

ESTUDIO Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE REGENERACIÓN DE SILICA GEL MEDIANTE ENERGÍA SOLAR Y CALOR RESIDUAL DEL CONDENSADOR EN SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

R. Spotorno, A. Busso^{*}, H. Osiska, J. Pochettino, F. Benítez
GITEA - Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas Apropriadas
Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Resistencia
French 414. 3500 Resistencia-Chaco. República Argentina
Tel: +54 3722 432928. / Fax: +54 3722 432683/ e.mail: rubenspotorno@yahoo.com
^{*}GER - Grupo en Energías Renovables – FaCENA – UNNE

Recibido: 13/08/12; Aceptado: 05/10/12

RESUMEN: En el presente trabajo se exponen los resultados obtenidos mediante el estudio y la simulación del proceso de regeneración de sílica gel mediante energía solar y aprovechamiento del calor residual del condensador en sistemas de climatización por compresión de vapor. Los resultados muestran que utilizando el calor residual del condensador en el ingreso del colector solar de placa plana permite reducir las dimensiones del mismo en un 15%, tomando como base una superficie colectora de 2 m². Además se simuló el proceso de regeneración del material desecante para diferentes temperaturas y velocidades del aire. De los resultados obtenidos se determinó que la velocidad y temperatura del aire del proceso de regeneración de 2.5 m/s y 95°C respectivamente, producen un ritmo de extracción de masa de agua de la sílica gel apropiado para reducir el tiempo de regeneración y adecuarlo al tiempo de saturación del panel, a fin de producir un ciclo continuo.

Palabras Clave: simulación, regeneración, energía solar, calor residual, sílica gel

INTRODUCCIÓN

Durante una gran parte del año en el nordeste argentino se hace imprescindible el acondicionamiento del aire para alcanzar niveles de confort adecuados para el normal desarrollo de las actividades humanas en general y laborales en particular. Los procesos convencionales con los que se acondiciona aire presentan elevados consumos de energía.

Uno de los factores que contribuyen a un mayor consumo de energía en estos equipos es la humedad en el aire de proceso. El contenido de agua en la corriente de aire a refrigerar produce un aumento en la carga térmica sobre el equipo. Por ello, controlando el contenido de agua de la corriente de aire ambiente podría ser una alternativa viable para lograr una mayor eficiencia energética en estos sistemas.

Con la finalidad de reducir los elevados consumos de energía eléctrica en los sistemas de climatización por compresión de vapor, el GITEA (Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas Apropriadas), realizó estudios y ensayos de un equipo experimental de climatización con la introducción de desecantes sólidos (sílica gel).

Spotorno et al (2010), reportaron los primeros estudios termodinámicos, realizados para el clima del NEA, sobre la mejora de la eficiencia de sistemas de climatización por compresión de vapor mediante deshumidificación del aire de proceso utilizando desecantes sólidos (sílica gel). En un estudio posterior, Spotorno et al (2011), reportaron los resultados experimentales de un equipo de climatización por compresión de vapor de 5.23 kW de potencia, luego de acondicionar un porcentaje de la corriente de aire de proceso mediante un panel que contiene sílica gel.

El sílica gel es actualmente uno de los desecantes sólidos más utilizados en la industria debido a sus numerosas ventajas tales como: alta capacidad de adsorción (más de 40% en peso), estabilidad con la temperatura, propiedades físicas estables, alta resistencia mecánica, baja temperatura de regeneración, bajo precio y disponibilidad en el mercado. La característica más importante del proceso de adsorción de agua por parte de los desecantes es su reversibilidad, mediante regeneración a temperaturas entre 55 °C y 149 °C, Bula y Juvinao (2004). Por otro lado, la regeneración de este material puede realizarse utilizando energía solar mediante colectores solares de placa plana, o bien calentando el aire mediante combustible como gas, etc.

El clima de la región del NEA y la alta disponibilidad de radiación solar, permiten obtener mediante un colector solar de placa plana temperaturas del orden de los 90 °C, lo que es adecuado para la regeneración del sílica gel.

El presente trabajo, expone los resultados obtenidos a partir del estudio y la simulación del proceso de regeneración del material desecante, mediante el aprovechamiento de la energía solar y el calor residual del condensador del equipo de climatización por compresión de vapor, resultando una innovación respecto a la bibliografía consultada.

Materiales y Métodos

El esquema de la figura 1 muestra el proceso de climatización de una habitación, mediante un equipo de aire acondicionado tipo split de 5.23 kW de potencia al que se incorporó deshumidificación y post enfriamiento del aire de proceso mediante la utilización de sílica gel y agua de subsuelo respectivamente. El funcionamiento es el siguiente: Mientras el equipo de aire acondicionado climatiza la habitación, un porcentaje (15% o 30%) del aire de recirculación es retirado de la habitación para hacerlo pasar a través de un panel de sílica gel, en donde se produce la deshumidificación, consiguiendo disminuir la humedad absoluta del mismo. Como este proceso de deshumidificación es exotérmico, el aire se calienta al pasar por el panel de sílica gel. Con la finalidad de enfriar la corriente de aire, se hace pasar el mismo a través de intercambiadores de calor aire-agua alimentado con agua de subsuelo a una temperatura aproximada de 26°C. El agua es extraída de una perforación de 29 m de profundidad mediante una bomba sumergible y es almacenada en un tanque de almacenamiento aislado, que alimenta los intercambiadores de calor. Posteriormente el aire deshidratado ingresa al evaporador del equipo de climatización.

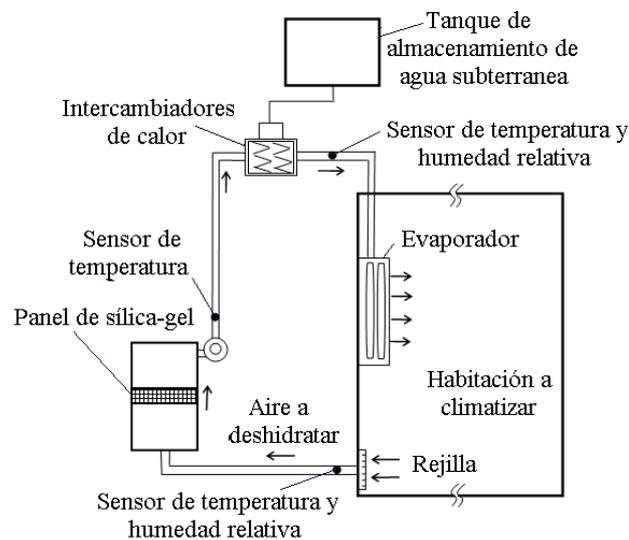


Figura 1: Esquema del sistema de aire acondicionado y accesorios

Aproximadamente después de una hora de ensayo el panel de sílica gel utilizado se satura de agua perdiendo la capacidad de adsorción de la misma. Una de las propiedades importantes que posee el sílica gel es su reversibilidad, mediante el proceso de regeneración. La regeneración consiste en hacer pasar una corriente de aire caliente de aproximadamente 80°C-95°C de temperatura a través del sílica gel para eliminar el agua retenida y poder volver a utilizar el material en un nuevo ciclo de adsorción.

Con la finalidad de determinar y evaluar la energía cedida por el condensador del equipo de climatización por compresión de vapor al medio ambiente durante el funcionamiento del mismo, se instalaron dos termocuplas tipo K antes y después del condensador (figura 2), registrando los valores de temperatura del aire mediante un sistema de adquisición de datos NUDAM a la PC a intervalos de 20 segundos.



Figura 2: Foto del condensador y termocupla tipo K

De los ensayos realizados del sistema de climatización con implementación del desecante sólido y aprovechamiento geotérmico, se obtuvieron registros de temperaturas del aire antes y después del condensador. A continuación se presentan dos gráficas de dichos ensayos.

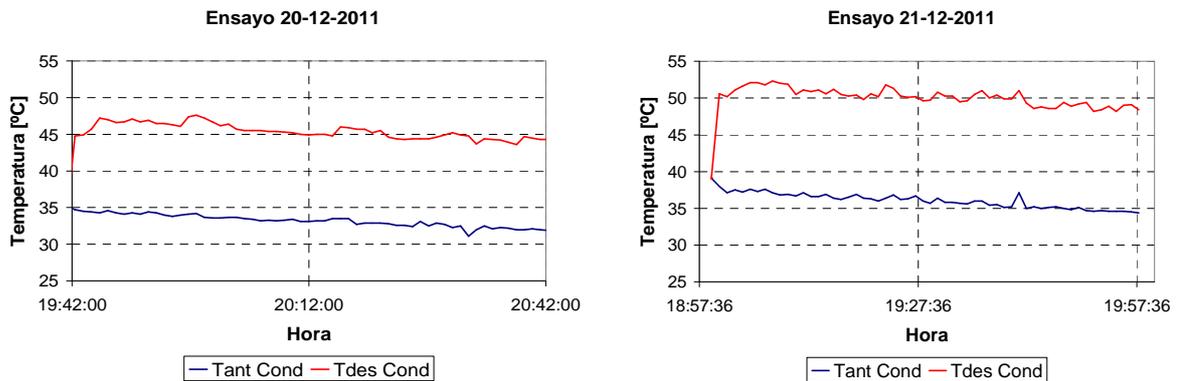


Figura 3: Temperaturas del aire antes y después del condensador

Se puede apreciar de las gráficas de la figura 3, que para ambos casos la diferencia de temperatura del aire es de aproximadamente 11°C. A partir de los ensayos realizados se comprobó que la diferencia de temperatura del aire antes y después del condensador correspondió a un Δt de temperatura de aproximadamente 10°C a 12°C.

Además se realizó un ensayo de climatización de aproximadamente doce horas de duración (12-03-2012), sin la implementación del material desecante (sílica gel) y agua subterránea. Los resultados se presentan en la gráfica de la figura 4. En la misma se puede apreciar que la mayor diferencia de temperatura del aire antes y después del condensador se ubica entre las 12:30 hs y 16:30 hs. Por otro lado, es en este mismo período del día cuando se presenta la mayor radiación solar. Como la máxima demanda de refrigeración normalmente se da en esta franja horaria, esto hace que tanto los valores de temperatura de salida del condensador y los valores de radiación solar sean máximos y apropiados para su aprovechamiento en el calentamiento del aire para la regeneración del material desecante.

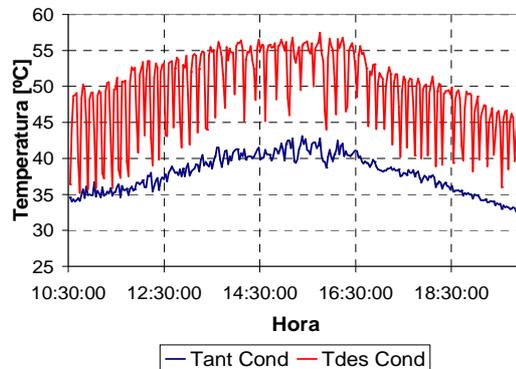


Figura 4: Temperaturas del aire antes y después del condensador

Mediante la utilización de los registros de temperaturas antes y después del condensador y aplicando la ecuación 1, se determinó la potencia calorífica cedida por el aire del condensador al medio ambiente.

$$Q = mxcpx\Delta t \quad (1)$$

Donde:

Q: potencia calorífica cedida por el aire del condensador al medio ambiente (kW)

m: caudal másico de aire impulsado por el ventilador del condensador (kg/h)

c_p : calor específico del aire (kJ/kg°C)

Δt : diferencia de temperatura del aire a la salida y entrada del condensador (°C)

El caudal másico de aire se determinó registrando valores de velocidades en distintos puntos del condensador. Realizando una media aritmética de la velocidad para una determinada sección del condensador se calculó el caudal volumétrico. El caudal másico de aire impulsado por el ventilador del condensador se determinó con la ecuación 2.

$$m = Vx\rho \tag{2}$$

Donde:

m= caudal másico de aire a la salida del condensador (kg/h)

V= caudal volumétrico de aire a la salida del condensador (m³/h)

ρ= densidad del aire a 45°C (kg/m³)

Las gráficas de la figura 5 muestran, los valores calculados para la potencia calorífica de los ensayos presentados anteriormente.

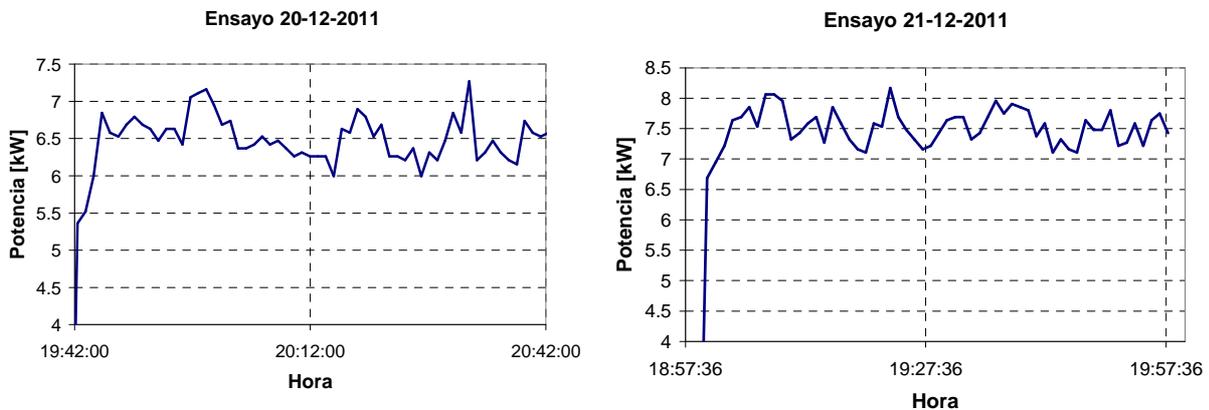


Figura 5: Potencia calorífica cedida por el aire del condensador al medio ambiente

Se observa que para el ensayo del día 20-12-2011, el valor promedio de la potencia calorífica es de 6.5 kW. Mientras que para el ensayo del día 21-12-2011, el valor promedio fue de 7.5 kW.

Mediante el tratamiento de datos de los ensayos realizados se determinó, que la potencia calorífica cedida por el aire del condensador al medio ambiente depende de la carga térmica de la habitación a climatizar. A su vez la carga térmica depende de factores como ser: luminarias, computadoras, personas, temperatura ambiente, radiación solar, y viento.

En virtud de la potencia liberada al ambiente por el condensador y la temperatura de salida del aire (fig 5), se plantea la posibilidad de regeneración del material aprovechando este calor residual para precalentamiento. El proceso propuesto es el siguiente: el aire caliente que emerge del condensador (calor residual), se lo hace ingresar al colector solar de aire de placa plana lográndose de esta manera, una temperatura final del aire adecuada para la regeneración del material desecante. A continuación, el aire caliente ingresa a una cámara de secado removiendo la humedad del sílica gel saturado para luego ser expulsado al medio ambiente. El efecto de precalentamiento del aire que se produce en el condensador debería, al menos en principio, reducir la superficie del colector solar necesaria y por consiguiente, disminuir costos asociados a la construcción del mismo.

En la figura 6 se observa el panel que contiene sílica gel, utilizado para el secado del aire de proceso durante los ensayos de climatización mediante el equipo de compresión de vapor.



Figura 6: Foto panel de silica gel

Para evaluar la contribución del calor liberado al ambiente por el condensador se implementó un modelo de simulación bajo TRNSYS. En el mismo se leen los datos experimentales de temperaturas del condensador, radiación solar y temperatura ambiente y con estos se alimenta a dos colectores de iguales características pero con la única diferencia que, en uno la temperatura de entrada es la temperatura ambiente y en el otro, la temperatura de salida del condensador.

Las figuras 7 y 8 muestran las curvas de evolución de las potencias caloríficas y temperaturas respectivamente, obtenidas para un intervalo de una hora.

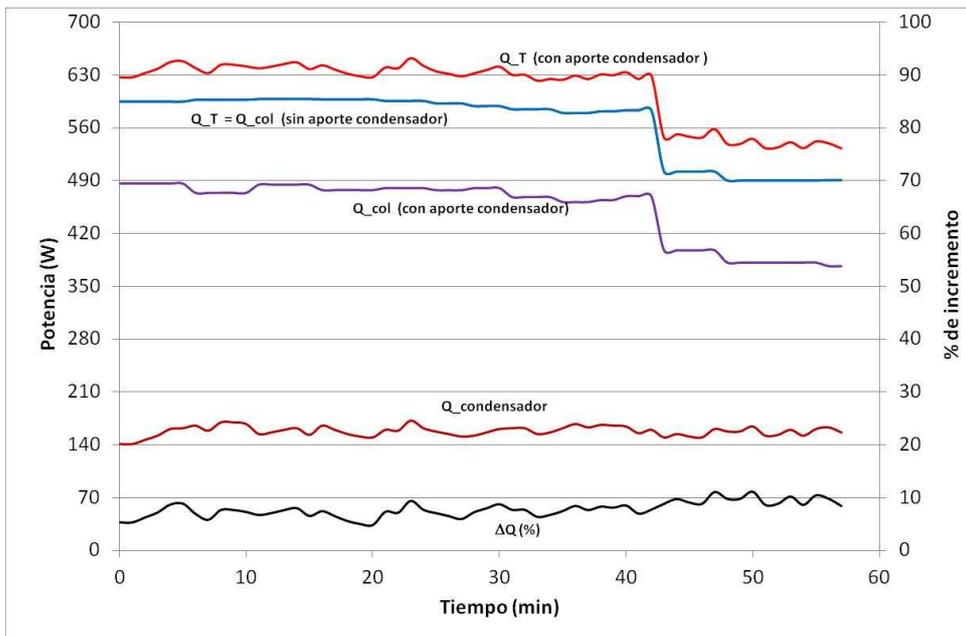


Figura 7: Curvas de evolución de potencias simuladas

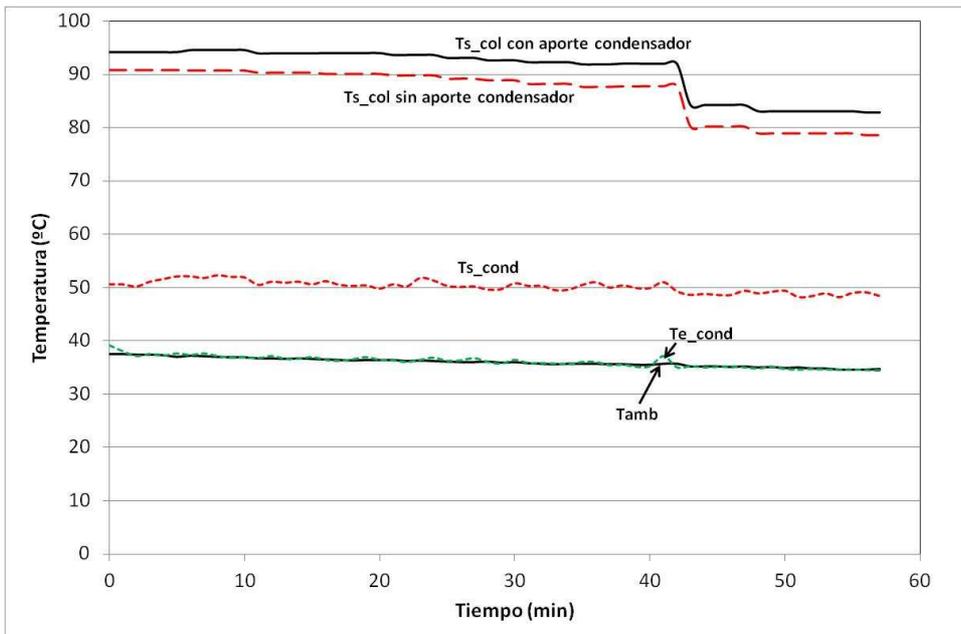


Figura 8: Curvas de simulación de temperaturas

La curva inferior de la figura 7 (línea negra) indica el porcentaje de incremento de la potencia debido al aprovechamiento del calor liberado por el condensador el cual ronda el 10% para el caso analizado.

Los resultados de las simulaciones demuestran además que, para obtener la misma temperatura de salida con aprovechamiento del calor de desperdicio del condensador se necesita un 15% menos de área colectora. En el análisis se tomo como base un colector de 2 m² de área activa.

Teniendo en cuenta que se utilizó un caudal de aire de proceso de 40 kg/h en el circuito de regeneración, la potencia total obtenida en cualquiera de los casos >600W (líneas azul y roja en la fig. 7), es suficiente para evaporar una masa de agua libre de alrededor de 0.9 kg, cantidad de agua mayor, en peso, a la retenida por el panel utilizado durante el periodo de tiempo ensayado.

Con la finalidad de determinar el tiempo necesario para la regeneración del material desecante, se realizaron simulaciones, teniendo en cuenta factores como ser: temperatura y velocidad del aire al ingreso de la cámara de secado. Para estos casos se consideraron las siguientes dimensiones del panel de sílica gel: ancho: 0.30 m; alto: 0.30 m; espesor: 0.05 m, panel de sílica gel utilizado en los ensayos del equipo de climatización por compresión de vapor.

La simulación se realizó partiendo de la formula (12), planteada por Figueredo et al (2001). La ecuación (3) representa la humedad absoluta del aire a la salida del sílica gel (proceso de adsorción).

$$x_3 = x_1 - Cte * K_m * (T_3) * W_{eq} * e^{-Km*(T3)*t} \quad (3)$$

Despejando el tiempo de la formula anterior, se obtuvieron las gráficas de las figuras 7 y 8.

La gráfica de la figura 7 representa la simulación del proceso de regeneración de sílica gel, considerando una temperatura del aire a la entrada del mismo de 80°C. La simulación se realizó para tres velocidades de aire. En el eje de ordenadas se representa la masa de agua por kg que el aire posee a la salida del panel de sílica gel. Las curvas representan la masa de agua en gramos/kg de aire seco que se extrae a medida que transcurre el tiempo. Se puede observar de la figura que para una velocidad de aire de 0.5 m/s la cantidad de agua extraída respecto a las otras dos velocidades es menor para un mismo intervalo de tiempo. Se observa de la gráfica que la mayor cantidad de agua extraída corresponde a velocidades superiores de 1.2 m/s. Cabe aclarar que se presenta como propuesta la utilización de la corriente de aire caliente emergente del condensador del equipo de climatización, la cual, mediante mediciones realizadas, registra valores de velocidad promedios alrededor de 2.5 m/s. Por lo tanto dicha velocidad coincide con la utilizada en el proceso de simulación.

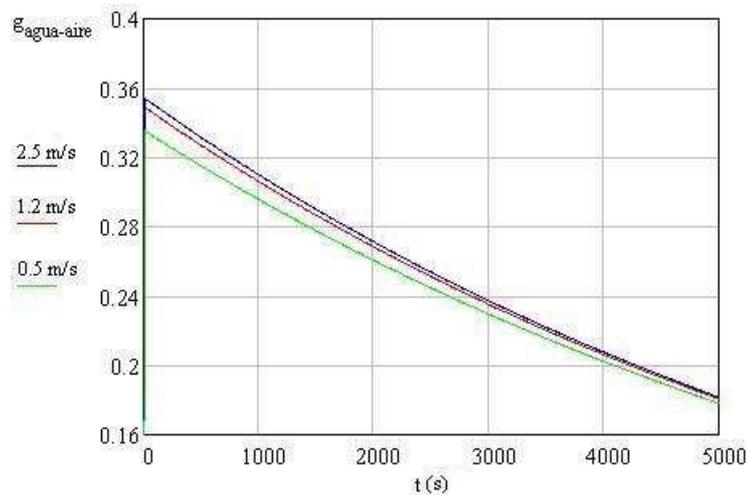


Figura 7: Gráfica de regeneración de sílica gel para temperatura de aire de 80°C

La gráfica de la figura 8 representa la simulación del proceso de regeneración de sílica gel, considerando una temperatura del aire de proceso de 95°C. Se puede observar que, respecto a la gráfica de la figura 7, la cantidad de agua extraída por el aire es relativamente mayor independientemente de la velocidad.

Por lo tanto la temperatura del aire adecuada para la regeneración del sílica gel se encuentra comprendida entre los valores de 80°C y 95°C. Cabe aclarar que si se supera la temperatura de 100°C del aire, el sílica gel pierde las propiedades higroscópicas y mecánicas.

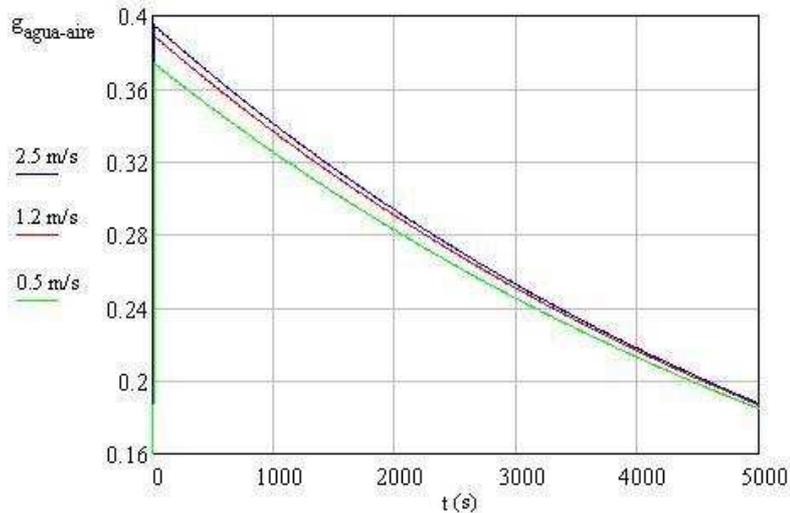


Figura 8: Gráfica de regeneración de sílica gel para temperatura de aire de 95°C

CONCLUSIONES

Mediante los ensayos de un equipo de climatización por compresión de vapor (split) de 5.23 kW de potencia, con la introducción de desecantes sólidos (sílica gel) para el secado de 15% y 30% del aire de proceso y agua subterránea, se lograron obtener las potencias caloríficas cedidas por el condensador del equipo para dichos ensayos.

El proceso de regeneración del sílica gel en función de la temperatura y velocidad del aire presentó los siguientes resultados:
 -En referencia a la temperatura se cuantifica en mayor proporción el agua extraída del sílica gel para el valor de 95°C.
 -En cuanto a la velocidad del aire, se determinó que a velocidades bajas (0.5m/s), la proporción de agua extraída del material desecante resulta menor respecto a velocidad del orden de 2.5 m/s, velocidad media de salida del condensador del equipo de climatización.

Se determinó mediante simulación del programa TRNSYS que la superficie colectora necesaria para regenerar el panel de sílica gel y extraer aproximadamente 0.9 kg de agua durante una hora, resulta un 15% menos de área colectora utilizando el calor residual del condensador.

La temperatura de salida del colector solar obtenida en la simulación se encuentra entre los valores de 85°C-95°C, temperatura adecuada para la regeneración del sílica gel.

REFERENCIAS

- Bula Silvera y Juvinao J. (2004). Comportamiento del gel de sílice como filtro deshumidificador en sistemas de acondicionamiento de aire por compresión de vapor. *Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.* pp. 73-83.
- Figueredo G., Busso A., Spotorno R., Pochettino J., Benítez F. (2001). Modelización y ensayo experimental de un climatizador por adsorción humidificación. *Avances en energías renovables y medio ambiente.* V5 08.55-60.
- Spotorno R., Busso A., Figueredo G., Pochettino J., Benítez F. (2010). Primeros estudios termodinámicos en la mejora de sistemas de climatización por compresión de vapor mediante deshumidificación del aire de proceso utilizando desecantes regenerados con energía solar. *Avances en energías renovables y medio ambiente.* V14 03.11-18.
- Spotorno R., Busso A., Pochettino J., Figueredo G., Benítez F. (2011). Mejora de la eficiencia de un climatizador por compresión utilizando desecantes sólidos regenerados con energía solar. *Avances en energías renovables y medio ambiente.* V 15 03.25-31.

ABSTRACT

This paper will examine the results obtained by studying and simulating the process of regeneration of silica gel using solar and residual heat from the condenser in air conditioning systems for vapor compression. The results obtained from the preliminary analysis residual heat from the condenser at the entrance of the flat plate solar collector can reduce the dimensions thereof by 15%, based on a collecting surface 2 m². In addition was simulated the regeneration process of the desiccant material to different temperatures and air velocities. The results of this study show speed and air temperature regeneration process was of 2.5 m / s and 95 ° C, consequently producing a mass rate of extraction of water from the silica gel suitable to reduce the regeneration time and adapt to the saturation time of the panel, to produce a continuous cycling.

Keywords: simulation, regeneration, solar energy, residual heat, silica gel