

## **ESTUDIO Y COMPARACIÓN DE DISTINTOS TIPOS DE INTERCAMBIADORES PARA ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO<sup>1</sup>**

**Gea M., Sánchez B., Placco C., Iriarte A. y Lesino G.**

Universidad Nacional de Salta, Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO)  
Av. Bolivia 5150, CP 4400, Salta. Email: geam@unsa.edu.ar

**RESUMEN:** A fin de mejorar la eficiencia energética de los sistemas de enfriamiento evaporativo se estudian distintos tipos de intercambiadores. En general, los usados corrientemente en la región presentan problemas de degradación, baja relación área/volumen o alta pérdida de carga. Para el estudio se construyeron y ensayaron intercambiadores que puedan superar estos problemas utilizando nuevos materiales y geometrías que no signifiquen costos elevados. Se encontraron los coeficientes de transferencia de calor y masa, el área unitaria y las caídas de presión para cada configuración. Se realizó una comparación técnica y económica a fin de elegir las mejores soluciones.

**Palabras clave:** enfriamiento evaporativo, intercambiadores, eficiencia energética.

### **INTRODUCCION**

El clima de gran parte del norte argentino se caracteriza por importantes períodos cálidos y secos, con temperaturas muy altas y precipitaciones anuales inferiores a los 600 mm. Durante estos períodos las condiciones de confort en viviendas y edificios públicos son malas porque la mayoría de ellos no cuenta con equipos de aire acondicionado convencional.

Los sistemas productivos agropecuarios intensivos, que han tenido un gran impulso en los últimos tiempos, han encontrado en las altas temperaturas del verano en la región un factor limitante para su desarrollo.

Bajo estas condiciones climáticas el método racional de refrescamiento desde el punto de vista energético es el enfriamiento evaporativo. Sin embargo estos sistemas no se han difundido lo suficiente a pesar que presentan importantes ventajas en relación a los equipos de aire acondicionado convencional:

- Poseen un bajo costo inicial
- Son fáciles de construir
- Producen una reducción de los costos de operación al bajar el consumo eléctrico.
- Mejora la calidad de vida, ya que puede resultar accesible para un sector más amplio de la población.
- En el caso de aplicaciones agrícolas, evita buena parte de la generación eléctrica local en bajas potencias que resulta por lo tanto más cara y eventualmente permite localizaciones en zonas alejadas o de difícil acceso mediante paneles fotovoltaicos.

### **MATERIALES Y GEOMETRIAS DE LOS INTERCAMBIADORES**

Actualmente su utilización en esta zona está prácticamente restringida a las actividades agrícolas mediante sistemas llamados de 'hidrocooling' (Iriarte et al., 1999). Éstos están constituidos por intercambiadores agua-aire integrados a una pared del invernadero. El aire es forzado a atravesarlos mediante extractores instalados en la pared opuesta. Se observa que los intercambiadores usados comúnmente tienen distintos tipos de problemas que se traducen en una baja eficiencia energética de los equipos, como se describe a continuación.

#### *Relleno de paja*

En contraposición a la ventaja de su bajo costo, el relleno de paja tiene algunas desventajas originadas principalmente en la dificultad que existe en lograr que el agua se distribuya de tal manera que moje todo el relleno. Como resultado, en las zonas que no se cubren permanentemente con un film de agua, se produce acumulación de polvo, bacterias y algas lo que trae como consecuencia un deterioro general del intercambiador. Otra desventaja típica de este material es que con el tiempo se produce un apelmazamiento del relleno y partes del intercambiador quedan cerradas para el paso de los fluidos bajando sensiblemente el área de intercambio y por consiguiente el rendimiento del sistema.

#### *Relleno de bolas de arcilla expandida*

Como la arcilla expandida es un material poroso, suele usarse como relleno para enfriamiento evaporativo con la idea de que la absorción permita reducir el movimiento de agua en el intercambiador. Además, debido a su baja densidad, es posible la incorporación del intercambiador a una pared sin producir daños estructurales. Se observa sin embargo que este material no tiene una gran capacidad para absorber el agua ya que su porosidad es cerrada. Por ello, para conseguir una elevada área por unidad de volumen se requiere una granulometría baja lo que trae como consecuencia una alta caída de presión del aire al atravesar el relleno (Gea et al., 2003).

---

<sup>1</sup> Trabajo parcialmente financiado por la ANPCyT y por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta

*Relleno estructurado*

El relleno estructurado presenta varias ventajas (alta área unitaria, mojado uniforme y autolimpiado, baja pérdida de carga) que hacen que sea un intercambiador muy eficiente. Debido a que es necesario importarlo, su costo es muy elevado de manera que prácticamente no se utiliza para enfriamiento evaporativo en Argentina.

**ESTUDIO EXPERIMENTAL**

A fin de mejorar la eficiencia energética de los sistemas de enfriamiento evaporativo se estudiaron distintos tipos de intercambiadores. Se eligieron materiales y geometrías que no presenten los problemas de degradación y que provean grandes áreas de intercambio de calor y masa sin que esto signifique mucha pérdida de carga ya que esta es determinante en el costo de funcionamiento de los equipos. Se tuvo en cuenta además que los materiales usados y la construcción no resulten de un costo elevado.

Para realizar los estudios experimentales se construyó un equipo de enfriamiento evaporativo real en un laboratorio de la universidad. Parte de una ventana se reemplazó por un recinto en el cual se ensayaron los distintos rellenos. Acoplado a esta cámara se instaló un sistema para la distribución y recirculación de agua mediante una bomba. En la pared opuesta a esa ventana se colocó un extractor de aire (figura 1).

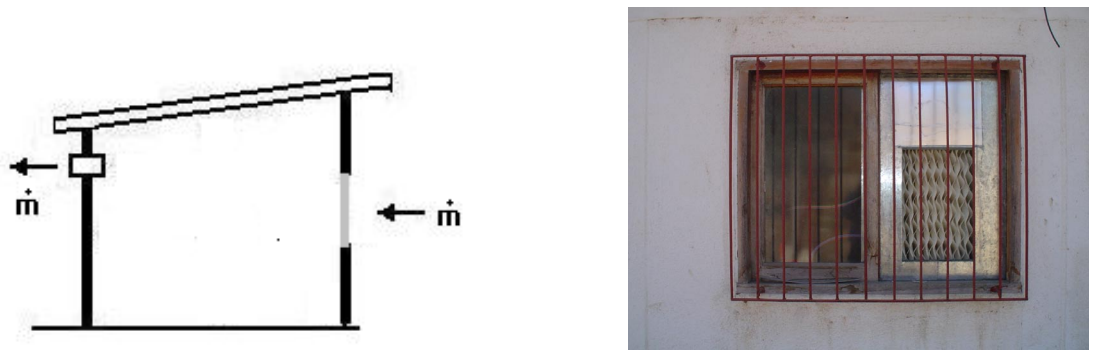


Figura 1: Esquema del sistema y vista del recinto del intercambiador

Se instaló un sistema de medidas compuesto por sensores de temperatura, humedad, presión, caudal y un equipo de adquisición de datos. Para cada tipo de intercambiador se realizó el ensayo que se describe a continuación: se puso a andar el sistema regulando un caudal de agua que garantice un máximo de área mojada. Se fijó el caudal de aire y se esperó que la temperatura del agua alcance un valor constante, próximo al de la temperatura de bulbo húmedo. Se midieron la temperatura y la humedad del aire a la entrada y a la salida del intercambiador, la temperatura y el caudal del agua recirculada y el caudal de aire. También se midió la caída de presión del aire.

Para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor y masa se planteó el siguiente modelo: durante la evaporación desde la superficie del líquido, la energía asociada con el cambio de fase es el calor latente de vaporización del agua. Despreciando efectos de radiación y en ausencia de otra fuente de calor, la energía requerida para sostener la evaporación debe provenir de las energías internas del agua y del aire los cuales experimentarán una reducción de su temperatura (figura 2).

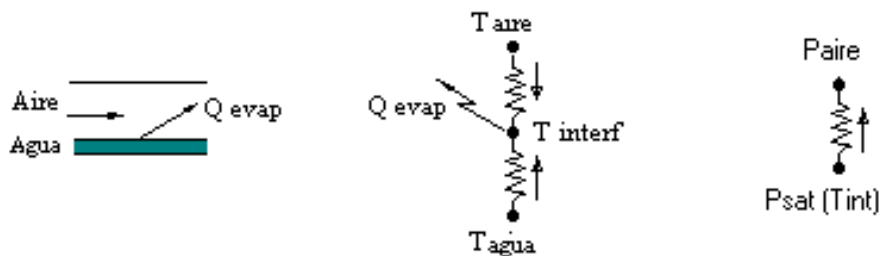


Figura 2: Intercambio de calor sensible y latente en la interfase agua - aire. El calor de vaporización es extraído desde el agua y desde el aire.

De este modelo surgen las siguientes ecuaciones de balance de calor:

$$Q_{evap} = Q_{aire} + Q_{agua} \tag{1}$$

$$h_{fg} h_m (P_{sat}(T_{int}) - P_{aire}) = h_{aire} (T_{aire} - T_{int}) + h_{agua} (T_{agua} - T_{int}) \quad (2)$$

La relación entre los coeficientes de calor y masa se obtiene de plantear la analogía de los procesos de transferencia en la capa límite (Incropera y De Witt, 1996).

$$h / h_m = \rho c_p Le^{2/3} \quad (3)$$

Los calores extraídos desde los flujos de aire y de agua al atravesar el intercambiador son:

$$Q_{aire} = M_{aire} C_{p,a} (T_{aire} \text{ entrada} - T_{aire} \text{ salida}) \quad (4)$$

$$Q_{agua} = M_{agua} C_{p,w} (T_{agua} \text{ entrada} - T_{agua} \text{ salida}) \quad (5)$$

Para la resolución de los circuitos térmicos y de masa se utilizó el programa Simusol (Alia y Saravia, 2004), tomando como datos de entrada para el cálculo 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.

### DESCRIPCIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES ESTUDIADOS

#### *Relleno estructurado de chapa ondulada:*

Teniendo en cuenta las ventajas físicas del intercambiador con relleno estructurado y la desventaja de su alto costo, ya que no se fabrica en Argentina, se decidió construir un relleno constituido por las chapas onduladas plásticas que se usan en cubiertas de techos. Para ellos se cortaron secciones rectangulares y se pegaron de manera que los canales formen entre sí un ángulo de 45 ° (figura 3).



Figura 3: Relleno estructurado construido con secciones de chapa ondulada plástica

Las chapas, empaquetadas verticalmente, se colocan en el recinto del intercambiador (figura 2). Sobre ellas un distribuidor genera una película de agua que circula por gravedad y moja ambas caras de cada chapa.

#### *Telas verticales:*

En busca de conseguir un intercambiador que presente una gran área y un costo que no sea elevado se construyó un dispositivo constituido por telas que cuelgan verticalmente desde un caño perforado que genera películas de agua en sus caras. Las telas se configuran de manera de guiar la corriente de aire para que barran toda el área mojada (figura 4).

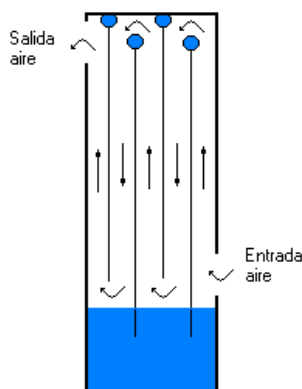


Figura 4: Intercambiador construido con telas verticales cubiertas con una película de agua

### Relleno aleatorio de anillos

Otro intercambiador estudiado es el que se construyó con un relleno de anillos. Estos están constituidos por secciones de caño de PVC de media pulgada que se colocan aleatoriamente en un recinto constituido por paredes de rejilla y sobre ellos se instala el distribuidor de agua que moja el relleno por gravedad (figura 5).

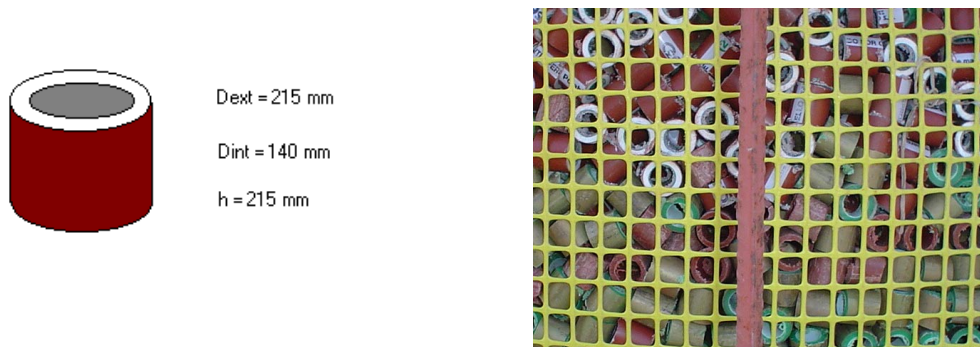


Figura 5: Relleno aleatorio con secciones de caño de PVC

### ANÁLISIS COMPARATIVO

Se evaluaron las propiedades de cada intercambiador relacionadas con la eficiencia energética, como la caída de presión, los coeficientes de transferencia y el caudal de agua. Para compararlas se tomó para los tres casos un mismo caudal de aire por metro cuadrado de área frontal. Se eligió el valor de  $1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$  que es del orden de los recomendados en los intercambiadores comerciales.

Para encontrar los coeficientes de transferencia se ajustaron los datos experimentales con los resultados teóricos tomando como parámetro el coeficiente de transferencia de calor  $h$ . Se muestra como ejemplo el caso del relleno de anillos (figura 6).

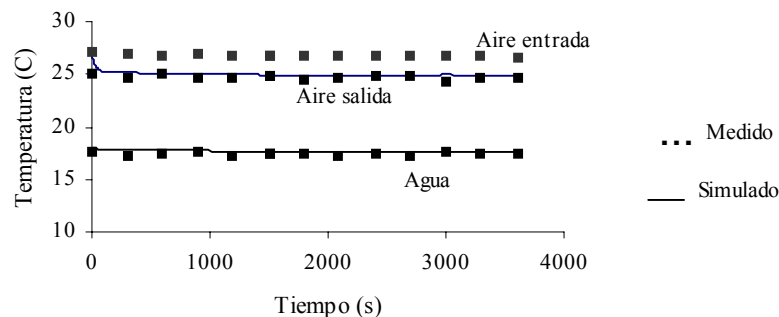


Figura 6: Ajuste para la determinación de los coeficientes de transferencia para el relleno de anillos para una velocidad del aire de  $1 \text{ m/s}$  y humedad ambiente de  $10 \text{ g/kg}$

Con las medidas de la geometría, la caída de presión y los resultados de la simulación se elabora el cuadro 1 que permite comparar los valores de propiedades que reflejan eficiencia energética, compacidad y costo de los intercambiadores.

- El *caudal de agua por unidad de volumen* es el caudal mínimo con el cual se puede alcanzar el máximo de área mojada. Para su cálculo se suponen intercambiadores de una altura de  $1,5 \text{ m}$  que es aproximadamente la máxima que permite una pared.
- La *caída de presión* se midió con manómetro marca Magnehelic que tiene un alcance de  $10 \text{ mm}$  de agua. Se presentan los valores por metro de profundidad luego de hacer una extrapolación lineal.
- *Potencia de ventilador* es el producto entre la caída de presión por unidad de longitud de espesor y el caudal volumétrico de aire por unidad de área frontal
- El *área unitaria* es la relación entre el área útil para el intercambio de calor por unidad de volumen de intercambiador.
- La *potencia de enfriamiento* surge de multiplicar el coeficiente de transferencia de masa por la diferencia entre la humedad del aire y la humedad de saturación. Se tomaron condiciones típicas de la región correspondientes a la temperatura máxima y a la humedad absoluta promedios de diciembre de la ciudad de Catamarca:  $t = 35 \text{ C}$ ,  $w = 12 \text{ g/kg}$ .

- La *capacidad de enfriamiento* es la potencia de enfriamiento que puede proveer un metro cúbico de intercambiador y se calcula multiplicando la potencia de enfriamiento (por unidad de área) por el área unitaria.
- Para la comparación del *precio* de los intercambiadores se asignó el valor unitario para las telas verticales y se consideró sólo el costo de materiales bajo la suposición de que el costo de mano de obra es aproximadamente igual para los tres intercambiadores ya que presentan dificultades constructivas equivalentes.

Características	Intercambiador Estructurado de chapas	Telas verticales	Aleatorio de anillos
Caudal de agua por unidad de volumen (litros/(s m <sup>3</sup> ))	2	0,4	2
Caída de presión por unidad de longitud (Pa / m)	59	164	116
Potencia del ventilador (W / m / m <sup>2</sup> )	64,9	180,4	127,6
Área unitaria (1 / m)	126	32	286
Coefficiente de transferencia de masa (m / s)	3,4 x 10 <sup>-3</sup>	4,9 x 10 <sup>-3</sup>	3,8 x 10 <sup>-3</sup>
Potencia de enfriamiento (W / m <sup>2</sup> )	50,2	71,3	55,5
Capacidad de Enfriamiento (kW / m <sup>3</sup> )	6,32	2,28	15,7
Precio por m <sup>3</sup> Respecto a telas verticales	34,2	1	15,4

Cuadro 1. Propiedades de los intercambiadores

Además de las características presentadas en el cuadro 1, a fin de comparar los intercambiadores se deben tener en cuenta otros factores relacionadas con la distribución del agua, la durabilidad y los detalles constructivos.

Se encontró dificultad para conseguir una buena distribución de agua sobre las superficies en los rellenos de chapa y de anillos. En el caso de las telas, se ensayaron varios tipos con distintas proporciones de fibra sintética y se terminó escogiendo lienzo de algodón, ya que su alta capacidad de absorción permite un mojado de un 100 % del área con un caudal de agua mínimo.

En cuanto a la durabilidad de los intercambiadores, se observa que los rellenos de materiales plásticos como la chapa ondulada o los anillos no sufrirán un desgaste mecánico por la acción de los fluidos. En cambio las telas deberán ser reemplazadas periódicamente. Aunque debe tenerse en cuenta que en los primeros pueden perder calidad por la acumulación de polvo o microorganismos en las áreas no mojadas.

## CONCLUSIONES

El relleno estructurado construido con chapa ondulada presenta las ventajas antes mencionadas de este tipo de intercambiadores. La amplitud de las ondulaciones de la chapa genera canales con un diámetro hidráulico grande y una potencia de enfriamiento baja comparado con los rellenos estructurados comerciales. Por ello también es que presenta una muy baja pérdida de carga en el flujo de aire.

El relleno de anillos tiene ventajas respecto al estructurado en cuanto tiene una potencia de enfriamiento por unidad de área levemente mejor y una mayor área unitaria. Sus desventajas son una mayor caída de presión para el aire y las dificultades para lograr un mojado completo.

El intercambiador formado por telas verticales genera una importante caída de presión debido al estrangulamiento que sufre la corriente de aire que debe recorrer una longitud de aproximadamente 2 metros. Su área por unidad de volumen es baja lo cual puede representar un problema en un equipo compacto. El caudal de agua que es necesario recircular es mucho más bajo que los otros casos. El costo es notablemente menor.

De lo expresado se puede concluir que la diferencia de costos y el bajo caudal de agua indican que es conveniente continuar con el estudio de las telas verticales a fin de obtener un sistema optimizado. En cuanto al relleno estructurado se observa que para mejorar su capacidad de enfriamiento es necesario utilizar un material que provea una geometría más cerrada.

## RECONOCIMIENTO

Se reconoce la colaboración de los señores Pablo Mendoza y Daniel Torres para la realización de este trabajo.

## NOMENCLATURA

Q<sub>evap</sub> = Potencia producida en la evaporación  
Q<sub>aire</sub> = Potencia extraída al aire  
Q<sub>agua</sub> = Potencia extraída al agua  
h<sub>fg</sub> = Calor latente de vaporización del agua  
h<sub>m</sub> = Coeficiente de transferencia de masa de agua en el aire  
h<sub>aire</sub> = Coeficiente de transferencia de calor en el aire por convección  
h<sub>agua</sub> = Coeficiente de transferencia de calor en el agua por convección  
T<sub>agua</sub> = Temperatura del agua  
T<sub>aire</sub> = Temperatura del aire  
T<sub>int</sub> = Temperatura de la interfase  
P<sub>sat(T<sub>int</sub>)</sub> = Presión de vapor de agua a la temperatura de la interfase  
P<sub>aire</sub> = Presión de vapor en el aire  
M<sub>aire</sub> = Flujo másico de aire  
M<sub>agua</sub> = Flujo másico de agua  
 $\rho$  = densidad del aire  
C<sub>p,a</sub> = calor específico del aire  
C<sub>p,w</sub> = calor específico del agua  
Le = Numero de Lewis

## REFERENCIAS

- Alia D y Saravia L. (2004). Programa Simusol. Simulación de Sistemas Solares. Inédito
- Incropera F. y De Witt D. (1996). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4<sup>a</sup> edición pp. 322. Wiley y Sons, New York.
- Iriarte A., Lesino G. y Tomalino L. (1999) Comportamiento Higrotérmico en Invierno de Propagación de Plantas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. (ISSN 0329-5184). Volumen 3 pp. 213 - 216.
- Gea M., Iriarte A y Lesino G. (2003) Estudio de la Arcilla Expandida como Relleno de Intercambiadores para Enfriamiento Evaporativo. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. (ISSN 0329-5184).

## ABSTRACT

In order to improve the energy efficiency of evaporative cooling systems different types of heat exchangers are studied. In general, the ones currently used in the region present degradation problems, low relation area/volume or high pressure drop. Low cost exchangers that can surpass these problems using new materials and geometries were constructed and tested. The heat and mass transfer coefficients, the unitary area and the pressure drop for each configuration. A technical and economic comparison was made in order to choose the best solutions.

**Keywords:** evaporative cooling, heat exchangers.