

ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE ENFRIAMIENTO DE LÍQUIDO SECANTE EN APLICACIONES RESIDENCIALES Y COMERCIALES

COST ANALYSIS OF A HYBRID LIQUID DESICCANT COOLING SYSTEM IN RESIDENTIAL AND COMMERCIAL APPLICATIONS

PEDRO JOSÉ MAGO GÓMEZ

*Departamento de Ingeniería Mecánica, Núcleo de Anzoátegui,
Universidad de Oriente, Cumaná, Venezuela. pmago@ufl.edu*

RESUMEN

En el presente trabajo se estudió el uso de un sistema híbrido de líquido secante, el cual utiliza una solución acuosa de cloruro de litio, en aplicaciones residenciales y comerciales, las cuales requieren 100% aire fresco por condiciones de diseño. Los experimentos consistieron en estudiar el sistema de aire acondicionado en dos configuraciones: el sistema convencional y el sistema híbrido de líquido secante. También se realizó un análisis económico para ambas configuraciones en el cual se demostró que usando el sistema híbrido de líquido secante en lugar del sistema convencional de aire acondicionado, se puede ahorrar hasta un 55% del consumo de la electricidad. Haciendo un análisis de la inversión inicial, se encontró que el sistema híbrido de líquido secante es más efectivo cuando es usado en aplicaciones comerciales donde la inversión inicial se recupera en menos de dos años, comparada con aplicaciones residenciales donde se recupera en aproximadamente nueve años.

PALABRAS CLAVES: Enfriamiento, Sistema Híbrido, Líquido Secante, Regeneración de Líquido.

ABSTRACT

This paper presents a feasibility study of a hybrid desiccant system which uses aqueous lithium chloride for residential and commercial applications which require 100% fresh air because of their design conditions. For these experiments, the air conditioning system was operated under two configurations: the conventional system and the hybrid desiccant system. An economic analysis was also made for both configurations, and led to the conclusion that the hybrid desiccant system may save 55% electricity over the conventional system. A cost analysis showed that a hybrid desiccant system is more cost effective when used for commercial applications, in which the original investment is recovered in less than two years, compared with approximately nine years for residential applications.

KEY WORDS: Cooling, Hybrid System, Liquid Desiccant, Liquid Regeneration.

INTRODUCCIÓN

Mago y Goswami (2001) demostraron que el sistema híbrido de líquido secante funciona mejor que el sistema convencional de aire acondicionado en aquellas regiones donde la humedad y las altas temperaturas son predominantes. En este trabajo se estudia la factibilidad de usar estos sistemas en aplicaciones comerciales y residenciales. Algunas de las aplicaciones comerciales en las que se puede usar este tipo de sistema son: hoteles, supermercados, hospitales y restaurantes.

En hoteles, estos sistemas pueden usarse para proveer aire seco, lo que permite mantener una presión ligeramente positiva. Esto asegura que el aire exterior hú-

medo no entrará a través de ranuras en las paredes exteriores u otras aberturas. La infiltración de aire húmedo ha sido identificado como una de las principales causas de la producción de hongos en la industria hotelera, (Harriman, 1994).

En los supermercados el consumo de energía es muy grande y algunas veces puede exceder sus ganancias anuales. Un gran porcentaje del consumo de energía se debe al uso del aire acondicionado, el cual la mayoría de las veces tiene que funcionar durante 24 horas al día. En los supermercados la humedad relativa debe ser mantenida entre 40% y 45%. Para conservar la humedad relativa en este rango los sistemas convencionales tienen que enfriar el aire a una temperatura más baja de la deseada, para luego recalentar el aire y así conseguir la tempera-

tura de diseño. Por este motivo el consumo de energía en los supermercados es bastante grande (Brandemuehl y Khattar, 1997)

Los hospitales pueden usar un sistema híbrido de líquido secante para deshumidificar y enfriar el aire exterior para salas de operaciones, las cuales requieren el uso de 100% aire fresco según los códigos.

Este trabajo presenta un análisis económico del uso de sistemas híbridos de líquido secante en aplicaciones residenciales y comerciales. Este análisis se llevó a cabo mediante experimentos con un sistema híbrido de líquido secante en una casa de prueba y en una simulación realizada para un supermercado. La construcción y funcionamiento de este sistema se presenta en detalle en Mago (2003).

FACILIDADES EXPERIMENTALES

Las facilidades experimentales constan de un sistema híbrido de líquido secante en una casa experimental en University of Florida's Energy Research and Education Park ubicada en Gainesville, Florida. El sistema de aire acondicionado en esta casa puede funcionar en dos configuraciones: el sistema convencional de aire acondicionado y el sistema híbrido de líquido secante. Ambas configuraciones pueden funcionar usando aire recirculado o 100% aire fresco. Figuras 1a y 1b muestran un esquema del sistema del aire acondicionado en la casa para 100% aire fresco y para recirculación, respectivamente. Para operar el sistema en el modo convencional de aire acondicionado se cierra el ducto y se sigue la línea punteada en ambas figuras.

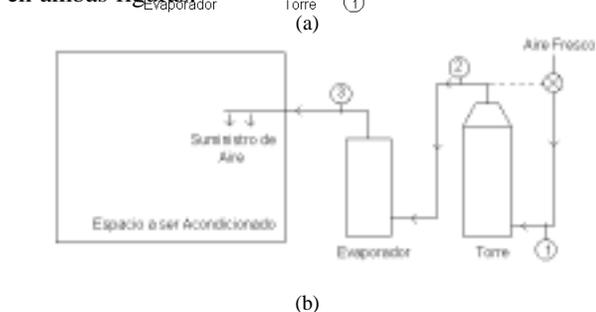


Figura 1. Sistema híbrido de líquido secante usando:
(a) 100% aire fresco; (b) aire recirculado

El sistema de líquido secante consta de una torre de 56 cm de diámetro y 60 cm de altura. La torre contiene unos packings (anillos) Rauschert Hiflow hechos de plástico y con un área específica de superficie de $210 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Para distribuir el líquido secante sobre los packing se usaron tres regaderas. La toma de datos se realizó mediante un software llamado Labview. Las temperaturas se midieron usando termocuplas de cobre-constantan, con una exactitud de $\pm 0.5^\circ\text{C}$, las humedades relativas se midieron por sensores de humedad HMD 20 UB, con una exactitud de $\pm 2\%$ RH (para el rango de 0-90% RH) y $\pm 3\%$ RH (para el rango de 90% - 100%), para medir la velocidad del aire se utilizó un Velometer ALNOR con una exactitud de $\pm 2\%$. La concentración del líquido secante fue determinada por el método de titulación Karl Fischer. Este es un método cuantitativo para determinar la concentración de agua presente en el líquido secante.

Ambos sistemas se analizaron usando 100% aire fresco. Para cada caso los experimentos para ambos sistemas se realizaron bajo las mismas condiciones iniciales y por el mismo período de tiempo. A través de un sistema computarizado de adquisición de datos se midieron los siguientes parámetros: temperatura y humedad relativa del aire a la entrada y a la salida del evaporador, temperatura del líquido secante en la torre, temperatura y humedad relativa del aire a la entrada y a la salida de la torre, el flujo másico de aire y el tiempo.

RESULTADOS - ANÁLISIS DEL USO DE ELECTRICIDAD

Se realizó un análisis del consumo de electricidad para ambos sistemas usando 100% aire fresco. Este análisis se llevó a cabo mediante datos experimentales tomados en la casa de prueba. El aire exterior durante este experimento tenía las siguientes condiciones: $T_{\text{bs}} = 29^\circ\text{C}$ y $\text{HR} = 83.7\%$, y el flujo másico de aire fue 0.6 kg/s . La solución acuosa de cloruro de litio tenía una concentración de 35% y un flujo volumétrico de 0.423 l/s . Los datos experimentales se muestran en las Tablas 1 y 2, y los procesos de enfriamiento y deshumidificación se muestran en la Figura 2.

De los resultados se puede observar que el sistema convencional de aire acondicionado tiene una capacidad de enfriamiento (flujo másico de aire multiplicado por el cambio de entalpía) de 6.65 kW o 1.9 ton , lo cual es insuficiente para enfriar y deshumidificar el aire de exterior hasta una temperatura y humedad que provean confort. Sin embargo, cuando se utiliza el sistema híbrido de líquido secante la capacidad se incrementa hasta 16.86 kW o 4.8 ton , con lo cual se puede llevar el aire hasta

condiciones de confort. De los resultados se observa que la torre disponible en la casa es pequeña, ya que no realiza toda la deshumidificación necesaria para que el sistema funcione de forma óptima. Idealmente, un sistema híbrido de líquido secante debería ser diseñado de manera que el sistema de deshumidificación maneje toda la carga latente y que el sistema de convencional de aire acondicionado maneje solo la carga sensible. Por consiguiente, un sistema óptimo para la casa experimental necesita una torre más grande que la actual y un sistema convencional de aire más pequeño que el sistema presen-

te (2 ton). El sistema de líquido secante se optimizó, conservando el tamaño del sistema de convencional de aire acondicionado, y aumentando la altura de la torre hasta 2 m, lo que permite que éste ejecute toda la deshumidificación necesaria para que el sistema convencional de aire solo tenga que manejar la carga sensible. Los resultados se muestran en las Tablas 3 y 4, y en la Figura 3. Los resultados mostrados en la Tabla 3 representan la capacidad que tendría que tener un sistema convencional de aire acondicionado operando bajo las mismas condiciones.

Tabla 1. Resultados experimentales para el sistema convencional de aire acondicionado.

Tabla 2. Resultados experimentales para el sistema híbrido de líquido secante.

Condiciones del aire						\dot{Q} (kW)			\dot{m}_c (g/s)		
Entrada torre		Salida torre		Salida evaporador		\dot{Q}_t	\dot{Q}_e	\dot{Q}_s	$\dot{m}_{c,t}$	$\dot{m}_{c,e}$	$\dot{m}_{c,s}$
T_{bs} (°C)	HR (%)	T_{bs} (°C)	HR (%)	T_{bs} (°C)	HR (%)						
29	75	32.5	45.1	21.6	68.1	5.77	11.09	16.86	3.10	1.72	4.82

Tabla 3. Resultados para el sistema convencional de aire acondicionado.

Aire a la entrada		Aire a la salida		\dot{Q} (kW)	\dot{m}_c (g/s)
T_{bs} (°C)	HR (%)	T_{bs} (°C)	HR (%)		
29	75	21.6	68.1	16.86	4.82

Tabla 4. Resultados para el sistema híbrido de líquido secante.

Condiciones del aire						\dot{Q} (kW)			\dot{m}_c (g/s)		
Entrada torre		Salida torre		Salida evaporador		\dot{Q}_t	\dot{Q}_e	\dot{Q}_s	$\dot{m}_{c,t}$	$\dot{m}_{c,e}$	$\dot{m}_{c,s}$
T_{bs} (°C)	HR (%)	T_{bs} (°C)	HR (%)	T_{bs} (°C)	HR (%)						
29	75	32.8	38.6	21.6	68.1	11.0	5.84	16.86	4.82	0	4.82

De los resultados se observa que un sistema convencional de aire de 4.8 ton es equivalente a un sistema híbrido de líquido secante con una torre de 2.0 m y un sistema convencional de aire acondicionado de 1.66 ton. Por medio de estos resultados puede verse que usando el sistema de líquido secante se disminuye el tamaño del aire acondicionado convencional para una aplicación específica.

se los ahorros en el consumo de electricidad usando el sistema de líquido secante son \$636/año (51%). El problema con el sistema híbrido de líquido secante es que el líquido tiene que ser regenerado cada cierto tiempo para mantener su concertación alrededor de 35%, y de esta forma mantenerlo funcionando en forma óptima (Mago, 2001). Cuando la concentración de la solución acuosa de cloruro de litio comienza a disminuir, se necesita regenerar el líquido secante, para lo cual es necesario elevar su temperatura hasta aproximadamente 80°C. Este proceso puede hacerse usando cualquier tipo de energía (energía solar, gas natural, etc) que no sea electricidad de manera de continuar con los ahorros. En esta investigación se utilizó un sistema de calefacción de líquido con colectores solares para el proceso de regeneración.

El calor total que tiene que ser suministrado por los colectores solares incluye el calor necesario para evaporar humedad del líquido secante, el calor necesario para aumentar la temperatura del líquido, y la pérdida de calor en el tanque. El calor total necesario para el proceso de regeneración fue 39 kWh. El tamaño de los colectores se determinó realizando una simulación en Gainesville, FL (Latitud 29°41'N) en el mes de Julio. Se encontró que un circuito solar de calefacción con 4 colectores de alta eficiencia de 2.5m x 1.3m, con un tanque de almacenamiento de 0.5 m³ es capaz de suministrar 48 kWh/día, lo cual es suficiente para el proceso de regeneración (39 kWh). El costo en el mercado de este sistema y todos lo materiales asociados (la bomba, el sistema de tuberías, etc.) es de \$6530.

En cuanto a los costos finales, si se quiere usar un sistema convencional de aire acondicionado, se necesita una unidad de 5 ton, la cual tiene un costo de \$4000 aproximadamente. El costo total del sistema de líquido secante es de \$9780, incluyendo el colector solar. Por lo tanto, el capital inicial adicional que se necesita para instalar un sistema híbrido de líquido secante en lugar de un sistema convencional es \$5780. Los ahorros en el consumo de electricidad por el uso del sistema híbrido de líquido secante eran \$608/año, lo que da un total de 9.5 años para recuperar la inversión inicial. El tiempo necesario para recuperar la inversión inicial sería inferior si los ahorros de energía que se producen por el uso sistema de colectores solares durante el período de invierno también se tomaran en consideración.

Análisis del uso de un sistema híbrido de líquido secante en un supermercado

En esta sección se presenta una simulación del uso de un sistema híbrido de líquido secante en un supermerca-

Figura 2. Representación de los procesos de enfriamiento y deshumidificación para ambos sistemas

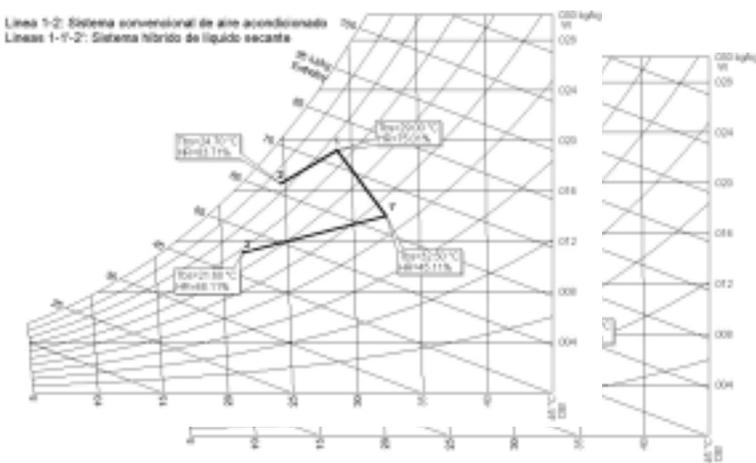


Figura 3. Representación de los procesos de enfriamiento y deshumidificación para ambos sistemas

Considerando que el costo de electricidad en el estado de la Florida en Estados Unidos, es de \$0.07/kWh por consumo y 4.55/kW-mes por demanda, y que el aire acondicionado funciona 2000 h/año se encontró que el costo total de la electricidad usando el sistema convencional de aire fue \$1244/año, mientras que para el sistema híbrido de líquido secante fue \$608/año. Como puede ver-

do de 465 m² de área localizado en Miami, Florida. Esta simulación se realizó con un software llamado “Software for the performance simulation of a hybrid liquid desiccant cooling system” desarrollado por Mago y Goswami (2001). Las condiciones ambientales eran $T_{bs} = 30^{\circ}\text{C}$ y $\text{HR} = 60\%$ y el sistema estaba obligado a mantener las condiciones del espacio en $T_{bs} = 24^{\circ}\text{C}$ y $\text{HR} = 55\%$. Normalmente 113 m³/min de aire son circulados a través del mercado. Se realizó un análisis usando primero un sistema convencional de aire acondicionado y luego un sistema de líquido secante. Los resultados se muestran en las Tablas 5 y 6, y los procesos de enfriamiento y deshumidificación se muestran en la Figura 4.

Los resultados muestran que un sistema convencional de aire acondicionado necesita 12.7 ton de capacidad para conservar las condiciones requeridas por el mercado. Sin embargo, un sistema híbrido de líquido secante sólo necesita un sistema convencional de aire acondicionado de 4.8 ton, lo que trae como consecuencia una gran diferencia en los costos iniciales de ambos sistemas. Considerando que el costo de electricidad en el estado de la Florida en Estados Unidos, es de \$0.07/kWh por consumo y 4.55/kW-mes por demanda, y el aire acondicionado funciona 4380 h/año, se determinó que el costo total de electricidad usando el sistema convencional de aire fue \$6309/año, mientras que el costo total de electricidad usando el sistema híbrido de líquido secante fue \$2883/año. Los ahorros de electricidad usando el sistema de líquido secante en lugar del sistema convencional fueron \$3426/año (55%). Aun cuando los ahorros en electricidad son grandes es importante señalar que se necesita un sistema de colectores solares para el proceso de regeneración del líquido secante.

Tabla 5. Resultados para el sistema convencional de aire acondicionado.

Aire a la entrada		Aire a la salida		\dot{Q} (kW)	\dot{m}_c (g/s)
T_{bs} (°C)	HR (%)	T_{bs} (°C)	HR (%)		
30	60	24	55	46.07	12.70

Usando el método descrito anteriormente, se encontró que el calor necesario para la regeneración del líquido secante fue 61 kWh. Para determinar el tamaño de los colectores solares se realizó una simulación similar a la descrita anteriormente pero en Miami, FL (Latitud 25°48’N) durante el mes de Julio. Después de la simulación se encontró que un circuito cerrado solar de calefacción de agua con 6 colectores solares de 2.5m x 1.3m con un tanque de 0.606 m³ de almacenamiento capaz de proveer 78 kWh/día, cantidad necesaria para el proceso de regeneración (61 kWh/día). El precio de este sistema es de \$9300. Realizando un análisis de costos se tiene que si se desea utilizar un sistema convencional de aire acondicionado para esta aplicación se necesita un equipo con una capacidad de 13 ton el cual tiene un costo de \$9500 aproximadamente. El costo total del sistema de líquido secante es de \$14800, incluyendo el colector solar. Por consiguiente, el capital inicial adicional que se necesita para instalar un sistema híbrido de líquido secante en vez de un sistema convencional es \$5300. Como fue mencionado previamente los ahorros por el uso del sistema híbrido de líquido secante eran \$3426/año, lo que quiere decir que se necesitan 1.6 años para recuperar la inversión inicial, lo cual satisface al Departamento de Energía del EUA (1996) que dice que la inversión inicial debe ser recuperada en menos de 5 años.

Figura 4. Representación del proceso de enfriamiento y deshumidificación para ambos sistemas

Tabla 6. Resultados para el sistema híbrido de líquido secante.

CONCLUSIONES

- Se comparó el consumo de electricidad para un sistema convencional de aire acondicionado y un sistema híbrido de líquido secante, encontrándose que con este último se puede ahorrar hasta un 55% de consumo.
- El uso de un sistema híbrido de líquido secante para una residencia no es económicamente llamativo. Sin embargo se demostró que este sistema es bastante llamativo para aplicaciones comerciales, ya que la inversión inicial se recupera en menos de 2 años. Basado en estos resultados se puede concluir que el sistema de líquido secante es más útil para aplicaciones comerciales, tales como: hoteles, mercados y restaurantes, que para aplicaciones residenciales.
- Con el sistema híbrido de líquido secante se reduce el tamaño del aire acondicionado convencional que tendría que usarse para una aplicación específica, por lo tanto, se confirma nuevamente que el consumo de energía eléctrica es mucho menor.

NOMENCLATURA

HR	humedad relativa, %
\dot{m}_c	flujo másico de condensación, $\dot{m}_{c,e}$ (evaporador), $\dot{m}_{c,t}$ (torre), $\dot{m}_{c,s}$ (sistema), g/s
\dot{Q}	capacidad, \dot{Q}_e (evaporador), \dot{Q}_t (torre), \dot{Q}_s (sistema), kW
T_{bs}	temperatura de bulbo seco, °C
W	relación de humedad, kg_w/kg_a

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRANDEMUEHL, M. J. AND KHATTAR M. K. 1997. Demonstration and Testing of an All-Electric Desiccant Dehumidifying System at a New Jersey Supermarket. ASHRAE Transactions 103 (1): 848-859.
- HARRIMAN, L. 1994. The Basic of Commercial Desiccant Systems. Heating / Piping / Air Conditioner 66(7): 77-85.
- MAGO, P. 2003. Sistema Híbrido de Enfriamiento de Líquido Secante Utilizado como Alternativa al Sistema Convencional de Aire Acondicionado. Revista SABER, Vol. 15/Nº 1-2, pp. 48-53.
- MAGO, P. AND GOSWAMI Y. 2001. A Simulation Model and Software for the Performance Simulation of a Hybrid Liquid Desiccant Cooling System. Proceedings of the ASES Annual Conference, and the 26th National Passive Solar Conference, Forum 2001 "Solar Energy: The Power to Choose": 229-235
- MAGO, P. AND GOSWAMI Y. 2001. A Study of the Performance of a Hybrid Liquid Desiccant Cooling System Using Lithium Chloride. Proceedings of the International Solar Energy Conference, a part of Forum 2001 "Solar Energy: The Power to Choose": 133-139.
- U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy by the National Renewable Energy Laboratory, 1996. Desiccant Cooling Program. What's New in Building Energy Research: Office of Building Technologies. Report Numbers: DOE/GO-10096-084.