

Comportamiento del gel de sílice como filtro deshumidificador en sistemas de acondicionamiento de aire por compresión de vapor

*Antonio José Bula Silvera y Javier Juvinao**

(Recibido el 7 de julio de 2003. Aceptado el 17 de marzo de 2004)

Resumen

Con el fin de determinar la tasa de adsorción de humedad por un filtro a base de gel de sílice, se han llevado a cabo una serie de experimentos en los cuales se ha variado la densidad de gel de sílice por unidad de área y la velocidad con que el aire se acerca al filtro. Los resultados mostraron que al disminuir la velocidad del aire y al aumentar la masa de desecante por unidad de área, se consigue mayor nivel de adsorción por parte del filtro. Sin embargo, al adimensionar la cantidad de agua retenida por unidad de masa de desecante, se observa que el filtro con menor densidad presenta mayor efectividad en el proceso de remoción de humedad. Los resultados se presentan en función del tiempo en un lapso de 50 minutos de muestreo.

----- *Palabras clave:* deshumidificadores sólidos, eficiencia energética, adsorción, aire acondicionado.

Performance of silica gel filters used in an air conditioning system based in a vapor compression refrigeration system

Abstract

In order to determine the humidity adsorption rate in a filter made out of silica gel, a series of experiments were carried out where the mass of silica gel per unit area and the velocity of the air coming to the filter were studied. The results showed that the amount of humidity removed by the filter increases as

* Departamento de Ingeniería Mecánica. Grupo UREMA. Universidad del Norte. Barranquilla, Colombia. abula@uninorte.edu.co.

the density of silica gel is increased and the velocity of the air is reduced. However, a dimensionless variable obtained between the silica gel and the amount of humidity removed shows that the process is more effective as the density is reduced. The results are presented as a function of time, in a 50 minutes time frame.

----- *Key words:* solid dehumidifiers, energy efficiency, adsorption, air conditioning.

Introducción

La utilización de equipos de aire acondicionado se ha hecho necesaria en las regiones tropicales húmedas a pesar de los altos costos que dichos sistemas implican en materia económica, energética y ambiental; en vista de lo cual se han desarrollado nuevos refrigerantes y materiales constitutivos como barreras térmicas sólidas, que no deterioran la capa de ozono. Debido a la gran contaminación existente y pensando en una gestión encaminada a mejorar el ambiente en que vivimos, se hace urgente disminuir el consumo energético, el cual procede en muchos casos de la combustión de elementos de origen fósil. Las zonas que requieren de la utilización de sistemas de acondicionamiento de aire se incrementan día a día, lo cual hace necesario buscar alternativas energéticas viables. Aunque los sistemas de refrigeración y acondicionamiento de aire actuales son muy eficientes, presentan un consumo de energía alto, sobre todo en lugares donde existe alta humedad, la cual produce un aumento en la carga térmica. Estos sistemas generadores de humedad ya han sido investigados con anterioridad, incluso se ha calculado el consumo energético al que se puede llegar al reducir la carga latente. Howell *et al.* [1] presentaron un modelo matemático para evaluar la carga latente en un supermercado típico en Estados Unidos y con ella determinar el desempeño energético de los refrigeradores. Howell *et al.* [2] calcularon el consumo energético de los refrigeradores de productos de acuerdo con los niveles de humedad presentes en un supermercado. Investigaciones más recientes, Bula y Márquez [3], presentaron un modelo matemático dinámico para la predicción de la temperatura y la humedad relativa en un recinto acondicionado. Bula y Méndez *et al.* [4] presentaron resultados preliminares sobre el efecto en el consumo energético de un sistema de refrigeración por compresión de vapor al utilizar filtros desecantes, los cuales mostraron ahorros significativos, 14%, cuando la humedad del sistema es alta (99%). Estos estudios de sistemas de aire acondicionado también han sido discutidos en otros artículos, Bula *et al.* [5],

presentaron un modelo matemático para sistemas de refrigeración en donde el objetivo era determinar el desempeño energético dependiendo de la disponibilidad térmica de la fuente de generación.

El presente artículo estudia el comportamiento de filtros deshumidificadores como alternativa para disminuir la carga térmica por calor latente de los sistemas de refrigeración por compresión de vapor utilizando filtros desecantes a base de gel de sílice que permiten controlar la humedad del aire que pasa por el evaporador y disminuyen la cantidad de trabajo del compresor obteniendo las condiciones deseadas de forma más rápida aumentando la eficiencia del sistema y disminuyendo los gastos energéticos sin contaminar el ambiente. Este sistema es de gran utilidad

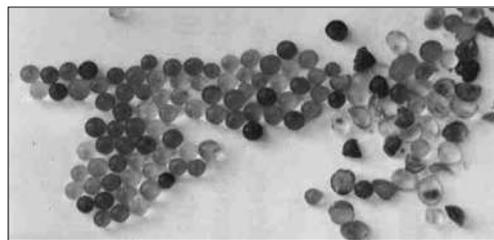


Figura 1 Gránulos de gel de sílice

donde se presentan cargas térmicas por calor latente altas como en el caso de supermercados, gimnasios, cines, discotecas etc. Un desecante es todo aquel material, ya sea líquido o sólido, que presente una gran capacidad para la absorción de humedad en relación con su propio peso. Los productos desecantes exhiben una afinidad tan fuerte por la humedad que pueden extraer vapor de agua directamente del aire circundante. Uno de los desecantes sólidos más comunes es el gel de sílice. La característica más importante del proceso de adsorción de agua por parte de los desecantes es su reversibilidad, mediante regeneración a temperaturas entre 55 y 149 °C. Un desecante sólido puede perder parcialmente la capacidad de adsorción de la humedad, debido a la degradación térmica y

mecánica, pero una reducción sustancial de capacidad de los desecantes sólidos es normalmente causada por contaminación con materiales aéreos y sustancias reactivas por lo cual el aire de entrada debe filtrarse para eliminar las partículas. El gel de sílice (SiO_2) es una sustancia amorfa, insoluble en agua y en casi cualquier otro solvente, no es tóxica, es inodora y químicamente estable (excepto por el ácido hidrofúrico y medios cáusticos con pH mayor de 10,5, no reacciona con alguna otra sustancia). Gracias a su única composición química y estructura física, el gel de sílice posee numerosas características tales como: alta capacidad de adsorción (más de 40% en peso), estabilidad con la temperatura, propiedades físicas estables, una relativamente alta resistencia mecánica y una baja temperatura de regeneración. El gel de sílice es actualmente uno de los desecantes sólidos más utilizados en la industria debido a sus numerosas características desecantes, su bajo precio y su disponibilidad. La adsorción de humedad tiene aplicaciones numerosas que ayudan a la solución de los problemas ocasionados por esta tales como: corrosión, condensación, olores, generación de moho y

bacterias, eliminación de estática (bajo ciertas condiciones).

Desarrollo experimental

Para realizar las pruebas fue necesaria la construcción de tres tipos de filtros desecantes desmontables, los cuales fueron localizados a la entrada del aire al ducto, tal como se muestra en la figura 2. El diámetro del ducto de entrada es de 25 cm ($490,87 \text{ cm}^2$). Los filtros se clasificaron de acuerdo con la cantidad de sílice por unidad de área superficial de la siguiente manera: $0,152 \text{ g de sílice/cm}^2$ de filtro (75 g de sílice), y $0,611 \text{ g de sílice/cm}^2$ de filtro (300 g de sílice). Esta fue confinada entre dos áreas circulares de $490,87 \text{ cm}^2$ divididas por canales que fueron diseñados para que ésta no dejara espacios libres y garantizara que el cien por ciento del sílice estuviera en contacto con la corriente de aire que entraba por el evaporador. La malla circular es de anejo plástico y se unió con costura común. Para la regeneración de los filtros después de cada prueba se utilizó un horno microondas.

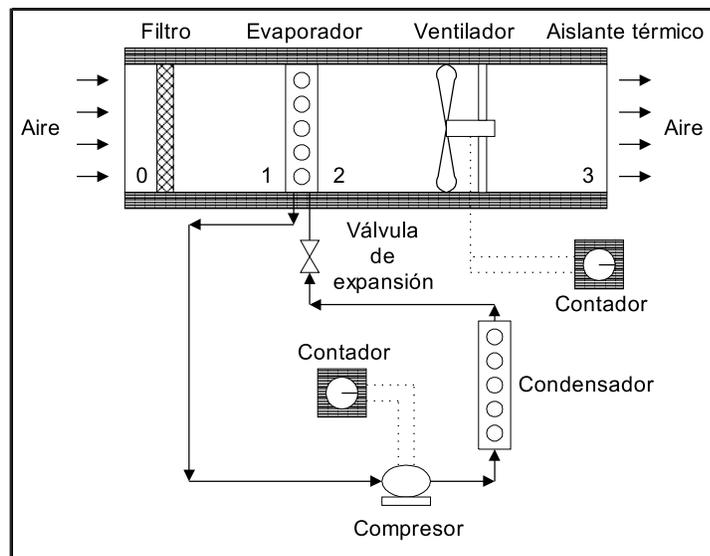


Figura 2 Esquema del sistema usado para el experimento

Se usaron dos velocidades de aire para observar cómo esta variable afectaba el proceso. Las velocidades usadas fueron 0,22 y 0,77 m/s.

El sistema de refrigeración Lab-Volt 3401 fue aislado térmicamente con láminas de poliestireno extruido de 1" de espesor en la sección del ducto para mantener una carga térmica constante. Los instrumentos de medición fueron distribuidos en el ducto del equipo de la siguiente forma:

1. Las tomas de humedad relativa fueron distribuidas en el ducto colocando una en el exterior para medir la humedad del aire de entrada (punto 0), la segunda se puso entre los filtros y el evaporador (punto 1).
2. El anemómetro digital fue colocado en la rejilla a la entrada de aire al ducto (punto 0) con el fin de determinar la velocidad con la cual entraba aire al evaporador y determinar el caudal.

Resultados y análisis

Las siguientes gráficas muestran el comportamiento del sílice para diferentes condiciones

de operación en el entrenador de acondicionamiento de aire Lab-Volt 3401. La figura 3 presenta la cantidad de agua removida por centímetro cuadrado de filtro. Se observa que durante los primeros minutos (0-6 min) de operación del sistema, para ambos filtros, se produce la mayor adsorción de humedad por parte del elemento. Esto se puede deducir por la pendiente que presentan ambas curvas, más empinadas en los primeros minutos. También se observa que a mayor densidad de sílice por unidad de área, la pendiente de adsorción de humedad es mayor. Después de aproximadamente quince minutos de operación, las curvas disminuyen la pendiente, lo cual significa que la capacidad del filtro de continuar con la deshumidificación del medio ambiente disminuye. Este fenómeno se puede explicar debido a que en los primeros instantes, los gránulos de sílice están ávidos de agua y esto permite que adsorban con gran facilidad, pero a medida que pasa el tiempo, el agua que ha sido retenida por los gránulos bloquea el proceso de adsorción hasta cuando la difusión de esta permita que el agua sea llevada hacia el centro del gránulo. Si este comportamiento es correcto, se puede esperar que la máxima transferencia de

Agua removida por unidad de área
(g humedad/cm²)

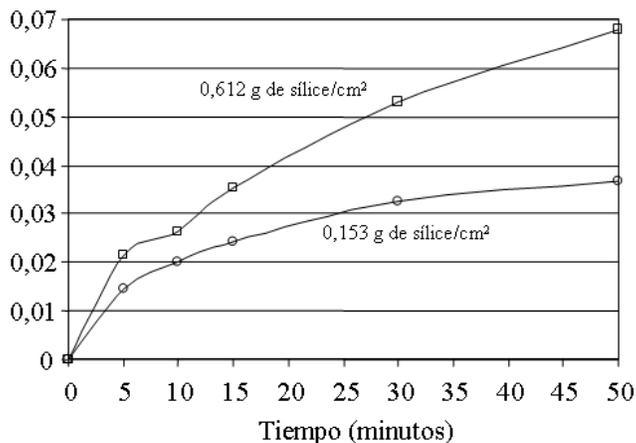


Figura 3 Agua retenida para filtros de diferente densidad superficial (velocidad: 0,77 m/s, humedad relativa inicial promedio: 73%)

agua desde el medio ambiente hacia el filtro se dé en este intervalo de tiempo, independientemente de la densidad superficial de sílice. Sin embargo, el aumento en la densidad superficial representa mayor capacidad de retención de masa de agua. Es importante tener en cuenta, que el proceso de difusión de la humedad hacia el centro de los gránulos de sílice no es deseado, ya que esto obligaría a pensar en un proceso de regeneración de más larga exposición o con una fuente de mayor temperatura.

Teniendo en cuenta que la mayor cantidad de agua removida se da en los primeros quince minutos, por medio de una regresión lineal se obtuvieron las ecuaciones que describen el proceso en este lapso de tiempo:

Filtro de 0,612 g de sílice/cm²:

$$\frac{g \text{ de humedad}}{cm^2} = 0,0044t - 0,0001t^2, R^2 = 0,967 \quad (1)$$

Filtro de 0,153 g de sílice/cm²:

$$\frac{g \text{ de humedad}}{cm^2} = 0,0032t - 0,0001t^2, R^2 = 0,991 \quad (2)$$

La figura 4 presenta la tasa de remoción de agua por unidad de tiempo. En ésta se observa que a

medida que pasa el tiempo la capacidad del filtro de seguir reteniendo la humedad se reduce. Es importante anotar que el filtro con menor densidad superficial de sílice presenta menor tasa de retención. También se aprecia que la máxima retención se da en los primeros minutos, y se aprecia con más claridad que el efecto deshumidificador es más notorio hasta los 15 min, independientemente de la densidad superficial. Las ecuaciones que describen el proceso de cambio de la velocidad de adsorción del filtro hasta el minuto quince son las siguientes:

Filtro de 0,612 g de sílice/cm²:

$$g \text{ de humedad}/min * cm^2 = 0,016t^{-0,7792}, R^2 = 0,985 \quad (3)$$

Filtro de 0,153 g de sílice/cm²:

$$g \text{ de humedad}/min * cm^2 = 0,015t^{-1,0556}, R^2 = 0,966 \quad (4)$$

La figura 5 muestra cómo disminuye la humedad relativa al pasar el aire a través del filtro. Esta gráfica se llevó a nivel porcentual teniendo en cuenta que la humedad relativa promedio del aire antes de entrar al filtro estaba alrededor de 73%. La variación en el tiempo muestra que en los primeros minutos de operación (0-6 min) la reducción de la humedad relativa es casi de un

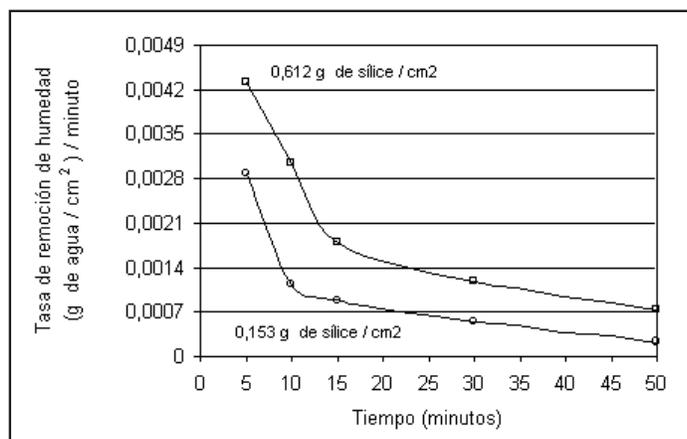


Figura 4 Agua retenida para filtros de diferente densidad superficial (velocidad: 0,77 m/s, humedad relativa inicial promedio: 73%)

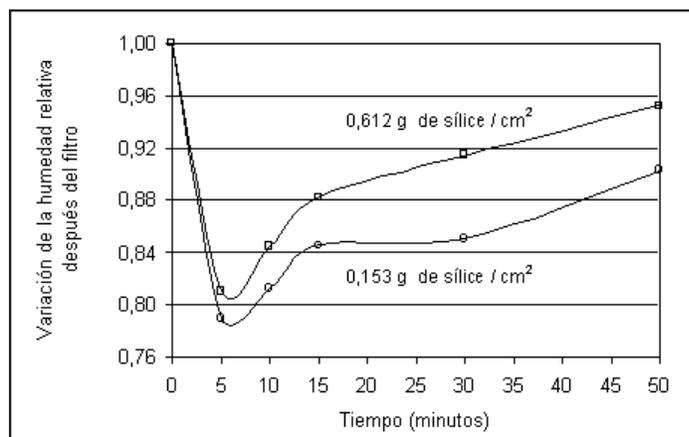


Figura 5 Porcentaje de variación de humedad relativa después del filtro (velocidad: 0,77 m/s, humedad relativa inicial promedio: 73%)

22%, y que con el paso del tiempo ésta aumenta. Estos valores están acordes con los presentados en la figura 3, ya que el proceso de deshumidificación se da a temperatura casi constante (la variación debido al proceso de adsorción de la sílice es despreciable), por lo cual, una disminución en la humedad absoluta representa una disminución en la humedad relativa. En la figura 2, también se observa que al aumentar la densidad superficial, también aumenta el nivel de deshumidificación. Las ecuaciones que describen el proceso de variación de la humedad relativa después del filtro hasta el minuto quince son las siguientes:

Filtro de 0,612 g de sílice/cm²:

$$\% \text{ cambio humedad relativa} = 1 - 0,0747t + 0,0088t^2 - 0,003t^3, R^2 = 1,0 \quad (5)$$

Filtro de 0,153 g de sílice/cm²:

$$\% \text{ cambio humedad relativa} = 1 - 0,0805t + 0,009t^2 - 0,003t^3, R^2 = 1,0, \quad (6)$$

La figura 6 muestra la cantidad de agua que se atrapa para un filtro bajo diferentes condiciones de velocidad. Se observa que al aumentar la velocidad disminuye la cantidad de agua retirada. Este fenómeno se puede explicar debido a que

el aire a baja velocidad posee mayor tiempo de residencia con lo cual aumenta la posibilidad de que el vapor de agua entre en contacto con la superficie de los granúlos de sílice. Por medio de una regresión lineal se obtuvieron las ecuaciones que describen el proceso en este lapso de tiempo:

Velocidad de 0,77 m/s:

$$\frac{g \text{ de humedad}}{cm^2} = 0,0008t - 6 \times 10^{-6}, R^2 = 0,998 \quad (7)$$

Velocidad de 0,22 m/s:

$$\frac{g \text{ de humedad}}{cm^2} = 0,0015t - 6 \times 10^{-5}t^2, R^2 = 0,998 \quad (8)$$

La figura 7 presenta la tasa de remoción de agua por unidad de tiempo. En esta se observa que a medida que pasa el tiempo la capacidad del filtro de seguir reteniendo la humedad se reduce.

Es importante anotar que a menor velocidad se presenta mayor capacidad de remover humedad. También se aprecia que la máxima retención se da en los primeros minutos, y se aprecia con más claridad que el efecto deshumidificador es notorio hasta los quince minutos, siendo más fuerte

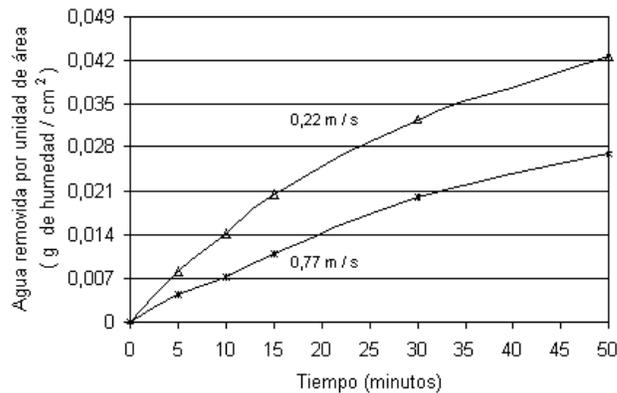


Figura 6 Agua retenida a diferentes velocidades (densidad superficial: 0,306 g/cm², humedad relativa inicial promedio: 73%)

el efecto a bajas velocidades. Por medio de una regresión lineal se obtuvieron las ecuaciones que describen el proceso en este lapso de quince minutos:

Velocidad de 0,77 m/s:

$$g \text{ de humedad/cm}^2 \cdot \text{min} = 0,0016 - 0,002 t + 1 \times 10^{-5} t^2, R^2 = 1,0 \quad (9)$$

Velocidad de 0,22 m/s:

$$g \text{ de humedad/cm}^2 \cdot \text{min} = 0,0024 - 0,0002 t + 8 \times 10^{-6} t^2, R^2 = 1,0 \quad (10)$$

La figura 8 muestra que para menor velocidad del aire a través del filtro, se pueden obtener mayores niveles de deshumidificación, con lo cual se reduce la humedad relativa del aire. Se observa que al disminuir la velocidad, se puede obtener una disminución de la humedad relativa de casi el 45% del valor inicial. Es importante resaltar que de acuerdo con las condiciones analizadas, la disminución en la humedad es más significativa al reducir la velocidad que al aumentar la densidad superficial de material de adsorción de humedad.

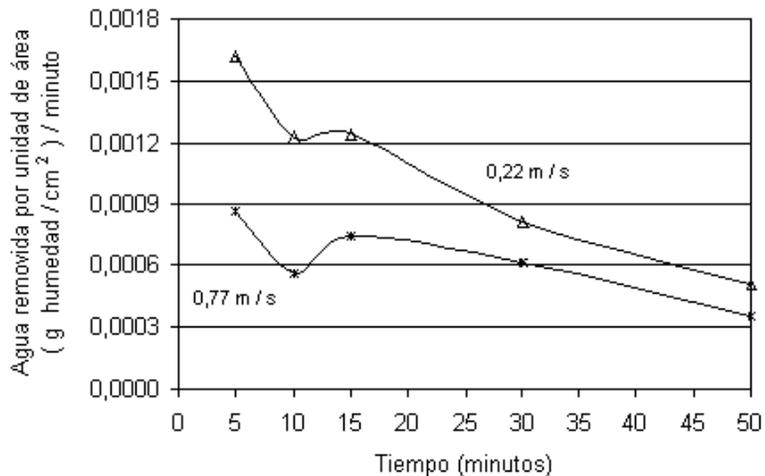


Figura 7 Agua retenida para diferentes velocidades (densidad superficial: 0,306 g/cm², humedad relativa inicial promedio: 73%)

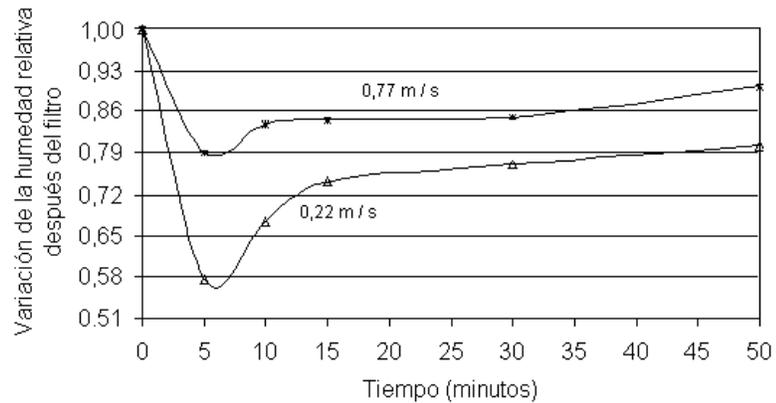


Figura 8 Porcentaje de variación de humedad relativa después del filtro (densidad superficial: 0,306 g/cm², humedad relativa inicial promedio: 73%)

Las ecuaciones que representan el fenómeno son:

Velocidad de 0,77 m/s:

$$g \text{ de humedad/cm}^2 \cdot \text{min} = 1 - 0,0887t - 0,0114t^2 - 0,0004t^3, R^2 = 1,0 \quad (11)$$

Velocidad de 0,22 m/s:

$$g \text{ de humedad/cm}^2 \cdot \text{min} = 1 - 0,1734t + 0,0214t^2 - 0,0007t^3, R^2 = 1,0 \quad (12)$$

La figura 9 muestra que la remoción de humedad se hace de manera más efectiva por parte del filtro de menor densidad superficial, esto puede originarse debido a que algunos granos de sílice no quedan expuestos de manera directa a la corriente de aire. Esto indica que para el caso en que se requiera eliminar gran cantidad de humedad de un flujo de aire, es más recomendable hacerlo en varias etapas con filtros de baja densidad, que con un solo filtro de alta densidad superficial.

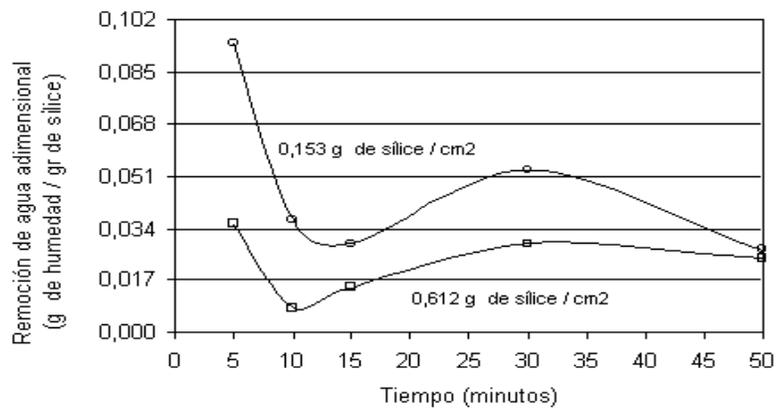


Figura 9 Remoción de agua adimensional (velocidad: 0,77 m/s, humedad relativa inicial promedio: 73%)

Las ecuaciones que representan el fenómeno hasta el minuto quince son:

Filtro de 0,612 g de sílice/cm²:

$$\frac{g \text{ de humedad}}{g \text{ de sílice}} = 0,0964 - 0,0156 t + 0,0007 t^2, R^2 = 1,0 \quad (13)$$

Filtro de 0,153 g de sílice/cm²:

$$\frac{g \text{ de humedad}}{g \text{ de sílice}} = 0,2013 - 0,0264 t + 0,001 t^2, R^2 = 1,0 \quad (14)$$

Conclusiones

- La sílice presenta un período de mayor adsorción de agua durante los primeros 15 min del proceso, independientemente de la densidad superficial de sílice. En este tiempo se dan los niveles más altos de retención de agua, fenómeno que tiende a disminuir y estabilizarse a medida que pasa el tiempo; esto es de esperarse debido a que en los primeros minutos la sílice se encuentra libre de agua y tenderá a capturar la mayor cantidad posible del ambiente.
- El aumento en la densidad superficial de sílice permite mayor adsorción de agua en el filtro. Después tiende a estabilizarse a medida que se satura. El aumento de la cantidad de agua retenida al aumentar la densidad superficial no es linealmente proporcional y por tanto no podemos esperar que al doblar la densidad superficial, el filtro deba retener el doble de humedad. Sin embargo, el tiempo requerido para la saturación del filtro aumenta al incrementar la densidad superficial de sílice, lo que permite mayor tiempo de operación del filtro.
- La humedad relativa después del filtro disminuye, presentando sus niveles más bajos en los primeros minutos de operación. Al aumentar la densidad de sílice, aumenta la capaci-

dad de adsorber agua del ambiente, bajando la humedad absoluta y por tanto la humedad relativa.

- Al utilizar sílice se presenta una disminución considerable de la humedad que pasa a través del sistema de acondicionamiento de aire, lo cual implica la disminución en la carga por calor latente del sistema. Este comportamiento es ideal para la filtración de humedad en recintos donde se requiera valores de humedad relativa bajos, tales como laboratorios, salas de operación, etc.
- La cantidad de agua retenida también se ve afectada por la velocidad a la cual entra la corriente de aire al filtro desecante. Por tanto se puede concluir que la cantidad de agua retenida decae con el aumento de la velocidad del flujo. La velocidad como es de esperarse también afecta la humedad relativa del aire, a menor velocidad mayor es el tiempo de contacto que tiene el aire con los granos de sílice, por tanto los niveles de humedad serán más bajos, alcanzando reducciones en el orden del 45%.
- Con el aumento de la densidad superficial de sílice mejoran las condiciones de operación del filtro, sin embargo a menor densidad superficial se presenta mayor efectividad en la retención de humedad del filtro.

Referencias

1. Howell, Ronald *et al.* "Simulation of refrigerated display cases performance in supermarkets". En: *Proceedings of the IASTED International Conference*. Banff, Canadá. 1997. pp. 173 -176.
2. Howell, Ronald *et al.* "Effects of indoor relative humidity on refrigerated display cases performance". En: *Proceedings of CLIMA 2000 Conference*. Bruselas, Bélgica. 1997.
3. Bula, Antonio y Márquez, Antonio. "Modelación matemática y simulación de un sistema de acondicionamiento de aire en estado transitorio". En: *Revista Ingeniería y Desarrollo*. N.º 11. 2002. pp. 83-100.

4. Bula, Antonio y Méndez, Felipe. "Ahorro de energía eléctrica por implementación de filtros desecantes en sistemas de acondicionamiento de aire por compresión de vapor". En: *Revista Facultad de Ingeniería*. Universidad de Antioquia. N.º 31. Medellín. Junio. 2004.
5. Bula, Antonio *et al.* "Thermodynamic simulation of a solar absorption refrigeration system, generator heat exchanger". En: *Conferencia Internacional en modelado, simulación y redes neuronales MSNN - 2000*. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 2000.