

SIMULACIÓN DE PANELES PARA ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO

Marcelo Gea y Graciela Lesino*
INENCO
Universidad Nacional de Salta
Calle Buenos Aires 177 - CP4400 - Salta
Tel - Fax: 087-255489 E-mail: geam@ciunsa.unsa.edu.ar

RESUMEN

Se presenta un programa que simula el comportamiento de las propiedades del aire y del agua que atraviesan paneles para enfriamiento evaporativo. Estos tienen actualmente gran aceptación en climas cálidos y secos donde se puede conseguir el acondicionamiento de invernaderos u otro tipo de edificios con un muy bajo consumo de energía. Este trabajo constituye la primera etapa de la construcción de una herramienta de cálculo y diseño de estos sistemas. Está dirigido, en principio, a paneles de relleno estructurado los cuales poseen grandes superficies específicas de intercambio a la vez que permiten la circulación del aire con una baja pérdida de carga. Se presenta el modelo del intercambio de calor y masa, los pasos de cálculo que sigue el programa y un ejemplo de la presentación de los resultados.

INTRODUCCIÓN

Existe actualmente una gran aceptación de los sistemas de enfriamiento evaporativo debido a que su funcionamiento se basa esencialmente en la evaporación de agua con un consumo muy bajo de energía para producir un buen enfriamiento. Su uso es habitual en invernaderos y en criaderos de animales en lugares con clima tropical o subtropical. Especialmente 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.

Cuando se ponen en contacto directo una corriente de agua con una de aire, éste puede ser calentado y humidificado, enfriado y humidificado o enfriado y deshumidificado, según el estado del aire húmedo y 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.

Este último proceso se puede explicar de la siguiente manera: la evaporación ocurre desde la superficie del líquido y la energía asociada es el calor latente de vaporización del agua. La energía requerida para sostener la evaporación debe provenir de la entalpía del agua la cual debe experimentar una reducción de su temperatura. Sin embargo, 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.

PANELES PARA ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO

Para producir un eficiente enfriamiento evaporativo son necesarias grandes superficies de intercambio. Ellas pueden lograrse pulverizando el agua dentro de la corriente de aire o mediante el uso de rellenos con gran superficie específica. Estos pueden ser por ejemplo de paja o 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 en particular un sistema de enfriamiento que utiliza como intercambiador un relleno estructurado. Éste está construido con planchas corrugadas pegadas de manera de generar canales para la circulación de los fluidos según se esquematiza en la figura 1.

Con esta geometría se produce una redistribución continua del agua y las paredes se mojan uniformemente debido a la acción capilar de manera que con pequeñas cargas de agua se consigue que toda la superficie del relleno sea efectiva para la transferencia de calor y masa. El flujo de aire que circula por el intercambiador atraviesa alternativamente secciones triangulares y romboidales en un relativamente simple camino, lo cual reduce significativamente su caída de presión en relación a otros rellenos tradicionales.

* Investigadora del CONICET

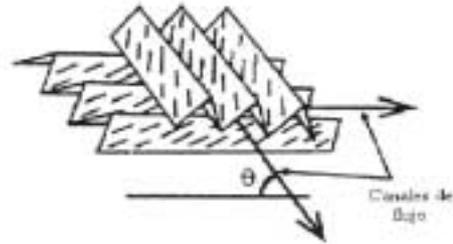
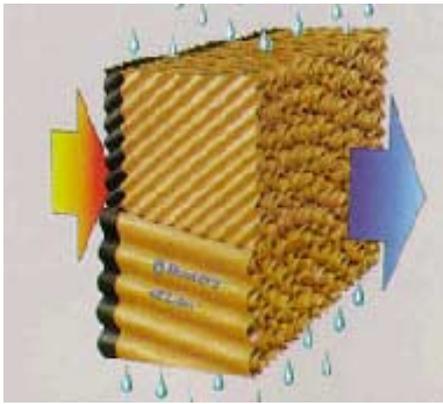


Figura 1: Intercambiador estructurado de celulosa. (Gentileza Munters I. G.)

DESCRIPCION DEL MODELO

Las correlaciones utilizadas para modelar los procesos de transferencia que ocurren entre los flujos de agua y de aire en un relleno estructurado fueron extraídas de la bibliografía (Bravo et al , 1985; Barathan et al, 1988). Con ellas es posible determinar el diámetro hidráulico, el espesor del film de agua, y los coeficientes de transferencia de calor y de masa del lado del liquido y del lado del gas.

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



Figura 2: Intercambio de calor sensible y latente en la interfase agua – aire

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

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

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

Q_{evap} = Calor producido en la evaporación

Q_{aire} = Calor extraído al aire

Q_{agua} = Calor extraído al agua

H_{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

Los datos de entrada para el cálculo son la geometría del intercambiador, el flujo, la temperatura y la humedad del aire a la entrada, y el flujo y la temperatura del agua a la entrada. El programa calcula las condiciones del aire y del agua en todo el relleno en cada instante y presenta las curvas de temperatura y humedad del aire a la salida a distintas alturas.

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 se encuentra paso a paso las condiciones del aire en esta fila y se calculan 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.
- Cálculo de las velocidades del aire y del agua y de sus velocidades relativas a partir de los valores de flujo a la entrada del elemento.
- Cálculo de los números de Nusselt y Sherwood a partir de los valores correspondientes de los números de Reynolds, Prandtl y Schmidt para el aire y para el agua.
- Cálculo de la temperatura de la interfase según la ecuación (1) actualizando los coeficientes de transferencia de calor y masa a las condiciones del aire y del agua.
- Utilización de la temperatura de la interfase para el cálculo de los calores y la masa transferida en el elemento.
- Determinación de las condiciones del aire y del agua para el elemento siguiente.

RESULTADOS

Como ejemplo se muestran los resultados correspondientes al comportamiento del aire a la salida del intercambiador a distintas alturas del panel: en la parte superior (a 0,10 m desde la entrada de agua); en la parte media (a 0,30 m) y en la parte inferior (a 0,60 m). Las condiciones de entrada son: $T_{\text{aire}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, Humedad = $0,008 \text{ kg / kg}$, $T_{\text{agua}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, Flujo aire = 1 kg / s m^2 , Flujo agua = $0,2 \text{ kg / s m}^2$, Espesor del panel = $0,20 \text{ m}$, Ancho del panel = 1 m . Se observa en la figura 3 la variación de la temperatura en función del tiempo desde que se inicia el movimiento de los flujos hasta alcanzar valores estacionarios.

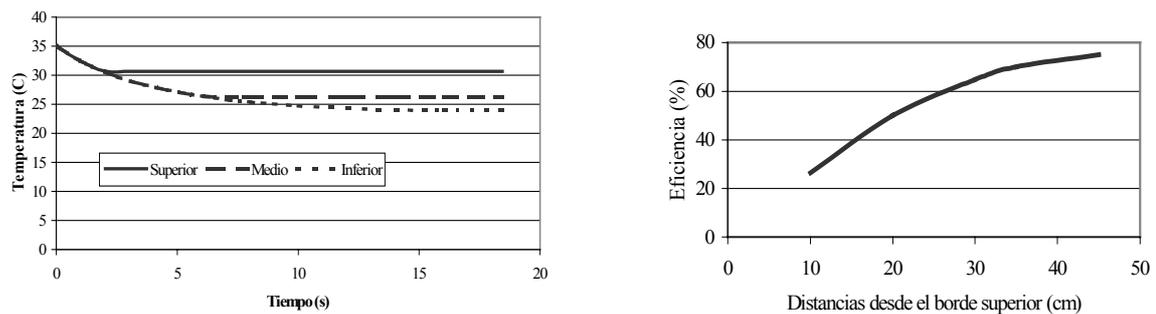


Figura 3: Temperatura del aire a la salida y eficiencia a distintas alturas del intercambiador en función del tiempo

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. Se observa en la figura 3 como aumenta la eficiencia cuando aumenta la distancia al borde superior del panel.

La evolución del estado del aire cuando atraviesa el panel a diferentes alturas se presenta en el diagrama psicrométrico de la figura 4. En la parte superior del panel, cuando el agua se pone en contacto con el aire que fluye perpendicularmente, predomina el intercambio de calor entre la interfase y el agua, y ésta comienza a enfriarse. La transferencia de calor desde el aire es mínima y la temperatura de éste disminuye poco.

A medida que se enfría el agua y su temperatura se acerca a la temperatura de la interfase, la transferencia de calor desde el agua se achica, y comienza a predominar el intercambio con el aire. Se observa entonces que en la parte media del panel el aire presenta a la salida una disminución más notable de su temperatura.

Cuando el agua alcanza en la parte inferior del panel la temperatura de bulbo húmedo del aire, la transferencia de calor sólo ocurre entre la interfase y el aire y todo el calor de vaporización es provisto por el enfriamiento adiabático del aire. Desde esa altura hacia abajo el aire presentará la mayor disminución de temperatura.

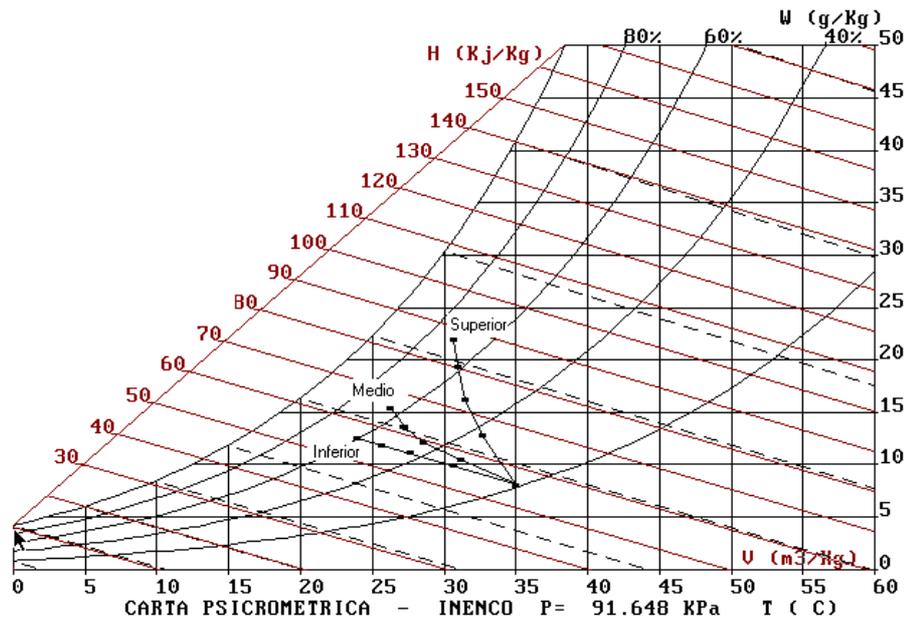


Figura 4: Estados que toma el aire húmedo mientras atraviesa el panel

CONCLUSIONES

Se compararon los resultados de los sistemas simulados con tablas de eficiencia de equipos comerciales con geometría de rellenos parecidas. Se encontró una adecuada correspondencia para las distintas combinaciones posibles de condiciones iniciales de los flujos de aire y agua.

El programa constituye la primera parte del desarrollo de una herramienta de diseño y cálculo de sistemas de enfriamiento evaporativo. Los resultados de la simulación deben compararse con los de un estudio experimental para la validación del modelo, lo que constituye la próxima etapa del trabajo. Ello permitirá encontrar con facilidad las condiciones de flujo y la geometría más conveniente para cada necesidad de enfriamiento.

Se contempla también la posibilidad de incorporar al programa existente de simulación de edificios (SIMEDIF) un módulo para considerar el enfriamiento evaporativo.

BIBLIOGRAFIA

- Bravo, J. L., Rocha J. A. Y Fair J. R. (1986). Pressure Drop in Structured Packings. *Hidrocarbon Processing* .
- D. Bharathan, B. K. Parsons, J. A. Althof (1988). Direct-Contact Condensers for Open-Cycle OTEC Applications. Model Validation with Fresh Water Experiments for Structured Packings. *National Renewable Energy Laboratory*.
- Robert E. Treybal (1981). *Operaciones de Transferencia de Masa*. 2ª Edición. Mc Graw – Hill Book Co