

## Desarrollo de sistemas térmicos solares por absorción para la generación de enfriamiento en la región norte de México

Ángel Eduardo Peña Guerra<sup>1</sup>, Andrea Cerdán-Pasarán<sup>1</sup>, Shadai Lugo Loredo<sup>1</sup>, Sanal Kozhiparambil Chandran<sup>1</sup>, Javier Alejandro Hernández Magallanes<sup>1\*</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas, Av. Universidad s/n, Ciudad Universitaria, CP 66455, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

\*E-mail de autor responsable: [javier.hernandezmg@uanl.edu.mx](mailto:javier.hernandezmg@uanl.edu.mx)

Recibido 30 septiembre 2022, Aceptado 19 octubre 2022

### Resumen

Los sistemas térmicos por absorción (o bombas de calor) son ciclos termodinámicos que aprovechan una fuente térmica como recurso de activación para obtener diversos productos o servicios, tales como: enfriamiento, energía eléctrica o revalorización de calor. Para el presente trabajo se propone la simulación termodinámica de una bomba de calor para la producción de enfriamiento (enfocado en la climatización de espacios) mediante el aprovechamiento de la energía solar térmica en la zona norte de México. Como país, México está posicionado en una región que es considerada la más favorecida en recursos solares, donde se recibe diariamente, en promedio, 5.5 kWh/m<sup>2</sup>. El noroeste del país es la zona con mayor potencial, donde la radiación excede los 8 kWh/m<sup>2</sup> diarios en primavera y verano, alcanzando 2922 kWh/m<sup>2</sup> de forma anual. La modelación termodinámica se realizó mediante el software Engineering Equation Solver (EES) en donde se estableció una potencia de enfriamiento de 100 kW (capacidad para dar enfriamiento a un edificio), una temperatura de generación entre 120 y 150 °C (temperatura alcanzable con colectores solares de tubos evacuados), una temperatura de condensación entre 40 y 50 °C, y una temperatura de enfriamiento entre 10 y 17 °C. Las condiciones de operación establecidas representan, grosso modo, las condiciones térmicas de la zona norte de México. Al realizar la simulación se encontró que el valor máximo de COP alcanzado fue de 0.703. Además, se puede ver que el sistema puede operar en condiciones ambientales extremas. De esta forma, se puede concluir que los sistemas térmicos de absorción pueden ser una alternativa sustentable para aplicaciones de climatización de espacios en la zona norte de México.

**Palabras clave:** energía solar, enfriamiento, sistemas de absorción, colectores solares, sustentabilidad.

### 1. Introducción

En México, el suministro energético está dominado principalmente por el petróleo y el gas natural, donde el petróleo aporta casi la mitad del total energético demandado por una población de aproximadamente 127 millones de habitantes. Actualmente, México cuenta con un rápido crecimiento en su sector eléctrico, la demanda energética del país aumentó, en promedio, un 1.6% anual desde el 2000 [1]. El consumo energético ha ido en constante aumento principalmente en el sector industrial y residencial, tal como se puede ver en Figura 1. Estas razones son de enorme interés para buscar y promover alternativas energéticas más sustentables que también reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero.

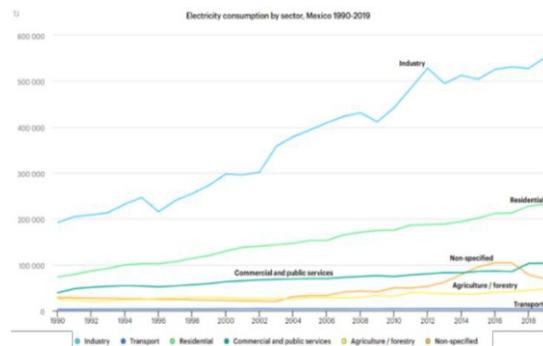


Figura 1. Consumo de electricidad por sector, México 1990-2019 [1].

Actualmente, el aporte energético de las energías renovables representa solo un 11.25% en la producción de energía primaria, mientras que los hidrocarburos suministran casi un 85% de este recurso (56.32% petróleo crudo, 25.67% gas natural y 2.83% carbón) [2]. La enorme dependencia hacia los combustibles fósiles ha derivado en grandes alteraciones en el clima por periodos largos de tiempo, dando lugar al cambio climático o el fenómeno de

lluvia ácida, que además de afectar la salud humana, también afecta a los bosques y ecosistemas acuáticos debido a la presencia de contaminantes como los óxidos de nitrógeno y de azufre [3]. Los registros de distintas organizaciones demuestran que las temperaturas extremas y las olas de calor en el mundo han aumentado en frecuencia y duración, trayendo consigo distintas afectaciones a la salud de la población.

El Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN), reporta en su Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2018 que las emisiones de gases de efecto invernadero totales pasaron de 445 a 683 megatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalente entre los años 1990 y 2015 respectivamente, representando un crecimiento del 53.6% a una tasa de crecimiento anual de 1.73%. Los sectores que tuvieron el mayor crecimiento en su volumen de emisión fueron los de residuos (265.8%), el de procesos industriales (65.9%) y el de energía (59.5%) [4]. Es importante empezar a desarrollar e implementar sistemas donde se implique la participación de energías renovables. Esto tiene como objetivo la disminución de la carga que tienen los combustibles fósiles en la generación de energía, y a su vez, se reduzcan las emisiones que afectan tanto a la humanidad.

## 2. Energía solar térmica en México

En México, la situación es similar que en el resto mundo, ya que el uso de energía en forma de calor representa alrededor del 33% del consumo final de energía en todo el país. Uno de los factores que contribuye a la rentabilidad de las tecnologías termosolares es la gran disponibilidad del recurso solar como tal, en contraste con países como Alemania que cuentan, en promedio, con la mitad del recurso solar a lo largo del año. México se encuentra entre 15 y 35° de latitud, región considerada como una de la más favorecidas en recurso solar, donde se recibe diariamente, en promedio, 5.5 kWh/m<sup>2</sup>. El noroeste del país es la zona con mayor potencial, donde la radiación excede los 8 kWh/m<sup>2</sup> en primavera y verano [5-6]. Sin embargo, los estados del centro del país, donde se encuentra la mayor demanda de calor para procesos industriales, cuentan con recurso solar suficiente para abastecer de manera adecuada los requerimientos de calor en la industria [5].

En la Figura 2 se muestra la distribución de la irradiación solar, claramente se observa que el noroeste del país es la zona con mayor potencial (la radiación alcanza 2922 kWh/m<sup>2</sup> de forma anual).



Figura 2. Mapa de recurso solar. Irradiación directa normal [7].

Las tecnologías derivadas de la energía solar térmica varían significativamente dependiendo de la región en la que se encuentre, estas se pueden distinguir por el tipo de colector solar utilizado, así como el tipo de funcionamiento del sistema (sistemas solares térmicos bombeados, sistemas termosifón) y el tipo principal de aplicación (calefacción de piscinas, preparación de agua caliente sanitaria, calefacción de espacios, calor para procesos industriales, calefacción solar urbana y refrigeración solar térmica) [8].

Existen diferentes tecnologías SHIP (Solar Heat for Industrial Process) que se pueden integrar en un sistema para satisfacer la demanda de calor, en la Figura 3 se muestran dichas tecnologías y el rango de temperaturas de aplicación. El funcionamiento de las primeras 3 tecnologías presentadas se basa en que los colectores están hechos con materiales que absorben la radiación del sol y suelen ser estacionarios, es decir, se colocan con un ángulo de inclinación fijo óptimo para recibir la mayor cantidad de radiación solar durante todo el año. Las otras tecnologías funcionan por concentración solar que consiste en reflejar la radiación hacia un “receptor” que es una superficie con un material absorbedor de energía (usualmente con forma de tubo) para generar calor a mayor temperatura. Este tipo de concentradores no son estacionarios, es decir, para su buen funcionamiento deben de contar con un sistema de seguimiento en uno o dos ejes para seguir con precisión al sol durante el día [5].

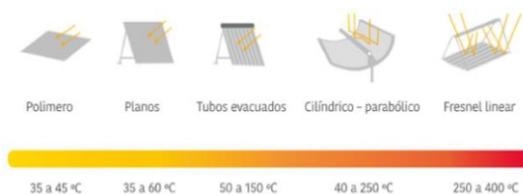


Figura 3. Tecnologías termosolares y rangos de temperaturas de operación [5].

La selección del tipo de tecnología depende en gran medida de los requerimientos térmicos del proceso. Sin embargo, además de la temperatura, los factores más importantes a tener en consideración son: el cumplimiento de los requisitos térmicos para el proceso industrial, el diseño apto para el fluido caloportador elegido, el peso adecuado de la instalación sobre el techo o tamaño adecuado para la instalación sobre el suelo, la variación del suministro y la demanda de energía, el precio de la tecnología, las opciones de almacenamiento y control, entre otras.

En 2018, al menos 104 empresas manufactureras tuvieron instalaciones de calor solar para procesos industriales (SHIP), elevando el total mundial en un 16%. Los mercados líderes en el número de nuevas instalaciones fueron México (51 sistemas), China (15), India (10) y Alemania (9) [9]. Sin embargo, debido al gran recurso solar presente en la región norte del país mexicano, se presentan condiciones ambientales y climáticas muy extremas.

Actualmente en México no se cuenta con un marco normativo específico para el diseño, instalación y puesta en marcha de proyectos solares térmicos aplicados en procesos industriales, sin embargo, ya existe experiencia documentada de la implementación de este tipo de proyectos. Una parte importante del costo total de los sistemas se concentra en la adquisición de los colectores solares, entre el 60% y 80% del costo total de la instalación. El resto de la inversión es atribuible a la tubería, intercambiadores de calor, bombas, planificación y diseño, así como instrumentos de control [10].

El consumo de energía aumentó 8% durante el período 1996-2014, debido al alto porcentaje de energía utilizada para la calefacción. De acuerdo con la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), el 30% del consumo de energía en los edificios es para fines de calefacción y refrigeración, muy por encima del consumo energético de los electrodomésticos y la iluminación. En términos generales, el clima en México es templado en el sur y extremo en el norte (muy frío durante el invierno y muy caliente durante los meses de verano) [11].

La energía que se destina al sector residencial tiene diferentes usos, sin embargo, los mayores consumos se

concentran en la refrigeración y climatización de espacios. En la Figura 4, se presenta con mayor detalle el consumo energético eléctrico proveniente del sector residencial [12].

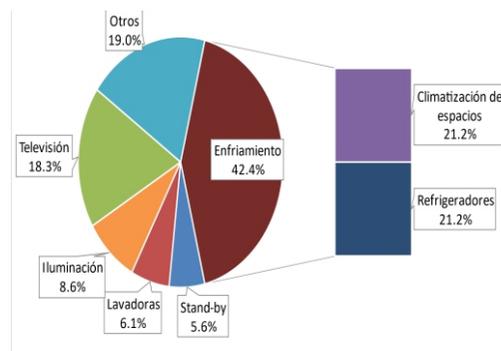


Figura 4. Distribución del consumo de energético por uso final en el sector residencial en 2015 [12].

Debido a la problemática descrita anteriormente, en la presente investigación se propone emplear un sistema de absorción que pueda aprovechar el recurso solar que existe en la zona norte del país mexicano, y a su vez, producir el efecto de refrigeración para la climatización de espacios. De esta manera, se plantea utilizar el recurso solar de manera sustentable para satisfacer la demanda de uno de los sectores que tienen elevado consumo energético e impacto ambiental. Para ello, se presenta una simulación termodinámica de una bomba de calor por absorción a distintas condiciones ambientales (representativas de las regiones extremas del norte del país) para garantizar las condiciones de operación necesarias del ciclo termodinámico.

### 3. Descripción del sistema

Los sistemas solares térmicos utilizan calor solar en lugar de electricidad para producir un efecto de refrigeración. Los colectores solares proporcionan calor al "compresor térmico" en una máquina de refrigeración accionada por calor. Los colectores evacuados se fabrican típicamente en un diseño de tubo de vidrio, es decir, un absorbente metálico insertado en un tubo de vidrio evacuado, para soportar la diferencia de presión entre el vacío y la atmósfera [13]. En la Figura 5 se presenta un diagrama ilustrativo del funcionamiento de la bomba de calor por absorción para la refrigeración de espacios.

En su configuración más simple, un sistema de absorción consiste en un evaporador, un condensador, un absorbedor, un generador, una solución como fluido de trabajo, una bomba y dos válvulas. En el generador se agrega el calor necesario (zona donde se suministra la fuente térmica solar) para separar el refrigerante de la

mezcla refrigerante-absorbente en una condición de alta presión y temperatura.

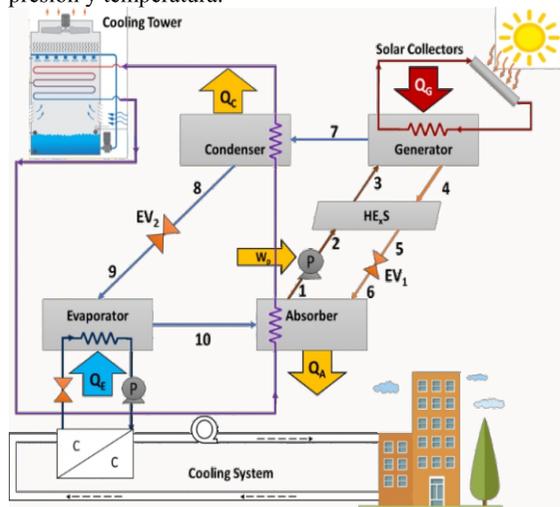


Figura 5. Diagrama de una bomba de calor aplicado para enfriamiento de espacios.

El vapor del refrigerante que se produce va al condensador donde se licua (la energía se disipa a través de la torre de enfriamiento). Posteriormente, pasa por la válvula de expansión donde sale como mezcla líquido-vapor a baja presión y temperatura. Enseguida, el refrigerante ingresa al evaporador en donde absorbe el calor de los productos o del espacio a enfriar produciendo el efecto de enfriamiento (en este componente se vincula la corriente de aire que se utilizará para el enfriamiento de espacios).

El vapor de refrigerante producido entra al absorbedor donde se mezcla con una solución que tiene baja concentración de refrigerante (proveniente del generador). Finalmente, la solución con alta concentración en refrigerante (producto del proceso de absorción) nuevamente es bombeada a la zona de alta presión y temperatura en el generador, donde se inicia nuevamente el ciclo [14].

Las dos principales mezclas de trabajo utilizadas en los sistemas de refrigeración por absorción solar son H<sub>2</sub>O–LiBr y NH<sub>3</sub>–H<sub>2</sub>O. En términos generales, la mezcla NH<sub>3</sub>–H<sub>2</sub>O se utiliza en sistemas para la refrigeración y en aplicaciones industriales, mientras que la mezcla H<sub>2</sub>O–LiBr es utilizada en sistemas que son más adecuados para fines de aire acondicionado [15]. Por lo mencionado anteriormente, se considera el uso de la mezcla H<sub>2</sub>O–LiBr como el fluido de trabajo en la simulación realizada.

#### 4. Metodología

Para realizar la simulación de la bomba de calor, se utilizó el Software Engineering Equation Solver (EES) [16] en donde se resuelven de manera simultánea los

balances de materia y energía de cada componente. A continuación, se muestra la metodología empleada para su estudio:

1. Desarrollo de balances de materia y energía de la bomba de calor
2. Desarrollo de código en EES (Ver Anexo)
3. Compilación de paquetería de la solución H<sub>2</sub>O–LiBr
4. Cálculo de parámetros de desempeño
5. Análisis paramétrico de variables

Para el caso de estudio, se busca suministrar una potencia de enfriamiento de 100 kW, potencia suficiente para poder refrigerar o acondicionar un edificio (aproximadamente de entre 20 y 25 habitaciones). Además, se suponen fuentes térmicas de entre 120 y 150 °C debido al rango de los colectores de tubo evacuados (ver Figura 3), temperaturas de sumidero características con las condiciones climáticas de la zona (entre 40 y 50 °C), y, por último, temperaturas de enfriamiento en el rango de 10 a 17 °C. Dentro de las consideraciones del modelado matemático se encuentran: el sistema opera en estado estacionario y en equilibrio termodinámico, se consideran despreciables las caídas de presión en los componentes (exceptuando las válvulas de expansión), los procesos en las válvulas de expansión se consideran isoentálpicos, se considera que el refrigerante (Agua) se encuentra en condiciones de saturación a la salida del evaporador y del condensador, las pérdidas térmicas del sistema son despreciables, finalmente, el economizador posee una eficiencia térmica de 0.64 [17].

El parámetro energético del sistema de enfriamiento por absorción se define como el Coeficiente de Desempeño o COP (Coefficient of Performance) el cual corresponde a la siguiente ecuación:

$$\text{COP} = \frac{Q_E}{Q_G + W_P} \quad (1)$$

A continuación, se presenta como se conforman los demás términos que componen la ecuación anterior:

Potencia térmica del generador:

$$\dot{Q}_G = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_3 h_3 \quad (2)$$

Potencia térmica del evaporador/enfriamiento:

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_9 (h_{10} - h_9) \quad (3)$$

Potencia térmica del absorbedor:

$$\dot{Q}_A = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_1 h_1 \quad (4)$$

Potencia térmica del condensador:

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_7 (h_8 - h_7) \quad (5)$$

Trabajo específico de la bomba:

$$W_B = h_2 - h_1 \quad (6)$$

Potencia de bomba:

$$\dot{W}_P = \dot{m}_1 W_B \quad (7)$$

### 5. Análisis de resultados

En la presente sección se muestran los resultados más sobresalientes de la simulación para el caso de estudio propuesto en donde se analiza el COP del sistema de absorción para diferentes condiciones de operación. El análisis paramétrico consiste en analizar las temperaturas fuente (energía solar captada por los colectores de tubo evacuado), las temperaturas de refrigeración (temperaturas obtenidas para el enfriamiento de espacios) y finalmente, ver el comportamiento del sistema respecto a la temperatura de sumidero (nivel energético ambiental para disipar energía).

En las Figuras 6-9 se muestra la variación del COP del sistema de absorción en función de las temperaturas de sumidero, las temperaturas de suministro en los colectores solares y las demandas frigoríficas.

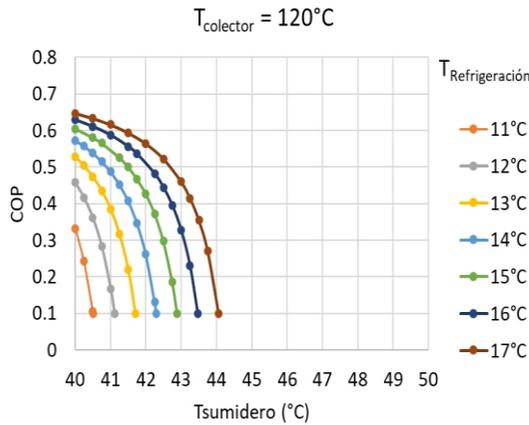


Figura 6. Variación del coeficiente de desempeño COP para una temperatura fuente de 120 °C

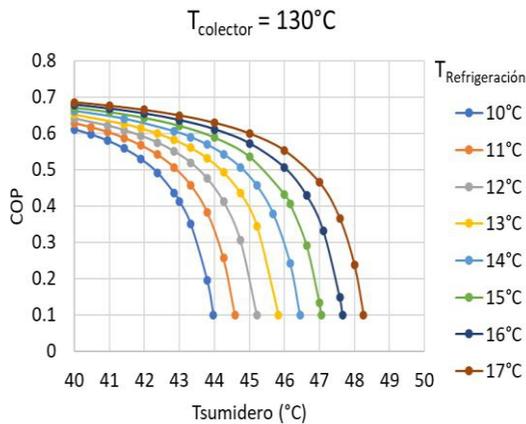


Figura 7. Variación del coeficiente de desempeño COP para una temperatura fuente de 130 °C

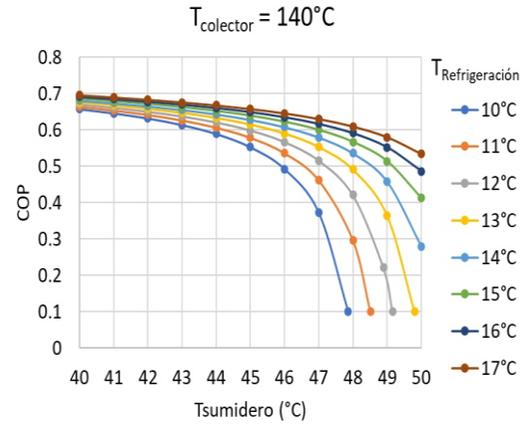


Figura 8. Variación del coeficiente de desempeño COP para una temperatura fuente de 140 °C

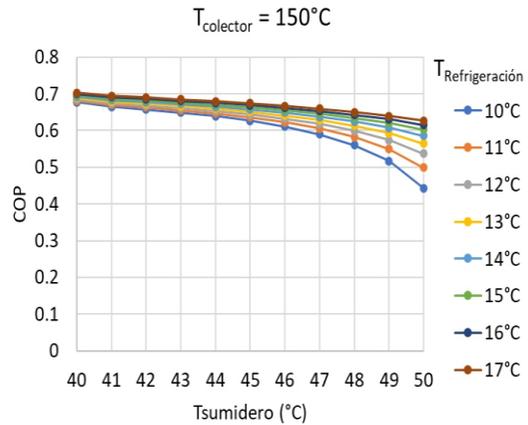


Figura 9. Variación del coeficiente de desempeño COP para una temperatura fuente de 150 °C

En las Figuras 6-9, se puede apreciar diversos comportamientos del sistema de absorción en función de las variables de operación.

En primer lugar, el COP del sistema es inversamente proporcional a mayores temperaturas del sumidero. Este comportamiento es de esperarse debido a que el sistema tiene la capacidad de retirar una menor cantidad de calor en el absorbedor y condensador, ambas a altas temperaturas. Además, es importante resaltar que cuando se tienen bajas temperaturas en los colectores solares, el sistema de absorción presenta un menor rango de operación cuando se incrementa la temperatura de sumidero. Por ejemplo, para una  $T_{colector}$  de 120 °C (Fig. 6), el sistema de absorción no puede operar por encima de 44 °C en el sumidero, lo que pudiera suponer una operación limitada del sistema de absorción en regiones con condiciones ambientales extremas.

Para una  $T_{colector}$  de 130 °C (Fig. 7), el sistema de absorción presenta un mayor rango de operación,

alcanzando temperaturas de sumidero máximas de hasta 48.3 °C. Finalmente, para temperaturas de 140 y 150 °C (Fig. 8, 9) en los colectores solares, el sistema de absorción puede operar fácilmente a 50 °C en el sumidero. El incremento en los rangos de operación y COP se deben principalmente a que, al aumentar la temperatura fuente dentro del generador, se produce una mayor cantidad de refrigerante. Por lo tanto, el sistema de absorción tiene la capacidad de remover una mayor cantidad de calor del espacio que se pretende acondicionar. Mayores temperaturas de refrigeración incrementan el COP, debido a que se requiere una menor potencia de enfriamiento a temperaturas mayores.

Más allá de la eficiencia que ofrece la metodología presentada, es de resaltar el alcance energético y el enorme potencial de aprovechamiento que se tiene para recurso solar en la región norte de México. Además, los sistemas de absorción presentan una gran oportunidad de desarrollo debido a su enorme versatilidad de operación incluyendo condiciones ambientales extremas. Por lo tanto, es importante desarrollar sistemas energéticos que se puedan implementar en regiones donde se tenga elevada cantidad de recurso solar y que beneficien el sector energético a través de sistemas más amigables con el medio ambiente.

## 6. Conclusiones

Partiendo de la problemática energética y ambiental en la que nos encontramos en México y en el mundo, es importante promover alternativas que utilicen recursos renovables para satisfacer nuestras necesidades de manera más amigable con el medio ambiente. Particularmente, la refrigeración y climatización de espacios representan alrededor del 42% del consumo energético en el sector residencial. La enorme necesidad hacia los servicios del frío se debe principalmente a las condiciones climatológicas extremas en las zonas norte del país. Estas características obligan a la búsqueda e implementación de tecnologías alternativas que ofrezcan el mismo servicio, sin minimizar la calidad de vida y representando una gran oportunidad de disminuir el impacto ambiental.

El desarrollo de esta investigación consiste en aprovechar el gran recurso solar que incide en la región norte de México y demostrar la funcionalidad de una bomba de calor Tipo I para dar enfriamiento a un edificio, así como determinar las condiciones de operación que favorecen el rendimiento del sistema.

Mediante la simulación termodinámica se encontró que a mayores temperaturas de sumidero (condiciones extremas de operación para el sistema de absorción), el coeficiente de desempeño es inversamente proporcional. Estas características sugieren que el sistema de absorción sea alimentado con temperaturas de suministro mayores a

140 °C. Mayores temperaturas de colector permiten al sistema operar en un mayor rango de temperaturas de sumidero. Sin embargo, los costos de la tecnología solar también se incrementan.

El valor máximo de COP que alcanzó el sistema de absorción es de 0.703, este valor se logró en condiciones de operación con una temperatura fuente de 150 °C, una temperatura de sumidero de 40 °C y una temperatura de refrigeración de 17 °C.

Aunado a lo anterior, a partir de temperaturas fuente de 140 °C el sistema de absorción puede operar con temperaturas de enfriamiento entre 10 y 17 °C y hasta 50 °C en temperaturas de sumidero. Esto garantiza que el sistema sea capaz de operar en condiciones ambientales extremas (y pudiera ser empleado en el sistema de condensación agua o aire), como, por ejemplo, en las zonas norte de México. Las temperaturas de suministro de 140 y 150 °C se pueden obtener fácilmente con tecnología solar de tubos evacuados o sistemas de concentración.

Se puede concluir que los sistemas solares térmicos de absorción pueden ser una alternativa sustentable para aplicaciones de refrigeración y climatización de espacios en la zona norte de México.

## 8. Referencias:

- [1] International Energy Agency. Mexico - Countries & Regions. IEA. <https://www.iea.org/countries/mexico> (accesado el 22 de julio de 2022)
- [2] SENER. Balance Nacional de Energía 2020. Gobierno de México. 2021.
- [3] IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. 2007.
- [4] Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Natural. Informe de la situación del medio ambiente en México- Capítulo 5 Atmosfera. Gobierno de México. 2022.
- [5] Sánchez, I., Torres, R. Calor solar para procesos industriales: estudio de potencial en la industria de conservas alimenticias en México. Cámara Nacional de la Industria de Conservas Alimenticias. 2020.
- [6] Nava-Velázquez, Y.; Hernández-Magallanes, J. A. Simulación termodinámica de un sistema de absorción modificado para la generación de energía. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Nuevo León. 2019.
- [7] Solargis. Mapas de recursos solares de México - Direct Normal Irradiation. <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/mexico> (accesado el 22 de julio de 2022)
- [8] International Energy Agency. Solar Heat Worldwide 2021. 2021.

- [9] REN21. Renewables 2019 Global Status Report. 2019.
- [10] SENER. Energía solar térmica para procesos industriales en México - Estudio base de mercado. 2018
- [11] Heinrich-Böll-Stiftung.  
<https://mx.boell.org/es/2016/10/08/es-tiempo-de-reducir-el-consumo-energetico-de-los-edificios-en-mexico> (accesado el 22 de julio de 2022)
- [12] CEPAL. Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de México, 2018.
- [13] Kima, D. S.; Infante-Ferreira, C. A. Solar refrigeration options – a state-of-the-art review. *International Journal of Refrigeration*. 2008, 3, 3–15.
- [14] Best, R.; Rivera, W. A review of thermal cooling systems. *Applied Thermal Engineering*. 2015, 75, 1162-1175.
- [15] Fan, Y.; Luo, L.; Souyri, B. Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2007, 11, 1758-1775.
- [16] Klein SA. Engineering equation solver (EES). Published online 2021.
- [17] Hernández Magallanes, J.A. Desarrollo y evaluación de un sistema de enfriamiento solar tipo vertical operando con la mezcla nitrato de litio-amoniaco. Doctoral tesis. Universidad Nacional Autónoma de México, 2017.  
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/88498>  
(accesado el 1 de Julio de 2022)