



## PRIMEROS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA OPERACIÓN CONTINUA DE UNA PLANTA PILOTO DE CLIMATIZACIÓN SOLAR

**R. Spotorno, N. Masdeu, 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: ifbenitez@infovia.com.ar

**RESUMEN:** Se exponen los resultados experimentales de la operación de una planta piloto de climatización por adsorción-humidificación con regeneración solar de silica gel. Para el estudio del proceso de adsorción-humidificación se registraron valores de caudales, temperatura y humedad relativa del aire en la entrada y salida de la habitación a climatizar. Los ensayos se realizaron para un caudal de aire de 700 kg/h. Los procesos de adsorción-humidificación se realizaron en forma simultánea con la regeneración solar. Mediante la realización de los ensayos de adsorción-humidificación y regeneración de silica gel se logró determinar la potencia frigorífica de la planta para diferentes meses del año y distintas cargas térmicas. Se determinó que el equipo desarrolla potencias del orden de 2400 kcal/h cuando la temperatura ambiente es elevada.

**Palabras clave:** adsorción, humidificación, regeneración solar

### INTRODUCCION

En los últimos años se ha producido un crecimiento evidente de las necesidades de refrigeración en los edificios por una mayor exigencia de las condiciones de confort. Habitualmente la demanda de refrigeración es cubierta por electricidad, hecho que provoca puntas de consumo considerables en las redes de distribución de energía eléctrica durante los meses de verano. No obstante, existen sistemas de refrigeración accionados por fuentes térmicas, como la energía solar.

En Hampton, Virginia, las pruebas de eficacia realizadas en una casa solar indican que el sistema solar puede proporcionar 57% de la calefacción y refrigeración necesaria anualmente (Yeung et al, 1992). En Hong Kong (China), las experiencias sobre calefacción y refrigeración solar, realizadas en una casa solar, mostraron que el sistema solar puede satisfacer el 100 % de las necesidades de energía calorífica durante el invierno y el 70 % de demanda de energía para la refrigeración en un día de verano típico (Yeung et al, 1992).

El clima de la región chaqueña junto al río Paraná se caracteriza por las altas temperaturas y humedades. Estas condiciones hacen que el aire acondicionado sea imprescindible para el confort humano. Los procesos convencionales con lo que se acondiciona aire, presentan altos consumos de energía y pueden traer consigo problemas ambientales. Además requieren compresores, los cuales presentan un alto costo de funcionamiento en comparación con otros electrodomésticos de uso habitual. Algunos de estos sistemas utilizan sustancias como los CFC y los HCFC, los cuales están restringidos por el protocolo de Montreal, Builes y Chejne (2004). Por todo ello será aconsejable recurrir a tecnologías de acondicionamiento basadas en el uso de las energías renovables, las que cuentan con la gran ventaja de ser limpias y seguras.

El problema radica en la conjunción de temperaturas y humedades elevadas. A fin de obtener rangos de humedades confortables del aire en el sistema de climatización por adsorción-humidificación, el mismo es deshidratado en un dispositivo según se detalla en Spotorno et al.(2007). La alta disponibilidad de radiación solar local, permite obtener mediante un colector solar de placa plana temperaturas del orden de 80°C adecuadas para la regeneración del silica gel (Busso et al, 2007). El sistema de climatización por adsorción-humidificación ha demostrado la viabilidad de la climatización solar en Europa central pero no para todas las condiciones climáticas (Henning et al, 1997).

En el presente trabajo se exponen los primeros resultados experimentales obtenidos durante los ensayos de operación integral de una planta piloto de climatización por adsorción-humidificación con regeneración solar mediante un colector de placa plana de 18 m<sup>2</sup>, destinada a climatizar una oficina de 16 m<sup>2</sup>.

## MATERIALES Y METODOS

Los ensayos fueron realizados en la planta piloto de climatización cuyo esquema se observa en la figura 1, y que consta de 2 circuitos principales: el de adsorción-humidificación y el de regeneración. En el circuito de adsorción-humidificación el aire sale de la habitación con un contenido elevado de humedad absoluta y una temperatura acorde con la carga térmica presente en la habitación a climatizar, y pasa a través de dos intercambiadores de calor con el fin de disminuir la temperatura del aire ya que el proceso de adsorción mejora a bajas temperaturas. El aire sale del panel que contiene el silica gel regenerado con una humedad absoluta menor y una temperatura mayor que a la entrada, y pasa a través de dos intercambiadores de calor donde su temperatura desciende. A continuación el aire circula por el humidificador (panel relleno de viruta de madera), donde desciende aún más su temperatura y aumenta su humedad absoluta, para luego ingresar a la habitación a climatizar. Los intercambiadores de calor eran alimentados por agua de subsuelo que se encontraba a una temperatura aproximada de 24°C, y que se impulsaba mediante una bomba sumergible situada a 26 m de profundidad, a un tanque elevado térmicamente aislado con capacidad de 1 m<sup>3</sup>, para luego por gravedad alimentarlos. El agua de subsuelo tenía el inconveniente que al contener sales de hierro y que al depositarse en los conductos de circulación del intercambiador provocaba pérdidas de carga, con la consecuencia de que reiteradamente debía realizarse la limpieza de los mismos. Con el fin de aumentar el caudal de agua por los intercambiadores, se encendió una bomba mediante un timer, y cuando esta no funcionaba la alimentación se realizaba por gravedad. El humidificador era alimentado por agua de red.

En lo que se refiere al funcionamiento del circuito de regeneración, el aire proveniente del colector solar de placa plana sale con una temperatura aproximada de 90°C, ingresa al cilindro que contiene el silica gel saturado de humedad, para salir del mismo a una temperatura cercana a los 80°C absorbiendo la humedad retenida en el silica gel, para luego ingresar al colector solar de placa plana. Para los días de baja radiación solar, como se observa en la figura 1, en el circuito de regeneración se instalaron tres resistencias eléctricas cuya potencia total es de 1200w, a fin de suministrar la energía adicional a la que aporta el colector solar. El estudio de la regeneración solar de silica gel se detalla en Busso et al. (2007).

Los ensayos consistían en realizar simultáneamente el proceso de adsorción y regeneración, y aproximadamente cada hora y media girar 180° la unidad donde se aloja el elemento adsorbente, de manera tal que el silica gel que se encontraba en el proceso de adsorción, al saturarse de humedad, pasaría al circuito de regeneración para el proceso de desorción. A la unidad donde se aloja el silica gel, reiteradamente se le debieron reparar las juntas de cierre a fin de evitar intercambio de aire desde el sistema de regeneración al de adsorción. Además cabe aclarar que la realización de los ensayos se interrumpieron debido a la rotura de los vidrios del colector solar provocados por causas ajenas al personal que se desempeña en el grupo. El caudal de aire empleado en los distintos ensayos fue de 700 kg/h, obtenido a partir de la obturación del conducto del sistema de adsorción-humidificación. Si bien con el sistema de impulsión de aire se obtenían caudales máximos de 1000 kg/h, no se presentaron ensayos para este caudal ya que la duración del proceso de adsorción-humidificación resultaba demasiado corto.

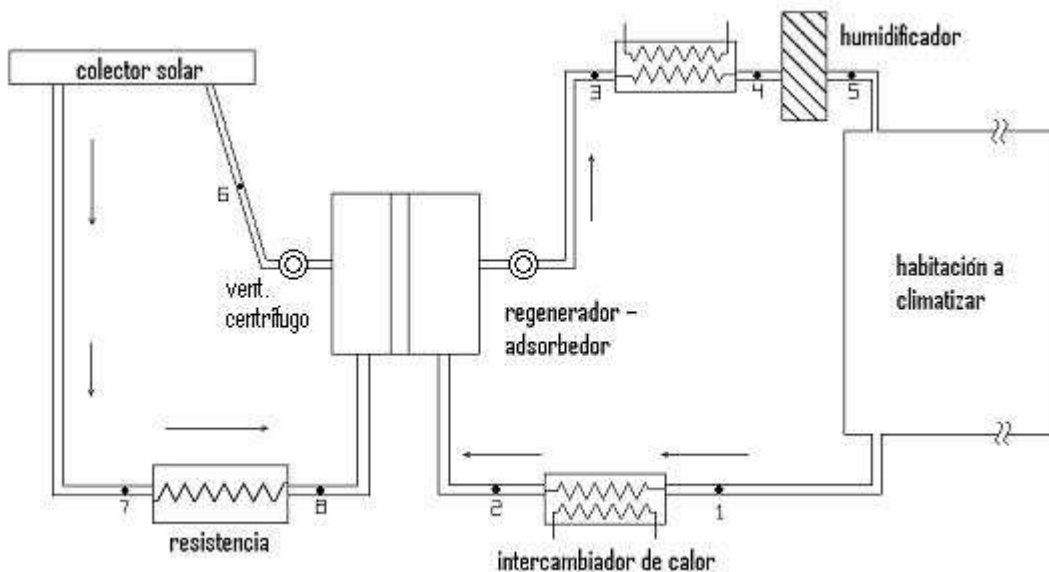


Figura 1.- Esquema de la planta de climatización por adsorción-humidificación y ubicación de sensores

A continuación se detallan los parámetros que se registraron en los distintos puntos indicados en la figura 1.

- Punto1: Medición de temperatura y humedad relativa del aire (salida de la habitación).
- Punto2: Medición de temperatura del aire a la entrada del sistema de adsorción-regeneración
- Punto3: Medición de temperatura del aire antes del intercambiador de calor.
- Punto4: Medición de temperatura del aire después del intercambiador de calor.
- Punto5: Medición de temperatura y humedad relativa del aire (entrada a la habitación).
- Punto6: Medición de temperatura del aire de entrada al colector solar.
- Punto7: Medición de temperatura del aire de salida del colector solar.
- Punto8: Medición de temperatura del aire después de la resistencia eléctrica.

Sistema de Medición: Como sensores de temperatura y humedad se emplearon dos Termo higrómetros marca Dwyer modelo 657 precisión de 3% para HR y de 0.5°C para la temperatura, y como sensores de temperatura se emplearon termocúplulas tipo K, conectados a un módulo adquiredor de datos NUDAM 6018, a su vez conectado a una PC por medio del la interfase RS232 NUDAM 6520. El registro de datos se realizó en forma automática a intervalos de 20 seg.

La habitación a climatizar presenta las siguientes características y dimensiones: la superficie cubierta es de de 16 m<sup>2</sup>, las paredes están construidas dos de mampostería y dos de placas de yeso con aislamiento interior de poli estireno 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 parte inferior, mientras que el cielorraso es de madera machimbrada. Las aberturas son una puerta y una ventana construida de marco de aluminio y vidrio. Cabe aclarar que la habitación recibe radiación solar en una de las paredes que se encuentra orientada al sur-este y techo.

La carga térmica presente en la habitación a climatizar estaba constituida por: 1 Computadora, 8 Tubos fluorescentes de 40w cada uno, personas en algunos ensayos o una estufa de 600w cuando no se encontraban personas presentes en la habitación.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con los registros de temperaturas y humedades relativa, se pudieron determinar las humedades absolutas utilizando la formula (1):

$$X = (0.622 * ((0.0085 * EXP(0.0527 * T)) * Hr / 100 / (1.013 - ((0.0085 * EXP(0.0527 * T)) * Hr / 100)))) * 1000 \quad (1)$$

Donde :

T: temperatura de entrada o salida del aire a la habitación a climatizar

Hr: humedad relativa de entrada o salida del aire a la habitación a climatizar

Mediante la aplicación de esta formula se realizaron las gráficas correspondientes de dicho parámetro, de manera tal de realizar el seguimiento del proceso del aire desde que ingresa a la oficina y sale de la misma.

La potencia frigorífica (N) de la instalación se calculo mediante la formula (2).

$$N = caudal * (h1 - h5) \quad (2)$$

$$h = cp * t + X(r + cpv * t) \quad (3)$$

Donde:

Caudal: 700 Kg/h

h: entalpía del aire en los estados 1 y 5

cpaire: 0.24 Kcal/kg °C

t: temperatura del aire en los estados 1 y 5

X: humedad absoluta en gr agua/Kg aire

r: calor latente de vaporización: 597 Kcal/kg

cpvapor: 0.46 Kcal/Kg °C

A continuación se exponen los resultados de cuatro ensayos realizados para los meses de marzo, abril y mayo del presente año. Dichos ensayos fueron seleccionados ya que corresponden a meses diferentes y se realizaron para distintas cargas térmicas.

*Ensayo del 26/03/2008:*

Durante la realización del ensayo se encontraba una persona permanentemente en el interior de la habitación a climatizar.

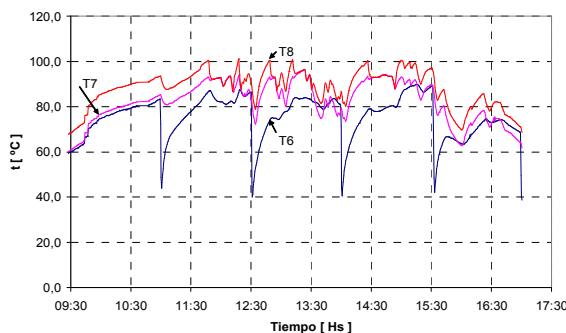


Figura 2.- Temperaturas en el circuito de regeneración

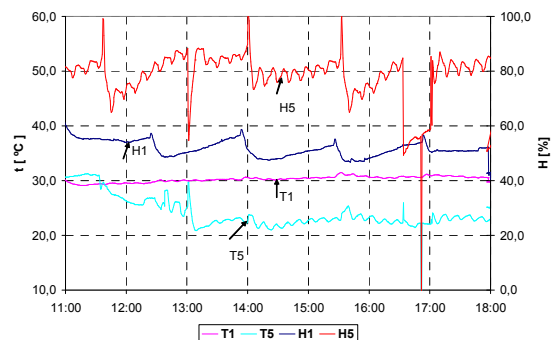


Figura 3.- Temperaturas y humedades relativas dentro de la habitación y a la salida del sistema de climatización

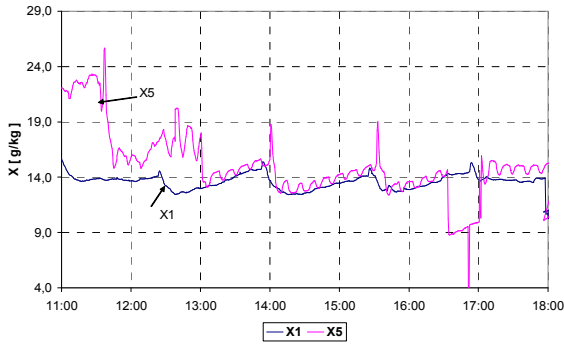


Figura 4.- Humedades absolutas dentro del local y a la salida del sistema de climatización

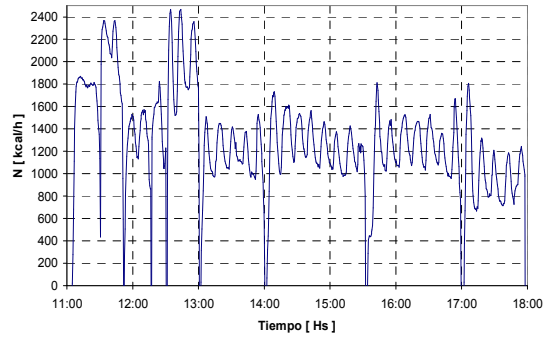


Figura 5.- Potencia desarrollada por el sistema de climatización

La gráfica 2 muestra la evolución de las temperaturas en el circuito de regeneración, donde puede observarse que para esta época del año se alcanzan valores de temperaturas promedio de 90°C a la salida del colector solar, sin el apoyo de energía auxiliar suministrada por la resistencia eléctrica, temperaturas adecuadas para la regeneración del silica gel.

En la figura 3 puede observarse que el interior del local permaneció durante todo el ensayo a una temperatura de aproximadamente 30°C, mientras el sistema entregaba aire a 23°C. La humedad relativa interior fue de aproximadamente 50% y a la salida del sistema de climatización es de aproximadamente 80%.

La gráfica 4 manifiesta la evolución de las humedades absolutas de entrada y salida de la habitación a climatizar donde puede apreciarse la pequeña diferencia que existe entre ambas. La diferencia en las humedades absolutas se deben a los aportes de humedad generados por las personas y a la mezcla que se produce debido a las infiltraciones de aire exterior que en general tiene una humedad absoluta diferente a la del interior del local.

La potencia desarrollada por la planta presenta una oscilación cíclica con una amplitud de aproximadamente 500 kcal/h figura 5. Al inicio del ensayo se alcanzo a tomar una carga térmica máxima instantánea de 2400kcal/h y a lo largo del ensayo se obtiene una potencia media de 1500kcal/h.

Ensayo del 07/04/2008:

El ensayo de adsorción-humidificación se realizó sin personas presentes en la habitación a climatizar, por lo que se instaló una estufa de 600 w. Se puede observar que los resultados obtenidos de las diferentes gráficas son muy similares al del día 11/04/08 ya que prácticamente se realizaron bajo las mismas condiciones.

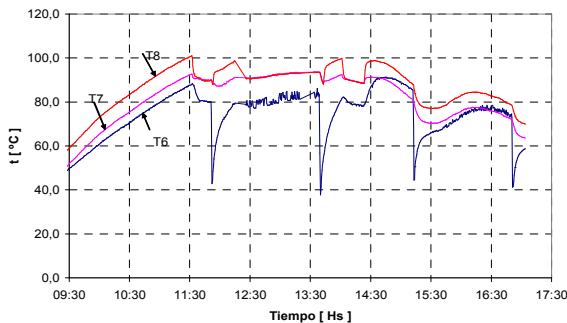


Figura 6.- Temperaturas en el circuito de regeneración

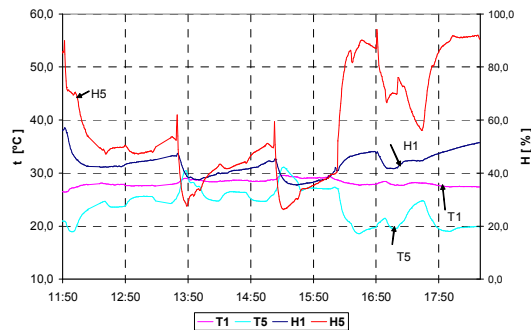


Figura 7.- Temperaturas y humedades relativas dentro de la habitación y a la salida del sistema de climatización

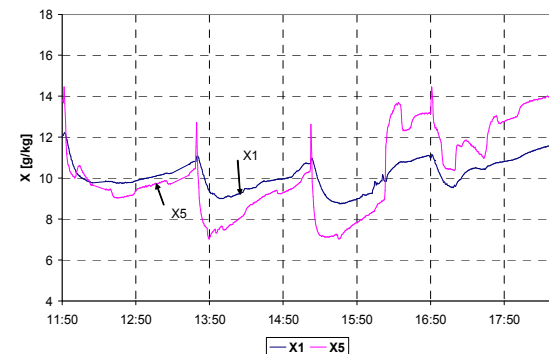


Figura 8.- Humedades absolutas dentro del local y a la salida del sistema de climatización

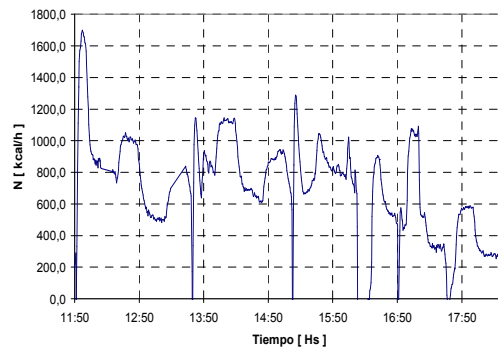


Figura 9.- Potencia desarrollada por el sistema de climatización

En la figura 6 referida a las temperaturas en el circuito de regeneración se puede observar que entre las 12:30 hs y 13:30 hs la temperatura del aire a la salida del colector solar alcanza los 90°C, únicamente con el aprovechamiento de la energía solar.

En la figura 9 se observa que la potencia desarrollada por la planta presenta una oscilación cíclica con una amplitud de aproximadamente 600 kcal/h. Al inicio del ensayo se alcanzó a tomar una carga térmica máxima instantánea de 1600kcal/h y a lo largo del ensayo se obtiene una potencia media de 1000kcal/h.

En la misma figura, se aprecia una perturbación entre los valores máximos y mínimos, debido a que la alimentación de los intercambiadores estaba programada mediante un timer de manera tal que funcionara una bomba de alimentación aumentando el caudal. Cabe aclarar que en los instantes en que la bomba no funcionaba, la alimentación de los intercambiadores se realizaba mediante un tanque elevado.

*Ensayo 11/04/2008*

En la figura 10 se observa que las temperaturas del aire al inicio del ensayo de regeneración tienen valores aproximados a los 80° C, debido a que el sistema de adquisición de datos se encendió a las 11:30 hs, mientras que el sistema de regeneración se encendió a las 10:00 hs.

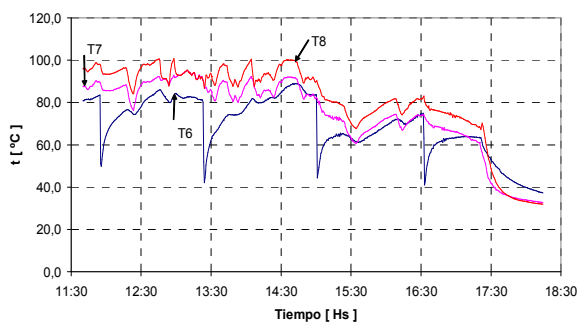


Figura 10.- Temperaturas en el circuito de regeneración

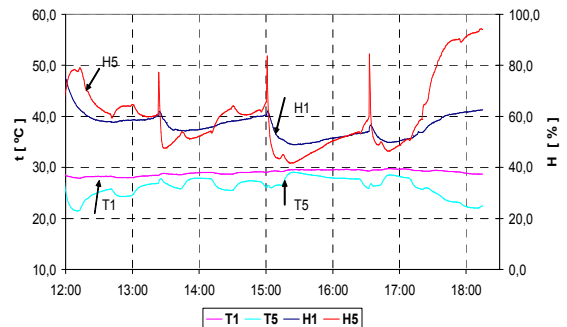


Figura 11.- Temperaturas y humedades relativas dentro de la habitación y a la salida del sistema de climatización

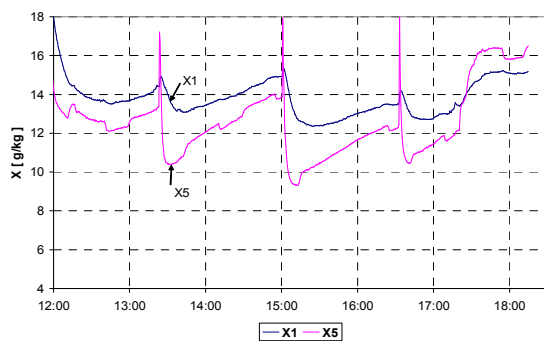


Figura 12.- Humedades absolutas dentro del local y a la salida del sistema de climatización

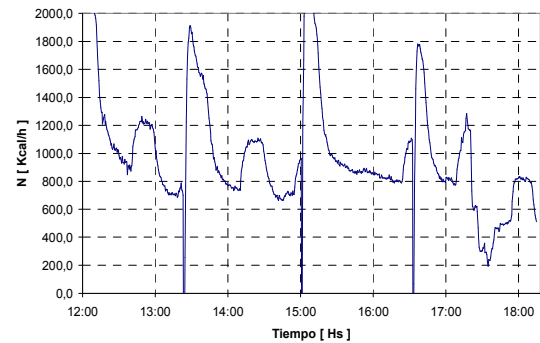


Figura 13.- Potencia desarrollada por el sistema de climatización

En la figura 11 pude observarse que el interior del local permaneció durante todo el ensayo a una temperatura de aproximadamente 29°C, mientras el sistema entregaba aire a 27°C.

La diferencia de las humedades absolutas entre la entrada y salida de la habitación a climatizar (figura 12), puede atribuirse a las infiltraciones de aire por la parte inferior de la puerta de ingreso.

En la figura 13 se puede apreciar que se obtuvieron valores máximos de potencia de 2000 kcal/h para ciertos instantes del ensayo, mientras que el valor promedio durante el ensayo fue de 1000 kcal/h.

*Ensayo 19/05/2008*

Durante la realización del ensayo se encontraban 2 personas permanentemente en el interior de la habitación a climatizar. Cabe aclarar que para este ensayo se colocó en la parte inferior de la puerta de ingreso de la habitación a climatizar un tapajuntas a fin de evitar infiltraciones de aire del exterior.

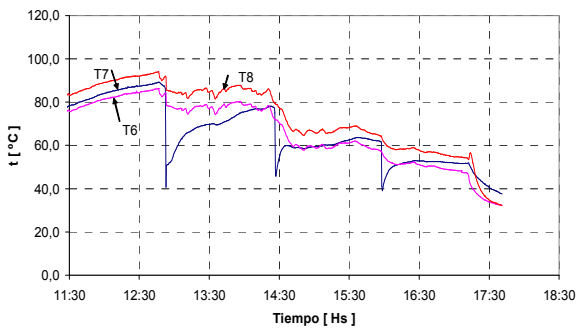


Figura 14.- Temperaturas en el circuito de regeneración

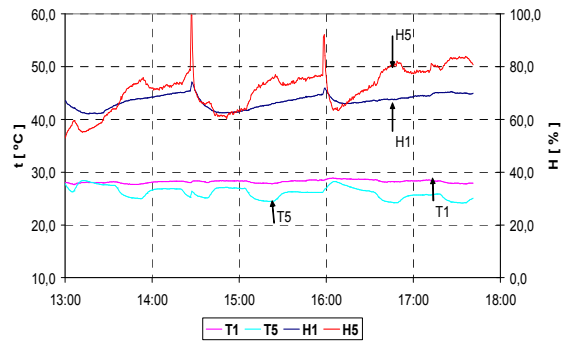


Figura 15.- Temperaturas y humedades relativas dentro de la habitación y a la salida del sistema de climatización

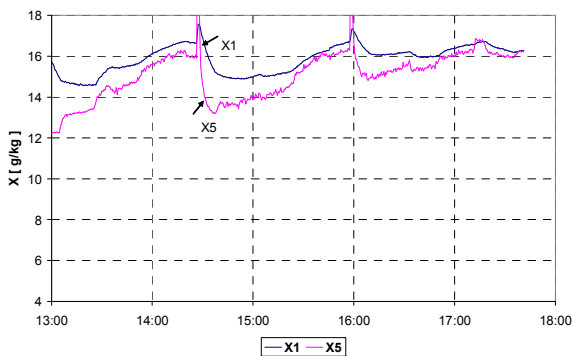


Figura 16.- Humedades absolutas dentro del local y a la salida del sistema de climatización

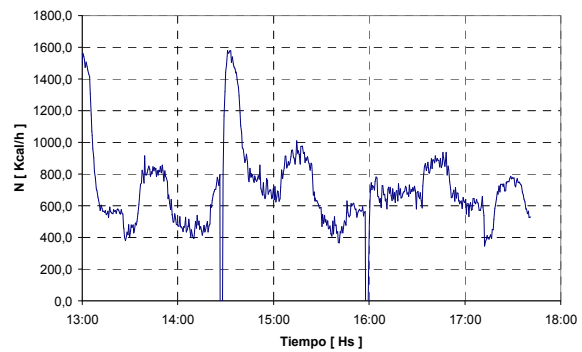


Figura 17.- Potencia desarrollada por el sistema de climatización

En la figura 14, referida a las temperaturas en el circuito de regeneración, se puede observar que después de las 14 hs aproximadamente comenzó a nublarse. Cabe aclarar que antes que se nuble las temperaturas alcanzadas por el aire a la salida del colector eran de 80 °C, lo cual manifiesta un rendimiento adecuado del colector solar para esta época del año.

En la figura 15 se puede apreciar que mediante la regulación del caudal de agua del humidificador, en los instantes en que se aumenta el mismo, la temperatura del aire de ingreso a la habitación disminuye. Mientras que la humedad relativa de salida de la habitación permanece constante debido a la inercia térmica de la habitación.

En la figura 16 se observa un aumento de humedad absoluta a la salida de la habitación debido al aporte de humedad suministrado por las personas presentes en la misma.

En la figura 17 se puede observar que se obtuvieron valores máximos de potencia de 1600 kcal/h para ciertos instantes del ensayo, mientras que el valor promedio durante el ensayo fue de 800 kcal/h.

Las perturbaciones pronunciadas, de las distintas gráficas corresponden al instante en que se realiza el giro del sistema de adsorción-regeneración.

## CONCLUSIONES

De los ensayos realizados se lograron obtener valores de potencias frigoríficas que van de 800 kcal/h a 2400 kcal/h.

El comportamiento del equipo mejora cuando la temperatura del ambiente a climatizar es elevada, como se observa en el ensayo del 26/03/08.

Estos primeros ensayos simultáneos de climatización por adsorción-humidificación y regeneración del elemento adsorbente, permitirán establecer estrategias de control y automatización de la planta piloto mencionada, tarea que se está desarrollando en el transcurso del presente año.

En el diseño de una planta de estas características se debe prestar especial atención a las pérdidas de carga o caídas de presiones que se producen en la circulación del aire. La potencia eléctrica necesaria para impulsar el caudal de aire necesario puede llegar a alcanzar valores elevados, tornando totalmente desaconsejable la operación del sistema.

## REFERENCIAS

- 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. Cartagena de Indias, Colombia.
- Busso A., Spotorno R., Pochettino J., Figueredo G., Benítez F., (2007). Regeneración solar de sílica gel. Avances en energías renovables y medio ambiente. V11 03.115-120.
- Henning H., Erpenbeck T., Hindenburg C., (1997). Sorptiongestutzte Klimatisierung mit Solarenergie, en Workshop. Solar Sorptive cooling, pp. 147-157, Stuttgart, Alemania.
- Spotorno R., Busso A., Pochettino J., Figueredo G., Benítez F., (2007). Resultados experimentales del proceso de adsorción mediante sílica gel en una planta piloto de climatización solar. Avances en energías renovables y medio ambiente. V11 03.99-106.
- Yeung M. y Yuen P. (1992). Performance of a solar-powered air conditioning system in Hong Kong. Solar Energy 48, 5, 309-319.

## ABSTRACT

The experimental operation results for a pilot plant of air conditioning by adsorption-humidification with silica gel's solar regeneration are exposed. For the study of adsorption-humidification process experimental values for weight, temperature and relative dampness on the input and output of the refrigerated room were registered. The tests were carried out with a 700 kg/h weight. The adsorption-humidification processes were performed simultaneously with solar regeneration. Through adsorption-humidification and solar regeneration of silica gel tests it was possible to determine refrigeration power of the plant for different months of the year and different heat charges. It was determined that the machine develops powers in the order of the 2300 kcal/h when environment's temperature is high.

**Keywords:** adsorción, humidificación, solar regeneration.