

## **MODELIZACIÓN Y ENSAYO EXPERIMENTAL DE UN CLIMATIZADOR POR ADSORCIÓN HUMIDIFICACIÓN**

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 presenta la simulación y su comparación con los resultados experimentales del proceso de optimización de un climatizador por adsorción – humidificación orientado a su operación mediante regeneración solar del adsorbente. Para simular el proceso de adsorción se empleó un modelo de parámetro amortiguado no equilibrado y para el proceso de humidificación se determinó experimentalmente la pendiente de la transformación. Mediante la optimización de los procesos se alcanzaron diferencias de 10 °C entre la entrada y salida del equipo, manteniéndose 8°C luego de 90 min. de operación. Se alcanzó una potencia de 850 W de refrigeración para un caudal de aire de 0.09 kg.sec<sup>-1</sup>.

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

### **INTRODUCCIÓN**

Sobre la base de un análisis de las ventajas técnicas económicas y a una revisión bibliográfica (Treffinger P. et al 1997) se decidió desarrollar un climatizador solar por adsorción humidificación con el objetivo de aplicarlo en edificios de zonas cálidas y húmedas. (Figueredo et al, 1998)

Para efectuar la optimización del diseño se construyó un prototipo de laboratorio de aproximadamente 1000 W de potencia frigorífica donde se experimentaron los procesos de adsorción y humidificación. Se detectaron numerosos problemas de índole constructiva que apartaban el desarrollo del ciclo real de las condiciones de diseño. (Sequeira et al, 2000).

A fin de estimar el comportamiento del equipo definitivo se desarrolló un procedimiento de simulación computarizado que se ajustó mediante ensayos experimentales. A la par se fueron mejorando los diferentes procesos, tratando de lograr que el equipo funcione apropiadamente.

### **SIMULACIÓN DEL PROCESO DE ADSORCIÓN**

La simulación del ciclo experimental se lleva a cabo básicamente determinando los diferentes estados del mismo mediante fórmulas y propiedades del aire húmedo. Para las etapas de adsorción y humidificación se utilizaron modelos matemáticos con parámetros ajustados para lograr una reproducción de los datos experimentales.

Para analizar el proceso de adsorción se emplea un punto de vista macroscópico, aplicando un modelo de parámetro amortiguado no equilibrado. Otras dos suposiciones realizadas son: a) la capacidad calorífica del sorbato en estado adsorbido es igual a la capacidad calorífica de la fase líquida; b) el calor específico y la densidad del adsorbente seco son constantes. La resistencia a la transferencia de masa en la fase sólida del adsorbente se toma en cuenta introduciendo una fuerza impulsora de tipo lineal, no considerándose la resistencia a la transferencia de masa en los espacios entre las partículas. (Zhang, y Wang 1997)

De esta manera, la velocidad de adsorción puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$\frac{dw}{dt} = k_m (w_{eq} - w) \quad [1]$$

$w_{eq}$  es el contenido de agua de equilibrio a una temperatura y presión dadas (T, P) y está determinado por la isoterma de adsorción asociada;  $k_m$  es el coeficiente global de transferencia de masa expresado por;

$$k_m = \frac{15D_s}{R_p^2} \quad [2]$$

donde la difusividad superficial  $D_s$  viene dada por:

$$D_s = D_{s0} e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad [3]$$

Las ec. [2] y [3] pueden ser combinadas y simplificadas obteniendo:

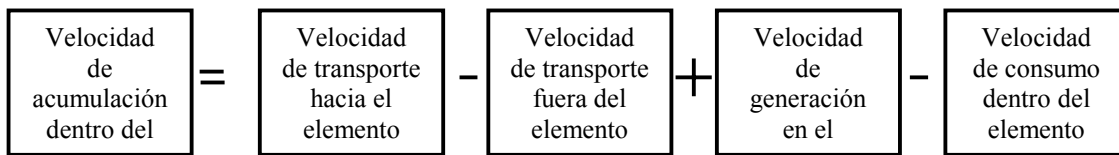
$$k_m = k_1 e^{\left(\frac{-k_2}{T}\right)} \quad [4]$$

Cuando T y P se mantienen constantes a lo largo del proceso de adsorción, la solución a la ec. [1] se escribe como:

$$w = w_{eq} [1 - e^{(-k_m t)}] \quad [5]$$

ecuación que expresa la dependencia temporal del contenido de agua del adsorbente.

Cama de adsorción: Para el caso práctico de una cama de adsorción, esta se divide en n elementos de volumen de espesor  $\Delta x$  cada uno. Aplicando un punto de vista macroscópico, el balance de masa para un volumen elemental debido a la corriente de aire húmedo que lo atraviesa lleva a lo siguiente:



Asumiendo que los dos últimos términos son nulos se puede expresar matemáticamente:

$$\rho V \Big|_{t+\Delta t} - \rho V \Big|_t = (\rho \bar{v} S \Big|_i - \rho \bar{v} S \Big|_o) \Delta t \quad [6]$$

donde los subíndices  $i, o$ , indican sentido entrante y saliente respectivamente;

$\rho V$  = concentración másica dentro del elemento de volumen elemental;  $S$  = área transversal del volumen elemental atravesada por el fluido y  $\bar{v}$  = velocidad promedio del fluido.

Operando sobre [6] se obtiene:

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = -S \bar{v} \Delta \rho \quad [7]$$

Aquí, el término de la izquierda es igual a la variación temporal de la concentración de agua en el adsorbente expresada por:

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho_{SG} V \frac{dw}{dt} \quad [8]$$

A su vez, el término de la derecha en [7] puede expresarse como la diferencia en contenido de vapor entre la corriente de fluido entrante y saliente:

$$-S \bar{v} \Delta \rho = -\rho_{aire} \bar{v} S \Delta X \quad [9]$$

Reemplazando [8] y [9] en [7]:

$$\rho_{SG} V \frac{dw}{dt} = \rho_{aire} \bar{v} S (X_i - X_o) \quad [10]$$

Derivando [5] y reemplazando se obtiene:

$$X_o = X_i - \frac{\rho_{SG} V k_m (T)}{\rho_{aire} \bar{v} S} w_{eq} (T) e^{-k_m (T) t} \quad [11]$$

Ecuación que expresa el contenido de humedad del aire de proceso saliente en función de la temperatura, T, y del tiempo, t.

Dado que el cartucho de Silica Gel se dividió en n elementos de volumen V, el estado del aire de proceso a la salida de un elemento de volumen dado representa el estado del aire entrante al elemento de volumen inmediato.

La expresión general para la cama de adsorción compuesta por n elementos de volumen es:

$$X_{z+1}(t, T) = X_z(t, T) - Kk_m(T)w_{eq}(T)e^{-k_m(T)t} \quad [12]$$

donde  $K = \frac{\rho_{SG}V}{\rho_{aire}\bar{v}S}$  y  $w_{eq}(T)$  = isoterma de adsorción

Las condiciones iniciales para el ciclo son:

$$X_{io} = X_{amb} \quad ; \quad T_{io} = T_{amb} \quad [13]$$

Desarrollo de la simulación: Para la determinación de las variables de estado a la salida del cartucho de sílica gel, se parte de las condiciones ambientales (estado 1) y se aplica la ec. [12] a cada elemento de volumen hasta obtener el estado del aire de proceso a la salida del cartucho de sílica gel (estado 2). Conocida la humedad absoluta y asumiendo que el proceso es isoentálpico, las demás variables se determinan aplicando las relaciones válidas para aire húmedo. El ajuste de los valores teóricos y experimentales se logra variando las constantes  $k_1$  y  $k_2$  (ec.[4]). La fig.1 muestra los resultados obtenidos.

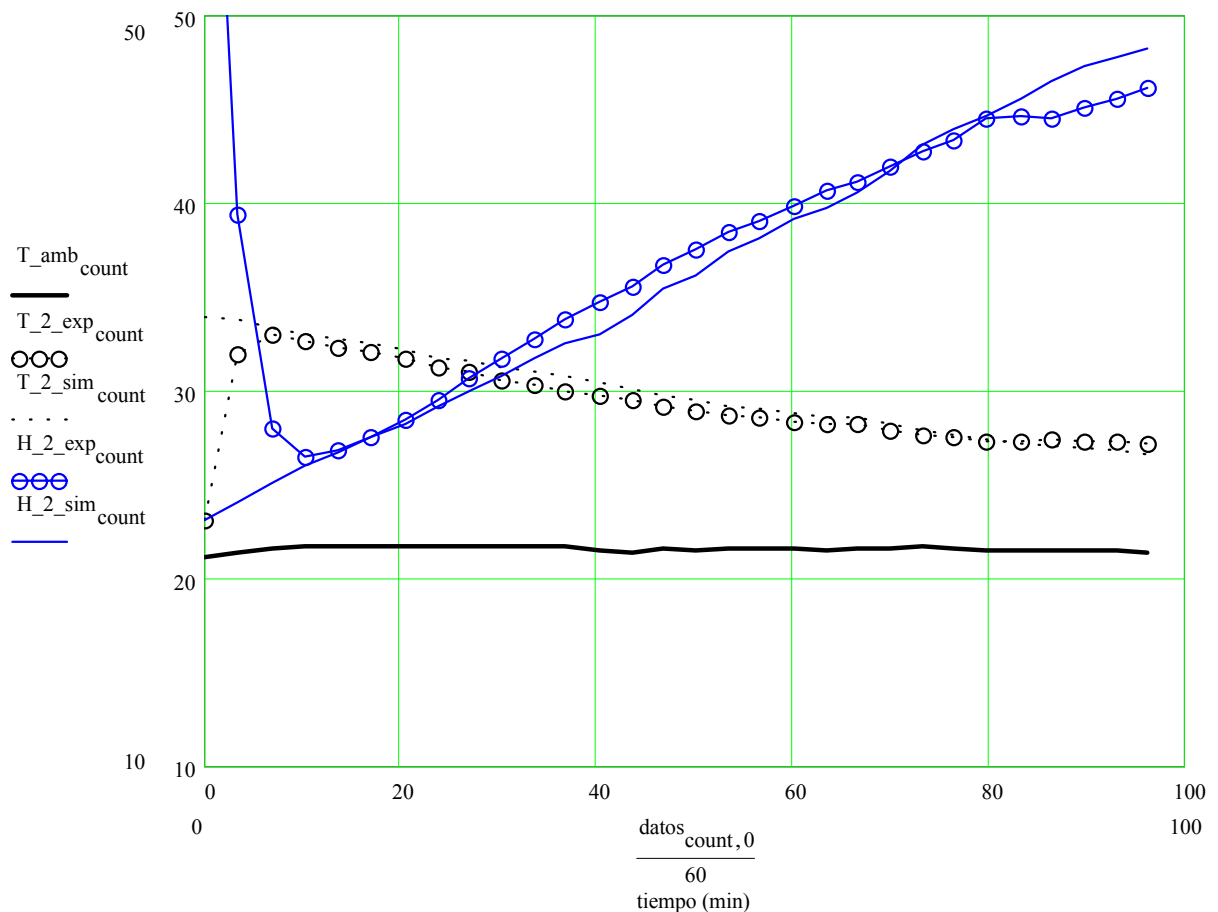


Fig.1.- Variación de HR y T teóricas y experimentales en función del tiempo

En la Fig. 1 se representa la variación en función del tiempo de la temperatura ambiente medida experimentalmente ( $T_{amb}$ ), la temperatura luego del proceso de adsorción medida ( $T_{2\_exp}$ ) y simulada ( $T_{2\_sim}$ ) junto con la humedad relativa luego del proceso de adsorción medida ( $H_{2\_exp}$ ) y simulada ( $H_{2\_sim}$ ). La humedad relativa ambiente permaneció en el 85%.

Se debe recalcar que, por la forma en que se dedujo el modelo, este no predice el estado transitorio inicial del sistema, lo que queda evidenciado por la desviación del modelo durante los primeros minutos de operación. El módulo de adsorción para este caso era un panel de 390 mm de alto, 370mm de ancho y 50 mm de espesor, relleno con sílica gel de 4 a 8 mm de granulometría. El aire circulaba perpendicularmente a la cara mayor a  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## PROCESO DE HUMIDIFICACIÓN

El módulo de humidificación está constituido por un panel de 390 mm de alto, 370mm de ancho y 50 mm de espesor, relleno con virutas de madera blanda de aprox. 50 mm de largo, 5mm de ancho y 1mm de espesor. El agua ingresa a la parte superior del panel a través de un tubo con paredes perforadas, luego cae por gravedad a través de una capa de goma espuma de 5mm de espesor que mejora la distribución de agua en el panel y por ultimo atraviesa el panel mojando la superficie de las virutas de madera.

La pendiente teórica del proceso de humidificación en la zona de trabajo del diagrama psicrométrico es de  $-0,397 \text{ gr/kg.K}^{-1}$ . Cometiendo un error menor al 2% puede suponerse con una pendiente teórica de  $-0,402 \text{ gr/kg.K}^{-1}$  igual a la pendiente de las isoentálpicas en los diagramas. No obstante experimentalmente se verificó un gran apartamiento de dicha transformación teórica (Sequeira et al 2000) obteniéndose pendientes de  $-3,3 \text{ gr/kg.K}^{-1}$  en el primer humidificador ensayado.

Luego de un proceso de optimización donde se aumentó la aislación a 4 cm de poli estireno expandido, se redujeron los puentes térmicos con el resto del equipo y se mejoró el control del caudal de agua reduciendo a un mínimo el exceso de agua en el humidificador se logró reducir la pendiente de la transformación a  $-0.56 \text{ gr/kg.K}^{-1}$ . Todavía se observa una gran discrepancia entre los valores teóricos y los experimentales.

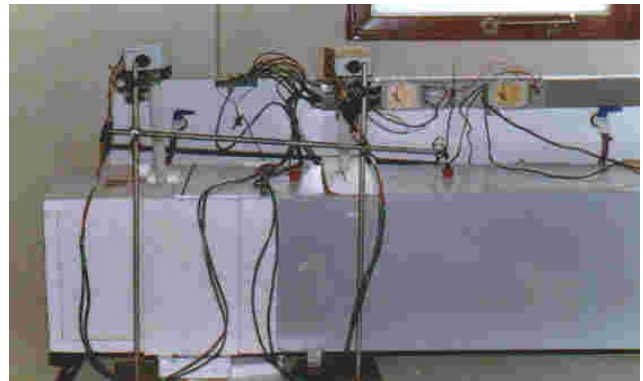
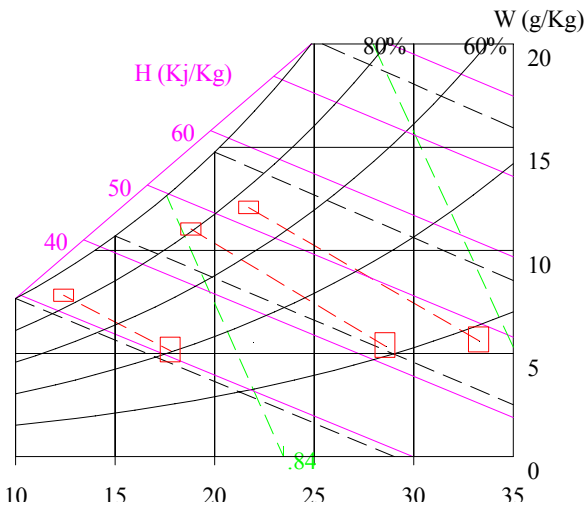


Fig. 2 Resultados experimentales del proceso de humidificación y fotografía del humidificador y termo higrometros.

En un gran numero de ensayos para diferentes estados del aire a la entrada se observó que la pendiente de la transformación y la humedad relativa a la salida se mantienen constante, variando la humedad absoluta y la temperatura en función del estado del aire a la entrada. En base a esto se decidió simular el comportamiento del panel humidificador a través de una recta que pase por el punto de entrada y que termine en una humedad relativa del 95%. La pendiente de la recta se determinó experimentalmente Fig. 2 obteniéndose  $-0.56 \text{ gr/kg.K}^{-1}$ .

## MODELIZACIÓN DEL CICLO

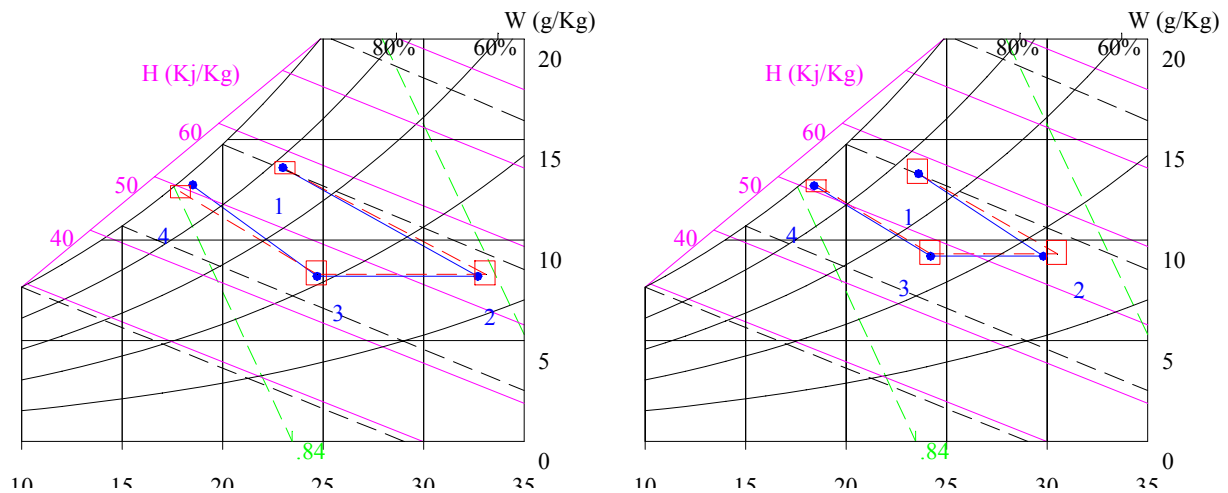


Fig.3.- Comparación de dos estados del ciclo. Los puntos y líneas llenas (azules) representan los puntos teóricos y los rectángulos y líneas de trazos (rojos) los puntos experimentales.

Una vez logrado el ajuste adecuado del proceso de adsorción y humidificación, se introdujo el modelo dentro de la lógica de cálculo del ciclo completo. A partir del estado ambiente (1) se determinan las variables de estado para el aire seco (estado 2), se calculan las nuevas variables a la salida del intercambiador de calor (estado 3) y luego se aplica una relación empírica que representa el proceso de humidificación (estado 4). Estos cálculos se repiten para cada registro de instante de tiempo para el cual se tiene un registro experimental.

La fig.3. muestra los resultados obtenidos para el ciclo completo comparando los datos predichos con los datos experimentales correspondientes para un tiempo  $t$  dado y la fig.4 presenta el diagrama de flujo de la lógica de cálculo, la que se implemento mediante el utilitario MathCad7.

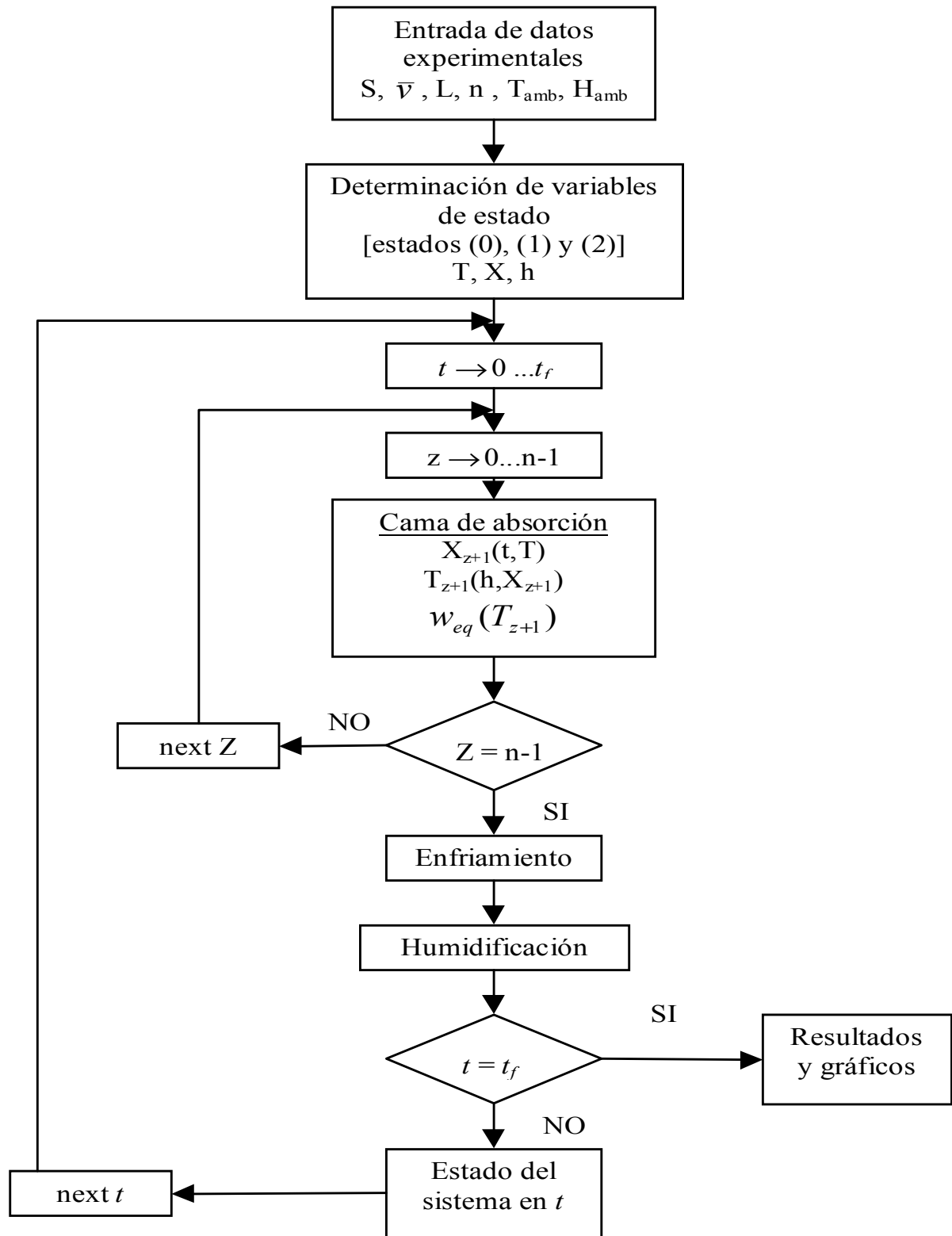


Fig.4.- Diagrama de flujo del programa de cálculo

## MEDICIONES:

Las mediciones se efectuaron mediante un sistema de adquisición de datos computarizado basado en los módulos NUDAM. Como sensores se utilizaron 3 termo higrómetros ROTRONIC con una precisión del 3% para la humedad relativa y de 0.5°C para temperatura uno a la entrada, otro luego del enfriador y el último a la salida del equipo. La velocidad del flujo de aire se midió con un anemómetro de hilo caliente AIRFLOW TA2 con una apreciación de 0,1 m/s en el rango de 0 a 2 m/s. También se midió la caída de presión en la cama de sílica gel con un manómetro de tubo inclinado, obteniéndose 8 mm de columna de H<sub>2</sub>O para 0,5 m.s<sup>-1</sup> de corriente de aire. También se monitorearon las variaciones de peso del módulo de adsorción y los caudales de agua en el humidificador.

## CONCLUSIONES:

Se desarrolló un procedimiento de cálculo computarizado que permite simular el comportamiento del módulo de adsorción y humidificación, dichos procedimientos se integraron con el proceso de enfriamiento permitiendo la simulación del comportamiento del prototipo de laboratorio a lo largo del tiempo. Mediante el ajuste de los parámetros se logró reproducir fielmente el desarrollo de las experiencias. Este procedimiento se utilizará para la optimización del diseño de un equipo piloto. Resta aun profundizar el análisis del proceso de humidificación y regeneración, esto último permitiría determinar el COP del equipo. Actualmente el prototipo de laboratorio opera por ejemplo según las transformaciones de la fig. N° 5 admitiendo aire a 24°C y 50%, el que luego del secado en el módulo de adsorción queda a 37°C y 15%, posteriormente se enfría en un intercambiador hasta los 24°C y posteriormente se humidifica hasta los 13°C y 95%. La humedad absoluta del aire a la salida es aproximadamente igual a la de la entrada. La transformación que abarca un área menor corresponde a 90 min. después de iniciado el proceso.

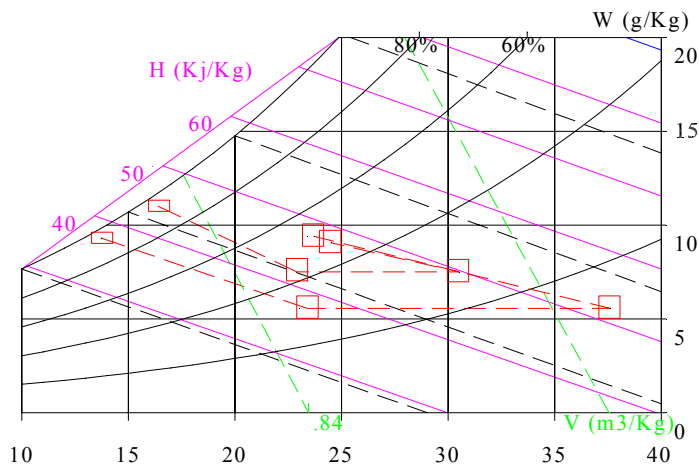


Fig. 5 últimos resultados experimentales

**Reconocimiento:** se agradece al GIDER de la Facultad de Ingeniería de la UNNE y a G. Bilhere por la colaboración.

## REFERENCIAS

- 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.
- Li Zhi Zhang, Ling Wang (1997), Performance Estimation of an Adsorption Cooling System for Automobile Waste Heat Recovery, Applied Thermal Engineering, Vol. 17, No. 12, pp. 1127-1139.
- Sequeira A., Pochettino J.J., Spotornno R. De Bortoli M. Screpnick C. Figueredo G. Benitez F., (2000). Climatizador por adsorción - humidificación: Construcción y primeros resultados experimentales.. Avances en energías renovables y medio ambiente. V4 03.49-53.
- 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

Simulation and experimental results for the optimization of an adsorption humidification cooling cycle are presented. Regeneration of the adsorbent is intended to be solar driven. To simulate the adsorption process a non-equilibrium lumped parameter modeling approach is employed. For the humidification process the slope of the transformation was determined from experimental data. After optimization temperature differences of 10 °C were reached between the entrance and exit of the process air. The difference remained in 8°C after 90 min continuous operation. A cooling power of 850 W was attained for an air flow of 0.09 kg.sec<sup>-1</sup>.

**Keywords:** solar air conditioning, adsorption, -humidification.