

INSTRUMENTACIÓN Y ESTRATEGIA DE CONTROL DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR ABSORCIÓN QUE OPERA CON ENERGÍA SOLAR

Gaby Yolanda Vega Cano¹, Víctor Hugo Gómez Espinoza², David Luna Sánchez³.

¹Escuela Superior de Tizayuca, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Km 2.5 Carretera Federal Tizayuca-Pachuca, C.P. 43800, Tizayuca, Hidalgo, México.

²Centro de Investigaciones de Energía (CIE), Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco S/N, Temixco, Morelos. C.P. 62580.

³Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ), Av. del Retablo 150 Constituyentes Fovissste, Santiago de Querétaro, C.P. 76150.

e-mail gaby_yolanda@hotmail.com

Resumen.

En este trabajo se presenta el desarrollo de la estrategia de control y selección de la instrumentación apropiada para utilizarse en un sistema de enfriamiento por absorción que opera mediante energía renovable. La unidad experimental fue diseñada con una capacidad de 10.5 kW de enfriamiento (3 toneladas de frío), opera con la mezcla amoníaco - agua y utiliza como principal fuente de abastecimiento la energía solar.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema posee estabilidad durante su operación, mostrando la relación directa que existe entre el generador y el evaporador, corroborando el lazo de control principal.

Palabras Clave: enfriamiento por absorción, energía solar, Instrumentación y Control automático, refrigeración, aire acondicionado.

Abstract.

This paper presents the development of the control strategy and selection of appropriate instrumentation for use in an absorption cooling system that operates through renewable energy. The experimental unit was designed with a capacity of 10.5 kW of cooling (3 tons of cooling), it operates with the ammonia mixture - water and used as the main source of supply of solar energy.

The results obtained show that the system has stability during operation, showing the direct relationship between the generator and evaporator, corroborating the main control loop.

Keywords: Absorption cooling, solar energy, evacuated tubes, refrigeration and air conditioning.

I. Introducción.

En México un porcentaje importante del consumo de energía, se utiliza para operar los equipos convencionales de aire acondicionado.[2] Actualmente la tecnología de refrigeración por absorción están siendo ampliamente estudiada en

varios países ya que se visualiza como una alternativa para satisfacer la demanda de refrigeración y aire acondicionado; en el año de 1991 Best Brown et al; realiza un estudio de una máquina por absorción simulando el calentamiento solar mediante un circuito de aceite térmico, resistencias eléctricas, y una bomba de engranes [6]; en el año 2008 Víctor Gómez et. al, presenta las técnicas para selección y calibración de sensores electrónicos apropiados para sistemas de enfriamiento por absorción. [14]

Los sistemas de medición e instrumentación son una herramienta fundamental para el registro de variables termodinámicas así como control, automatización y optimización de los sistemas de refrigeración y aire acondicionado lo que permite monitorear y evaluar los sistemas de manera eficiente.

II. Metodología.

El sistema solar objeto de estudio se está desarrollando para operarlo con tecnología de tubos evacuados con caloriducto (heat pipe) y un sistema auxiliar, por lo cual se considera éste como un sistema amigable al ambiente y con potencial para satisfacer las necesidades de refrigeración y aire acondicionado en México

Los sensores utilizados en el sistema de enfriamiento fueron referenciados con una metodología desarrollada en el laboratorio de refrigeración del Centro de Investigación en Energía de la UNAM. Los procedimientos de referenciación son mediante la intercomparación de los sensores a utilizar contra un instrumento patrón de acuerdo a lo recomendado por la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación, obteniéndose las ecuaciones de ajuste que darán certidumbre en los datos obtenidos por dichos

instrumentos. El software utilizado para desarrollar el programa para registro y almacenamiento de las variables termodinámicas del sistema de enfriamiento por absorción es el programa VEE Engineering versión 5.0.

El funcionamiento del sistema se realiza con el vapor refrigerante que sale del rectificador, es vapor de amoníaco con alta pureza, saturado y seco a la presión alta del sistema. El refrigerante al ser enfriado en el condensador sale como líquido saturado; luego es sub enfriado en el pre enfriador y posteriormente pasa a un proceso de expansión en una válvula de estrangulamiento, donde la presión es reducida, dando como resultado un fluido frío en dos fases (mezcla líquido-vapor).

El refrigerante entra al evaporador, donde al recibir calor del agua a enfriar, termina de convertirse en vapor, produciendo el efecto frigorífico y sale en forma de vapor saturado, o en algunos casos con pequeñas trazas de agua, es terminado de evaporar en el pre enfriador. Entonces, el vapor entra a la columna absorbedor por la parte inferior, donde es condensado y absorbido en tres diferentes etapas por medio de una solución acuosa caliente. La reacción de disolución del amoníaco es exotérmica, de modo que se debe colocar equipos con intercambio de calor en el absorbedor con el fin de enfriar dicha solución caliente, mejorando así su capacidad de absorción al retirar la entalpía de condensación y el calor de reacción. Lo anterior se logra por medio de aire de enfriamiento y la utilización de la misma solución fría que deja el absorbedor.

La solución acuosa con alto porcentaje de amoníaco (solución concentrada), sale de la columna absorbedor y entra en la bomba, de donde sale a la presión alta del sistema. Luego es introducida de nuevo a la sección media de la columna (AHX *Absorber Heat eXchangers*), donde enfría o recibe calor del absorbedor, saliendo

posteriormente entra en la parte más caliente del absorbedor, en donde al recibir calor de absorción de alta calidad, alcanza el punto de saturación e inicia el proceso de cambio de fase (liberación de amoniaco), y sale del economizador al generador, como una mezcla vapor-líquido.

La mezcla de dos fases a alta presión, entra en la cámara de separación de la columna generador - rectificador, en donde la fase líquida se incorpora al vapor condensado proveniente del rectificador y entran al generador, en donde se le agrega calor para terminar de extraer el amoniaco de la solución.

El líquido caliente con un bajo porcentaje de amoniaco (solución diluida), sale por el fondo de la columna generador-rectificador, posteriormente la solución caliente se introduce de nuevo a la columna para que caliente la sección GHX (*Generator-Heat eXchangers*) del generador, saliendo del economizador para luego reducir su presión al pasar por la válvula de expansión de la solución, para salir en el absorbedor. La solución acuosa todavía caliente entra a la columna absorbedor por la parte superior, en donde se pone en contacto en contracorriente con el vapor de amoniaco a absorber.

En el generador, la liberación del amoniaco en forma de vapor se realiza en tres etapas y sale del generador, pasando a la cámara de separación en donde se une con la fase vapor proveniente de la columna absorbedor. La corriente de vapor ascendente, sale de la cámara de separación y entra al rectificador en donde se le retira calor y como se trata de un vapor saturado, se condensa en mayor proporción el componente más pesado (agua), de esta forma se realiza la purificación o rectificación del flujo de vapor, saliendo después en amoniaco de alta pureza, completando la operación del ciclo [22]; el sistema en estudio se muestra en la figura 2.1. y se encuentra en el Centro de Investigaciones

de Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México en Temixco Morelos.

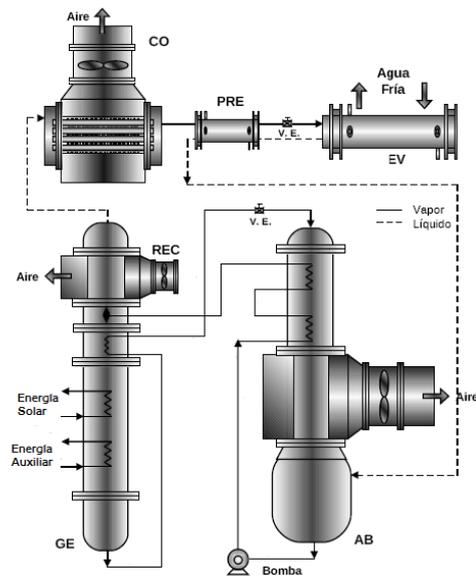


Fig. 2. 1. Sistema de Enfriamiento por Absorción del CIE

III. Resultados.

Para medir la irradiancia se utilizó un piranómetro marca Kipp and Zone con un rango espectral de 285-2500 nm con respuesta menor a 18 s. y una exactitud de $\pm 1\%$, para la presión se eligió un sensor Cole Parmer con un rango de operación de 500 psi, señal de salida de 4-20 mA y una exactitud de $\pm 1\%$, para medición del flujo másico se consideró un sensor Cole Parmer con un rango de medición de 5.5 a 40 kg/min con una exactitud de $\pm 1\%$, por último se opta por termistores para la medición de temperatura con un rango de -40° a 150°C , un tiempo de respuesta de 1 a 2 s, y una exactitud de $\pm 0.1\%$.

Todos los elementos están conectados a una tarjeta multiplexora de 20 canales y un sistema de adquisición de datos Agilenten 34901A para registrar sus mediciones. Para el monitoreo del sistema de enfriamiento experimental se desarrolló

un programa integral estructurado para el registro, almacenamiento de las variables sistema en tiempo real, lo cual permite conocer el desempeño instantáneo de todos los equipos del sistema. Se realizaron pruebas preliminares con el sistema de enfriamiento para verificar el correcto funcionamiento de los instrumentos de medición y del programa general de registro y almacenamiento de datos, mostrando ambos buen desempeño. También se realizaron una serie de pruebas experimentales con el sistema de enfriamiento por absorción, operándolo a cargas parciales de 2 a 5 kW, mostrando estabilidad en la producción de frío, con coeficientes de operación de entre 0.3 a 0.4, respectivamente.

En la figura 3.1. se muestra la temperatura de entrada y salida del aceite térmico que se utilizó en el generador de película descendente, el cual se precalentó en un sistema auxiliar a 220°C. La entrada al generador fue de 188.5°C, al momento de tener contacto con el refrigerante sufre una caída de temperatura de 80°C a la salida del mismo, permaneciendo un comportamiento estable y suficiente para el enfriamiento del agua que se utiliza en el proceso de enfriamiento.

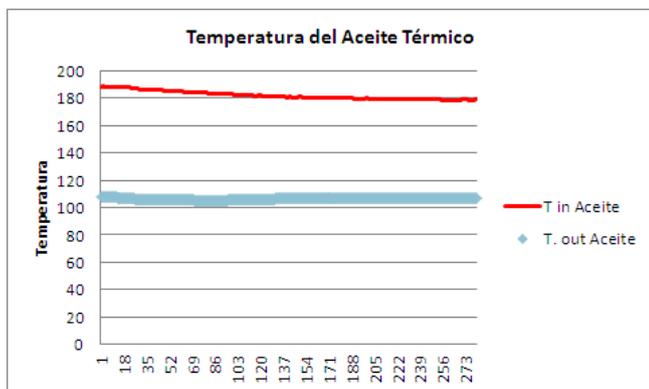


Fig. 3.1. Temperatura del Aceite Térmico

En la figura 3.2. se muestra la temperatura del agua en el evaporador con un delta de cinco grados entre la entrada y la salida con lo que se muestra

que el sistema es estable, realizándose una variación el flujo de refrigerante y temperatura en el aceite térmico.

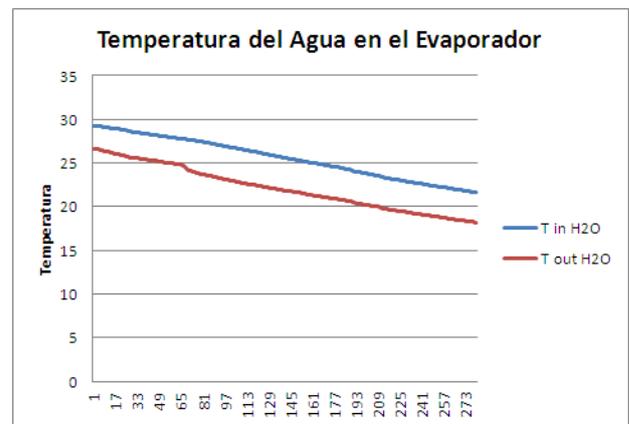


Fig. 3.2. Temperatura del Agua en el Evaporador

En la prueba se realizaron tres cambios en el flujo del amoniaco como se muestra en la figura 3.3, dando como resultado las variaciones de temperatura en el evaporador y en el generador; debido a la cantidad necesaria de refrigerante y al cambio en la temperatura según la consigna asignada para realizar el control en la temperatura y la presión en el sistema de enfriamiento.

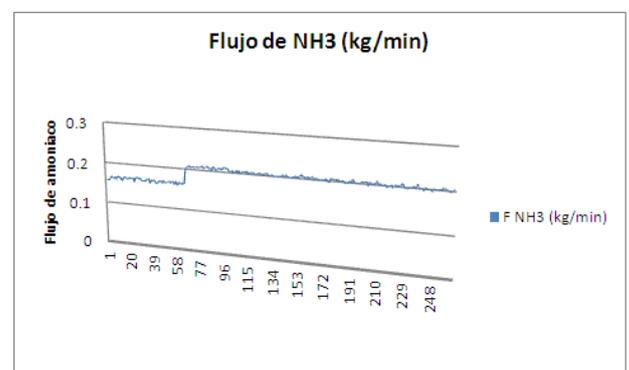


Fig. 3.3. Flujo de Amoniaco (kg/min)

Las consignas de control del sistema en estudio deben considerar los paros de emergencia, monitorear los valores de baja y alta presión, si es que excede en más de 20 bar de presión en el

generador el equipo se detiene, así como también si la presión de baja comienza a subir, el proceso se monitorea con el software VEE Engineering versión 5.0, verificando los set points declarados para cada uno de los equipos del sistema de refrigeración por absorción.

IV. Conclusiones.

Los instrumentos fueron calibrados e instalados y mostraron buen desempeño y estabilidad al momento de medir las variables termodinámicas del sistema, lo cual permitió obtener valores aceptables y confiables en las mediciones. Se operó el sistema de enfriamiento a carga parcial de 5 kW, utilizando el programa general de registro y almacenamiento de datos desarrollado expofeso para la unidad experimental, y se propuso una estrategia de control integral ligada al programa general con miras a una futura automatización. El sistema demostró estabilidad durante su operación, mostrando la relación directa que existe entre el generador y el evaporador, corroborando el lazo de control principal.

Reconocimientos

La autora manifiestan su gratitud al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) por el apoyo otorgado para el desarrollo de esta investigación a través del proyecto de intercambio académico, así como al Dr. Víctor Hugo Gómez Espinoza del Centro de Investigaciones de Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por el apoyo brindado en mi estancia.

Referencias

[1]. Instituto, de Investigaciones Legislativas del Senado de la República, *Nuevas energías renovables: una alternativa energética sustentable para México (Análisis y Propuesta)*; México, D. F., 2004.

[2]. Manuel Ibañez Plan, *Tecnología Solar*. Madrid, España: Mundi-Prensa, 2005, pág. 544.

[3]. Luis Lesur, *Manual de Refrigeración y Aire Acondicionado I*. México: Trillas, 2002;. ISBN 968 24 6729 2.

[4]. Isaac Pilatowsky Figueroa, *Métodos de Producción de Frío*. México: UNAM, 1993;. ISBN 968 36 2954 7.

[5]. Javier Méndez Muñiz et al, *Energía solar térmica*. Madrid: Fc Editorial, 2008. ISBN 8496743314.

[6]. Roberto Best B. et al, "Experimental studies on the operating characteristics of an ammonia-water absorption system for solar cooling", México: *Trans Icheme*, 1991, Vol. 69.pag 153-160

[7]. F. Fernández Llebraz et al, *Programa de ensayos de una planta de enfriamiento solar para el acondicionamiento de aire*. Sevilla, España

[8]. Meléndez González et. Al, *Automation and control of solar air conditioning systems*. 2002/0053214 A1 Estados Unidos, 09 de mayo de 2002.

[9]. Miguel Ramos et al, *Diseño de un prototipo experimental de refrigeración por absorción*. Lima, Perú, 2002.

[10]. Zhang X. J. et al, "Numerical simulation of heat transfer in regenerator of solid adsorption refrigeration system", *China: Renewable Energy*, 2002, Vol. 26 pag 599-610. ISBN 0960 1481.

[11]. Ruzhu, Wang et al, "Adsorption refrigeration green cooling driven by low grade thermal energy", Shanghai, China: *Chinese Science Bulletin*, 2005, Vol. 50.

[12]. Wu Jing, Yi et al, "Study on cyclic characteristics of the solar-powered adsorption cooling system", Shanghai, China: *Springer*, 2009, Vol. 52.pag 1551-1562

[13]. Naghelli Ortega, *Validación experimental del modelo de transferencia de calor en un concentrador parabólico compuesto aplicado a la refrigeración solar*. Tesis doctoral: UNAM, México, 2008.

[14]. Victor Hugo Gómez Espinoza et. al, "Theoretical and experimental evaluation of an indirect-fired GAX cycle cooling system"., Mexico: *Applied Thermal Engineering*, 2008, Vol. 28. Pag 975-987, ISBN 13594311.

[15]. Gomri. Rabah, "Solar Energy to drive half-effect absorption cooling system"., Algeria: *IASKS*, 2010, Vol. 1.pag 1-8

[16]. Carlos Monné et al, "Evaluación de una instalación de refrigeración por absorción con energía solar", Zaragoza, España: *Información Tecnológica*, 2011, Vol. 22.pag 39-44

[17]. G. Urueta Gutierrez, et al, "Experimental performances of a LiBr-water absorption facility equipped with adiabatic absorber", España: *International Journal Refrigeration*, 2011, Vol. 34. Pag 1749-1759, ISBN 0140 7007.

[18]. A.Busso. et al; " Attempt of integration of a small commercial ammonia-water absorption refrigerator with a solar concentrator: Experience and results", Argentina: *International Journal of Refrigeration*, 2011, Vol. 34. Pag 1378-1388, ISBN 0140 7007.

- [19]. **César Arellano García**; *Aplicación de Técnicas de Automatización y Control para Sistemas de Refrigeración Solar*. México: UNAM, 2011.
- [20]. **Segio Hernando Sanz**; *Red Iberoamericana de Refrigeración y Aire Acondicionado Solar, CYTED*. Valladolid, España: CARTIF, 2004.
- [21]. **José Miguel Pantoja Miranda**; *Ingeniería de Microondas, Técnicas experimentales*. Madrid, España : Pearson Education, 2002. 84 205 3099 9.
- [22]. **César Arellano García**; *Aplicación de técnicas de automatización y control para sistemas de refrigeración solar*. México: UNAM, 2011.
- [23]. **José Viloría Roldan**; *Instalaciones Solares Fotovoltaicas. Instalaciones Eléctricas Fotovoltaicas*. Madrid España: Paraninfo, 2010, pág. 388.
- [24]. **John A. Duffie et al**; *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [25]. **Meinel, Aden B**; *Aplicaciones de la energía solar*. s.l.: Reverte, 1982.
- [26]. **Ángel Luis Barreras Miranda**; *Monografías de climatización y ahorro energético*. España: CEAC, S.A., 2004.
- [27]. **Liwei et al**; "Adsorption refrigeration green cooling driven by low grade thermal energy",. 2005, *Springer*, Vol 50 No. 3, págs. 193-204.
- [28]. **Missallam A et al**; "Thermodynamic Investigation for Developing Solar Refrigerator", 2010, *Springer*, págs. 13-19.
- [29]. **Benjamin Valdez Salas**; *Tecnologías de Refrigeración y Aire Acondicionado Activadas con Energía Solar*. México: Universidad de Baja California, 2006. pág. 200.