

## **MEJORA DE LA EFICIENCIA DE UN CLIMATIZADOR POR COMPRESIÓN UTILIZANDO DESECANTES SÓLIDOS REGENERADOS CON ENERGÍA SOLAR**

**R. Spotorno, A Busso\*, J. Pochettino, G. Figueredo, 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](mailto:rubenspotorno@yahoo.com)  
\*GER - Grupo en Energías Renovables – FaCENA – UNNE

**RESUMEN:** Se presentan los primeros resultados experimentales obtenidos a partir de ensayos realizados con un equipo de climatización por compresión de vapor al cual se acopló desecante sólido (silica gel) en el 30% de la corriente de aire de proceso. El desecante es regenerado con energía solar. La metodología desarrollada se basa en el análisis del consumo de energía eléctrica de un sistema de climatización por compresión de vapor de 5.23 kW de potencia, al cual se le adicionó un módulo desecante y aprovechamiento geotérmico utilizando agua de napa con el objetivo de reducir la carga térmica de la corriente de aire de proceso. Los resultados muestran una reducción del consumo de energía eléctrica en el orden del 13%, interviniendo en el mismo factores como la humedad relativa ambiente y el grado de regeneración del material desecante.

**Palabras clave:** compresión de vapor, silica gel, regeneración.

### **INTRODUCCIÓN**

Las principales fuentes de consumo de energía eléctrica en las regiones subtropicales húmedas son los sistemas de aire acondicionado, que se han convertido en una necesidad para industrias, comercios y hogares, a pesar de los elevados costos energéticos y ambientales que ellos implican.

El acondicionamiento de aire y la refrigeración es un problema ambiental, tanto por la contaminación como por el consumo de energía eléctrica, el cual puede ser en algunos casos hasta de un 40% del consumo energético total de la industria. En el caso específico de los supermercados, un 50% de la energía eléctrica es usada anualmente en refrigeración y un 15% en acondicionamiento de aire. (Builes y Chejne, 2004).

Actualmente, en países industrializados se están utilizando sistemas desecantes para contribuir al confort humano. La comprobada eficacia y eficiencia energética de éstos, ha motivado a los gobiernos de algunos países industrializados a promover su masificación mediante la investigación y desarrollo de nuevos materiales y equipos. (Bula Silvera y Díaz, 2004).

Estos desecantes (silica gel), poseen una elevada capacidad de adsorción del vapor de agua, además de tener la propiedad de regeneración a bajas temperaturas (menores a 100°C), permitiendo de esta forma utilizar un recurso renovable como es la energía solar con el fin de calentar el aire para utilizarlo en el proceso de regeneración.

En la región del Nordeste de la República Argentina, los parámetros de temperatura y humedad relativa son elevados aproximadamente durante cinco o seis meses del año, lo cual conlleva la necesidad de utilizar equipos de climatización para lograr las condiciones de confort necesarias para el desarrollo de las actividades humanas.

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. El presente trabajo, expone los resultados experimentales obtenidos luego de adicionar a la corriente de aire de proceso un dispositivo desecante sólido (sílica gel) y la utilización del agua de napa en los intercambiadores. Se cuantifica además el ahorro de energía eléctrica que estas modificaciones técnicas producen en este tipo de sistemas. Cabe destacar que la mayoría de los estudios realizados en este ámbito no utilizan este recurso geotermal o sumidero de calor residual tan importante.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La habitación a climatizar tiene las siguientes dimensiones: largo: 4,8 m, ancho: 3,3 m, alto: 3,2 m y un volumen de 50 m<sup>3</sup>, dos de sus paredes están construidas de mampostería y otras dos de placa de yeso con aislamiento interior de poliestireno expandido de 20 mm de espesor, el piso es de mosaicos graníticos. El techo es de chapa galvanizada con aislamiento de poliuretano inyectado en la cara interior de la cámara de aire y cielorraso de madera machimbrada. La habitación tiene una puerta y una ventana, ambas con marco de aluminio, y vidrio simple. Cabe aclarar que la habitación recibe radiación solar solamente a la mañana sobre su pared orientada al sur-este y sobre el techo todo el día. Las tres paredes restantes se comparten con otras oficinas y/o laboratorios. Esta situación hace que exista una escasa incidencia de las condiciones ambientales externas sobre la habitación a climatizar. Durante los ensayos, la carga térmica presente en la habitación a climatizar consistió en 3 computadoras, ocho tubos fluorescentes de 40 W cada uno y tres personas permanentemente desarrollando actividades de oficina, lo que representa una carga total aproximada de 1500W.

La investigación se realizó utilizando, para climatizar la habitación testigo, un equipo de aire acondicionado (AA) tipo split de 5.23 kW de potencia. La figura 1 muestra un esquema funcional general empleado. En el mismo se identifican los diferentes componentes: AA (split), habitación a climatizar, colector solar de placa plana (utilizado para calentar el aire necesario para la regeneración del material desecante), cámara de secado del material desecante e intercambiadores de calor. Estos dos últimos componentes se visualizan en las fotos de las figuras 2 y 3. Se muestra además la ubicación de los puntos de medición.

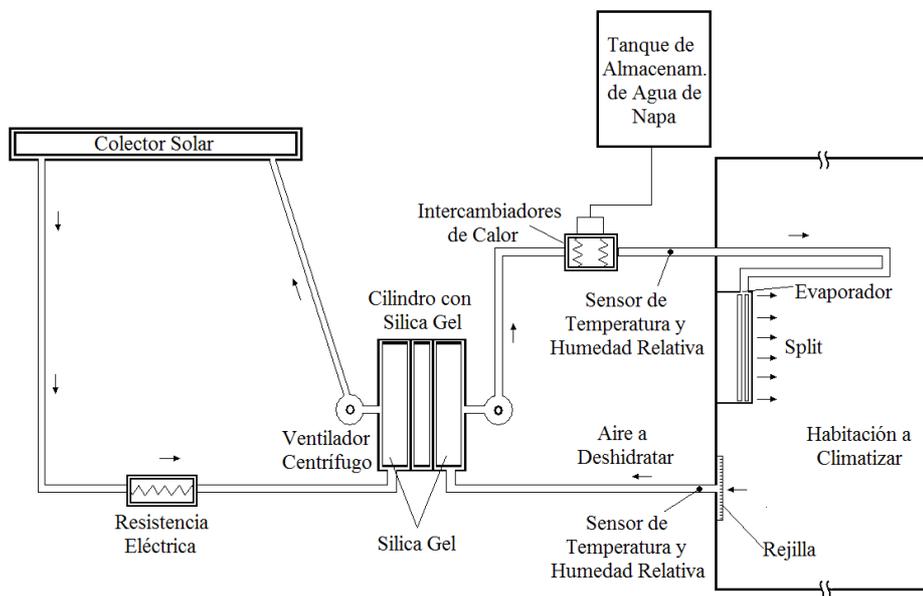


Figura 1: Diagrama esquemático del sistema de aire acondicionado y material desecante.



Figura 2: Cilindro con silica gel.



Figura 3: Silica gel e intercambiadores de calor.

Se utilizó como material desecante silica gel esferoidal con una granulometría de 3-5mm de diámetro, ubicado en un cilindro construido de chapa perforada de forma tal que permita el paso del aire de proceso a través del mismo. El espesor del panel es de 5 cm conteniendo aproximadamente 25 kg de gel de sílice. (Spotorno et al, 2007).

El sistema de medición dispone de dos termohigrómetros marca Dwyer modelo 657C-1 con precisión de 3% para HR y de 0.5°C para la temperatura y termocuplas tipo K. Los datos se registraron conectando estos sensores a un módulo adquisidor de datos NUDAM 6018 y éste, por medio de la interfase RS232 NUDAM 6520, a la PC. El registro de datos se realizó en forma automática a intervalos de 20 seg. Además, se registraron valores de temperatura y humedad relativa ambiente mediante un termohigrómetro marca Dwyer, modelo 657 precisión de 3% para HR y de 0.5°C para la temperatura, ubicado en un abrigo meteorológico in situ donde se encuentra el equipo experimental (Fig.4).



Figura 4: Abrigo meteorológico.



Figura 5: Adaptación del sistema desecante- evaporador.

La medición del consumo de energía eléctrica del equipo de climatización se realizó con un medidor de energía monofásico tipo M8S1, clase 2, marca ABB (Asea Brown Boveri).

Para determinar el caudal de aire por el circuito del evaporador y el del aire a deshidratar, se midieron las velocidades de cada circuito con un anemómetro de hilo caliente marca Lutrom AM-4204 con una resolución de 0.1 m/seg.

Todos los ensayos se realizaron de la siguiente forma: el 30% (220 m<sup>3</sup>/h) del caudal de aire, que es impulsado hacia el evaporador, se retira de la habitación para deshidratarse a través del sílica gel. Previo a ingresar al evaporador y mezclarse con el aire de retorno (Fig. 5), esta corriente de aire se hace pasar por dos intercambiadores de calor por los cuales circula agua de napa con el fin de reducir la energía aportada al aire por el sílica gel durante el proceso de secado (proceso exotérmico) (Fig. 3).

Los ensayos se realizaron en los mismos horarios para días con condiciones climática muy similares a fin de comparar los consumos de energía. Las características que presenta esta región son de clima subtropical templado y húmedo, con valores de temperatura media del orden de 35°C, 70% de humedad relativa, y vientos predominantes del nordeste del orden de 20 km/h para los meses de verano. Se realizaron ensayos con la implementación del desecante sólido (sílica gel), y sin ella, y el agua de napa.

En todos los ensayos se configuró el equipo de AA para una temperatura de 24°C en el interior de la habitación a climatizar y la velocidad del aire a la salida del evaporador en estado medio, aproximadamente 4 m/s según nuestras mediciones realizadas en distintos puntos del evaporador. Además, antes de iniciar los ensayos, se midió el valor de la temperatura en el interior de la habitación la cual registró valores aproximados a los 30-31°C para todos los ensayos realizados.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

La Tabla N° 1 presenta un detalle de los ensayos realizados. El ensayo del 17/12/010 se toma como de referencia para el cual el equipo de AA funciona sin secado previo del aire de recirculación y sin circulación de agua de perforación. Los ensayos restantes se realizaron con secado del 30% del aire de retorno del evaporador y enfriamiento del aire con agua de perforación, observándose para éstos una reducción del consumo de energía eléctrica respecto al anterior. Todos los ensayos se realizaron en el horario de 19:00hs hasta 20:30hs, con excepción del ensayo del día 23/03/2011 que se realizó desde las 14:00hs hasta las 15:30hs.

Ensayos	Consumo [kW-h]	% Reducción del Consumo
17-12-2010	1.4	REFERENCIA
11-03-2011	1.2	14
22-03-2011	1.3	13
23-03-2011	1.3	13
04-04-2011	1.2	14

Tabla 1: Ensayos del equipo experimental.

### Ensayo del 11/03/2011

En la Figura 6 se observa la evolución de la temperatura y humedad relativa del aire durante el desarrollo del ensayo. Las curvas azul y magenta representan la humedad relativa y temperatura del aire (30% del aire de recirculación) a la salida de la habitación. Las curvas verde y celeste representan la humedad relativa y temperatura del aire (30% del aire de recirculación) a la entrada del evaporador del equipo de climatización. Mientras que la curva de color violeta indica la temperatura de salida del aire luego de pasar a través del sílica gel, observándose que al inicio del proceso de secado la temperatura del aire se

encuentra en el orden de los 35°C y a medida que transcurre el mismo comienza a descender (disminuye el proceso exotérmico).

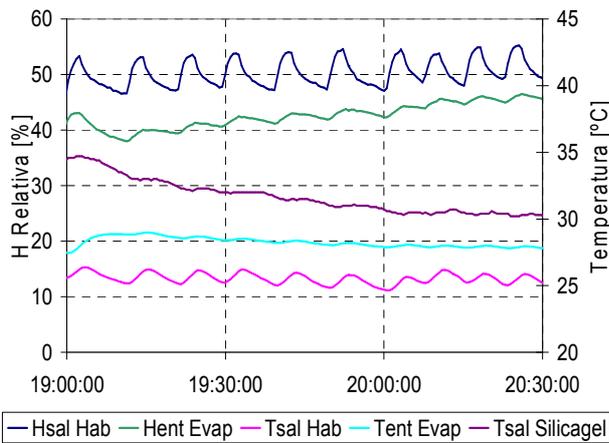


Figura 6: Evolución de Temperaturas y H Relativas.

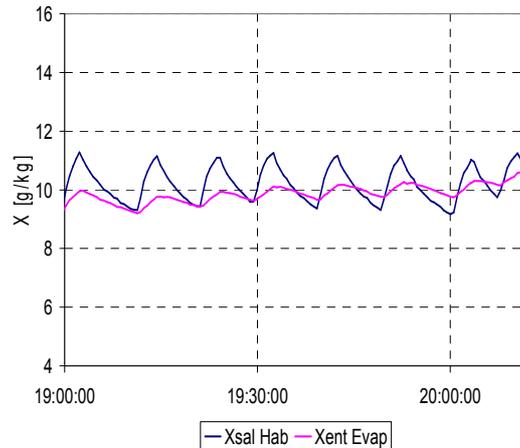


Figura 7: Evolución de Humedades Absolutas.

La Figura 7 representa la evolución de la humedad absoluta del 30% del aire que se retira de la habitación para deshidratarse. En la curva azul se aprecian los periodos en los cuales la humedad absoluta del aire comienza a aumentar (periodo en que el aire de la habitación se carga de humedad por la presencia de las personas y filtraciones de puerta y ventana) para luego descender (momento en el cual se encuentra funcionando el motocompresor del equipo de climatización). En cuanto a la curva de color magenta, indica la humedad absoluta del aire después de pasar a través del silica gel e intercambiadores de calor (antes de su ingreso al evaporador). En la misma se observa la diferencia del contenido de agua por kg de aire seco en relación a la curva anterior (proceso de secado del aire).

**Ensayo del 22/03/2011**

En la gráfica de la Figura 8, para las curvas de humedad y temperatura de salida del aire de la habitación, se aprecia que desde el inicio disminuyen durante un intervalo de tiempo aproximado de 35 minutos, periodo durante el cual funciona el motocompresor del sistema de climatización hasta alcanzar la temperatura y humedad de confort del ambiente a climatizar. Esta diferencia de funcionamiento desde el inicio respecto al ensayo del 11/03/2011, corresponde a que la humedad relativa y temperatura ambiente eran más elevadas para el ensayo del día 22/03/2011. En la Figura 9 se observa que la humedad absoluta del aire a la entrada del evaporador es relativamente baja respecto a la de salida del aire de la habitación, con lo cual se demuestra que el proceso de secado del aire es inferior al caso anterior y que a su vez se atribuye a una regeneración deficiente del material desecante (baja radiación del día 22/03/2011, Figura 12).

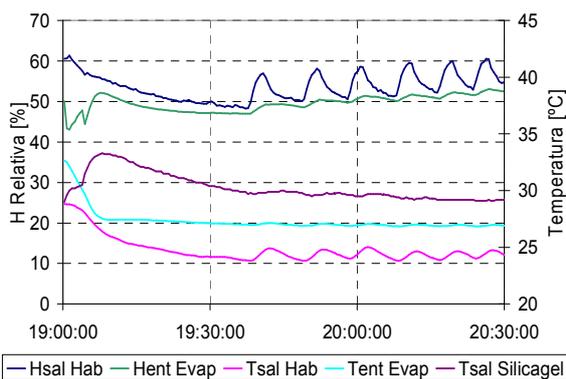


Figura 8: Evolución de Temperaturas y H Relativas.

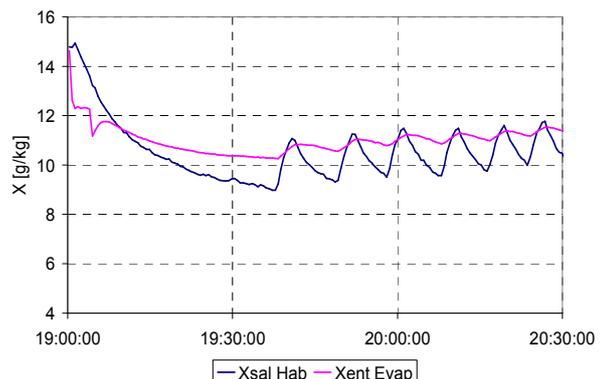


Figura 9: Evolución de Humedades Absolutas.

**Ensayo del 04/04/2011**

En la Figura 10 se observa que desde el inicio del ensayo y transcurrido aproximadamente 25 minutos, las curvas de humedad relativa y temperatura del aire a la salida de la habitación descienden, periodo durante el cual funciona el motocompresor del sistema de climatización hasta alcanzar la temperatura y humedad de confort del ambiente a climatizar.

Se aprecia que el tiempo de funcionamiento del motocompresor durante este intervalo es menor respecto al ensayo del 22/03/2011 y que se condice con un valor de humedad relativa ambiente menor (figura 13).

La Figura 11 indica la evolución de las humedades absolutas del aire a la salida de la habitación (azul), con un mayor contenido respecto a la de entrada del evaporador (magenta), después de pasar a través del silica gel y deshidratarse.

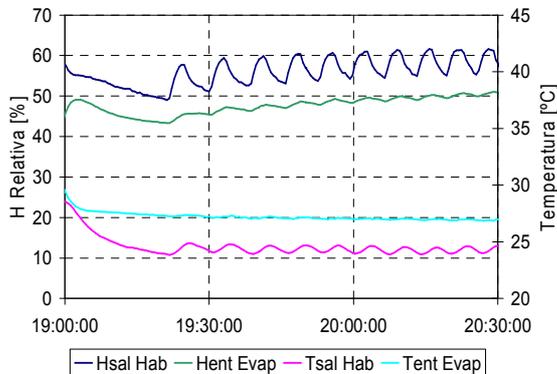


Figura 10: Evolución de Temperaturas y H Relativas.

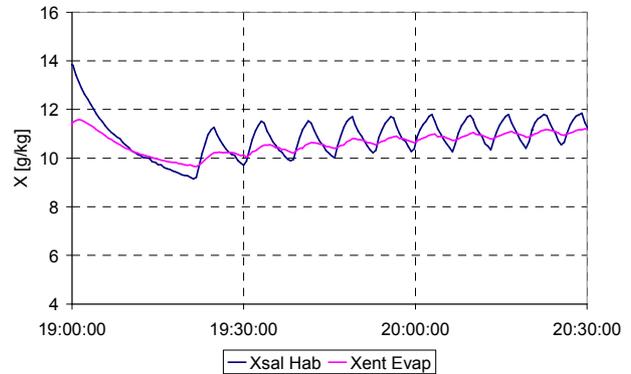


Figura 11: Evolución de Humedades Absolutas.

La determinación de la humedad absoluta del aire a la salida de la habitación (30% del aire de recirculación) y del aire secado después de pasar a través del silica gel y de los intercambiadores de calor, se realizó mediante la fórmula utilizada por Spotorno et al (2008).

$$X = (0.622 * ((0.0085 * EXP(0.0527 * T)) * Hr / 100 / (1.013 - ((0.0085 * EXP(0.0527 * T)) * Hr / 100)))) * 1000$$

En donde:

T: temperatura de salida del aire de la habitación o temperatura de entrada al evaporador del 30 % del aire que se deshidrata.

Hr: humedad relativa de salida del aire de la habitación o humedad relativa de entrada al evaporador del 30 % del aire que se deshidrata.

Mediante la aplicación de esta fórmula se realizaron las gráficas correspondientes de dicho parámetro, de manera tal de realizar el seguimiento del proceso del aire a la salida de la habitación y del aire que ingresa deshidratado al evaporador.

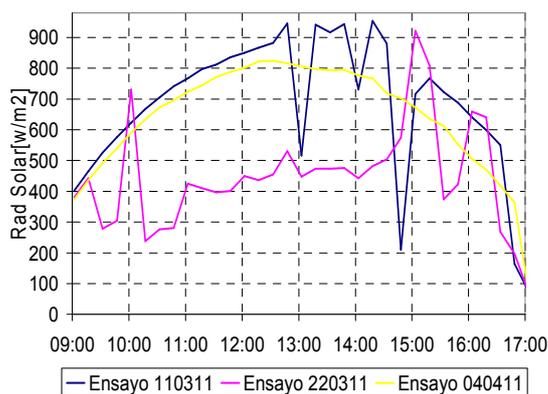


Figura 12: Radiación solar para los diferentes ensayos de regeneración del material desecante.

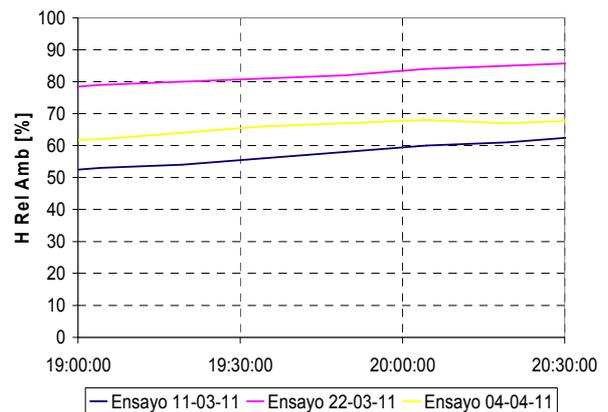


Figura 13: Humedad Relativa ambiente durante los ensayos.

La gráfica de la Figura 12 muestra la evolución de la radiación solar para los diferentes días que se realizó la regeneración del material desecante. En la misma se puede apreciar que para el día 22/03/2011 los valores de la radiación solar fueron menores que para los otros dos días, lo cual atribuye a que el grado de regeneración del silica gel fuera menor y que por lo tanto se traduzca en que la humedad absoluta del aire a la salida del panel desecante (Fig. 9) tenga valores tan reducidos. Además, el hecho que la regeneración del material desecante no fue la apropiada, determinó que la reducción del consumo de energía eléctrica del equipo de climatización fuera menor respecto a los otros ensayos.

La Figura 13 indica la evolución de la humedad relativa ambiente durante los ensayos realizados. En la misma se logra apreciar que, para el ensayo del día 22/03/2011, la humedad relativa es mayor respecto a los otros ensayos lo que indica uno de los factores que influyó en la menor reducción de consumo de energía eléctrica.

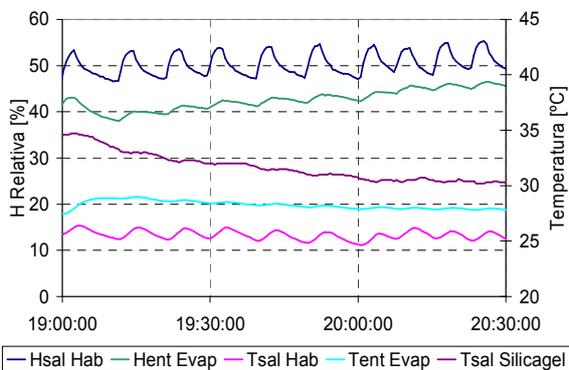


Figura 14: Evolución de Temp y H Rel Ensayo 110311.

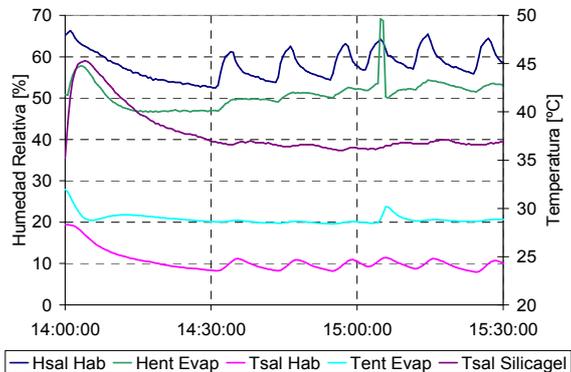


Figura 15: Evolución de Temp y H Rel Ensayo 230311.

Uno de los aspectos importantes introducidos en el estudio y desarrollo de este equipo, es el agua de perforación (napa). Para poder explicar el beneficio de este recurso geotermal, analicemos las figuras 14 y 15. La Figura 14 corresponde a un ensayo del equipo de climatización después de dos horas de realizada la regeneración del material desecante. En la misma se observan dos curvas representativas de la temperatura del aire a la salida del silica gel (violeta) y la temperatura del aire después del intercambiador de calor (celeste, entrada al evaporador). Debido a que se dejó transcurrir aproximadamente dos horas entre el proceso de regeneración del silica gel y el de climatización propiamente dicho, la temperatura de salida del aire después del silicagel alcanza un valor de 35°C y luego comienza a descender con el transcurrir del ensayo. Mientras que la temperatura de salida del aire después de los intercambiadores de calor (entrada al evaporador), se mantiene prácticamente durante todo el ensayo en 28°C aproximadamente. En cambio, la gráfica de la Figura 15 corresponde a un ensayo de climatización realizado seguidamente al proceso de regeneración del material desecante. En la misma se observa que la temperatura del aire después del silica gel al inicio del ensayo alcanza los 45°C y luego comienza a descender, mientras que la temperatura del aire después de los intercambiadores se mantiene en 28°C aproximadamente durante todo el ensayo. De esta forma la climatización de la habitación es independiente del proceso de regeneración del silica gel, debido al uso del agua de perforación, que reduce el aumento de temperatura del aire cualquiera sea su incremento a la salida del silica gel, que sino se traduciría en un mayor consumo de energía del equipo por compresión de vapor.

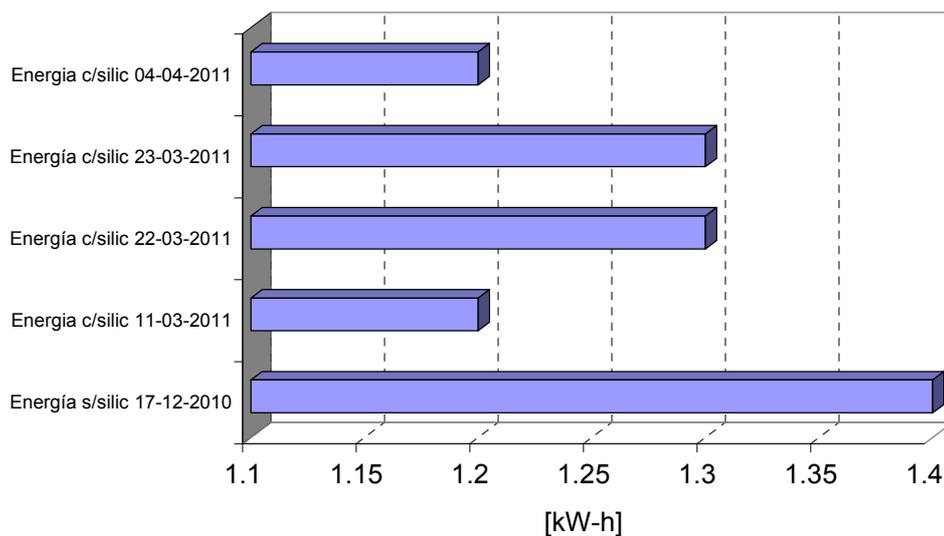


Figura 16: Comparación de Consumo de Energía del equipo de AA.

En la Figura 16 se presenta la comparación de consumo de energía eléctrica del equipo de AA para los diferentes ensayos realizados. En la misma se observa que el mayor consumo de energía eléctrica corresponde al ensayo del día 17/12/2010, el cual se realizó sin secado previo del 30% del aire que retorna al evaporador y sin circulación de agua de napa por los intercambiadores de calor. En cambio, para el resto de los ensayos se evidencia una disminución del consumo energético

comprendido entre el 13-14%. Estos ensayos se corresponden a los realizados con secado previo del 30% del aire que retorna al evaporador y con circulación de agua de napa a través de los intercambiadores.

## CONCLUSIONES

Se ensayó un equipo de climatización por compresión de vapor (split) de 5.23 KW de potencia, con la introducción de desecantes sólidos (silica gel) para el 30% del aire de proceso y agua de napa, obteniendo una reducción del consumo de energía eléctrica del orden del 13-14%.

Se logró determinar que la diferencia de consumo entre los ensayos correspondió a la intervención de factores como ser: humedad relativa ambiente en el momento del ensayo y grado de regeneración final del material desecante.

La utilización del agua de napa o de perforación en los intercambiadores de calor en el sistema propuesto, permite independizar el proceso de climatización y el de regeneración del material desecante, de acuerdo a lo expresado a las figuras 14 y 15.

Aunque sea satisfactorio en términos de ahorro de energía eléctrica, es necesario un análisis económico en el que se destaquen los méritos y deficiencias del sistema. Cabe destacar que si tenemos en cuenta el sistema desecante, el colector solar de placa plana, la bomba sumergible para extraer el agua de napa y demás accesorios necesarios para el funcionamiento del sistema propuesto, los costes del mismo serían demasiados elevados, con lo cual es evidente que el sistema de aire desecante es una opción viable sólo para los sistemas de aire acondicionado centrales (grandes potencias).

Reconocimiento: Se agradece a Hugo Osiska por la colaboración.

## REFERENCIAS

- Bula Silvera y Díaz F. (2004). Ahorro de energía eléctrica por implementación de filtros desecantes en sistemas de acondicionamiento de aire por compresión de vapor. Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. pp. 84-92.
- Builes D y Chejne F. (2004). Acondicionamiento de aire utilizando ruedas deshumidificadoras. Instituto de Energía y Termodinámica. Universidad Pontificia Bolivariana. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo. Jornadas Iberoamericanas sobre el enfriamiento solar. CYTED. Cartagenas de Indias, Colombia.
- Spotorno R., Busso A., Pochettino J., Figueredo G., Benítez F. (2007). Resultados experimentales del proceso de adsorción mediante silica gel en una planta piloto de climatización solar. Avances en energías renovables y medio ambiente. V11 03.99-106.
- Spotorno R., Masdeu N., Pochettino J., Figueredo G., Benítez F. (2008). Primeros resultados experimentales de la operación continua de una planta piloto de climatización solar. Avances en energías renovables y medio ambiente. V12 03.39-45.
- 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.

## ABSTRACT

We present the first experimental results from tests conducted with vapor compression air conditioning equipment, which is coupled to solid desiccant (silica gel), in the 30% of process air stream. Desiccant is regenerated by solar energy. The methodology is based on analyzing of electrical energy consumption of an air conditioning system for vapor compression of 5.23 kW, which was added a desiccant module and by taking advantage underground geothermal water to reduce the thermal load of process air stream. The results show a reduction of power consumption near 13%. Some of the factors involved are: relative humidity, degree of regeneration of the desiccant material.

**Keywords:** vapor compression, silica gel, regeneration.