

MERCOFRIO 2000-CONGRESSO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DO MERCOSUL

RUEDAS DESHUMIDIFICADORAS EN EL ACONDICIONAMIENTO DE AIRE

Mgt., I.Q. Daniel Builes-dabuiles@logos.upb.edu.co.

Profesor-Investigador. Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Química y Grupo de energía y Termodinámica. Circ.1^A #73-34 Medellín. Fax: (574) 4111207.

PhD., I.M., Físico Farid-Chejne-fchejne@logos.upb.edu.co.

Director Grupo de Energía y Termodinámica.

Mgt. I.Q. Alan Hill

Profesor-Investigador. Grupo de Energía y Termodinámica.

I.M. Juan Fernando Gómez

Ingeniero A. Faccini S.A.

Resumen. *En busca de nuevas alternativas para el acondicionamiento de aire que presenten un bajo impacto ambiental, se ha analizado una alternativa energética que utiliza una rueda deshumidificadora con sílica gel, regeneradores rotatorios, un calentador y un par de humidificadores o enfriadores evaporativos. Para ello se realizó un modelo matemático que describe tanto la operación de la rueda deshumidificadora como de todo el proceso. Esta alternativa de acondicionamiento utiliza el mismo aire como fluido refrigerante, pues no utiliza los ciclos clásicos termodinámicos para refrigeración, donde se requiere tanto de fluidos refrigerantes, que puede ser nocivos para el medio ambiente como de compresores que hacen que la demanda de energía eléctrica sea mayor que en la alternativa estudiada. Para la simulación de la rueda deshumidificadora se desarrolló un programa en computador. Dicho programa soluciona el modelo de cuatro ecuaciones diferenciales derivadas de los balances de masa y energía para el proceso de adsorción y cuatro para el proceso de regeneración. Para la verificación de los resultados del modelo se construyó un sistema completo de acondicionamiento piloto obteniendo buenos resultados.*

Palabras claves: *Deshumidificación, Desecantes, Ruedas deshumidificadoras, Aire acondicionado.*

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha incrementado la preocupación por conservar el medio ambiente y los recursos naturales. El acondicionamiento de aire y la refrigeración son problemas ambientales, tanto por la contaminación y los riesgos en la operación de algunos sistemas, como por el gran consumo de energía, el cual puede ser en algunos casos hasta de un 40% del consumo total de la energía en la industria. En el caso específico de los supermercados el 50% de la energía eléctrica es usada anualmente en refrigeración y el 15% en acondicionamiento de aire (Wang 1993).

Los sistemas de acondicionamiento de aire más utilizados hoy, emplean los ciclos clásicos termodinámicos, que por lo general utilizan sustancias como los CFC y HCFC, los cuales destruyen la capa de ozono y según el protocolo de Montreal deben ser sacados de servicio antes del 2005. Por lo anterior, algunos de los procesos clásicos están siendo reemplazados por otros de menor consumo de energía y menor impacto ambiental.

Una alternativa es un proceso basado en la deshumidificación y la humidificación del aire. Esta alternativa de acondicionamiento utiliza el mismo aire como fluido refrigerante, sin utilizar ningún ciclo clásico de refrigeración. Se trata entonces de una tecnología limpia que permite ahorrar energía y que se ha desarrollado con buenos resultados en algunos países.

En este trabajo se llegó a un modelo matemático que describe el funcionamiento de la rueda, y el diseño detallado de todo el equipo. Dentro de los problemas en el diseño de tal equipo, se tuvo la selección del desecante el cual marca una gran diferencia en el resultado final para satisfacer las mismas necesidades. Se puede optar por un desecante como el Cloruro de Litio o el Cloruro de Sodio cuyo fenómeno de deshumidificación es completamente distinto al de las zeolitas o la Sílica Gel. Si se cuenta con la tecnología necesaria se puede pensar en diseñar un desecante óptimo según los requerimientos. En los últimos años se ha estado trabajando en el desarrollo de nuevos desecantes que puedan ser aplicados para los sistemas de enfriamiento (Collier et al, 1986, Collier, 1988 y Novosel, 1996). El desecante utilizado tiene un efecto inmediato en el desempeño de la rueda y puede llegar a influir de forma radical en el material de la matriz y especialmente en la forma de disponerlo en ella. Tal es el caso de desecantes que se disuelven en una matriz de cartón. Una vez seleccionado el desecante es necesario optar por una forma de disponerlo en la rueda (Harriman, 1990). Esto proporciona la alternativa de crear caprichosamente cualquier lecho o geometría de la matriz; sin embargo, una geometría totalmente nueva requeriría de trabajo experimental encaminado a encontrar correlaciones para los dos coeficientes convectivos y factores de fricción.

2. ESTADO DEL ARTE

El interés por el desarrollo de las ruedas de calor y las ruedas que intercambian calor y masa, se vio incrementado con su aplicación a los ciclos enfriamiento que utilizan desecantes sólidos. Tal es el caso del ciclo-Pennington (1955) o ciclo-Munters y del ciclo-Dunkle (1965), el cual era un ciclo abierto que utilizaba ruedas deshumidificadoras. Otros ciclos han sido propuestos y evaluados por Jurinak et al (1984), Van den Bulk et al (1986), Mekler (1991) y Wang (1993) entre otros. Otra forma de utilizar las ruedas que intercambian calor y masa fue presentada por Nimmo et al (1993) y Rengarajan y Nimmo (1993) quienes evaluaron las ventajas de usar dichas ruedas conjuntamente con los sistemas convencionales.

Para la simulación de las ruedas deshumidificadoras varios autores han hecho muchos trabajos con buenos resultados teóricos y experimentales. Van den Bulk, Mitchell y Klein (1985) desarrollaron modelos analíticos con coeficientes de transferencia infinitos, solucionados con el método de características y el de onda de choque. Además presentan correlaciones para la efectividad. Stiesch, Klein y Mitchell (1995) trabajaron con las ruedas de entalpía, e hicieron el modelo y su verificación experimental con bajos porcentajes de error.

3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE POR DESHUMIDIFICACIÓN CON SUSTANCIAS DESECANTES

El objetivo del acondicionamiento del aire es obtener un recinto a unas condiciones de humedad y temperatura denominadas de confort. Para este propósito, se requiere llevar a cabo una serie de procesos de transferencia de calor y de masa sobre el aire como son la humidificación, la deshumidificación, el enfriamiento y el calentamiento, etc.; de forma que el resultado final del arreglo es el de conseguir las condiciones deseadas en el recinto.

En un sistema de acondicionamiento por deshumidificación con sustancias desecantes, el aire se toma de la atmósfera y se somete inicialmente a un proceso de deshumidificación con

deseccantes donde aumenta su temperatura y disminuye su humedad. Posteriormente se enfría con un intercambiador aire-aire para luego ser humidificado y disminuirle aun más su temperatura de forma controlada. En este punto se obtienen las condiciones de ingreso al recinto. En el recinto, el aire gana humedad y la carga térmica hace que aumente su temperatura. Luego, al salir del recinto, se somete a un proceso de humidificación donde se baja su temperatura para pasar posteriormente a un proceso de calentamiento en el intercambiador de calor. Finalmente, la corriente se somete a un nuevo proceso de calentamiento controlado donde se obtienen las condiciones de temperatura necesarias para regenerar la sustancia desecante y luego abandonar el sistema. Los cambios de estado que sufre la corriente se ilustran en la figura 1 por medio de la carta psicrométrica.

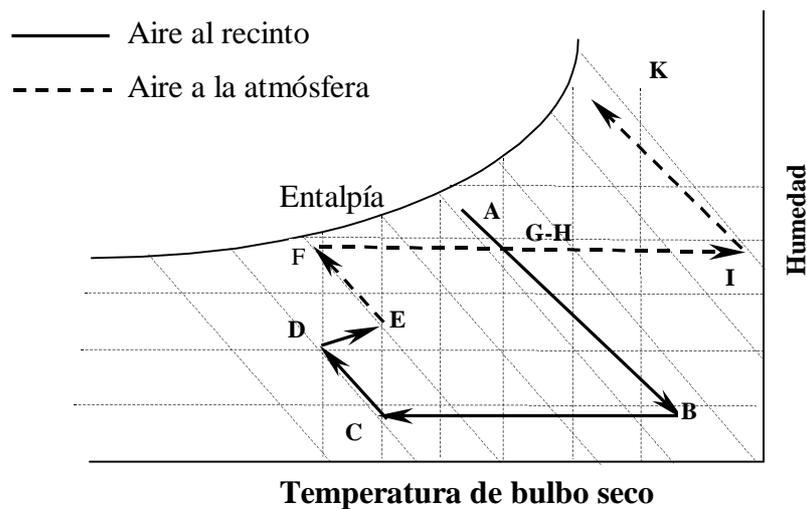


Figura 1. Representación del proceso en la carta Psicrométrica

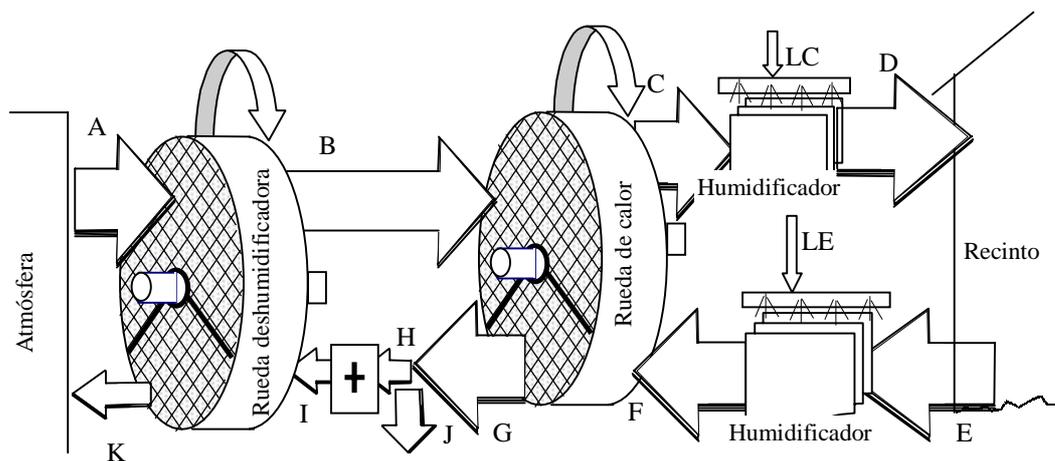


Figura 2. Sistema de acondicionamiento de aire por deshumidificación con desecantes

Con base en lo anterior, se puede decir que un sistema de este tipo está compuesto por un equipo con una sustancia que seca el aire por adsorción o por absorción, un intercambiador de calor aire-aire, dos humidificadores, un calentador de aire y una serie de equipos y accesorios adicionales como bombas, ventiladores, dampers etc. Dicho tren de equipos se puede ver en la figura 2.

La alternativa estudiada utiliza una rueda deshumidificadora en lugar de torres, lográndose así un proceso de regeneración y deshumidificación simultáneo. Las torres pueden ser de desecante líquido atomizado o torres empacadas con un desecante, dispuestas de tal manera que se pueda trabajar en forma alternativa para adsorción-regeneración (Cho y Kim, 1992 y Saha et al 1995). Sin embargo, el tamaño de dichas torres marcaría una diferencia considerable respecto a las ruedas para lograr el mismo objetivo. Por lo anterior la rueda deshumidificadora es el centro de atención del sistema analizado.

En cuanto al intercambiador de calor, se utilizó una rueda recuperadora y como calentador una resistencia eléctrica.

Existen principalmente cuatro tipos de operación del sistema. En el modo de recirculación como se puede ver en la figura 3(a) el recinto es la fuente de aire para ser tratado. Para la regeneración las fuentes de aire son el recinto y la atmósfera. En la figura 3(b) se observa el modo de ventilación pura, donde el aire que se trata es extraído en su totalidad de la atmósfera y el que sale del recinto se utiliza para la regeneración. En el modo de reposición(figura 3(c)), el aire a que se trata y el de regeneración se toman de la atmósfera. Por último, en la figura 3(d) se ilustra el modo mezclado, donde se hace una combinación de los otros modos.

Meckler (1991) analizó un sistema para un restaurante de comidas rápidas de 2000 ft², el cual deshumidifica en dos etapas. La regeneración es hecha con dos corrientes diferentes, a las cuales que se les hacen tres niveles de calentamiento. Las condiciones ambientales son de 35°C y temperatura de bulbo húmedo de 25°C. El flujo volumétrico requerido es de 1.89 m³/s(4000cfm). Las condiciones en el recinto deseadas son de 24°C y 45% de humedad relativa. Los particulares requerimientos y parámetros de operación de los supermercados hacen de ellos campos de gran aplicación para las ruedas deshumidificadoras. Estos logares requieren una especial remoción de humedad para lograr el aire requerido. Asimismo, si se cuenta con una fuente de energía que no sea costosa, como gas natural o energía solar, para ser utilizada en la regeneración se puede justificar energéticamente un sistema con desecantes sobre uno de compresión de vapor

En ocasiones se combinan los sistemas de aire acondicionados de compresión de vapor con ruedas de entalpía en un módulo de preacondicionamiento, el cual reduce la carga de humedad o latente y por lo tanto los costos de operación. Pruebas realizadas por Meckler (1995) demostraron que dicho módulo reduce las necesidades de enfriamiento del aire hasta en un 30%. Con este nuevo sistema se puede obtener un aire con mejor calidad a menor costo. Una serie de ocho estudios realizados por ASHRAE (1992) muestran que incluir ruedas deshumidificadoras en sistemas HVAC los hace más efectivos, reduciendo además la inversión de capital.

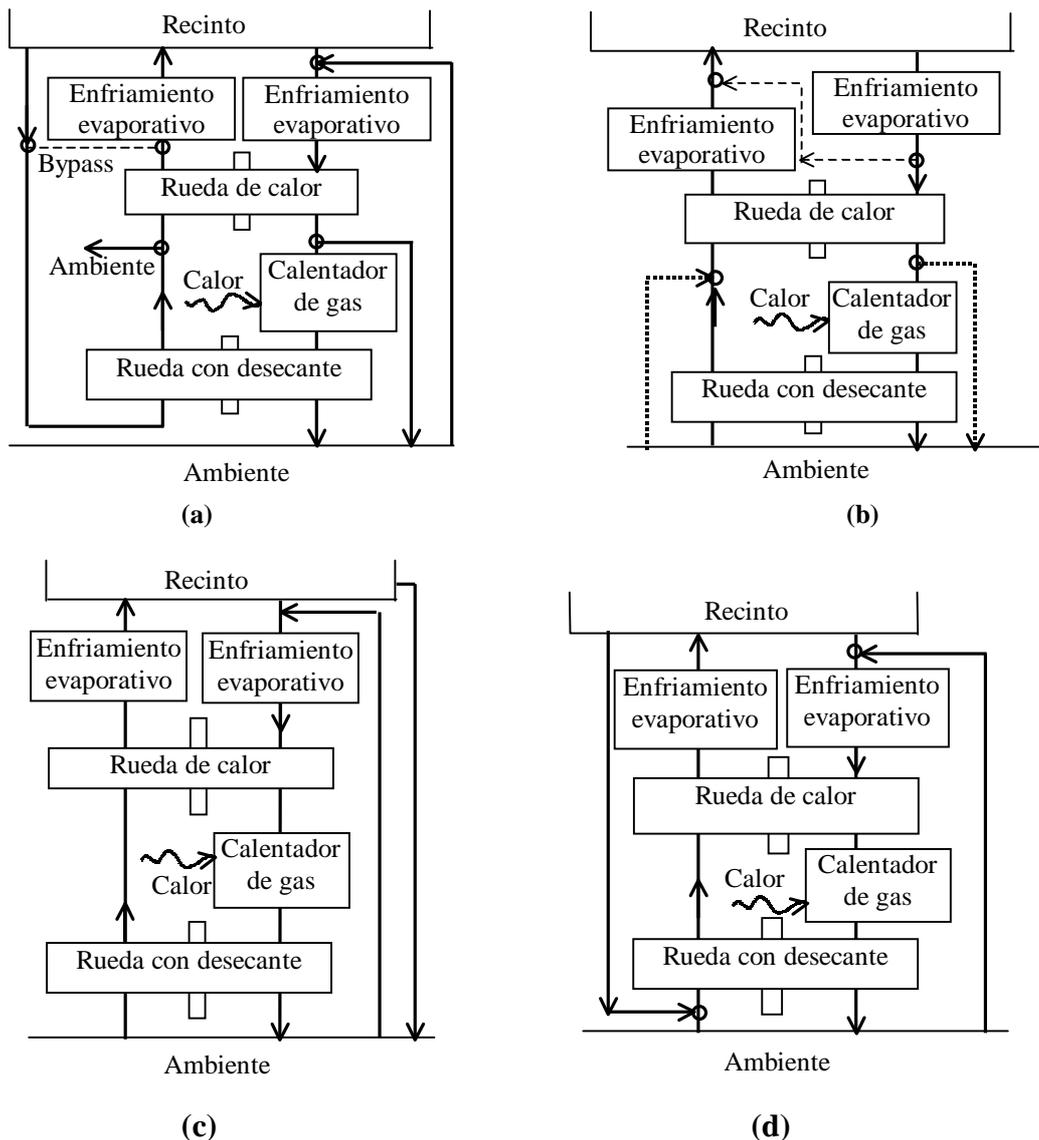


Figura 3. Sistema de enfriamiento con desecantes. (a) Ciclo con recirculación. (b) Ciclo Ventilado. (c) Ciclo con reposición. (d) Ciclo con mezclado. .
 (Van den Bulck, Mitchell y Klein, 1986 y Katipamula, 1998)

4. MODELO MATEMÁTICO DE LA RUEDA DESHUMIDIFICADORA

Para llegar a un modelo diferencial se requiere de dos volúmenes de control, uno den el sólido y otro en el aire (ver figura 6).

Donde \dot{m}_v es el flujo másico de vapor sorbido o desorbido por el desecante. \dot{q} es el flujo de calor convectivo intercambiado entre el sólido y el aire y dy es el espesor de los volúmenes de control.

A cada uno de los volúmenes de control se le hacen los balances de masa y energía teniendo en cuenta que la conducción de calor axial en el sólido y en el gas son despreciables y que los cambios de humedad y temperatura solo se dan en la dirección del flujo. Si el sólido está compuesto por desecante húmedo y su matriz, se puede despreciar la resistencia a la conducción en él pues la matriz utilizada es por lo general muy delgada. En este caso en particular es aluminio de 0.13 mm de espesor con una capa de desecante de 0.3mm.

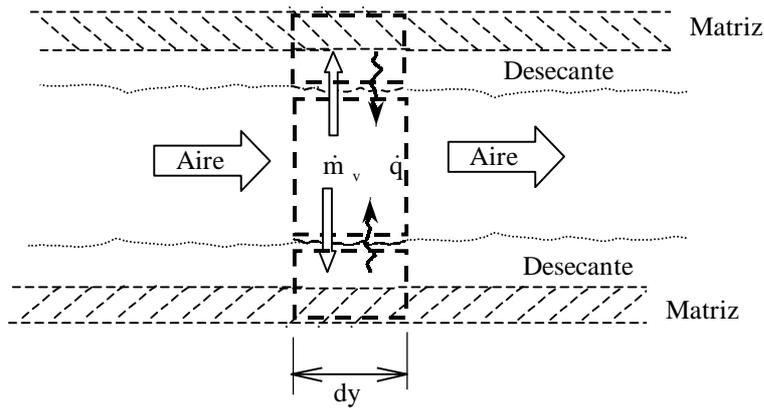


Fig. 6. Volúmenes de control en el conducto

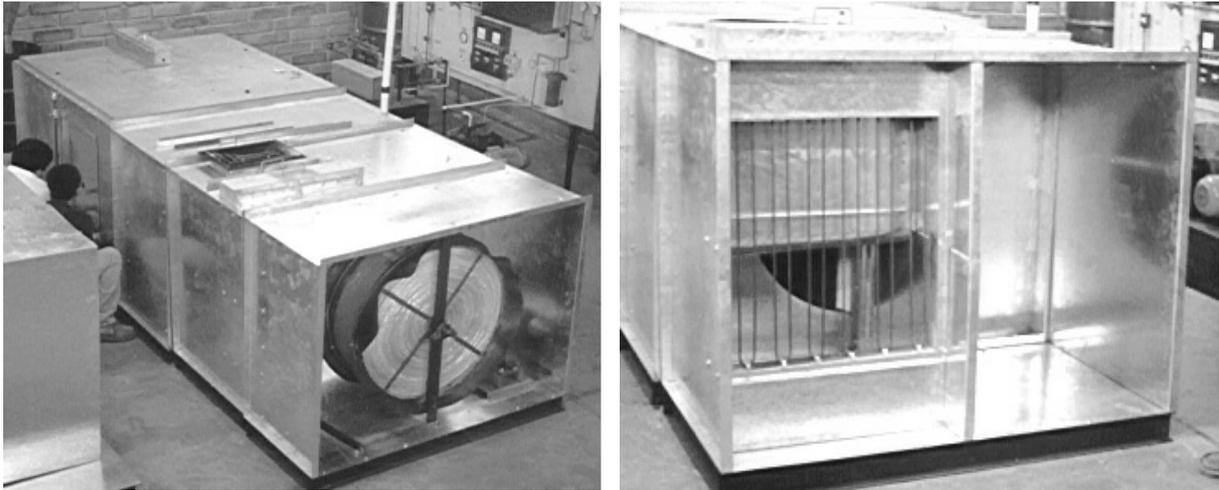
Correlaciones para el coeficiente de transferencia de calor convectiva son presentadas por Kays y London (1984). El coeficiente convectivo de transferencia de masa, puede obtenerse en forma experimental por medio de correlaciones, o usando la analogía entre la transferencia de calor y masa. Para una mezcla aire-vapor de agua se tienen números de Lewis cercanos a la unidad.

El sistema de ecuaciones diferenciales al que se llegó consta de 4 ecuaciones para la sorción y 4 para la regeneración. Para su solución se utilizó un método numérico, pues el sistema es altamente no lineal. La convergencia se logró utilizando el método de Newton-Raphson mejorado con Backtracking. El programa de computador desarrollado para la simulación arroja como resultados los perfiles de humedad y temperatura en el sólido y el aire en un solo conducto además de las condiciones medias de operación en las descargas de la rueda entera.

En términos generales se concluye que el objetivo de los procesos de regeneración y de sorción, es secar el sólido y bajar la humedad del aire respectivamente. En la regeneración se puede llegar rápidamente al mínimo de humedad del sólido, por el contrario, se puede notar que la evolución de la deshumidificación del aire en el proceso de sorción es muy lenta. Ambos resultados sugieren, que para lograr los objetivos, se debe reducir el período de regeneración y aumentar período de adsorción, es decir, que el porcentaje de rueda utilizado para ambos procesos no es igual, que es lo que se hace en la práctica. Ambos fenómenos tienen la misma justificación, ya que la transferencia de masa convectiva es movida por la diferencia de presiones de vapor del agua entre el seno del fluido y la interfase con el sólido, diferencia que es proporcional a la diferencia de temperaturas entre el sólido y el seno del fluido.

5. DIMENSIONAMIENTO Y DISEÑO BÁSICO DE LA MAQUINA PILOTO

Basado en los resultados de los balances de masa y energía se realizó el dimensionamiento de la máquina piloto. La construcción se realizó de forma modular y por consiguiente existe una alta versatilidad, para reformar, cambiar o analizar de manera independiente cada equipo. Los módulos son en lamina de hierro galvanizado calibre 20 montados sobre una base de platinas. Cada uno de los módulos tiene la facilidad para tomar datos de humedad, velocidad, temperatura y presión estática.



(a)

(b)

Figura 4. (a). Módulos 2,3,4,5,y 6; (b). Módulo 3 al frente y módulo 4 al fondo.

El sistema completo consta de seis módulos, cada uno de ellos dividido en dos, una parte para la corriente al recinto y la otra para la corriente a la atmósfera. Cada uno de los módulos consta de los siguientes equipos.

5.1 Primer módulo

Una sección es para el ingreso de aire de la atmósfera. Consta de un filtro y un regulador de flujo con baffles deflectores para el ingreso del aire al sistema a 90°. La segunda sección es un conducto para descarga del aire a al atmósfera y consta de un ventilador de 0.236m³/s (500 cfm) y 0.033m (1.3") de agua de cabeza a 1150 rpm.

5.2 Segundo módulo

Esta compuesto por una carcasa sobre la cual esta empotrada la rueda deshumidificadora con su sistema de tracción. Éste utiliza un motor, de 1/15hp con una caja de velocidades para llevar al rueda de 0.9m de diámetro a 0.5 rpm.

5.3 Tercer módulo

Una sección recibe el aire seco de la rueda deshumidificadora y lo descarga en la rueda recuperadora de calor. La otra sección tiene el calentador de aire compuesto de un banco de seis resistencias (8 kW instalados) en paralelo uniformemente distribuidas.

5.4 Cuarto módulo

Esta comprendido por una carcasa sobre la cual esta empotrada la rueda recuperadora de calor y de su sistema de transmisión. El sistema de tracción consta de un motor de 27 rpm con las reducciones necesarias para que la rueda, de 0.9m de diámetro y 0.4m de espesor tenga la posibilidad de girar a 7, 3 y 1rpm.

5.5 Quinto módulo

En ambas secciones hay un humidificador. En la sección de descarga del aire al recinto se instaló otro ventilado igual al del primer módulo.

5.6 Sexto Módulo

Este es el último módulo y en el se encuentra la simulación del recinto. Consta de baffles deflectores a 90° y de un banco tres resistencias en paralelo uniformemente distribuidas (2kW instalados) para simular la carga térmica.

6. EXPERIMENTACIÓN

La experimentación consistió en medir flujos de aire, temperatura de bulbo seco y humedad relativa en cada compartimento de la máquina. Entre las mediciones hechas se pudo notar para la rueda deshumidificadora una tendencia de existir un máximo de cantidad de agua sorbida y desorbida con respecto a la diferencia de temperatura del aire entre la entrada y salida de la rueda. También se apreció que la cantidad sorbida es menor que la desorbida, por lo tanto, se sugiere que una óptima forma de operación de la rueda está encaminada a utilizar una mayor porción de rueda para la deshumidificación y no 50-50% como se hizo. Dichos resultados se pueden apreciar en la figura 5.

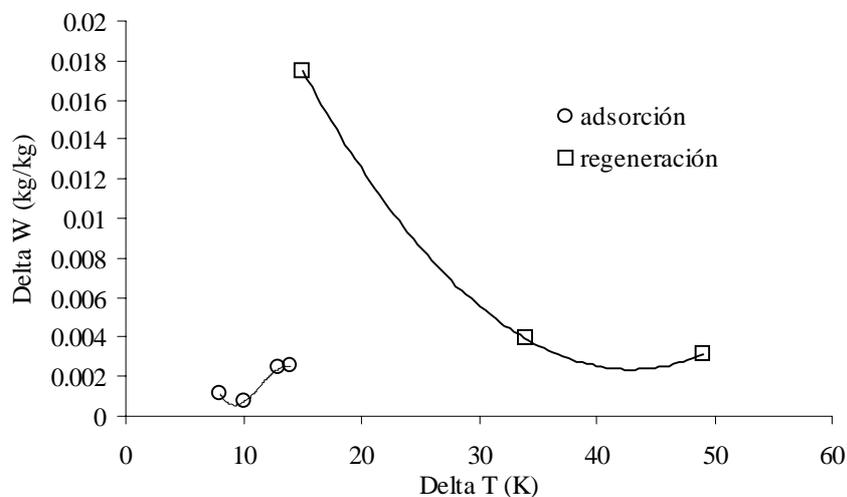


Figura 5. Variación del cambio de humedad con el cambio de temperatura a través de la rueda

CONCLUSIONES

La alternativa de acondicionamiento estudiada, tiene consumos de energía que no tienen los sistemas convencionales. De dichos consumos, el más importante es el calentamiento del aire para la regeneración, pues los motores de la rueda deshumidificadora y de la regeneradora requieren menos de 1/15 hp. Lo anterior ofrece la ventaja de poder utilizar energías alternativas tales como gas o energía solar, en la producción de calor de regeneración.

Para una estimación rápida de las dimensiones de la rueda deshumidificadora se deben tener en cuenta los siguientes criterios. En primer lugar, se debe tratar de obtener una velocidad dentro del rango recomendado, variando el diámetro hidráulico de los conductos, el diámetro de la rueda y la fracción de rueda destinada a cada corriente. Luego, teniendo en cuenta la capacidad de disposición del desecante por unidad de área en las paredes de los conductos, se conoce la cantidad de desecante que es posible alojar según un espesor de rueda. Con el espesor de la rueda y la velocidad del aire, es necesario chequear el tiempo de residencia recomendado, el cual satisface las necesidades de deshumidificación. Por último, para encontrar la velocidad angular, se utiliza la rata o tiempo de saturación y regeneración, que se hará igual al tiempo de exposición de cada conducto en cada sección.

El programa desarrollado que soluciona las ecuaciones, puede simular de una manera satisfactoria el proceso de adsorción y desorción. Por lo tanto puede ser utilizado para conocer los tiempos necesarios de cada proceso y así lograr el diseño de ruedas deshumidificadoras.

Los objetivos de los procesos de regeneración y de deshumidificación, son secar el sólido y bajar la humedad del aire respectivamente. En la regeneración se puede llegar rápidamente al mínimo de humedad del sólido, por el contrario, se puede notar (tanto en las predicciones como en los resultados experimentales) que la evolución de la deshumidificación del aire en el proceso de adsorción es muy lenta. Ambos resultados sugieren que para lograr los objetivos, se debe reducir el período de regeneración y aumentar período de deshumidificación, es decir, que el porcentaje de rueda utilizado para ambos procesos no es igual.

El programa desarrollado que soluciona las ecuaciones, puede simular de una manera satisfactoria el proceso de deshumidificación y regeneración. Por lo tanto puede ser utilizado para llegar al diseño de las ruedas deshumidificadoras, pues permite conocer los tiempos necesarios de cada proceso la cantidad de sílica gel, el diámetro total de la rueda y la velocidad angular entre otros.

Agradecimientos

Los autores agradecen a COLCIENCIAS (BID), a la empresa A. Faccini S.A. y a la Universidad Pontificia Bolivariana por el apoyo económico y logístico para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Stiesch, G., Klein S.A. and Mitchell, J.W., 1995, Performance of rotary Heat and Mass exchangers. En: HVAC & R. Research. Vol. 1, No.(4); p.308-323.
- Rengarajan, K., and Nimmo, B.G., 1993, Desiccant Enhanced Air Conditioning (DEAC): An Approach to improved Comfort. En: Heat Pump and Refrigeration Systems Design, Analysis and Applications. ASME AES-Vol.29, p.129-138.
- Nimmo, B.G., R.K. Collier Jr., And R. Rengarajan, 1993, DEAC: Desiccant Enhancement of cooling-based dehumidification. En: ASHRAE Trans. Vol. 99, No. 1; p.842-848.
- Van Den Bulck, E., Mitchell, J.W. And Klein, S., 1985, Design Theory For Rotary Heat And Mass Exchangers. En: Int. J. Heat and Mass Transfer. Vol. 28, p. 1575-1595.
- Van Den Bulck, E., Mitchell, J.W. And Klein, S., 1986, The Use of Dehumidifiers in Desiccant Cooling and Dehumidification Systems. En: ASME Journal of Heat Transfer, vol. 108, p. 684-692.
- Dunkle, R.V., 1965, A Method of Solar Air Conditioning, in Mechanical and Chemical Transactions. En: MCI. Institute of Engineering, Australia: vol. 1, p.73-78.

- Jurinak, J.J., Mitchell, J.W. And Beckman, W.A., 1984, Open cycle desiccant air-conditioning as an alternative to vapor compression cooling in residential applications. En: J. sol. Energy Eng. Vol. 106, p. 256-260.
- Wang, Shah K., 1993, HandBook of Air Conditioning and Refrigeration. McGraw Hill.
- Collier , R.K., Jr., 1988, Advanced Desiccant Materials Assessment –Phase II Gas Research Institute Report. Chicago. GRI-88/0125.
- Collier , R.K., Jr., Cale, T.S., And Lavan, Z., 1986, Advanced Desiccant Materials Assessment. Gas Research Institute. Chicago. Report GRI-86/0182.
- Novosel, Davor, 1996, Advances in Desiccant Technologies. En: Energy Engineering. Vol. 93, No. 1, p.6-19.
- Harriman, L.G., 1990, The Dehumidification Handbook. 2^a Ed. Munters Cargocaire, Amesbury, MA.
- Pennington, N.A., 1955, Humidity Changer for Air-Conditioning, U.S. Patent 2,700,537, Jan.
- Cho, Soon-Haeng And Kim, Jong-Nam, 1992, Modeling of a Silica Gel/Water Adsorption Cooling System. En: Energy. Vol. 17, No.9, p.829-839.
- Meckler, G., 1991, Comparative Analysis of a Gas-Energized Desiccant Cold-Air Unit. En: ASHRAE Transactions, part I. p. 637-640.
- Meckler, M., 1995, Desiccant Outdoor Air Preconditioners Maximize Heat Recovery Ventilation Potentials. En: ASHRAE Transactions. Vol. 101, No.2; p.992-1000.
- ASHRAE, 1992, Desiccant Cooling And Dehumidification. Atlanta : Edited by L. Harriman.
- Katipamula, Srinivas, 1998, Clearing the Air with Two-Wheel Desiccant Dehumidification. En: Energy User News. Vol. 23, No. 12, p. 31-33 and 49
- Kays, W.M. And London, L., 1984. Compact Heat Exchangers. Third Edition. New York: McGraw-Hill.

Abstract. In order to find new alternatives to air conditioning with a low environmental damage, a system that uses a desiccant wheel with a silica gel matrix, a heat recovery wheel, an air heater and two humidifiers is analysed. For this purpose, a mathematical model that describes the operation of the whole process and of the desiccant wheel was developed. In this alternative, the same air to be conditioned is used as refrigerant, it does not uses the classical thermodynamical refrigeration cycles where environmental harmfulness refrigerants and compressors, with higher electricity consumption than the above alternative, are employed. To simulate the desiccant wheel behaviour a computer software was developed. In it, a eight differential equation system derived from the energy and mass balances for the adsorption and regeneration (four for each) processes is solved. In order to validate the results a pilot system was designed and constructed with. Experimental assays were done with satisfactory results.

Key Words: *Dehumidification, Desiccant, dehumidifying Wheels, Air conditioning.*