

# DESTILACIÓN POR MEMBRANA Y SU POTENCIAL APLICACIÓN EN SISTEMAS SOLARES DE ENFRIAMIENTO POR ABSORCIÓN INTERMITENTES

Jonathan Ibarra-Bahena a, Ulises Dehesa-Carrasco b, Yuridiana Rocio Galindo-Luna c, Eduardo Venegas-Reyes b, Wilfrido Rivera Gómez-Franco a, Esmeralda Cervantes-Rendón d y Luis Ernesto Cervera-Gómez e

a Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco S/N, Colonia Centro, Temixco, Morelos, 62580, México. [jibarra@ier.unam.mx](mailto:jibarra@ier.unam.mx)

b Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, 62550, México.

c Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. San Rafael Atlixco 186, Iztapalapa, CDMX, 09340, México.

d El Colegio de Chihuahua, Partido Díaz 4723, Colonia Progresista, Cd Juárez, Chihuahua, 32310, México.

## RESUMEN

La tecnología de enfriamiento por absorción puede utilizar fuentes de calor de provenientes de energías renovables (solar, biomasa o geotermia) o calor de desecho industrial para su funcionamiento. Una etapa dentro de la operación de estos equipos es la desorción, que consiste en la separación del fluido refrigerante de la solución de trabajo. Cuando se utilizan soluciones salinas, este proceso ocurre por ebullición a presiones reducidas en intercambiadores de calor. Una alternativa al proceso convencional de desorción por ebullición es la destilación por membrana. En el presente trabajo se presenta una evaluación experimental de un módulo de membrana que funciona como desorbedor y condensador.

Se utilizó la mezcla LiBr/H<sub>2</sub>O (Bromuro de litio/agua) al 49.7% peso/peso, a una temperatura de 90.2±0.1°C y 3 temperaturas de condensación (45.1±0.1°C, 40.1±0.1°C y 35. ±0.1°C). Se cuantificó la cantidad de fluido refrigerante (agua) que se produjo después de un periodo de operación de 3.5 horas. La cantidad más alta de fluido refrigerante producido fue 6.8 kg, asumiendo 1 m<sup>2</sup> de superficie de membrana. Con los datos de la evaluación del desorbedor se dimensionó un sistema solar de 6 colectores con 24.9 m<sup>2</sup> de área total con un termotanque de 1500 litros. Las temperaturas calculadas del evaporador del sistema de enfriamiento por absorción intermitente fueron 22.0, 18.0 y 14.0 °C, para cada temperatura de condensación, respectivamente. Estas temperaturas calculadas tienen el potencial de aplicación para la conservación de alimentos y/o acondicionamiento térmico de espacios.

## PALABRAS CLAVE

desorbedor; membranas; energía solar; sistema intermitente.

Revista Energías Renovables, Año 10 Núm.52, Ene-Jun 2024  
Certificado de reserva al uso exclusivo del Título:  
No. 04-2014-101414142700-203 PUBLICACIÓN TRIMESTRAL  
Registro ISSN: 2395-930  
DOI: 10.59730/rev.v11n52a4

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de aire acondicionado por compresión de vapor representan el 40% del consumo de energía primaria, lo cual genera el 24% de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector residencial [1]. Ante esta problemática, la investigación sobre alternativas energéticamente sostenibles para la producción de frío y acondicionamiento térmico de espacios se ha convertido en un tema relevante. Entre las diferentes soluciones, los sistemas de enfriamiento por absorción solar representan una alternativa atractiva, ya que la demanda de enfriamiento que ocurre generalmente en verano está asociada con una alta radiación solar, por lo tanto, ofrece la oportunidad de utilizar tecnologías solares para su funcionamiento [2]. El acoplamiento de una tecnología solar térmica y un sistema de enfriamiento por absorción depende principalmente de la temperatura del desorbedor (también llamado generador), ya que en este componente se suministra energía térmica, desde el sistema solar, para separar parte del fluido refrigerante de la mezcla de trabajo (compuesta por un refrigerante y un absorbente), este proceso es llamado "desorción" [3].

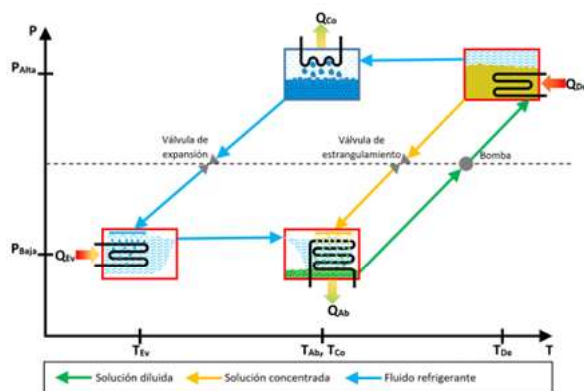
Esta es una limitación importante para la aplicación de energía solar térmica, porque el proceso de desorción por ebullición convencional requiere un flujo de calor constante al desorbedor y, para los sistemas de enfriamiento por absorción que usan agua como fluido refrigerante, se requieren condiciones de presión de vacío para separar el fluido refrigerante de la mezcla de trabajo a los niveles térmicos proporcionados por los colectores solares. Una alternativa a la desorción por ebullición es el proceso de destilación por membrana, en el cual, el componente volátil se separa, en fase de vapor, de una solución acuosa a una temperatura más baja que el punto de ebullición de la mezcla líquida. Por lo tanto, la integración de fuentes de energía térmica renovables para llevar a cabo el proceso de desorción, mediante el proceso de destilación por membranas, muestra un gran potencial para su aplicación en sistemas de enfriamiento por absorción.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar un desorbedor con la configuración de destilación por membrana con espacio de aire (AGMD, por las siglas en inglés de Air Gap Membrane Distillation) para demostrar el potencial del dispositivo para reemplazar a un desorbedor convencional en un sistema de enfriamiento por absorción intermitente que utiliza energía solar como fuente térmica.

### 2.1 Ciclo de enfriamiento por absorción

En un ciclo de enfriamiento por absorción existen al menos los siguientes componentes: un desorbedor, un condensador, un evaporador, un absorbedor, una bomba, una válvula de expansión y una válvula de estrangulamiento; y utiliza una mezcla líquida conformada por un fluido refrigerante y un absorbente. El es como se describe a continuación: Se suministra una cantidad de calor constante al desorbedor hasta alcanzar la temperatura de ebullición de la mezcla, de esta manera una parte del fluido refrigerante es vaporizado; este proceso es conocido como desorción y ocurre a la temperatura y presión más altas del ciclo. El vapor del fluido refrigerante es dirigido al condensador donde cede su calor latente de vaporización al ambiente y así cambia a fase líquida.

El fluido refrigerante líquido pasa a través de una válvula de expansión la cual divide el ciclo en dos zonas de presión. Posteriormente se evapora en el evaporador a la presión más baja del ciclo. Para este cambio de fase, el fluido refrigerante toma energía en forma de calor del ambiente y, de esta manera, produce un efecto de enfriamiento. El vapor del fluido refrigerante es llevado hacia el absorbedor donde se pone en contacto con la solución concentrada en absorbente proveniente del desorbedor. Este proceso se conoce como absorción y es exotérmico, lo que significa que libera una cantidad de calor al ambiente. La solución resultante, ahora diluida en absorbente, es bombeada al desorbedor para iniciar el ciclo nuevamente (Figura 1). Una de las mezclas más utilizadas en estos dispositivos es LiBr/H<sub>2</sub>O (Bromuro de litio/agua), la cual fue considerada para este estudio.

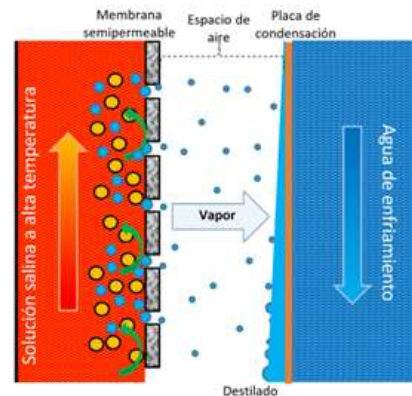


**Figura 1. Diagrama Presión-Temperatura de un ciclo de enfriamiento por absorción.**

### 2.2 Destilación por membrana

La destilación por membrana es un proceso de separación térmica en el que solo el vapor de agua (u otras moléculas volátiles) atraviesa una membrana porosa e hidrófoba. Una cantidad de agua se evapora en la interfase líquido-membrana en el lado caliente, pasa a través de la membrana porosa y se condensa en el lado frío. La diferencia de temperatura entre ambos lados de la membrana genera una diferencia de presión parcial; esta es la fuerza impulsora de la transferencia de masa. La función de la membrana es mantener la interfase vapor-líquido creado en ambos lados y, debido a su naturaleza hidrófoba, solo el vapor de agua la atraviesa [4]. En la configuración de destilación de membrana con espacio de aire (AGMD), una capa de aire estancado separa la membrana y la superficie de condensación.

Las principales ventajas de esta configuración son: las temperaturas de operación son más bajas que la temperatura de ebullición de la mezcla líquida funciona a presión atmosférica y los dispositivos son más compactos. La Figura 2 muestra un diagrama esquemático de un módulo con la configuración AGMD.

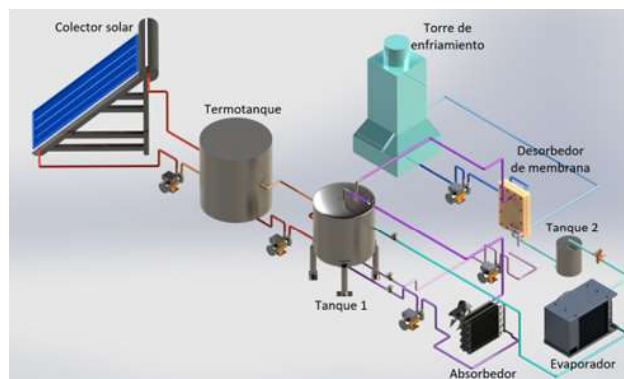


**Figura 2. Diagrama esquemático de la destilación por membrana con espacio de aire (AGMD).**

### 2.3 Sistema de enfriamiento por absorción intermitente

En un sistema de enfriamiento por absorción intermitente, los procesos de desorción/condensación y evaporación/absorción se llevan a cabo por separado en momentos diferentes. La operación se considera de la siguiente manera: La mezcla de LiBr/H<sub>2</sub>O con baja concentración de LiBr (Tanque 1) se calienta a la temperatura de operación mediante la energía captada por los colectores solares y almacenada en el termotanque. Una vez que la mezcla de LiBr/H<sub>2</sub>O alcanza la temperatura específica, inicia el proceso de desorción en el desorbedor de membrana. La solución se recircula, de tal manera que la concentración de LiBr aumenta con el tiempo. Con una torre de enfriamiento se extrae la carga de calor del condensador (integrado en el desorbedor de membrana). El agua destilada (fluido refrigerante) producida por el desorbedor se acumula en el Tanque 2. La solución concentrada de LiBr se acumula en el Tanque 1 y se enfría mediante un radiador antes de que comience el proceso de absorción. Una vez que se ha almacenado una cantidad suficiente de fluido refrigerante en el Tanque 2, se pasa a través de la válvula de expansión reduciendo su presión y temperatura.

En estas condiciones, el fluido refrigerante ingresa al evaporador, produciendo el efecto de enfriamiento. El vapor proveniente del evaporador es absorbido por la solución concentrada de LiBr (previamente enfriada) en el Tanque 1, y la carga de calor entregada por el proceso de absorción es removida por el radiador. Cuando finaliza el proceso de absorción, la solución de LiBr diluida se calienta con la energía térmica suministrada por los colectores solares, iniciando un nuevo ciclo de operación. La Figura 3 muestra un diagrama del sistema propuesto.



**Figura 3. Diagrama esquemático del sistema de enfriamiento por absorción intermitente propuesto.**

### 3.1 Evaluación experimental del desorbedor

El desorbedor de membrana utilizado tenía 144 cm<sup>2</sup> de área efectiva de transferencia de calor y masa. Se evaluaron diferentes condiciones de operación, las cuales se enlistan en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones experimentales evaluadas.

Variable	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Concentración inicial de LiBr (% peso/peso)	49.73 ± 0.03		
Flujo másico de la solución de H <sub>2</sub> O/LiBr (kg/s)	3.50×10 <sup>-2</sup> ± 5.00×10 <sup>-5</sup>		
Temperatura de la solución de H <sub>2</sub> O/LiBr (°C)	90.2 ± 0.1		
Flujo másico del agua de enfriamiento (kg/s)	3.07×10 <sup>-2</sup> ± 6.70×10 <sup>-4</sup>		
Temperatura de condensación (°C)	45.1 ± 0.1	40.1 ± 0.1	35.1 ± 0.1

### 3.2 Sistema solar térmico

Para el dimensionamiento del sistema solar térmico se usó la metodología reportada por Venegas-Reyes et al. [5]. En la Tabla 2 se muestran las características del colector de tubos evacuados marca Apricus Modelo AP-30 el cual se consideró para el presente estudio.

Tabla 2. Características del colector solar

Tipo	Tubos evacuados
Area	4.158 m <sup>2</sup>
η <sub>oFR</sub>	0.458
ULFR	1.579

Los datos meteorológicos (radiación, temperatura ambiente, viento etc.) para un año típico utilizados pertenecen al municipio de Ciudad Juárez, Chihuahua, debido a que durante el verano pueden alcanzar temperaturas de hasta 46°C [6], por lo que el sistema propuesto está pensando para operar en esas condiciones.

## 4. RESULTADOS

El desorbedor de membrana operó durante un periodo 210 minutos (3.5 horas). Se cuantificó la cantidad de fluido refrigerante producido, así como el incremento de la concentración de LiBr. Se produjeron 4.5, 5.9 y 6.8 kg/m<sup>2</sup> con las temperaturas de condensación de 45.1°C, 40.1°C y 35.1°C, respectivamente. Como se aprecia en la Figura 4, la cantidad de fluido refrigerante producido (agua destilada) aumenta al disminuir la temperatura de condensación.

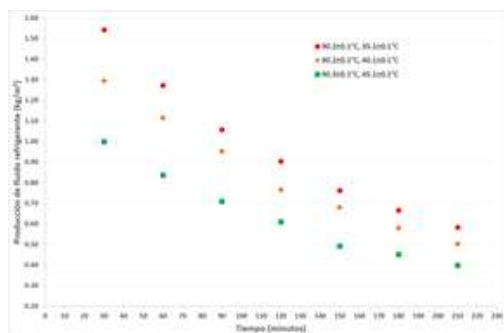


Figura 4. Producción de fluido refrigerante

Como se comentó en la Sección 2.2, la destilación por membranas es un proceso de separación térmico, y la fuerza impulsora es la diferencia de presión parcial, la cual está relacionada con la diferencia de temperatura entre ambos lados de la membrana; por lo tanto, la disminución de la temperatura de condensación disminuye la presión parcial del vapor de agua en el lado frío lo que aumenta la transferencia de masa de vapor de agua.

La concentración final de LiBr en la solución fue de 53.19%, 53.67% y 54.34% (peso/peso), para cada una de las temperaturas de condensación, respectivamente. De acuerdo con la Figura 5, al igual que con la cantidad de fluido refrigerante, la concentración de LiBr aumenta al disminuir la temperatura de condensación.



Figura 5. Aumento de la concentración de LiBr en la mezcla.

Como se mencionó en la sección 2.3, el sistema propuesto opera de manera intermitente: la temperatura del tanque de almacenamiento aumenta a medida que aumenta la radiación solar. Al mismo tiempo, la temperatura de la solución LiBr/H<sub>2</sub>O (en el Tanque 1) también aumenta, hasta la temperatura de operación. Cuando se alcanza esta condición, comienza el proceso de desorción. El sistema solar proporcionaría suficiente energía térmica para mantener constante la temperatura de desorción. Cuando se requiere el efecto de enfriamiento (en este estudio se consideró un horario 12:00 pm a 15:30 pm), se inicia el proceso de absorción el cual se asume que se lleva a cabo de manera adiabática. Con esta consideración, se calcularon las temperaturas del evaporador (TEv). En la Tabla 3 se muestran las posibles condiciones de operación del sistema de enfriamiento por absorción intermitente solar. El Coeficiente de Operación (COP) se definió como la razón entre la energía total proporcionada por el evaporador (EEv) y la energía requerida para el proceso de desorción (EDes) durante un periodo de tiempo definido (3.5 horas).

Tabla 3. Condiciones calculadas del sistema de enfriamiento por absorción intermitente.

T <sub>con</sub> (°C)	Cantidad de fluido refrigerante (kg/m <sup>2</sup> )	T <sub>Ev</sub> (°C)	E <sub>Ev</sub> (kJ)	E <sub>Des</sub> (kJ)	COP (–)
45.1	4.5	22	1.10×10 <sup>4</sup>	1.25×10 <sup>5</sup>	0.09
40.1	5.9	18	1.45×10 <sup>4</sup>	1.16×10 <sup>5</sup>	0.13
35.1	6.8	14	1.68×10 <sup>4</sup>	1.08×10 <sup>5</sup>	0.16

## 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizó un sistema de enfriamiento por absorción intermitente que incluye desorbedor de membrana, el cual usa como fuente de energía térmica un sistema de colectores solares. De acuerdo con la evaluación experimental del desorbedor de membrana, después de 3.5 h de funcionamiento y con una temperatura constante de la solución de LiBr/H<sub>2</sub>O de 90.1°C, la cantidad total de refrigerante producido fue de 4.5, 5.8 y 6.9 kg/m<sup>2</sup> con temperaturas de condensación de 45.1, 40.1 y 35.1 °C, respectivamente.

Para dimensionar el sistema de energía solar se tomaron en cuenta las condiciones ambientales de Ciudad Juárez, Chihuahua. El sistema solar calculado consta de un termotanque 1500 litros, y 6 colectores con 24.9 m<sup>2</sup> de área total. Las temperaturas calculadas del evaporador del sistema de enfriamiento por absorción intermitente fueron 22.0, 18.0 y 14.0 °C, para cada temperatura de condensación, respectivamente. Estas temperaturas calculadas tienen el potencial de aplicación para la conservación de alimentos y/o acondicionamiento térmico de espacios. El COP calculado fue de 0.09, 0.13 y 0.16 para cada temperatura de condensación, respectivamente. El sistema de enfriamiento por absorción intermitente solar propuesto muestra un gran potencial de aplicación en regiones con climas donde las temperaturas ambientales llegan hasta los 45°C.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto PAPIIT-UNAM IT102224, por el apoyo para este trabajo. Jonathan Ibarra-Bahena agradece al CONAHCYT por la beca posdoctoral otorgada a través del programa "Estancias Posdoctorales por México para la Formación y Consolidación de las y los Investigadores por México".

### Referencias

- [1] Boyaghchi F. A., Heidarnjad P. Thermoeconomic assessment and multi objective optimization of a solar micro CCHP based on Organic Rankine Cycle for domestic application. *Energ. Convers. Manage.* 97 (2015) 224-234.
- [2] Balaras C. A., Grossman G., Henning H. M., Infante Ferreira C. A., Podesser E., Wang L., Wiemken E. Solar air conditioning in Europe—an overview. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 11 (2007) 299-314.
- [3] Xu Z. Y., Wang R. Z., Solar-powered absorption cooling systems. In *Advances in Solar Heating and Cooling*, Ed., R. Z. Wang and T. S. Ge, Capítulo 11, pp. 251-298, Woodhead Publishing, 2016.
- [4] Izquierdo-Gil M. A., García-Payo M. C., Fernández-Pineda C. Air gap membrane distillation of sucrose aqueous solutions. *J. Membr. Sci.* 155 (1999) 291-307.
- [5] Venegas-Reyes E., Ortega-Avila N., Rodríguez-Muñoz N. A., Nájera-Trejo M., Martín-Domínguez I. R., Ibarra-Bahena, J. Parametric methodology to optimize the sizing of solar collector fields in series-parallel arrays. *Processes* 7 (2019) 294.
- [6] Salas-Esparza, M. G., Herrera-Sosa, L. C. La vegetación como sistema de control para las Islas de Calor Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Hábitat Sustentable* 7 (2017) 14-23.