

## OPTIMIZACION DEL AREA DE TRANSFERENCIA DE UN INTERCAMBIADOR PLASTICO

E.S.de Buenader y A.Iriarte<sup>1</sup>

INENCO", Unidad de Investigación Catamarca\*\*  
Facultad de Ciencias Agrarias-UNCa.  
C.C.189 - 4700 Catamarca

### RESUMEN

El diseño real de un intercambiador de calor es un problema mucho más complicado que el análisis de la transferencia de calor, porque en la práctica final juegan un papel muy importante el costo, el tamaño y las consideraciones económicas.

El estudio del intercambiador de calor a flujos cruzados agua-aire con superficie de plástico (1) se encuentra en el grado de optimización de rendimiento. Se considera de importancia, en este sentido, optimizar las áreas a fin de obtener temperaturas de salida predeterminadas para una necesidad. A fin de lograr un criterio, en este trabajo se propone para las ecuaciones del modelo matemático (2) con nuevas condiciones de borde, el método de diferencias finitas y se presenta el análisis de resultados cuando se modifican las dimensiones del intercambiador.

### INTRODUCCION

La propuesta de un intercambiador de calor a flujos cruzados agua-aire con superficie de plástico, ha despertado interés por la versatilidad que presenta su diseño para ser incorporado en sistemas integrados de aprovechamiento de energía solar. En principio, fue ideado para ser incorporado a la unidad de secado que tiene como fuente de calor una poza solar, sistema de colección-convulsión que usa solución salina, como fluido caloportador.

Avance en su estudio y diseño, otorga la posibilidad, en estos momentos, de ampliar su empleo en sistemas de acondicionamiento ambiental locales de cría, etc., temas de interés para el desarrollo regional. Esto presupone contar con un criterio para optimizar su rendimiento, en orden a las exigencias del sistema en que será aplicado, y las características de fácil mantenimiento, operación y bajo costo.

Actuada la configuración de elementos que forman el intercambiador y la interacción entre los mismos surge como factor dominante para obtener su rendimiento el área de transferencia. Con el objeto de optimizar la misma deben tenerse

Miembro de la Carrera de Investigador del CONICET  
Instituto UNSa-CONICET  
Unidad de Investigación del INENCO en Catamarca UNCa-UNSa-CONICET

en cuenta los siguientes condicionantes:

- El largo está limitado por la altura de carga que determina la velocidad del agua y la formación pelicular.
- El ancho está limitado por los diseños y costos del sistema al que será integrado.
- Las temperaturas de salida son una exigencia para cada necesidad: tipo de secado, locales de cría, acondicionamiento ambiental, etc.

Los factores anteriores, restringen las posibilidades de análisis y predicción del diseño efectuadas con la solución analítica del modelo matemático propuesto en el trabajo anterior (2), por cuanto ésta no tiene como datos, sino como resultados, las temperaturas de salida, y no depende del largo y del ancho en sí mismos, sino del área total de transferencia.

Lo puntualizado anteriormente lleva a proponer una solución matemática que permita considerar y ajustar el ancho y el largo del intercambiador a los factores condicionantes. Tal solución se obtiene por el método de diferencias finitas.

### 2.- CONFIGURACION DEL PROBLEMA

A fin de sistematizar la tarea, el problema a resolver es el siguiente: dada las temperaturas de entrada y salida del agua y del aire, determinar el área de transferencia necesaria para el intercambiador a flujos cruzados con superficie de plástico y optimizar la misma de tal modo que responda a condiciones del diseño y sistema al que se lo va a integrar y a los costos de construcción y producción. Se suponen conocidos los flujos de agua y de aire y el coeficiente global de transferencia de calor.

La solución del mismo se efectúa mediante los siguientes pasos:

- a) Determinación del área.
- b) Optimización del largo y del ancho.
- c) Análisis de cotas para la validez de las variaciones del ancho y del largo.
- d) Análisis de resultados.

Con el objeto de obtener una estructuración correcta en el ordenamiento conceptual de los resultados, se describe en primer término la solución matemática propuesta.

### 3.- SOLUCION POR EL METODO DE DIFERENCIAS FINITAS

Uno de los condicionantes mencionados es que el intercambiador debe responder a temperaturas de salida predeterminadas. Cuando se solicita esto, ellas constituyen condiciones de contorno del problema de frontera que se plantea del siguiente modo:

Siendo "x" la dirección del flujo de aire, e "y" la dirección del flujo de agua, perpendiculares entre sí, el sistema de ecuaciones para el fenómeno de intercambio es:

$$dq = U(T - t) dx dy$$

$$dq = - \frac{C_{ag}}{X_0} \frac{\partial T}{\partial y} dy dx$$

$$dq = \frac{C_a}{Y_0} \frac{\partial T}{\partial x} dx dy$$

Con condiciones de frontera

$$x = 0 \Rightarrow T = T_0; y = 0 \Rightarrow t = t_0$$

$$x = X_0 \Rightarrow t = t_s; y = Y_0 \Rightarrow T = T_s$$

Considerando las condiciones de frontera y las ecuaciones dadas, se obtiene, para la temperatura del agua en  $x = 0$  la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial T}{\partial y} + \frac{UX_0}{C_{ag}} T = \frac{UX_0}{C_{ag}} t_0$$

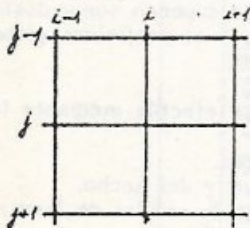
por lo tanto

$$T_{x=0} = t_0 + (T_0 - t_0) \exp\left(-\frac{UX_0}{C_{ag}} y\right)$$

Combinando el sistema de ecuaciones inicial, obtenemos para la temperatura del agua la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y} + \frac{UX_0}{C_{ag}} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{UY_0}{C_{ai}} \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

Para su solución se propone el siguiente esquema de diferencias:



Siendo h los pasos en la dirección "x" y k los pasos en la dirección "y" y llamando:

$$\alpha = -\frac{UX_0}{C_{ag}}; \beta = \frac{UY_0}{C_{ai}}$$

la ecuación en diferencias es:

$$\alpha KT_{i+1} + T_{i,j+1} + (\beta h - 1 - \alpha k) T_{i,j} - \beta h t_{i,j} - T_{i-1,j} = 0$$

Para simplificar la notación podemos hacer:

$$A = \alpha h; B = \beta h - 1 - \alpha k; C = \beta h$$

entonces la ecuación anterior se transforma en:

$$AT_{i+1,j} + T_{i,j+1} + BT_{i,j} - T_{i-1,j} - CT_{i,j-1} + T_{i-1,j-1} = 0$$

El sistema de ecuaciones algebraicas que resulta al variar i y j según los nudos de la red, puede resolverse por el método de eliminación de Gauss o el método finito de Crunt. Cabe hacer notar las bondades de este esquema, por cuanto no es necesario efectuar cambios de variables y solo se remite a resolver sistemas elementales de ecuaciones algebraicas.

#### 4.- DETERMINACION DEL AREA DE TRANSFERENCIA

Para el intercambiador agua-aire a flujos cruzados que se estudia, no existen en la bibliografía sobre el tema, diagramas de distribución de temperaturas que permitan determinar el área de transferencia necesaria cuando se especifican las temperaturas de entrada y de salida.

A fin de unificar los conceptos desarrollados en la búsqueda de tales distribuciones, se retomaron aquí los resultados obtenidos para efectividad y unidades de transferencia (1) y relación media de temperatura (2) en referencia a este tipo de intercambiadores.

Del análisis de las ecuaciones matemáticas y su significado físico, se llegan a establecer las siguientes igualdades:

$$\epsilon = \frac{T_0 - T_s}{T_0 - t_0} = \frac{t_s - t_0}{T_0 - t_0}$$

$$= t'_m = \int_0^1 t' (1-y') dy'$$

siendo

$$t' = T' (1 - e^{-ax'})$$

Esta igualdad puede apreciarse gráficamente al observar la Fig. N° 1 que muestra la relación entre la media de temperatura del aire en función de la efectividad (para un caso particular de funcionamiento) compararla con la correspondiente a efectividad en función de las unidades de transferencia.

Lo expresado anteriormente, permite asegurar que para una efectividad o rendimiento solicitado, conocidos los datos de funcionamiento (temperaturas globales y flujos), puede determinarse el área requerida por medio de la gráfica  $\epsilon = f(A)$  o las ecuaciones correspondientes.

## OPTIMIZACION DEL ANCHO Y DEL LARGO DEL INTERCAMBIADOR

Para una descripción más clara, los pasos siguientes de este trabajo se acompañan con el análisis de los resultados obtenidos para una situación particular.

Conocida el área de transferencia, y circunscripto el problema a determinados valores de flujo de agua y de aire y coeficiente global de transferencia, se deben determinar el largo y el ancho del intercambiador a fin de optimizar su rendimiento.

Para la determinación mencionada, es necesario contar con la distribución puntual de temperaturas. El método matemático usado en este caso es el de diferencias finitas expuesto en el punto anterior.

Se optimiza el área, modificando el ancho y el largo por medio de la variación de los pasos  $h$  y  $l$  del esquema de diferencias y contrastando la distribución que resulta con el diagrama correspondiente a las condiciones particulares de funcionamiento obtenido con la solución analítica.

La Fig. Nº 2 muestra la distribución de temperaturas obtenidas con el método de diferencias finitas para el caso particular siguiente:

$$\begin{aligned} &= 32,76 \text{ [W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C]} & G_{ag} &= 0,100 \text{ [kg/seg]} \\ &= 0,189 \text{ [kg/seg]} & T_o &= 71,86 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ &= 8,79 \text{ [}^\circ\text{C]} & T_{ij} &= 61,77 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ &= 67,37 \text{ [}^\circ\text{C]} & A &= 2,72 \text{ [m}^2\text{]} \end{aligned}$$

Los valores se obtuvieron para un esquema de nueve puntos interiores. La observación de la distribución permite asegurar que el método ajustado a los valores analíticos a los experimentales de temperatura de salida y en consecuencia puede ser usado a fin de ajustar el ancho y el largo del intercambiador.

## VALIDEZ DE LA VARIACION DE LAS DIMENSIONES

La optimización del largo y del ancho del intercambiador está sujeta a los condicionantes mencionados en la introducción de este trabajo. En consecuencia es necesario efectuar el análisis de variación de tales dimensiones. Para ello se repite el caso particular estudiado en el punto 4 y se modifica el dato de área.

La figura nº 3 muestra los resultados de temperatura media de salida para ambos flujos. En ella se observa que, para iguales condiciones de funcionamiento, si se aumenta el área de transferencia las temperaturas del aire crecen, en tanto que las del agua decrecen, como era de esperar. Sin embargo esta variación para valores máximos de 8 m<sup>2</sup> se hace muy lenta, 1 a 2 °C por

por metro cuadrado de área de transferencia. Cabe ahora preguntarse hasta qué punto es válido aumentar el largo o el ancho.

Desde ya, el aumento en el largo está limitado por la acción de la gravedad, por cuanto la altura de carga determina la velocidad del agua y la formación de película.

Teóricamente, de acuerdo a las ecuaciones del modelo (2) a medida que crece el área, las relaciones  $T'$  y  $t'$  de temperatura del agua y del aire tienden a cero y los valores  $T(x,y)$  y  $t(x,y)$  de temperaturas de salida del agua y salida del aire tienden a las de temperatura de entrada del aire. Esto físicamente es válido, por cuanto en el balance de calor, el agua entrega todo el calor posible y para áreas muy grandes no habría cambio en la temperatura del aire. O sea que el aumento de área se ve limitado por la temperatura de entrada del agua.

La Fig. Nº 1 dijimos, muestra la relación media de temperatura del aire en función del área de transferencia. En ella se observa que a partir de los 9 a 10 m<sup>2</sup> de transferencia la curva sufre un achatamiento que hace descartar un aumento de área. Esto se corresponde con su dependencia de la relación media de temperatura del agua  $T'$  y lo expresado anteriormente. Es importante destacar que en la expresión analítica de  $t'$  aparece como variable determinante de la proporcionalidad el ancho del intercambiador.

En este punto, cabe recordar que el ancho está sujeto a las condiciones de diseño del sistema al que se va a integrar el intercambiador.

De lo anterior se concluye que si bien el aumento del área de transferencia permite un aumento en la temperatura de salida del aire, dicho cambio de área está limitado por las temperaturas de entrada, el ancho del intercambiador, las condiciones de diseño y la altura de carga. Estos condicionantes ponen cotas para el largo y el ancho, dentro de las cuales deberán optimizarse los valores.

## 7.-INTEGRACION

A modo de conclusión e integración de métodos la Fig. Nº 4 muestra en un diagrama de flujo los pasos que se prevén efectuar para optimizar el área de un intercambiador a flujos cruzados agua-aire con superficie de plástico, según los requerimientos de cada problema.

En él se destacan cada tipo de solución y cómo se entrelazan las mismas de acuerdo al análisis efectuado en este trabajo. Esto permite resolver cualquier instancia en el diseño e integrarlo al sistema ideado para cada necesidad tecnológica.

## REFERENCIAS

- (1) A. Iriarte, S.B. de Biagi, E.S. de Buenader, R. Moreno y L. Saravia. "Intercambiadores de calor

con superficie plástica para secado solar". Actas 8va. Reunión ASADES-La Pampa-1983.  
 (2) A.Iriarte, E.S.de Buenader, S.B. de Biagi, R. Moreno y A.Amaya. "Secadero Solar de bajo costo con colectores de agua: Diseño y ensayo térmico". Actas 9na. Reunión ASADES-San Juan 1984.

**TABLA I**

Q	- Flujo de calor W	Y	- Largo del intercambiador m
$C_{ag}$	- Tasa de capacidad calorífica del agua J/kg seg.	$A^o$	- X Y de transferencia del intercambiador m <sup>2</sup>
$C_i$	- Tasa de capacidad calorífica del aire J/kg seg.	$T'$	- Relación temperatura del agua
T	- Temperatura del agua °C	$t'$	- Relación temperatura del aire
t	- Temperatura del aire °C	$t'_m$	- Relación media temperatura salida del agua
$T_o$	- Temperatura de entrada del agua	$T_m$	- Temperatura media salida del agua
$t_o$	- Temperatura de entrada del aire	$t_m$	- Temperatura media salida del aire °C
$T_s$	- Temperatura de salida del agua	$N_{ut}$	- Número unidades de transferencia
$t_s$	- Temperatura de salida del aire	$G_{ag}$	- Flujo de agua kg/seg
U	- Coeficiente global de transferencia de calor W/m <sup>2</sup> °C	$G_{ai}$	- Flujo de aire kg/seg
$x_o$	- Ancho del intercambiador m	E	- Efectividad

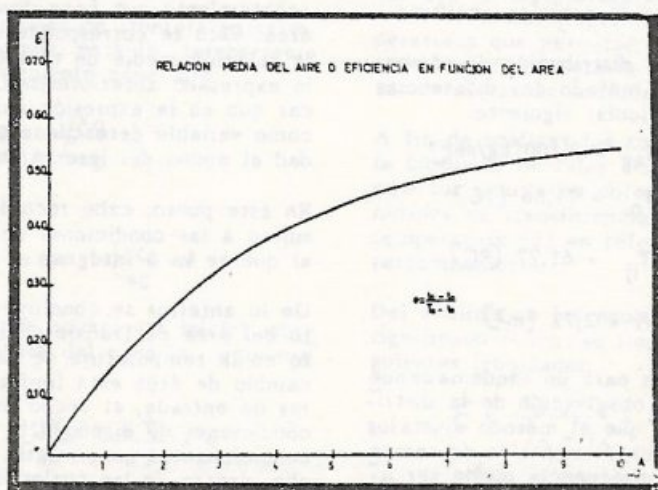


Fig. 1

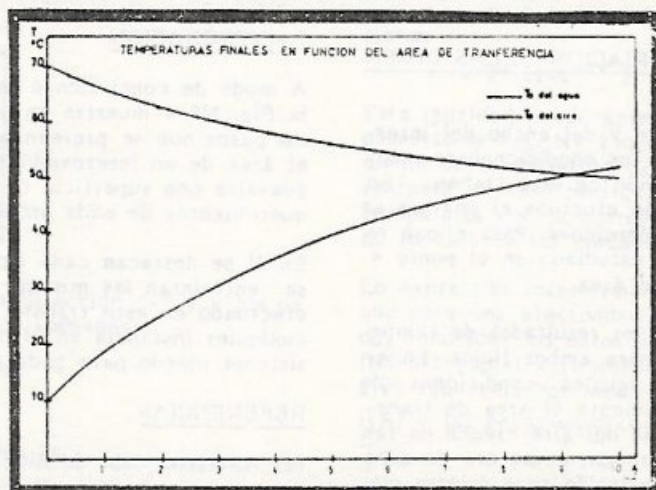


Fig. 2

# DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS

METODO DIFERENCIAS FINITAS

RESULTADOS TEMPERATURA DEL AGUA

Agua			
	70,60	68,29	66,68
	67,42	67,39	65,52
Aire			
	64,51	64,39	64,84

DATOS  
 $U = 32,67 \text{ (W/m}^2\text{°C)}$   
 $A = 2,72 \text{ (m}^2\text{)}$   
 $T_0 = 71,86 \text{ °C}$   
 $t_0 = 0,79 \text{ °C}$   
 $T_{01} = 8,8 \text{ } 63,06 \text{ e}^{-k_j}$   
 $T_{j4} = 61,77 \text{ °C}$   
 $T_{k1} = 67,37 \text{ °C}$

Fig. 3

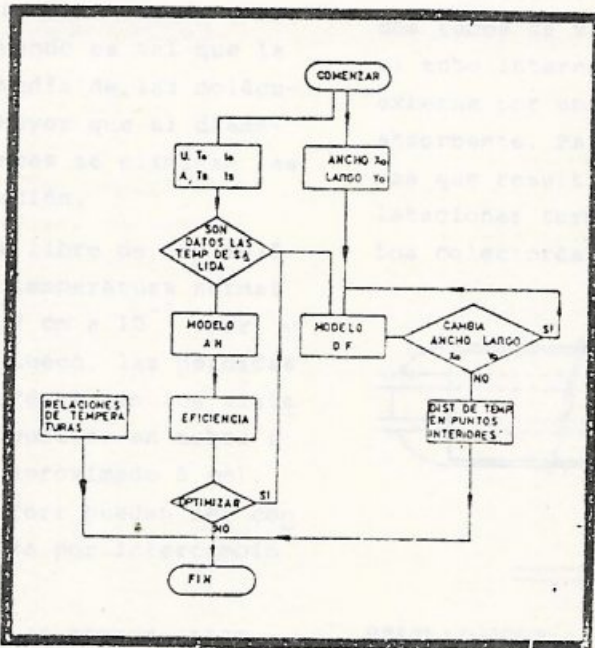


Fig. 4