

CLIMATIZADOR POR ADSORCIÓN HUMIDIFICACIÓN: OPTIMIZACIÓN Y REGENERACIÓN SOLAR

G. Figueredo, A. Busso, R. Spotorno, J. Pochettino, F. Benitez
Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas Apropriadas (GITEA)
Facultad Regional Resistencia - Universidad Tecnológica Nacional
French 414. 3500 Resistencia. Chaco. Argentina.
Tel. 03722 – 432928 Fax. 03722 – 432683 e-mail: gfigueredo@topmail.com.ar

RESUMEN:

Se presentan los resultados obtenidos durante los ensayos experimentales de un climatizador por adsorción humidificación a circuito cerrado. El equipo consta de paneles de adsorción con 20 kg de sílica gel, un intercambiador aire-agua y un panel humidificador relleno de virutas de madera. El proceso de regeneración del sílica gel se efectuó en un regenerador eléctrico a circuito cerrado.

Para la regeneración mediante energía solar se calculó la capacidad de regeneración de un colector solar de placa plana de 2,3 m² de superficie. Los parámetros constructivos para obtener temperaturas de salida por encima de los 85°C fueron determinados mediante un análisis de sensibilidad. Mediante TRNSYS, se realizaron corridas de simulación para analizar el comportamiento del colector en un circuito cerrado sometido a una incorporación de agua de 0.0006 kg/kg cada 10 min. En estas corridas se emplearon datos climáticos reales correspondientes al día solar 29. De acuerdo con los resultados así obtenidos, el colector podría entregar 2900 kJ de energía útil total haciendo factible al menos la evaporación de 1 kg de agua libre.

Mediante ensayos intermitentes con ciclos de 3 hr de duración se determinó que el COP del equipo climatizador se encuentra entre 0.1 y 0.26 con temperatura de salida del aire de 13 y 18°C respectivamente.

Palabras clave: climatización solar, adsorción, humidificación, aire acondicionado

INTRODUCCIÓN

Durante 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. El problema radica en la conjunción de temperaturas y humedades elevadas. En este marco se inició un proyecto donde se pretende desarrollar un equipo que utilice como fuente principal de energía a la solar y que aproveche la correlación que existe entre demanda de refrigeración y oferta de energía solar. Se decidió utilizar un ciclo cerrado de adsorción humidificación sobre la base de un estudio técnico y económico de las diferentes opciones disponibles (Figueredo et al, 1998).

El estudio de los procesos de adsorción y humidificación se efectuó en un equipo a circuito abierto, lográndose la optimización de dichos procesos y también su modelización y simulación (Figueredo et al, 2001). Actualmente se trabaja en la integración de los diferentes procesos en un circuito cerrado y en la etapa de regeneración solar del adsorbente.

Un análisis de las diferentes tecnologías, instalaciones experimentales y recomendaciones para futuros trabajos en este campo fue desarrollada por Treffinger P. et al (1997).

CIRCUITO CERRADO DE REFRIGERACIÓN

El equipo funciona en circuito cerrado. Esta compuesto por: una cámara de aproximadamente 2 m³ construida con placas de poliestireno expandido de 4 cm de espesor; 3 paneles en serie de sílica gel; un ventilador centrífugo; un intercambiador de calor agua-aire y un humidificador de virutas de madera (fig.1). La carga térmica se simula con un calefactor eléctrico de 2000 W de capacidad máxima. En la fig. 2 se observan el humidificador y absorbedor.

El aire evoluciona en el equipo a través de los siguientes procesos:

- Secado en los paneles de adsorción.
- Aspiración e impulsión mediante el ventilador centrífugo
- Enfriamiento en un intercambiador de calor agua-aire del tipo tubos y aletas.
- Humidificación en el panel humidificador.
- Absorción de la carga térmica en la cámara aislada.

La temperatura en la cámara aislada aumenta al incrementarse la carga térmica. La temperatura es mínima cuando la carga térmica entregada por el calefactor es nula. En este caso solo recibe la energía desde el exterior por la diferencia de temperaturas existente entre ambos sistemas. El valor mínimo depende de la humedad mínima que el adsorbedor es capaz de producirle al aire y de la temperatura del intercambiador de calor.



Figura 1: Fotografía del climatizador

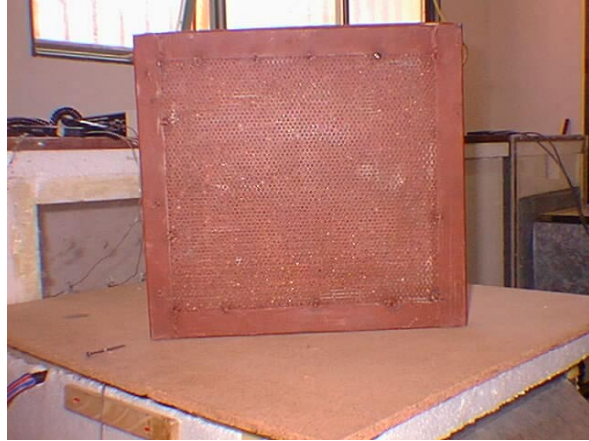
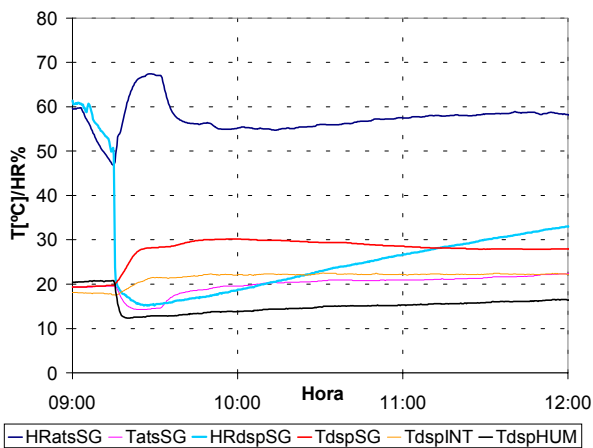


Figura 2: fotografía del panel de adsorción

Con el prototipo a circuito cerrado se efectuaron ensayos para optimizar los diferentes procesos a los que se somete el aire. En la Figura 3 se observa el desarrollo general del proceso de refrigeración, con todas las temperaturas y las humedades representadas en función del tiempo. En la Tabla 1 se describen las nomenclaturas de las figuras siguientes. El ciclo de adsorción se extiende por aproximadamente 3 hr. y la carga térmica con la que se efectuó este ensayo fue de 400 W. Durante todo el proceso se adsorbió un total de 1830 gr de agua. El intercambiador aire agua trabajó con agua de red a 20°C y un caudal de 0.03 kg/s de agua. Posteriormente se utilizará agua proveniente del subsuelo.



TatsSG	Temperatura de salida de la cámara aislada
HRatsSG	Hum. relativa a la salida de la cámara aislada
XatsSG	Hum. absoluta a la salida de la cámara aislada
TdspCar1	Temp. de salida del primer panel de adsorción
TdspSG	Temp. de salida del proceso de adsorción
HdspSG	Hum. relativa de salida del proceso de adsorción
XdspSG	Hum. absoluta a la salida proceso de adsorción
TdspINT	Temp. de salida del intercambiador de calor
TdspHUM	Temp. de salida del panel humidificador

Figura 3. Desarrollo general del ensayo

Tabla 1. Referencia de las variables

En las figura 4 se pueden observar como se desarrolla el proceso de adsorción en particular, con la temperatura y humedad absoluta a la entrada y salida del panel de adsorción. Se observa que la diferencia de humedad absoluta es inferior a 4 gr/kg.

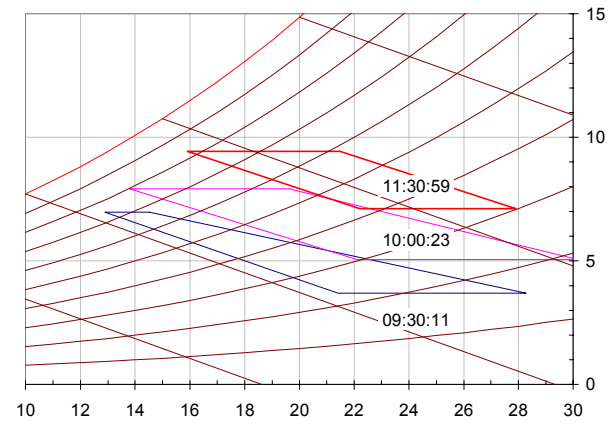
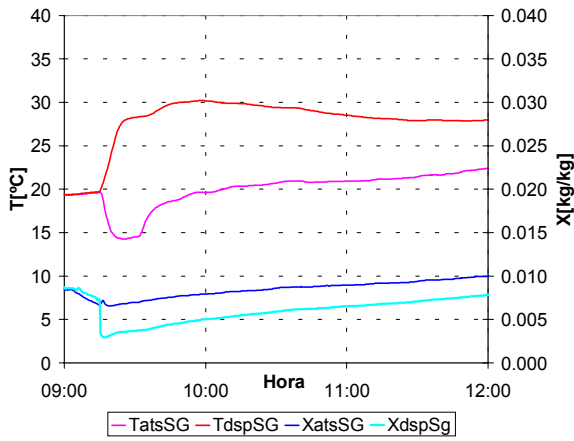


Figura 4. Proceso de adsorción, $x-T$

Figura 5. Diagrama psicrométrico

En la *Figura 5* están representadas las transformaciones en el diagrama psicrométrico. Se destaca que tanto la adsorción como la humidificación son aproximadamente isoentálpicas. Se observa que si bien el equipo luego de 2 hr sigue tomando la carga térmica el ciclo se desplaza hacia zonas de mayores humedades absolutas.

CIRCUITO CERRADO DE REGENERACIÓN

El proceso de regeneración del sílica gel se efectúa en una cámara exterior al climatizador. Al aire de regeneración que circula en circuito cerrado, se lo calienta mediante disipación de energía eléctrica en una resistencia. Para eliminar el agua extraída del adsorbente se renueva parcialmente el aire en circulación.

En la eliminación 2100 de agua, adsorbidas por 20 kg de sílica gel, se hizo circular 24×10^{-3} kg/s de aire a temperatura de comprendidas entre 80°C y 90°C . El caudal másico de renovación fue de $3,7 \times 10^{-3}$ kg/s. La energía eléctrica consumida alcanzó el valor de 5,41 kW.h.

En la *figura 6* de observan las temperaturas durante el proceso de regeneración. El sílica gel se encuentra distribuido en 3 paneles que se ubican en serie en el regenerador; T1 corresponde a la medida antes del primer panel, T2 entre el primer y segundo panel, T3 entre el segundo y el tercero, mientras que T4 a la salida del tercero. En la *figura 7* se aprecia una fotografía del regenerador y la disposición de las termocuplas, control de temperatura, medidor de energía y anemómetro de hilo caliente.

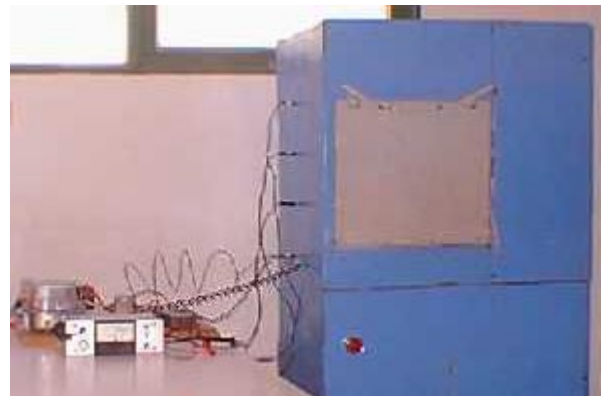
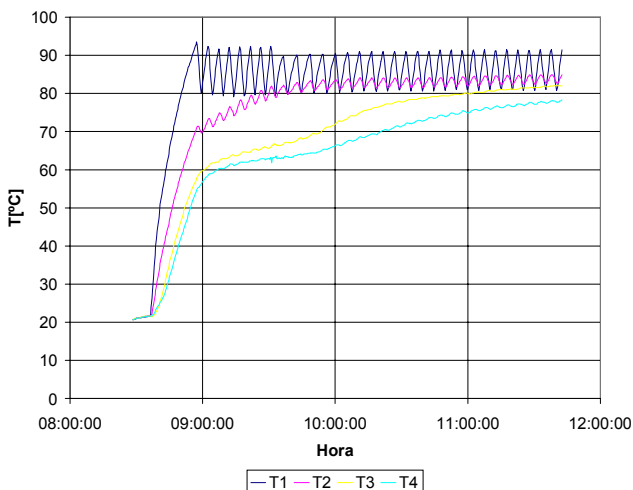


Figura 6. Temperaturas durante la regeneración

Figura 7. Equipo regenerador

MODULO DE REGENERACIÓN POR ENERGÍA SOLAR

Para encarar la regeneración de la SG utilizando energía solar se evaluó la posibilidad de emplear un colector solar de aire existente cuyas características y dimensiones son:

largo = 2.29 m

ancho = 1.02 m

distancia entre placa y vidrio = 0.115 m.

Alto del canal de aire = variable

Cubierta = vidrio común

Placa = chapa de hierro pintada de negro mate

Aislamiento posterior = 11 cm de poliestireno expandido

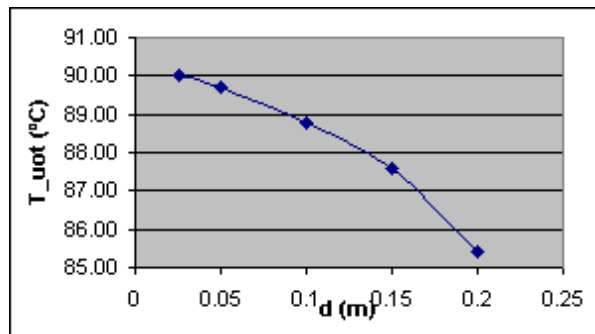
A fin de determinar los valores óptimos para alto del canal, la velocidad y la pendiente, tal que permitan lograr temperaturas de salida superiores a los 85°C, se realizó un estudio de sensibilidad variando los parámetros antes mencionados. La Figura 8. presenta los resultados obtenidos.

Día = 29

Influencia del alto (d) del canal de aire

beta = 5° ; v = 1 m/s

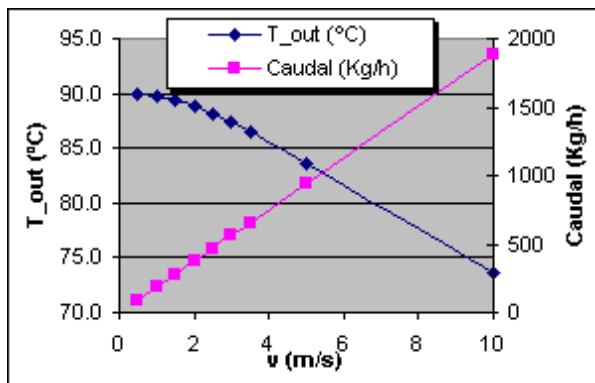
d (m)	T_out (°C)
0.2	85.40
0.15	87.60
0.1	88.80
0.05	89.70
0.025	90.00



Influencia de la velocidad de aire

beta = 5° ; d = 0.05 m

v (m/s)	Caudal (Kg/h)	T_out (°C)
0.5	94	90.0
1	188	89.7
1.5	282	89.4
2	376	88.8
2.5	470	88.2
3	564	87.4
3.5	658	86.5
5	940	83.5
10	1880	73.6



Influencia de la inclinación del panel

d = 0.05 m ; v = 1 m/s (89.7 Kg/h)

β (°)	T_out (°C)
1	90.20
2	90.10
3	90.00
4	89.90
5	89.80
10	88.80
15	87.40
20	85.30

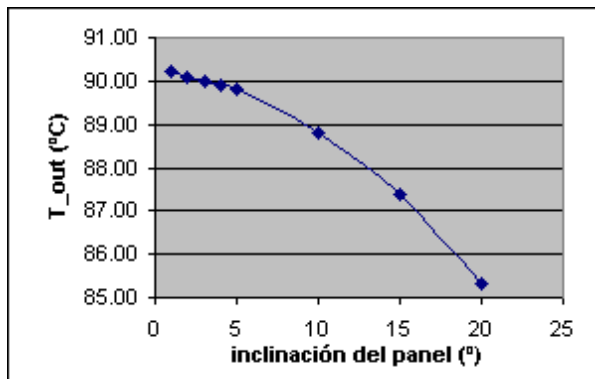


Figura 8. Resultados para el colector.

De los resultados obtenidos se decidió trabajar con d = 0.05 m , β = 5° y una velocidad de 1 m/s. A fin de obtener temperaturas > 85 °C.

En estos resultados aún no se tuvo en cuenta el efecto de la humidificación que tiene lugar durante la regeneración.

Para estudiar este fenómeno, se modelizó, mediante TRNSYS, al colector trabajando en un circuito cerrado al cuál se le incorpora en forma constante una cantidad de humedad por unidad de tiempo. La tasa de incorporación de humedad se determinó a partir de ensayos de regeneración realizados con cartuchos construidos para tal fin. Para la simulación se empleó

el mismo caudal de aire que el medido en el equipo de regeneración. En el módulo que simula al colector de aire se utilizaron parámetros térmicos y ópticos extraídos del Duffie y Beckman (1980). La Figura 9 muestra el esquema de módulos que componen el circuito de simulación.

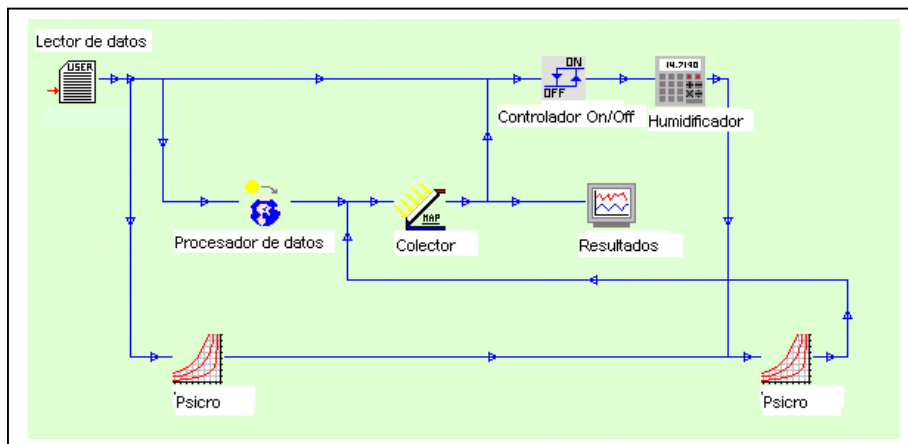


Figura 9. Esquema de módulos del circuito de simulación

El controlador On / Off activa / corta el proceso de humidificación cuando la diferencia de temperatura entre la salida del colector y la ambiente es de 20 °C. Para la simulación se utilizó un archivo con datos de temperatura y humedad relativa ambiente, velocidad del aire y radiación solar, para el día solar 29 y tomados a una frecuencia de 10 min..

En la Figura 10 se observa la evolución de las diferentes variables simuladas superpuestas a valores medidos de temperatura y humedad ambiente.

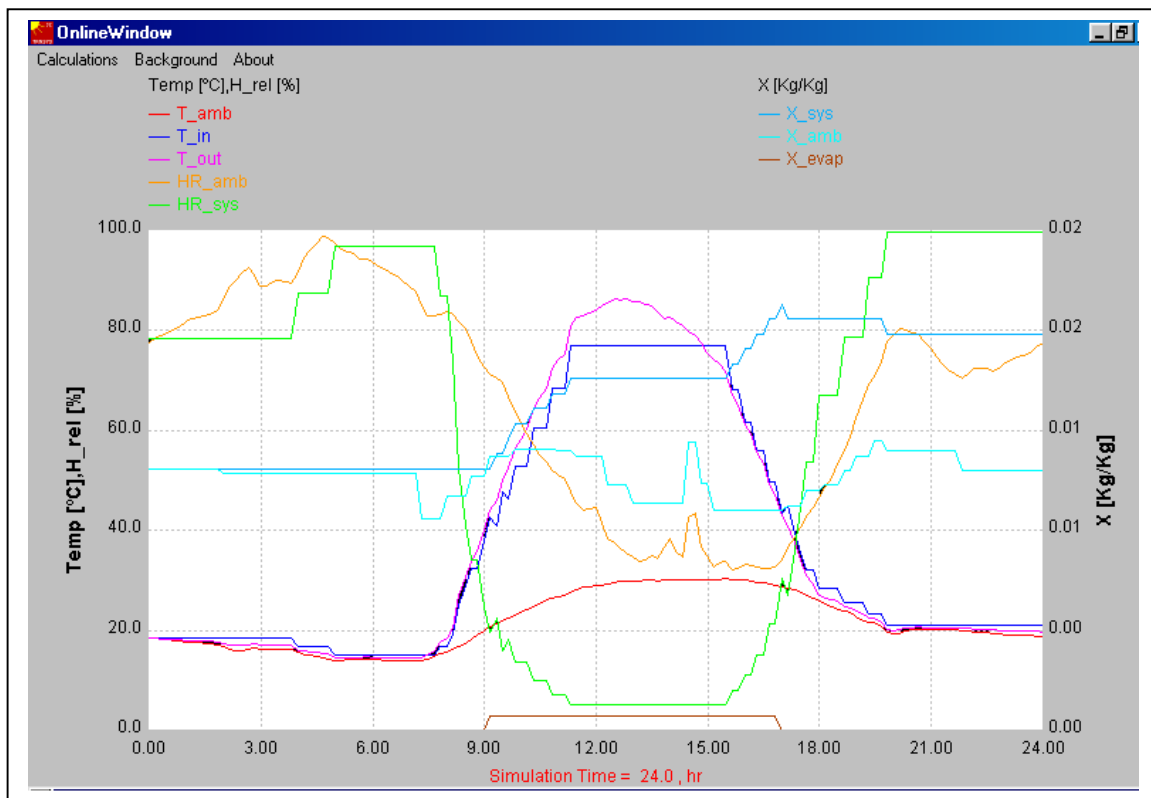


Figura 10. Evolución de los parámetros simulados y experimentales.

La curva verde representa la humedad relativa del aire de proceso. Se observa que al final de la simulación, a pesar de que la temperatura del aire (curvas azul o violeta) es mayor que al comienzo de la simulación, la humedad relativa llega al punto de saturación debido a la cantidad de agua incorporada.

Además, de acuerdo a los resultados de la simulación, la temperatura máxima que se podría alcanzar con una incorporación constante de humedad de 0.0006 Kg/Kg cada 10 min. es de unos 86 °C. y la energía útil total entregada por el colector de aproximadamente 2900 kJ. Asumiendo que el calor de vaporización del agua a 20°C es de 2454 kJ/kg, esta energía en principio sería suficiente para evaporar 1 kg de agua en estado líquido.

Es de destacar, que en la presente simulación no se han tenido en cuenta pérdidas térmicas de los conductos ni tampoco el hecho que la energía necesaria para la regeneración es mayor que el calor de vaporización.

ENFRIAMIENTO UTILIZANDO AGUA DEL SUBSUELO

La temperatura del suelo depende tanto de la radiación solar incidente sobre el terreno así como del intercambio de energía del mismo con la atmósfera. Este último proceso es bastante complicado y depende de varios parámetros tales como temperatura del aire, viento, nieve, estado del subsuelo (congelado, saturado, etc.), entre otros.

En general, el cambio anual en la temperatura de la superficie del suelo solo afecta a la temperatura del subsuelo hasta una profundidad de entre 10 a 15 m. A profundidades mayores ya es el gradiente geotérmico local quien predomina, por tanto la temperatura de las fuentes de aguas subterráneas a profundidades mayores a los 15m permanece constante e igual a la temperatura media anual en la superficie (Eklöf et al, 1996).

En nuestra zona geográfica (Chaco-Corrientes), la temperatura media anual es de alrededor de 20°C. Por esta razón, se puede utilizar agua de pozo y hacerla circular a través del intercambiador logrando reducir aún más la temperatura del aire de proceso a la salida de la cama de SG. Actualmente se está utilizando agua de la red domiciliaria en el intercambiador, el enfriamiento representa una de las limitantes que no permiten lograr temperaturas más bajas a la salida del humidificador. Mediante la utilización de agua de pozo en el enfriador se podrían obtener temperaturas similares en el verano sin introducir gran consumo de energía adicional. La energía necesaria para la extracción de la cantidad de agua necesaria para un ciclo de 3 horas asciende a solo 0.05 kW.h.

CONCLUSIONES:

Se construyó ensayó y optimizó un equipo climatizador por adsorción humidificación en circuito cerrado. Durante el proceso de regeneración de 20 kg de sílica gel se utilizan 5,4 kW.h de energía eléctrica para calentar el aire hasta 90°C y regenerar aproximadamente 2100 gr de agua. Durante el proceso de adsorción el equipo puede tomar una carga térmica máxima de 2,4 kW.h admitiendo aire a 36°C y entregándolo a 18°C obteniéndose un COP de 0,26. Con una carga térmica más reducida, de 0.91 Kwh., el equipo admite aire a 21°C y lo devuelve a 13°C obteniéndose un COP 0,1. Para un acondicionador de aire, trabajando en modo ventilación, constituido por ruedas desecantes e intercambiadores de calor regenerativos se obtuvo un COP 0,6 con una temperatura de regeneración de 85°C (Pons y Kodama, 1999). En un prototipo trabajando en modo recirculación con un panel compacto de sílica gel se obtuvo un COP 0.3 (Dupont et al, 1994).

Para el caso en que el calentamiento del aire se efectúe mediante energía solar se tiene que tener en cuenta que el COP final del equipo será el producto del COP del climatizador por el rendimiento de los colectores solares.

Reconocimiento: se agradece a M. Estrella y a G. Bilhere por la colaboración.

REFERENCIAS

- Duffie J., Beckman W. (1980). Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley and Son.
- Dupont M., Celestine B., Beghin B., (1994). Desiccant solar air conditioning in tropical climates: II-Field testing in Guadeloupe. *Sola Energy*, Vol. 52, No 6, pp. 519-524.
- Eklöf C., Gehlín S., (1996). TED, A Mobile Equipment for Thermal Response Test. Lulea University of Technology.
- Figueredo G. R., Busso A., Pochettino J.J., Benitez F., Aeberhard A., (1998). Climatización por ciclo abierto por desecado y humidificación.. *Avances en energías renovables y medio ambiente*. V2 02.77-80.
- Figueredo G. R., Busso A., Pochettino J.J., Benitez F., Aeberhard A., (2001). Modelización y ensayo experimental de un climatizador por adsorción humidificación. *Avances en energías renovables y medio ambiente*. V5 02.77-80.
- Pons M. and Kodama A. (1999) Second law analysis of the open cycle for solid desiccant air conditioners, *Proc. Int. Sorption Heat Pump Conf.*, pp. 389-394, Munich, Alemania.
- Treffinger P., Busweiler U., Koenigsdorff R., Lavemann E., Lamp P., (1997) Status and Perspective of Solar Sorptive Cooling. *Forschungsverbund Sonnenenergie*, en Workshop "Solar Sorptive cooling", pp. 8-13, Stuttgart, Alemania.

ABSTRACT

Experimental results obtained with an adsorption-humidification cooling cycle are presented. The system comprises adsorption panels with a total of 20 kg of silica gel, an air-to-water heat exchanger and a re-humidification panel made of wooden chips. The process of regeneration of the silica gel was made with an electric powered regenerator in a closed circuit. For the regeneration by solar energy, the regeneration capacity of a flat plate solar air collector of 2,3 m² of collecting surface was evaluated. Constructive parameters leading to operation temperatures higher than 85°C were determined by a sensitivity analysis. The behavior of the collector in a closed circuit under a constant incorporation of water of 0.0006 kg/kg every 10 min. was done performing simulation runs using TRNSYS. Real climatic data for solar day 29 was used for the simulations. According to the results, a total useful energy of 2900 kJ could be delivered by the collector making feasible at least the evaporation of 1 kg of free water.

By means of intermittent cycles of 3 hours in duration the COP of the system was determined to be between 0.1 and 0.26 for exit temperatures for the process air of 13 and 18°C respectively.

Keywords: solar air conditioning, adsorption, -humidification.