

DISEÑO DE UN EQUIPO EXPERIMENTAL PARA EVALUAR CICLOS DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN Y ADSORCIÓN

DESIGN OF EXPERIMENTAL EQUIPMENT TO EVALUATE ABSORPTION AND ADSORPTION COOLING CYCLES

Luis C. Olmos V., J.C. Velásquez R.², C.A. Isaza R.².

RESUMEN

La producción de frío con fuentes de energía térmica tales como energía solar, calor de desechos o gases combustibles, representa una alternativa para los métodos de refrigeración convencional por compresión de vapor, que consume energía eléctrica y usa refrigerantes que afectan la capa de ozono y contribuyen al aumento del efecto invernadero terrestre y como consecuencia al calentamiento global de la atmósfera terrestre. Existen en el mundo gran cantidad de empresas, universidades e instituciones de investigación, dedicadas a la vigilancia tecnológica de nuevos desarrollos en fluidos refrigerantes, aplicaciones, fuentes de energía, sistemas de control y en general, a ofrecer sistemas de producción de frío que consuman menos energía, más eficientes en términos económicos y ambientales. La mayoría de estas investigaciones apuntan hacia la producción de frío con fuentes de energía térmica, tales como los sistemas de refrigeración por absorción o adsorción.

En este trabajo se presenta el diseño en detalle de algunos elementos del equipo experimental a escala de laboratorio, tales como el evaporador, condensador y absorbedor. La metodología usada incluye conceptos de termodinámica, transferencia de calor, flujo de fluidos y mecánica de materiales. Adicionalmente, se consideraron las propiedades termodinámicas de algunas sustancias de trabajo con el fin de dimensionar cada uno de los elementos. Como resultado final se obtuvo el dimensionamiento de cada uno de los elementos del equipo para trabajar con una capacidad de extracción de calor de 0.5 kW.

PALABRAS CLAVES:

Sorción, Amoníaco-Agua, Sistemas de refrigeración, Equipo experimental.

ABSTRACT

In this paper is shown the detailed design of some component of experimental equipment to laboratory scale, such as evaporator, condenser and absorber. The methodology used includes thermodynamic, heat transfer, fluid and materials mechanic concepts. In addition, thermodynamics properties from some work substances were considered, aiming to sizing each component of the experimental equipment. As final result of this work, each component was sized based on a heat extraction capacity of 0.5 kW.

KEYWORDS:

Sorption, ammonia-water, cooling systems, experimental equipment.

Docente investigador, Grupo de
Investigación GHEX, Institución
Universitaria Pascual Bravo,
Colombia,
luis.olmos@pascualbravo.edu.co,
Instituto de Energía y
Termodinámica, Universidad
Pontificia Bolivariana, Colombia,
cesar.isaza@upb.edu.co.



1. INTRODUCCIÓN

Por décadas los sistemas de frío por sorción, han sido comercialmente usados para diferentes aplicaciones como acondicionamiento de aire y refrigeración, usando diversos rangos de ciclos termodinámicos y tecnologías para muchos tamaños y capacidades. Sin embargo, su uso ha sido limitado principalmente por altos costos de inversión y bajas eficiencias, comparados con los sistemas convencionales (por compresión), sistemas que son ampliamente usados en todo el mundo. Por esta razón, los sistemas de sorción, sólo han sido usados cuando existe la necesidad de recuperar energía de grandes desechos de energía térmica, actualmente estos sistemas son usados en tecnologías geotérmicas y solares, Pilatowsky (2010).

El equipo experimental, permite la evaluación termodinámica de sistemas de refrigeración por absorción y adsorción en ciclos continuos o intermitentes, útiles en la capacitación para el manejo de equipos y sustancias de trabajo, en la investigación y el desarrollo de configuraciones innovadoras y en el análisis del comportamiento térmico de nuevas sustancias de trabajo. Además, la infraestructura desarrollada sirve como equipo demostrativo para integrar diferentes elementos, como el generador o desorbedor, rectificadores de vapor, bombas de burbujeo, tubos capilares, etc.; permitiendo determinar las condiciones óptimas de operación de un sistema de refrigeración por absorción; tales como presión, temperatura, concentración, flujo, etc., que posteriormente podrán ser implementados en prototipos o equipos comerciales.

El proceso de diseño, consiste principalmente en el planteamiento de parámetros de

funcionamiento, tales, como presión, temperatura, concentración, flujo, entre otros, además de algunas geometrías generales y considerando las propiedades termodinámicas y de transporte de los fluidos de trabajo. Variables que finalmente se integran en sistemas de ecuaciones que se resuelven simultáneamente introduciendo los datos conocidos y condiciones de frontera para obtener los diseños definitivos.

2. DISEÑO DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

El proceso de diseño de un sistema de refrigeración, requiere como primer paso la definición de los requerimientos del sistema, el cual debe ser lo suficientemente pequeño para que el equipo pueda ser instalado en un laboratorio y lo suficientemente grande para que las variables de control del equipo, se encuentren en un rango que haga posible su medición en laboratorio con fines experimentales. La potencia frigorífica del equipo fue establecida en 0.5 kW, trabajando con el par amoníaco-agua.

El objeto del equipo experimental es que pueda operar con una variedad de pares refrigerante-absorbente y con diferentes concentraciones de refrigerante, sin embargo, en el proceso de diseño se ha usado el par H_2O-NH_3 (absorción), $CaCl_2-NH_3$ (absorción química) y Carbón Activado- NH_3 (adsorción), por ser algunos de los pares absorbente-refrigerante más comúnmente usados y que requieren de niveles de presión más críticos. Adicionalmente, el equipo está concebido preliminarmente para trabajar en un ciclo simple de refrigeración por absorción y adsorción, tal como el presentado en la figura 1, pero posteriormente se pueden instalar nuevos elementos para implementar otros tipos de ciclos (doble etapa, GAX, presión simple, etc.).

A, Absorbedor	E, Evaporador	G, Generador	Tk, Tanque
C, Condensador	G-A, Desorbador	R, Rectificador	HXL, Intercambiador
T, Termómetro	P, Manómetro	N, Nivel	V, Válvula

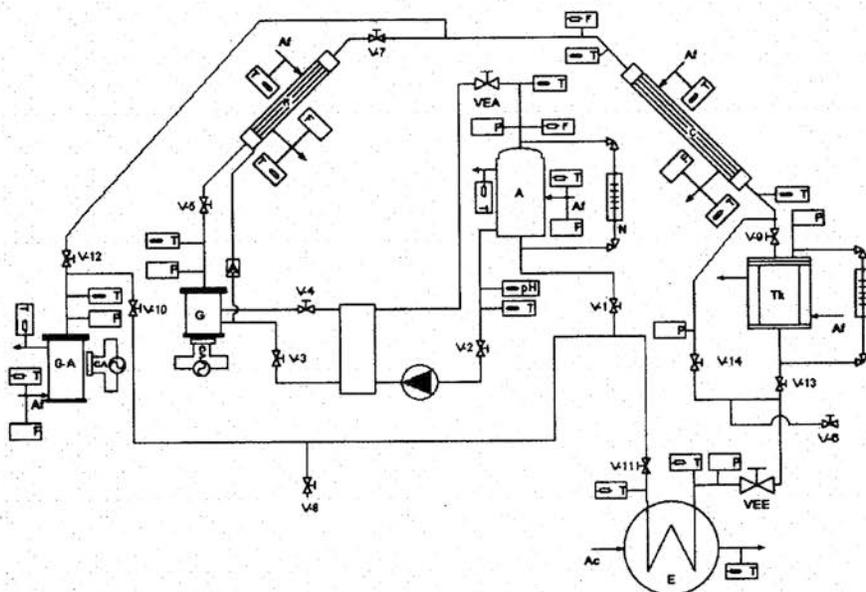


Figura 1. Esquema simplificado del equipo experimental

Se ha seleccionado trabajar con acero inoxidable (304 y 316), para la construcción de cada uno de los elementos del sistema de refrigeración por absorción y adsorción, así como los elementos de interconexión, medición y control, ya que es un material lo suficientemente versátil desde el punto de vista de resistencia de materiales, durabilidad, compatibilidad, economía, disponibilidad y posee adecuadas características de conductividad térmica y rugosidad, con el fin de propiciar eficientes procesos de transferencia de calor y flujo de fluidos.

2.1 Evaporador

Para el diseño del evaporador, se comienza con un balance de energía para calcular el flujo másico de

refrigerante necesario, estableciendo las siguientes hipótesis: sistema en estado estacionario, presión constante a lo largo del evaporador, cambios despreciables en la energía cinética, el refrigerante entra al evaporador en estado de mezcla bifásica con calidad y sale como vapor sobrecalentado, el tubo del serpentín se considera totalmente horizontal para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por convección. El objetivo que se desea alcanzar con el evaporador, es, que retire calor de un sumidero de calor con agua, definido como un serpentín sumergido en el recipiente, tal como se presenta en la figura 2.

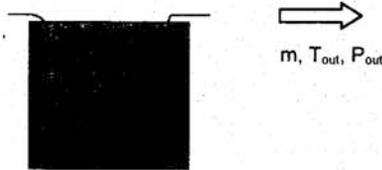


Figura 2. Configuración del evaporador

El cálculo del área de transferencia de calor con la cual se diseñó el evaporador requiere inicialmente del cálculo de los coeficientes convectivos (coeficientes de película - h) externo e interno, para obtener así un coeficiente global de transferencia de calor (U) con el que se obtenga una capacidad de extracción de calor de 0.5 kW con un área definida. Este proceso requiere

introducir en el modelo todas las ecuaciones y datos de entrada, resolviendo el sistema de ecuaciones, para despejar la longitud del serpentín. Para el diseño de un intercambiador de calor en el que uno de los fluidos cambia de fase, se consideró en dividir el intercambiador en tres partes, como se muestra en la figura 3.

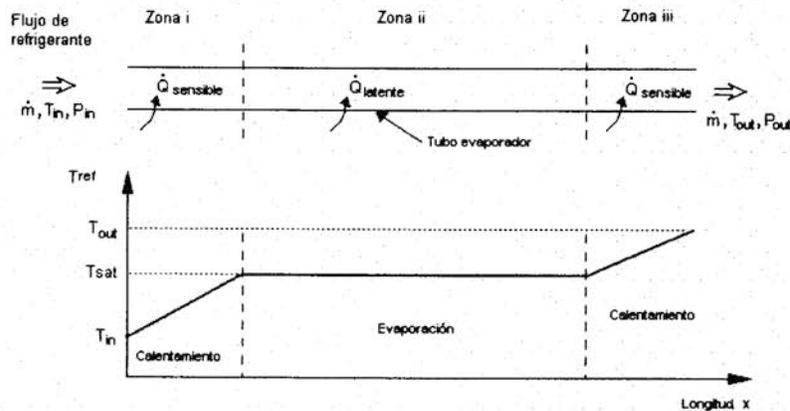


Figura 3. Zonas en las que se divide un evaporador

Esta división en zonas se hace debido a la diferencia entre las propiedades del fluido en estado líquido y gaseoso, ya que el refrigerante cambia de estado a lo largo del evaporador. Una de las propiedades más críticas entre un estado y otro es la viscosidad dinámica, la cual influencia el valor de Reynolds (Re), con el cual se halla Nusselt (Nu) y finalmente el coeficiente de calor (h). Debido a que al evaporador llega refrigerante con calidad desde la válvula de expansión, sólo se aplica el procedimiento para las dos últimas zonas (ii y iii).

Para hallar el coeficiente de calor (h), se utiliza la ecuación de Gnielinski (1976), esta ecuación es utilizada para una sola fase y se usa en el caso del evaporador en la zona iii. Para hallar el coeficiente de calor en la zona de evaporación (zona ii), se utiliza la ecuación de Shah (1982).

Los resultados de diseño del evaporador permitieron estimar una longitud total del serpentín de 5.5 m, usando un coeficiente global de transferencia de calor de $621 \text{ W/m}^2\text{-K}$

2.2 Condensador

El condensador es uno de los componentes principales de cualquier equipo de refrigeración. De este depende que se evacue completamente el calor latente y sensible, que trae el vapor del refrigerante proveniente del generador, para evitar que llegue refrigerante en estado de vapor a la válvula de expansión y al evaporador, ya que esto reduce su eficiencia, debido a la menor capacidad de absorber calor que tiene el refrigerante en este estado.

Las hipótesis planteadas para el diseño del condensador son similares a las del evaporador, considerando que el refrigerante entra al condensador en estado de vapor sobrecalentado y sale como líquido subenfriado. El calor que se debe extraer del refrigerante en el condensador está definido por las condiciones de salida del rectificador y las condiciones requeridas en el evaporador, de acuerdo con los respectivos balances de masa y energía.

El condensador diseñado es de tipo coraza-tubos; agua en la coraza y refrigerante en los tubos. Se consideraron cuatro tubos para el refrigerante que realizan un paso por la coraza, la cual está dispuesta con baffles para hacer que el flujo de agua circule transversalmente a la longitud de los tubos, mejorando así los coeficientes de transferencia de calor y disminuir el tamaño del mismo (figura 4).

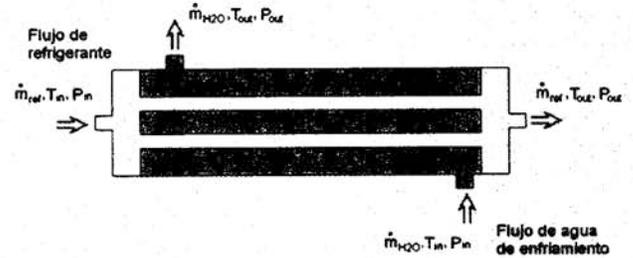


Figura 4. Configuración del condensador

El condensador es un intercambiador de calor que al igual que el evaporador, uno de sus fluidos cambia de fase, el proceso de cálculo se realiza de manera similar. El modelo se aplica para hallar el área de transferencia de calor necesaria para evacuar la cantidad de calor y enfriar el refrigerante en las zonas i y iii, y finalmente condensar el fluido refrigerante en la zona ii (figura 5).

Para obtener el coeficiente global de transferencia de calor del condensador, es necesario conocer los coeficientes de película tanto externo como interno. Para determinar el coeficiente de película externo (en contacto con el agua), se utilizaron correlaciones válidas para bancos de tubos con flujo externo transversal; Zukauskas (1972), Churchill y Bernstein (1977). Estas correlaciones se encuentran como una función en el EES®, la cual calcula las propiedades del fluido a la temperatura de película.

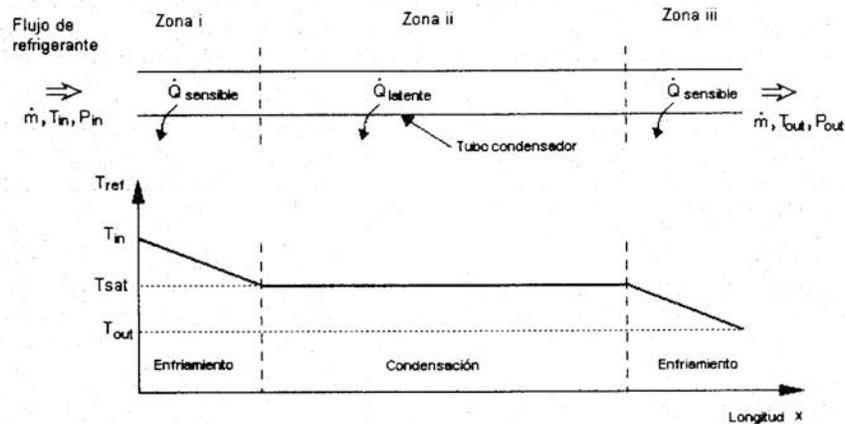


Figura 5. Zonas en las que se divide un condensador

Para calcular los coeficientes internos, se ha usado para la zona i y iii la correlación de Dobson y Chato (1998), la cual consiste en la división de la zona de condensación en dos zonas: una de flujo anular y la otra de flujo ondulado. En la zona ii, el refrigerante (vapor) pierde calor latente y se condensa hasta un estado de líquido saturado. Para hallar el coeficiente de transferencia de calor por convección, se utilizó la correlación de Rohsenow (1956).

Los resultados de diseño del condensador permiten estimar una longitud total del serpentín de los tubos de 0.504 m, usando un coeficiente global de transferencia de calor de $913 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

2.3 Absorbedor

El absorbedor, es uno de los elementos fundamentalmente en los sistemas de refrigeración por absorción. En este equipo se presentan fenómenos de transferencia de calor y masa, considerando ésta desde la fase gaseosa a la líquida (solución diluida).

Para el diseño de absorbedores hay diferentes configuraciones, pero las más utilizadas por su buen comportamiento frente a la extracción de calor, son las de película descendente y las de burbuja. Para este trabajo se ha seleccionado la configuración de burbujas (figura 6), por su mejor mojado, facilidad de poner en contacto el absorbente con el área de transferencia de calor y buena compactación del equipo.

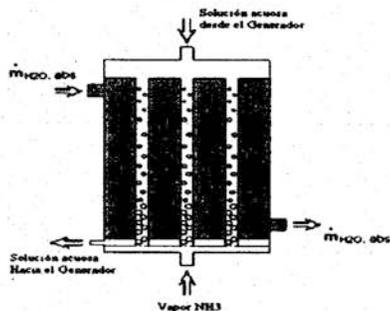


Figura 6. Configuración del absorbedor

El modelo de cálculo usado para este equipo es iterativo y tiene como finalidad, encontrar la longitud necesaria para que una solución acuosa de amoníaco con una concentración diluida (x_w), proveniente del generador y un flujo másico de amoníaco puro proveniente del evaporador, salga a una concentración más alta (x_s) a condiciones de saturación.

El primer paso para el desarrollo del modelo de cálculo, es determinar el coeficiente de transferencia de masa, los flujos másicos de salida y entrada de la solución, los cuales son obtenidos a través del balance de masa general y se considera que el flujo másico de vapor de amoníaco a la salida del absorbedor es cero. El área de transferencia de masa, se obtiene, multiplicando el área interfacial por el área transversal y la longitud de cada tubo. El área interfacial, se calcula de la ecuación obtenida de Mounir (2000). Para el cálculo del flujo de gas, se acude a la ecuación obtenida de Haibo (2007).

Con el tiempo de absorción hallado y la velocidad del vapor de amoníaco, se calcula la longitud de absorción y dando el primer resultado para la longitud. Una segunda longitud se halla cuando la solución esté a condiciones de saturación, por medio del calor retirado. Finalmente, se comparan ambos resultados y si la longitud de transferencia de calor es mayor, el absorbedor será diseñado con esta longitud; si la longitud de absorción es mayor, se diseñará el absorbedor con esta longitud, pero se debe volver a calcular la temperatura de salida de la solución del absorbedor con esta longitud. En la tabla 1 se presentan los resultados del diseño del absorbedor de burbujas.

Tabla 1. Características del absorbedor

Variable	Valor	Unidad
Longitud del absorbedor	0,21	m
Número de tubos	16	Adim
Temperatura de salida de la solución	331,2	K
Presión de salida del absorbedor	0,3417	MPa
Flujo másico de entrada de la solución	0,010043	kg/s
Flujo másico de salida de la solución	0,010487	kg/s
Concentración de salida del absorbedor	0,3296	Adim.
Calor retirado	0,7584	kW
Coefficiente global de transferencia de calor	91	W/m ² -K

El diseño del generador del sistema de absorción y el desorbedor del sistema de adsorción, siguen una metodología similar a la desarrollada en el evaporador y condensador.

3. CONCLUSIONES

El equipo experimental de refrigeración es una herramienta útil para estudiantes e investigadores, que deseen realizar proyectos sobre sistemas de refrigeración por adsorción.

Con este equipo se pueden experimentar con diversas clases de refrigerantes y absorbentes/adsorbentes, cambiando variables como presión, temperatura, flujo y concentración y además caracterizar pares de adsorbato-adsorbente mediante las isotermas de adsorción.

El correcto dimensionamiento de un sistema de refrigeración, requiere una gran cantidad de cálculos, conocimiento de propiedades de materiales, fluidos y aplicación de teoría de termodinámica, transferencia de calor (y transferencia de masa en el caso de la absorción y adsorción).

El cálculo de los coeficientes de transferencia de masa y de calor se realiza por medio de correlaciones ampliamente aceptadas, que requieren como datos de entrada las propiedades de los fluidos con los cuales se trabaja. En el caso de la refrigeración por absorción se requiere las propiedades de la mezcla de refrigerante-adsorbente, que muchas veces no están

disponibles, puesto que no han sido ampliamente estudiadas. Por esta razón, la obtención de estas propiedades de pares refrigerantes es de gran importancia para el avance del estudio de sistemas de refrigeración por absorción.

4. REFERENCIAS

CHURCHILL, S.W., and CHU, H.H.S. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder. New York: Int. J. Heat Mass Transfer, 1975. 5 p.

DOBSON, M. K. and CHATO, J. C. Condensation in smooth horizontal tubes. In: Journal of Heat Transfer. Vol.120. (1998); 21 p.

GNIELINSKI, V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. In: International Chemical Engineering. Vol.16. (1976); p.359-368.

PILATOWSKY, I., et al., Cogeneration Fuel Cell-Sorption Air Conditioning Systems.: © Springer-Verlag London Limited. (2010). p. 176

ROHSENOW, W. M. Heat transfer and temperature distribution in laminar film condensation. New York: ASME, 1956. 1645-1648.

SHAH, M M. Chart correlation for saturated boiling heat transfer: equations and further study. In: Ashrae transactions. Vol. 88. (1982); p.185-196.