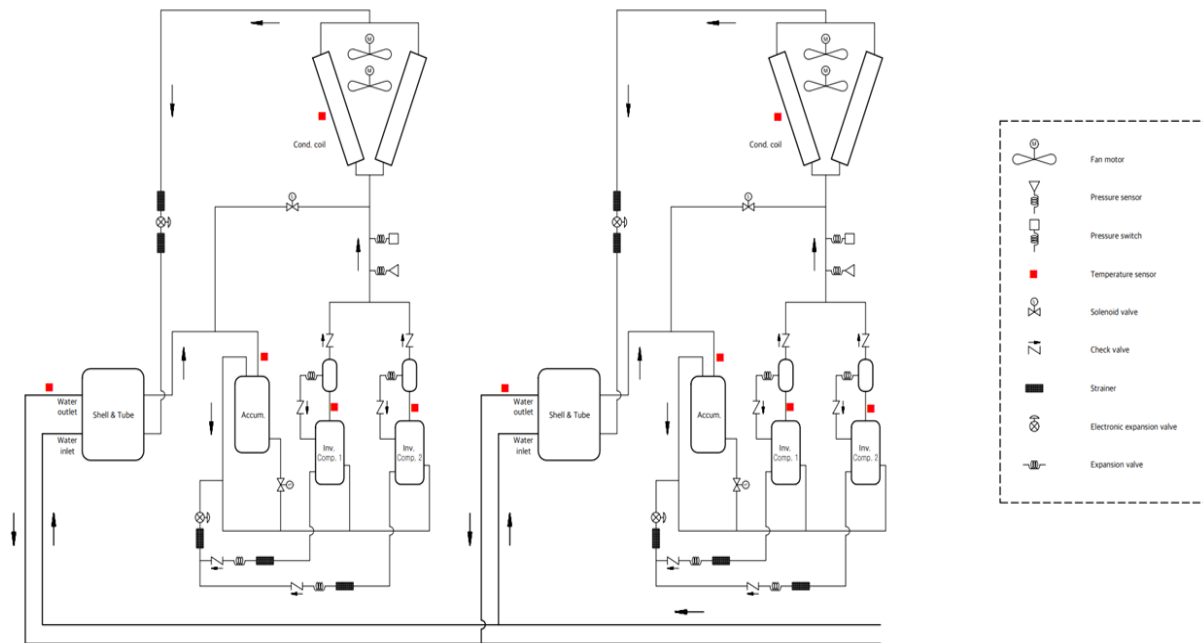
agua fría es distribuida hacia las cargas térmicas (fan coils, manejadoras de aire o equipos) retornando al chiller para ser enfriada nuevamente haciendo de esto un ciclo continuo.

El refrigerante evaporado es comprimido por los compresores de scroll, luego es conducido hacia el condensador enfriado por aire, mediante ventiladores disipan el calor al ambiente. Posteriormente, el refrigerante líquido pasa por la válvula de expansión reduciendo su presión y temperatura antes de regresar al evaporador. Todo el proceso es supervisado por sensores y dispositivos de protección. Cabe resaltar que el exceso de refrigerante líquido es separado del vapor por medio del acumulador, un dispositivo que actúa como depósito temporal y protege al compresor de posibles daños.

El chiller está compuesto por varios circuitos de refrigeración que funcionan de manera repetitiva dentro del mismo equipo. En el caso del ACAH040, el sistema cuenta con cuatro compresores, organizados en dos circuitos, cada uno con su condensador y su evaporador. Para el ACAH060, el principio es el mismo, pero con mayor capacidad, ya que dispone de seis compresores, distribuidos en tres circuitos, cada uno con su respectivo condensador y evaporador. En ambos modelos, el agua ingresa y sale por una línea común, la cual se conecta a los evaporadores tipo carcasa y tubos, donde se realiza el intercambio de calor y se enfría el agua antes de ser enviada al sistema. La Figura 2 ilustra el ciclo de refrigeración y los componentes para el chiller de cuarenta toneladas de refrigeración.

Figura 2

Ciclo de refrigeración sistema ACAH040



Nota. Este diagrama muestra el ciclo de refrigeración del sistema ACA040 junto con sus componentes, dispositivos de control y dirección del flujo refrigerante. Tomado de *Air Cooled Scroll Chiller* (p. 23), por LG HVAC SOLUTION.

3.1.2 Sistema de Refrigeración por Absorción Solar

El sistema de refrigeración por absorción solar que emplea agua y bromuro de litio se basa en un ciclo de absorción de efecto simple, en el cual el agua actúa como refrigerante y el bromuro de litio como absorbente (Ver esquema en Figura 3). El funcionamiento del sistema se apoya principalmente en el uso de energía térmica, la cual es suministrada de manera prioritaria por colectores solares. No obstante, para garantizar la operación continua del sistema cuando la radiación solar no es suficiente, se incorpora una caldera a gas que actúa como fuente de apoyo, aportando el calor necesario al generador.

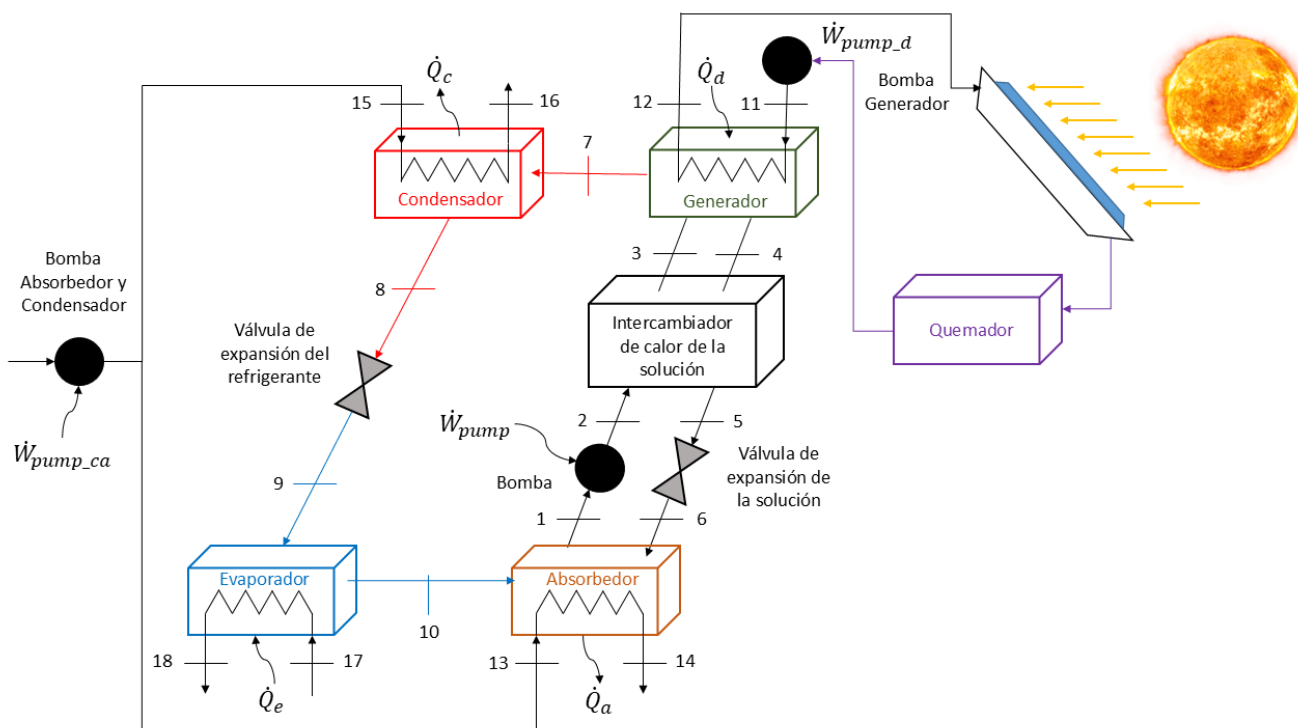
El ciclo está compuesto por los elementos fundamentales: evaporador, absorbedor, generador y condensador, además de un intercambiador de calor de solución y varias bombas auxiliares. En el evaporador, el agua refrigerante se evapora a baja presión al absorber calor del medio que se desea enfriar. El vapor generado se dirige al absorbedor, donde es absorbido por la solución concentrada de bromuro de litio, proceso durante el cual se libera calor que es retirado mediante un circuito de agua fría, impulsado por una bomba hacia el absorbedor para mantener condiciones adecuadas de operación.

La solución diluida resultante es transportada por medio de una bomba de solución hacia el generador. En este componente, la solución recibe energía térmica proveniente de los colectores solares y del sistema de apoyo a gas, provocando la separación del agua refrigerante en forma de vapor y regenerando la solución concentrada de bromuro de litio. El vapor de agua liberado fluye hacia el condensador, donde cede calor a un fluido externo y se condensa.

El refrigerante condensado pasa luego por un dispositivo de expansión que reduce su presión antes de retornar al evaporador, cerrando el ciclo. La solución concentrada de bromuro de litio, tras ceder parte de su calor en el intercambiador de solución, retorna al absorbedor para reiniciar el proceso.

Figura 3

Ciclo Modelo Sistema de refrigeración por absorción solar



Nota. El diagrama ilustra el flujo del refrigerante a través de los componentes del sistema de refrigeración por absorción solar y las fuentes de energía que influyen en el ciclo.

Los colectores solares térmicos se evaluaron con base en datos de desempeño establecidos por la normativa griega TOTEE-KENAK. Para ello, se consideraron tres tipos de colectores, cuya eficiencia térmica se determina mediante la ecuación general correspondiente presentada en la Tabla 1. Cada uno de estos colectores posee parámetros y coeficientes de eficiencia específicos, cuyos valores son proporcionados por dicha normativa. En particular, en este estudio se analizan el colector de placa plana simple (Simple FPC), el colector de placa plana avanzado (Advanced FPC) y el colector de tubos al vacío (Bellos, Papavasileiou, Kekatou, & Michalis, 2022). Los parámetros son los siguientes a_0 , a_1 y a_2 , la irradiación es representada por G_T . Asimismo, se

tienen en cuenta las temperaturas del fluido de trabajo y del ambiente, las cuales influyen directamente en el desempeño térmico del colector. La Tabla 1 también presenta la ecuación empleada para el cálculo de la producción térmica útil del campo solar, la cual depende de la eficiencia del colector y de la energía solar incidente. A su vez, la energía solar de entrada está determinada por el área del colector y la irradiación solar disponible.

Tabla 1

Eficiencia térmica para diferente tecnología de colector solar, producción térmica útil y energía solar incidente

Tipo de colector	Ecuación de eficiencia
General	$\eta_{col} = a_0 - a_1 \frac{T_{fluid} - T_{am}}{G_T} - a_2 \frac{(T_{fluid} - T_{am})^2}{G_T}$
Placa Plana simple	$\eta_{col} = 0.73 - 5.51 \frac{T_{fluid} - T_{am}}{G_T} - 0.006 \frac{(T_{fluid} - T_{am})^2}{G_T}$
Placa Plana Avanzado	$\eta_{col} = 0.77 - 3.75 \frac{T_{fluid} - T_{am}}{G_T} - 0.015 \frac{(T_{fluid} - T_{am})^2}{G_T}$
Tubos al Vacío	$\eta_{col} = 0.70 - 1.80 \frac{T_{fluid} - T_{am}}{G_T} - 0.020 \frac{(T_{fluid} - T_{am})^2}{G_T}$
Producción Térmica Útil	$\dot{Q}_u = \eta_{col} \dot{Q}_{sol}$
Energía Solar Incidente	$\dot{Q}_{sol} = A_{col} G_T$

El colector de placa plana simple es el tipo más básico de colector solar térmico, compuesto por una placa absorbente, una cubierta transparente —generalmente de vidrio— y un aislamiento térmico en la parte posterior. Su funcionamiento consiste en captar la radiación solar y transferir el calor al fluido que circula por tubos adheridos a la placa. No obstante, presenta elevadas pérdidas térmicas, principalmente por convección y radiación hacia el ambiente, debido a la ausencia de superficies selectivas avanzadas y a un nivel de aislamiento limitado. Esto se traduce en

coeficientes de pérdidas relativamente altos (por ejemplo, $a_1 = 5,51 \text{ W/m}^2\text{K}$), lo que provoca una rápida disminución de su eficiencia ante bajas irradiaciones o cuando se incrementa la temperatura de operación.

El colector de placa plana avanzado representa una mejora del colector plano simple, conservando su estructura básica, pero incorporando avances tecnológicos significativos. Entre estos destacan el uso de superficies selectivas en el absorbedor, que incrementan la absorción de radiación solar y reducen las pérdidas por emisión térmica, así como un mejor aislamiento que disminuye las pérdidas por conducción y convección. Además, presenta una mayor eficiencia óptica. Estas mejoras permiten reducir de manera considerable las pérdidas térmicas (por ejemplo, $a_1 = 3,75 \text{ W/m}^2\text{K}$), destacándose especialmente la disminución de las pérdidas radiactivas a temperaturas elevadas.

El colector de tubos al vacío está constituido por tubos cilíndricos en cuyo interior se ubica el absorbedor dentro de un entorno al vacío, lo cual constituye su principal ventaja. Esta configuración elimina prácticamente las pérdidas por convección y, junto con el uso de superficies selectivas, reduce también las pérdidas por radiación. Gracias a ello, este tipo de colector puede operar a temperaturas más altas con una menor degradación de su eficiencia. En consecuencia, presenta los coeficientes de pérdidas térmicas más bajos (por ejemplo, $a_1 = 1,80 \text{ W/m}^2\text{K}$), lo que lo convierte en la opción más eficiente bajo condiciones de operación exigentes.

3.2 Balances de Energía y Masa

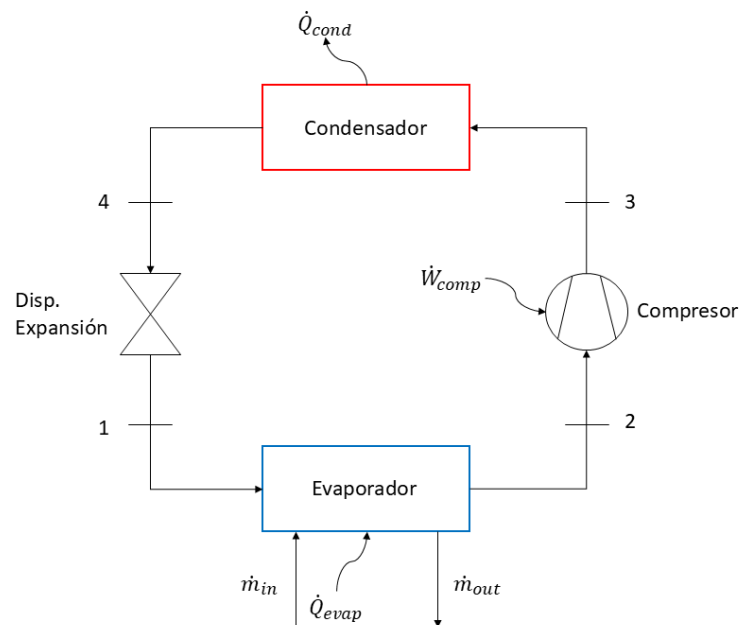
Los modelos de ambos sistemas tanto el mecánico como el de absorción se desarrollaron a través de la herramienta Engineering Equation Solver (EES).

3.2.1 Sistema de Compresión Mecánica Instalado

Para el análisis del sistema de refrigeración se realizó un balance de masa y energía modelando el equipo como un ciclo de compresión mecánica de vapor real, el cual representa una simplificación adecuada del funcionamiento del sistema. En este ciclo se consideran cuatro estados principales del refrigerante: el estado 1 corresponde a la salida del dispositivo de expansión y entrada al evaporador; el estado 2 es la salida del evaporador y entrada al compresor; el estado 3 representa la salida del compresor y entrada al condensador; y el estado 4 es la salida del condensador y entrada nuevamente al dispositivo de expansión como se muestra en la figura 4.

Figura 4

Modelo simplificado del sistema de compresión mecánica



Nota. El diagrama representa el modelo empleado como una simplificación del sistema de compresión mecánica, correspondiente al ciclo de compresión de vapor.

La Tabla 2 presenta los balances de energía y masa para cada componente del sistema de compresión mecánica.

Bajo condiciones de operación en estado estacionario y despreciando las variaciones de energía cinética y potencial, se asume que el caudal másico del refrigerante permanece constante a lo largo de todo el ciclo, tal como se establece en la ecuación (1). A partir del balance energético, la transferencia de calor absorbida durante el proceso de evaporación puede expresarse en función de la diferencia de entalpías entre los estados 1 y 2, como se indica en la ecuación (1). De manera alternativa, esta capacidad de refrigeración puede determinarse a partir del flujo de agua que atraviesa el evaporador, considerando las condiciones de entrada y salida del agua fría proveniente del exterior.

Por su parte, el calor rechazado y el trabajo de compresión se calculan a partir de las variaciones de entalpía entre los estados 3–4 y 2–3, respectivamente, tal como se muestra en las ecuaciones (2) y (3). El proceso de expansión se modela como una válvula de estrangulamiento, por lo que se considera isoentálpico, de acuerdo con la ecuación (4).

La eficiencia global del compresor se define como la relación entre el trabajo ideal isentrópico y el trabajo real del equipo. Para su determinación, se emplea una correlación de compresores, que depende principalmente de la relación de compresión y de la temperatura del refrigerante a la entrada del compresor. Finalmente, el desempeño del sistema se evalúa mediante el coeficiente de desempeño (COP), definido como la razón entre la capacidad de enfriamiento y la potencia requerida.

Tabla 2

Balance de Energía y Masa Sistema Compresión Mecánica

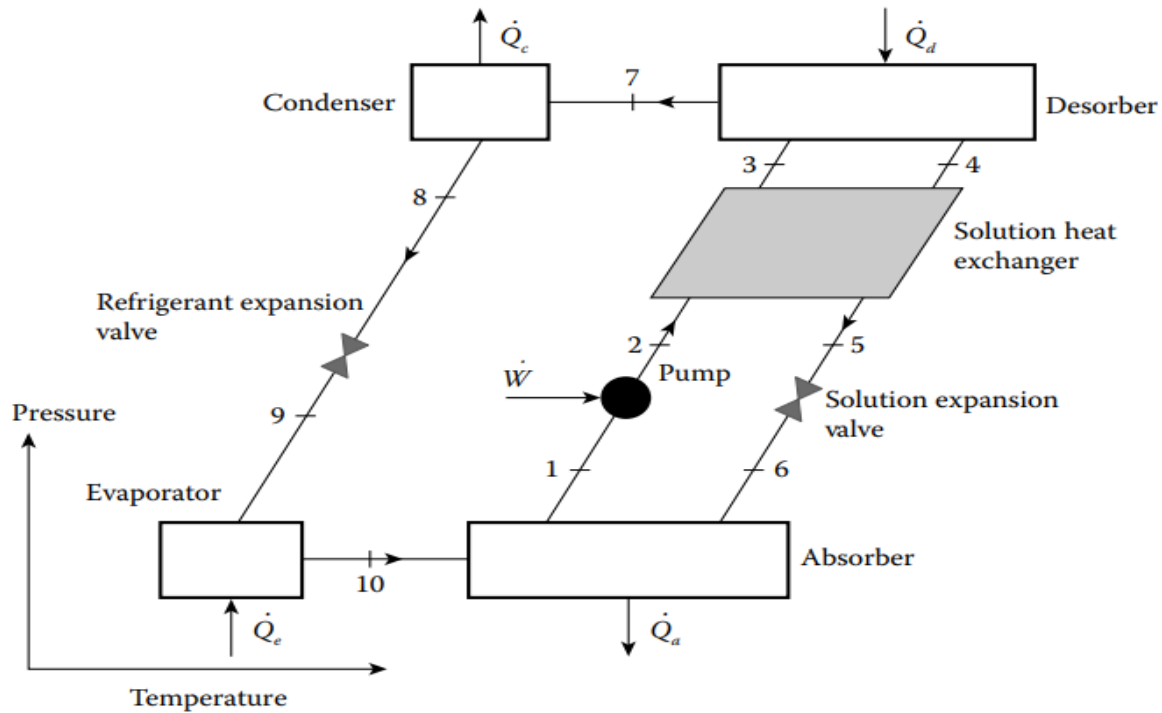
Componente	Balance de Masa	Balance de Energía	Nº
Evaporador	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$\dot{m}_1 h_1 + \dot{Q}_{evap} = \dot{m}_2 h_2$	(1)
	$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in}$	$\dot{m}_1 h_1 + \dot{Q}_{evap} = \dot{m}_2 h_2$	
Compresor	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$	$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{in} h_{in} = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_{out} h_{out}$	(2)
		$\dot{m}_2 h_2 + \dot{W}_{comp_S} = \dot{m}_3 h_{3_S}$	
Condensador	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$	$\dot{m}_2 h_2 + \dot{W}_{comp_R} = \dot{m}_3 h_3$	(3)
		$\eta_{global} = \dot{W}_{comp_S} / \dot{W}_{comp_R}$	
Dispositivo de expansión	$\dot{m}_4 = \dot{m}_1$	$\dot{m}_4 h_4 + \dot{Q}_{cond} = \dot{m}_3 h_3$	(4)
		$h_4 = h_1$	

3.2.2 Sistema de Refrigeración por Absorción Solar

Para el análisis de los balances de masa y energía, nos guiamos en el diagrama del ciclo de refrigeración por absorción mostrado en la Figura 5, el cual sirve como base para introducir y desarrollar las ecuaciones que describen el comportamiento de los sistemas de refrigeración por absorción solar.

Figura 5

Ciclo Sistema de refrigeración por absorción



Nota. Esquema del ciclo de un enfriador de absorción de agua/bromuro de litio de efecto simple. Tomado de *ABSORPTION CHILLERS AND HEAT PUMPS* second edition (p. 124), por Herold, K., Radermacher, R., & Klein, S.

En régimen permanente, no se presenta acumulación de masa dentro de ninguno de los equipos, por lo que la suma de los flujos másicos que entran y salen de cada componente se equilibra. Adicionalmente, al suponerse que el agua y el bromuro de litio no reaccionan químicamente entre sí, el balance debe cumplirse de manera individual para cada sustancia. Dado que el sistema está constituido únicamente por estas dos especies, es posible formular solo dos ecuaciones de balance de masa independientes (Herold, Radermacher, & Klein, 2016).

En la Tabla 3 se presenta los balances de energía y masa de los componentes del sistema de refrigeración por absorción solar.

Tomando como referencia el generador, el balance puede plantearse de manera global en términos de la masa total, como se muestra en la ecuación (5). Esta misma ecuación incluye el balance de bromuro de litio, bajo la suposición de que el vapor que abandona el generador no contiene sal. Por su parte, el balance de agua se obtiene a partir de la diferencia entre el balance global de masa y el balance de bromuro de litio. Este procedimiento puede extenderse a los demás componentes, verificándose que la conservación de la masa se cumple en todo el sistema.

La relación de circulación de la solución, expresada en la ecuación (5), indica cuántas veces el caudal líquido que circula por la bomba de solución supera al caudal de vapor generado.

En cuanto al análisis energético, el balance en el generador se presenta en la ecuación (5), considerando los flujos másicos de solución y vapor junto con sus respectivas entalpías. Para el evaporador, el balance energético da lugar a la ecuación (6), donde la carga térmica se determina a partir de la diferencia de entalpías entre la entrada y la salida del refrigerante. De manera análoga, el mismo procedimiento se aplica al condensador, obteniéndose la ecuación (7). En ambos equipos puede simplificarse el análisis al considerar que el caudal másico del refrigerante es igual en la entrada y la salida, condición que se mantiene en todo el circuito de refrigerante.

Este mismo enfoque se aplica al absorbedor, cuyo intercambio de calor se describe en la ecuación (9). Por su parte, el intercambiador de calor de solución se analiza separando sus dos lados (caliente y frío), verificando el cumplimiento del balance energético global al comprobar que el calor cedido por un lado es igual al absorbido por el otro.

Adicionalmente, tanto la válvula de expansión del refrigerante como la válvula asociada a la solución se modelan como procesos de estrangulamiento, por lo que cada una cumple un balance

energético isoentálpico; es decir, la entalpía se mantiene constante entre la entrada y la salida de ambas válvulas.

En el caso de la bomba de solución, su consumo de potencia se determina mediante el balance energético presentado en la ecuación (10). Desde el punto de vista termodinámico, el trabajo de la bomba puede considerarse despreciable en ciclos de simple efecto; sin embargo, en la práctica sigue siendo un elemento crítico de diseño debido a factores como el sellado, la corrosión, el costo y la prevención de la cavitación. Cabe resaltar que cada componente cuenta con su respectivo balance de masa y energía para los flujos externos de agua.

Finalmente, una vez determinadas todas las transferencias de calor, el desempeño del sistema se evalúa mediante el coeficiente de operación para refrigeración, definido como la relación entre el calor absorbido en el evaporador y el calor suministrado en el generador.

Tabla 3

Balance de Energía y Masa Sistema de Refrigeración por Absorción Solar

Componente	Balance de Masa	Balance de Energía	Nº
	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7$		
	$\dot{m}_3 x_3 = \dot{m}_4 x_4$		
Generador	$\dot{m}_3(1 - x_3) = \dot{m}_4(1 - x_4) + \dot{m}_7$	$\dot{m}_3 h_3 + \dot{Q}_d = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7$	(5)
	$f = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_7} = \frac{x_4}{x_4 - x_3}$	$\dot{m}_{12} h_{12} + \dot{Q}_d = \dot{m}_{11} h_{11}$	
	$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$		
Evaporador	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$	$\dot{m}_9 h_9 + \dot{Q}_e = \dot{m}_{10} h_{10}$	(6)
	$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18}$	$\dot{m}_{18} h_{18} + \dot{Q}_e = \dot{m}_{17} h_{17}$	
Condensador	$\dot{m}_7 = \dot{m}_8$	$\dot{m}_8 h_8 + \dot{Q}_c = \dot{m}_7 h_7$	(7)
	$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16}$	$\dot{m}_{15} h_{15} + \dot{Q}_e = \dot{m}_{16} h_{16}$	
Absorbedor	$\dot{m}_1 = \dot{m}_6 + \dot{m}_{10}$	$\dot{m}_1 h_1 + \dot{Q}_a = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{10} h_{10}$	(8)
	$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14}$	$\dot{m}_{13} h_{13} + \dot{Q}_a = \dot{m}_{14} h_{14}$	

Intercambiador de calor	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$	$\dot{m}_2 h_2 + \dot{Q}_{hx} = \dot{m}_3 h_3$	(9)
	$\dot{m}_4 = \dot{m}_5$	$\dot{m}_5 h_5 + \dot{Q}_{hx} = \dot{m}_4 h_4$	
Bomba de solución	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$\dot{m}_1 h_1 + \dot{W}_{pump} = \dot{m}_2 h_2$	(10)
		$\dot{W}_{pump} = \dot{m}_1 v_1 (P_{high} - P_{low})$	
		$\eta_{pump} = \dot{W}_{pump} / \dot{W}_{pumpR}$	
Válvula de expansión de la solución	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$	$h_5 = h_6$	(11)
Válvula de expansión del refrigerante	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$	$h_8 = h_9$	(12)

3.3 Consideraciones

3.3.1 Sistema de Compresión Mecánica Instalado

- Operación en estado estacionario con caudal másico constante.
- Cambios de energía cinética y potencial despreciables.
- Compresión isentrópica y expansión isoentálpica.
- Intercambios de calor a presión constante (evaporador y condensador).
- El refrigerante sale del evaporador como vapor saturado y del condensador como líquido saturado (condiciones ideales de referencia).
- Refrigerante en condiciones ideales: vapor saturado (salida del evaporador) y líquido saturado (salida del condensador).

3.3.2 Sistema de Refrigeración por Absorción Solar

- Operación en régimen permanente con flujo continuo y sin acumulación de masa.
- Cambios de energía cinética y potencial despreciables.
- Sistema ideal sin caídas de presión y con tuberías adiabáticas.
- Procesos ideales: expansión isoentálpica y equipos (como eyector) adiabáticos.

- No hay reacciones químicas; solo absorción física entre agua y bromuro de litio.
- Condiciones ideales del refrigerante y la solución (sin arrastre y con propiedades uniformes).
- Equipos acoplados operan a presiones similares y el sistema funciona con una fuente térmica externa.

3.4 Condiciones de Operación

3.4.1 Sistema de Compresión Mecánica Instalado

Tabla 4

Condiciones de operación sistema mecánico

Parámetro	Valor	Unidad
P _w	201	kPa
DT _e	5	°C
DT _c	5	°C
T _{out_w}	7	°C
SH	5	°C
SC	7	°C

Nota. La tabla 1 presenta las condiciones de funcionamiento consideradas para el desarrollo del modelo de compresión mecánica, condiciones que son las mismas para ambos chillers.

3.4.2 Sistema de Refrigeración por Absorción Solar

Tabla 5

Condiciones de operación sistema de absorción solar

Parámetro	Valor	Unidad
P _{w_e}	105	kPa
P _{w_c}	105	kPa
P _{w_a}	105	kPa
P _{w_d}	205	kPa
T [11]	88	°C
T [18]	7	°C
ΔT _{conabs}	6	°C
Eff H _x	64	%

η_{pump}	ca	60	%
----------------------	----	----	---

Nota. La tabla 2 presenta las condiciones de funcionamiento consideradas para el desarrollo del modelo de refrigeración por absorción.

Las Tablas 4 y 5 muestran las condiciones de operación asumidas para cada sistema de refrigeración a evaluar.

Ambos modelos enfrían el agua presente a la salida del evaporador a la misma temperatura siendo esta de 7 grados centígrados, T_{out_w} para el modelo mecánico y $T [18]$ para el modelo de absorción solar.

La efectividad del intercambiador de calor de solución es un parámetro que depende tanto del diseño del equipo como de las condiciones de operación del sistema. En la literatura especializada, se reporta que este parámetro suele adoptarse dentro de un rango típico entre 0,65 y 0,85 en modelos de sistemas de refrigeración por absorción, aunque en estudios paramétricos se consideran intervalos más amplios que pueden variar aproximadamente entre 0,4 y 0,8. En este contexto, el valor de 0,64 asumido en el presente trabajo se encuentra dentro de los rangos reportados, siendo representativo de condiciones reales de operación y adecuado para la modelación del sistema (Zhai, y otros, 2025). La efectividad del intercambiador de calor suele oscilar entre el 60 % y el 80 %, dependiendo de la superficie y la configuración del flujo (Ingener, 2023).

Refiriéndonos un poco a las efectividades de los otros componentes tenemos que el evaporador y el condensador operan bajo procesos de cambio de fase del refrigerante, lo que favorece coeficientes de transferencia de calor elevados y, en consecuencia, un mejor desempeño térmico, por lo que se les asocian efectividades medias a altas. En contraste, el absorbedor presenta

un desempeño más limitado debido a la ocurrencia simultánea de transferencia de calor y masa, lo que introduce resistencias adicionales al proceso, siendo representado mediante una efectividad media. Por su parte, el generador requiere un aporte significativo de energía térmica para llevar a cabo la desorción, operando con mayores diferencias de temperatura y concentrando una parte importante de las irreversibilidades del sistema, lo que justifica una efectividad baja.

3.5 Condiciones Ambientales

Para la determinación de las condiciones ambientales, se utilizó como fuente el repositorio de datos climáticos para simulación de edificaciones disponible en <https://climate.onebuilding.org/>. Este portal proporciona archivos correspondientes a años meteorológicos típicos (TMY), siendo el formato principal el EPW (EnergyPlus Weather File).

El archivo descargado en formato .zip incluye diversas extensiones y tipos de datos, entre los que se encuentran: formato meteorológico de EnergyPlus (EPW), formato para ESP-r, formato para Daysim, archivos para diseño en PVSyst, archivos DDY con condiciones de diseño según ASHRAE, datos de precipitación horaria (LLUVIA, en m/h) y archivos STAT con estadísticas meteorológicas ampliadas.

A partir de estos recursos, se emplearon específicamente los datos de estadísticas horarias promedio de temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$) y de radiación solar horizontal global (Wh/m^2), considerando el intervalo de horas solares comprendido entre las 6:00 y las 18:00 horas.

Para la obtención de la información, se siguió la ruta de acceso dentro del repositorio: región de Suramérica, país Colombia, departamento de Santander, y ciudad de Bucaramanga, seleccionando los datos medidos en la estación del aeropuerto Palonegro. Finalmente, se procedió a la descarga del archivo comprimido correspondiente para su posterior análisis.

Las Tablas 6 y 7 presentan la variación horaria promedio de la temperatura de bulbo seco y la radiación solar horizontal global en horas sol.

Tabla 6

Datos de temperatura de bulbo seco en años meteorológicos típicos

ESTADÍSTICAS HORARIAS PROMEDIO DE TEMPERATURAS DE BULBO SECO [°C]
(HORAS SOL)

Horas	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
6-7	18,3	19,4	19,7	19,2	19,1	19,3	18,9	18,7	19	18,6	18,9	18,7
7-8	18,7	19,3	20	19,7	19,6	19,7	19,4	19,2	19,7	19,1	19,5	19
8-9	20,5	20,6	21,2	21,3	21	20,7	21,1	20,6	20,9	20,4	20,6	20,7
9-10	22,5	22,5	22,5	22,5	22,3	22,4	22,8	22,5	22,6	21,7	22	22,2
10-11	23,4	23,2	23,2	22,9	23,4	23,6	24,3	23,9	24,2	22,8	23	23,1
11-12	23,6	23,7	23,8	23,6	24,4	24,7	25,3	24,8	25,6	23,9	23,8	23,4
12-13	23,9	24	24,5	23,9	24,3	25,4	25,2	25,4	25,5	24,4	24,2	24
13-14	24	23,9	24,2	23,9	24,5	25,4	25,4	24,8	25,6	23,8	24,5	24
14-15	24	24,5	24,6	24,1	24,1	25,3	24,9	25	25,2	24,2	24,3	24,3
15-16	24	24,5	24,5	23,9	23,9	25,1	24,4	24,8	24,6	24,1	23,9	24
16-17	23,7	24,4	24	23,5	23,9	24,4	24,3	24,1	23,9	23,3	23,3	23,7
17-18	22,9	23,7	23,1	22,9	22,7	23	23,1	23,1	23	22,7	22	22,6

Nota. La tabla muestra la variación horaria promedio de la temperatura de bulbo seco entre las 6:00 y las 18:00, evidenciando un incremento progresivo desde la mañana hasta primeras horas de la tarde, donde se alcanzan los valores máximos, seguido de un descenso gradual al final del día, con variaciones mensuales poco significativas. Tomado de *Repository of Building Simulation Climate Data* por Climate.OneBuilding.Org. https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/COL_Colombia/index.html#IDSAN_Santander-

Tabla 7

Datos de radiación solar horizontal global en años meteorológicos típicos

ESTADÍSTICAS HORARIAS PROMEDIO DE LA RADIACIÓN SOLAR HORIZONTAL
GLOBAL [WH/M²] (HORAS SOL)

Horas	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
6-7	18	14	21	40	47	67	41	44	56	40	47	24
7-8	145	125	133	167	175	207	184	193	198	169	182	154
8-9	352	299	300	354	377	376	382	410	406	338	337	332
9-10	530	461	505	509	534	536	561	589	585	523	483	489
10-11	681	631	661	649	673	681	701	740	698	683	593	622

11-12	757	726	745	716	753	757	734	719	776	736	675	723
12-13	798	793	767	753	745	744	699	691	754	699	688	736
13-14	708	765	735	702	660	620	609	640	646	666	646	705
14-15	649	689	645	609	589	576	527	551	553	549	570	595
15-16	501	559	477	480	443	372	404	418	397	415	409	449
16-17	308	351	313	300	299	180	275	263	269	230	237	267
17-18	124	150	135	131	133	37	139	127	110	66	0	87

Nota. La tabla presenta la variación horaria promedio de la radiación solar horizontal global entre las 6:00 y las 18:00, mostrando un incremento desde las primeras horas de la mañana hasta un máximo alrededor del mediodía, seguido de una disminución progresiva en la tarde, con mayores intensidades hacia mitad de año. Tomado de *Repository of Building Simulation Climate Data* por Climate.OneBuilding. Org. https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/COL_Colombia/index.html#IDSAN_Santander-

3.6 Validación de Modelos

Inicialmente, para la validación del modelo mecánico, se recopilieron los datos de rendimiento de los chillers ACAH040 y ACAH060, los cuales incluyen la capacidad de enfriamiento, la potencia requerida (consumo energético) y el coeficiente de desempeño (COP), en función de la temperatura del aire exterior y la temperatura de salida del agua. El proceso de validación se llevó a cabo mediante la comparación entre los valores de potencia requerida obtenidos a partir del modelo desarrollado y aquellos reportados por el fabricante, con el propósito de analizar las desviaciones existentes. Este análisis permitió evaluar la precisión del modelo y confirmar que su comportamiento es consistente con el desempeño real de los equipos instalados.

El modelo de absorción fue validado mediante la comparación con datos operativos de un sistema de refrigeración por absorción tipo WFC-SC SH 10. Para ello, se consideraron principalmente variables térmicas claves como la carga térmica en el generador y el calor de disipación del sistema. De manera análoga al modelo mecánico, la validación se realizó a partir de

la comparación entre los valores simulados y los reportados para el equipo de referencia, evaluando las desviaciones correspondientes. Este procedimiento permitió analizar la concordancia entre los resultados y determinar la proximidad de los valores, verificando así la capacidad del modelo para representar de forma adecuada el comportamiento térmico del sistema de absorción.

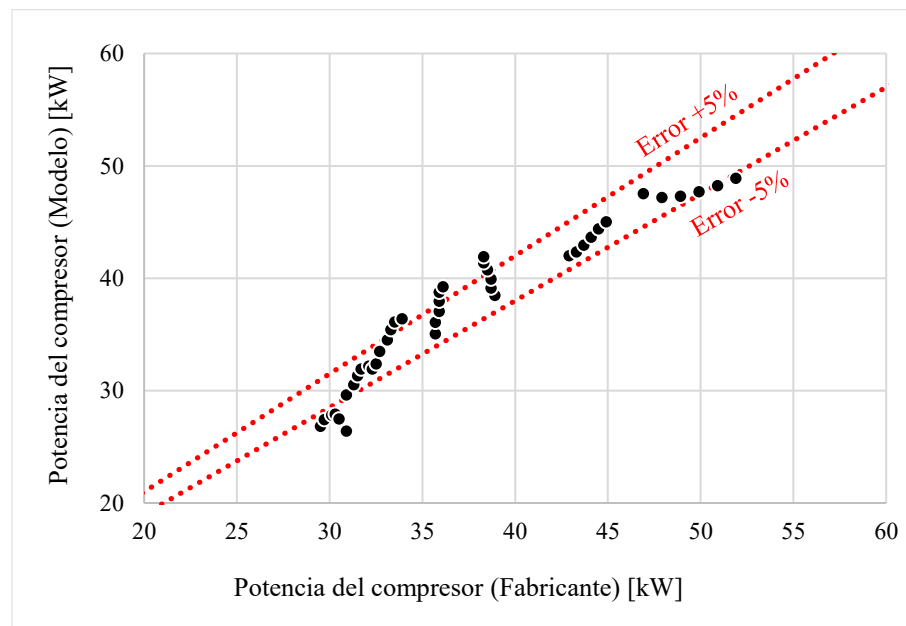
4. Resultados

4.1 Validación de los Modelos

4.1.1 Sistema de Compresión Mecánica Instalada

Figura 6

Validación de modelo sistema mecánico ACAH040

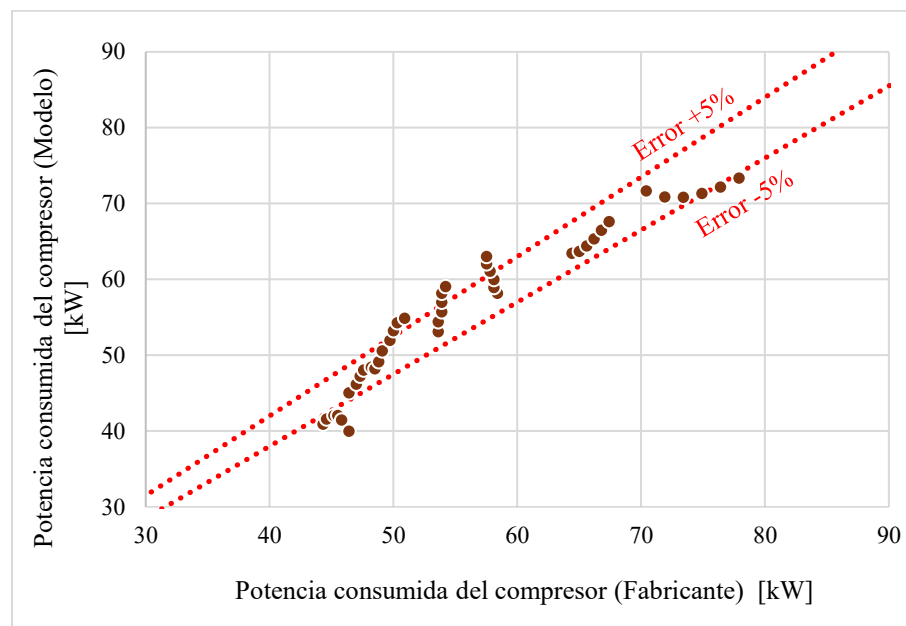


Las Figuras 6 y 7 presentan la comparación entre la potencia eléctrica consumida por el compresor estimada mediante el modelo desarrollado y los valores reportados por el fabricante para las unidades ACAH040 y ACAH060, respectivamente.

En ambos casos se observa una relación positiva entre los valores simulados y los datos de referencia, evidenciando que el modelo reproduce adecuadamente la tendencia de consumo energético del compresor bajo las diferentes condiciones de operación evaluadas. Aunque existe cierta dispersión entre los resultados simulados y los datos del fabricante, esta se mantiene dentro de rangos aceptables para aplicaciones de simulación energética.

Figura 7

Validación de modelo sistema mecánico ACAH060



Las líneas punteadas rojas representan una banda de tolerancia de $\pm 5\%$ respecto a la línea de perfecta concordancia entre los valores simulados y los datos de referencia. Se observa que la mayoría de los puntos se ubican dentro de esta región, indicando una buena capacidad predictiva del modelo para estimar la potencia requerida por el compresor.

Las desviaciones observadas pueden atribuirse a las simplificaciones inherentes al modelo matemático, así como a diferencias entre las condiciones reales consideradas por el fabricante y

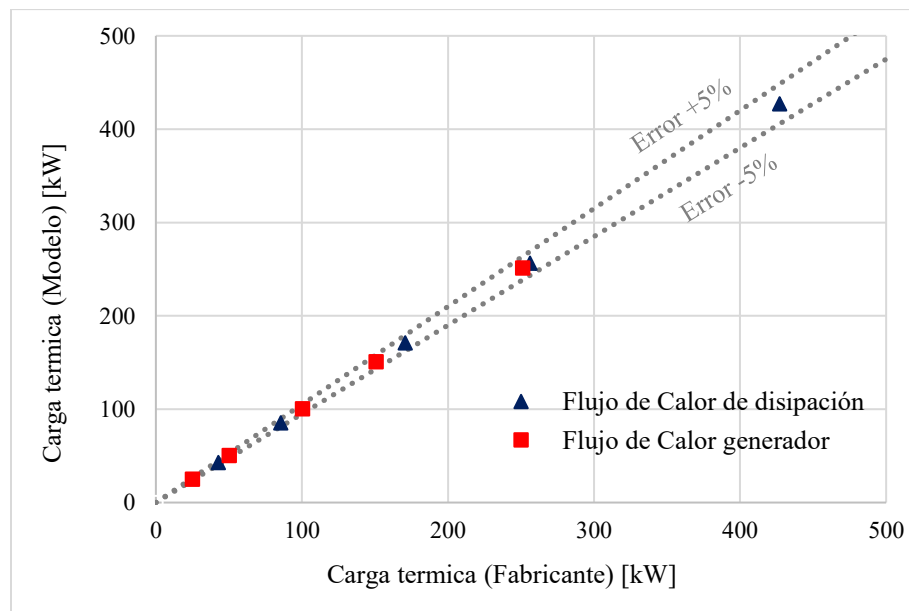
las hipótesis empleadas durante la simulación. No obstante, dado que los resultados permanecen mayoritariamente dentro del margen de error establecido, se considera que el modelo reproduce satisfactoriamente el comportamiento energético de los sistemas de compresión mecánica analizados.

Para la validación de ambos equipos se adoptó un criterio de aceptación basado en un error máximo del $\pm 5\%$, valor comúnmente utilizado en estudios de simulación y evaluación energética. En consecuencia, el modelo se consideró validado al cumplir dicho criterio para la mayor parte de las condiciones de operación evaluadas.

4.1.2 Sistema de Refrigeración por Absorción Solar

Figura 8

Validación de modelo sistema refrigeración por absorción solar



La Figura 8 presenta la comparación de la carga térmica entre los valores obtenidos mediante el modelo y los reportados por el fabricante, considerando tanto el calor de disipación

como el calor generado. Se observa una tendencia lineal claramente definida, donde los datos del modelo siguen de manera muy cercana los valores reales. La dispersión es mínima, lo que indica una alta correlación entre ambas variables.

Esta baja variabilidad sugiere que el modelo reproduce con buena precisión el comportamiento térmico del sistema, evidenciando un alto grado de concordancia con los datos del fabricante. No obstante, aunque la aproximación es muy cercana, no implica una coincidencia exacta, sino un ajuste dentro de márgenes de error reducidos.

La Figura 8 presenta la comparación entre las cargas térmicas estimadas mediante el modelo desarrollado y los valores reportados por el fabricante para el sistema de refrigeración por absorción. La validación se realizó considerando dos parámetros fundamentales del ciclo: el calor suministrado al generador y el calor rechazado en el sistema de disipación.

Se observa que los valores obtenidos mediante la simulación presentan una alta concordancia con los datos de referencia, ubicándose muy próximos a la línea de identidad. Tanto para la carga térmica del generador como para la carga térmica de disipación, los puntos muestran una distribución uniforme y una dispersión reducida a lo largo de todo el rango de operación evaluado.

Las líneas punteadas representan la banda de error de $\pm 5\%$ adoptada como criterio de aceptación para la validación del modelo. Se evidencia que la totalidad o la gran mayoría de los puntos se encuentra dentro de este intervalo, lo que indica una adecuada capacidad del modelo para reproducir el comportamiento térmico del sistema de absorción.

Las pequeñas desviaciones observadas pueden atribuirse a simplificaciones inherentes al proceso de modelado, así como a diferencias entre las condiciones de operación asumidas en la simulación y aquellas empleadas por el fabricante durante la caracterización del equipo. Sin

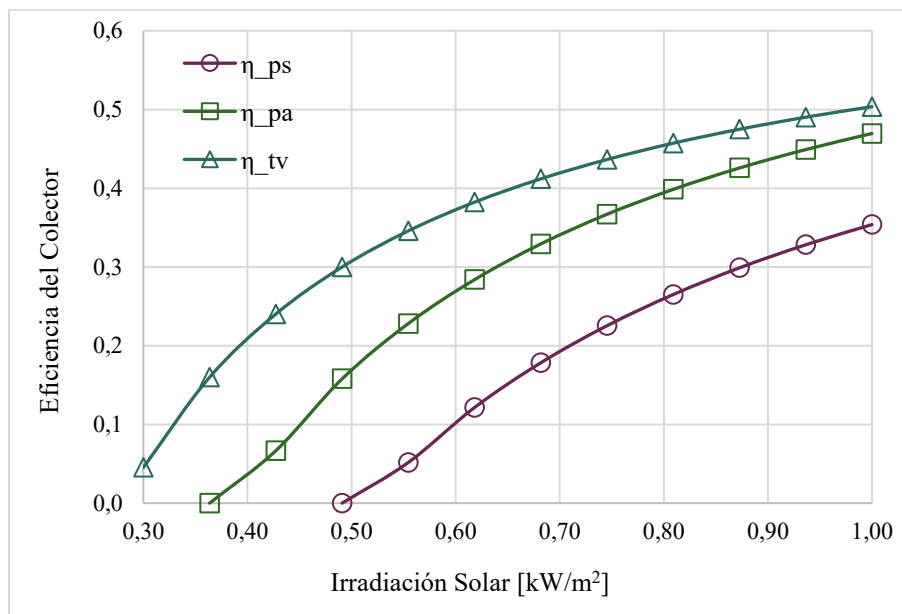
embargo, dichas diferencias son reducidas y no afectan significativamente la capacidad predictiva del modelo.

Los resultados obtenidos permiten considerar validado el modelo del sistema de refrigeración por absorción solar, al cumplir satisfactoriamente el criterio de error máximo establecido y reproducir de manera consistente las cargas térmicas características del ciclo de absorción.

4.2 Dimensionamiento Sistema Captación Solar

Figura 9

Sensibilidad de colectores solares



La Figura 9 presenta la variación de la eficiencia térmica de los colectores solares evaluados en función de la irradiación solar incidente. Para este análisis se mantuvieron constantes la temperatura media del fluido del colector en $83,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la temperatura ambiente en $18,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondiente al valor mínimo registrado en los datos meteorológicos de referencia. La temperatura media del fluido de $83,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ fue seleccionada por corresponder aproximadamente a la temperatura promedio requerida en el generador del chiller de absorción. Bajo estas condiciones,

la irradiación solar fue la única variable modificada con el fin de analizar su influencia sobre el desempeño térmico de cada tecnología.

La selección de la temperatura ambiente mínima permite evaluar el comportamiento de los colectores bajo una condición conservadora, caracterizada por una mayor diferencia de temperatura entre el fluido de trabajo y el entorno. Esta situación incrementa las pérdidas térmicas hacia el ambiente y, por tanto, representa un escenario crítico para la operación del sistema. En consecuencia, cualquier aumento de la temperatura ambiente reduciría dichas pérdidas y favorecería una mayor eficiencia térmica de los colectores.

Los resultados muestran que la eficiencia térmica de los tres colectores aumenta conforme se incrementa la irradiación solar. Sin embargo, el comportamiento difiere significativamente entre las tecnologías evaluadas.

El colector de placa plana simple presenta las menores eficiencias en todo el rango de irradiación analizado, alcanzando aproximadamente un 35 % para una irradiación de 1 kW/m². Además, su rendimiento disminuye rápidamente al reducirse la irradiación debido a sus elevadas pérdidas térmicas.

Por su parte, el colector de placa plana avanzado exhibe un mejor desempeño como consecuencia de la incorporación de superficies selectivas y mejoras en el aislamiento térmico, alcanzando eficiencias cercanas al 47 % para las mayores irradiaciones evaluadas.

El colector de tubos al vacío presenta el comportamiento más favorable, con eficiencias superiores a las de las demás tecnologías en todo el rango analizado y valores cercanos al 50 % para irradiaciones elevadas, mientras que el colector puede funcionar a partir de irradiaciones solares por encima de los 0.3 kW/m². Este resultado se atribuye principalmente a la reducción de

las pérdidas térmicas por convección y radiación proporcionada por la cámara de vacío y las superficies selectivas del absorbedor.

Los resultados evidencian que la tecnología de tubos al vacío mantiene una mayor estabilidad frente a variaciones de la irradiación solar y ofrece el mejor desempeño térmico bajo las condiciones críticas consideradas, lo que la convierte en la alternativa más adecuada para suministrar energía térmica al sistema de refrigeración por absorción.

Una vez evaluado el comportamiento de las diferentes tecnologías de colectores solares, se procedió al dimensionamiento del campo de captación requerido para suministrar la energía térmica demandada por el generador del sistema de refrigeración por absorción.

Para este análisis se empleó una irradiación solar promedio máximo de 798 W/m^2 , obtenida a partir de los valores registrados durante las horas de disponibilidad solar. Asimismo, se consideró una temperatura ambiente de $18,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y una temperatura media del fluido de $83,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondiente a la temperatura promedio requerida para el suministro de calor al generador del chiller de absorción. La selección de la temperatura ambiente mínima permitió realizar el dimensionamiento bajo una condición conservadora, caracterizada por mayores pérdidas térmicas en los colectores.

Bajo estas condiciones se determinaron las eficiencias térmicas de cada tecnología, obteniéndose valores de 25 %, 38 % y 45 % para los colectores de placa plana simple, placa plana avanzada y tubos al vacío, respectivamente. Posteriormente, se calculó la energía solar incidente requerida para suministrar la potencia térmica demandada por el generador, equivalente a 251,32 kW.

Los resultados presentados en la Tabla 8 muestran que el colector de placa plana simple requiere un área de captación de $1.278,83 \text{ m}^2$, superior al área disponible en la cubierta del edificio.

Por su parte, el colector de placa plana avanzado reduce este requerimiento a 823,86 m² gracias a su mayor eficiencia térmica. Sin embargo, la menor superficie requerida corresponde al colector de tubos al vacío, con un área de 707,27 m², resultado asociado a sus menores pérdidas térmicas y mayor capacidad de aprovechamiento de la radiación solar.

Para la instalación del sistema se asumió como área disponible el 80 % de la superficie total de la azotea (1.522,39 m²), mientras que el 20 % restante se reservó como área de circulación para garantizar el acceso durante las actividades de mantenimiento, inspección y operación del sistema. El área máxima disponible en la cubierta del edificio es de 1.217,912 m², se determinó que la alternativa más adecuada corresponde al colector de tubos al vacío, debido a que requiere una menor área de captación para accionar un chiller de absorción con una capacidad de enfriamiento de 175,84 kW. En consecuencia, se estableció que, con el área disponible en la cubierta, es posible alimentar dos chillers de absorción de dicha capacidad.

Por lo tanto, a partir de esta sección se tomará como referencia el colector de tubos al vacío, el cual presenta una producción térmica útil de 436.521,83 W para un área de captación de 1.217,912 m², permitiendo así la operación de dos chillers de absorción solar. Los resultados obtenidos para cada tipo de colector se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 8

Dimensionamiento del área del colector solar

CAPTADORES VARIABLES	Placa Plana Simple	Placa Plana Avanzado	Tubos al vacío
η_{col}	0,25	0,38	0,45
$\dot{Q}_{sol} [W]$	1.020.508,13	657.438,62	564.403,57
$A_{col} [m^2]$	1.278,83	823,86	707,27

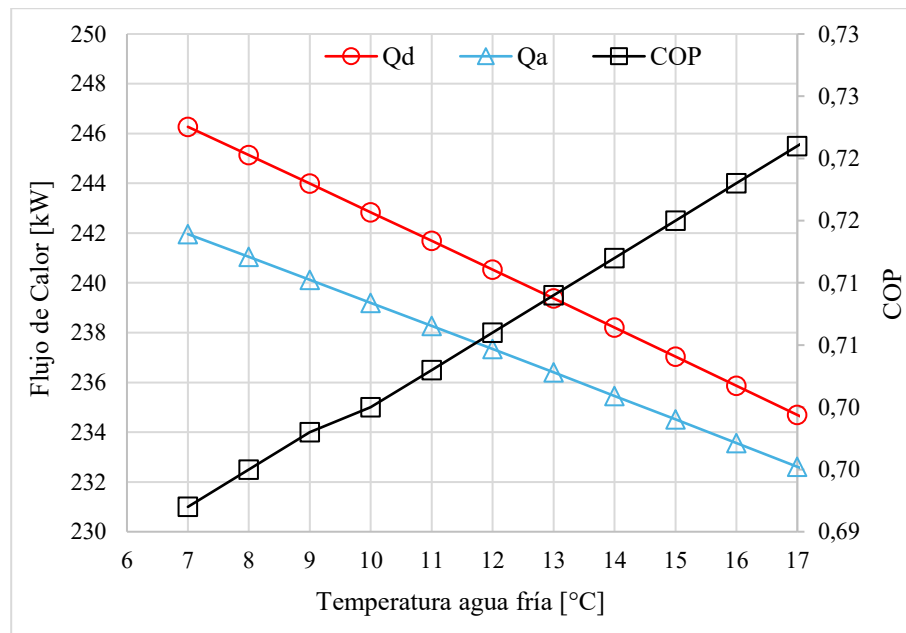
$T_{fluid} = 83 [^{\circ}C]$	Temperatura del fluido del colector
$T_{am} = 18.3 [^{\circ}C]$	Temperatura ambiente
$G_T = 798 [W/m^2]$	Irradiación requerida
$Q_u = 251320 [W]$	Potencia demandada

En la Tabla 8 podemos observar los diferentes valores de eficiencia obtenidos para cada tipo de colector según las ecuaciones definidas en la Tabla 1, también su Área requerida para aportar esa potencia demandada por el sistema en el generador.

4.3 Evaluación del Desempeño del Sistema de Refrigeración por Absorción

Figura 10

Efecto de la temperatura de agua fría de salida sobre el coeficiente de desempeño del sistema y flujos de calor en el generador y absorbedor.



La Figura 10 presenta la influencia de la temperatura del agua fría sobre el flujo de calor en el generador (Qd), el flujo de calor rechazado en el absorbedor (Qa) y el coeficiente de desempeño (COP) del sistema de refrigeración por absorción.

Los resultados muestran que, al incrementar la temperatura del agua fría desde 7 °C hasta 17 °C, tanto el calor suministrado al generador como el calor rechazado en el absorbedor disminuyen de manera aproximadamente lineal. En particular, el flujo de calor en el generador se reduce desde valores cercanos a 246 kW hasta aproximadamente 235 kW, mientras que el calor rechazado en el absorbedor disminuye de alrededor de 242 kW a 233 kW.

Esta tendencia indica que el sistema requiere una menor cantidad de energía térmica para operar a medida que aumenta la temperatura del agua fría. Desde el punto de vista termodinámico, una mayor temperatura de evaporación favorece el proceso de refrigeración al reducir la diferencia de presiones entre el evaporador y el generador, disminuyendo la energía necesaria para separar el refrigerante de la solución absorbente y reduciendo simultáneamente la carga térmica que debe rechazarse en el absorbedor.

Por otra parte, el coeficiente de desempeño presenta una tendencia creciente con el aumento de la temperatura del agua fría, incrementándose desde aproximadamente 0,695 hasta 0,720. Este comportamiento se explica porque el COP se define como la relación entre la capacidad de enfriamiento producida en el evaporador y la suma de la energía térmica suministrada al generador más el consumo energético de los equipos auxiliares. Dado que la capacidad de enfriamiento se mantiene constante durante el análisis, la disminución del calor requerido en el generador provoca un incremento progresivo del COP.

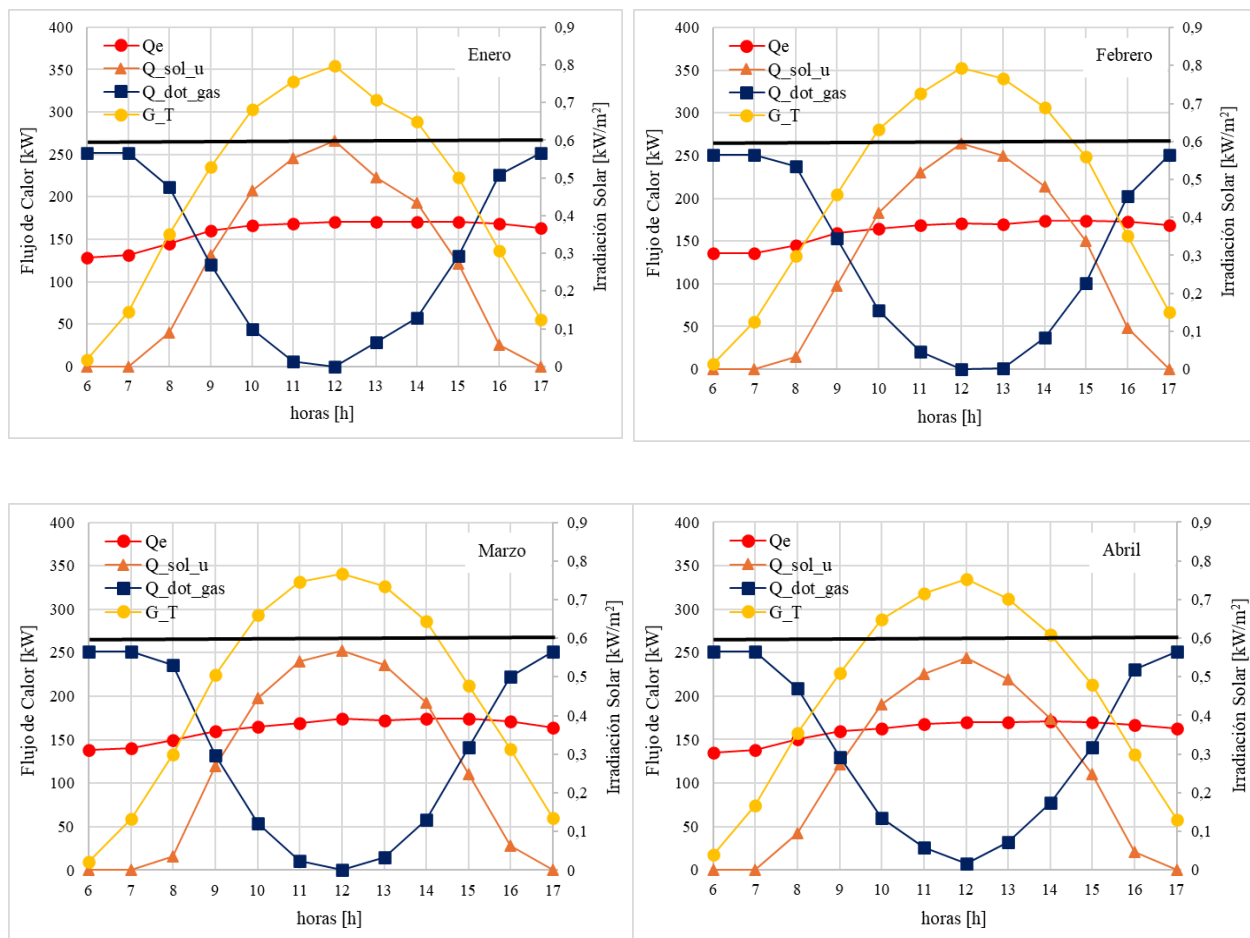
En consecuencia, temperaturas más elevadas del agua fría favorecen el desempeño energético del sistema de absorción, ya que permiten reducir los requerimientos térmicos de operación y mejorar la eficiencia global del ciclo.

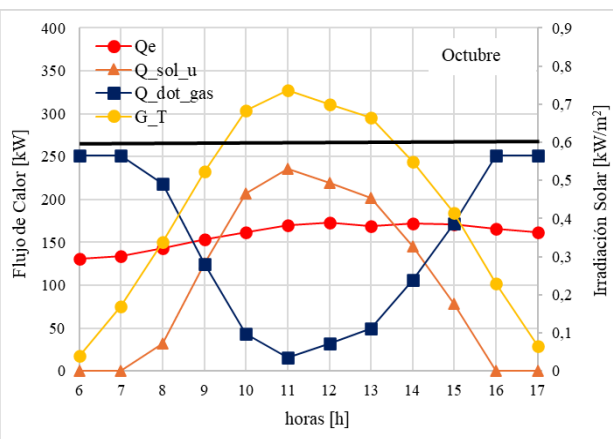
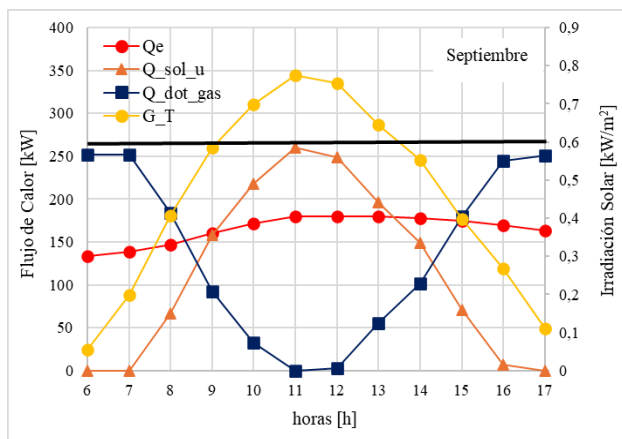
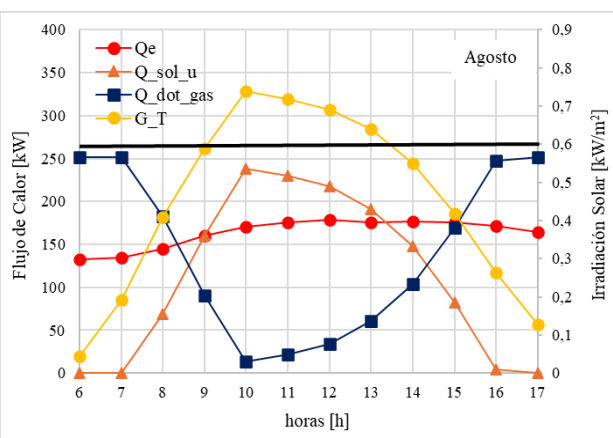
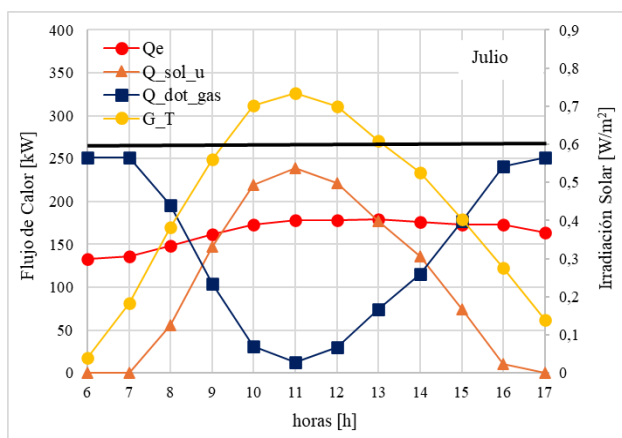
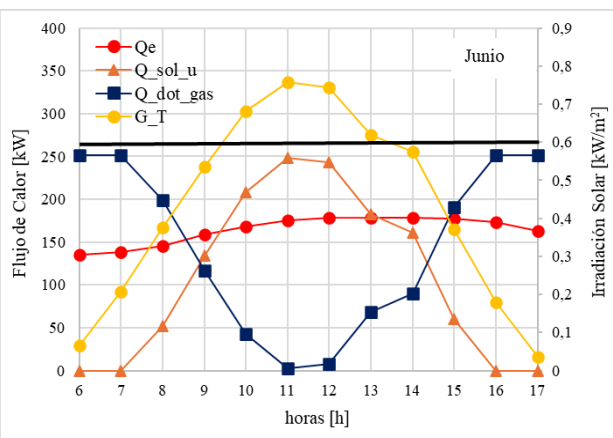
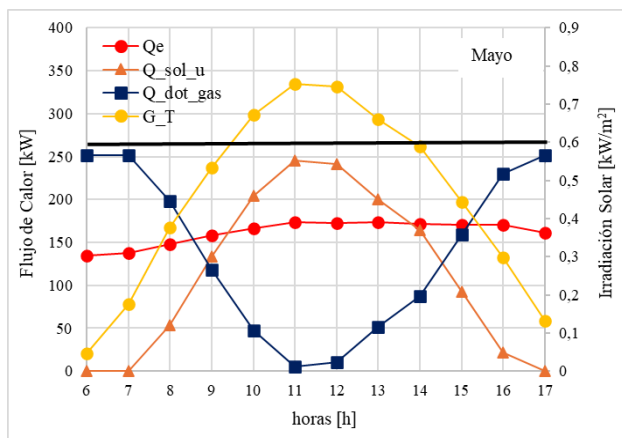
Cabe resaltar que para la selección de la potencia instalada de los chillers se valoraron el uso de un chiller de 175,84 kW, otro de 105,51 kW y por ultimo uno de 17,58 kW sumando así los 299 kW requeridos.

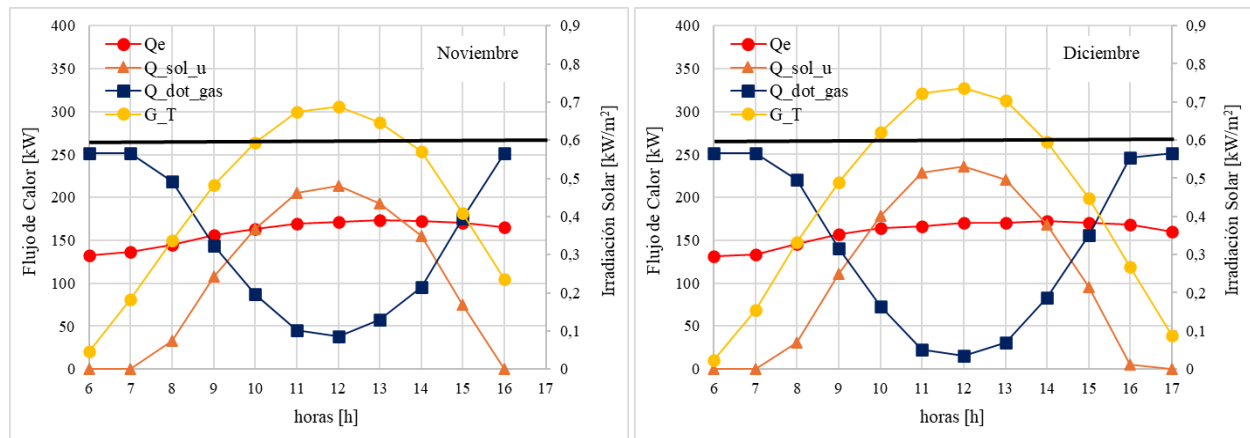
4.4 Evaluación del Desempeño del Sistema de Refrigeración por Absorción Solar

Figura 11

Desempeño mensual del sistema de absorción solar







La Figura 11 presenta el comportamiento horario del sistema de refrigeración por absorción solar para cada mes del año. En las gráficas se muestra la capacidad de enfriamiento del evaporador (Q_e), el calor suministrado por los colectores solares (Q_{sol_u}), el aporte térmico complementario proporcionado por gas natural (Q_{dot_gas}), la irradiación solar incidente (G_T) y la demanda térmica requerida por el generador del sistema.

En todos los meses se observa que la irradiación solar alcanza sus valores máximos alrededor del mediodía, incrementando la producción térmica de los colectores solares. Como consecuencia, durante estas horas el aporte de energía solar aumenta significativamente y la demanda de energía auxiliar proveniente del gas natural disminuye. Por el contrario, durante las primeras horas de la mañana y al final de la tarde, cuando la irradiación es reducida, el sistema requiere una mayor contribución de la fuente auxiliar para satisfacer la demanda térmica del generador.

La energía suministrada al generador se mantiene prácticamente constante durante el periodo de operación, por lo que la participación relativa de las fuentes energética solar y convencional varía en función de la disponibilidad del recurso solar. Esto evidencia el papel de los colectores solares como sustitutos parciales del consumo de combustible, reduciendo la energía requerida de la fuente auxiliar durante las horas de mayor irradiación.

Asimismo, se observa que la capacidad de enfriamiento del evaporador presenta variaciones moderadas a lo largo del día. Este comportamiento puede atribuirse principalmente a los cambios en las condiciones ambientales que afectan el funcionamiento del condensador y del absorbedor. Variaciones en la temperatura ambiente modifican las condiciones de rechazo de calor del ciclo, afectando el desempeño termodinámico del sistema y, en consecuencia, la capacidad de enfriamiento obtenida.

Las tendencias de irradiación solar se representan hasta las 17:00 h debido a que la disponibilidad del recurso solar depende directamente de la posición aparente del Sol y de las condiciones meteorológicas registradas en el Año Meteorológico Típico (TMY) utilizado en el estudio. En algunos meses, particularmente durante noviembre, se observan reducciones significativas de irradiación en las últimas horas de la tarde, asociadas a condiciones atmosféricas desfavorables como nubosidad o precipitación.

La Tabla 9 presenta la distribución mensual de la energía térmica suministrada al generador del sistema de refrigeración por absorción, diferenciando la fracción aportada por los colectores solares y la fracción cubierta mediante gas natural.

Los resultados muestran que, durante todos los meses analizados, la contribución de la energía solar oscila entre el 41,3 % y el 48,2 % de la demanda térmica total del generador. Los mayores aportes solares se registran en enero y febrero, con fracciones cercanas al 48 %, mientras que los menores valores corresponden a octubre y noviembre, donde la contribución solar desciende hasta aproximadamente el 41 %.

Como consecuencia, la participación del gas natural varía entre el 52 % y el 59 %, actuando como fuente auxiliar para garantizar la operación continua del sistema cuando la energía solar disponible resulta insuficiente para cubrir la totalidad de la demanda térmica.

Los resultados evidencian una relación inversa entre ambas contribuciones energéticas: a medida que disminuye la disponibilidad del recurso solar, aumenta la energía requerida de la fuente auxiliar. Este comportamiento confirma la fuerte dependencia del desempeño del sistema respecto a la irradiación solar disponible y a la duración efectiva de las horas de sol a lo largo del año.

A pesar de que la energía solar no logra satisfacer completamente la demanda térmica del generador, el sistema permite reducir de manera significativa el consumo de combustible convencional, alcanzando fracciones solares superiores al 40 % durante todos los meses evaluados. Este resultado demuestra el potencial de integración de la energía solar térmica en sistemas de refrigeración por absorción para aplicaciones de acondicionamiento de aire en edificaciones universitarias.

Tabla 9

Aportes al sistema de absorción solar

Mes	Aporte Sol	Aporte Gas
Enero	0,48198	0,52314
Febrero	0,48172	0,52268
Marzo	0,46204	0,53841
Abril	0,44737	0,55272
Mayo	0,44935	0,55071
Junio	0,42788	0,57219
Julio	0,42473	0,57539
Agosto	0,44424	0,55582
Septiembre	0,45629	0,54656
Octubre	0,41336	0,58674
Noviembre	0,41488	0,58524
Diciembre	0,42225	0,57788

4.5 Consumo de energía anual

4.5.1 Sistema de compresión mecánica

La Tabla 10 presenta el consumo mensual de energía eléctrica estimado para las enfriadoras de agua por compresión mecánica instaladas en el edificio objeto de estudio. Los resultados se obtuvieron mediante la evaluación horaria del modelo, considerando las temperaturas de bulbo seco promedio correspondientes a cada hora solar y su frecuencia de ocurrencia durante los diferentes meses del año.

Para cada condición climática analizada se determinó la potencia instantánea demandada por los compresores, la cual fue integrada durante el periodo de operación diario y posteriormente acumulada para cada mes. En el análisis se asumió una operación continua de 12 horas diarias durante todo el año.

Tabla 10

Consumo energético mensual de enfriadoras de agua por compresión mecánica

Mes	Consumo eléctrico [kWh]
Enero	27.492,66
Febrero	26.013,4
Marzo	28.877,43
Abril	27.753,9
Mayo	28.775,13
Junio	28.141,2
Julio	29.084,2
Agosto	28.972,91
Septiembre	28.182,9
Octubre	28.566,81
Noviembre	27.692,4
Diciembre	28.601,22
ANUAL (kWh/año)	338.154,16

Los resultados muestran que el consumo eléctrico mensual varía entre 23.107,28 kWh y 25.840,05 kWh, correspondientes a los meses de febrero y julio, respectivamente. Esta variación está asociada principalmente a los cambios en la temperatura ambiente, los cuales modifican las condiciones de condensación del sistema y afectan la potencia requerida por los compresores.

Se observa que los mayores consumos energéticos se presentan durante los meses de marzo, mayo, julio y agosto, mientras que los menores valores se registran en febrero y abril. Sin embargo, las diferencias entre meses son relativamente reducidas, evidenciando un comportamiento operativo estable del sistema de refrigeración a lo largo del año.

A partir de la sumatoria de los consumos mensuales se obtuvo un consumo anual de 301.310,72 kWh/año para las enfriadoras de agua por compresión mecánica instaladas. Este valor constituye la línea base energética del edificio y será utilizado posteriormente para comparar el desempeño energético y económico del sistema de refrigeración por absorción solar propuesto. Los datos detallados utilizados para la elaboración de la tabla resumen se presentan en el apartado de anexos.

4.5.1 Sistema de refrigeración por absorción solar

Antes de presentar los consumos energéticos del sistema de absorción solar, es importante señalar que se analizaron dos escenarios de capacidad de enfriamiento. El primero corresponde a la instalación de un único chiller de absorción con una capacidad nominal de 175,84 kW. El segundo escenario considera el aprovechamiento máximo del área disponible en la cubierta del edificio (1.217,91 m²) mediante la instalación de tres chillers de absorción accionados por energía solar, con capacidades de 175,84 kW, 105,51 kW y 17,58 kW, respectivamente. Esta configuración permite alcanzar una capacidad total de enfriamiento de 298,93 kW, representando el potencial máximo de enfriamiento que podría obtenerse con el área de captación solar disponible.

Tabla 11

Consumo de energía eléctrico y de gas

Mes	Consumo Energía Eléctrica		Consumo Gas	
	175 kWh	298 kWh	175 kWh	298 kWh
Enero	5.277,35	8.971,49	48.908,76	83.144,90
Febrero	4.626,68	7.865,36	44.136,54	75.032,12
Marzo	5.066,66	8.613,33	50.336,56	85.572,15
Abril	5.052,76	8.589,69	50.007,09	85.012,05
Mayo	5.144,84	8.746,23	51.486,47	87.527,01
Junio	4.766,92	8.103,76	51.768,84	88.007,03
Julio	4.910,64	8.348,08	53.793,68	91.449,26
Agosto	4.987,37	8.478,53	51.964,06	88.338,90
Septiembre	4.736,32	8.051,74	49.449,93	84.064,88
Octubre	5.310,39	9.027,66	54.854,81	93.253,18
Noviembre	4.658,41	7.919,30	48.537,60	82.513,92
Diciembre	5.280,56	8.976,95	54.026,18	91.844,51
Anual	59.818,89	101.692,11	609.270,53	1.035.759,89
(kWh/año)				

La Tabla 11 presenta los consumos energéticos mensuales y anuales asociados a los dos escenarios evaluados para el sistema de refrigeración por absorción solar. El primero corresponde a la operación de un único chiller de absorción con una capacidad de enfriamiento de 175,84 kW, mientras que el segundo representa el aprovechamiento máximo del área disponible en la cubierta del edificio mediante la instalación de tres chillers de absorción, alcanzando una capacidad total de enfriamiento de 298,93 kW. En ambos casos se reportan los consumos de energía eléctrica requeridos por los equipos auxiliares y el consumo de gas natural utilizado como fuente térmica complementaria para el generador.

Los resultados muestran que el consumo de energía eléctrica es significativamente inferior al consumo de gas natural en ambos escenarios. Este comportamiento es característico de los sistemas de refrigeración por absorción, en los cuales la producción de frío depende principalmente de una fuente de energía térmica suministrada al generador, mientras que la energía eléctrica se limita al funcionamiento de bombas, ventiladores y demás equipos auxiliares. Como consecuencia, la mayor parte de la demanda energética del sistema se satisface mediante calor y no mediante electricidad, a diferencia de los sistemas de compresión mecánica convencionales.

Para el escenario de 175,84 kW se obtuvo un consumo anual de 59.818,89 kWh de energía eléctrica y 609.270,53 kWh de energía térmica proveniente de gas natural. Cuando se considera el aprovechamiento total del área disponible en cubierta, con una capacidad instalada de 298,93 kW, los consumos aumentan hasta 101.692,11 kWh de electricidad y 1.035.759,89 kWh de energía térmica suministrada por el combustible. Este incremento es consistente con el aumento de la capacidad de enfriamiento instalada y con la mayor demanda energética requerida para garantizar la operación de los tres chillers de absorción.

Desde el punto de vista temporal, se observa una variación mensual relativamente moderada en el consumo eléctrico de ambos escenarios. En el caso del sistema de 175,84 kW, los valores oscilan entre 4.626,68 kWh en febrero y 5.310,39 kWh en octubre. De manera similar, para la configuración de 298,93 kW el consumo eléctrico varía entre 7.865,36 kWh y 9.027,66 kWh. Estas diferencias están asociadas principalmente a los cambios en las condiciones ambientales y en la disponibilidad del recurso solar a lo largo del año, los cuales afectan las condiciones de operación del sistema y la participación de la fuente auxiliar.

El comportamiento del consumo de gas natural presenta una relación directa con la fracción solar disponible en cada mes. Los mayores consumos de combustible se registran durante octubre,

noviembre y diciembre, meses en los que previamente se identificaron las menores contribuciones solares. En estas condiciones, la reducción del calor suministrado por los colectores debe compensarse mediante una mayor aportación de la caldera auxiliar para mantener constante la demanda térmica del generador. Por el contrario, durante enero y febrero se observan los menores consumos de gas natural, coincidiendo con los meses de mayor disponibilidad solar y, por tanto, con una mayor participación de los colectores térmicos en el suministro energético del sistema.

Estos resultados evidencian la fuerte dependencia del sistema de absorción respecto a la disponibilidad de energía solar. Aunque la integración de colectores solares permite reducir significativamente el consumo de combustible convencional, la energía solar captada no resulta suficiente para cubrir completamente la demanda térmica del generador durante ningún mes del año. En consecuencia, la fuente auxiliar de gas natural continúa desempeñando un papel fundamental para garantizar la continuidad operativa del sistema.

Al comparar estos resultados con el sistema de compresión mecánica instalado en el edificio, cuyo consumo anual fue estimado en 301.310,72 kWh de energía eléctrica, se evidencia una reducción sustancial de la demanda eléctrica. El sistema de absorción de 175,84 kW requiere únicamente el 19,8 % de la electricidad consumida por el sistema convencional, mientras que la configuración de máxima capacidad instalada (298,93 kW) demanda aproximadamente el 33,7 %. Esto representa reducciones cercanas al 80 % y 66 %, respectivamente, en el consumo de energía eléctrica.

No obstante, esta disminución de la demanda eléctrica se logra mediante una sustitución parcial por energía térmica, proveniente tanto de los colectores solares como del gas natural. Por esta razón, la evaluación del desempeño global del sistema no debe basarse únicamente en el ahorro eléctrico alcanzado, sino también en la cantidad de combustible auxiliar requerida, la

fracción solar obtenida y los costos asociados a cada fuente de energía. En este sentido, la conveniencia energética y económica de la tecnología dependerá del balance entre la reducción del consumo eléctrico, el aprovechamiento del recurso solar y la dependencia residual del combustible fósil.

Finalmente, los resultados obtenidos demuestran que el área disponible de 1.217,91 m² permite alcanzar una capacidad total de enfriamiento cercana a 299 kW mediante la integración de tres chillers de absorción solar. Esto confirma el potencial de la energía solar térmica para contribuir significativamente a la demanda de climatización del edificio universitario, reduciendo la dependencia de la red eléctrica y diversificando las fuentes de energía utilizadas para la producción de frío.

4.6 Costos de la energía consumida

Tabla 12

Costos de energía eléctrica y de gas natural para cada sistema de refrigeración

SISTEMAS COSTO	Compresión Mecánica	Absorción Solar
Consumo eléctrico anual [kWh/año]	338.154,16	101.692,11
Consumo gas natural anual [kWh/año]	-	1.035.759,89
Tarifa energía eléctrica [\$/kWh]	874,14	
Tarifa energía gas natural [\$/kWh]	257,29	
Costo eléctrico [\$]	295.594.077,42	88.893.139,50
Costo gas natural [\$]	-	266.490.663,18

En la Tabla 12 se puede observar los costos anuales para cada sistema analizado. En el caso del sistema de refrigeración por compresión mecánica, el costo energético está asociado únicamente al consumo de energía eléctrica, mientras que el sistema de absorción solar combina consumo de energía eléctrica y gas natural como fuente auxiliar para el funcionamiento del generador.

Para estimar los costos de operación, se tomó como base el consumo anual de energía de cada sistema. El chiller de compresión mecánica presentó un consumo eléctrico anual de 338.154,16 kWh, mientras que el chiller de absorción registró un consumo de 101.692,11 kWh. Adicionalmente, el sistema de absorción requirió un consumo anual de gas natural de 1.035.759,89 kWh para su funcionamiento. Para el cálculo de los costos energéticos se consideró una tarifa de 874,14 COP/kWh para la energía eléctrica y de 257,29 COP/kWh para el gas natural.

Con respecto al consumo eléctrico, el sistema de absorción solar presenta una disminución aproximada del 66,3 % en comparación con el sistema de compresión mecánica. Este comportamiento se atribuye al aprovechamiento de la energía solar térmica para suplir parte de la demanda energética del sistema, reduciendo considerablemente la dependencia de la red eléctrica.

No obstante, el sistema de absorción solar requiere un aporte adicional de gas natural, mientras que el sistema de compresión mecánica no presenta consumo de este combustible. Como consecuencia, al considerar el costo energético total, el sistema de absorción solar presenta un incremento cercano al 34,9 % respecto al sistema convencional de compresión mecánica.

Estos resultados evidencian que, aunque la implementación del sistema de absorción solar permite una reducción significativa en el consumo de energía eléctrica, la necesidad de una fuente térmica auxiliar basada en gas natural incrementa el costo operativo total del sistema bajo las condiciones evaluadas.

5. Conclusiones

Se identificaron las características técnicas y la capacidad nominal del sistema de refrigeración por compresión mecánica instalado en el edificio de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Asimismo, el modelo desarrollado para representar su funcionamiento mostró una adecuada concordancia con los datos del fabricante, manteniéndose dentro del margen de error establecido del 5 %.

El modelo termodinámico del sistema de refrigeración por absorción con solución LiBr/H₂O permitió representar satisfactoriamente el comportamiento del ciclo bajo las condiciones climáticas de Bucaramanga. Los resultados evidenciaron que, al aumentar la temperatura del agua fría, disminuyen los requerimientos térmicos del generador y del absorbedor, mientras que el COP presenta una tendencia creciente.

Entre las tecnologías de captación solar evaluadas, los colectores de tubos al vacío presentaron el mejor desempeño térmico, alcanzando eficiencias superiores al 50 % y mostrando una menor sensibilidad a las variaciones de irradiación solar. Esto los convierte en la alternativa más adecuada para el sistema propuesto.

A partir del análisis del área disponible en la cubierta del edificio, equivalente a 1.217,9 m² (80% del área total de 1522,39 m², al considerar espacios de circulación, etc.), se determinó que es posible instalar un campo de colectores de tubos al vacío capaz de suministrar energía térmica para la operación de tres chillers de absorción con capacidad total de enfriamiento de 298 kW (175,84 kW+105,51 kW+17.58 kW).

La evaluación del desempeño del sistema de absorción solar mostró que el aporte energético de los colectores depende directamente de la disponibilidad de radiación solar. Aunque la energía solar contribuye significativamente al funcionamiento del sistema, durante todos los

meses del año fue necesario complementar la demanda térmica mediante gas natural para garantizar la operación continua del generador.

El sistema de refrigeración por absorción solar permitió reducir aproximadamente un 66,3 % el consumo de energía eléctrica en comparación con el sistema convencional de compresión mecánica, cuyo consumo anual estimado fue de 301.310,72 kWh para los dos chillers instalados.

Desde el punto de vista económico, el uso de gas natural como fuente térmica auxiliar incrementó el costo energético total del sistema de absorción solar en aproximadamente un 34,9 % respecto al sistema de compresión mecánica. Esto evidencia que la reducción en el consumo eléctrico no necesariamente implica una disminución de los costos operativos bajo las condiciones evaluadas.

Recomendaciones

Evaluar la incorporación de sistemas de almacenamiento térmico que permitan aprovechar los excedentes de energía solar durante los periodos de alta irradiación y reducir la dependencia del gas natural como fuente térmica auxiliar.

Analizar el desempeño del sistema utilizando otras fuentes de energía de respaldo, como biomasa, biogás o calor residual de procesos industriales, con el propósito de disminuir los costos operativos asociados al consumo de gas natural.

Realizar estudios de optimización del campo de colectores solares, considerando diferentes configuraciones, orientaciones e inclinaciones, con el fin de maximizar el aprovechamiento del recurso solar disponible en Bucaramanga.

Evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes temperaturas de agua fría de suministro, debido a que esta variable mostró una influencia significativa sobre el COP y los requerimientos térmicos del ciclo de absorción.

Considerar la evaluación ambiental del sistema mediante indicadores como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que permitiría complementar el análisis energético y económico realizado en esta investigación.

Referencias Bibliográficas

- Aguirre, A. (3 de Septiembre de 2024). *COP (Coeficiente de rendimiento)*. Obtenido de area Cooling Solutions: <https://areacooling.com/es/glosario-de-terminos-hvac/cop-coeficiente-de-rendimiento/>
- Alexis. (12 de junio de 2019). *Refrigeración por Absorción por Amoniac y Bromuro de Litio*. Recuperado el 28 de febrero de 2025, de Refrisoluciones: <https://refrisoluciones.blogspot.com/2019/06/refrigeracion-por-absorcion-por.html?>
- Arnabat, I. (26 de mayo de 2023). *Sistemas de refrigeración y aire acondicionado: compresión y absorción*. Recuperado el 19 de febrero de 2025, de Caloryfrio: <https://www.caloryfrio.com/aire-acondicionado/aire-instalaciones-componentes/sistemas-de-refrigeracion-compresion-absorcion.html>
- Bellos, E., Papavasileiou, L., Kekatou, M., & Michalis, K. (2022). *A Comparative Energy and Economic Analysis of Different Solar Thermal Domestic Hot Water Systems for the Greek Climate Zones: A Multi-Objective Evaluation Approach*. School of Pedagogical and Technological Education. doi:<https://doi.org/10.3390/app12094566>
- Ecochillers. (2024). *¿Qué es un Chiller?* Obtenido de Ecochillers: <https://ecochillers.net/que-es-un-chiller/>
- Electrificadora de Santander [ESSA]. (2024). *Informe de sostenibilidad*. Bucaramanga.
- Guohua, L., Jinliang, X., Ting, C., & Kaiying, W. (2022). *Progress in thermoplasmonics for solar energy applications*. Physics Reports. Obtenido de <https://pdf.sciencedirectassets.com/271542/1-s2.0-S0370157322X00306/1-s2.0-S0370157322002605/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEKL%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXV>

zLVVhc3QtMSJHMEUCIQDbjx2E%2BocgPRPANQ%2F0XAVxyCSWtxvhK3smMg
%2F5Pq5VgIgB6IJB8

Herold, K. E., Radermacher, R., & Klein, S. A. (2016). *ABSORPTION CHILLERS AND HEAT PUMPS* (Second ed.). Boca Ratón, Florida (EE. UU.).

Iberdrola. (s. f.). *Recurso solar: Medición de la radiación solar para mejorar las estimaciones de producción*. Recuperado el 11 de septiembre de 2025, de https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/energia-solar-fotovoltaica/recurso-solar?utm_source=chatgpt.com

Iberdrola. (s.f.). *Radiación solar: ¿cuál es su impacto sobre el planeta y el ser humano?* Recuperado el 11 de septiembre de 2025, de Iberdrola: <https://www.iberdrola.com/compromiso-social/radiacion-solar>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (s.f.). *Atlas Climatológico Nacional*.

International Energy Agency [IEA]. (2018). *The future of cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning*. París. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>

Jayden. (2024 de septiembre de 2024). *El bromuro de litio y su papel en el enfriamiento por absorción*. Recuperado el 28 de marzo de 2025, de honrel lithium Bromide: <https://honrellibr.com/es/lithium-bromide-and-its-role-in-absorption-cooling/>

Lopez, J., & García, M. (2019). Integración de sistemas de refrigeración por absorción en entornos urbanos. *Revista de Energía Renovable y Sostenible*, 7(2), 45-62.

Mendoza Fandiño, J. M., Rhenals Julio, J. D., Ávila Gómez, A. E., Martínez Guarín, A. R., De la Vega Gonzáles, T. d., & Durango Padilla, E. R. (2021). *Refrigeración por absorción de*

- calor con energías renovables: Un estudio de caso con energía solar fotovoltaica y biogás en Córdoba, Colombia.* Universidad de Córdoba, Montería.
doi:<https://doi.org/10.17981/ingecuc.17.2.2021.03>
- Nasiru I, I., Azzedine, Y., Jamilu Adamu, G., Ridha Ben, M., & Shafiqur, R. (2024). *Refrigeración solar con enfriadores de absorción, almacenamiento de energía térmica y estrategias de control: una revisión.* doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112762>
- Rodríguez, A., Martínez, F., & Sánchez, L. (2017). *Evaluación experimental de colectores CPC en sistemas de refrigeración solar por absorción.* Journal Energía Solar Térmica.
- Romage, G., Jiménez, C., Zacarías, A., Carvajal, I., García, N., Vega, M. d., & Venegas, M. (2022). *Enfriador solar mediante refrigeración por absorción adiabática utilizando energía solar a baja temperatura.* Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena. Obtenido de <https://repositorio.upct.es/server/api/core/bitstreams/0b43e165-c174-409a-ac8f-8229c09d2e2d/content>
- Romero, J., & Carbonell, T. (2014). *Sistema de refrigeración solar por absorción para la comunidad de Kumay en Ecuador.* Universidad Estatal Amazónica. Recuperado el 28 de marzo de 2025, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012014000300013#fig
- Sarachu, E. (28 de agosto de 2024). *Refrigeración por absorción: Funcionamiento y aplicaciones.* Recuperado el 19 de febrero de 2025, de e-ficiencia: <https://e-ficiencia.com/refrigeracion-por-absorcion/>
- Toledo, R. H. (2025). *Desarrollo de un guion experimental en una unidad didáctica "Túnel de Calor".* UNAM, Zaragoza. Recuperado el 19 de febrero de 2025, de <https://blogceta.zaragoza.unam.mx/tcalor/2025/02/>

- United Nations Environment Programme [UNEP]. (2020). *Cooling Emissions and Policy Synthesis Report: Benefits of cooling efficiency and the Kigali*. Nairobi. Obtenido de <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/33094/CoolRep.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Zacarías, A., Rivas, D., García, A. I., Barrera, E. E., Sánchez, J. G., Romage, G., . . . Vanegas, M. (2024). *Modelación y simulación de un refrigerador solar para medicamentos mediante refrigeración por absorción*. Universidad Miguel Hernández de Elche. doi:<https://doi.org/10.21134/hpy1ch59>
- Zacarías, A., Sánchez, J. G., García, A. I., Barrera, E. E., Romage, G., Jiménez, C., . . . Carvajal, I. (2024). *Modelado y simulación de un sistema de enfriamiento solar continuo mediante refrigeración por absorción de simple efecto*. Universidad Miguel Hernández de Elche. doi:<https://doi.org/10.21134/3kcysz87>