



SIMULACIÓN DE SISTEMA DE REFRIGERACIÓN SOLAR POR ABSORCIÓN DE SIMPLE EFECTO USANDO BROMURO DE LITIO-AGUA

Simulation of single-stage solar absorption refrigeration system using water-lithium bromide

Juan Manuel García Guendulain^{1*}, América Eileen Mendoza Rojas²,
José Manuel Riesco Ávila¹

¹División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca,
Universidad de Guanajuato, Carretera Salamanca-Valle de Santiago km
3.5+1.8 Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, 36885 Guanajuato, México

²División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las campanas S/N, Santiago
de Querétaro, Querétaro, 76010, México.

*Autor de correspondencia
jm.garciaguendulain@ugto.mx

RESUMEN

En el presente trabajo se ha desarrollado un análisis y simulación de un sistema de refrigeración por absorción operado con mezcla de bromuro de litio-agua (LiBr-H₂O), y a través de una fuente de energía solar. Una verificación del modelo desarrollado en el software computacional EES (Engineering Equation Solver) para la estimación de las propiedades de la mezcla ha sido realizada. Los resultados muestran que se puede aprovechar el uso de la energía solar en la ciudad de Guanajuato, Gto., México, en un sistema de refrigeración por absorción. Se presenta una gráfica donde muestra la zona en la que el proceso de cristalización de la mezcla se lleva a cabo, con la finalidad de obtener un rendimiento aceptable sin la necesidad de estar en dicha zona. Se ha obtenido un coeficiente de rendimiento de 0.8 aproximadamente y un coeficiente de rendimiento solar de 0.4, lo cual coincide con los valores obtenidos en la literatura.

Palabras Clave:

Bromuro de litio-agua, Colector solar, Cristalización, Energía solar, Refrigeración por absorción, Simulación.

ABSTRACT

In this work an analysis and simulation of absorption refrigeration system operating with water-lithium bromide as working fluid using solar energy, has been realized. A verification of the developed model was made in a computational software, EES (Engineering Equation Solve), to determine properties of working fluid. Results show it is possible to take advantage of solar energy of Guanajuato city in Mexico for an absorption refrigeration system. A property chart of the brine is shown with the aim to obtain an acceptable performance avoiding the crystallization zone. The coefficient of performance of 0.8 and a solar coefficient of performance of 0.4

were obtained, these values are agree with literature review.

Keywords:

Water-lithium bromide, Solar collector, Crystallization, Solar energy, Absorption refrigeration, Simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de refrigeración por absorción ofrecen una alternativa más favorable para el medio ambiente como sustitutos de los tradicionales sistemas de compresión de vapor debido a que emplean refrigerantes naturales, lo que provoca la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero tales como el CO₂ (Riffat *et al.*, 1997; Dincer *l.*, 2003; S.B. Riffat *et al.*, 1998).

Un sistema de refrigeración por absorción difiere en dos aspectos principalmente a los sistemas de compresión de vapor convencionales (Moran M. J. *et al.*, 2011). El primero, en lugar del uso de un sistema de compresión de vapor de refrigerante entre el condensador y el evaporador, el refrigerante es absorbido por una sustancia secundaria (absorbente) para formar una solución líquida que posteriormente pasa a través de un sistema de bombeo para elevar la presión hasta la presión de condensación del refrigerante. En segundo aspecto, requiere de una fuente de alta temperatura para llevar a cabo la separación del refrigerante del absorbente, comúnmente se usa gas natural pero actualmente fuentes alternativas, como energía solar, son usadas para este propósito. Diversas sustancias han sido utilizadas como absorbentes. En los sistemas de refrigeración por absorción se pueden encontrar dos principales mezclas de fluidos de trabajo: amoníaco-agua (NH₃-H₂O) y bromuro de litio-agua (LiBr-H₂O), (Karamangil *et al.*, 2010). Soluciones de NH₃-H₂O son usadas en aplicaciones donde se requieren bajas temperaturas de enfriamiento. Mientas que, LiBr-H₂O son utilizados en aplicaciones que requieren



temperaturas moderadas (aplicaciones de aire acondicionado). Este trabajo se enfoca al análisis de este segundo fluido de trabajo debido a su aplicación residencial.

Xu and Wang demostraron que un sistema de refrigeración solar por absorción es una buena solución para evitar el uso de torres de enfriamiento en sistemas tipo chiller, sin embargo, existe un riesgo de producir problemas de cristalización. Assilzadeh et al., 2005, han desarrollado estudios de sistemas de enfriamiento solar de simple efecto de LiBr-H₂O, operado mediante colectores solares de tubos de vacío desarrollado en TRNSYS, donde la capacidad de enfriamiento óptima de 3.5 kW necesita 35 m² de área de colectores solares, con un tiempo de trabajo de 5 h por día. Syed et al., 2005, analizaron un sistema LiBr-H₂O de simple efecto en Madrid, donde el coeficiente de desempeño (COP) máximo instantáneo y el COP promedio obtenido en un día fue de 0.6 y 0.42, respectivamente. Lizarte et al., 2012, analizaron un sistema de colectores solares de placa plana de tubos de vacío para 4.5 kW en Madrid obteniendo un COP promedio y COP solar de 0.53 y 0.06, respectivamente. Mazloumi et al., 2008, analizaron un colector parabólico de 14.5 kW por medio de simulación., el chiller trabajó 12 h por día con un COP de 0.67 a 0.76. Por otro lado, Xu and Wang, 2017, obtuvieron un COP de 0.88 para el chiller y un COP solar de 0.35 para una capacidad de enfriamiento de aproximadamente 50 kW. Por otro lado, Chen et al., 2017 han demostrado experimentalmente que existe una influencia significativa de la temperatura ambiente en el rendimiento del sistema de enfriamiento tipo chiller y la capacidad de enfriamiento, variando en este caso de 8.93 a 5.78 cuando la temperatura se incrementa de 28°C a 35°C, mientras el COP varía de 0.68 a 0.6, respectivamente.

Diversas simulaciones han sido realizadas para el análisis de sistemas de refrigeración por absorción para ambos fluidos de traba-

jo (NH₃-H₂O y LiBr-H₂O) (Karamangil et al., 2010), (Mostafavi and Agnew, 1996; Bulgan, 1997; Horuz, 1998; Manu and Chandrashekar, 2016; Wageiallah Mohammed and Yanling, 2017), las cuales se basan en relaciones termodinámicas para cada componente, sin embargo, la mayoría de estos modelos no consideran la zona de cristalización como una limitante para el funcionamiento de un sistema de absorción de mezcla LiBr-H₂O.

En este estudio se pretende analizar el potencial de uso de energía solar para la activación de un sistema de refrigeración por absorción LiBr-H₂O en la ciudad de Guanajuato, Gto, México, el coeficiente de desempeño del sistema de absorción y el coeficiente de desempeño solar compuesto por colectores solares como fuente de generación, considerando las propiedades límite para evitar la cristalización de la mezcla. El modelo desarrollado en este trabajo y su comparación con otro modelo de la literatura ha sido llevado a cabo y los resultados y las ecuaciones utilizadas se muestran en las siguientes secciones.

2. METODOLOGÍA

Un modelo termodinámico para el sistema de refrigeración por absorción de simple etapa mostrado en la Figura. 1 ha sido desarrollado basado en el modelo propuesto por Karamangil et al., 2010, bajo las siguientes consideraciones:

- Flujo permanente en estado estable.
- La caída de presión es considerada únicamente en válvulas de expansión y la bomba.
- La temperatura de condensación (T_c) y evaporación (T_e) corresponden a las temperaturas T₃ y T₅ de la Figura 1.
- La temperatura de absorción (T_a) corresponde a la temperatura T₈ de la Figura 1.
- La temperatura de generación (T_g) corresponde a las temperaturas T₁ y T₁₂ de la Figura 1.

- Condiciones de saturación están presentes a la salida del condensador y evaporador (puntos 3 y 6, respectivamente).
- No existe transferencia de calor en intercambiadores de calor, válvulas de expansión y la bomba.

Soluciones de bromuro de litio-agua (LiBr-H₂O) y amoníaco-agua (NH₃-H₂O) han sido simuladas para su comparación con datos obtenidos en la literatura. En la primera solución el agua actúa como medio refrigerante, mientras que el LiBr es el fluido de absorción, para el caso de la segunda solución, el amoníaco actúa como refrigerante. Para cada una de estas mezclas se ha realizado un balance de masa en el generador basado en la concentración de LiBr o NH₃ presente en el agua, como se muestra a continuación.

A partir de estas ecuaciones se puede obtener una expresión en función de las concentraciones y el fluido refrigerante:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{11} &= \dot{m}_1 + \dot{m}_{12} && \text{(Masa total)} && (1) \\ X_{11}\dot{m}_{11} &= X_{12}\dot{m}_{12} && \text{(Balance LiBr)} && \\ X_{11}\dot{m}_{11} &= \dot{m}_1 + X_{12}\dot{m}_{12} && \text{(Balance NH}_3\text{)} && \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{12} &= \frac{X_{11}}{X_{12} - X_{11}} \dot{m}_1 && \text{(para: LiBr - H}_2\text{O)} && (2) \\ \dot{m}_{11} &= \frac{X_{12}}{X_{12} - X_{11}} \dot{m}_1 && && \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{11} &= \frac{1 - X_{12}}{X_{12} - X_{11}} \dot{m}_1 && \text{(para: NH}_3\text{ - H}_2\text{O)} && (3) \\ \dot{m}_{12} &= \frac{1 - X_{12}}{X_{11} - X_{12}} \dot{m}_1 && && \end{aligned}$$

Un parámetro FR puede ser definido como la relación entre el flujo másico de la bomba con respecto al flujo másico del fluido de trabajo.

$$FR = \frac{X_{12}}{X_{12} - X_{11}} \quad \text{(para: LiBr - H}_2\text{O)} \quad (4)$$

$$FR = \frac{1 - X_{12}}{X_{12} - X_{11}} \quad \text{(para: NH}_3\text{ - H}_2\text{O)} \quad (5)$$

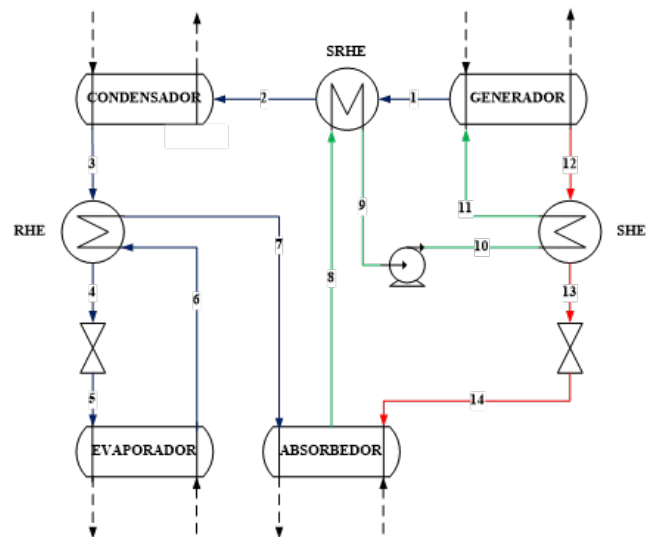


Figura 1. Sistema de refrigeración por absorción de simple etapa con intercambiadores de calor intermedios.

Las ecuaciones (6-9) muestran el balance de masa realizado en los componentes evaporador, condensador, generador y absorbedor respectivamente (Incropera and DeWitt, 1996; Karamangil et al., 2010; Moran M. J. et al., 2011).

Las ecuaciones (10-12) presentan el balance de energía realizado al intercambiador de calor de la solución (solution heat exchanger SHE) (Incropera and DeWitt, 1996; Karamangil et al., 2010; Moran M. J. et al., 2011).

$$Q_e = h_6 - h_5 \quad (6)$$

$$Q_c = h_2 - h_3 \quad (7)$$

$$Q_g = h_1 + (FR - 1)h_{11} - FRh_{12} \quad (8)$$

$$Q_a = FRh_8 - (FR - 1)h_{14} - h_7 \quad (9)$$

$$T_{13} = \epsilon_{SHE}T_{10} + (1 - \epsilon_{SHE})T_{12} \quad (10)$$

$$h_{11} = h_{10} + (h_{12} - h_{13})\frac{FR-1}{FR} \quad (11)$$

$$Q_{SHE} = (h_{12} - h_{13})(FR - 1) = (h_{11} - h_{10})FR \quad (12)$$

El balance de energía en el intercambiador de calor del refrigerante (refrigerant heat exchanger, RHE) es presentado a través de las ecuaciones (10-12) (Incropera and DeWitt, 1996; Karamangil et al., 2010; Moran M. J. et al., 2011).



$$h_7 = h_6 + \varepsilon_{RHE}(h_{7(T3)} - h_6) \quad (13)$$

$$h_4 = h_3 - \varepsilon_{RHE}(h_{7(T3)} - h_6) \quad (14)$$

$$Q_{RHE} = h_3 - h_4 = h_7 - h_6 \quad (15)$$

Un balance de energía realizado al intercambiador de calor de la mezcla solución-refrigerante (solution-refrigerant heat exchanger, SRHE) (Incropera and DeWitt, 1996; Karamangil et al., 2010; Moran M. J. et al., 2011), puede ser determinado por:

$$h_2 = h_1 - \varepsilon_{SRHE}(h_1 - h_{2(T8)}) \quad (16)$$

$$h_9 = h_8 + \frac{\varepsilon_{SRHE}}{FR}(h_1 - h_{2(T8)}) \quad (17)$$

$$Q_{SRHE} = h_1 - h_2 = (h_9 - h_8)FR \quad (18)$$

donde $h_7(T3)$ y $h_2(T8)$ son las entalpías del refrigerante evaluada a la temperatura del condensador y a la temperatura del absorbedor, respectivamente.

La potencia de la bomba puede ser determinada mediante la ecuación (19), a su vez la ecuación (20) muestra la definición de eficiencia isentrópica. Combinando las ecuaciones (19) y (20) se puede determinar la entalpía en el estado 10 con la ecuación (21).

$$W_P = FR(P_C - P_E) \frac{v}{\eta_P} \quad (19)$$

$$\eta_P = \frac{h_{10,s} - h_9}{h_{10,a} - h_9} \quad (20)$$

$$h_{10,a} = h_9 + (P_C - P_E) \frac{v}{\eta_P} \quad (21)$$

La ecuación (22) representa el coeficiente de desempeño (COP) del sistema.

$$COP = \frac{Q_E}{Q_G + W_P} \quad (22)$$

Para determinar el coeficiente de desempeño solar (COP solar) se puede utilizar la ecuación (23),

$$COP_{solar} = \frac{Q_E}{\int IA dt} \quad (23)$$

donde I representa la radiación solar y A es el área total correspondiente a los colectores solares. A continuación, se presenta la verificación del modelo y los resultados obtenidos a través del mismo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Verificación del modelo

El presente modelo ha sido resuelto a través del software Engineering Equation Solver (EES) y los valores obtenidos han sido comparados con los resultados presentados por Karamangil et al., 2010, empleando las mismas condiciones de este trabajo, algunos parámetros de entrada son requeridos para poder resolver el sistema de ecuaciones obtenido de las expresiones anteriores, los cuales constan de: temperaturas de evaporador, condensador, absorbedor y generador; así como las efectividades de los intercambiadores de calor y la eficiencia de la bomba. Para este efecto tres casos de estudios fueron analizados, los cuales constan de: análisis del efecto de los intercambiadores de calor en el COP, análisis del sistema en el COP y el parámetro FR para diferentes temperaturas del evaporador y del generador para ambas soluciones, LiBr-H₂O y NH₃-H₂O.

Las Figuras 2-4 muestran la comparación de los resultados obtenidos con el modelo desarrollado en EES y los obtenidos por Karamangil et al., 2010. El mismo comportamiento cualitativo es obtenido para los tres casos de estudio, sin embargo, diferencias cuantitativas han sido encontradas al examinar dichas figuras, las cuales pueden ser atribuidas al hecho de que la base de datos utilizada en ambos modelos para el cálculo de las propiedades de las mezclas utilizadas es distinta.

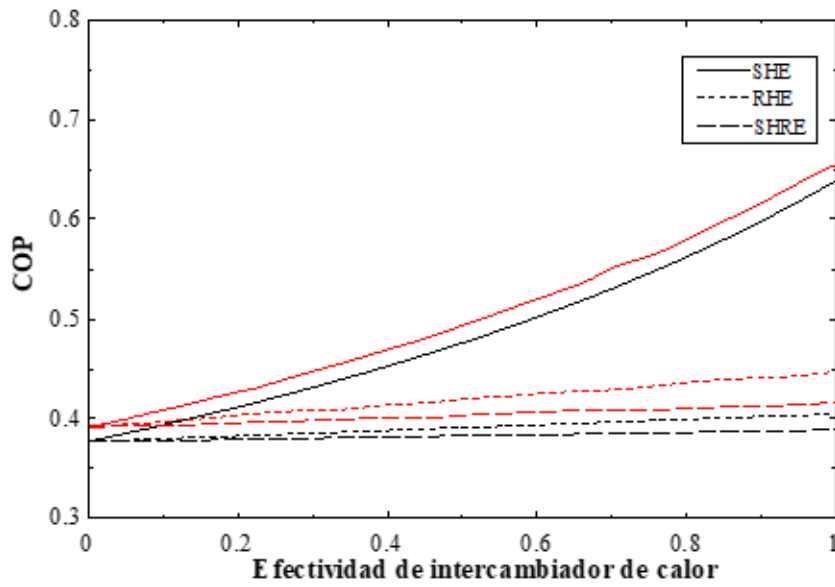


Figura 2. Comparación del desempeño del ciclo de absorción para diferentes valores de efectividad de los intercambiadores de calor. Presente modelo (líneas negras), modelo de Karamangil et al., (2010) (líneas rojas).

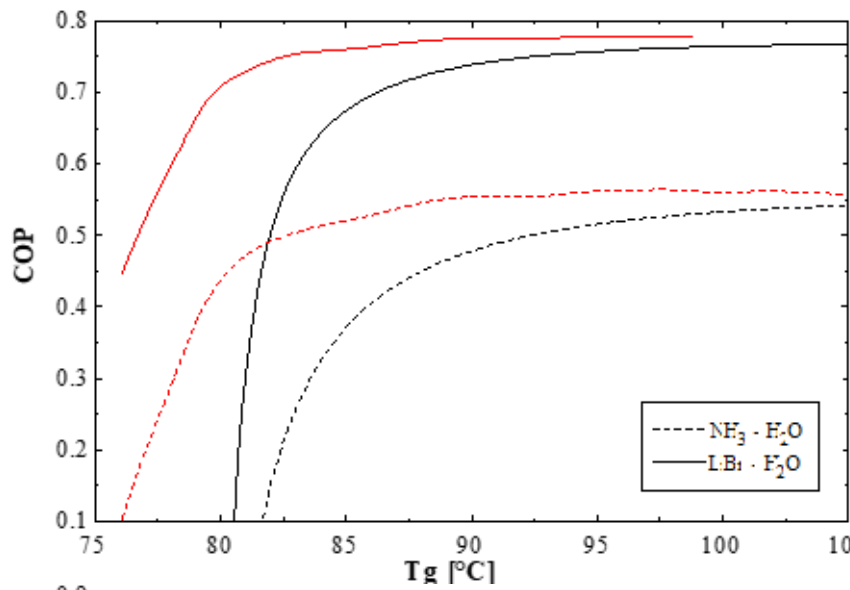


Figura 3. Comparación del desempeño del ciclo de absorción para diferentes valores de temperatura del generador. Presente modelo (líneas negras), modelo de Karamangil et al., (2010) (líneas rojas).

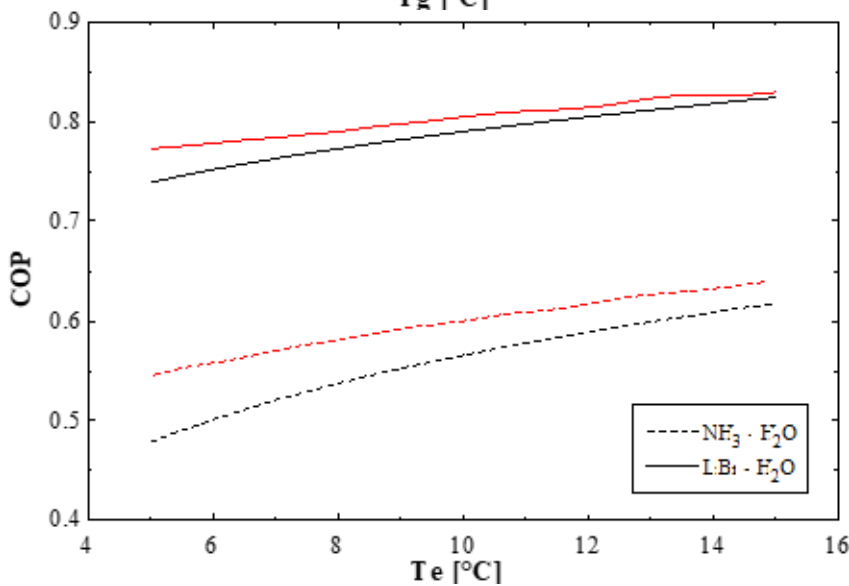


Figura 4. Comparación del desempeño del ciclo de absorción para diferentes valores de temperatura del evaporador. Presente modelo (líneas negras), modelo de Karamangil et al., (2010) (líneas rojas).



Las Figuras 2 y 4 muestran que no existe una diferencia considerable en ambos modelos en cuanto al coeficiente de rendimiento para una variación en temperatura de evaporación o las efectividades de los intercambiadores. Sin embargo, la Figura 3 muestra que ambos modelos presentan diferencias cuantitativas significativas para bajas temperaturas del generador, esto puede deberse a que el software EES cuenta con una base de datos para las propiedades de la mezcla LiBr-H₂O más actualizada comparada con la utilizada por Karamangil et al., 2010.

El problema de cristalización de la mezcla LiBr-H₂O limitan la aplicación práctica de este tipo de sistemas, debido a que provoca la formación de fango (slush) en la tubería, al cual se solidifica formando incrustaciones dentro de la misma limitando el paso del fluido. La línea de cristalización para bromuro de litio agua se encuentra muy cerca de las concentraciones requeridas para propósitos prácticos (Liao and Radermacher, 2007), como es muestra en la Figura 5.

En este trabajo se ha procurado que las propiedades de la solución LiBr-H₂O se encuentren alejadas de la curva de cristalización, para el caso de estudio mostrado en la siguiente sección.

3.2 Desempeño del sistema de refrigeración solar.

En este trabajo se ha analizado la influencia de la energía solar en un sistema de colectores solares, bajo las condiciones de operación obtenidas de la literatura Xu and Wang, (2017). Este sistema comprende de un área total 200 m² y un flujo volumétrico de agua de 20 L/min. Para llevar a cabo las simulaciones se requiere del conocimiento de la radiación solar y la temperatura ambiente; en este trabajo se ha utilizado la información proporcionada para el mes de abril por (Pición-Núñez et al., 2014). La Figura 6 muestra la información solar obtenida.

Con esta información se puede obtener la potencia térmica debida a la radiación, así como la potencia absorbida por el colector solar, considerando que dicho colector trabajó bajo una eficiencia térmica del 60%. La Figura 7 muestra la potencia útil del colector solar y que posteriormente es suministrada al sistema de refrigeración por absorción.

Con esta energía solar absorbida por el colector se obtiene una capacidad de enfriamiento mostrada en la Figura 8 para tres diferentes temperaturas de enfriamiento de 14, 10 y 4°C. Donde una mayor capacidad de enfriamiento es obtenida para una mayor temperatura de enfriamiento esto debido a que se requiere una gran cantidad de energía en el evaporador para llevar a cabo el cambio de fase de la mezcla de líquido-vapor a vapor sobrecalentado. Esto provoca también un incremento en el coeficiente de desempeño (COP) y por ende un mayor coeficiente de desempeño solar (COP solar), como se puede ver en la Figura 9 y 10, respectivamente.

La Figura 8 muestra que la capacidad de enfriamiento depende fuertemente de la radiación solar y no de la variación de la temperatura ambiente, esto debido a que el sistema de enfriamiento es de mayores dimensiones comparado con el sistema analizado por Chen et al., 2017, donde la capacidad de enfriamiento varía de 8.93 kW a 5.78 kW cuando la temperatura varía de 28 a 35°C, respectivamente.

Puede notarse que para las Figuras 8 a 10, los parámetros son evaluados en un rango de 10.5 h y 16.7 h; esto debido a que la concentración antes y después de este rango provoca el fenómeno de cristalización en el sistema, por lo que, el límite de operación para este caso queda definido por este intervalo de tiempo. Estos valores varían dependiendo del área de colectores y condiciones ambientales. Esto demuestra que existe potencial para aprovechar la energía solar en la ciudad de Guanajuato en un sistema de refrigeración solar.

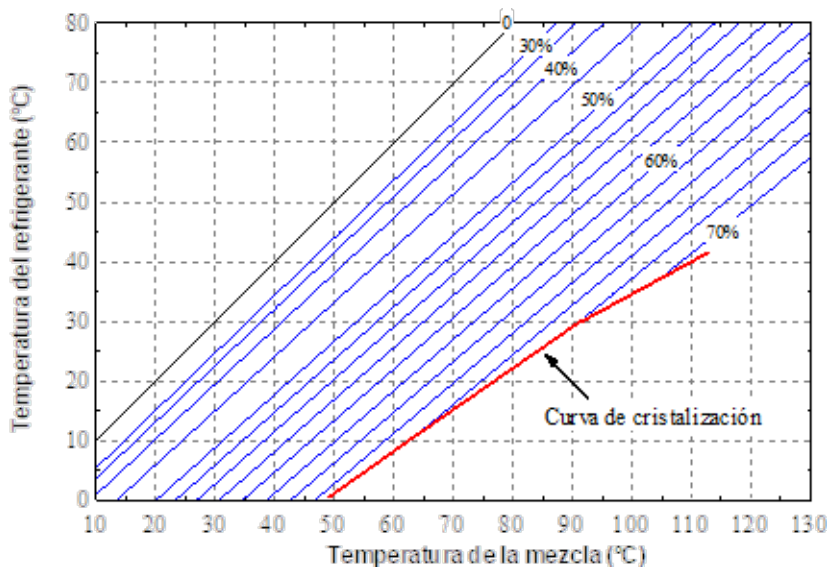


Figura 5. Diagrama de propiedades para la mezcla LiBr-H₂O con curva de cristalización.

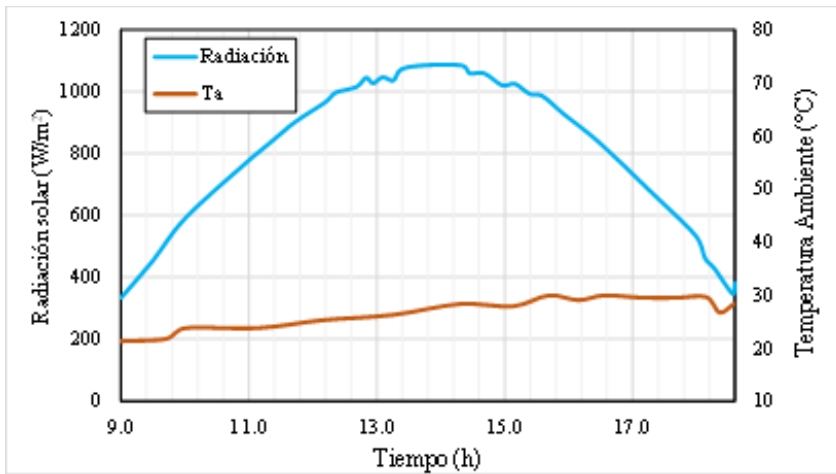


Figura 6. Radiación solar y temperatura ambiente para un día en el mes de abril en la ciudad de Guanajuato, México (extraída de (Picón-Núñez et al., 2014)).

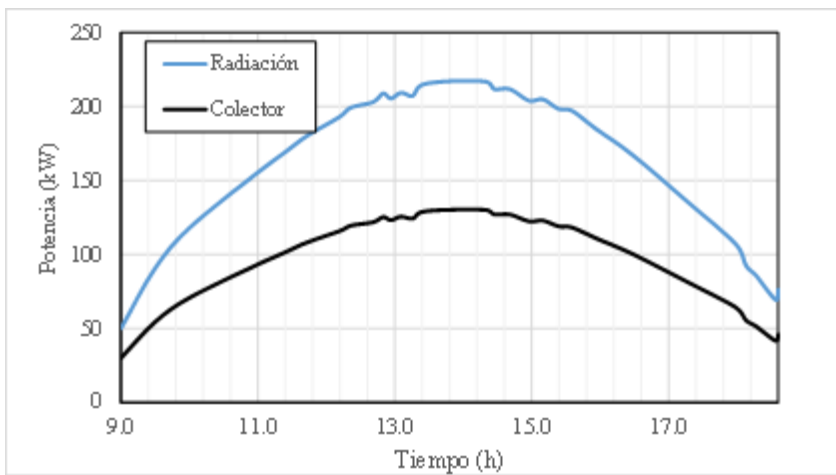


Figura 7. Flujo de energía solar por radiación y absorbida por el colector.

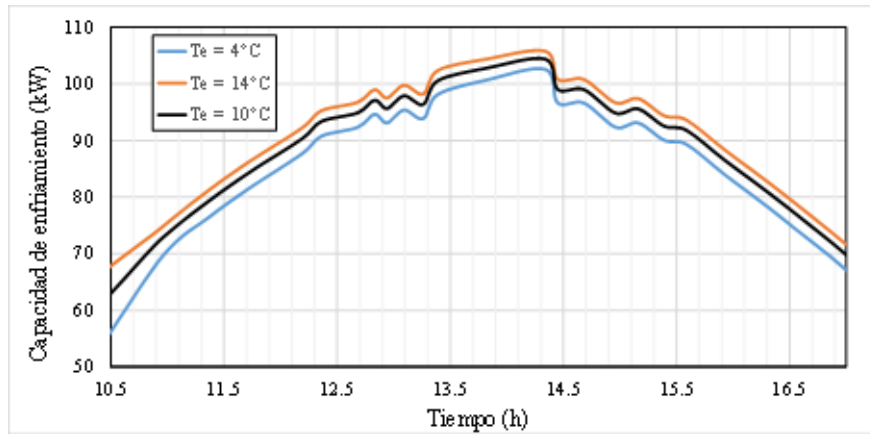


Figura 8. Capacidad de enfriamiento para distintas horas de funcionamiento del sistema de refrigeración por absorción.

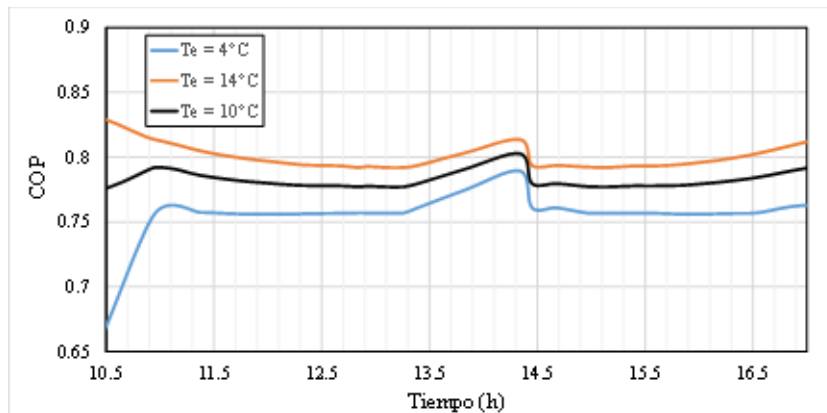


Figura 9. Coeficiente de desempeño del sistema de refrigeración por absorción.

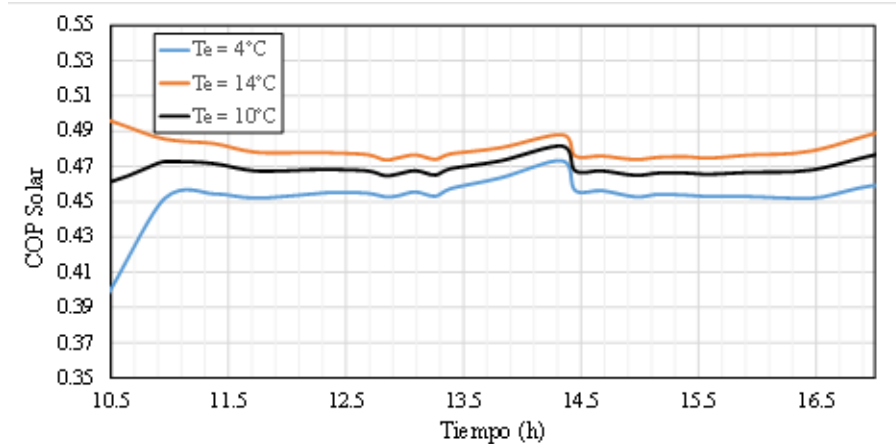


Figura 10. Coeficiente de desempeño solar para el sistema de refrigeración por absorción.

El valor máximo instantáneo de capacidad de enfriamiento, COP y COP solar ha sido determinado y se muestran en la Tabla 1. Estos valores son muy similares a los obtenidos por Xu and Wang, 2017, los cuales corresponden a un COP promedio de 0.88 y un COP solar promedio de 0.3, con una máxima capacidad de enfriamiento de aproximadamente 120 kW.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo una simulación de un sistema de refrigeración por absorción LiBr-H₂O operado con energía solar ha sido desarrollada. Los resultados muestran que el modelo es capaz de predecir el comportamiento térmico del sistema operado mediante colectores

T_e (°C)	COP_{prom}	$COP_{solar,prom}$	COP_{max}	$COP_{solar,max}$	$Q_{e,prom}$ (kW)	$Q_{e,max}$ (kW)
4	0.75	0.45	0.79	0.47	85.14	102.60
10	0.78	0.47	0.80	0.48	88.32	104.40
14	0.80	0.48	0.83	0.50	90.21	105.80

Tabla 1. Capacidad de enfriamiento y coeficiente de desempeño máximo y promedio para tres temperaturas de enfriamiento.

solares que puede llevarse a cabo bajo condiciones de radiación perteneciente al estado de Guanajuato.

- El modelo ha sido verificado con resultados obtenidos en la literatura mostrando un comportamiento cualitativo aceptable con ello, la diferencia cuantitativa obtenida puede ser atribuida al cálculo de las propiedades de la mezcla LiBr-H₂O.
- El modelo desarrollado, a diferencia de otros modelos de la literatura, considera la zona de cristalización, condición no deseable en mezclas LiBr-H₂O, con esto se establece el rango de operación apropiado para el sistema.
- La capacidad de enfriamiento depende fuertemente de la radiación solar y no de la temperatura ambiente debido a las grandes dimensiones del sistema analizado (para este caso con un área de colectores de 200 m² se obtiene una capacidad de enfriamiento entre 60 kW y 105 kW).
- El COP y COPsolar obtenidos son de magnitudes comparables a datos experimentales obtenidos de la literatura. Lo anterior demuestra que el modelo desarrollado, a pesar de estar basado en relaciones termodinámicas, es capaz de arrojar buenos resultados comparado con datos experimentales (valores máximos de 0.8 y 0.5 para COP y COPsolar, respectivamente). Estos valores son más bajos que los que se obtienen con un sistema de compresión de vapor, sin embargo, el uso de una fuente renovable de energía y la sustitución del compresor del sistema de refrigeración convencional dismi-

nuye la emisión de gases de efecto invernadero al no requerir de un gran consumo de energía eléctrica.

- El modelo puede ser utilizado como punto de partida para el análisis del potencial de uso de energía solar si se cuenta con la información de las condiciones ambientales para localidades distintas a la analizada en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- Assilzadeh, F., S. A. Kalogirou, Y. Ali, and K. Sopian. 2005. Simulation and optimization of a LiBr solar absorption cooling system with evacuated tube collectors. *Renew. Energy*. 30:1143–1159. doi:10.1016/j.renene.2004.09.017.
- Bulgan, A. T. 1997. Use of low temperature energy sources in aqua-ammonia absorption refrigeration systems. *Energy Convers. Manag.* 38:1431–1438. doi:10.1016/0196-8904(95)00351-7.
- Chen, J. F., Y. J. Dai, and R. Z. Wang. 2017. Experimental and analytical study on an air-cooled single effect LiBr-H₂O absorption chiller driven by evacuated glass tube solar collector for cooling application in residential buildings. *Sol. Energy*. 151:110–118. doi:10.1016/j.solener.2017.05.029.
- Dincer I. 2003. Refrigeration systems



and applications. John Wiley and Sons.

Horuz, I. 1998. A comparison between ammonia-water and water-lithium bromide solutions in vapor absorption refrigeration systems. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 25:711–721. doi:10.1016/S0735-1933(98)00058-X.

Incropera, F. P., and D. P. DeWitt. 1996. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 4th ed. John Wiley & Sons, USA.

Karamangil, M. I., S. Coskun, O. Kaynakli, and N. Yamankaradeniz. 2010. A simulation study of performance evaluation of single-stage absorption refrigeration system using conventional working fluids and alternatives. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14:1969–1978. doi:10.1016/j.rser.2010.04.008.

Liao, X., and R. Radermacher. 2007. Absorption chiller crystallization control strategies for integrated cooling heating and power systems. *Int. J. Refrig.* 30:904–911. doi:10.1016/j.ijrefrig.2006.10.009.

Lizarte, R., M. Izquierdo, J. D. Marcos, and E. Palacios. 2012. An innovative solar-driven directly air-cooled LiBr–H₂O absorption chiller prototype for residential use. *Energy Build.* 47:1–11. doi:10.1016/j.enbuild.2011.11.011.

Manu, S., and T. K. Chandrashekar. 2016. A simulation study on performance evaluation of single-stage LiBr–H₂O vapor absorption heat pump for chip cooling. *Int. J. Sustain. Built Environ.* 5:370–386. doi:10.1016/j.ijsbe.2016.08.002.

Mazloumi, M., M. Naghashzadegan, and K. Javaherdeh. 2008. Simulation of solar lithium bromide–water absorption cooling system with parabolic trough collector. *Energy Convers. Manag.* 49:2820–2832. doi:10.1016/j.enconman.2008.03.014.

Moran M. J., Howard N. S., Daisie D. B., and Margaret B. B. 2011. *Fundamentals of engineering thermodynamics*. 7th ed. John Wiley and Sons.

Mostafavi, M., and B. Agnew. 1996.

The effect of ambient temperature on the surface area of components of an air-cooled lithium bromide/water absorption unit. *Appl. Therm. Eng.* 16:313–319. doi:10.1016/1359-4311(95)00006-2.

Picón-Núñez, M., G. Martínez-Rodríguez, and A. L. Fuentes-Silva. 2014. Design of solar collector networks for industrial applications. *PRES'13 Process Integr.* 70:1238–1245. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.05.005.

Riffat, S. B., C. F. Afonso, A. C. Oliveira, and D. A. Reay. 1997. Natural refrigerants for refrigeration and air-conditioning systems. *Appl. Therm. Eng.* 17:33–42. doi:10.1016/1359-4311(96)00030-0.

S.B. Riffat, S.E. James, and C.W. Wong. Experimental analysis of the absorption and desorption rates of HCOOK/H₂O and LiBr/H₂O. *Int J Energy Res.* 22:1099–1103.

Syed, A., M. Izquierdo, P. Rodríguez, G. Maidment, J. Missenden, A. Lecuona, and R. Tozer. 2005. A novel experimental investigation of a solar cooling system in Madrid. *Int. J. Refrig.* 28:859–871. doi:10.1016/j.ijrefrig.2005.01.007.

Wageiallah Mohammed, O., and G. Yanling. 2017. Comprehensive Parametric Study of a Solar Absorption Refrigeration System to Lower Its Cut In/Off Temperature. *Energies.* 10:1746. doi:10.3390/en10111746.

Xu, Z. Y., and R. Z. Wang. 2017. Simulation of solar cooling system based on variable effect LiBr-water absorption chiller. *Renew. Energy.* 113:907–914. doi:10.1016/j.renene.2017.06.069.

Xu, Z. Y., and R. Z. Wang. Comparison of absorption refrigeration cycles for efficient air-cooled solar cooling. *Sol. Energy.* doi:10.1016/j.solener.2018.04.004. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18303499>