



CARACTERIZACIÓN DE INTERCAMBIADORES PARA ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO¹

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, Argentina
e-mail: 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 Argentina 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 contar con elementos que permitan elegir las mejores soluciones.

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 Argentina 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.

1. 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.
- Mejoran la calidad de vida, ya que puede resultar accesible para un sector más amplio de la población.

¹ Trabajo parcialmente financiado por la ANPCyT y por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta

- En el caso de aplicaciones agrícolas, evitan 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.

2. 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 edificio. 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. A continuación se describen los rellenos de intercambiadores estudiados en este trabajo.

2.1 Relleno de Paja

Se ensayo una muestra de paja que surge como deshecho de la fabricación de escobas. Está formada por una mezcla de cañas de junco y de guinea. Actualmente, como no existe demanda de estas fracciones, su costo para usarlas en instalaciones para enfriamiento evaporativo es sólo el de su transporte.



Figura 1: La paja es colocada horizontalmente y de manera aleatoria

El intercambiador se construye relleno un recinto con la paja colocada horizontalmente y de manera aleatoria en dirección perpendicular a los flujos de agua y de aire (figura 1). El área de intercambio que resulta dependerá del diámetro medio de las varillas y del grado de compactación del lecho.

2.2 Relleno Estructurado

En los últimos años se desarrolló una nueva familia de rellenos para intercambiadores de contacto directo en los cuales sus elementos se ajustan cuidadosamente a la estructura en un orden o arreglo estructurado (structured packings), en contraste con los rellenos aleatorios (random packings) en los cuales los elementos del relleno van colocados al azar.

Están contruidos con planchas corrugadas pegadas de manera de generar canales para la circulación de los fluidos con baja pérdida de carga.

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.

Más recientemente comenzaron a producirse rellenos estructurados específicamente para equipos de enfriamiento evaporativo, para sistemas llamados de medio rígido, que se comercian sin el sistema de movimiento de los fluidos (ventilador y bomba).

Los rellenos estructurados presentan ventajas notables como una mejor distribución del agua, mayor durabilidad y menor caída de presión en el flujo de aire, lo que implica un consumo menor de energía.

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).



Figura 2: Relleno estructurado construido con secciones de chapa ondulada plástica

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

2.3 Relleno de Bolas de Arcilla Expandida

Tratando de encontrar un intercambiador para enfriamiento evaporativo que no sufra la degradación que sufre la paja y no resulte tan costoso como los rellenos estructurados se estudió la performance de rellenos aleatorios constituidos por bolas de arcilla expandida conocidas como LECA (Lightweight Expanded Clays Aggregate) que es un material inerte, liviano y disponible en el mercado ya que se fabrica para la industria de la construcción.

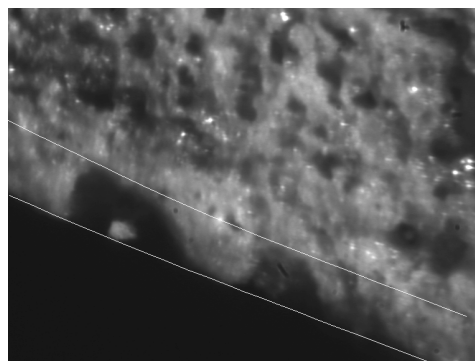
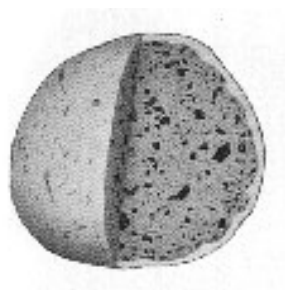


Figura 3: Micro y macro poros vistos en un corte de una bola de arcilla expandida

La arcilla expandida es un material de origen cerámico con una estructura altamente porosa , de porosidad cerrada (figura 3). Su elevada resistencia intrínseca la hace apta para su utilización tanto en morteros aislantes ultraligeros como en hormigones ligeros de altas prestaciones. Por ser un material inerte y poroso también se usa comúnmente como sustrato en hidrocultivo.

También 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 riesgo de producir daños estructurales. Para este estudio se utilizaron bolas de arcilla expandida de 0,04 m de diámetro medio.

2.4 Telas Verticales:

Se construyó un intercambiador que presenta una gran área con un bajo costo mediante 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).

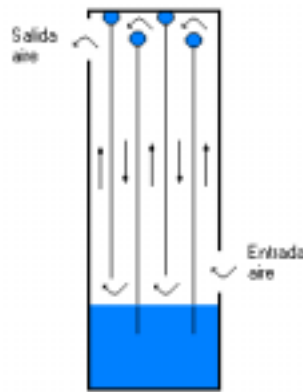


Figura 4: Intercambiador construido con telas verticales cubiertas con una película de agua

2.5 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

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Para realizar los estudios experimentales se construyó un equipo de enfriamiento evaporativo en un laboratorio. Parte de una ventana se reemplazó por un recinto en el cual se ensayaron los distintos rellenos (figura 6).

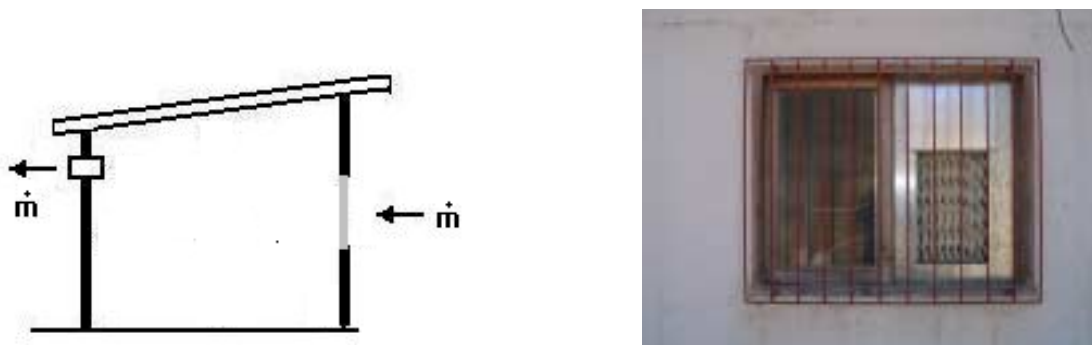


Figura 6: Esquema del sistema y vista del recinto del intercambiador

Acoplado a este recinto 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. 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; se midió la caída de presión del aire.

4. MODELIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA

Para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor y masa se planteó que el fenómeno del enfriamiento evaporativo corresponde al 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 7).

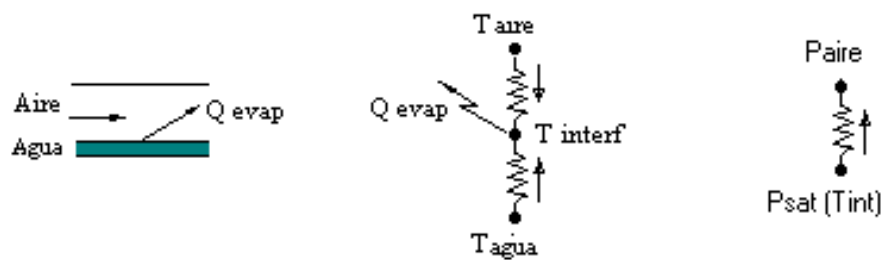


Figura 7: Intercambio de calor sensible y latente en la interfase agua - aire. El calor de vaporización es extraído desde el agua y desde el aire.

- Q_{evap} = Potencia producida en la evaporación
- Q_{aire} = Potencia extraída al aire
- Q_{agua} = Potencia extraída al agua
- T_{agua} = Temperatura del agua
- T_{aire} = Temperatura del aire
- T_{int} = Temperatura de la interfase
- $P_{sat(T_{int})}$ = Presión de vapor de agua a la temperatura de la interfase
- P_{aire} = Presión de vapor en el aire

Para obtener las ecuaciones que modelizan los procesos de transferencia se plantean los balances de calor y masa en un volumen de control de espesor diferencial dx siendo x la dirección del flujo de aire y se realizan las siguientes hipótesis: flujo se distribuye unidimensionalmente; se desprecia la transferencia de calor por conducción; no existen pérdidas de calor y masa al ambiente; existe un equilibrio termodinámico entre la superficie de agua y la capa de aire que la rodea y se considera que ésta se encuentra a la temperatura del agua.

Se plantea el caso más general en el cual el agua fluye sobre un sólido con capacidad calorífica apreciable como es el caso de la arcilla expandida. En el resto de los casos se desprecia el término que representa la acumulación de calor sensible. Se presentan las ecuaciones de balance de calor y de masa en ambas fases en el volumen de control (Gea et al., 2003).

En el fluido, la ecuación diferencial correspondiente al balance de calor es:

$$(\rho C_p)_f \varepsilon \partial T_f / \partial \tau = (m C_p)_f / A_i \partial T_f / \partial x + h_v (T_b - T_f) \quad [\text{Eq. 1}]$$

En el sólido, para el caso de la arcilla expandida, la ecuación diferencial correspondiente al balance de calor es:

$$(\rho C_p)_b (1 - \varepsilon) \partial T_f / \partial \tau = h_v (T_f - T_b) \quad [\text{Eq. 2}]$$

T = temperatura (C)

w = contenido de agua por unidad de masa (kg/kg)

τ = tiempo (s)

m = flujo másico de aire (kg/s)

ρ = densidad (kg/m³)

ε = fracción de huecos

C_p = calor específico (J/kg C)

h_v = coeficiente de transferencia de calor por unidad de volumen (W/m³)

subíndice f = fluido

subíndice b = sólido

subíndice v = por unidad de volumen

En el fluido, la ecuación diferencial correspondiente al balance de masa es:

$$\rho_f \varepsilon \partial w_f / \partial \tau = m / A_i \partial w_f / \partial x + h_{mv} (w_f - w_{s b}) \quad [\text{Eq. 3}]$$

En el sólido, la ecuación diferencial correspondiente al balance de masa es:

$$\rho_b (1 - \varepsilon) \partial w_b / \partial \tau = h_{mv} (w_{s b} - w_f) \quad [\text{Eq. 4}]$$

h_m = coeficiente de transferencia de masa por unidad de volumen (kg / s m³)

subíndice s = saturación de vapor de agua

La relación entre la humedad absoluta y la humedad relativa es:

$$w = 0,622 \text{ HR } P_{\text{sat}}(T) / (P_{\text{atm}} - 0,378 \text{ HR } P_{\text{sat}}(T)) \quad [\text{Eq. 5}]$$

$$P_{\text{sat}}(T) = e^{(23,5613 - 4032 / (273,15 + T - 38))} \quad [\text{Eq. 6}]$$

HR = humedad relativa

$P_{\text{sat}}(T)$ = presión de vapor de saturación a la temperatura T (Pa)

P_{atm} = presión atmosférica (Pa)

El calor que entregan el agua y el aire para sostener la evaporación es:

$$q_{ev} = h_{fg} A_i h_{mv} (w_{s b} - w_f) \quad [\text{Eq. 7}]$$

h_{fg} = calor de vaporización (J/kg)

La relación entre los coeficientes de transferencia de calor y masa surge de la analogía de los procesos en la capa límite:

$$h / h_m = \rho C_p Le^{2/3} \quad [\text{Eq. 8}]$$

Le = número adimensional de Lewis

La resolución del sistema se realiza planteando los circuitos térmico y másico y utilizando el programa SIMUSOL. A cada elemento del volumen del lecho discretizado le corresponden los siguientes circuitos:

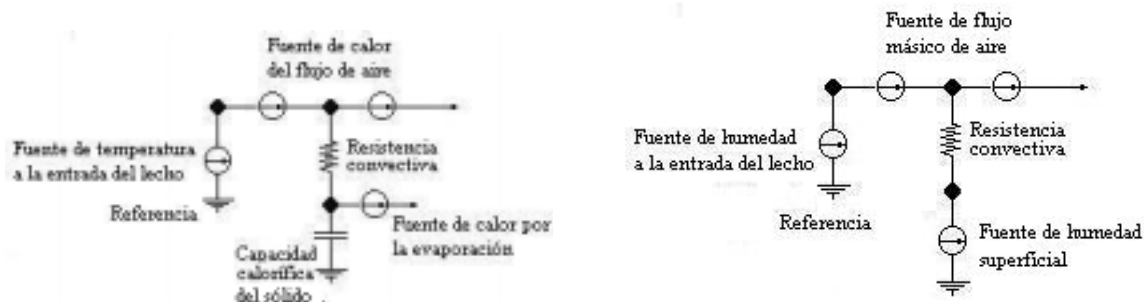


Figura 8: Circuitos térmico y de masa que representan las transferencias en el lecho de bolas de arcilla

En el circuito térmico los nodos representan valores de temperatura y la corriente es el flujo de calor. La fuente de temperatura a la entrada del lecho provee el valor de la temperatura ambiente desde una tabla de datos experimentales. La fuente de calor de flujo de aire representa el calor transferido entre los nodos de temperatura a la entrada y a la salida. La capacidad calorífica de la porción del lecho considerado isotérmico está representado por el condensador. La resistencia convectiva representa la resistencia a la transferencia de calor entre el agua y el aire. La fuente de calor por la evaporación es el producto de la masa evaporada por el calor de cambio de fase.

En el circuito másico los nodos representan valores de humedad absoluta y la corriente es el flujo másico transferido. La fuente de humedad a la entrada provee el valor de la humedad ambiente desde una tabla de datos experimentales. La fuente de flujo másico de aire representa el caudal de vapor de agua transferido en el flujo de aire entre los nodos de humedad a la entrada y a la salida. La resistencia convectiva es la resistencia a la transferencia de vapor entre la superficie de agua y el aire. Este flujo másico es tomado por el circuito térmico para calcular el calor de evaporación. La fuente de humedad provee el valor de la humedad del aire en la saturación. Se incorporaron al programa de cálculo las ecuaciones (5), (6), (7) y (8).

5. 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 (Watt, 1997).

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 .

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.
- La *caída de presión* se midió con manómetro marca Magnehelic que tiene un alcance de 10 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 y del sistema de distribución del agua, bajo la suposición de que el costo de mano de obra es aproximadamente igual para los cinco intercambiadores ya que presentan dificultades constructivas equivalentes.

Además de las características presentadas en la Tabla 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.

Tabla 1. Propiedades de los Intercambiadores

Intercambiador	Relleno de paja	Estructurado de chapas	Relleno de bolas de arcilla	Telas verticales	Relleno de anillos de PVC
Características					
Caudal de agua por unidad de volumen (litros/(s m³))	2	2	2	0,4	2
Caída de presión por unidad de longitud (Pa / m)	148	59	131	164	116
Potencia del ventilador (W / m / m²)	163	65	144	180	128
Área unitaria (1 / m)	560	126	175	32	286
Coefficiente de transferencia de masa (m / s)	4,1 x 10 ⁻³	2,9 x 10 ⁻³	3,2 x 10 ⁻³	2,4 x 10 ⁻³	3,8 x 10 ⁻³
Potencia de enfriamiento (W / m²)	59	42	46	35	55
Capacidad de Enfriamiento (kW / m³)	33	5,3	8,0	1,2	15,7
Precio por m³ respecto a telas verticales	1,4	34,2	21	1	15,4

6. CONCLUSIONES

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.

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.

La arcilla expandida cuenta con cualidades que la hacen apta para ser usada como relleno de intercambiadores para enfriamiento evaporativo. Una de ellas es que al ser un material inerte y rígido no sufre degradación por la acción del agua ni deformaciones que alteren la porosidad del lecho. 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.

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 que tienen los rellenos aleatorios.

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 en los otros casos y el sistema de distribución de agua es muy sencillo, lográndose un área mojada del 100 %. El costo es notablemente menor.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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*. 4ª 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. 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.
- WATT J. and BROWN W. *Evaporative Air Conditioning Handbook*. 3º Edition. pp. 121. New York. Prentice Hall.