

COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LA ETAPA DE GENERACIÓN DE UN REFRIGERADOR SOLAR OPERANDO CON LA MEZCLA $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$

G. Moreno-Quintanar^{1*}, W. Rivera², C. O. Rivera³

¹ Posgrado en Ingeniería, Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México 62580 Temixco, Mor., México

² Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México A.P.34, 62580 Temixco, Mor., México

³ Facultad de Ingeniería Campus Coatzacoalcos, Universidad Veracruzana Av. Universidad Km 7.5, 96530 Coatzacoalcos, Ver., México

* gmq@cie.unam.mx

RESUMEN

El uso de la energía solar en aplicaciones de refrigeración tiene un gran potencial de desarrollo ya que cuando la escasez de los hidrocarburos sea mayor estas tecnologías tendrán un costo más competitivo.

En el Centro de Investigación en Energía (CIE) de la UNAM, se encuentra un refrigerador solar intermitente que opera en un ciclo por absorción. El refrigerador esta compuesto de un condensador, una válvula de expansión, un evaporador y un generador/absorbedor. La energía la recibe a través de un colector parabólico compuesto (CPC) que transforma la energía solar a energía térmica concentrándola en su receptor cilíndrico que es el generador/absorbedor.

La mezcla que utiliza este refrigerador es amoníaco-nitrato de litio ($\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$) que presenta ventajas con respecto a la mezclas más comunes, como el hecho de no necesitar rectificación y operar a presiones manométricas relativamente bajas. Una de sus desventajas es que presenta cristalización a bajas concentraciones.

El refrigerador al ser intermitente realiza dos etapas para completar un ciclo de refrigeración: una etapa de generación-condensación y otra de evaporación-absorción. Este trabajo se enfoca en la evaluación de la etapa de generación-condensación.

Se realizaron 37 pruebas operando con la mezcla binaria $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$, trabajando a 3 concentraciones: 48%, 49% y 50% de amoníaco, con diferentes temperaturas de agua de enfriamiento en el condensador de 26°C, 28°C y 30°C. El refrigerador solar obtuvo el mejor rendimiento en la etapa de generación de amoníaco al operar con la mezcla binaria al

49% y al 50% de concentración. El cambio de temperatura de agua de enfriamiento de 26°C a 30°C con incrementos de 2°C no presenta cambios en el rendimiento del equipo.

Prefiero presentación oral.

1.- Introducción

El potencial de energía solar en México es de los más altos del mundo, al encontrarse dentro del cinturón más favorable formado por la franja entre las latitudes de 15° y 35° . La mayor parte del territorio tiene una insolación media anual de 5 kWh m^{-2} [1]. por día equivalente a 18 MJ m^{-2} , en algunos lugares se llega a 6 kWh m^{-2} [2] equivalente a 21.6 MJ m^{-2} .

La energía solar puede apoyar a reducir la demanda de energía eléctrica basada en hidrocarburos, abriendo la posibilidad de proveer energía a poblaciones a las cuales no llega mediante la distribución convencional. El uso de la energía solar en aplicaciones de refrigeración tiene un gran potencial de desarrollo ya que cuando la escasez de los hidrocarburos sea mayor estas tecnologías tendrán un costo más competitivo.

Se han reportado diversos trabajos sobre refrigeración solar por absorción tanto teóricos como experimentales, de los cuales pocos han trabajado con la mezcla amoníaco-nitrato de litio ($\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$) aunque se reporta como prometedora para refrigeración solar.

Antonopoulos y Rogdakis en 1996, describen el comportamiento de un sistema de absorción operado con energía solar empleando amoníaco-nitrato de litio y amoníaco-tiocianato de sodio. Concluyen que el amoníaco-nitrato de litio provee una mayor potencia de enfriamiento, mientras que el amoníaco-tiocianato de sodio alcanza un mayor coeficiente de operación [3].

Da-Wen en 1998 lleva a cabo un análisis termodinámico para comparar los ciclos de amoníaco-agua, amoníaco-nitrato de litio y amoníaco-tiocianato de sodio. Los ciclos amoníaco-nitrato de litio y amoníaco-tiocianato de sodio tienen mejor desempeño que el ciclo amoníaco-agua [4].

En el Centro de Investigación en Energía (CIE) ha sido probado un prototipo de refrigeración solar diseñado por Rivera en 2006 [5] operado con la mezcla $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$, Martínez en 2008 [6], realizó pruebas experimentales con el equipo operando en un rango de concentraciones de 44% a 47%.

En este trabajo se realiza la evaluación de este refrigerador operándolo a concentraciones de 48% a 50% variando la temperatura de agua de enfriamiento en un rango de 26°C a 30°C con incrementos de 2°C .

2.- Descripción del refrigerador y su funcionamiento.

El prototipo experimental evaluado en este trabajo, es un refrigerador solar intermitente que opera bajo el principio de absorción cuya fuente de energía principal es la energía solar. Fue diseñado para producir 8 kg de hielo y operar con la mezcla $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$, amoníaco como refrigerante y nitrato de litio como absorbente. En la Figura 1 se muestra una foto del equipo.

El sistema consta de un Colector Parabólico Compuesto (CPC) cuyo receptor cilíndrico funciona como generador/absorbedor, un condensador, un tanque de almacenamiento de amoníaco, un tubo capilar, una válvula de aguja y un evaporador. Para operar el refrigerador y recabar información de su comportamiento se cuenta con sistemas de instrumentación, control y adquisición de datos.

Al ser un refrigerador intermitente el proceso se realiza en dos etapas, estas etapas se nombran de generación y de evaporación según el proceso que se lleve a cabo en el refrigerante.

La etapa de generación comienza en el generador/absorbedor donde se recibe energía térmica que calienta la solución hasta llevarla al punto de saturación, en este punto el amoníaco comienza a separarse en forma de vapor de la mezcla y por diferencia de densidad llega al condensador donde se le retira energía por medio de agua de enfriamiento para que salga en estado líquido y pueda ser almacenado en el tanque de condensado.

Una vez que la presión y la temperatura bajan en el generador/absorbedor la etapa de evaporación puede comenzar. El proceso se da cuando el amoníaco líquido fluye del tanque de condensados hacia el evaporador atravesando el tubo capilar. A la salida del tubo capilar el amoníaco se encuentra en una mezcla líquido-vapor con una temperatura baja que permite recibir calor del interior del evaporador provocando el efecto de enfriamiento. Al absorber energía el amoníaco sale del evaporador en forma de vapor para ser reabsorbido por la solución en el interior del generador/absorbedor mediante un tubo difusor completando el ciclo de refrigeración.



Figura 1. Foto del refrigerador solar

3.- Resultados

A continuación se describirán dos: pruebas una de generación y otra de evaporación para explicar el comportamiento de las propiedades de temperatura y presión a lo largo del sistema durante su operación. En todas las pruebas se encontraron tendencias similares con variaciones en el valor de las propiedades.

En la Figura 2 se muestran las temperaturas y presión del proceso de generación del día 26 de febrero de 2009 en el cual se generó 5.05 L de amoníaco correspondientes a 2.97 kg operando con la mezcla a 50% de concentración. En este día la prueba inició a las 9:00 y terminó a las 16:00, se considera el fin de la prueba cuando el dato de volumen de amoníaco en el tanque de condensado se repite en un intervalo de 45 minutos. La temperatura de la solución T_s inicia por debajo de la temperatura ambiente, a partir de las 9:15 se aprecia una tendencia de aumento lineal. Después del inicio de la generación continuando esta tendencia con una pendiente menor, al final del proceso desciende la razón de aumento de temperatura llegando a un máximo de 110.9°C . La presión del generador P_g inicia en 1.44 bar con una tendencia a aumentar notándose un cambio al inicio de la generación y llega a su máximo de 12.73 bar a las 15:00 para terminar con una ligera disminución.

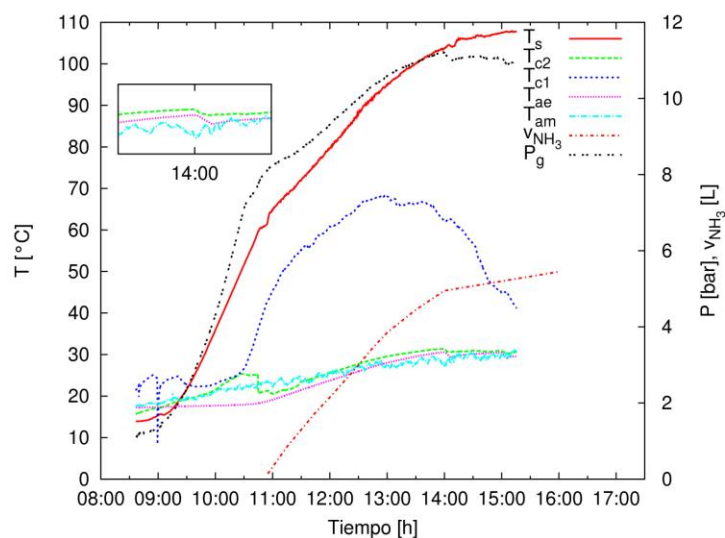


Figura 2. Temperaturas y presión del proceso de generación de la prueba del día 24 de febrero del 2009.

La temperatura de entrada del condensador T_{c1} tiene forma de campana, al principio del proceso se nota una caída drástica en la temperatura debida al encendido de la bomba de circulación del agua de enfriamiento que provoca un coeficiente convectivo alto reflejado en la disminución de temperatura la cual rápidamente se recupera, el aumento de ésta temperatura comienza al inicio de la generación cuando el vapor de amoníaco generado ingresa al serpentín del condensador, alcanzando su máximo para después disminuir hasta que finaliza el proceso.

Al principio del proceso el agua de enfriamiento que circula por el exterior del serpentín mantiene una temperatura T_{ae} constante, hasta el momento en que T_{c1} aumenta, ya que recibe el calor del vapor de amoníaco que circula por el interior del serpentín para condensarlo, al final se nota un pequeño diente de sierra debido a la operación del control de temperatura que actúa para mantener ésta temperatura en un rango de 29.5°C a 30.5°C.

La temperatura a la salida del condensador T_{c2} , al principio del proceso, es independiente de la presión del generador ya que en este lugar se encuentra vapor de amoníaco, unos minutos después del inicio de la generación esta temperatura presenta una caída debido a que ha llegado amoníaco líquido proveniente del serpentín, después de este momento P_g

depende de T_{c2} esto se observa al comparar las tendencias de ambas curvas, notando que a las 14:00 presentan un descenso idéntico.

La temperatura ambiente, T_{am} , se encuentra en constante aumento, al principio del proceso todas las temperaturas excepto T_{c1} están por debajo de ésta. A lo largo de todo el proceso T_{ae} y T_{c2} tienen magnitudes similares a T_{am} finalizando por encima de ésta.

La etapa de evaporación durante la cual se da el proceso de absorción, se describirá con la prueba del día 3 de diciembre del 2008 operando el sistema a la concentración de 48%, evaporando 4.4 L de amoníaco correspondientes a 2.62 kg.

En la Figura 3 se muestran las temperaturas registradas durante la etapa de evaporación. T_{e1} indica la temperatura a la entrada del evaporador, que coincide con la salida de la válvula de expansión, cuando fluye el amoníaco del tanque de condensado hacia el evaporador atravesando el tubo capilar, sufre una caída de temperatura abrupta debida a la caída de presión y tiende a aumentar siguiendo una curva siempre por debajo de 0°C . El amoníaco líquido se encuentra en el tanque de condensados a una presión P_t atraviesa el tubo capilar y se expande hasta P_v , la presión a la salida del tubo capilar. La presión a la salida de la válvula P_v , es menor a 3 bar lo cual permite que T_{e1} esté por debajo de 0°C favoreciendo así la transformación del agua del interior del evaporador en hielo. Las temperaturas comienzan con valores muy cercanos a la ambiente, T_{ei} la temperatura del aire en el interior del evaporador sigue una curva con una disminución pronunciada que la acerca a T_{e1} para seguir una tendencia similar, unos grados por encima.

La temperatura del agua al interior del evaporador T_{ea} disminuye linealmente hasta llegar a 0°C donde inicia el cambio de fase de líquido hacia sólido manifestándose como una línea horizontal de temperatura constante.

La temperatura a la salida del evaporador T_{e2} inicia a 15°C describiendo una curva que al principio presenta una disminución lenta para después descender rápidamente hasta llegar a la misma temperatura que T_{ei} donde se unen y continúan la misma tendencia.

La transferencia de calor es una función de la diferencia de temperaturas, en el caso del evaporador la diferencia entre la entrada y la salida. Ésta diferencia es grande la primera hora del proceso con tendencia a disminuir, indicando que la tasa de transferencia de calor es alta; después de esto la diferencia se reduce, estando T_{e2} solo unos grados arriba de T_{e1} .

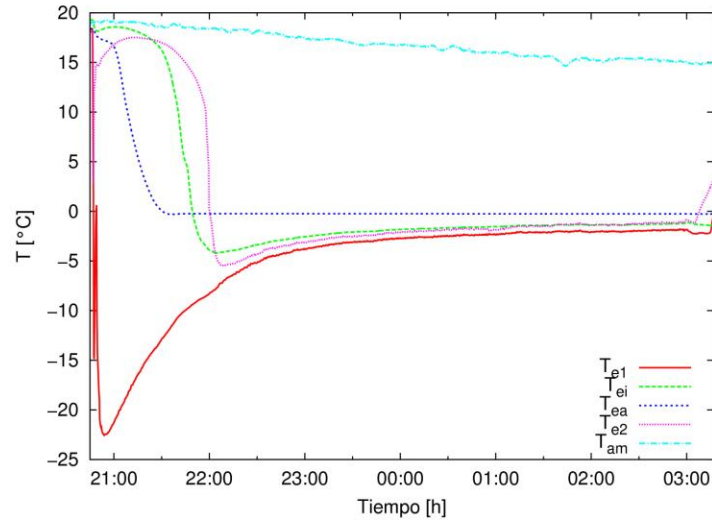


Figura 3. Temperaturas en el proceso de evaporación de la prueba del día 8 de diciembre del 2008.

La temperatura ambiente, T_{am} , disminuye lentamente debido al horario nocturno de realización de la prueba, esto es de vital importancia porque gracias a este comportamiento se tienen menores pérdidas de energía al ambiente.

Para comparar el rendimiento de las pruebas se utilizan los siguientes parámetros:

La insolación que se calcula como la suma del producto de la radiación global por el tiempo transcurrido entre cada medición para cada dato adquirido.

$$H = \sum \alpha t \quad (1)$$

La energía recibida se calcula como la insolación por el área de apertura del colector

$$E_r = HA \quad (2)$$

La eficiencia del CPC es la energía útil de generación entre la energía recibida.

$$\eta_{CPC} = \frac{Q_g}{E_r} \quad (3)$$

El coeficiente de operación equivalente (COPE) es un parámetro para evaluar el proceso de generación, calculándose como la relación entre la masa de amoniaco generado y la energía recibida.

$$\text{COPE} = \frac{m_{\text{NH}_3}}{E_r} \quad (4)$$

Se realizaron 37 pruebas exitosas operando con la mezcla $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$, trabajando a 3 concentraciones: 48%, 49% y 50% de amoniaco, con diferentes temperaturas de agua de enfriamiento en el condensador de 26°C, 28°C y 30°C. Por cada concentración se hacen en promedio 4 pruebas con cada temperatura de agua de enfriamiento.

En la Figura 4 se muestra el COPE para cada prueba realizada, el color indica la concentración, rojo 48%, azul 49% y negro 50%, mientras que la temperatura del agua de enfriamiento es diferenciada por el símbolo; círculo para 26°C, triángulo para 28°C y cuadrado para 30°C.

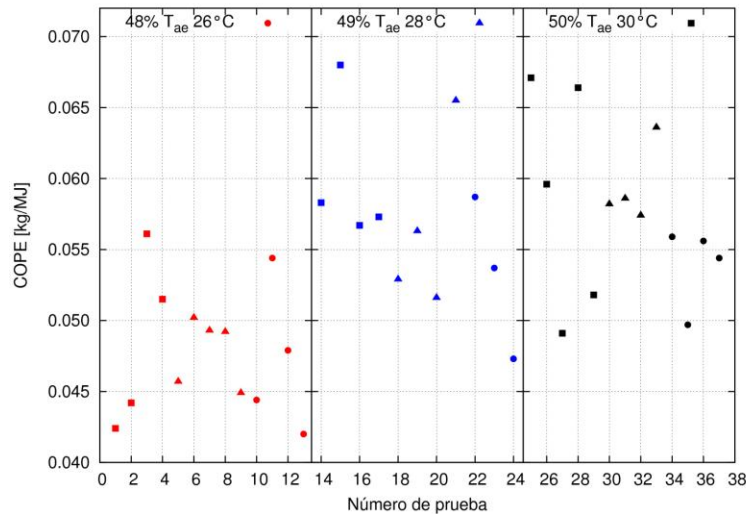


Figura 4. COPE de las pruebas de generación.

Los valores de COPE se presentan en la gráfica de la Figura 4, en ésta figura se puede apreciar que existe una aumento en los valores del COPE al aumentar la concentración

aunque presentan gran dispersión. La dispersión de los datos se debe a que en el proceso de experimentación se tienen variables que no se pueden controlar como lo son la insolación y la temperatura ambiente.

A los valores de los parámetros de comparación se les realizó un análisis estadístico y pruebas de significancia para conocer si la variación de la temperatura del agua de enfriamiento influye en parámetro.

Las pruebas de significancia consisten en realizar una prueba F a dos muestras para conocer si la desviación estándar de las muestras es igual o diferente con un nivel de confianza de 95%, el resultado define el estadístico que se usara para realizar la prueba t y concluir si las muestras pertenecen a la misma población o no, usando el mismo nivel de confianza [7].

La Figura 5 muestra los datos promedio del COPE para las pruebas en función de la concentración y la temperatura de enfriamiento, se aprecia que las aletas de error estándar son grandes y las pruebas concluyen que no existe diferencia entre los parámetros de comparación por lo cual se decide agrupar los datos únicamente por concentración.

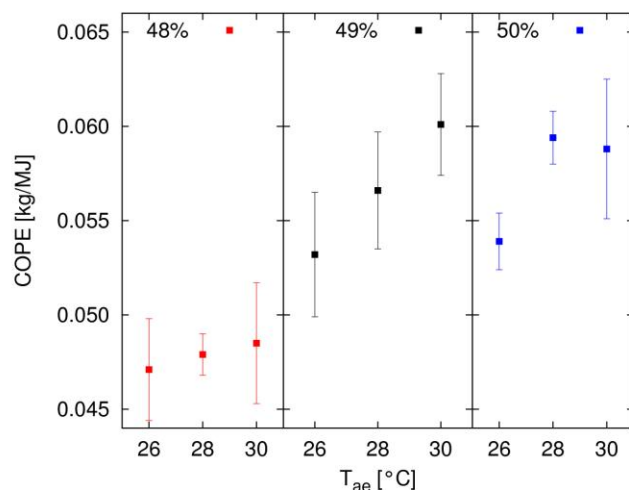


Figura 5. Valores promedio del COPE de las pruebas de generación.

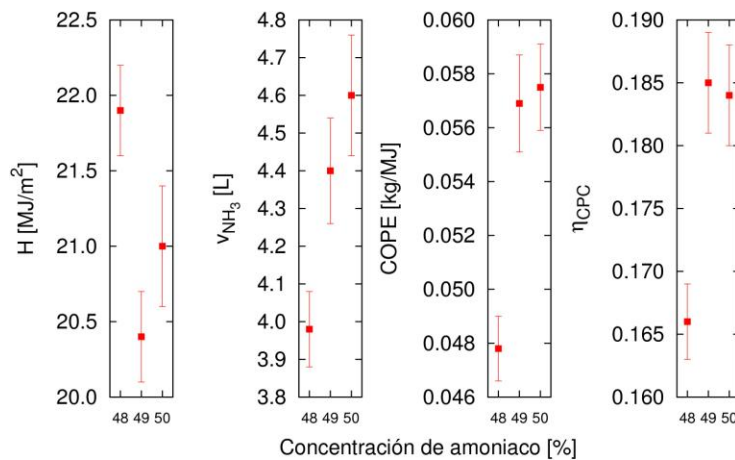


Figura 6. COPE promedio con su error estándar.

El valor promedio de los parámetros de comparación de las pruebas agrupados por concentración se presentan en la Figura 6, en la cual se puede ver que el mejor COPE lo presenta las pruebas operando con la mezcla a 50% de concentración y el menor rendimiento lo presenta la mezcla a 48% ya que obtuvo los valores más bajos de los parámetros. Se generó en promedio 4.6 L de amoníaco con la mezcla de 50%, valor máximo.

Las pruebas de significancia indican que existe diferencia entre la concentración de 48% y 49% pero no existe diferencia entre los parámetros de 49% y 50%.

4.- Conclusiones

Al realizar el análisis estadístico y las pruebas de significancia se concluyó que estadísticamente no hay diferencia entre los parámetros de generación debido al cambio de temperatura de agua de enfriamiento.

La operación del refrigerador a la concentración de 50% presenta los mejores resultados de la mezcla binaria con el mayor volumen generado de amoníaco, 5.45L (3.25kg) y un COPE promedio de 0.058.

Estadísticamente no existe diferencia en el rendimiento de la etapa de generación al operar el sistema con la concentración de 49% y la de 50%.

5.- Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto IN110706-2 de PAPIIT-UNAM por el apoyo financiero otorgado para el desarrollo de esta investigación.

Los autores agradecen al Dr. Victor Hugo Gómez Espinoza por su ayuda para la realización del trabajo experimental.

6.- Referencias

- [1] R. Almanza V. Estrada, J. Barrientos, *Actualización de los Mapas de Irradiación Global Solar en la República Mexicana*, Series del Insituto de Ingeniería 543, UNAM, (1992).
- [2] P. Mulás et al, *Prospectiva sobre la utilización de las energías renovables en México. Una visión al año 2030*. Universiad Autónoma Metropolitana, (2005).
- [3] K. Antonopoulos y E. Rogdakis, *Applied Thermal Engineering*, 11, 1775, (1995).
- [4] Da-Wen Sun, *Energy Convers*, 39, 357, (1997).
- [5] C. O. Rivera, *Simulación, diseño y evaluación de un refrigerador solar intermitente usando un CPC como generador-absorbedor* , Tesis Doctoral UNAM, (2006).
- [6] J. F. Martínez, *Optimización de un refrigerador solar para la producción de hielo* , Tesis Maestría UNAM, (2008).
- [7] S. P. Verma., *Estadística básica para el manejo de datos experimentales: aplicación en geoquímica (geoquimiometría)* , CIE UNAM, (2005).

7.- Nomenclatura

A	Área de apertura del concentrador	[m ²]
E	Energía	[J]
G	Radiación global	[W m ⁻²]
H	Insolación	[J m ⁻²]
P	Presión	[bar]
Q	Calor	[J]
T	Temperatura	[° C]
COPE	Coficiente de operación equivalente	[kg J ⁻¹]
m	Masa	[kg]
t	Tiempo	[s, h]
v	Volumen	[L]

Letras griegas

η Eficiencia [adimensional]

Subíndices

CPC Colector Parabólico Compuesto

ae Agua de enfriamiento

am Ambiente

c1 Entrada del condensador

c2 Salida del condensador

e1 Entrada del evaporador

e2 Salida del condensador

ea Agua dentro del evaporador

ei Interior del evaporador

g Generador/absorbedor

r Recibida

s solución

t Tanque

ug Útil de generación

v Salida de la válvula