

# CARACTERIZACIÓN DE PANELES RELLENOS DE PAJA PARA ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO<sup>1</sup>

Marcelo Gea y Graciela Lesino<sup>2</sup>

INENCO  
Universidad Nacional de Salta  
Calle Buenos Aires 177 - CP4400 - Salta  
Tel - Fax: 0387-4255489 E-mail: geam@unsa.edu.ar

## RESUMEN

El enfriamiento evaporativo es de uso común en climas cálidos y secos para conseguir el acondicionamiento de casas de cría de animales o vegetales u otro tipo de edificios con un muy bajo consumo de energía. La paja es un elemento apropiado como relleno de paneles para este fin debido a que con ella se consiguen grandes superficies por unidad de volumen para el intercambio de calor y masa y se encuentra disponible a muy bajo costo. Se realizó un trabajo para la determinación de sus características con prototipos para enfriamiento evaporativo. Se presentan el modelo físico, los resultados de la caracterización y un programa de cálculo que puede ser acoplado a simuladores de edificios.

## PALABRAS CLAVE:

Enfriamiento evaporativo. Relleno de paja. Simulación de edificios.

## INTRODUCCIÓN

Cuando el clima es relativamente seco y caluroso, el enfriamiento evaporativo es la vía natural de acondicionamiento de ambientes para el desarrollo óptimo de plantas o animales que necesitan humedad y temperaturas más bajas. Su funcionamiento se basa en el aprovechamiento del calor latente del agua que se evapora al tomar contacto con el aire caliente. De esta manera se puede conseguir el refrescamiento de casas crías de vegetales o animales con un consumo de energía muy bajo.

Cuando se ponen en contacto directo una corriente de aire con una de agua relativamente grande, el aire puede ser calentado y humidificado, enfriado y humidificado o enfriado y deshumidificado según el estado del aire húmedo y de la temperatura del agua. Si se produce evaporación y la entalpía del vapor incorporado es menor que la entalpía del aire, éste resulta enfriado sensiblemente durante el proceso de humidificación (Treybal, 1981).

Este último proceso se puede explicar de la siguiente manera: la evaporación ocurre desde la superficie del líquido y la energía asociada con el cambio de fase es el calor latente de vaporización del agua. La energía requerida para sostener la evaporación debe provenir de la energía interna del agua la cual debe experimentar una reducción de su temperatura. Sin embargo, si se mantienen condiciones estacionarias, el calor latente perdido por el agua debido a la evaporación debe ser recuperado en parte por energía transferida al líquido desde sus alrededores. Despreciando efectos de radiación, esta transferencia puede provenir de la convección, es decir, de la energía sensible del gas en ausencia de otra fuente de calor. El aire entonces se enfriará y humidificará hasta valores de temperatura y humedad que dependen de las condiciones de los flujos de aire y de agua que interactúan (Incropera, 1996).

## LA PAJA COMO RELLENO

Los medios usados comúnmente para producir el enfriamiento evaporativo son la pulverización del agua dentro de la corriente de aire o el uso de rellenos con gran superficie específica. Estos pueden ser por ejemplo de paja, tela o estructurados de papel corrugado o fibra de vidrio. En ellos el contacto se produce entre flujos cruzados. El aire movido por ventiladores atraviesa el intercambiador horizontalmente y el agua cae por gravedad empapando la superficie del relleno. Según el grado de contacto entre el agua y el aire, éste se aproximará más o menos a las condiciones de saturación adiabática.

En este trabajo se estudia la utilización de paja como relleno de los paneles. Se elige este material porque además de tener las características físicas adecuadas, resulta muy accesible desde el punto de vista económico. Para este estudio se ensayaron dos

---

<sup>1</sup> Parcialmente financiado por la ANPCYT y el CIUNSa

<sup>2</sup> Investigadora del CONICET

fracciones que surgen como deshechos de la fabricación de escobas. Su costo entonces es sólo el del transporte. Una fracción está formada por puntas de guinea y la otra por una mezcla de junco y guinea.

El panel es rellenado con la paja colocada horizontalmente y de manera aleatoria en dirección perpendicular a los flujos de agua y de aire. El área de intercambio que resulta dependerá del diámetro medio de las varillas y de la porosidad del lecho, es decir de la fracción de vacío.

Se busca en este trabajo encontrar, a partir de mediciones en un prototipo, una relación empírica entre los números adimensionales que caracterizan al material, los flujos y a los procesos de transferencia involucrados. Para ello se construyó un prototipo como el que se esquematiza en la figura 1, que consiste en un conducto que contiene un lecho de paja, al cual se le inyecta un flujo de aire caliente de baja humedad relativa. Se mide la velocidad del aire para obtener el flujo másico y su temperatura y humedad antes y después de atravesar el lecho. Perpendicularmente se hace circular por gravedad un flujo de agua y se miden su caudal y su temperatura a la entrada y a la salida.

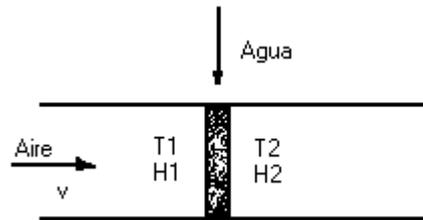


Figura 1: Esquema del prototipo experimental. Se miden las variables a ambos lados del lecho

Se realizaron ensayos para distintas condiciones del aire y las medidas obtenidas fueron volcadas a un programa de cálculo elaborado a partir del modelo que se explica a continuación.

### DESCRIPCION DEL MODELO

Se plantea que, en la superficie de intercambio de un elemento del relleno, el calor empleado en producir la evaporación produce un descenso de la temperatura de la interfase. Esto genera un flujo de calor desde el agua y desde el aire que están a una temperatura mayor hacia la interfase, según se esquematiza en la figura 2.



Figura 2: Intercambio de calor sensible y latente en la interfase agua - aire. El calor de vaporización es extraído desde el agua y desde el aire.

La temperatura de la interfase se puede determinar de la siguiente manera:

$$Q_{\text{aire}} = M_{\text{aire}} C_p (T_{\text{aire entrada}} - T_{\text{aire salida}})$$

$$Q_{\text{agua}} = M_{\text{agua}} (T_{\text{agua entrada}} - T_{\text{agua salida}})$$

$$Q_{\text{evap}} = Q_{\text{aire}} + Q_{\text{agua}}$$

$$H_{\text{fg}} H_m (P_{\text{sat}(T_{\text{int}})} - P_{(T_{\text{aire}})}) = H_{\text{aire}} (T_{\text{aire}} - T_{\text{int}}) + H_{\text{agua}} (T_{\text{agua}} - T_{\text{int}})$$

$$T_{\text{int}} = (H_{\text{aire}} T_{\text{aire}} + H_{\text{agua}} T_{\text{agua}} - H_{\text{fg}} H_m (P_{\text{sat}(T_{\text{int}})} - P_{(T_{\text{aire}})})) / (H_{\text{aire}} + H_{\text{agua}}) \quad (1)$$

$Q_{\text{evap}}$  = Calor producido en la evaporación

$Q_{\text{aire}}$  = Calor extraído al aire

$Q_{\text{agua}}$  = Calor extraído al agua

$H_{\text{fg}}$  = Calor latente de vaporización del agua

$H_m$  = Coeficiente de transferencia de masa de agua en el aire

$H_{aire}$  = Coeficiente de transferencia de calor en el aire por convección  
 $H_{agua}$  = Coeficiente de transferencia de calor en el agua por convección  
 $T_{agua}$  = Temperatura del agua  
 $T_{aire}$  = Temperatura del aire  
 $T_{int}$  = Temperatura de la interfase  
 $M_{aire}$  = Flujo másico de aire  
 $M_{agua}$  = Flujo másico de agua

Los datos de entrada para el cálculo son la geometría del intercambiador (dimensiones y área específica), flujos másicos, temperatura a la entrada y a la salida del aire y del agua y humedad del aire a la entrada y a la salida del lecho. El programa calcula el calor entregado por el aire y el agua. Con ellos determina los coeficientes de transferencia partiendo de una temperatura de interfase arbitraria. Luego, con la ecuación (1) calcula el valor de la temperatura de la interfase, lo compara con el valor propuesto y cuando no coinciden itera hasta la convergencia. Las propiedades del aire se van actualizando en cada paso utilizando los valores de la temperatura y humedad promedio entre la interfase y el cuerpo del flujo.

De una manera similar que en el caso de los lechos de piedra, se puede decir que en un relleno de paja la geometría de las transferencias de calor y masa va a estar definida por el diámetro medio de las varillas y por el grado de compactación de éstas, que viene dado por la fracción de vacíos, con los que se obtiene el área específica de intercambio:

$$\epsilon = (V_t - V_p) / V_t$$

$$A_e = A_i / V_t = A_i (1 - \epsilon) / V_p$$

$$A_e = 4 (1 - \epsilon) / d$$

$\epsilon$  = Fracción de vacíos  
 $V_t$  = Volumen total del lecho  
 $V_p$  = Volumen de la paja  
 $A_e$  = Área específica  
 $A_i$  = Área de intercambio  
 $d$  = Diámetro medio de varillas

Para caracterizar el flujo de aire se define el número de Reynolds en términos de la velocidad del aire en el conducto fuera del lecho y del diámetro medio  $d$  que es el diámetro de un cilindro de volumen igual al de una varilla de paja.

Se propone una correlación de números adimensionales, con la misma forma de la que se obtuvo para lechos de piedra (Sherwood, 1975; Bird, 1976), obtenida a partir de los datos experimentales. Ésta describirá las transferencias en el aire para un dado caudal de agua, y podrá ser generalizada para cualquier lecho de paja :

$$\epsilon j_h = \epsilon j_m = C_1 Re^{C_2}$$

Donde  $j_h$  y  $j_m$  son los factores  $j$  de Colburn definidos por la siguientes expresiones:

$$j_h = h / (\rho v C_p) Pr^{2/3} \quad ; \quad j_m = h_m / v Sc^{2/3}$$

$Pr$  = Número de Prandtl  
 $Sc$  = Número de Schmidt  
 $\rho$  = Densidad  
 $v$  = Velocidad  
 $C_p$  = Calor específico

## MEDICIONES

En el prototipo esquematizado en la figura 1 el aire caliente es impulsado por un ventilador en el cual se pueden controlar el flujo y la temperatura. El intercambiador consiste en una caja de paredes de malla plástica que es rellena por arriba con la paja. Para controlar las condiciones del agua que ingresa al intercambiador se utilizó un baño termostático desde el cual se extrae el agua por sifón y se repone para mantener constante el nivel y en consecuencia el caudal. El agua ingresa por la parte superior del panel, donde se encuentra un difusor. Las medidas del panel son: base = altura = 20 cm; espesor = 5 cm.

Para la toma de medidas de temperaturas se utilizó un módulo de adquisición de datos de conexión seriada marca Nudam de ocho canales para termocuplas. La humedad relativa se midió con un higrómetro Vaisala colocado alternativamente antes y después del panel. Las humedades absolutas se calcularon con el programa Psicro. La velocidad del aire para el cálculo del flujo másico fue medida con una sonda unidireccional marca TSI. El caudal de agua se midió con un vaso graduado. El diámetro medio de la paja se determinó mediante un promedio de medidas con tornillo micrométrico de una muestra del relleno. El volumen de la paja se midió sumergiendo la paja húmeda en un vaso graduado.

Se realizaron numerosas medidas para distintas condiciones del flujo de aire de entrada para condiciones estacionarias. El tiempo de cada ensayo estuvo fijado por el tiempo de respuesta del sensor de humedad que es de varios minutos. El ajuste del prototipo y del sistema de medidas se realizó controlando el balance de calor. Los datos obtenidos corresponden a un cierre del balance con un error menor al 4 %.

Las medidas se volcaron primeramente al ábaco psicrométrico (figura 3) en el cual se observa que la recta que une los puntos del diagrama, correspondientes a las condiciones del aire antes y después de atravesar el panel, posee una inclinación levemente superior a la de las líneas de temperatura de bulbo húmedo constante. Esto se debe a que la transformación de las condiciones del aire no es adiabática ya que una fracción del calor de vaporización corresponde al enfriamiento del agua. En una instalación real, en la cual el agua que atraviesa el panel es reintroducida, una vez que ésta alcanza la temperatura de bulbo húmedo, toda la extracción del calor para el enfriamiento proviene del aire.

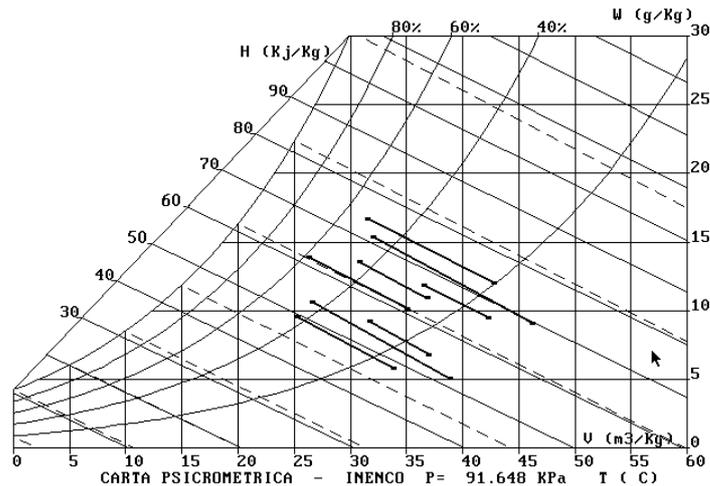


Figura 3: Ocho ensayos de enfriamiento evaporativo. La inclinación de las rectas es levemente superior a las de temperatura de bulbo húmedo constante.

Se calcularon los valores de los factores  $j$  y del número de Reynolds para cada experiencia y se encontraron los valores de  $C_1$  y  $C_2$  correspondientes al ajuste de los datos con una función potencial (figura 4), obteniéndose la siguiente correlación:

$$\varepsilon j_h = 0.54 Re^{-0.60} \quad (2)$$

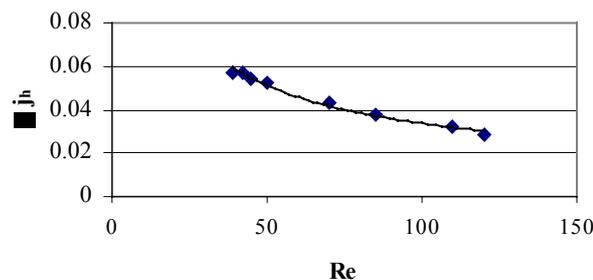


Figura 4: Ajuste de los resultados de las experiencias a una curva potencial

### CALCULO DE UN PANEL INSTALADO

Para simular el comportamiento de un panel de paja para enfriamiento evaporativo se elaboró otro programa que tiene en cuenta que las temperaturas del agua y del aire y la humedad del aire varían a lo largo y en la profundidad del panel. Para ello se realiza una discretización espacial en estas direcciones y se realiza el cálculo para elementos pequeños, por metro de ancho, en los que se suponen temperaturas y humedad constantes.

Los datos de entrada para el programa son las temperaturas del aire y del agua y la humedad del aire antes de atravesar el panel, la velocidad del aire, el caudal de agua, las dimensiones, la fracción de vacíos y el área específica del panel.

El cálculo se inicia en la parte superior del panel donde la temperatura del agua es conocida para todos los elementos de la primera fila. Siguiendo la dirección del flujo de aire encuentra paso a paso las condiciones del aire en esta fila y calcula las del agua para la fila siguiente. Los pasos de cálculo para cada elemento de panel son los siguientes:

- Evaluación de las propiedades fundamentales (densidad, viscosidad, difusividad, conductividad térmica) del aire húmedo y del agua.
- Tomando los valores de flujo a la entrada del elemento y los valores correspondientes de los números de Reynolds, Prandtl y Schmidt sigue el cálculo de los coeficientes de transferencia a partir de la correlación (2).
- Cálculo de la temperatura de la interfase según la ecuación (1) actualizando los coeficientes de transferencia de calor y masa a las nuevas condiciones.
- Utilización de la temperatura de la interfase para el cálculo de los calores y la masa transferida en el elemento.
- Determinación de las condiciones de entrada del aire y del agua para el elemento siguiente.

El rendimiento se obtiene como la caída de la temperatura del aire entre la entrada y la salida sobre la máxima caída de temperatura que puede tener el aire:

$$\eta = (T1 - T2) / (T1 - T^*)$$

Donde T1 y T2 son las temperaturas de entrada y salida respectivamente, y T\* es la temperatura termodinámica de bulbo húmedo para las condiciones de entrada del aire.

## CONCLUSIONES

Se obtuvo una correlación que generaliza los resultados para distintas características de geometría y flujo para paneles rellenos de paja. En el estado actual del estudio, ésta corresponde a un determinado caudal de agua, por lo que en futuros trabajos se debe encontrar la dependencia con distintas condiciones de flujo de agua. Debería también aumentarse la cantidad de puntos.

Se plantea también como un trabajo futuro probar la correlación y el programa de cálculo con los datos de un panel de paja que se encuentra en funcionamiento en una casa de cría de vegetación en el INTA de Catamarca.

Las correlaciones obtenidas y el programa de cálculo se podrán incorporar como un módulo dentro de otro programa existente de simulación de edificios lo que permitirá estudiar a aquellos que incluyan sistemas de enfriamiento evaporativo.

## BIBLIOGRAFIA

Treybal Robert E. (1981). Operaciones de Transferencia de Masa, 2ª Edición. Mc Graw – Hill Book Co.

Incropera F. y De Witt D. (1996). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4ª edición pp. 311-396. Wiley y Sons, New York.

Sherwood T. (1975). Mass Transfer. Mc Graw – Hill Book Co.

Bird R. (1976). Fenómenos de Transporte, 2ª Edición. Reverté. Barcelona.

## ABSTRACT

Evaporative cooling is an energy – efficient common strategy in hot dry climates to achieve adequate temperatures conditions in buildings. Straw is an adequate packing for de panels used in these systems because high relation of area of heat and mass exchange to volume can be obtained. It is also a cheap material in our region. In the present paper the thermal and mass exchange charasterics of straw were determinated. A physical model of the transfers is propoused, the results obtained and the computer program are presented.