

## Programación de propiedades aplicadas a sistemas de refrigeración por absorción Programming of properties applied to absorption refrigeration systems

José L. Rodríguez-Muñoz <sup>a</sup>, Sergio Pacheco-Cedeño <sup>b</sup>, Jorge Zuno-Silva <sup>c</sup>, Carlos E. Borja-Soto <sup>d</sup>

### Abstract:

This work aims to develop a computational model that helps to predict the thermodynamic properties of the CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O mixture, which can be used for the analysis and simulation of absorption refrigeration systems. The study is based on the multiple interpolation methodology developed in the Engineering Equation Solver (EES) software and the values obtained are compared with those obtained experimentally. The results show that the developed model adequately predicts the properties of vapor pressure, specific enthalpy, and specific heat and the maximum deviation percentages obtained are 9.34%, 0.027%, and 0.15%, respectively. In addition, the simulation results show that, for the same operating conditions, a COP error of 4.58% is obtained when the system operates at an effectiveness of 1.0 (100% of its capacity), while the smallest COP error of 1.02% is obtained at the effectiveness of 0.6 (60% of its capacity), in comparison with the results presented in the literature.

### Keywords:

Properties, Programming, EES, ARS, COP, Multiple interpolation

### Resumen:

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo computacional que ayude a predecir las propiedades termodinámicas de la mezcla CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O, las cuales sean utilizadas para el análisis y simulación de sistemas de refrigeración por absorción. El estudio está basado en la metodología de interpolación múltiple desarrollada en el software Engineering Equation Solver (EES) y los valores obtenidos son comparados con aquellos obtenidos experimentalmente. Los resultados muestran que el modelo desarrollado predice adecuadamente las propiedades de presión de vapor, entalpía específica y calor específico y los máximos porcentajes de desviación obtenidos son de 9.34%, 0.027% y 0.15%, respectivamente. Además, los resultados de la simulación muestran que, para las mismas condiciones de operación, se obtiene un error del COP del 4.58% cuando el sistema opera a una efectividad de 1.0 (100% de su capacidad), mientras que el menor error del COP del 1.02% se obtiene a una efectividad del 0.6 (60% de su capacidad), en comparación con los resultados presentados en la literatura.

### Palabras Clave:

Propiedades, Programación, EES, ARS, COP, Interpolación múltiple

### Introducción

Los sistemas de refrigeración por absorción, al igual que los sistemas de refrigeración por compresión de vapor, tienen la característica de ser utilizados para aplicaciones de refrigeración y acondicionamiento de aire doméstico, residencial e industrial. Su diferencia radica principalmente en que, el compresor mecánico del

sistema de refrigeración por compresión de vapor es remplazado por un compresor térmico, el cual está constituido por un generador, intercambiador de solución y absorbedor. Por otra parte, el sistema de refrigeración por compresión de vapor utiliza un fluido refrigerante para su funcionamiento, mientras que los sistemas de refrigeración por absorción utilizan una mezcla de trabajo,

<sup>a</sup> Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-4108-9414>, Email: jose\_rodriguez@uaeh.edu.mx

<sup>b</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-3400-518X>, Email: sergio\_pacheco@uaeh.edu.mx

<sup>c</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0002-1997-5399>, Email: jorge\_zuno@uaeh.edu.mx

<sup>d</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <https://orcid.org/0000-0003-3385-8348>, Email: carlos\_borja@uaeh.edu.mx

el cual está constituida por un refrigerante y un absorbente.

En los equipos comerciales de refrigeración por absorción, los fluidos de trabajo son NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O (Refrigeración) y LiBr-H<sub>2</sub>O (Acondicionamiento de aire). La selección de los fluidos de trabajo tiene un efecto considerable en los costos de fabricación del equipo, así como en su rendimiento energético. Por tal motivo, en la literatura existe una gran variedad de trabajos relacionados al uso de las mezclas NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O (Rogdakis y Antonopoulos, 1992; Fernández-Seara y Vázquez M., 2001; Fernández-Seara y Sieres, 2006, Jawahar *et al.*, 2010; Du *et al.*, 2012; Yamamoto *et al.*, 2022) y LiBr-H<sub>2</sub>O (Monné *et al.*, 2011; Patel *et al.*, 2016; Kilic y Kaynakli, 2007; Wang y Lior 2011a; Wang y Lior 2011b; Ma y Deng, 1996, Soliman *et al.*, 2021). Otros trabajos, se enfocan en estudiar nuevas mezclas binarias, con la finalidad de obtener mejores prestaciones energéticas. Por ejemplo, Sun, 1998, realizó un estudio energético de un sistema de refrigeración por absorción en el que se usan como mezclas de trabajo el NH<sub>3</sub>-LiNO<sub>3</sub> y NH<sub>3</sub>-SCN y los resultados obtenidos se compararon con la mezcla convencional de NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O. Él concluyó que, desde el punto de vista energético, las mezclas NH<sub>3</sub>-LiNO<sub>3</sub> y NH<sub>3</sub>-SCN resultan ser ligeramente mejores en comparación con la tradicional mezcla NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O. Ahmad *et al.*, 2022 presentaron un estudio energético de un sistema de refrigeración por absorción en el que se utilizaron LiBr-H<sub>2</sub>O y LiCl-H<sub>2</sub>O como mezclas de trabajo. El estudio fue realizado bajo las mismas condiciones de operación y sus resultados muestran que la mezcla LiCl-H<sub>2</sub>O presenta un mayor rendimiento energético y una menor carga en el generador, en comparación con el sistema operando con LiBr-H<sub>2</sub>O. Chen *et al.*, 2022 presentaron un estudio termodinámico de un sistema de refrigeración por absorción en que H<sub>2</sub>O-3- Aminopropil Tributyl Fosfonio Glicinato (H<sub>2</sub>O-[aP4443][Gly]) es utilizada como mezcla de trabajo. Ellos concluyeron que, bajo las mismas condiciones de operación, la mezcla H<sub>2</sub>O-[aP4443][Gly] presenta un mayor rendimiento energético que la mezcla NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O, aunque, comparado esta mezcla con el LiBr-H<sub>2</sub>O, el rendimiento energético es ligeramente menor.

El uso de mezclas ternarias o cuaternarias como alternativa a las mezclas convencionales en los sistemas de refrigeración por absorción, se ha venido investigando con mayor detalle durante los últimos años. Esto se debe principalmente a dos aspectos: 1) se requiere incrementar el rendimiento energético del sistema y 2) reducir la temperatura de activación. Por tal motivo, Liang *et al.*, 2017 estudiaron el rendimiento energético de un sistema de refrigeración por absorción, empleando NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O-LiBr y combinada con un dispositivo electrodiálisis. Para la simulación del ciclo utilizaron Aspen Plus y en base a sus resultados, concluyeron que el COP

empleando esta mezcla se incrementa hasta en un 30%, en comparación con el sistema con NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O. Zhou *et al.*, 2022 investigaron experimentalmente el efecto de cuatro diferentes proporciones de agua (9.6%, 18.6%, 27.6% y 36.9%) sobre la capacidad de enfriamiento en un sistema de refrigeración por absorción, en el que emplearon NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O como mezcla de trabajo. Sus resultados muestran que al utilizar las proporciones de agua de 9.6%, 18.6%, 27.6% y 36.9%, la capacidad de enfriamiento se incrementa en 10.6%, 17.8%, 24.8% y 26.4%, respectivamente, en comparación al sistema con NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub>. Li *et al.*, 2018 propusieron la mezcla CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O, como alternativa a la mezcla LiBr-H<sub>2</sub>O. Ellos encontraron que el COP de la mezcla CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O es 0.04 unidades superior al del LiBr-H<sub>2</sub>O, bajo las mismas condiciones de operación.

Con base a lo anterior, se estableció como primera etapa, seleccionar a la mezcla CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O presentada por Li *et al.*, 2018, debido a que sus prestaciones energéticas resultan ser ligeramente superior que la mezcla tradicional LiBr-H<sub>2</sub>O, y a que sus propiedades termodinámicas son relativamente más sencillas de programar. Para la programación de la presión, calor específico y entalpía específica, se usó el software Engineering Equation Solver (EES), debido a que este software contiene las propiedades termofísicas de varios fluidos refrigerantes, además, es comúnmente empleado para el análisis y simulación de sistemas de refrigeración, tanto de compresión de vapor, como por absorción.

Finalmente, la incorporación de un código computacional que permita predecir las propiedades de la mezcla CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O, ayudará a los desarrolladores de esta tecnología a entender mejor su comportamiento energético, reducir su temperatura de activación, así como su utilización y análisis en nuevas configuraciones de ciclos de refrigeración por absorción.

## Correlaciones de las propiedades

En esta sección se presentan las correlaciones empleadas para determinar las propiedades de la mezcla CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O. Posteriormente, se desarrolla un modelo de interpolación múltiple en el software Engineering Equation Solver (EES) y los resultados obtenidos se comparan con aquellos valores obtenidos por Li *et al.*, 2018.

### Presión de vapor

La presión de vapor saturado para la mezcla CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>(8.72:1:1)/H<sub>2</sub>O fue determinada por medio de la ecuación de Antoine (Li *et al.*, 2018) y dicha expresión es definida como sigue:

$$\log p = \sum_{i=1}^2 \left[ A_i + \frac{B_i}{T-C_i} \right] (100w)^i \quad (1)$$

Donde  $p$ ,  $T$  y  $w$ , es la presión de saturación en kPa, la temperatura en °C y la fracción en masa en peso de la mezcla (%), respectivamente. Las constantes  $A$ ,  $B$  y  $C$  son los valores de los parámetros de regresión para la mezcla  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3(8.72:1:1)/\text{H}_2\text{O}$ , los cuales se obtienen a partir de la Tabla 1.

$i$	$A_i$	$B_i$	$C_i$
0	$-2.614 \times 10^0$	$7.160 \times 10^2$	$-5.757 \times 10^1$
1	$2.234 \times 10^{-1}$	$-2.886 \times 10^1$	$-5.032 \times 10^1$
2	$-2.685 \times 10^{-3}$	$1.459 \times 10^{-6}$	$2.770 \times 10^1$

Tabla 1. Valores de las constantes  $A$ ,  $B$  y  $C$  para la Ec. 1. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2 se muestran los resultados correspondientes a la presión de vapor de la mezcla  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3(8.72:1:1)/\text{H}_2\text{O}$  para un rango de temperaturas de 20 °C a 100.5 °C, así como para un rango de concentración de la solución de 50% a 65%. Los resultados muestran que la menor presión de vapor de 0.321 kPa se obtiene a una temperatura de 25 °C y una concentración de la solución del 60%, mientras que la máxima presión de vapor de 36.81 kPa, corresponde a la temperatura de 100.1 °C y una concentración de la solución de 50%.

$w$ (%)	Presión de vapor saturado $p$ (kPa) a cada valor de temperatura $T$ (°C)									
50	$T$	20	25	30.9	35.3	40.2	45.1	50	54.5	60.7
	$p$	0.568	0.802	1.185	1.572	2.144	2.843	3.734	4.731	6.458
	$T$	64.9	70.1	75	79.9	85	90.1	95	100.1	
	$p$	7.95	10.18	12.88	15.91	19.81	24.68	30.18	36.81	
55	$T$	20	25	30	35	40	45	50	55	60
	$p$	0.365	0.530	0.746	1.040	1.438	1.935	2.571	3.382	4.392
	$T$	65	70	75	80	85	90	95	100	
	$p$	5.710	7.386	9.568	12.15	15.22	18.87	22.96	27.51	
60	$T$	25	30	35	40	45	50	55	60	65
	$p$	0.321	0.465	0.653	0.918	1.265	1.747	2.36	3.148	4.088
	$T$	70	75	80	85	90	95	100		
	$p$	5.333	6.947	8.951	11.30	13.97	17.18	21.19		
65	$T$	74.7	80.8	85.3	90	95.2	100.2	100.5		
	$p$	5.110	7.029	8.725	10.065	13.065	16.161	19.24		

Tabla 2. Presión de vapor de la mezcla  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3$  obtenida por Li et al., 2018.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 1 se muestran los valores obtenidos de la presión de vapor de forma experimental y se comparan con los datos obtenidos por el presente trabajo. La línea continua representa los resultados obtenidos por medio del modelo desarrollado en el software EES. Dicho modelo está basado en un análisis de interpolación múltiple para todo el rango de temperaturas y concentraciones de la solución descritas en la Tabla 2, mientras que las líneas punteadas corresponden a los valores obtenidos experimentalmente por Li et al., 2018.

Los resultados muestran que existe una buena aproximación entre los resultados teóricos y experimentales. El máximo porcentaje de desviación encontrado entre ambos valores es de 9.34%, el cual corresponde a la concentración de la solución del 65%.

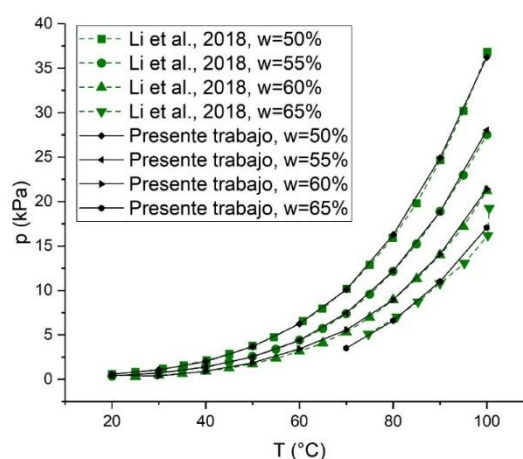


Figura 1. Presión de vapor de la mezcla  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3(8.72:1:1)/\text{H}_2\text{O}$ .

Fuente: Elaboración propia

### Entalpía específica

La ecuación de regresión para la entalpía de la mezcla es obtenida por medio de la ecuación propuesta por Chen and Xi, 2006.

$$h = \sum_{i=0}^2 [A_i + B_i w + C_i w^2] T^i \quad (2)$$

donde  $h$ , es la entalpía específica en kJ/kg;  $T$  es la temperatura en °C;  $w$  es la fracción en masa del absorbente en %,  $A$ ,  $B$  y  $C$  son los parámetros de regresión, los cuales se obtienen a partir de la Tabla 3.

$i$	$A_i$	$B_i$	$C_i$
0	$3.202 \times 10^2$	$-1.962 \times 10^0$	$1.101 \times 10^{-2}$
1	$4.127 \times 10^0$	$-4.623 \times 10^{-2}$	$1.870 \times 10^{-4}$
2	$2.385 \times 10^{-3}$	$2.066 \times 10^{-5}$	$-2.753 \times 10^{-7}$

Tabla 3. Valores de las constantes  $A$ ,  $B$  y  $C$  para la Ec. 2. Fuente: Elaboración propia

Los valores de la entalpía encontrados a partir de la ecuación 2, se muestran en la Tabla 4. Los resultados muestran que la entalpía incrementa con el incremento de la temperatura, sin embargo, disminuye a medida que se incrementa la concentración de la solución. Los mayores valores de entalpía se obtienen a una concentración de la solución de 50%, mientras que a una concentración de la solución del 65%, menores valores de entalpía son encontrados.

Los resultados para la entalpía específica de la mezcla se muestran en la Figura 2. De la figura, se puede determinar que la entalpía específica aumenta en un 34.30% a medida que se incrementa la temperatura de 10°C a 100°C. Sin embargo, también se puede observar que el incremento en la concentración de la solución, reduce la entalpía específica de la mezcla. Comparativamente, los resultados teóricos son muy similares a los obtenidos experimentalmente y el mayor porcentaje de desviación de 0.027% corresponde a la temperatura de 10°C y una concentración en la solución del 60%.

$w$ (%)	Entalpía específica $h$ (kJ/kg) a cada valor de temperatura $T$ (°C)					
	$T$	10	20	30	40	50
50	$h$	272.222	295.413	318.713	342.117	365.620
	$T$	60	70	80	90	100
	$h$	389.215	412.898	436.663	460.505	484.418
55	$T$	10	20	30	40	50
	$h$	267.285	288.918	310.619	332.393	354.246
	$T$	60	70	80	90	100
60	$h$	376.182	398.207	420.325	442.541	464.860
	$T$	10	20	30	40	50
	$h$	262.689	282.828	303.023	323.281	343.609
65	$T$	60	70	80	90	100
	$h$	364.017	384.513	405.104	425.799	446.605
	$T$	10	20	30	40	50
65	$h$	258.788	277.500	296.280	315.134	334.064
	$T$	60	70	80	90	100
	$h$	353.074	372.170	391.355	410.632	430.007

Tabla 4. Entalpía específica de la mezcla  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3(8.72:1:1)/\text{H}_2\text{O}$  obtenida por Li et al., 2018. Fuente: Elaboración propia

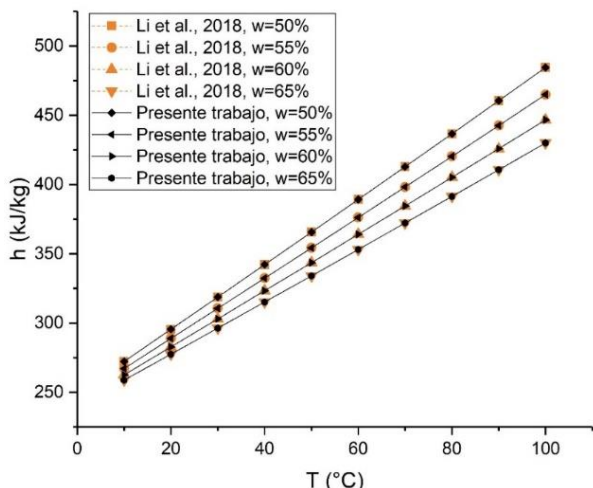


Figura 2. Entalpía de la mezcla  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3$  (8.72:1:1)/ $\text{H}_2\text{O}$ . Fuente: Elaboración propia

### Calor específico

El calor específico para la mezcla es determinado en un rango de fracción de masa de 50% a 65% y un rango de temperaturas de  $10^\circ\text{C}$  a  $100^\circ\text{C}$ . Para esta propiedad, sus valores correspondientes se obtuvieron a partir de la ecuación propuesta por He *et al.*, 2010:

$$C_p = \sum_{i=0}^2 (A_i + B_i T + C_i T^2) w^i \quad (3)$$

En base a la ecuación 3,  $C_p$  es el calor específico en  $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ ;  $T$  es la temperatura en  $^\circ\text{C}$  y  $w$  es la fracción en masa de la mezcla en %. Por otra parte, las constantes  $A$ ,  $B$  y  $C$ , son los obtenidos a partir de la Tabla 5.

$i$	$A_i$	$B_i$	$C_i$
0	$3.842 \times 10^0$	$3.028 \times 10^{-2}$	$-2.530 \times 10^{-4}$
1	$-3.192 \times 10^{-2}$	$-9.980 \times 10^{-4}$	$8.621 \times 10^{-6}$
2	$2.244 \times 10^{-5}$	$8.336 \times 10^{-5}$	$-7.220 \times 10^{-8}$

Tabla 5. Valores de las constantes  $A$ ,  $B$  y  $C$  para la Ec. 3. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6 se muestran los valores del calor específico obtenidos experimentalmente para la mezcla  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3(8.72:1:1)/\text{H}_2\text{O}$ . El aumento de la temperatura ocasiona que el calor específico de la mezcla se incremente en alrededor del 2%. También, se observa en los resultados que el incremento de la concentración de la solución, reduce el calor específico de la mezcla. Los valores del calor específico para la mezcla  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3(8.72:1:1)/\text{H}_2\text{O}$  para un rango de temperatura de  $10^\circ\text{C}$  a  $100^\circ\text{C}$  y para el rango de concentración de la solución de 50% a 65% se ilustran en la Figura 3. Los

resultados muestran que las tendencias entre los resultados teóricos y los experimentales son muy similares son prácticamente iguales. El máximo porcentaje de desviación de 0.15% se obtienen a una temperatura de  $90^\circ\text{C}$  y una concentración de la solución de 65%.

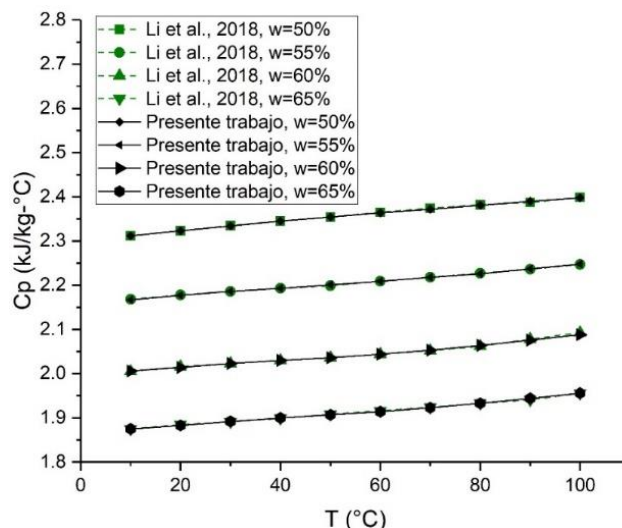


Figura 3. Entalpía de la mezcla  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3(8.72:1:1)/\text{H}_2\text{O}$ . Fuente: Elaboración propia

### Descripción del ciclo ARS

El ciclo de refrigeración por absorción (ARS) está constituido por los siguientes componentes: generador, condensador, válvula de refrigerante (válvula 1), evaporador, absorbedor, bomba de solución, válvula de solución (válvula 2) y un intercambiador de calor de solución (SHX), tal como se observa en la Figura 4. El ciclo opera bajo dos niveles de presión, presión alta en el condensador y presión baja en el evaporador, además, utiliza como refrigerante el agua y como absorbente la mezcla  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3(8.72:1:1)/\text{H}_2\text{O}$ .

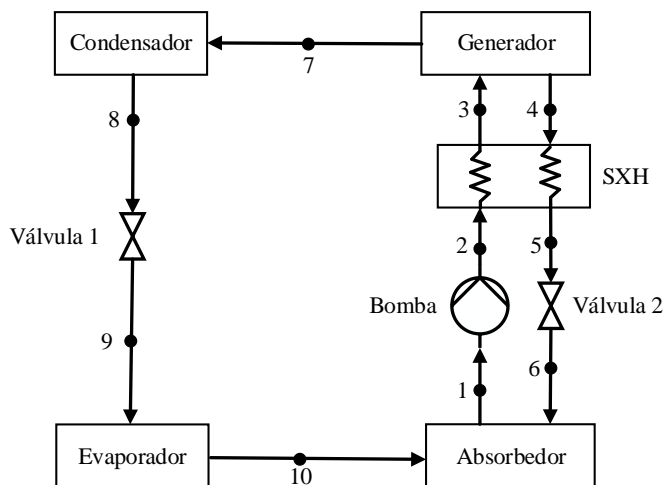


Figura 4. Diagrama esquemático del ciclo ARS.  
Fuente: Elaboración propia

Para describir su funcionamiento, refrigerante líquido procedente del condensador (8) pasa a través de la válvula 1, reduciendo su temperatura y presión (9), donde luego se evapora en el evaporador hasta alcanzar las condiciones de saturación (10). El refrigerante saturado entra al absorbedor y se mezcla con la solución rica proveniente del generador (4), a través de la válvula de expansión (6) y con ello, se forma la solución débil (1), que se bombea al generador (3) y se calienta en este componente. El vapor producido pasa al condensador (7), mientras que la solución rica en refrigerante se envía de vuelta al absorbedor. Para aumentar la eficiencia energética del sistema de refrigeración por absorción, se coloca un intercambiador de calor de solución, SHX, entre el absorbedor y el generador, de tal manera que la solución pobre (2) absorbe energía de la solución rica en 4, reduciendo su temperatura hasta alcanzar las condiciones en (5) y de esta manera continuar con el ciclo.

**Ecuaciones del ARS**

De acuerdo a la Figura 4, las ecuaciones que caracterizan cada uno de los componentes que conforman el ARS se describen en la Tabla 6.

El rendimiento energético (COP) para el ARS se obtiene a partir de la ecuación 4.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{gen} + \dot{W}_p} \quad (4)$$

**Simulación**

Para la simulación del ARS, se estableció como condiciones de operación que el condensador y absorbedor se encuentran a la misma temperatura,  $T_{cond}=T_{abs}=37\text{ }^\circ\text{C}$ , la temperatura de evaporación,  $T_{evap}=5\text{ }^\circ\text{C}$  y la temperatura de activación,  $T_{gen}=73.3\text{ }^\circ\text{C}$ . Además, se evaluaron cinco valores de efectividad en el intercambiador de solución  $\eta_{SHX}=0.6, 0.7, 0.8, 0.9$  y  $1.0$ , y con dichos valores se determinaron sus rendimientos energéticos, los cuales se presentan en la Tabla 7. Además, los resultados obtenidos se compararon con aquellos rendimientos energéticos obtenidos por Li et al., 2018. De los resultados se puede establecer que los errores correspondientes al COP son del 1.02% cuando el ARS opera a una  $\eta_{SHX}=0.6$  (60% de carga), mientras que el mayor error de 4.58% se obtiene a una  $\eta_{SHX}=1.0$  (100% de carga). Esta diferencia se puede atribuir directamente a las propiedades del agua, ya que Li et al., 2018 las obtiene de los trabajos presentados por Florides et al., 2003; Jiang and Cao, 2003, mientras que en el presente estudio se obtienen de The International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS), las cuales vienen incluidas en el software EES.

Componente	Balance de masa y concentración	Balance de energía
Evaporador	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$	$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{10}(h_{10} - h_9)$
Absorbedor	$\dot{m}_{10} + \dot{m}_6 = \dot{m}_1$	$\dot{Q}_{abs} = \dot{m}_{10}h_{10} + \dot{m}_6h_6 - \dot{m}_1h_1$
Válvula 2	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$	$h_5 = h_6$
Bomba	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$\dot{W}_p = \dot{m}_1(h_2 - h_1)$ $\dot{W}_p = \dot{m}_1v_1(P_2 - P_1)$
Condensador	$\dot{m}_7 = \dot{m}_8$	$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_7(h_7 - h_8)$
Válvula 1	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$	$h_8 = h_9$
SHX	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$ $\dot{m}_4 = \dot{m}_5$	$\dot{m}_4h_4 + \dot{m}_2h_2 = \dot{m}_3h_3 + \dot{m}_5h_5$ $\eta_{SHX} = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_2}$
Generador	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7$ $\dot{m}_3x_3 = \dot{m}_4x_4$	$\dot{Q}_{gen} = \dot{m}_4h_4 + \dot{m}_7h_7 - \dot{m}_3h_3$

Tabla 6. Balances de masa, especies y energía del ARS.  
Fuente: Elaboración propia

$\eta_{SHX}$	COP (Li <i>et al.</i> , 2018)	COP (Presente trabajo)	Error (%)
0.6	0.734	0.7238	1.02
0.7	0.768	0.7866	2.42
0.8	0.805	0.8313	3.26
0.9	0.847	0.8764	3.47
1.0	0.892	0.9329	4.58

Tabla 7. Rendimiento energético del ciclo ARS.  
Fuente: Elaboración propia

### Abreviaciones y Acrónimos

- $\dot{m}$  = Flujo másico (kg/s)
- $\dot{Q}$  = Transferencia de energía (kW)
- $\dot{w}$  = Potencia (kW)
- h = Entalpía (kJ/kg)
- T = Temperatura (°C)
- x = Fracción de la solución (%)
- P= Presión (kPa)
- $v$  = Volumen específico (m<sup>3</sup>/kg)
- 1,2,3 = Estados termodinámicos
- evap= Evaporador
- abs = Absorbedor
- cond = Condensador
- p = Bomba
- gen = Generador
- SHX = Intercambiador de calor de solución

### Conclusiones

El desarrollo de un modelo para predecir las propiedades de la mezcla CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>(8.72:1:1)/H<sub>2</sub>O, como son; presión de vapor, entalpía específica y calor específico son presentadas y discutidas en este trabajo. El estudio está basado en la metodología de interpolación múltiple desarrollada en el software EES y los valores obtenidos son comparados con valores obtenidos experimentalmente por Li *et al*, 2018. Además, se incluye el análisis de un ciclo de refrigeración por absorción y los resultados obtenidos se comparan con aquellos presentados en la literatura. Dentro de las conclusiones más relevantes del presente trabajo son las siguientes:

El modelo predice adecuadamente las propiedades de la mezcla CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>(8.72:1:1)/H<sub>2</sub>O para todo el rango de temperaturas y de concentración de la solución. Los máximos porcentajes de desviación para la presión de vapor, entalpía específica y calor específico son de 9.34%, 0.027% y 0.15%, respectivamente. Además, los resultados de la simulación muestran que, para las mismas condiciones de operación, se obtiene un error en el COP del 4.58% cuando el sistema opera a una efectividad de 1.0 (100% de su capacidad), mientras que el menor error del COP de 1.02% se obtiene al operar el

sistema a una efectividad del 0.6 (60% de su capacidad), comparado con los resultados obtenidos por Li *et al.*, 2018.

Finalmente, se puede concluir que la incorporación de un código que permita predecir las propiedades de la mezcla CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>(8.72:1:1)/H<sub>2</sub>O, ayudará a los desarrolladores de esta tecnología a entender mejor su comportamiento energético, reducir su temperatura de activación, así como su utilización y análisis en nuevas configuraciones de ciclos de refrigeración por absorción.

### Referencias

Ahmad T., Azhar Md., Sinha M.K., Meraj Md., Mohammed Islam., Ahmad A. (2022). Energy analysis of lithium bromide-water and lithium chloride-water based single effect vapour absorption refrigeration system: A comparison study. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 100432. DOI: 10.1016/j.clet.2022.100432

Chen, D., Xie, J.H. (2006). *Heat Pump Water Heater*. Chemical Industry Press, Beijing, pp. 201.

Chen Y., Zhou T., Zhao T., He Y. (2022). Thermodynamic analysis of H<sub>2</sub>O-3-aminopropyl tributyl phosphonium glycinate as a working pair for absorption refrigeration system. *Applied Thermal Engineering*, 213, 118658. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118658

Du S., Wang R.Z., Lin P., Xu Z.Z., Pan Q.W., Xu S.C. (2012). Experimental studies on an air cooled two stage NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O solar absorption air-conditioning prototype. *Energy*, 45, 581-587. DOI: 10.1016/j.energy.2012.07.041

Fernández-Seara J., Vázquez M. (2001). Study and control of the optimal generation temperature in NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O absorption refrigeration systems. *Applied Thermal Engineering*, 21, 343-357. DOI: 10.1016/S1359-4311(00)00047-8

Fernández-Seara J., Sieres J. (2006). Ammonia-water absorption refrigeration systems with flooded evaporators. *Applied Thermal Engineering*, 26, 2236-2246. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.03.011

Florides, G.A., Kalogirou, S.A., Tassou, S.A., Wroble, L.C. (2003). Design and construction of a LiBr-water absorption machine. *Energy Conversion and Management* 44, 2483-2508. DOI: 10.1016/S0196-8904(03)00006-2

He, Z.B., Zhao, Z.C., Zhang, X.D., Feng, H. (2010). Thermodynamic properties of new heat pump working pairs: 1, 3-dimethylimidazolium dimethyl phosphate and water, ethanol and methanol. *Fluid Phase Equilibria* 298, 83-91. DOI: 10.1016/j.fluid.2010.07.005

Jawahar C.P., Raja B., Saravanan R. (2010). Thermodynamic studies on NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O absorption cooling using pinch point approach. *International Journal of Refrigeration*, 33, 1377-1385. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2010.04.015

Jiang, X., Cao, Z. (2003). A group of simple precise formulations for properties of water and steam. *Power Engineering* 23, 2777-2780.

Kilic M., Kaynakli O. (2007). Second law-based thermodynamic analysis of water-lithium bromide absorption system. *Energy*, 32, 1505-1512. DOI: 10.1016/j.energy.2006.09.003

Li N., Luo C., Su Q. (2018). A working pair of CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O and its application in a single-stage solar-driven absorption refrigeration cycle. *International Journal of Refrigeration*, 86, 1-13. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.11.004

Ma W.B., Deng S.M. (1996). Theoretical analysis of low-temperature hot source driven two-stage LiBr/H<sub>2</sub>O absorption refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 19, 141-146. DOI: 10.1016/0140-7007(95)00054-2

- Monné C., Alonso S., Palacín F., Guallar J. (2011). Stationary analysis of a solar LiBr-H<sub>2</sub>O absorption refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 34, 518-526. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2010.11.009.
- Patel H.A., Patel L.N., Jani D., Christian A. (2016). Energetic analysis of single stage lithium bromide water absorption refrigeration system. *Procedia Technology*, 23, 488-495. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.03.054
- Rogdakis E.D., Antonopoulos K.A. (1992). Performance of a low-temperature NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O absorption-refrigeration system. *Energy*, 17, 477-484. DOI: 10.1016/0360-5442(92)90083-C
- Soliman A. S., Zhu S., Dong J., Cheng P. (2021). Design of an H<sub>2</sub>O-LiBr absorption system using PCMs and powered by automotive exhaust gas. *Applied Thermal engineering*, 191, 116881. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116881
- Sun D.W. (1998). Comparison of the performances of NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>-LiNO<sub>3</sub> and NH<sub>3</sub>-NaSCN absorption refrigeration system. *Energy Conversion and Management*, 39, 357-368. DOI: 10.1016/S0196-8904(97)00027-7
- Wang Y., Lior N. (2011a). Proposal and analysis of a high-efficiency combined desalination and refrigeration system based on the LiBr-H<sub>2</sub>O absorption cycle—Part 1: System configuration and mathematical model. *Energy Conversion and Management*, 52, 220-227. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.06.071
- Wang Y., Lior N. (2011b). Proposal and analysis of a high-efficiency combined desalination and refrigeration system based on the LiBr-H<sub>2</sub>O absorption cycle—Part 2: Thermal performance analysis and discussions. *Energy Conversion and Management*, 52, 228-235. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.06.064
- Yamamoto E., da Silva R., Higa M. (2022). Performance improvements on energy and exergy basic for an ammonia-water absorption refrigeration system in a coffee industry. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102284. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102284
- Zhou S., Guogeng H., Liang X., Li Y., Pang Q., Cai D. (2022). Comparison of experimental performance of absorption refrigeration cycle using NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>O working fluids with different component proportions. *International Journal of Refrigeration*, 139, 25-40. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2022.04.01

Haga clic o pulse aquí para escribir texto.