

Sistemas de refrigeración por absorción: Funcionamiento, aplicaciones y desafíos comparado con el sistema de refrigeración por compresión mecánica

Absorption refrigeration systems: Operation, applications, and challenges

Antonio Lechuga Gutiérrez ^a, José L. Rodríguez Muñoz ^b, Jorge Zuno Silva ^c, Carlos E. Borja Soto ^d, Ventura Rodríguez Lugo ^e, Josué E. Muñoz Pérez ^f

Abstract:

The absorption refrigeration system has emerged and consolidated as a clean and sustainable alternative to the compression refrigeration system, which has been the preferred choice for a long time. Thanks to its operation using external heat sources such as waste heat and solar energy, absorption refrigeration has established itself as a clean technology. It achieves this by eliminating the need for electricity and minimizing environmental impact, as it operates with entirely natural refrigerants that have zero global warming potential (GWP). However, this innovative system faces certain limitations and challenges that must be considered for it to compete with compression refrigeration. These include lower energy efficiency compared to compression systems, high installation and maintenance costs, and dependence on a stable heat source. This article analyzes the operation of both systems, their main configurations, and applications, all subjected to comparison. Additionally, it evaluates the limitations of absorption refrigeration compared to compression refrigeration in terms of efficiency, costs, and energy sources.

Keywords:

Absorption refrigeration, energy efficiency, environmental impact, thermodynamic cycle, renewable energy

Resumen:

El Sistema de refrigeración por absorción ha emergido y consolidado como una alternativa limpia y sostenible para hacerle frente al sistema de refrigeración por compresión el cual ha sido el predilecto por mucho tiempo, gracias a que el sistema de refrigeración por absorción trabaja mediante fuentes de calor externas como lo son el calor residual y la energía solar, se ha consolidado como una tecnología limpia. Esto último lo logra porque es un sistema que no utiliza energía eléctrica y minimiza el impacto ambiental al funcionar con refrigerantes totalmente naturales nulo impacto de calentamiento global medido por el índice GWP. A un que este sistema innovador enfrenta limitaciones y desafíos a considerar para ser un competidor para el sistema de refrigeración por compresión como su menor eficiencia energética cuando se compara con la obtenida por un sistema de refrigeración por compresión, costos elevados de instalación y mantenimiento, así como su dependencia a una fuente de calor estable. En este artículo se analiza el funcionamiento de ambos sistemas, sus principales configuraciones y aplicaciones, todo esto sometido a comparación. De igual forma se evalúan las limitaciones presentadas por el sistema de absorción con el sistema de compresión en términos de eficiencia, costos y fuente de energía.

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0004-3113-0921>, Email: le399553@uaeh.edu.mx

^b Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-4108-9414>, Email: jose_rodriguez@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-1997-5399>, Email: jorge_zuno@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-3385-8348>, Email: carlos_borja@uaeh.edu.mx

^e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales | Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería | México, <https://orcid.org/0000-0001-8767-032X>, Email: venturar165@gmail.com

^f Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales | Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería | México, <https://orcid.org/0000-0003-4205-2151>, Email: ingtelecom617@gmail.com

Palabras Clave:*Refrigeración por absorción, eficiencia energética, impacto ambiental, ciclo termodinámico, energía renovable***Introducción**

La refrigeración es un proceso conocido que se ha venido empleado durante décadas en diferentes sectores ya sea en aplicaciones industriales, comerciales o domésticas para mantener los productos o espacio en condiciones adecuadas de confort y temperatura. Una aplicación específica de este tipo de sistemas es la conservación de nuestros alimentos, la comodidad en edificaciones o el funcionamiento óptimo de nuestros equipos que tiene cierta sensibilidad a la temperatura (Enfriamiento electrónico). Una de las alternativas que para mitigar esta situación han sido los sistemas de refrigeración por compresión de vapor, debido a que estos sistemas presentan un rendimiento superior en la producción de temperaturas más bajas, aunque estos dependen para su funcionamiento de una fuente de energía eléctrica, de aquí se deriva una de sus mayores desventajas por su alto consumo energético y el impacto ambiental que ocasionan por el tipo de refrigerante que emplean para su correcto funcionamiento, de aquí que se tenga la necesidad de buscar configuraciones alternativas de ciclos de refrigeración, así como refrigerantes más amigables al medio ambiente. Es aquí cuando los sistemas de refrigeración por absorción emergen como una alternativa viable y prometedora debido a la facilidad de aprovechar fuentes de calor para producir el efecto refrigerante deseado, lo que beneficia en una reducción del consumo de energía eléctrica y por consecuencia, el impacto ambiental producido.

El principio básico de la refrigeración por absorción se basa en la combinación de dos sustancias: un refrigerante y un absorbente. Los refrigerantes más comúnmente empleados en este tipo de sistemas de refrigeración son el agua y el amoníaco. Para el caso del agua, bromuro de litio es empleado como absorbente, mientras que el agua se emplea como el absorbente del amoníaco. Los sistemas de refrigeración que operan con agua como refrigerante se emplean para aplicaciones de acondicionamiento de aire, mientras que los sistemas que operan con amoníaco como refrigerante son comúnmente utilizados para aplicaciones de refrigeración.

Cabe mencionar que los sistemas de compresión mecánica su funcionamiento se basa en el incremento de la presión del refrigerante por parte del compresor, mientras que la refrigeración por absorción funciona de una manera distinta, en este caso el refrigerante es absorbido por el absorbente, logrando una solución que posteriormente es calentada para permitir de manera eficiente la separación de ambos componentes y de esta

manera reiniciar el ciclo. Además, los sistemas de refrigeración por absorción presentan la ventaja de emplear fuentes de calor externas, como lo es la energía solar, el calor residual producido por medio de los procesos industriales o combustibles fósiles, disminuyendo el uso y consumo de energía eléctrica, reduciendo el impacto ambiental y las emisiones de gases de efecto invernadero.

El sistema de refrigeración por absorción muestra una alternativa eficiente y sostenible a diferencia de los sistemas de compresión mecánicos convencionales, gracias a su uso de energía calorífica en lugar de la energía eléctrica para conseguir su efecto de refrigeración. Este tipo de innovaciones son ideales para utilizarse en aplicaciones donde el acceso a energía eléctrica es limitado. Si bien, su eficiencia es menor comparada con el sistema de compresión de vapor, el bajo impacto ambiental y sus altas posibilidades de ser integrado a los sistemas de cogeneración lo hacen una opción atractiva para diferentes sectores industriales, zonas residenciales, edificios e incluso para su incorporación en instituciones educativas.

En este sentido, Velázquez, 2023 presentó el análisis de un sistema de refrigeración por absorción de simple efecto activado con energía solar, en el cual utilizó LiBr/H₂O como mezcla de trabajo. En su trabajo, se muestra una visión precisa y detallada del sistema de refrigeración por absorción y describe el ciclo termodinámico utilizado y las interacciones que realizan el refrigerante y el absorbente. De igual manera analiza las aplicaciones ya utilizadas de este innovador sistema en la industria y sus diferentes sectores. El autor concluyó en el análisis que, para generar una capacidad de enfriamiento de 50 kW, es necesario similar una potencia calorífica en el generador de 67.72 kW y 5.2 kW en la bomba de solución, logrando con esto, un rendimiento energético de 0.69.

Arroyo Rosa, 2012 desarrolló un equipo de refrigeración por absorción activado con energía solar para enfriamiento de agua. Para una capacidad de 5 litros de enfriamiento, se pudo obtener un rendimiento energético de 0.013, por lo que se deben cuidar las condiciones de operación para mejorar sus prestaciones energéticas.

Salazar Massaro, M. I. (2019) realizó un estudio de viabilidad de un sistema solar por refrigeración por absorción para su aplicación en campamentos en el Perú. A través de estudio se evaluó lo viable que sería implementar un sistema de refrigeración por absorción que se alimentaría por medio de energía solar para la conservación de alimentos en áreas rurales del Cusco, Perú. El estudio incluye el análisis de aspectos técnicos y

económicos para realizar dicho proyecto, así como también el impacto positivo que brindaría para la sociedad de dicha ciudad.

Romage et al., 2020 efectuó el análisis de un ciclo de refrigeración por absorción en que se empleó energía solar a baja temperatura para su funcionamiento. Para su estudio utilizaron agua como refrigerante y bromuro de litio como absorbente. Bajo diferentes condiciones de operación, los autores determinaron que la capacidad de enfriamiento se reduce al disminuir la temperatura de evaporación y con el aumento de la temperatura de los colectores, concluyendo que el COP depende en gran medida de la temperatura de generación y las condiciones atmosféricas.

Orozco, 2019 realizó el diseño de un sistema de refrigeración por absorción intermitente, en el cual emplearon amoníaco refrigerante y agua como absorbente, así como energía solar para su activación. Se analizaron las condiciones operativas y se evalúa la viabilidad técnica, así como la económica del sistema diseñado como propuesta, encontrándose que el sistema puede alcanzar un rendimiento energético de 0.59.

Noriega Sánchez y Pérez Rojas, 2011 analizaron un sistema de refrigeración por absorción como la solución o alternativa sostenible frente a los clásicos sistemas por compresión mecánica. Además, estudiaron su funcionamiento, resaltando su capacidad para trabajar con fuentes de calor a baja temperatura, como lo son las energías renovables como la solar y el calor residual. Se determinaron sus ventajas hablando en términos de eficiencia energética, así como la reducción de su impacto en el medio ambiente, también nos presenta sus desafíos que se asocian con su bajo coeficiente de desempeño (COP) y la creciente necesidad de mejorar la transferencia de calor y masa de los absorbentes a utilizar.

La creciente demanda de encontrar soluciones que sean energéticamente eficientes y a un más ambientalmente responsables considerando la dirección que está tomando el planeta hace que este tipo de innovaciones sean de vital importancia y que surjan como posibles soluciones por eso vale la pena explorarlas y conocerlas. La refrigeración por absorción muestra ventajas significativas e importantes como lo son el poderse permitir el uso de la energía calorífica residual, así como energía renovable como lo es la solar, diluyendo el uso de energía eléctrica y a su vez reduciendo el impacto producido por las emisiones de gases de efecto invernadero.

La importancia de hablar de este tema emerge no solo por su relevancia en la lucha de buscar tecnología sostenible con energía renovable para combatir el cambio climático, sino también por las grandes posibilidades que emergen junto con ella, su potencial en sectores en

donde la energía eléctrica es limitada o de alto costo o en donde existe alto desperdicio de energía residual que no se está aprovechando. Comprender su funcionamiento, las aplicaciones que se le pueden dar y los desafíos la que esta nueva tecnología se enfrenta, es de carácter fundamental para poder evaluar su viabilidad y poder fomentar su adopción en diferentes industrias.

Por tal motivo, este trabajo tiene como objetivo analizar de manera detallada el funcionamiento de este sistema, explicando su ciclo termodinámico que lo hace posible y las combinaciones que más se utilizan entre refrigerantes y absorbentes. De igual forma se explorará sus aplicaciones principales en donde este sistema ya trabaja de manera eficiente, así como su uso en edificaciones y procesos de cogeneración todo enfocado hacia una comparación con el sistema de refrigeración por compresión. Además, se incluirá un análisis de sus respectivas configuraciones que más se utilizan en estos sistemas y se realizarán comparaciones energéticas que nos ayudaran a evaluar su desempeño frente a otros sistemas de refrigeración, tomando como referencia factores como consumo energético eficiencia y costos de operación. Finalmente se hablará de los desafíos a los que se enfrenta este innovador sistema de refrigeración, en los cuales se incluyen su menor eficiencia a comparación de los sistemas de refrigeración mecánicos, sus costos de instalación y mantenimiento, así como la necesidad de contar con fuentes de calor idóneas para su correcto funcionamiento.

Funcionamiento de los sistemas

Los sistemas de refrigeración por absorción funcionan mediante el uso de una fuente de energía calorífica supliendo al clásico compresor mecánico. Su funcionamiento tiene su base en la combinación de refrigerante y un absorbente los cuales a mezclarse logran el efecto refrigerante.

En la Figura 1 se muestra el esquema representativo del sistema de refrigeración por absorción, el cual está constituido por los siguientes componentes: generador (GE), condensador (CO), válvula de refrigerante (REV), evaporador (E), absorbedor (AB), válvula de solución (SEV), bomba de solución (SP) y un intercambiador de solución (SHX) empleado para mejorar el rendimiento energético del sistema. Su principal característica del sistema de refrigeración por absorción es que no requiere de un compresor para trabajar, más bien, este se basa en un proceso químico de absorción y desorción térmica para lograr mover el refrigerante. Todo su ciclo comienza en el evaporador, donde el refrigerante de baja presión tiene la función de absorber el calor de la zona y logra la evaporación. En vez de ser comprimido como comúnmente trabajan los sistemas de compresión

mecánica este estado gaseoso es absorbido por un líquido absorbente que tiene la función de convertirlo en una mezcla líquida que es transportada al generador. Es en este punto donde se aplica una fuente de calor por ejemplo energía solar, que tiene la función de separar la mezcla antes realizada entre el absorbente y el refrigerante, permitiendo que este último se dirija hacia el condensador, donde se condensa en estado líquido y se enfría. Tras esto el refrigerante pasa por medio de una válvula de expansión que logra que este disminuya su presión antes de entrar nuevamente al evaporador y se reinicie el ciclo.

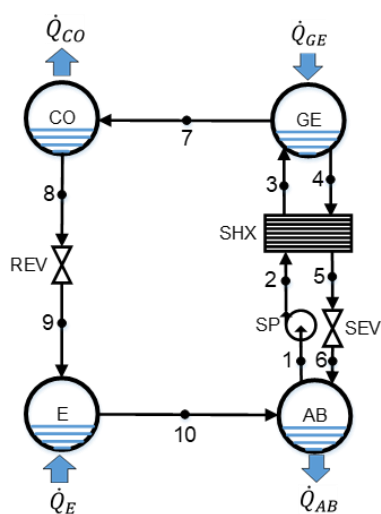


Figura 1. Ciclo de un sistema de refrigeración por absorción. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en la Figura 2 se muestra el esquema del sistema convencional de refrigeración por compresión de vapor. El ciclo opera con dos niveles de presión, alta presión en el condensador y línea de descarga del compresor y baja presión en el evaporador y línea de succión del compresor. Además, este funciona mediante un ciclo cerrado en el que el compresor, el cual es parte fundamental de su funcionamiento, impulsa al refrigerante por diferentes etapas para poder conseguir el enfriamiento deseado. Lo primero que sucede es que el refrigerante es comprimido logrando un aumento de su presión y temperatura. Para luego pasar hacia el condensador donde este libera calor hacia el ambiente y se condensa en líquido. Posteriormente, el refrigerante en condiciones de saturación pasa por una válvula de expansión y esta reducirá su presión y temperatura de una manera abrupta. Por último, el evaporador tiene la función de evaporar el refrigerante por medio de la absorción del calor de la zona que se va a enfriar, una vez evaporado regresa al compresor para comenzar nuevamente el ciclo.

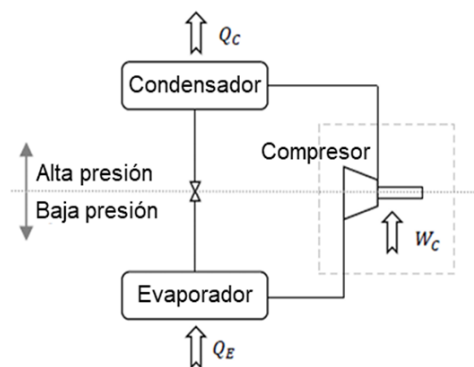


Figura 2. Ciclo de un sistema de refrigeración por compresión de vapor (Vereda Ortiz, 2015).

Como se puede observar, la principal diferencia en su funcionamiento de ambos sistemas radica principalmente en que el sistema de refrigeración por compresión de vapor hace uso de un compresor mecánico para lograr el aumento de presión y temperatura del refrigerante, utilizando como principal fuente de energía la electricidad para su correcto funcionamiento. Mientras el sistema de refrigeración por absorción no utiliza el compresor mecánico, sino, un compresor químico que tiene la función de absorber al refrigerante y luego volver a ser separados mediante la aplicación de energía calorífica. Otra alternativa para mejorar el rendimiento en los sistemas de refrigeración por absorción, es la incorporación de un compresor entre el evaporador y absorbedor y generador y absorbedor y a este tipo de ciclos se les denomina ciclos de refrigeración híbrido (absorción/compresión), como el mostrado en la Figura 3. En la Figura 3a se muestra el ciclo de refrigeración híbrido, en el que el compresor se incorpora en la zona de baja presión entre el evaporador y absorbedor, el cual ayuda a incrementar la temperatura y presión en el absorbedor facilitando su proceso de absorción y a reducir la temperatura de activación en el sistema. En la Figura 3 b se ilustra el ciclo de refrigeración híbrido en el que el compresor es incorporado entre el generador y condensador, ayudando a reducir la carga térmica en el generador.

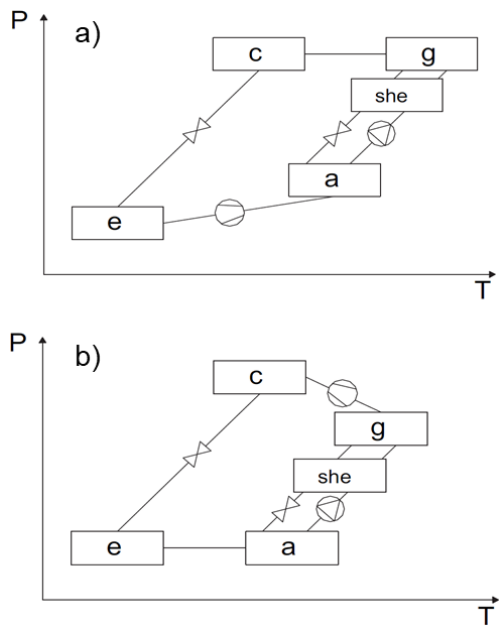


Figura 3. Ciclo de refrigeración híbrido (compresión/absorción): a) Compresor entre el evaporador y absorbedor y b) Compresor entre el generador y condensador. Fuente: Ventas et al., 2010.

Aplicaciones de los sistemas de refrigeración por absorción y compresión

Las aplicaciones de los sistemas refrigeración por compresión de vapor y los sistemas de refrigeración por absorción es variable ya que depende de factores como la disponibilidad de energía y los diferentes requerimientos del proceso. Actualmente la refrigeración por compresión de vapor es la más utilizada en los diferentes sectores de la sociedad. Por ejemplo, los refrigeradores domésticos, aires acondicionados, la industria alimentaria emplean este tipo de tecnología, debido a su alta eficiencia y rapidez para reducir la temperatura. Sin embargo, este tipo de sistemas presenta un gran problema debido a su alto consumo de energía eléctrica.

Por otra parte, los sistemas de compresión de vapor ha sido ampliamente usados por muchos años por sus buenas prestaciones energéticas, aunque debido a su alto consumo energético y su impacto ambiental provoco que se buscaran otras soluciones es aquí cuando emerge el sistema de refrigeración por absorción como la solución al problema y si bien a un en temas de eficiencia se encuentra lejos del sistema por compresión, existen otras múltiples ventajas que lo han llevado a ser un sistema aplicable utilizado, principalmente en sectores donde se cuenta con disponibilidad de calor residual o fuentes de energía alternativa como lo es el gas y la energía solar, y se ha vuelto muy común en hoteles, hospitales y grandes edificaciones, ya que estos de manera inteligente aprovechan el calor de procesos industriales o sistemas de calefacción. Por otro lado, es la solución perfecta en sitios marginados y remotos con acceso limitado a

electricidad o en el peor de los casos sin acceso a ella, como son algunas áreas rurales o vehículos recreativos.

En la Tabla 1 se muestran las comparativas más relevantes entre los ciclos de refrigeración por compresión de vapor y absorción. Como se puede apreciar, los sistemas de compresión de vapor presentan una ventaja significativa en aplicaciones de refrigeración y climatización doméstica, ya que estos son más ampliamente recomendados por su alto rendimiento energético, son más compactos y disponibilidad de energía para su funcionamiento. Por su parte, los sistemas de refrigeración por absorción, es recomendable su uso en sistemas de acondicionamiento de aire a gran escala, específicamente para hoteles y edificios en los cuales se pueda aprovechar el calor residual. También, ambos sistemas de refrigeración resultan adecuados para ser empleados en refrigeración industrial y alimentaria, con la ventaja que los sistemas de refrigeración por absorción son capaces de aprovechar el calor residual de dichos procesos, incrementando su rendimiento energético y reduciendo el impacto ambiental.

En zonas con escasos del suministro eléctrico, los sistemas de refrigeración por absorción puede ser una buena alternativa debido a su funcionamiento puede ser por medio de gas o en su caso, energía solar.

Tabla 1. Comparativa sistemas de refrigeración por compresión de vapor y absorción. Fuente: Velázquez, 2023, Refri-climas, 2023 y Noriega y Pérez Rojas, 2011.

Aplicación	Tipo de sistema	
	Compresión	Absorción
Refrigeradores domésticos	Muy común, debido a su eficiencia y tamaño compacto.	Poco común en solo modelos específicos sin acceso a electricidad.
Aire acondicionado	Amplias aplicaciones en hogares, oficinas y automóviles	Usado en sistemas de climatización a gran escala, por ejemplo, hoteles o edificios que aprovecha el calor residual.
Industria alimentaria	Utilizado en congeladores, cámaras frigoríficas y transporte de producto perecederos.	Utilizado en fábricas de procesamiento alimentario donde existe calor residual aprovechable.
Refrigeración industrial	Es ideal para proceso que necesitan una	Es aplicado en industrias con energía

	refrigeración rápida y controlada.	calorífica residual a gran escala como plantas químicas y petroquímicas.
Difícil acceso a electricidad	No es funcional debido a su dependencia a la energía eléctrica para su correcto funcionamiento.	Ideal para utilizarse en zonas rurales con difícil o nulo acceso a la energía eléctrica debido a su funcionamiento con gas o energía solar.

Configuraciones de los sistemas de refrigeración por absorción comparados con los de compresión mecánica

Los sistemas de refrigeración por absorción se dividen en diferentes configuraciones dependiendo del número de etapas y estas varían según su aprovechamiento de calor (simple efecto, doble efecto y triple efecto), así como aquellas que incorporan el uso de un compresor (sistema híbrido). Cada una de ellas tiene aspectos importantes que las caracterizan y que definen su eficiencia, así como determinar bajo qué condiciones se le puede dar una aplicación óptima. Lo que las diferencia con el sistema convencional de refrigeración por compresión de vapor es que este último opera con un ciclo mecánico que es relativamente más simple pero que también es altamente eficiente.

Sistemas de simple efecto

El sistema de refrigeración por absorción de simple efecto es el más básico de todos los sistemas de refrigeración por absorción (ver Figura 1), este funciona con un solo generador que cumple con la función de separar el refrigerante del absorbente, para después dar paso a su condensación, expansión y evaporación y completar su ciclo. Este depende del calor aplicado en el generador para conseguir un correcto funcionamiento, lo cual lo convierte en la solución perfecta cuando se tiene disponibilidad de energía solar, gas o calor residual. Pero este también cuenta con una gran desventaja comparado con el sistema de refrigeración por compresión mecánica, que es su bajo rendimiento energético (COP), el cual cuenta con un COP que en muy raras ocasiones supera los 0.8, lo que los deja muy por detrás del sistema de refrigeración por compresión de vapor, ya que este tiene una eficiencia mucho mayor y cuenta con un coeficiente de rendimiento (COP) que alcanza valores entre 3 y 6 unidades, esto debido al uso de energía eléctrica para hacer accionar un compresor que les permite impulsar el refrigerante a través del ciclo sin la necesidad de fuentes

de calor externas. En la Figura 1 se muestra el esquema del sistema de refrigeración de simple efecto y sus estados termodinámicos.

En la Tabla 2 se muestra la comparativa energética entre el ciclo de refrigeración por compresión de vapor y el sistema de refrigeración por absorción. La desventaja de los sistemas de refrigeración por absorción de simple efecto en comparación con los sistemas de refrigeración por compresión de vapor radica en su bajo rendimiento energético. Para el caso de los sistemas de refrigeración por absorción de simple efecto el COP oscila entre 0.6 y 0.8, mientras los sistemas de refrigeración por compresión de vapor el COP varía entre los 2.5 y 6, dependiendo de las condiciones de operación y el tipo de refrigerante que se esté utilizando. La desventaja de los sistemas de compresión de vapor en comparación con los sistemas de refrigeración por absorción es que dependen principalmente del suministro de la energía eléctrica y presentan mayores costos de operación e instalación.

Tabla 2. Comparativa entre sistema de compresión de vapor y el de absorción de simple efecto. Fuente: Mardones Barrientos, 2016 y Cervantes, 2015.

Característica	Compresión Mecánica	Absorción simple efecto
COP	2.5-6	0.6-0.8
Consumo de energía eléctrica	Alto depende del compresor	Mínimo o nulo
Fuente de energía principal	Electricidad	Calor (vapor, gas, solar, residuos térmicos)
Eficiencia bajas temperaturas	Alta	Baja
Costo de instalación	Medio alto	Bajo o medio
Costo de operación	Medio (Por consumo eléctrico)	Bajo si el calor es gratuito
Dependencia a la electricidad	Total	Nula o mínima

Dentro del mercado se pueden encontrar una variedad de máquinas de refrigeración por absorción de simple efecto condensadas por agua (Yazaki, Thermax, EAW, Phoenix, Climate Well, las cuales trabajan con LiBr/H₂O y LiCl/H₂O como pares de trabajo. Las máquinas Yazaki y Thermax se caracterizan por tener capacidades de refrigeración de hasta 35 kW, así como operar con combustibles fósiles, calor residual o energías renovables (solar y biomasa). A diferencia de las máquinas EAW, estas se limitan a capacidades frigoríficas de hasta 15 kW, aunque también pueden ser activadas de forma similar que las máquinas Yazaki y Thermax. Por su parte, las máquinas de refrigeración por absorción Phoenix y Climate Well, presentan la ventaja de ser activadas con energía solar,

la cual puede ayudar a reducir las emisiones de gases efecto invernadero, sin embargo, su capacidad de enfriamiento está limitada a 10 kW y se debe seleccionar adecuadamente el sistema de enfriamiento para evitar riesgos de legionela (formación de bacterias). Es importante mencionar que el rendimiento energético de este tipo de máquinas de refrigeración por absorción es de máximo 0.7.

Otro de los sistemas de refrigeración de simple efecto son aquellas enfriadas por aire. Algunas de las máquinas de refrigeración por absorción de simple efecto enfriadas por aire han sido diseñadas por varias empresas y por prototipos experimentales desarrollados a nivel institucional. En este sentido, se puede encontrar la máquina desarrollada por la empresa Carrier cuya capacidad de enfriamiento es de 35 kW, la cual se caracteriza por ser activada con energía solar y cuyos rendimientos energéticos oscilan entre 0.71 a 0.75. Por su parte, la Universidad Politécnica de Cataluña diseñó una máquina de simple efecto enfriada por aire con una capacidad de 6.7 kW y alimentada con agua, la cual alcanzó un rendimiento energético de entre 0.32 a 0.47 a una temperatura ambiente de 32°C. Por su parte, Rotartica diseñó una máquina de absorción de simple efecto, la cual operaba con LiBr/H₂O como mezcla de trabajo y tenía una capacidad frigorífica de 4.5 kW. Además, podía ser alimentada con energía solar o agua caliente proveniente de una caldera y presentaba la ventaja de no tener inconvenientes con la cristalización, sin embargo, su rendimiento energético estaba limitado a 0.43 y no podía trabajar a temperaturas de refrigeración altas. Por otra parte, la temperatura nominal de entrada de agua caliente era de 90°C, lo que representaba una carga térmica en el generador de 6.7 kW. Además, para que la máquina funcionara adecuadamente y pudiera producir frío, las temperaturas de operación en los circuitos secundarios en el evaporador, condensador y evaporador deben estar dentro del siguiente rango: $T_E=12^{\circ}\text{C}-22^{\circ}\text{C}$, $T_{CO}=30^{\circ}\text{C}-40^{\circ}\text{C}$ y $T_{GE}=80^{\circ}\text{C}-105^{\circ}\text{C}$, cuyo máximo rendimiento alcanzado fue de 0.5.

Sistemas de doble efecto

Buscando la mejora de eficiencia energética en los ciclos de refrigeración por absorción, se desarrolló la configuración de doble efecto, la cual funciona con dos generadores que están conectados en serie (Figura 3). La característica principal de esta configuración es que el calor que es aplicado en el primer generador no es desperdiciado por completo si no que con la ayuda de este se alimenta al segundo generador lo que permite un mejor aprovechamiento de la energía y se consigue un avance en su coeficiente de rendimiento (COP) a valores de entre 1.2 y 1.4 (Herold et al., 2016), lo que representa incrementos en el COP que van del 70 al 100%. Este tipo

de configuración ya es utilizada de manera común los sistemas de aire acondicionado a gran escala y procesos industriales que suelen tener una producción considerable de calor residual como lo son fábricas y plantas de cogeneración. A pesar del uso de sus dos generadores y la significativa mejora energética, esta configuración sigue teniendo una eficiencia y un COP muy por debajo en comparación del sistema de refrigeración por compresión de vapor quien, con la ventaja de su diseño compacto, mayor eficiencia y su menor dependencia a las fuentes de calor externas sigue teniendo mayor uso en los diferentes sectores.

El principio de funcionamiento es muy similar al del ciclo de refrigeración por absorción de simple efecto. Primeramente, calor ingresa al generador de alta temperatura (Qd2) separando la mezcla. Por un lado, el refrigerante es enviado al condensador (c2), producto de la transferencia de calor, el refrigerante alcanza las condiciones de líquido saturado a su salida por este componente. Posteriormente, el refrigerante ingresa a la válvula de refrigerante reduciendo su presión y temperatura a su ingreso al primer condensador (c1). Por su parte, la mezcla pobre en refrigerante es enviado hacia el generador vía el intercambiador de calor de solución (SHX2), donde el calor proveniente del condensador (c2) ocasiona que la mezcla sea separada nuevamente. La solución rica en refrigerante es enviada de regreso al generador de alta presión por medio de la bomba de solución, mientras el refrigerante ingresa al condensador c1 y se mezcla con el refrigerante líquido del condensador c2. Es este componente, parte del calor es rechazado al medio ambiente e ingresa a la segunda válvula de refrigerante como líquido saturado. El refrigerante fluye hacia el evaporador a baja presión y temperatura, donde calor proveniente del espacio a enfriar provoca que se transforme en vapor saturado y se envía hacia el absorbedor. Por su parte, la solución pobre en refrigerante pasa a través del intercambiador de calor de solución (SHX1) para después ser enviado a la válvula de solución reduciendo su presión y temperatura a su ingreso al absorbedor. En el absorbedor, la solución pobre en refrigerante se mezcla con el vapor de refrigerante proveniente del evaporador. La mezcla rica en refrigerante fluye hacia el generador (d1) por medio de la bomba de solución de baja presión y de esta manera completar el ciclo.

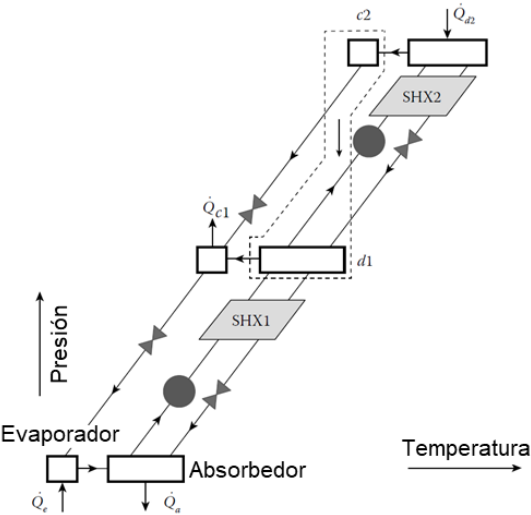


Figura 3. Sistema de refrigeración por absorción de doble efecto. Fuente: Herold et al., 2016.

Cabe mencionar que las temperaturas de operación con las que debe operar un ciclo de refrigeración por absorción de doble efecto es mayor que aquel de un ciclo de refrigeración por absorción de simple efecto (aproximadamente 100°C), los cuales varían entre 150°C y 180°C (Henning, 2007), resultado ser entre 50% a 80% superiores a aquellas empleadas por el ciclo básico de refrigeración por absorción.

Es importante resaltar que este tipo de configuración es de mayor capacidad frigorífica, el cual se emplea comúnmente para acondicionamiento de aire en edificios y sistemas industriales. Además, permiten aprovechar la energía residual de procesos industriales y plantas de cogeneración, lo que ayuda a mejorar el rendimiento energético y reducir el impacto ambiental que ocasionan aquellos sistemas que son alimentados con electricidad (Sistemas de refrigeración por compresión de vapor). Las capacidades de las máquinas de refrigeración por absorción de doble efecto oscilan entre 200 TR hasta las 350 TR, las cuales son principalmente alimentadas con calor, aunque también se pueden encontrar máquinas de doble efecto que son accionadas con agua caliente, cuya temperatura de operación varían entre 155 a 205°C, sin embargo, el rendimiento energético es ligeramente menor en comparación con las máquinas de doble efecto activadas con calor, cuyos rendimientos energéticos oscilan entre 0.9 a 1.2. Dentro del mercado se pueden encontrar dos tipos de máquinas de refrigeración por absorción de doble efecto: condensadas por aire y condensadas por agua. Las máquinas condensadas por agua emplean LiBr/H₂O y LiCl/H₂O como mezclas refrigerantes, las cuales son construidas por las empresas Broad y Rinnai/Oska, cuyas capacidades frigoríficas son de 16 kW y 6.7 kW, respectivamente.

La comparativa energética entre el sistema de compresión de vapor y el sistema de refrigeración por absorción de doble efecto se muestra en la Tabla 3. Como ya se mencionó, la diferencia principal entre ambos sistemas radica principalmente en los rendimientos energéticos, ya que estos siguen siendo superiores para el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, sin embargo, esto dependen directamente del suministro de la energía eléctrica y emplean fluidos refrigerantes que contribuyen en gran medida al calentamiento global del planeta (GWP).

Tabla 3. Comparativa entre sistema de compresión y sistema de absorción de doble efecto. Fuente: Cortés, 2014 y Romage, 2020.

Característica	Compresión Mecánica	Absorción doble efecto
COP	2.5-6	1.0-1.2
Consumo de energía eléctrica	Alto depende del compresor	Mínimo o nulo
Fuente de energía principal	Electricidad	Calor (alta temperatura)
Eficiencia en bajas temperaturas	Alta	Media
Costo de instalación	Medio alto	Medio alto
Costo de operación	Medio (Por consumo eléctrico)	Medio
Dependencia a la electricidad	Total	Nula o mínima

Sistemas de triple efecto

En busca de conseguir mayor eficiencia y competir con el sistema de refrigeración por compresión de vapor, se desarrolló la configuración de refrigeración por absorción de triple efecto, la cual integra hasta tres generadores conectados en cascada para que el aprovechamiento de calor sea el máximo posible. Con la innovación de este diseño se logró obtener una mayor eficiencia energética comparado con las configuraciones de simple y doble efecto y un COP de hasta 1.8. Si bien se logró una mejora considerable de eficiencia energética, la complejidad de este sistema también aumentó, lo que la a hecho solo considerable para aplicaciones industriales donde su energía residual es considerable para poder justificar el tamaño de dicha inversión, ya que al contar con tres generadores su costo y mantenimiento se elevan considerablemente y su temperatura de activación también se eleva significativamente. Es por esta razón

que el sistema de refrigeración por compresión de vapor sea una adecuada opción para aplicaciones de refrigeración industrial por su fácil instalación y un mantenimiento menor, ya que no requiere de estructuras con múltiples generadores ni fuentes de calor específicas para su funcionamiento óptimo. En la Figura se muestra el esquema representativo del ciclo de absorción de triple efecto, donde E representa al evaporador, C al condensador, A al absorbedor, D al generador, p a la bomba de solución y SHX al intercambiador de calor de solución, mientras los subíndices 1-3 indican el número de componentes asociados al sistema. El principio de funcionamiento es similar al del ciclo de refrigeración por absorción de doble efecto. Sin embargo, para mejorar el rendimiento energético del sistema, el calor del condensador C3 se utiliza como fuente de calor en el generador D2, mientras la energía proveniente del condensador C2 es empleado como fuente de calor en el generador D1.

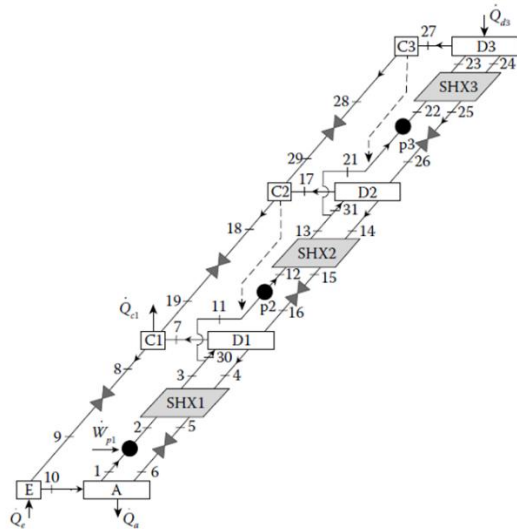


Figura 6. Ciclo de refrigeración por absorción de triple efecto. Fuente: Herold et al., 2016.

La comparativa entre el sistema de refrigeración por compresión de vapor y el sistema de refrigeración por absorción de triple efecto se muestra en la Tabla 4. La principal diferencia entre ambos sistemas radica en su rendimiento energético y el consumo de energía para su correcto funcionamiento. Los sistemas de refrigeración por compresión de vapor dependen principalmente de la electricidad para su funcionamiento, aunque estos presentan un mayor rendimiento energético en comparación con el ciclo de refrigeración por absorción de triple efecto. La ventaja de los sistemas de refrigeración por absorción radica en las fuentes de suministro de energía, las cuales pueden ser calor residual de procesos industriales e incluso energía solar,

lo que conlleva a una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y al cuidado del medio ambiente.

Tabla 4. Comparativa entre sistema de compresión y sistema de absorción de triple efecto. Fuente: Romage, 2020 y Soto Parra, 2018.

Característica	Compresión Mecánica	Absorción triple efecto
COP	2.5-6	1.6-1.8
Consumo de energía eléctrica	Alto depende del compresor	Mínimo o nulo
Fuente de energía principal	Electricidad	Calor (muy alta temperatura)
Eficiencia en bajas temperaturas	Alta	Alta
Costo de instalación	Medio alto	Alto
Costo de operación	Medio (Por consumo eléctrico)	Medio alto
Dependencia a la electricidad	Total	Nula o mínima

Sistemas híbridos (compresión/absorción)

Por otro lado, existen ya innovaciones con un sistema de configuración híbrido los cuales tiene la capacidad de combinar el ciclo de absorción con un compresor mecánico, lo que lo hace conseguir un equilibrio entre el uso energético de electricidad comparado con el sistema de compresión mecánico de vapor y una mejora considerable de eficiencia comprado con las configuraciones de los sistemas de absorción convencionales. En este sistema el compresor mecánico reduce la carga térmica del generador, y por tal motivo mejora la eficiencia considerablemente. Su implementación se ha dado principalmente en donde se tiene aplicaciones de alta capacidad, como lo son los grandes edificios e industrias, donde estos buscan una alternativa más flexible y sustentable, sin perder eficiencia. Al comparar el sistema de refrigeración híbrido con el sistema de compresión mecánico de vapor, el sistema de absorción híbrido tiene ventajas a considerar en términos de consumo energético y en el uso de calor residual producido, pero este sistema tiene un costo inicial y una complejidad que son factores para considerarse antes de elegirlos por encima del clásico sistema de compresión mecánico.

Como se observa en la Tabla 5. Si bien, el rendimiento energético de los sistemas de absorción híbrido mejoró significativamente (COP=1.5-4), este sigue siendo inferior en comparación con el ciclo de compresión de vapor. Como ya se mencionó, la configuración de refrigeración por absorción híbrida se encuentra todavía en la etapa de desarrollo, por lo que todavía no se cuentan con equipos comerciales que puedan ser una alternativa viable en el

campo de la refrigeración. Por tal motivo, investigaciones encaminadas al análisis y desarrollo de compresores eficientes en este tipo de configuraciones ayudarán en gran medida en el desarrollo tecnológico y la búsqueda de nuevas alternativas que puedan ser aún más competitivas en comparación con los ciclos de compresión de vapor.

En la Tabla 5 se muestra la comparativa entre el ciclo de compresión de vapor y el ciclo híbrido de absorción. Como se puede observar, ambos sistemas dependen del consumo eléctrico del compresor, aunque el sistema de refrigeración también depende del calor suministrado al generador para su correcto funcionamiento. Los costos de instalación son mayores en los sistemas híbridos de refrigeración por absorción, aunque el costo de operación es menor que el sistema de refrigeración por compresión de vapor.

Tabla 5. Comparativa entre sistema de compresión y sistema híbrido (compresión + absorción). Fuente: Cortés, 2014 y Noriega y Pérez Rojas, 2011.

Característica	Compresión Mecánica	Híbrido (Compresión/Absorción)
COP	2.5-6	1.5-4
Consumo de energía eléctrica	Alto depende del compresor	Reducido, depende de la carga compartida con absorción)
Fuente de energía principal	Electricidad	Electricidad + calor residual
Eficiencia en bajas temperaturas	Alta	Alta si es calor residual es suficiente
Costo de instalación	Medio alto	Alto (requiere ambos)
Costo de operación	Medio (Por consumo eléctrico)	Bajo si usa calor residual
Dependencia a la electricidad	Total	Parcial

Comparaciones energéticas y evaluación de desempeño

Los sistemas de refrigeración son de vital importancia en aplicaciones industriales, comerciales y residenciales, pero su eficiencia, sus costos operativos y su impacto ambiental tienden a ser variados según su principio de funcionamiento. A continuación, se realizará un análisis y comparación del desempeño de los sistemas de refrigeración por absorción y compresión de vapor enfocados en tres aspectos, su consumo energético y coeficiente de desempeño (COP), impacto de costos operativos y su impacto ambiental.

Consumo energético y COP

Para hablar de consumo energético y COP es importante mencionar que el consumo de energía de un sistema de refrigeración está directamente relacionado con su eficiencia, la cual se mide con el ya antes mencionado coeficiente de desempeño COP, que representa la cantidad de frío generado por cada unidad de energía consumida. Dicho rendimiento energético se puede calcular por medio de la siguiente expresión:

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_G + \dot{W}_B}$$

Hablando específicamente del sistema de refrigeración por absorción, este se basa en el uso de una fuente de energía calorífica como lo es el gas, el vapor, energía solar o el calor residual, supliendo a la energía eléctrica para conseguir el efecto refrigerante. Como ya se mencionó antes este tipo de sistema tiene un bajo consumo energético por el hecho de no utilizar compresor sino un generador, pero como se comentaba anteriormente su eficiencia es mucho menor con un COP de entre 0.6 a 1.8, dependiendo del tipo de configuración utilizada. Comparado con el sistema de refrigeración por compresión que con la ayuda de un compresor eléctrico tiene la función de comprimir y expandir el refrigerante permite alcanzar COPs entre 2.5 a 6 dependiendo de varios factores, como es la calidad del equipo, las condiciones de operación y el tipo de refrigerante utilizado.

Impacto de costos operativos

Se puede definir que el costo de operación de un sistema de refrigeración se determina dependiendo del consumo de energía eléctrica y el mantenimiento que se realice. Como se ha mencionado antes, el sistema de refrigeración por absorción tiene la capacidad de reducir o anular el uso de energía eléctrica lo que conlleva a menos costos de operación en zonas donde el calor residual está disponible o si se hace uso de energías renovables como la energía solar. No obstante, su costo de instalación tiende a ser elevado porque requiere de un equipo más grande y complejo en algunos generadores de calor, como es el caso de las calderas, paneles solares térmicos o sistemas de cogeneración. Al igual que su mantenimiento debe de ser especializado, ya que este trabaja con refrigerantes y absorbentes como el bromuro de litio o amoníaco, los cuales requieren de un control para evitar corrosión y fugas debido a su alta reactividad. Por otro lado, el sistema de refrigeración por compresión de vapor tiende a tener un costo de instalación más barato y accesible, además es más fácil de instalar debido a su alta demanda en el mercado. Su mayor desventaja es su alto consumo de energía eléctrica, el

cual podría llevarlo a ser costoso en especial en países donde la tarifa eléctrica es elevada, aunque hablando de términos de mantenimiento suele ser más económico debido al uso de componentes mecánicos estándar, variedad de repuestos y la disponibilidad de técnicos especializados.

Desde una perspectiva económica, el sistema de refrigeración por absorción es una mejor elección cuando se tienen factores como el aprovechamiento de calor residual gratuito o de bajo costo, mientras que el sistema de refrigeración por compresión de vapor muestra ventajas a la hora de mantenerlo e instalarlo.

Impacto ambiental

El impacto ambiental que genera un sistema de refrigeración se mide dependiendo diversos factores como lo son: su consumo energético, las emisiones de gases de efecto invernadero que producen y el tipo de refrigerante que estas utilicen en su ciclo.

Cabe mencionar que el sistema de refrigeración por absorción tiene un impacto ambiental muy bajo, debido a que este utiliza refrigerantes naturales como lo son el agua o el amoníaco, los cuales no tienen un impacto ambiental debido a tener nulo potencial de calentamiento global medido por el índice GWP, además de no afectar la capa de ozono. Por otra parte, este sistema depende solo de la energía solar o el calor residual aprovechado de los procesos industriales, se logra reducir la huella de carbono, además de reducir su dependencia a los combustibles fósiles.

Hablando ahora del sistema de refrigeración por compresión de vapor, el cual hace uso comúnmente de refrigerantes sintéticos los cuales resultan altamente costosos en el ámbito ecológico, ya que estos llegan a tener tradicionalmente alto potencial de calentamiento global medido por el índice GWP, como lo son los HFCs, HCFCs o CFCs. Sin embargo, ya se ha estado trabajando en este problema y con los avances e implementaciones en las normativas ambientales se ha empezado a utilizar refrigerantes que tengan menor impacto ecológico, como el CO₂ (R-744), amoníaco (R-717) y los hidrocarburos (R-600a) que si bien logran reducir el impacto ambiental siguen teniendo mayor impacto que los utilizados en sistema de refrigeración por absorción.

Sin embargo, eso es solo hablando de los refrigerantes utilizados en su ciclo, otro aspecto a considerar es el uso de la energía eléctrica, el cual llega a ser alto cuando se habla de sistemas de refrigeración por compresión de vapor, ya que este consumo puede generar más emisiones de CO₂ si la energía eléctrica proviene de fuentes fósiles. Aunque si bien, la energía eléctrica es producida por fuentes renovables, este impacto puede ser mitigado.

En la Tabla 6 se muestran algunas mezclas de trabajo y refrigerantes empleados en los sistemas de refrigeración por absorción y compresión de vapor. Como se puede observar, las mezclas refrigerantes empleadas en equipos comerciales de refrigeración por absorción no presentan efecto al calentamiento global, ni contribuyen a la destrucción de la capa estratosférica del planeta. Sin embargo, existen refrigerantes que presentan un alto índice de GWP que siguen utilizándose en equipos comerciales de compresión de vapor, lo que los pone en una desventaja en comparación con los fluidos de trabajo empleados en los sistemas de refrigeración por absorción.

Tabla 6. Comparación del impacto ambiental, índice GWP y efecto sobre la capa de ozono de las configuraciones de los sistemas de refrigeración por compresión y absorción. Fuente: Refri-climas, 2023, Orozco, 2019, Pérez, 2021 y United for Efficiency, 2017.

Refrigerante	Impacto ambiental	GWP	ODP
LiBr/H ₂ O (absorción)	Bajo impacto ambiental, no emite gases de efecto invernadero	0	No afecta
Amoníaco (R-717) (absorción o compresión)	Bajo impacto ambiental, pero tóxico y corrosivo en caso de fugas	0	No afecta
Dióxido de carbono CO ₂ (R-744) (compresión)	Bajo impacto ambiental, aunque opera a alta presión	1	No afecta
Hidrocarburos (R-600a, R-290) (compresión)	Bajo impacto ambiental, pero son inflamables	~3	No afecta
HFC (R-134a, R-410A, R-404A) (compresión)	Alto impacto ambiental debido a su elevado GWP	1300-4000+	No afecta
HCFC (R-22) (compresión)	Alto impacto ambiental, con contribución al calentamiento global y afectación a la capa de ozono	~1810	Moderado impacto
CFC (R-12, R-11) (compresión)	Muy alto impacto ambiental, ya prohibidos en la mayoría de los países	>4000	Alto impacto

Desafíos y limitaciones de la refrigeración por absorción comparada con la compresión mecánica

El sistema de refrigeración por absorción muestra ventajas significativas hablando en ámbito ecológico y de operación, pero a su vez también enfrenta otros desafíos y limitaciones que hacen complicada su adopción masiva por encima del sistema de refrigeración por compresión mecánica. Estas limitaciones y desafíos serán analizados en los ámbitos más notables y los que más interesan a la hora de adoptar alguno de los dos sistemas su eficiencia energética, costos de instalación y mantenimiento y su fuente de energía.

Eficiencia energética

La eficiencia energética en los sistemas de refrigeración por absorción es relativamente baja en comparación con los sistemas de refrigeración por compresión de vapor, la cual es una de las desventajas principales que limita su uso en aplicaciones habitacionales, residenciales e industriales. Cabe mencionar que la eficiencia de un sistema de refrigeración se mide con el índice de coeficiente de rendimiento (COP), el cual se basa entre la relación que existe entre la cantidad de calor extraído y la energía suministrada. Para el caso de los sistemas de refrigeración por compresión, se pueden lograr COPs que van desde las 3 hasta las 6 unidades de calor que se extraen por cada unidad de energía eléctrica, mientras que en el sistema de refrigeración por absorción en su configuración más simple apenas logra ir de los 0.5 a 0.8, lo que demuestra una eficiencia considerablemente menor, y si bien en su configuración de triple efecto mejora considerablemente su eficiencia logrando unidades de 1.6 hasta 1.8 no es una mejora significativa ni comparable con el sistemas de refrigeración por compresión de vapor, sin mencionar que en esta configuración se pone en total desventaja en ámbitos de mantenimiento e instalación.

Se puede decir que en términos de eficiencia al sistema de refrigeración por absorción se encuentra en total desventaja, aunque si se logra trabajar en nuevos ciclos y tecnologías que optimicen el uso de calor y reduzcan las pérdidas energéticas, quizás en un futuro esta desventaja sea menor o desaparezca.

Costos de instalación y mantenimiento

Ahora hablando de otro ámbito vital a considerar a la hora de elegir el sistema de refrigeración oportuno, entre el sistema de refrigeración por compresión y el sistema de refrigeración por absorción, este último muestra desafíos y desventajas considerables cuando se le compara con el sistema de refrigeración por compresión, ya que al ser un sistema relativamente nuevo su mantenimiento es más complejo debido a la poca demanda hay pocos técnicos especializados y refacciones para este sistema suelen

ser escasas, además en su mantenimiento existe la necesidad de evitar cristalizaciones en las soluciones absorbentes y se tiene que garantizar la hermeticidad del sistema, y hablando de su costo de instalación se requiere una inversión inicial significativa, debido a que este sistema requiere de intercambiadores de calor más grandes, sistemas de tuberías adicionales, sin mencionar que tiene que ser de materiales resistentes a las sustancias químicas que este sistema utiliza como el amoníaco o el bromuro de litio. Si comparamos estos dos aspectos con el sistema de refrigeración por compresión este tiene una ventaja significativa, ya que este sistema gracias a su antigua funcionalidad como sistema de refrigeración predilecto hace que su mantenimiento sea más simple, además de contar con fácil acceso a refacciones y gran variedad de técnicos especializados, por lo tanto su mantenimiento es de menor costo, y hablando de su instalación los sistemas de refrigeración por compresión son más compactos, tienen un menor costo inicial y requieren de menos espacio, lo que lo hace convertirse un sistema más accesible para cualquier aplicación.

El sistema de refrigeración por absorción enfrenta grandes limitaciones en costos de instalación y mantenimiento, y su gran desafío es trabajar en desarrollar nuevos diseños más compactos, modulares y económicos, además de mejorar en la disponibilidad de técnicos especializados y acceso sencillo a refacciones para poder competir con los sistemas de refrigeración por compresión.

Fuente de energía

La fuente de energía de la cual se alimentan los sistemas de refrigeración para trabajar es uno de los factores diferenciadores vitales a tomar en cuenta entre el sistema de refrigeración por compresión y el sistema de refrigeración por absorción, si bien el sistema de refrigeración por compresión trabaja dependiendo totalmente de energía eléctrica la cual es de fácil acceso y facilita su operación los costos de su uso podrían representar gastos importantes si la tarifa eléctrica es elevada. Por otro lado, el sistema de refrigeración por absorción trabaja mediante una fuente de calor como lo es la energía solar, el calor residual producido o combustibles fósiles, esto le genera una ventaja en procesos donde se obtiene considerablemente calor residual o en zonas con difícil acceso a la energía eléctrica, a un que hay que tomar en cuenta que el rendimiento de este sistema depende y se ve afectado principalmente de la disponibilidad y estabilidad de la fuente de calor a utilizar lo que podría considerarse como su mayor limitante.

Si bien el sistema de refrigeración por absorción muestra en este ámbito ventajas considerables como lo son el bajo costo de su consumo energético, alternativas con

energías renovables y funcionabilidad en zonas donde hay un difícil acceso a la energía eléctrica, a un tiene como principal limitante su dependencia a la disponibilidad y estabilidad de su fuente de calor la cual puede afectar su rendimiento, sin mencionar que el acceso a la anergia eléctrica es más sencillo, su principal desafío es trabajar en la fomentación de integrar energías renovables y mejorar los sistemas de almacenamiento térmico esto le ayudara a superar este desafío operando de manera más estable y competitiva.

Innovaciones y nuevas configuraciones desarrolladas

Al presentar tanto ventajas como desventajas los sistemas de refrigeración se encuentran trabajando continuamente en la innovación de su tecnología precisamente en sus puntos que se encuentran en desventaja para poder competir, ya sea con el desarrollo de nuevas tecnologías, cambios en sus ciclos o nuevas configuraciones, los avances tecnológicos que han desarrollado han permitido la optimización de los sistemas de absorción y compresión, sin dejar atrás las configuraciones híbridas que fusionan lo mejor de ambos. Estas innovaciones están dirigidas principalmente a una mejora de eficiencia energética, la reducción de costos operativos y disminución del impacto ambiental según sea el caso.

Innovaciones y nuevas configuraciones en el sistema de refrigeración por absorción

Ante este panorama el sistema de refrigeración por absorción se encuentra trabajando arduamente en dar solución o presentar mejor en los aspectos que lo ponen en desventaja comentados anteriormente, en los últimos años este sistema se ha enfocado en desarrollar nuevas mezclas de refrigerantes y absorbentes como solución a los problemas principales, buscan que con el desarrollo de estas nuevas tecnologías se optimice la eficiencia energética, se reduzca la corrosión causada a los componentes y minimizar la cristalización, buscando que la aplicación de este sistema crezca exponencialmente. Tradicionalmente el sistema de refrigeración por absorción trabajaba con dos configuraciones principales: Amoniaco-Agua, la cual se utiliza principalmente en aplicaciones de bajas temperaturas y sistemas de carácter industrial, la otra es: Agua-Bromuro de litio la cual es común en sistemas de climatización y refrigeración de media temperatura. Estas mezclas primordiales mostraban desventajas en algunos aspectos principalmente la eficiencia lo cual llevo a desarrollar nuevas configuraciones en la búsqueda de solucionar o mitigar las desventajas.

Se desarrollaron nuevas mezclas derivadas de ellas por ejemplo del Amoniaco-Agua se desarrollaron dos derivaciones: Amoniaco-Dietiléter el cual representa ventajas significativas como una reducción en la presión de operación, lo que da pie a sistemas más compactos, una mejora de estabilidad térmica y reducción de la corrosión, su aplicación principal se encuentra en sistemas de refrigeración de transportes y equipos de bajo consumo energético, la otra derivación es una mezcla de: Amoniaco-Mezclas de sales liquidas, la cual permite operar a menores presiones, lo que reduce de manera significativa el desgaste de componentes, además de una disminución de la cristalización y corrosión de tuberías, al igual que se han investigado mezclas que involucran las sales de sodio y el potasio con la finalidad de mejorar la absorción del amoniaco. En la Tabla 7 se describen algunas características, ventajas y desventajas de los sistemas de refrigeración empleando Amoniaco-Agua y Amoniaco-Dietiléter.

Como se puede apreciar en la tabla, los rendimientos energéticos con la mezcla tradicional Amoniaco-Agua son ligeramente menores en comparación con aquellos obtenidos por las mezclas alternativas de Amoniaco-Dietiléter y Amoniaco-Mezclas de sales liquidas. Otra de las ventajas de las mezclas alternativas en comparación con la mezcla Amoniaco-Agua es que estas pueden operar con una menor presión, se reducen los problemas de corrosión y cristalización, aunque muchas de estas mezclas aún se encuentran en la fase de desarrollo.

Tabla 7. Comparación de la configuración Amoniaco-Agua con sus configuraciones innovadora. Fuente: Soto Parra, 2018 y Orozco, 2019.

Característica	Amoniaco-Agua	Amoniaco-Dietiléter	Amoniaco-Mezclas de sales liquidas
COP aproximado	0.6-1.2	0.8-1.4	0.7-1.3
Temperatura de operación (°C)	-60 a 5	-50 a 10	-50 a 10
Presión de trabajo	Alta (8-14 bar)	Media (6-10 bar)	Media (5-9 bar)
Ventajas	Alta capacidad de enfriamiento o he ideal para bajas temperaturas	Menor presión para operar y reduce corrosión y tamaño del equipo	Reduce cristalización y mejora la absorción del amoniaco
Desventajas	Altamente corrosivo con riesgo de toxicidad	Aún se encuentra en fase experimental, además	Complejidad para el manejo de las sales liquidas y

causada por el amoníaco	de requerir materiales resistentes al DME	posibles depósitos en tuberías.
-------------------------------	--	--

A un que también se han desarrollado nuevas configuraciones derivadas de la mezcla Agua-Bromuro de litio como lo son: el uso de Agua-Cloruro de litio la cual dicha configuración muestra una reducción de temperatura mínima de operación, lo que se traduce a una mejora en la eficiencia en climas cálidos, además que cuenta con una menor tendencia a la cristalización comparada con la que presentaba el bromuro de litio, su principal aplicación se encuentra en la refrigeración solar y los sistemas de aire acondicionado eficientes. De igual manera, se ha desarrollado otra configuración derivada del Agua-Bromuro de litio la cual se basa en: Agua-Mezclas de sales de Magnesio y Calcio la cual mejora la absorción del agua sin la necesidad de altas temperaturas de regeneración, si bien esta configuración aún se encuentra en fase experimental se está evaluando su aplicación en sistemas compactos de climatización para edificios. La comparativa entre algunas mezclas de trabajo se muestran en la Tabla 8.

La comparativa revela que la mezcla de Agua- sales de magnesio y calcio presenta un ligero incremento en el rendimiento energético en comparación con los sistemas de refrigeración por absorción operando con Agua-Bromuro de litio y Agua-Cloruro de litio, sin embargo, dicha mezcla presenta un mayor costo de producción y todavía se encuentra en la fase de experimentación.

Tabla 8. Comparación de la configuración Agua-Bromuro de litio con sus configuraciones innovadoras. Fuente: Salazar Massaro, 2019 y Romage, 2020.

Característica	Agua-Bromuro de litio	Agua-Cloruro de litio	Agua- sales de magnesio y calcio
COP aproximado	0.6-1.0	0.7-1.2	0.7-1.3
Temperatura de operación (°C)	5 a 120	5 a 110	10 a 120
Presión de trabajo	Baja (~0.01 bar)	Baja (~0.02 bar)	Baja (~0.02 bar)
Ventajas	No es toxico y es ampliamente utilizado en climatización	Menor tendencia a la cristalización y cuenta con mejor estabilidad térmica	Tiene una mayor capacidad de absorción del agua y es más estable

Desventajas	Cristalización en temperaturas bajas y es corrosivo	Requiere un mayor volumen de absorbente para una eficiencia optima	químicamente Tiene un costo de producción alto, se encuentra en pruebas de fase de optimización
-------------	---	--	---

Además de las innovaciones en configuraciones, de igual manera se ha buscado la innovación en nuevos enfoques que ayuden a combatir su principal desventaja que es la baja eficiencia comparada con el sistema de refrigeración por compresión. Además, se han desarrollada estrategias enfocadas en este problema como lo son el uso de absorbentes agregándoles nanopartículas metálicas como óxidos de cobre y aluminio a las soluciones de bromuro de litio lo que permitiría mejorar su transferencia de calor, además de utilizar sistemas de absorción en estado sólido, se han estado investigando en los últimos años materiales porosos y zeolitas que podrían trabajar como absorbentes alternativos para lograr una reducción en los tamaños de los equipos y lograr una mejora de la eficiencia térmica, por otro lado se quiere lograr una mejora en la estabilidad química lo que ha llevado a evaluar el uso de refrigerantes orgánicos como hidrocarburos fluorados en combinación con sales absorbentes para lograr este objetivo. La Tabla 9 muestra la comparativa de equipos de refrigeración por absorción que se encuentran aún en experimentación.

Tabla 9. Comparación de nuevas tecnologías aún en fase experimental. Fuente: Romage, 2020, Cortés, 2014 y Velázquez, 2023.

Característica	Absorbentes con nanopartículas	Sistemas de absorción de estado solido	Refrigerantes orgánicos
COP aproximado	1.0-1.5	1.2-1.8	0.9-1.4
Temperatura de operación (°C)	5 a 130	10 a 150	-40 a 20
Presión de trabajo	Baja (~0.02 bar)	Baja (~0.05 bar)	Media (3-7 bar)
Ventajas	Mejora la transferencia de calor y aumenta la eficiencia del ciclo	Equipos más compactos y reducción de cristalización	Buena estabilidad química y menor impacto ambiental

Desventajas	Requiere más estudios	ón y corrosión Requiere más estudios	Requiere más estudios
-------------	-----------------------	--	-----------------------

Innovaciones y nuevas configuraciones en el sistema de refrigeración por compresión mecánica

Por otro lado, el sistema de refrigeración por compresión si bien sigue siendo el sistema de refrigeración predilecto sigue trabajando en innovaciones que le permitan seguir teniendo este título, enfrentando las desventajas que presenta con el desarrollo de nuevas tecnologías y configuraciones.

Para combatir su impacto ambiental el cual es su mayor desventaja el sistema de refrigeración por compresión ha desarrollado nuevas configuraciones como ya se había comentado antes el uso de refrigerantes masa ecológicos como lo son los hidrofluoroolefinas (HFO), el CO₂(R-744) y el amoniaco (R-717) para lograr una reducción del potencial de calentamiento global medido por el índice GWP y eliminar el uso de sustancias que afectan la capa de ozono.

Además, este sistema ha estado desarrollando soluciones para combatir sus costos de operación y de consumo energético utilizando compresores de velocidad variable que permite regular el consumo de energía eléctrica según lo requiera la demanda térmica, lo cual mejora su eficiencia energética y reduce los costos de operación del sistema, al igual que está desarrollando la integración de energías renovables con la implementación de sistemas de compresión los cuales operan mediante el uso de energía eléctrica generada paneles solares o turbinas eólicas, lo que reduce su dependencia total a la energía eléctrica. La Tabla 10 se incluyen las características de algunos refrigerantes empleados en los equipos de refrigeración por compresión mecánica de vapor.

Como se puede apreciar en la tabla, los sistemas de refrigeración por compresión mecánica de vapor siguen utilizando fluidos que contienen un elevado índice de GWP, por lo que se siguen buscando refrigerantes alternativos que cumplan con la legislativa ambiental que ayuden a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. También se puede apreciar que los rendimientos energéticos de estos sistemas son mayores en comparación a los sistemas de refrigeración por compresión de vapor, siendo estos más empleados para aplicaciones domésticas, industriales y/o residenciales.

Tabla 10. Características de los refrigerantes. Fuente: Refri-climas, 2023, Orozco, 2019 y United for Efficiency, 2017.

Refrigerant e	GWP	CO P	Toxicida d	Inflamabl e
---------------	-----	------	------------	-------------

CO ₂ (R-744)	1(bajo impacto)	3.5-4.5	No toxico	No inflamabl e
Amoniaco (R-717)	0(sin impacto)	4.5-5.5	Toxico	No inflamabl e
HFO-1234yf	4(bajo)	3.0-4.0	Baja	Ligera
HFO-1234ze	6(bajo)	3.5-4.2	Baja	Ligera
HFO/HFC (R-513 A)	573 (moderado)	3.0-4.0	Baja	No inflamabl e
Propano (R-290)	3 (bajo)	3.8-4.5	Baja	Alta
Isobutano (R-600 a)	3 (bajo)	3.6-4.2	Baja	Alta

Innovaciones y nuevas configuraciones en el sistema de refrigeración híbrido (absorción/compresión)

Hablar de innovaciones en los sistemas de refrigeración es hablar sin duda de los sistemas de refrigeración híbridos (absorción/compresión) que emergen como una innovación prometedora que fusiona lo mejor de ambos ciclos, aunque si bien experimenta desventajas como sus costos de instalación y el gran tamaño de sus equipos, este sigue en busca de nuevas innovaciones que le permitan establecerse en el mercado como un sistema de refrigeración factible, ha estado trabajando en los últimos años en la una mejora de la recuperación del calor residual, el cual es residuo de procesos industriales y este sistema lo utiliza para disminuir el consumo de energía eléctrica, ha introducido el uso de energías renovables como lo son la energía solar o la biomasa, junto con el uso de refrigerantes ecológicos como el amoniaco y el CO₂ logrando reducir su impacto al calentamiento global que mide el índice GWP.

Este sistema ha desarrollado una configuración en cascada eficiente, que combina dos etapas de refrigeración, haciendo uso del sistema de absorción genera temperaturas intermedias, para que posteriormente un ciclo de compresión las reduzca a un más. Con esto se logra disminuir la carga del compresor y optimizar el consumo energético. De igual forma se ha estado desarrollando el uso de sensores IoT e inteligencia artificial que ayuda al sistema a ajustar de manera autónoma su funcionamiento dependiendo la demanda de refrigeración y la disponibilidad que se tenga de energía térmica, logrando de esta manera maximizar su rendimiento.

Estas innovaciones se están implementado en centros de datos, climatización urbana y procesos industriales, donde se busca tener una mayor eficiencia y a su vez sostenibilidad, aunque se deberá trabajar en buscar innovaciones que le permitan combatir sus altos costos

de instalación y mantenimiento, así como la optimización de sus equipos.

Conclusión

En conclusión el sistema de refrigeración por absorción surge como una alternativa sostenible para hacerle frente al sistema de refrigeración por compresión mecánica el cual por décadas ha sido el sistema de refrigeración predilecto, el sistema de refrigeración por absorción se destaca principalmente por tener la capacidad de trabajar haciendo uso de energías renovables como la energía solar y el calor residual producido logrando que el consumo eléctrico sea reducido y por consecuencia también el impacto ambiental ocasionado. Cabe mencionar que tiene ventajas significativas haciendo frente al sistema de refrigeración por compresión, su aplicación suele ser ventajosa en zonas donde se cuenta con acceso limitado a la energía eléctrica y en la industria donde se puede conseguir grandes cantidades de calor residual gratuito.

A pesar de estas ventajas este sistema se enfrenta también a muchas limitaciones y desafíos comparado con sistema de refrigeración por compresión como lo son la eficiencia que hasta el momento sus configuraciones desarrolladas quedan bastante lejos de otorgar la misma eficiencia que sistema de refrigeración por compresión, otra de ellas son los costos de instalación y mantenimiento donde el sistema de refrigeración por compresión al ser el sistema más longevo en utilizarse cuenta con ventajas significativas desde refacciones de fácil acceso y una cantidad considerable de técnicos especializados, además de que es un sistema compacto lo cual le da ventajas a la hora de instalarse, mientras que el sistema de refrigeración por absorción es todo lo contrario, otra limitación importante de mencionar es que el sistema de refrigeración por absorción necesita de vital importancia una fuente de calor estable. El sistema de refrigeración por absorción cuenta con un coeficiente de rendimiento (COP) muy limitado a la hora de competir con el sistema de compresión mecánica más aún, en instalaciones donde la eficiencia es un punto clave. En resumen, su baja eficiencia sus altos costos de instalación por las grandes dimensiones de sus equipos, su mantenimiento costoso y difícil hace que la adopción masiva de este sistema sea complicada.

A pesar de sus limitaciones y desafíos presentados con el sistema de refrigeración por compresión, los avances en diseño en los que actualmente se trabaja, su integración a la causa de utilización de energías renovables y optimización del ciclo térmico pueden llegar a mejorar su viabilidad en un futuro. Para lograr la fomentación de su adopción es de vital importancia enfocarse en trabajar en nuevos materiales, ciclos de

mayor eficiencia y quizás sistemas híbridos que combinen lo mejor de ambos sistemas los cuales ya hay en existencia, pero se tiene que trabajar en sus costos y optimización.

Finalmente, aunque el sistema de refrigeración por absorción aún presenta limitaciones para poder suplir al sistema de refrigeración por compresión de vapor, la función que tiene en el camino que conlleva la utilización de tecnologías más limpias y eficientes, no puede ser negado por lo que su exploración y desarrollo es de vital importancia para el futuro de los sistemas de refrigeración.

Referencias

- Arroyo, E. H., & Orozco, M. A. R. (2012). Análisis de las variables que inciden en el comportamiento de un refrigerador solar. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, 1(19), 50-54.
- Cervantes, M. (2015). Estudio comparativo de los ciclos de refrigeración por absorción y compresión. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, Eléctrica, Civil e Industrial (REIBCI)*, enero, 1-12.
- Cortés, G. I. (2014). Análisis energético del sistema de refrigeración por absorción regenerativo $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Henning, H., 2007, Solar assisted air conditioning of buildings – an overview. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 1734-1749.
- Herold, K. E., Radermacher, R., & Klein, S. A. (2016). *Absorption chillers and heat pumps*. CRC press.
- Mardones Barrientos, C. C. (2016). Comparación entre los ciclos de refrigeración por compresión de vapor y de absorción mediante la primera y segunda ley de la termodinámica [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile].
- Noriega-Sánchez, C. J., & Pérez-Rojas, E. E. (2011). Sistemas de refrigeración por adsorción como una alternativa para el uso de calor residual y energía solar. *Revista Ingenio*, 4(1), 1-5.
- Orozco Bedoya, D. A. (2019). Diseño de un sistema de refrigeración por absorción intermitente de amoníaco utilizando fuentes térmicas solares.
- Refri-climas. (2023). *Refrigeración por absorción: funcionamiento, aplicaciones*.
- 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.
- Salazar Massaro, M. I. (2020). Estudio de viabilidad de un sistema solar de refrigeración para la implementación en campamentos de extracción en la selva peruana.
- United for Efficiency (U4E). (2017). *Refrigeradores amigables con el ambiente y energéticamente eficientes: Guía política para regulaciones y normas técnicas*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- Velázquez Martí, B. (2023). *Sistemas de refrigeración por absorción (SRA)*.
- Ventas, R., Lecuona, A., Zacarías, A., & Venegas, M. (2010). Ammonia-lithium nitrate absorption chiller with an integrated low-pressure compression booster cycle for low driving temperatures. *Applied Thermal Engineering*, 30(11-12), 1351-1359.
- Vereda Ortiz, S. C. (2015). Eyector-absorbedor adiabático como potenciador de un ciclo híbrido para refrigeración por absorción basado en la disolución amoníaco-nitrato de litio (Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid). Descargado de www.uc3m.es.