

Ahorro de energía eléctrica por implementación de filtros desecantes en sistemas de acondicionamiento de aire por compresión de vapor

*Antonio José Bula Silvera y Felipe Andrés Méndez Díaz**
(Recibido el 7 de julio de 2003. Aceptado el 27 de agosto de 2003)

Resumen

Una serie de experimentos exploratorios han sido llevados a cabo para determinar cómo se afecta el desempeño energético de un sistema de aire acondicionado por compresión de vapor al trabajar con un filtro deshumidificador instalado en la línea de retorno del aire hacia el evaporador. Los experimentos se realizaron considerando sistemas con alta y baja carga latente, y se observó cómo variaba el consumo de energía del equipo. Se encontró que al estar sometido el sistema de aire acondicionado a altas cargas latentes, el ahorro de energía al instalar estos filtros desecantes puede llegar a 14,5% mientras que al estar sometido el sistema a bajas cargas latentes, el ahorro sólo llega a 2%.

----- *Palabras clave:* gel de sílice, filtro desecante, aire acondicionado, ahorro energético.

Energy savings due to dehumidifiers filters in air conditioning systems using vapor compression refrigeration equipments

Abstract

Experiments were carried out in order to determine how the performance of a vapor compression air conditioning system is affected by a dehumidifier filter installed before the evaporator. The experiments monitored the energy consumed by the refrigeration system while the latent load was held at high and low levels. It was found that at high latent loads, there are important savings in energy, around 14,5%, while at low latent loads, the energy savings are around 2%.

----- *Key words:* silica gel, dehumidifying filter, air conditioning, energy saving.

* Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte, Grupo UREMA, km. 5, Carretera Puerto Colombia, Barranquilla, Colombia. abula@uninorte.edu.co.

Símbolos

<i>A</i>	Constante de compatibilidad de unidades
<i>B</i>	Constante de compatibilidad de unidades
<i>h</i>	Entalpía
<i>hr</i>	Humedad relativa
<i>Q</i>	Calor
<i>SVF</i>	Flujo volumétrico estándar de aire
<i>T</i>	Temperatura
<i>W</i>	Relación de humedad

Subíndices

<i>E</i>	Expulsión
<i>M</i>	Mezcla
<i>LE</i>	Latente externo
<i>LI</i>	Latente interno
<i>LR</i>	Latente del recinto
<i>LU</i>	Latente de la unidad
<i>OA</i>	Exterior
<i>R</i>	Recinto
<i>S</i>	Suministro
<i>SE</i>	Sensible externo
<i>SI</i>	Sensible interno
<i>SR</i>	Sensible del recinto
<i>SU</i>	Sensible de la unidad

Introducción

Uno de los principales consumidores de energía en las regiones tropicales húmedas son los sistemas de aire acondicionado, que se han convertido en una necesidad para industrias, comercios y hogares, a pesar de los altos costos operativos, energéticos y ambientales que ellos implican. En países industrializados se están utilizando sistemas desecantes para contribuir al confort humano. Adicionalmente, la deshumidificación contribuye a evitar problemas tales como: corrosión, condensación, olores, moho, costos de operación, etc.; así pues, se plantea la implementación de sistemas desecantes sólidos para disminuir el contenido de humedad en el aire de suministro, lo cual se refleja en la disminución del consumo eléctrico del equipo, al tiempo que aumenta la vida útil de los equipos de refrigeración. Los productos desecantes exhiben una afinidad tan fuerte con la humedad que pueden extraer vapor de agua directamente del aire circundante, los desecantes sólidos más comunes son el gel de sílice (SiO_2) y la alúmina activada (Al_2O_3). La característica más importante del proceso de adsorción de agua por parte de los desecantes es su reversibilidad. En el proceso de adsorción, la humedad relativa del aire circundante desciende, mientras que su temperatura de bulbo seco y la temperatura del desecante aumentan. En el proceso de regeneración, el desecante libera vapor de agua mientras se le transfiere calor. El desecante regenerado está, una vez más, preparado para adsorber vapor de agua. Las temperaturas de regeneración están generalmente entre 54,4 y 148,9 °C. Un desecante sólido pierde la capacidad de adsorción de humedad debido a la degradación térmica y mecánica, y principalmente por contaminación.

La presente investigación está encaminada a determinar el ahorro de energía eléctrica en sistemas de acondicionamiento de aire que funcionan por compresión de vapor, luego de introducir en ellos un sistema desecante por sólidos. Estos equipos son altos consumidores energéticos, y gran parte de este se debe a la generación de humedad. Estos sistemas generadores de hume-

dad 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 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 el supermercado. Investigaciones más recientes, Bula *et al.* [3], presentaron un modelo matemático dinámico para la predicción de la temperatura y la humedad relativa en un recinto acondicionado; Bula *et al.* [4], 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.

Sistema de acondicionamiento del aire

El sistema de acondicionamiento de aire por medio de refrigeración por compresión de vapor se muestra en la figura 1. Este generalmente consta de una unidad que maneja carga latente y sensible según los requerimientos específicos del recinto, dependiendo del cálculo previo de carga, demanda de calidad de aire e infiltraciones. La unidad toma parte del aire del recinto y parte de aire exterior, esto debido a la necesidad de garantizar el aire de reposición u oxigenación al recinto.

El desarrollo de las ecuaciones que describen este proceso se plantea a través del modelo que se presenta en la figura 2, la cual es un diagrama en donde se muestran las interacciones energéticas de este proceso.

Para el cálculo de la unidad requerida para el manejo, tanto de la carga sensible como latente del espacio acondicionado, se hace necesario seleccionar algunas variables que son consideradas de diseño. Para el desarrollo del modelo matemático siguiente se considerará como conocido lo siguiente:

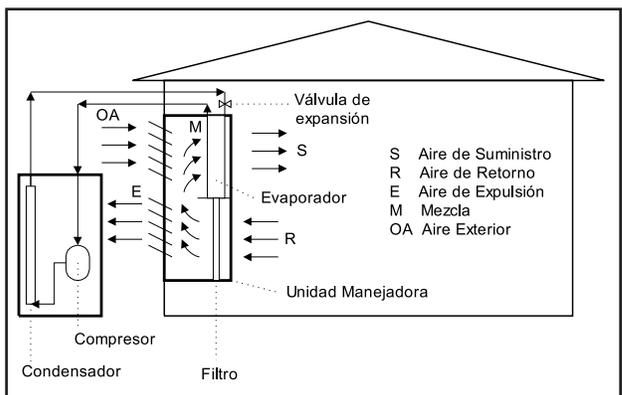


Figura 1 Esquema de un sistema de aire acondicionado por medio de compresión de vapor

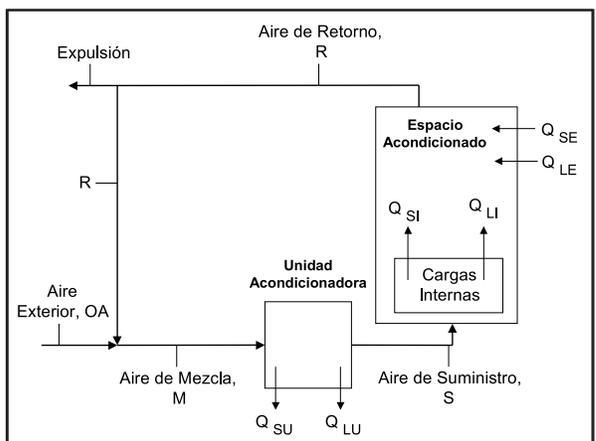


Figura 2 Diagrama de un sistema de aire acondicionado

- La carga sensible, tanto interna como externa.
 - La carga latente, tanto interna como externa.
 - La temperatura a la cual se desea mantener el recinto acondicionado.
 - La humedad relativa a la cual se desea mantener el recinto acondicionado.
 - La temperatura a la cual se suministra el aire al recinto acondicionado.
 - El porcentaje de aire que se expulsa del sistema de acondicionamiento de aire.
 - La cantidad de aire que se trae del exterior por motivos de ventilación.
 - La temperatura del aire exterior.
 - La humedad relativa del aire exterior.
- De la carga térmica sensible y latente, tanto externa como interna, obtenemos la carga sensible y latente total del recinto,

$$Q_{SR} = Q_{SI} + Q_{SE} \quad (1)$$

$$Q_{LR} = Q_{LI} + Q_{LE} \quad (2)$$

De la cantidad de calor sensible a remover del espacio acondicionado obtenemos el flujo volumétrico estándar de aire:

$$SVF = \frac{Q_{SR}}{A \times (T_R - T_S)} \quad (3)$$

De la cantidad de calor latente a retirar del recinto acondicionado obtenemos la humedad del aire de suministro,

$$W_S = W_R - \frac{Q_{LR}}{B \times SVF} \quad (4)$$

En el sitio de mezcla, el balance de energía nos presenta la siguiente relación,

$$h_M = (1 - \%OA) h_R + \%OA h_{OA} \quad (5)$$

La entalpía de una mezcla aire/vapor de agua depende de las dos, pero se puede hacer una aproximación en aras de observar cómo la unidad se ve afectada por las interacciones del resto del sistema,

$$T_M = (1 - \%OA) T_R + \%OA T_{OA} \quad (6)$$

El balance de humedad nos presenta esta otra relación,

$$W_M = (1 - \%OA) W_R + \%OA W_{OA} \quad (7)$$

A través de la unidad acondicionadora, el calor sensible retirado es el siguiente,

$$Q_{SU} = A \times SVF \times (T_M - T_S) \quad (8)$$

y el calor latente retirado es el siguiente,

$$Q_{LU} = B \times SVF \times (W_M - W_S) \quad (9)$$

Remplazando (6) en (8) tenemos,

$$Q_{SU} = A \times SVF \times [(1 - \%OA) T_R + \%OA T_{OA} - T_S] \quad (10)$$

Remplazando (3) en (10),

$$Q_{SU} = \frac{Q_{SR}}{(T_R - T_S)} \times [(1 - \%OA) T_R + \%OA T_{OA} - T_S] \quad (11)$$

En la ecuación 11 se observa que el calor sensible retirado en la unidad depende de la cantidad de calor sensible transportado desde el recinto, así como de la temperatura exterior y el porcentaje de aire que se trae desde el exterior hacia el sistema con fines de ventilación. Remplazando (7) en (9),

$$Q_{LU} = B \times SVF \times [(1 - \%OA) W_R + \%OA W_{OA} - W_S] \quad (12)$$

Remplazando (4) en (12),

$$Q_{LU} = B \times SVF \times \left[(1 - \%OA) W_R + \%OA W_{OA} - W_R + \frac{Q_{LR}}{B \times SVF} \right] \quad (13)$$

La ecuación 13 muestra que la cantidad de calor latente retirado por la unidad, es dependiente de la cantidad de calor latente transportado desde el recinto, así como de las condiciones exteriores y la cantidad de aire que se trae al sistema para ventilación. Este calor latente es representado por el vapor de agua transportado por el aire, el cual, si se puede retirar del sistema sin necesidad de ser condensado en el evaporador, representaría un ahorro energético para la unidad. Teniendo en cuenta esto, se planteó un experimento exploratorio con el fin de determinar este ahorro.

Desarrollo experimental

Se realizaron una serie de pruebas (con filtro desecante, con alta y baja humedad y sin él) en un entrenador en sistemas de refrigeración LAB-VOLT 3401-22 perteneciente al laboratorio de máquinas térmicas de la Universidad del Norte.

Para la realización las pruebas fue necesaria, en primer lugar, la elaboración de un filtro desecante

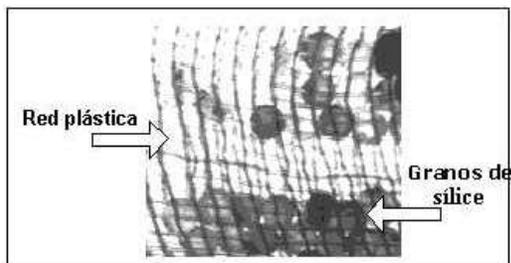


Figura 3 Detalle del filtro desecante utilizado

a partir de gel de sílice (SiO_2) como agente activo, el cual estaba confinado dentro de una red plástica que actuaba como soporte mecánico del desecante, tal como se muestra en la figura 3. El filtro desecante se diseñó de tal manera que este pudiera ser desmontable para poder ser pesado y regenerado al inicio y al final de cada prueba. Además de esto debía garantizar el cubrimiento total de la entrada de aire del entrenador.

El conducto de aire se aisló para que la carga térmica que éste soportara fuera única y exclusivamente la proporcionada por el aire de suministro. Seguido a esto se procedió a instalar un contador eléctrico en la entrada de energía del entrenador, el cual tenía la función de medir el consumo de energía eléctrica de dicho equipo.

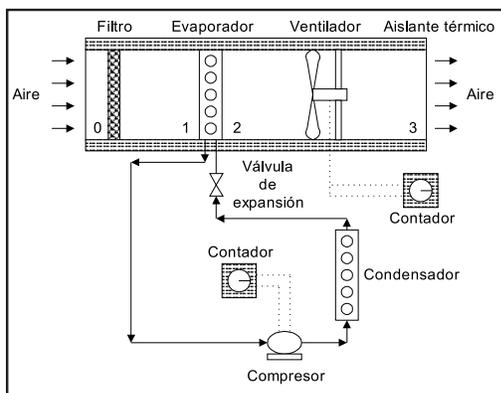


Figura 4 Esquema del sistema

Las características del filtro fabricado, y las condiciones de flujo del aire que llegaban a este son las siguientes:

- Densidad superficial: 0,306 g de gel de sílice/cm² de filtro.
- Diámetro promedio de los granos de gel de sílice: 4 mm.
- Velocidad del aire: 0,77 m/s.

Cada una de las pruebas se hicieron en un entrenador en sistemas de refrigeración funcionando con válvula de expansión y con un *set point* de 21 °C para el termostato, garantizando que el compresor prendiera y apagara durante las pruebas, a fin de medir su tiempo de funcionamiento. Cada prueba tuvo un tiempo total de ejecución de una hora, tiempo en el cual se tomaron medidas de consumo energético además de los tiempos de funcionamiento del compresor.

Para cada una de dichas pruebas se tenían cuatro puntos de medida, los cuales se observan en la figura 4, y en las que se recolectaron veinticinco datos de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire. Cada uno de estos puntos corresponde a:

- Punto 0 (entrada al filtro desecante).
- Punto 1 (entrada al evaporador).
- Punto 2 (salida del evaporador).
- Punto 3 (salida del ducto). En este punto se calculó la velocidad promedio del aire.

Antes de realizar cada prueba se dejó funcionar el entrenador un tiempo de media hora para alcanzar estado estable y evitar problemas por los efectos transitorios del arranque del equipo. Para las pruebas con filtro desecante se tomó el peso del filtro al inicio y al final de cada prueba. Adicionalmente, el filtro era regenerado antes de cada prueba sometiéndolo a cinco minutos dentro de un horno microondas para así restituirle todas las propiedades desecantes y así garantizar la confiabilidad de los resultados. Las prue-

bas de alta humedad se realizaron en septiembre de 2001 en el Laboratorio de Térmicas de la Universidad del Norte, en donde se alcanzaron humedades relativas de 99,9%. Las pruebas con baja humedad se realizaron en un recinto acondicionado con humedad relativa de 25%.

Resultados

La figura 5 presenta la operación del equipo de aire acondicionado, sin filtro, con una humedad relativa en el recinto de 99%. Se observa que el compresor permanece encendido de manera continua por un tiempo de aproximadamente 315 s. La figura 6 presenta la operación del equipo de aire acondicionado, con filtro, con una humedad relativa en el recinto de 99%. Se observa que el compresor permanece encendido por un tiempo

de aproximadamente 220 s. El tiempo que permanece el compresor apagado entre arranques permanece constante debido a que este depende de la carga térmica del recinto. La figura 7 presenta un resumen del tiempo de operación del sistema bajo condiciones de alta humedad relativa. Se observa disminución en el tiempo de operación del compresor al ser instalado el filtro desecante comparado con el tiempo cuando no hay filtro instalado en la línea, pasando de 45,1 a 39,9 min por hora de operación. Esto representa una disminución de 11,41% en el tiempo de funcionamiento del compresor, tiempo que depende obviamente de la carga térmica que se va a manejar.

Cuando el sistema trabaja con el filtro desecante bajo condiciones de baja humedad, presenta una

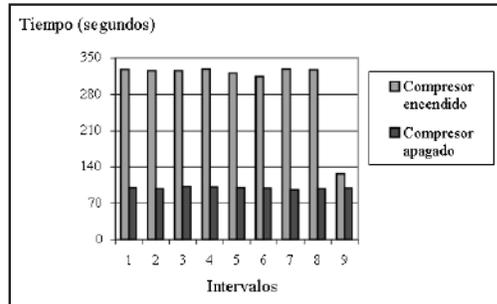


Figura 5 Intervalos de funcionamiento del equipo (sin filtro, 99% HR)

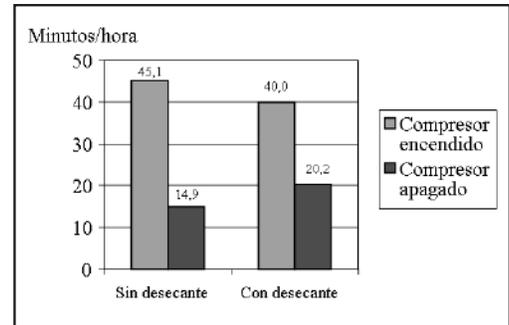


Figura 7 Tiempo total de funcionamiento del equipo (99% HR)

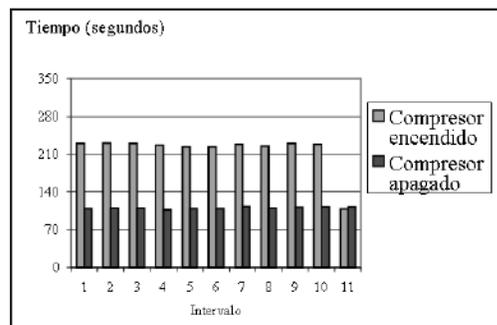


Figura 6 Intervalos de funcionamiento del equipo (con filtro, 99% HR)

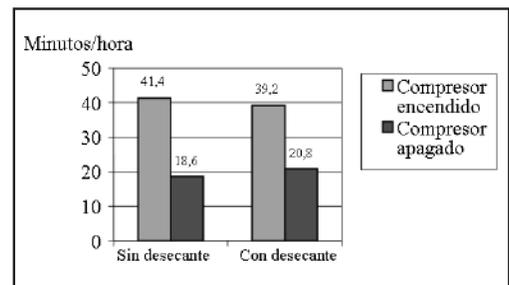


Figura 8 Tiempos totales de funcionamiento del equipo (24% HR)

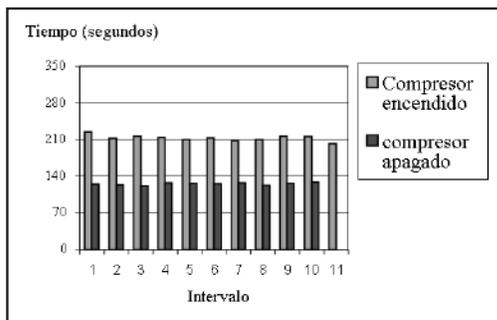


Figura 9 Intervalos de funcionamiento del equipo (con filtro, 24% HR)

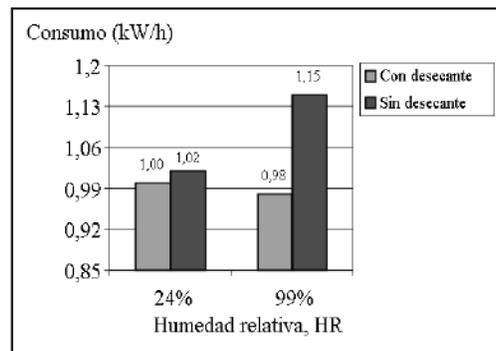


Figura 11 Consumo energético del sistema

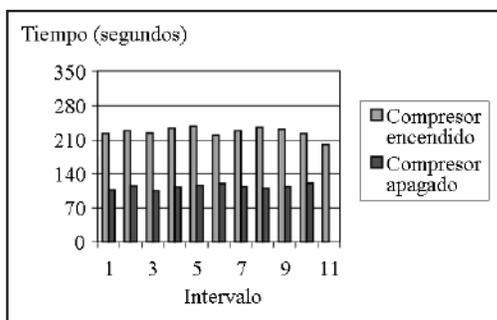


Figura 10 Intervalos de funcionamiento del equipo (sin filtro, 24% HR)

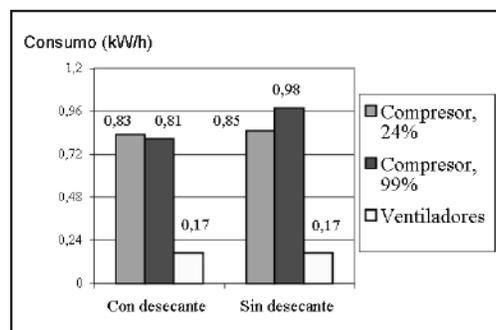


Figura 12 Consumo energético de los ventiladores

disminución de 5,3% en el tiempo de funcionamiento. Así mismo, experimenta un aumento de 11,7% en el tiempo que este dura apagado.

El ahorro eléctrico presentado en el sistema bajo condiciones de alta humedad con el filtro instalado fue de 14,8%, mientras que el sistema con filtro desecante con condiciones de baja humedad con filtro desecante mostró un ahorro energético de 1,9%. Esto se observa en la figura 11.

La cantidad de agua absorbida por el filtro se muestra en la figura 13.

Análisis de resultados

Los resultados de estas pruebas exploratorias muestran que se obtiene un ahorro energético del 14% al utilizar un filtro desecante en la línea

de entrada de aire al evaporador de un sistema de refrigeración. Obviamente, este resultado sólo aplica para las condiciones de flujo, densidad de gel de sílice por centímetro cuadrado de filtro utilizado y condiciones de alta humedad (99% HR). Bajo estas condiciones se obtuvo un ahorro de 14,8% (0,17 kWh).

La reducción en el consumo energético se debe principalmente al menor tiempo requerido por el equipo para llegar a las condiciones establecidas en el recinto debido a la disminución de la carga latente que llega al evaporador. Se observó, que el tiempo que el compresor dura apagado cuando se utiliza el filtro desecante o no, es similar debido a que la carga térmica es la misma para el sistema, lo cual ocasiona que la curva de recuperación sea idéntica matemáticamente.

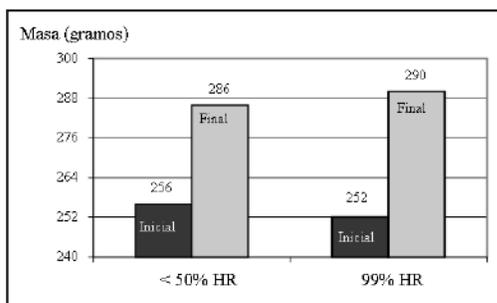


Figura 13 Cantidad de agua adsorbida por el filtro

Conclusiones

El filtro desecante se debe utilizar en sistemas de refrigeración que trabajen en un ambiente de alta humedad ya que en este ambiente es donde se presenta mayor ahorro energético. El filtro desecante reduce la carga térmica del sistema de acondicionamiento de aire ya sea que trabaje en condiciones de alta o baja humedad. Cuando se utiliza el filtro desecante en un sistema de refrigeración operando en un ambiente húmedo se reduce el tiempo de funcionamiento del equipo de refrigeración. Bajo condiciones de baja humedad, el filtro no representa un ahorro significativo de energía eléctrica.

Con este trabajo preliminar sobre la utilización de filtros desecantes a base de gel de sílice se obtuvieron ahorros prometedores en consumo de energía, lo cual hace obligatorio seguir con la exploración del uso de este tipo de sistemas. Para ello se debe:

- Estudiar el ciclo como sistema cerrado, variando los porcentajes de carga sensible y latente del sistema.
- Determinar las curvas de saturación del filtro dependiendo de la velocidad del aire y la concentración de desecante por área de filtro.
- Calcular la energía requerida para renovar el filtro.
- Determinar las curvas de renovación a bajas temperaturas con el fin de poder diseñar un equipo compacto comercializable.

Estos aspectos deben ser tratados con mucha rigurosidad para llegar a un desarrollo que sea utilizable a nivel comercial y doméstico.

Referencias

1. Howell, Ronald, *et al.* "Simulation of refrigerated display cases performance in supermarkets". En: *Proceedings of the IASTED International Conference*. Banff, Canada. 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*. Brussels, Belgium. 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, *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.