

Anteproyecto de Doctorado en Ingeniería

Estudiante: Sergio Ulises Llamas Guillén

4 de diciembre de 2006

Proyecto:

“Evaluación teórico-experimental de un absorbedor acoplado a un sistema de refrigeración solar por absorción amoniaco / nitrato de litio”

Antecedentes

Cuando el hombre avanzó en la agricultura y logró una abundante producción de alimentos se vio en la necesidad encontrar una forma de conservarlos, dicha necesidad dio origen a la refrigeración.

El desarrollo de los sistemas de refrigeración tuvo mayor auge en los sistemas por compresión, con los cuales convivimos diariamente en nuestros hogares; sin embargo, actualmente existe una crisis de recursos energéticos por lo que necesitamos desarrollar nuevos sistemas que permitan el uso más eficiente de tales recursos, como es el caso de la refrigeración por absorción. En los sistemas de refrigeración por absorción, la energía se suministra en forma térmica por lo cual es posible utilizar energías alternas para su funcionamiento, como la energía solar, energía de desecho de alguna industria, entre otras.

La tecnología de absorción comenzó a desarrollarse para aplicaciones tales como acondicionamientos de espacios; las mezclas de trabajo estudiadas para estos procesos fueron en un principio: amoniaco / agua y amoniaco / bromuro de litio; sin embargo, se han comenzado a desarrollar desde hace algún tiempo nuevas mezclas de trabajo, como es el caso de amoniaco / nitrato de litio, el cual se pretende utilizar en este trabajo. La refrigeración por absorción también tiene aplicaciones en sistemas de cogeneración, es decir, la producción conjunta de electricidad o energía mecánica y energía térmica útil; en estos sistemas, la refrigeración mejora la eficiencia de combustión.

La energía solar ha sido motivo de múltiples investigaciones, y sin necesidad de técnicas complicadas. Cada vez se encuentran más aplicaciones, sumamente prácticas y atractivas, por ejemplo la calefacción y enfriamiento de edificios, bombeo de agua en áreas rurales, producción de vapor de agua industrial, secado, descontaminación, etc.

Para este trabajo, se utilizará la forma directa de la energía, que es el calor; esta aplicación se logra mediante los colectores térmicos o solares. Actualmen-

te contamos con tecnologías que nos permiten obtener altas temperaturas. Los colectores de placa plana son los dispositivos térmicos de aprovechamiento solar más comunes por su fácil construcción y bajo costo, sin embargo, presentan fuertes limitaciones cuando se pretende alcanzar temperaturas mayores a los 90 °C. Sin embargo, existe la tecnología para aprovechar el potencial de la energía solar, ejemplos de esto son los colectores de tubos evacuados, reflectores parabólicos, reflectores parabólicos compuestos, refractor Fresnel, refractor cilíndrico, refractor de plato parabólico, reflector de plato esférico y campo de helióstatos; con lo cuales se pueden obtener temperaturas superiores a los 100 °C, con una infinidad de aplicaciones. Los sistemas de absorción, como los de amoníaco / agua, permiten obtener temperaturas de trabajo para el evaporador por debajo de 0 °C, pero las temperaturas de operación para el generador se encuentran alrededor de 120 °C o superiores, en el caso de simple efecto; en el caso de agua / bromuro de litio, las temperaturas de generación pueden ser de 80 °C o superiores, pero las temperaturas de trabajo del evaporador no pueden ser menores a 0 °C; en general se trabaja en un rango de 7-13 °C. Con la mezcla de amoníaco / nitrato de litio, se puede trabajar en el evaporador con temperaturas por debajo de 0 °C y el generador con temperaturas de 80 °C o superiores, por lo que la utilización de colectores de bajo costo es posible con esta mezcla.

Otro punto importante que se debe señalar es la disminución de la capa de ozono y el calentamiento global, que fue provocada principalmente por los refrigerantes utilizados en décadas pasadas, conocidos como clorofluorocarbonos (CFC). La firma del protocolo de Montreal ha restringido el uso de refrigerantes que disminuyen la capa de ozono. El amoníaco es noble con el ambiente, por lo cual representa una ventaja importante en este tipo de equipos que hay que tomar en cuenta, sin olvidar que, aunque no presentan daños a la capa de ozono, si pueden tener riesgos para la salud humana; por lo que hay que tener un buen manejo y seguridad del equipo.

Para este trabajo se pretende utilizar la mezcla de amoníaco / nitrato de litio, para ser utilizada en el equipo de refrigeración que se encuentra en el Centro de Investigación en Energía junto con el acoplamiento a colectores solares de tubos evacuados.

Introducción

El amoníaco es un refrigerante comercial de uso muy extendido en refrigeración por sus múltiples ventajas derivadas de sus excelentes propiedades termodinámicas y termofísicas. En los sistemas de refrigeración por absorción, el amoníaco es utilizado en combinación con el agua, que actúa como absorbente. Esta mezcla es utilizada en aplicaciones industriales y comerciales, en particular en aplicaciones donde se requieren temperaturas por debajo de 0°C[1]. En aplicaciones de pequeña capacidad se han desarrollado enfriadoras de agua, para aire acondicionado, de llamas directas y condensadas por aire. Es también la mezcla utilizada en sistemas de absorción avanzados del tipo GAX por la posibilidad de ser operados a altas temperaturas de generación lográndose una alta integración energética interna.

Una de las mayores desventajas de las mezclas de amoníaco-agua es la necesidad de la rectificación para separar el agua de los vapores de amoníaco provenientes del generador, debido a la escasa volatilidad relativa de dichos dos fluidos. Esta rectificación es indispensable ya que la presencia del agua en el evaporador reduce su capacidad frigorífica[2][3]. Esta purificación requiere la disipación de energía térmica y de equipo adicional de gran volumen, que puede llegar a ser considerable conforme se incrementa la temperatura de generación o cuando se requieren temperaturas de evaporación muy bajas (-10 a -20 °C) para aplicaciones de refrigeración.

Por otro lado, se ha propuesto a partir de los trabajos de Gensch[4] en 1937, la utilización de la sal de nitrato de litio como una alternativa al agua como absorbente para el amoníaco, produciendo una mezcla de trabajo en sistemas de absorción que no requiere rectificación. Además de esta ventaja, para bajas temperaturas de evaporación, esta mezcla opera a temperaturas de generación por debajo de las que requiere la mezcla amoníaco-agua. Esta última ventaja es de gran interés en aplicaciones con fuentes de energía de baja temperatura como la energía solar, geotérmica o con calor residual de proceso. Niebergall[5] publicó los datos de Gensch del equilibrio líquido-vapor de esta mezcla, además de algunos otros datos de propiedades termofísicas. Posteriormente, Infante-Ferreira en la Universidad de Delft, midió propiedades termodinámicas y termofísicas de la mezcla y propuso una serie de ecuaciones para su determinación[6]. Aggarwal[7] presentó ecuaciones de propiedades de equilibrio líquido-vapor que concuerdan básicamente con las proporcionadas por Infante Ferreira.

Las ecuaciones de Infante-Ferreira, han sido utilizadas por varios autores en estudios sobre ciclos de absorción operados con fuentes de energía térmica de baja temperatura. En dichos trabajos se estudiaron sistemas de simple efecto[8][9] así como de doble etapa o medio efecto[10].

La utilización de la energía solar térmica para sistemas de absorción de simple efecto que produzcan frío a bajas temperaturas (0 a -20°C) requiere de una tecnología solar eficiente que proporcione una fuente de calor entre 80 y 120°C. Existen actualmente captadores solares del tipo de tubos de vacío con tubos de calor, o bien del tipo de concentradores sin seguimiento tipo Compound Parabolic Concentrator CPC, con eficacias adecuadas a estas temperaturas. Los sistemas de refrigeración por absorción de medio-efecto pueden ser accionados por captadores solares de placa plana.

Es relevante en estos estudios la coincidencia en demostrar la ventaja termodinámica de la mezcla amoníaco-nitrato de litio de operar a temperaturas por debajo de los 0°C con temperaturas de operación inferiores a las de agua-amoníaco. Esto es aun más evidente cuando se incrementan las temperaturas de disipación de calor en el absorbedor y condensador.

Sin embargo, esta mezcla no carece de desventajas, ya que presenta el riesgo de cristalización a concentraciones inferiores a 30 % en peso de amoníaco, y muy especialmente, una gran viscosidad que afecta negativamente a los procesos de

transferencia de masa y calor en el generador y el absorbedor.

Existen varios trabajos experimentales con la mezcla amoniaco-nitrato de litio, entre los que se encuentran los primeros trabajos publicados por Chinnappa, Infante-Ferreira, Ayala, Heard, Rivera et al.[11]. Es interesante recalcar que Infante Ferreira destaca la existencia de pocas ventajas en operar el absorbedor con temperaturas de agua de enfriamiento bajas porque el beneficio termodinámico se ve sobrepasado por la desventaja de operar con la alta viscosidad de la solución a esas temperaturas. Rivera et al.[11] calcularon los coeficientes de transferencia de calor para las mezclas amoniaco-agua y amoniaco-nitrato de litio en convección forzada y compararon las dos mezclas. En sus resultados, observaron que los coeficientes de transferencia de calor para amoniaco-nitrato de litio fueron de dos a tres veces inferiores a los de amoniaco-agua. Heard hace una referencia a una reducción del COP y la potencia frigorífica esperada debido principalmente a la baja eficiencia en el proceso de absorción debido a la significativa viscosidad de la solución. En la Universidad Carlos III de Madrid, Venegas et al.[12][13], realizaron estudios teóricos sobre la transferencia de masa y calor en el proceso de la absorción de amoniaco vapor en absorbedores de gotas de la mezcla nitrato de litio-amoniaco, concluyendo que los coeficientes de transferencia de masa pueden ser superiores a los obtenidos en absorbedores de película descendente.

Es evidente en varios de los trabajos experimentales con la mezcla amoniaco-nitrato de litio, que la ventaja termodinámica de operar a menores temperaturas de generación se puede perder por su alta viscosidad, que limita los procesos de transferencia de masa y calor en el generador y el absorbedor. Esto se demuestra con los bajos coeficientes de transferencia de calor y altas relaciones de caudal, lo cual requiere entonces mayores áreas de transferencia de calor y masa que podría anular el beneficio de no requerir rectificación.[14]

En el Centro de Investigación en Energía he realizado mi tesis de licenciatura y maestría (próxima a concluir), trabajando con la mezcla de amoniaco / nitrato de litio, en las cuales se realizó un diseño térmico de los equipos así como su construcción y posteriormente se llevó a cabo una simulación numérica para describir el fenómeno de transferencia de masa y calor que ocurre en el absorbedor; también se desarrolló un sistema de refrigeración por absorción intermitente con la mezcla amoniaco / nitrato de litio por el Dr. Wilfrido Rivera y Carlos O. Rivera[15]; ahora estos trabajos sirven de base para el trabajo doctoral.

Objetivo General

Evaluación de un equipo de refrigeración por absorción enfriado por aire, trabajando con la mezcla de amoniaco / nitrato de litio, acoplado a un sistema de colectores solares del tipo de tubos evacuados.

Desarrollo de un programa numérico validado experimentalmente que permita futuros diseños de alta eficiencia.

Objetivos particulares

- Realizar la integración de los componentes diseñados en el CIE para operar un sistema de absorción de amoníaco / nitrato de litio, así como calibración de instrumentos y prueba de fugas.
- Realizar la evaluación experimental del sistema y en particular corroborar la operación del absorbedor validando la simulación numérica mediante condiciones controladas.
- Llevar a cabo la optimización del sistema de refrigeración por absorción enfriado por aire para operarse con energía solar térmica de mediana temperatura.
- Realizar la operación del sistema integrando un banco de 21 metros cuadrados de colectores solares del tipo tubo evacuado.

Estancias

Se pretende realizar una estancia en el Centro de Innovación Tecnológica en Revalorización Energética y Refrigeración (CREVER), ya que ellos tienen un proyecto con el título “Mejora de las propiedades termofísicas y de los fenómenos de transporte en intercambiadores de placas mediante la adición de agua a la mezcla $NH_3 - LiNO_3$ en refrigeración solar por absorción” [14], que tiene como finalidad desarrollar sistemas de absorción para el aire acondicionado solar más eficientes, basado en el estudio de mezclas ternarias de amoníaco-agua-nitrato de litio, identificadas como mezclas potencialmente adecuadas para aplicaciones de la tecnología de refrigeración solar por absorción para temperaturas inferiores a $0^\circ C$. El proyecto abarcará la obtención experimental y el cálculo de propiedades termodinámicas, como el equilibrio líquido-vapor, temperatura de cristalización, solubilidad, densidad, y capacidad calorífica, así como propiedades termofísicas tales como la viscosidad y la conductividad térmica para el diseño de los componentes principales como el absorbedor y el generador. Esto puede ser de gran utilidad en mi proyecto doctoral ya que podríamos utilizar esta mezcla ternaria y me mejorar así el desempeño del sistema.

Otra estancia que se planea es en el “Área de Máquinas y Motores Térmicos, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Vigo, Universidad de Vigo, Campus Lagoas-Marcosende, España”, ya que en este lugar trabajan con absorbedores de película descendente en tubos verticales[2], la estancia se realizara con el fin de intercambiar información sobre el análisis de este tipo de absorbedores que trabajamos en común, la mezcla con la que trabajan es amoníaco / agua.

Justificación

Las mezclas mas estudiadas han sido amoníaco / agua y agua / bromuro de litio, para las cuales hay una gran cantidad información y equipos comerciales con diferentes aplicaciones, como aire acondicionado; sin embargo para la mezcla de amoníaco / nitrato de litio aunque existe información de hace muchos años

referentes a esta mezcla aun es pobre y no hay equipos comerciales. Llevar a cabo este proyecto nos permitirá contribuir en gran medida al desarrollo de nueva tecnología. El obtener una simulación numérica confiable nos permitirá diseñar equipos eficientes, sin necesidad de construir prototipos costosos, ahorrando tiempo y dinero.

1. Infraestructura

En el laboratorio de refrigeración y bombas de calor se cuenta con laboratorio de cómputo, donde podemos encontrar compiladores para programación como Visual Basic y lenguaje C, para el desarrollo de programas. También cuenta con lo siguiente : Absorbedor, Generador, Evaporador, Condensador, Colectores solares planos de tubos evacuados, tubería e instrumentación. Así mismo se cuenta con el apoyo del taller mecánico de CIE para manufactura o ajuste de piezas para el equipo. El material extra que se requiera se comprará con una partida del proyecto CONACyT U44764-Y, titulado “Desarrollo de nuevas alternativas para la producción de frío con sistemas térmicos” del cual es responsable el Dr. Roberto Best y Brown.

Metas

- Estudiar el comportamiento dinámico y térmico del fluido de trabajo a través del absorbedor, para mejorar la simulación numérica de modo que optengamos resultados aproximados a la realidad.
- Estudiar la posibilidad de una mezcla ternaria para disminuir la viscosidad de la solución.
- Evaluar el sistema de calentamiento térmico solar acoplado al equipo de refrigeración, analizando el efecto que tiene en el absorbedor.

Cronograma de Actividades

Actividad	Semestre						
	1	2	3	4	5	6	7
Revisión bibliográfica	xxxxxx	x	x	x	x	x	x
Armado del equipo	xxxx						
Evaluación experimental		xxxx					
Validación numérica		xx					
Examen de candidatura		x					
Estancia en Tarragona			xxxxxx				
Acoplamiento a colectores				xxxx			
Evaluación y análisis				xx	xx		
Estancia en Vigo					xxxx	xx	
Pruebas finales de operación						xxxx	
Escritura de la tesis	xxx	xx	x	xx	xx	xx	xxxx
Examen doctoral							xx

Referencias

- [1] *Handbook of Refrigeration*. ASHRAE, 1994.
- [2] Jos Fernández-Seara, Jaime Sieres, and Manuel Vázquez. Simultaneous heat and mass transfer of a packed distillation column for ammoniawater absorption refrigeration systems. *International Journal of Thermal Sciences*, 41:927–935, 2002.
- [3] M. Bogart. Ammonia absorption refrigeration in industrial processes. Gulf Publishing Company, Houston, 1981.
- [4] K. Gensch. Lithiumnitratammoniak als absorptionsflüssigkeit für kältemaschinen, zeitschr. *Kälte-Ind.*, 1937.
- [5] Niebergall W., Arbeitsstoffpaare, Markewitz-Verlag G.m.b.h., and Darmstadt. (ammoniak als ktemittel) pp. 133-153, 1942.
- [6] C.A. Infante Ferreira. Thermodynamic and physical property data equations for ammonia-lithium nitrate and ammonia-sodium thiocyanate solutions. *Solar Energy*, 32(2):231–236, 1984.
- [7] Aggarwal M.K. and Agarwal R.S. Thermodynamic properties of lithium nitrate-ammonia and mixtures. *Energy Research*, 10:59–68, 1986.
- [8] Antonoupoulos K.A. and Rodgakis E.D. Performance of a solar driven ammonia-lithium nitrate and ammonia-sodium thiocyanate absorption systems operating as coolers or heat pumps in athens, vol. 16(2), 127-147.

- [9] Sun D.W. Comparison of the performances of nh_3 - h_2o , nh_3 - lino_3 and nh_3 - nascn absorption refrigeration systems. *Energy Conversion and Management*, 39(5/6):357–368, 1998.
- [10] Arzoz D., Venegas M., Rodriguez P., and Izquierdo M. Solar absorption refrigeration using lino_3 - nh_3 solution, and flat plate collectors. In *Proc. Of the Int. Sorption Heat Pump Conf., Shangai, China*, pages 101–106, 2002.
- [11] Rivera W. and Best R. Boiling heat transfer coefficients inside a vertical smooth tube for water/ammonia and ammonia/lithium nitrate mixtures. *International Journal of heat and Mass Transfer*, 45(5):905, 921 1999.
- [12] M. Venegas, D. Arzoz, P. Rodríguez, and M. Izquierdo. Heat and mass transfer in $\text{lino}_3 - \text{nh}_3$ spray absorption system. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 30(6):805–815, 2003.
- [13] M. Venegas, M.Izquierdo, P. Rodríguez, and A. Lecuona. Heat and mass transfer during absorption of ammonia vapour by lino_3nh_3 solution droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47:2653–2667, 2004.
- [14] Manel Vallès Rasquera. Mejora de las propiedades termofísicas y de los fenómenos de transporte en intercambiadores de placas mediante la adición de agua a la mezcla $\text{nh}_3 - \text{lino}_3$ en refrigeración solar por absorción. Technical report, Centro de Innovación Tecnológica en Revalorización Energética y Refrigeración (CREVER), 2005.
- [15] C.O. Rivera and W. Rivera. Modeling of an intermittent solar absorption refrigeration system operating with ammonia-lithium nitrate mixture. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 76(3):417–427, 2003.
- [16] Sergio Ulises Llamas Guillén. Desarrollo de un sistema de refrigeración por absorción utilizando energía alterna, 2004.
- [17] *Métodos de Producción de frío*. UNAM, 1993.
- [18] Robert E. Treybal. *Operaciones de Transferencia de Masa*. McGraw-Hill, 1985.
- [19] J. P. Holman. *Transferencia de Calor*. McGraw-Hill, 1986.

Propuesta de comité tutorial

Director de tesis:

Dr. Roberto Best y Brown. _____

Centro de Investigación en Energía - UNAM.

Proporcionará la asesoría sobre el sistema de refrigeración por absorción, la mezcla de trabajo y el proyecto en general.

Dr. Octavio Garcia Valladares. _____

Centro de Investigación en Energía - UNAM.

Brindará asesoría sobre el modelado matemático en intercambiadores.

Dr. Isaac Pilatowsky Figueroa. _____

Centro de Investigación en Energía - UNAM.

Brindará apoyo sobre los sistemas de refrigeración solar.

Dr. Rosenberg Javier Romero Domínguez. _____

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas - Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Proporcionará asesoría sobre la integración de intercambiadores y los sistemas de absorción.

Dr. Wilfrido Rivera Gómez-Franco. _____

Centro de Investigación en Energía - UNAM.

Proporcionará asesoría sobre sistemas de refrigeración solar.

Aspirante de doctorado:

Ing. Q. Sergio Ulises Llamas Guillén. _____