

Simulación de un sistema de refrigeración solar por absorción con mezcla $\text{NH}_3 / \text{H}_2\text{O}$, utilizando el software aspen plus

JUÁREZ-BORBONIO, Jesús†*, VIDAL-SANTO, Adrián, BELTRÁN-CHACÓN, Ricardo y MALDONADO-SAAVEDRA, Octavio

Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz; Av. Universidad No.350, Carretera Federal Cuitláhuac-La Tinaja, 94910, Cuitláhuac, Ve. Universidad Veracruzana, Lomas del estadio s/n, Edificio «A», 3er. Piso, C.P

Recibido 22 de Abril, 2017; Aceptado 28 de Junio, 2017

Resumen

La radiación solar actualmente tiene diversos usos con fines de ahorro de energía, uno de los de mayor interés es el de la refrigeración solar, donde comúnmente los sistemas pueden ser del tipo absorción o adsorción; ambos procesos aprovechan directamente la energía calorífica del sol. Aun cuando existen para estos procesos tecnologías maduras, actualmente no se ha logrado la comercialización de sistemas de refrigeración solar con la rapidez que lo demanda el mercado, ya que sigue siendo el sistema de refrigeración por compresión, el de mayor comercialización. Por ello presentamos aquí los resultados de un estudio realizado mediante la simulación con el software Aspen Plus, en un sistema de refrigeración por absorción con mezcla de amoníaco-agua, con la finalidad de coadyuvar para que la transferencia de las tecnologías de refrigeración solar, produzcan a corto plazo la introducción en el mercado de refrigeradores de uso doméstico solares. Los resultados obtenidos indican que, para una tonelada de refrigeración, será necesario una masa de refrigerante en el evaporador de 0.9 kg/min, alcanzando una temperatura promedio dentro del evaporador de -8.35°C . De igual manera para activar el ciclo de refrigeración en el generador, será necesario que la temperatura del fluido caloportador proveniente del colector solar, se encuentre en 160°C .

Refrigeración, absorción, solar, simulación, Aspen Plus

Abstract

Solar radiation currently has several uses for energy saving purposes, one of the most interesting is solar cooling, where commonly the systems can be of the absorption or adsorption type; Both processes directly exploit the heat energy of the sun. Although there are mature technologies for these processes, commercialization of solar refrigeration systems has not yet been achieved with the speed demanded by the market, since it is still the refrigeration system for compression, the one with greater commercialization. Therefore, we present here the results of a study carried out by simulation with Aspen Plus software, in an absorption refrigeration system with ammonia-water mixture, in order to contribute to the transference of solar cooling technologies to produce In the short term the introduction into the market of solar household refrigerators. The results obtained indicate that, for one ton of refrigeration, a mass of refrigerant in the evaporator of 0.9 kg/min will be necessary, reaching an average temperature inside the evaporator of -8.35°C . Similarly to activate the cooling cycle in the generator, it will be necessary that the temperature of the heat transfer fluid from the solar collector is at 160°C .

Cooling, Absorption, Solar, Simulation, Aspen Plus

Citación: JUÁREZ-BORBONIO, Jesús, VIDAL-SANTO, Adrián, BELTRÁN-CHACÓN, Ricardo y MALDONADO-SAAVEDRA, Octavio. Simulación de un sistema de refrigeración solar por absorción con mezcla $\text{NH}_3 / \text{H}_2\text{O}$, utilizando el software aspen plus. Revista de Tecnologías Computacionales 2017. 1-2:16-23

† Investigador contribuyendo como primer autor.

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: jesus.juarez@utcv.edu.mx

Introducción

La mayor parte de la energía renovable disponible en nuestro planeta proviene del sol, el origen y continuación de la humanidad está basado en la energía del mismo (Soteris A., 2009). Aun cuando la radiación solar se ha utilizado desde la antigüedad en procesos de secado de productos de consumo humano, hoy en día aún no se ha explotado al máximo y existe un gran potencial en diversos procesos, tales como secado de plantas medicinales, granos y carnes, producción eléctrica en centrales solares termoeléctricas y refrigeración solar. (Fundación Celestina Perez de Almada). De igual manera, para la refrigeración solar de absorción, será siempre indispensable la energía del sol como energía térmica, con la que se activa el proceso de la refrigeración, siendo 30% más efectiva que la refrigeración solar con sistemas PV (Ullah, R., H. W., R. K., & N. H., 2013). Sin embargo, en el caso de los sistemas de simple, medio y doble efecto siempre es necesario utilizar equipos auxiliares, tales como, bombas para transporte de la mezcla y la recirculación del fluido caloportador desde el colector hasta el generador, además de otras dos bombas, en caso de intercambiadores con agua, o ventiladores, cuando se utilizan intercambiadores a base de aire; que suelen utilizarse para acelerar la transferencia de calor en el evaporador y el condensador. Aunque estos últimos no son indispensables y en algunos casos se pueden omitir, dejando que la transferencia de calor se produzca naturalmente con el aire ambiental, por consecuencia baja el Coeficiente de desempeño del inglés (Coeficient of performance, COP), siempre existirá consumo de energía eléctrica en los equipos auxiliares (Pongsid, Satha, & Supachart, 2001).

Con el estudio aquí presentado se logró simular el ciclo de refrigeración por adsorción de simple efecto utilizando hidróxido de amonio como mezcla de trabajo, y con ello se obtuvieron los resultados de consumo energético de los sistemas auxiliares, así como la cantidad de calor necesaria en el generador, lo que permitirá dimensionar el colector solar que alimentara al sistema de refrigeración y contribuye así en plantear nuevas estrategias de ahorro en los equipos auxiliares, mejorando los sistemas de refrigeración solares en su autonomía.

Materiales y métodos

En la primera parte del proyecto se realizó un estudio de las cargas requeridas en el refrigerador de uso doméstico. Por lo tanto, se realiza un estudio de la carga térmica del refrigerador con base en la cantidad de alimentos que una familia de zonas rurales puede almacenar dentro del mismo.

Posteriormente en la segunda etapa del proyecto, se realizó la simulación del sistema de refrigeración por absorción con la ayuda del software Aspen Plus, el cual fue planteado basado en la carga térmica obtenida en la primera parte.

Es importante considerar que para este proyecto, la conservación de los productos no será por debajo del punto de congelación, por ser un refrigerador de uso doméstico, y no será necesario llegar a temperaturas menores de 0°C. En el estudio de la refrigeración a este fenómeno se le llama conservación de alimentos a corto plazo. Sin embargo la simulación está sobredimensionada para contrarrestar algunas pérdidas.

Para calcular la carga de refrigeración de productos, se plantean dos fórmulas, véase la ecuación 1 y 2 (Pita E. G., 2000)

- a) Calor sensible arriba del punto de congelación.

$$Q_1 = WC_1(T_2 - T_1) \dots\dots (1)$$

Dónde:

Q_1 Es calor sensible por arriba del punto de congelación del producto a refrigerar (BTU/hr).

T_1 Temperatura de los productos cuando estén en el interior de refrigerador (°F).

T_2 Temperatura de entrada, de los productos en el refrigerador (Inicial) (°F).

W Peso del producto a refrigerar (lb/hr).

C_1 Calor específico del producto a refrigerar (BTU/lb°F).

- b) Calor latente de congelación
- c)

$$Q_2 = Wh_c \dots\dots (2)$$

Para determinar la cantidad de masa de la mezcla de refrigerante y absorbente que genera una tonelada de refrigeración en el ciclo simulado en Aspen plus se utiliza la fórmula (Ec. 1.3)

$$Q = \dot{m} (h_4 - h_3) \dots\dots (3)$$

Para el cálculo de la eficiencia del ciclo de refrigeración es necesario calcular el coeficiente de desempeño COP (Coefficient of performance).

En el sistema en estudio se han definido dos COP's el primero denominado COP de enfriamiento véase la ecuación 4, y el segundo llamado COP real, véase la ecuación 5 (Vidal Santo, Adrián; Gómez, V. H.; García, C.; García, O.; Best, R., 2005). El segundo COP, se calcula tomando en cuenta los equipos auxiliares que serán instalados en el ciclo tales como ventiladores y bombas.

$$COP_{enf} = \frac{Q_{ev}}{Q_{ge}} \dots\dots (4)$$

$$COP_{real} = \frac{Q_{ev}}{Q_{ge} + W_{bs} + W_{ve,ab} + W_{ve,co}} \dots\dots (5)$$

W_{bs} El trabajo suministrado a la bomba

$W_{ve,ab}$ El trabajo requerido por el ventilador del absorbedor

$W_{ve,co}$ El trabajo requerido por el ventilador del condensador

Q_{ev} Calor evacuado

Q_{ge} Calor en el generador

Simulación del sistema de refrigeración

Para la simulación del generador mediante el software Aspen Plus¹, se instala un intercambiador de calor mismo que intercambia la energía que proviene del colector solar mediante un fluido caloportador hacia la mezcla de amoníaco/agua, las cuales se observan en las líneas 6 y 7 de la Fig. 1. En consecuencia, en la línea 8 se instala la torre de destilación de siete etapas, donde se logra la separación del amoníaco (ver Fig. 1).

¹ <http://www.aspentech.com/products/engineering/aspen-plus/>

La mezcla pobre en amoníaco se lleva nuevamente al mezclador para la correcta operación del absorbedor, sin embargo antes pasa por un intercambiador de calor el cual realiza la función de un del ingles Solution Heat-Exchanger (SHX), éste ultimo se utiliza para aumentar la eficiencia del ciclo, y posteriormente a la salida del intercambiador se instala una válvula de expansión para separar la zona de alta presión de la zona de baja presión. Por otra parte en la línea 9 que sale de la torre de destilación, sale el amoníaco en estado gaseoso que se envía al intercambiador de calor que cumple la función de un condensador, así mediante aire ambiental a temperatura ambiente; y con base a la temperatura y presión a la que se encuentra, pasa de la fase gaseosa a líquido.

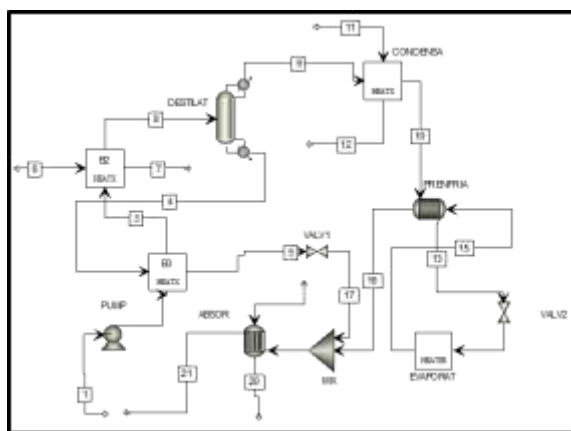


Figura 1 Ciclo de refrigeración por absorción de $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ simulado con Aspen Plus.

Aspen Plus es un software de los muchos que pertenecen a la familia Aspen Tech, diseñado para simular operaciones unitarias y procesos químicos industriales, (Simulación de procesos en ingeniería química, 2017) por esta razón para la simulación del sistema de refrigeración fue necesario adaptar algunos procesos del sistema de refrigeración, para que la simulación diera resultados confiables.

Por lo tanto, el generador se compone de un intercambiador de calor que recibe en su línea caliente el fluido caloportador procedente del colector solar de tubos evacuados y una torre de destilación de siete etapas, de igual forma el absorbedor se simula mediante un mezclador y un intercambiador de calor, véase la figura 1.

El sistema de refrigeración por absorción de simple efecto es el más sencillo y más comúnmente utilizado. Existen dos configuraciones, que dependen del fluido de trabajo que se esté usando.

La figura 2 muestra un sistema de simple efecto diseñado para utilizar un refrigerante no volátil como absorbente, tal es el caso de la mezcla libr/agua.

Cuando el fluido es volátil tal es el caso de la mezcla Agua/ NH_3 , el sistema requiere un elemento extra “el rectificador”, el cual purificara el refrigerante antes de que ingrese al condensador.

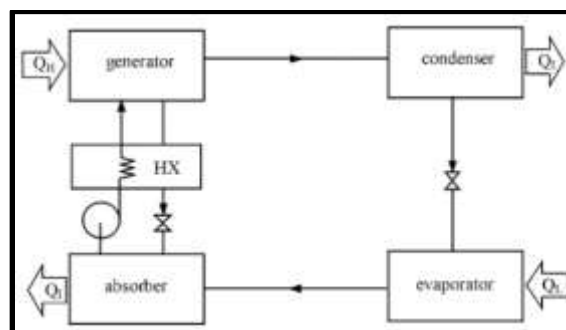


Figura 2 Tomado de (Pongsid, Satha, & Supachart, 2001)

En la figura 3 se muestra el absorbedor generado en el simulador Aspen Plus el cual es una combinación de dos elementos, el mezclador y el intercambiador de calor, con ello se logra simular el desempeño del absorbedor.

Cantidad de producto lb/h	Tipo de producto	Temp. Recomendada °F	(A) BTU/lb°F.	Temp. Deseada °F	Temp. Inicial de entrada a°F	(B) BTU x hrs
2.203	Tomates (Verdes)	55	0.92	39.2	86	94.88
2.203	Chiles	50	0.87	39.2	86	89.72
1.102	Cebollas	50	0.91	39.2	86	46.92
1.102	Aguacate	40	0.91	39.2	86	46.92
1.102	Papa	50	0.86	39.2	86	44.34
2.203	Carne de res	35	0.75	39.2	86	77.34
					Total	400.14

(A) Calor específico del producto Cp
(B) Calor sensible por encima del punto de congelación

Tabla 1

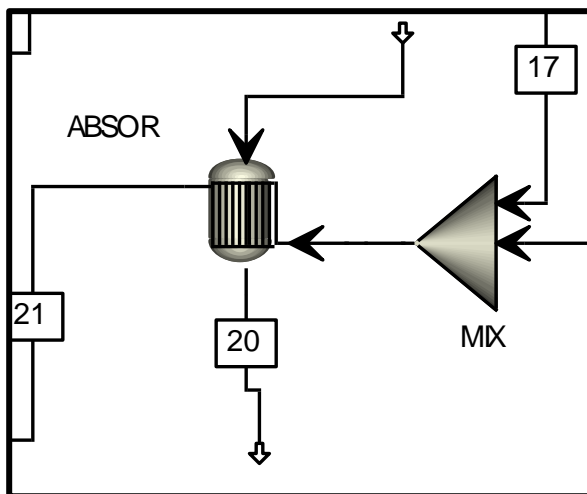


Figura 3 Representación del absorbedor en Aspen Plus

Resultados y discusiones

Los resultados del cálculo de la carga térmica del refrigerador se observan en la figura 4 y 5, la cual es proyectada a una tonelada de refrigeración; de tal manera que, si se requiere aumentar la capacidad del refrigerador se puede aumentar en unidades de refrigeración cada vez que sea necesario.

Calor sensible total en BTU x hr	Potencia de refrigeración total BTU x 24 hrs	Potencia de refrigeración expresada en Ton
400.14	9,603.38	0.800
	Sumando el 15% por pérdidas diversas*	0.92
	Capacidad de diseño del refrigerador	1

Tabla 2 Cálculo de la carga basada en los productos almacenados

Los cálculos de la carga térmica son sustentados con base en los requerimientos de conservación de alimentos por abajo del punto de congelación.

Parámetros	Valores obtenidos
Cop_{enf}	0.64
Cop_{real}	0.59
RC	4.084
RF	5.084

Tabla 3 Capacidad calorífica del refrigerador.

Los resultados obtenidos indican que el sistema de refrigeración por absorción alcanza una temperatura máxima promedio de -8.35°C en el evaporador, siendo la temperatura máxima de -10.21°C y la mínima es de -6.49°C ; temperaturas que suelen ser incluso muy elevadas para la conservación de los alimentos, véase la figura 6.

Los resultados muestran que la cantidad de refrigerante será de 39.27% aproximadamente y la de absorbente será de 60.73%. Con éste porcentaje de refrigerante y absorbente, se obtiene una buena absorción (Dincer & Kanoglu, 2010). Así mismo, una cantidad de masa de refrigerante de 0.9 kg/s será requerida.

Accesorio	Nombre del parámetro	Valor de entrada	Valor de salida
1 CONDENSADOR	Temperatura (°C) línea caliente	72.73	40.07
	Temperatura (°C) línea fría	25	25.003
	Fluido de línea fría	Aire ambiente	
	Presión en línea caliente (Bar)	15.53	15.53
2 EVAPORADOR	Presión en línea fría (Bar)	1.5	1.5
	Temperatura de salida (°C)	-10.21	-6.49
	Presión de salida (Bar)	2.8	2.8
	Fracción de vapor	0.071	0.95
3 ABSORBEDOR	Temperatura (°C) línea caliente	55.97	37.78
	Temperatura (°C) línea fría	25	25.003
	Fluido de línea fría	Aire ambiente	
	Presión en línea fría (Bar)	1.5	1.5
	Presión en línea caliente (Bar)	2.8	3.28
	Fracción de vapor	0.1858	0

Tabla 4 Resultados obtenidos de la simulación del ciclo con Aspen Plus

Para el coeficiente de desempeño del ciclo simulado, los valores obtenidos de los COP's se muestran en la figura 7, donde se muestra también la relación de circulación RC, que es la masa de solución pobre dejando el generador entre la masa de refrigerante saliendo del generador y la relación de flujo RF que es la masa de solución rica que entra al generador entre la masa de refrigerante saliendo del generador.

Parámetros	Valores obtenidos
COP_{enf}	0.64
COP_{real}	0.59
RC	4.084
RF	5.084

Tabla 5 Resultados de los COP's, RC y RF

Por otra parte utilizando los datos de la simulación en Aspen Plus se obtienen los valores de consumo energético de los equipos auxiliares los cuales se presentan en la figura 8, donde se observa que el consumo energético no es alto.

Equipo	Trabajo requerido W_s (Watts)	Trabajo real requerido W_{sh} (Watts)
Ventilador del condensador	213.33	250.98
Ventilador del absorbedor	366.66	431.36
Bomba	28.93	30
Bomba recirculación de fluido caloportador	28.93	30
Total	607.85	742.34

Tabla 6 Consumo energético de los equipos auxiliares.

Conclusiones

Una gran ventaja de la simulación con Aspen Plus radica en que una vez que se ha configurado el proceso y se ha comprobado que la simulación no contiene errores, se pueden realizar pruebas con diferentes valores de entrada al proceso, las veces que sea necesario. De tal manera que se pueden simular diferentes capacidades de un refrigerador.

En este trabajo se simuló varias veces hasta que se logró diseñar las características de un refrigerador con capacidad de una tonelada de refrigeración.

Los resultados de la simulación muestran las características para cada elemento de un sistema de refrigeración por absorción, por lo tanto, como se muestra en la figura 4, las temperaturas a las que opera el refrigerador son menores a 0°C, así mismo, las temperaturas necesarias en el absorbedor y el condensador son encontradas, lo que nos resulta importante para el dimensionamiento de los elementos reales del sistema. De igual manera los datos de la simulación permiten el dimensionamiento de los equipos auxiliares y el cálculo de la eficiencia del ciclo.

Los valores del COP obtenidos permiten asegurar un desempeño aceptable del ciclo de refrigeración, lo que nos permite, reconocer también posibilidades para mejorar el proceso si se logran disminuir algunas pérdidas de energía en equipos auxiliares.

Después de la simulación queda abierta la posibilidad para trabajar con otros sistemas de refrigeración por absorción, por ejemplo, sistemas de doble efecto o efecto medio, incluso, se podrían simular también con otras mezclas tales como el $\text{brli}/\text{H}_2\text{O}$ u otros.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial al Dr. Adrián Vidal Santo quien aceptó el reto de dirigir el proyecto y al Dr. Ricardo Beltrán Chacón quien revisó y asesoró el proyecto como coasesor de la tesis de maestría de la cual se desprende el presente artículo.

De igual manera se agradece profundamente las revisiones del Dr. (c) Octavio Maldonado Saavedra en la presentación del presente artículo.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Daniel Villanueva Vázquez quien revisó el formato y el estilo del documento.

Referencias

- Dincer, I., & Kanoglu, M. (2010). *Refrigeration Systems and Applications* (Second edition ed.). The Atrium UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Fundacion Celestina Perez de Almada. (s.f.). *Guia de Uso de secadores solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes*. Asunción, Paraguay: Fundacion Celestina Perez de Almad.
- Pita, E. G. (2000). Sistemas y equipos de refrigeracion. En *Acondicionamiento de aire: Principios y Sistemas* (Segunda edición ed., págs. 355 - 385). Mexico D.F.: CECSA.
- Pongsid, S., Satha, A., & Supachart, C. (2001). A review of absorption refrigeration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 343-372.

Romero, D. M. (2008). Energía Solar Termoelectrica. *Jornadas sobre la energía "Energías del mañana"* (pág. 4). Madrid España: IMDEA Energía.

Simulación de procesos en ingeniería química. (17 de Julio de 2017). Obtenido de Simulación de procesos en ingeniería química: <http://modeladoysimulacioneniqu.webnode.es/simulacion-en-ee/simulacion-de-procesos-quimicos-usando-aspen-plus/>

Soteris A., K. (2009). Solar Energy Engineering: Processes and Systems. En K. Soteris A., *Solar Energy Engineering: Processes and Systems* (pág. 1). San Diego California: Elsevier Inc.

Ullah, K., R., S., H. W., P., R. K., A., & N. H., S. (2013). A review of solar thermal refrigeration and cooling methods. *Renewable and Sustainable energy Reviews*, 501.

Vidal Santo, Adrian; Gomez, V. H.; García, C.; García, O.; Best, R. (2005). Simulación numérica y validación experimental de un ciclo de refrigeración por absorción, solar GAX. *SSDA*, 2-15.