

OPTIMIZACION DEL SISTEMA COLECCION-INTERCAMBIO  
EN CALENTADORES SOLARES DE AGUA

G. AHUMADA Y R. FERIOLI.

INENCO\*, UNIDAD DE INVESTIGACION CATAMARCA.

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS - UNCa.

C.C. 189 - 4700 CATAMARCA.

**RESUMEN.**

La introducción de intercambiadores compactos de flujo cruzado en calentadores solares de agua, constituyen una solución ciertamente prometedora en lo que concierne a la utilización de estos sistemas en regiones con predominio de temperaturas nocturnas por debajo del punto de congelación del agua.

Así, es razonable pensar en la sustitución del líquido anticongelable utilizado como fluido intercambiador en los calentadores tradicionales, ya que el intercambiador compacto que se describe en el presente trabajo, opera a resguardo de las condiciones climáticas adversas.

En trabajos anteriores sobre el tema que nos ocupa, se muestran las ventajas de utilizar el aire como fluido de intercambio. No obstante los resultados obtenidos al presente, es preciso destacar la necesidad de proceder al ajuste de las variables que condicionan el funcionamiento de calentadores solares con intercambiadores compactos incorporados, ya que éstos son elementos relativamente caros por una parte y por otra, dicho ajuste se exige al no haber antecedentes de esta naturaleza en el tema.

El objetivo de este trabajo es formular conclusiones respecto a:

- Relación colección-intercambio.
- Dimensionamiento del subsistema intercambio.

- Redimensionamiento global que apunte hacia la compacticidad general de los calentadores.

**INTRODUCCION.**

Por regla general, los calentadores solares de agua destinados a regiones de baja temperatura lo hacen con un fluido intercambiador anticongelable. Es evidente que un problema a resolver, entre otros, es el de evitar la probable contaminación ante fallas de hermeticidad de dicho intercambiador. Como alternativa a estos dispositivos, la propuesta es la utilización de los intercambiadores compactos de flujo cruzado que operan al amparo de los avatares climáticos, cuyo fluido primario de intercambio es simplemente aire.

El intercambiador se encuentra en el extremo superior de un calentador solar de aire (fig. 1), suministrando el aire caliente en convección natural que lo atraviesa a aquél.

Tanto los colectores solares de aire de diseño convencional, pintados de negro como los intercambiadores compactos de flujo cruzado son dispositivos cuyos comportamientos han sido ampliamente estudiados al presente, no así la combinación que resulta de ambas estructuras térmicas que motiva el presente trabajo.

**DESCRIPCION GENERAL.**

Se procederá a realizar una descripción del sistema general utilizado para llevar a cabo los en-

sayos que se analizarán posteriormente.

El prototipo constituye una estructura principal de adobe estabilizado, con un ancho de pared incluido el revestimiento de 30 cm aproximadamente. Su ancho máximo es de 2 m, así como su altura total, excluyendo el subsistema de acumulación. En la parte posterior de la estructura se encuentran dos ventanas, para facilitar el acceso al interior del equipo durante los ensayos. Además está previsto en este prototipo su eventual utilización para el acondicionamiento bioclimático de recintos. Como prueba de ello, se destacan en la parte interno-inferior, ductos de retorno de aire de una habitación contigua que se complementa con la ventana póstero-superior, la que facilitará el transporte de aire caliente a la estancia.

El subsistema de colección está constituido básicamente por una estructura metálica portavidrios y dos hemicolectores independientes entre sí, consecuencia de la presencia de un tabique aislante térmico. El área total de colección es de  $4 \text{ m}^2$ , con cubierta de doble vidrio. Cada hemicolector, puede desplazarse mediante correderas que permiten ajustar la distancia vidrio-placa. A su vez, el subsistema de intercambio está constituido por dos intercambiadores compactos idénticos de flujo cruzado tipo 9.68-0.87/R (denominación americana). Cada intercambiador está soportado de tal manera que pueden realizarse una gran variedad de movimientos, no sólo de traslación sino también de rotación; los intercambiadores funcionan independientemente uno del otro, esto es, no hay contacto físico alguno entre ellos.

Finalmente, la acumulación térmica se lleva a cabo en un tanque cilíndrico apoyado en la parte superior de la estructura principal, como se observa en la fig. 1. El tanque tiene una capacidad de 215 lts, con espesor de pared de 3 mm. De momento, el subsistema de acumulación térmica no entrará en la discusión

fundamental de este trabajo por razones que expondrán posteriormente, motivo por el cual se enfocará la atención en el agregado colector-intercambiador.

#### Análisis Cualitativo de Funcionamiento.

En un trabajo anterior [1], se describe el funcionamiento de un sistema de calentamiento de agua con un intercambiador compacto incorporado. En el trabajo que ahora nos ocupa, las condiciones operativas de funcionamiento se mantienen esencialmente sin alteración, aunque el comportamiento en particular pueda verse modificado por la versatilidad prevista tanto en la colección como en el intercambio, según ya se ha señalado. Concretamente, el aire calentado en los hemicolectores asciende por termosifón pasando a través de los intercambiadores para retornar a la placa y completar así el circuito convectivo primario. El agua que se calienta en los intercambiadores asciende al tanque de acumulación y retorna a través de tuberías plásticas a aquellos, cerrándose a su vez el circuito convectivo secundario. El sistema opera en forma automática, es decir, lo hace simplemente por movimientos convectivos naturales, aunque la incorporación de bombeo forzado de uno o ambos fluidos es absolutamente factible.

Para una condición dada de funcionamiento se establece con cierta certeza cómo gravitan ciertos factores en el comportamiento de un hemisistema en comparación con el otro tomado como referencia. El hemisistema de referencia es una placa colectora pintada de negro exenta de aletas u otro tipo de aditamento, situado su plano paralelo al de los vidrios y a 10 cm de éstos. El intercambiador compacto que conforma el hemisistema es perpendicular a la placa, con la mitad de su altura sobre la misma y la otra por debajo. En estas condiciones, los parámetros del hemisistema restante se modifican ex-profeso a fin

de observar y medir cómo se alteran los resultados como consecuencia de tales cambios. Todo esto bajo la premisa esencial de que si las condiciones operativas son las mismas en ambos hemisistemas, los resultados a obtener también deberán serlo.

#### Análisis Cuantitativo de Funcionamiento.

El análisis cuantitativo de funcionamiento se llevará a cabo en dos partes. La primera de ellas estará orientada hacia el balance térmico correspondiente en las placas colectoras de cada hemisistema. La segunda parte del análisis, de mayor importancia aún, se refiere al balance térmico en los subsistemas de intercambio, dada la necesidad de compatibilizar la transmisión de calor y la caída de presión como consecuencia de la estrecha relación física y económica entre ambas.

#### A.- Balance térmico en el subsistema de colección.

$$Sf(X \delta x) = U_L(X \delta x)(t_p - t_i) + h_c(X \delta x)(t_p - t) + h_r E(X \delta x)(t_p - t_r) \quad (1)$$

El primer miembro es la radiación solar absorbida por un elemento de placa de ancho X y longitud  $\delta x$ .

Segundo miembro:

- el primer término es la pérdida de calor, desde la placa de absorción a través de la cubierta transparente.
- El segundo término es el flujo de calor por convección en la corriente de aire.
- Calor radiado desde la placa hacia abajo.

#### B. Balance de calor sobre un elemento de aire.

$$WC_p \frac{dt}{dx} \delta x = h_c(X \delta x)(t_p - t_i) + h'_c(X \delta x)(t_p - t_i) \quad (2)$$

El primer miembro es el aumento de entalpía de la corriente de aire al pasar a través de un elemento de longitud  $\delta x$  del colector.

En el segundo miembro, el primer término es el flujo de calor hacia la corriente de aire de la placa absorbente; y el segundo término representa el flujo de calor entre la corriente de aire y paredes.

Se ha observado un aporte adicional obtenido cuando se asocia a la placa colectoras de experimentación, metal desplegado liviano a lo largo de aquélla. Matemáticamente, esto es multiplicar la ec. (1) por un factor mayor que la unidad con la finalidad de tomar en consideración el incremento de temperatura (ver fig. 3). Teóricamente, puede demostrarse la existencia de fenómenos contrapuestos. Por un lado, si bien es cierto que se obtiene un mayor aumento de temperatura, también es real que se hace a expensas de un aumento de pérdida de carga ocasionando una disminución en la velocidad de circulación del aire.

#### B. Balance térmico en el intercambiador compacto.

El aire caliente proveniente de las placas pasa a través del intercambiador cediendo parte de su energía térmica, mientras que el resto corresponde a la energía residual que porta el aire y pérdidas a través de la aislación. Esto es,

$$- WC_p \frac{dt}{dx} \delta x = h_A(L \delta x) + h'_c(L \delta x) + U_L(L \delta x) \cdot (t - t_a) \quad (3)$$

En la ec. (3), el primer miembro es la disminución de entalpía de la corriente de aire al pasar a través de un elemento de longitud  $\delta x$  del

intercambiador. Por su parte, el primer término del segundo miembro es el flujo de calor en la corriente de agua por convección; el segundo, a su vez, da el flujo de calor residual en la corriente de aire y por último, el tercer término, representa las pérdidas de calor a través de la aislación térmica.

El comportamiento de un calentador solar de agua con intercambiador compacto de flujo cruzado incorporado, debe analizarse a la luz de un gran número de parámetros que permiten calcular en forma correcta las dimensiones del subsistema de intercambio. La experiencia señala que cuando se incrementa la velocidad de uno o ambos fluidos, como en el caso que nos ocupa, más efectiva es la transferencia y más compacto puede hacerse el intercambiador. Entonces, para obtener las características más provechosas, los problemas de transmisión y pérdida de carga deben ser resueltos simultáneamente.

Para predecir las eficiencias involucradas en un intercambiador compacto dado y las caídas de presión en los fluidos intervinientes, debemos tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Características de la superficie.
- Propiedades de los fluidos de intercambio.
- Números de Reynolds.
- El producto (StPr) y el factor f de Fanno.
- Eficiencia de las aletas.
- Eficiencia de la superficie.
- Coeficiente total de transferencia de calor.
- Núm. de unidad de transf. de calor (NTU).
- Temperatura de salida.
- Eficiencia neta de intercambio.
- Relación de la DMLT con el caudal másico de agua.

A continuación se indican algunos parámetros básicos, característicos de la superficie relacionados al intercambiador compacto 9.68-0.87R

utilizado en este trabajo.

Radio hidráulico al pasaje de flujo de aire,  $r_{h,a} = 3.59 \text{ mm.}$

Area total de transferencia del lado del aire/volumen total =  $690 \text{ m}^2/\text{m}^3.$

Relación área de aletas/área total = 0.795.

Area de flujo libre/área frontal = 0.697.

Espesor de la aleta metálica = 1.02 mm.

Conductividad térmica de las aletas (cobre) =  $385 \text{ W/m,}^\circ\text{C.}$

Longitud de aletas, l = 6.35 mm.

Lado del agua.

Dimensión externa de cada tubo aplanado: 22.1 mm x 3.05 mm.

Dimensión interna de cada tubo aplanado: 22.0 mm x 1.05 mm.

Area frontal asociada con un tubo:  $2,98 \text{ cm}^2.$

Dado que la viscosidad es la propiedad del aire que sufre mayor cambio con la temperatura, es necesario entonces calcular este valor para la temperatura media de trabajo de trabajo del colector, esto es,  $87.5 \text{ }^\circ\text{C.}$

Medidas realizadas en forma complementaria para establecer la relación entre la ganancia de temperatura del agua y el caudal a través de los intercambiadores demuestran la existencia de un punto de intersección entre las curvas (fig. 3).

Más allá de dicho punto, un incremento del caudal de agua favorece a la eficiencia de la placa colectora de referencia. En la fig. 4 se observa la dependencia de la diferencia media logarítmica de la temperatura, en función del caudal

másico de agua. Para pequeños caudales, la Diferencia Media Logarítmica de Temperatura permanece prácticamente constante con tendencia a decrecer con el aumento de caudal.

## CONCLUSIONES.

La asociación a la placa colectora de un elemento tal como metal desplegado (aún sin pintar de negro) sugiere la posibilidad de disminuir la superficie de colección, esto es, compactar el subsistema adecuadamente obteniéndose mayor rendimiento en comparación con la placa plana convencional. Sin embargo, lo importante en esta consideración es que el metal desplegado no implica un costo considerable, ni aumento de peso importante, en contraste con la utilización de aletas, analizadas su aplicación en un trabajo anterior. Las ventajas del metal desplegado sobre las aletas es entonces evidente, no justificando el uso de las mismas por un problema de costo de mano de obra y tiempo de ejecución.

El intercambiador compacto a utilizar exige en vista de los resultados experimentales un cálculo cuidadoso, aunque en términos generales se hace absolutamente necesario reformular su tamaño pues la mayor parte del intercambio térmico se produce en la parte superior de él. En otras palabras, si se disminuye su altura se logrará una mayor eficiencia de intercambio pues el aire se moverá más rápidamente. Otro efecto, secuela de la disminución de altura es la ausencia de expansión adiabática del aire causando del enfriamientos indeseables en la zona crítica de intercambio. Pero, utilizar un intercambiador compacto de menor altura tiene otra consecuencia importante: su menor costo.

La diferencia media logarítmica de temperaturas en función del caudal muestra en principio que resulta insustancial el bombeo forzado para Re bajos, no así la convección forzada del

aire, la cual por razones de índole práctica y de información experimental su circulación forzada resulta por demás justificada.

La acumulación térmica resume un importante adelanto pues el tanque plástico descrito anteriormente reúne requisitos valiosos que justifican con plenitud su incorporación:

- bajo costo.
- peso reducido.
- resistencia aceptable a presiones normales de trabajo.
- paredes aislantes térmicas.
- no requiere mano de obra especializada.
- aceptable vida útil.
- menores espesores de aislación.

Todos los aspectos considerados hasta aquí muestran la tendencia hacia el logro de los objetivos propuestos en este trabajo y otros anteriores, esto es, desarrollar sistemas de calentamiento de agua para zonas de baja temperatura de bajo costo, compactos, livianos, confiable sin que ello conspire con su eficiencia.

## NOMENCLATURA.

- S: Radiación solar ( $W/m^2$ ).
- f: producto absorberancia-transmitancia.
- $U_L$ : coeficiente de pérdidas del colector.
- $t_p$ : temperatura de placa.
- t: temperatura del aire a la distancia x, medida desde la base del colector.
- $h_c$ : coeficiente de transferencia entre la placa y el aire.
- $h_r$ : coeficiente de transferencia entre la placa superior y la superficie inferior.
- E: factor de emitancia.
- $h'_c$ : coeficiente de transferencia entre el aire y las paredes.

$h_A$ : coeficiente de transferencia entre el intercambiador y el agua.

St.Pr: producto Stanton-Prandtl (Parámetros adimensionales.)

#### AGRADECIMIENTOS.

Los autores de este trabajo agradecen la colaboración prestada por el INENCo Unidad de Investigación Catamarca, a la facultad de Ciencias Agrarias de la UNCa y en forma especial al apoyo brindado por Vialidad Provincial de Catamarca.-

#### Bibliografía.

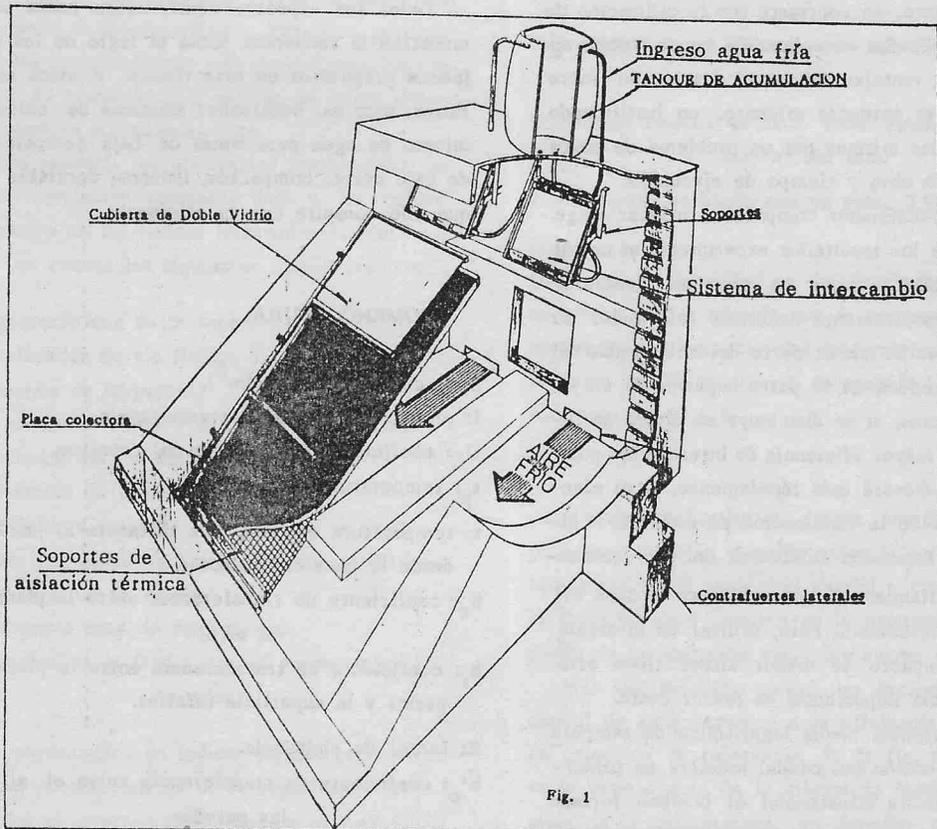
G. Ahumada, A. Iriarte, A. Amaya. Uso de intercambiadores compactos aire-líquido en calentadores solares de agua. ASADES, 1984.

A. Iriarte y otros. Calentador solar de agua con intercambiador aire-agua en circulación natural. ASADES, 1981.

S. Chiabrera y otros. Ensayo de colectores y calefones solares en el banco de pruebas de la CNIE. ASADES, 1980.

A. Whillier. Calentadores solares de aire pintados de negro de diseño convencional. Solar Energy. 1964.

W. Kays, L. London. Compact Heat Exchangers. Mc Graw Hill. 1964.



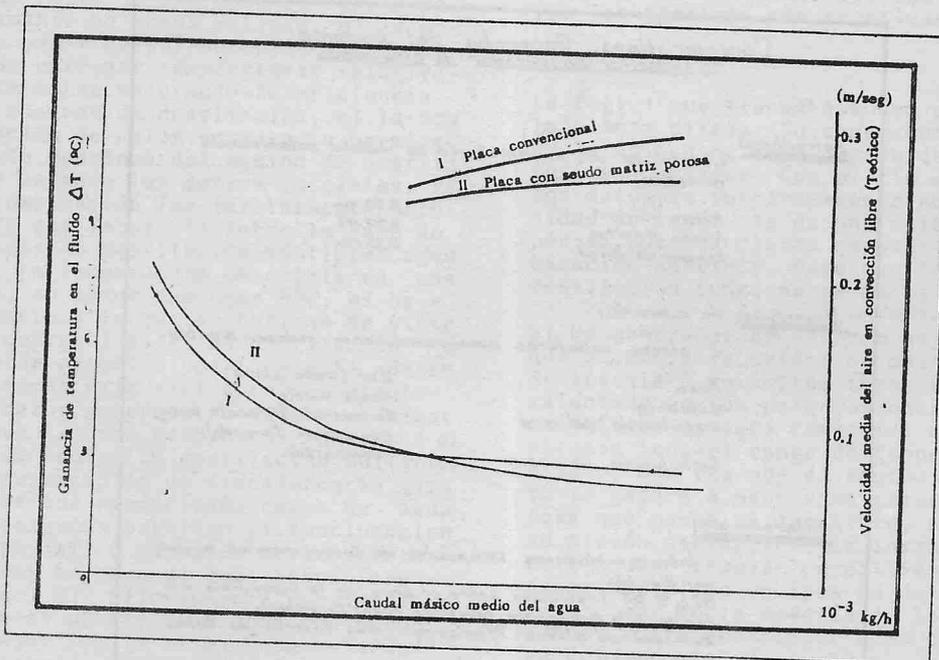
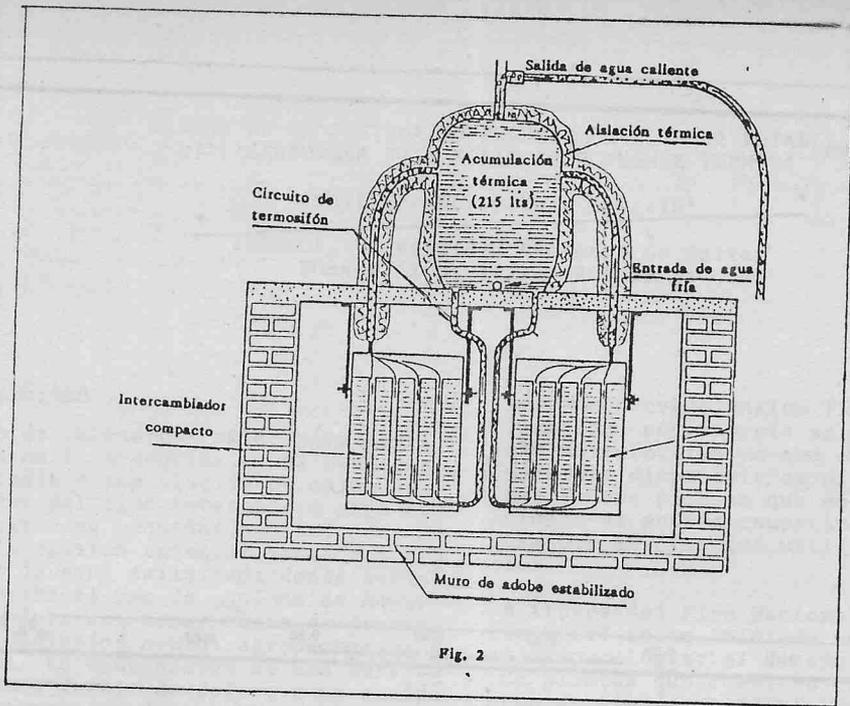


Fig. 3

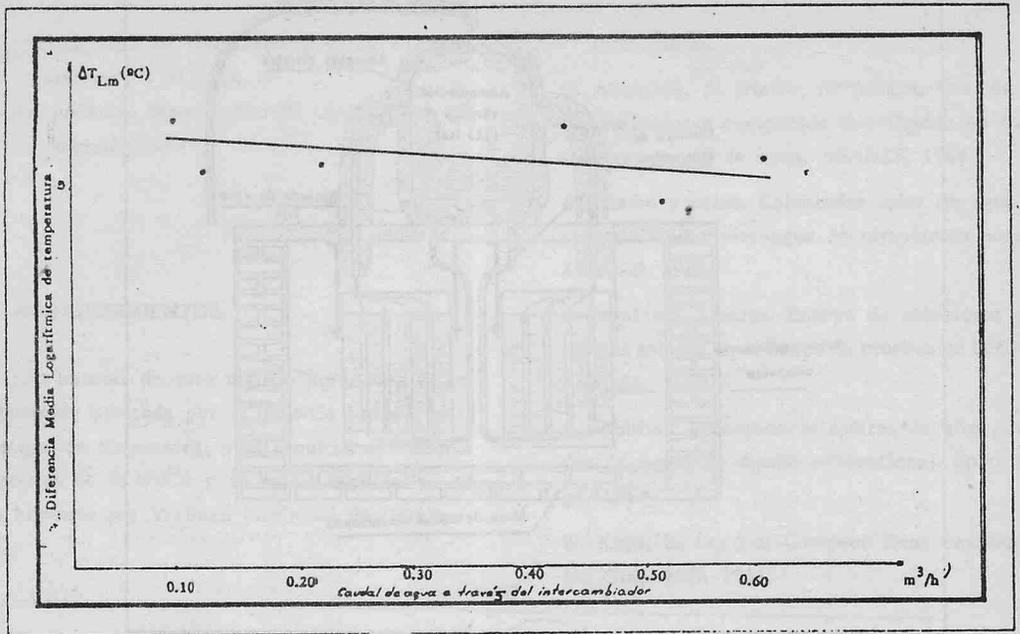


Fig. 4

### Características Generales del sistema Colector Calentador de aire-agua

#### Estructuras:

Construida en mampostería de adobe estabilizado revestida a la Cal.

Altura Máxima	2,50 m.
Ancho Máximo	2,50 m.
Espesor de Pared	0,35 m.

#### Superficies de colección:

2 placas colectoras operacionalmente independientes.

Área	2 m <sup>2</sup> (cada placa)
Cubierta	doble Vidrio
Circulación del aire	Termosifón (Previsto para Convección forzada).
Circulación del agua	Termosifón

#### Intercambio:

2 intercambiadores Compactos de Cobre, móviles e independientes.

$A_f/A_s \approx 0,8$  (Relación entre el área de la superficie alveolar y la superficie total de transferencia).

Densidad de aleros: 8/pulgadas; tres hileras de tubos aplanados.

#### Acumulación:

tanque plástico cilíndrico de 215 lbs. de capacidad  
Aislación: 10 cm de lana de vidrio  
Temperatura máxima del agua: 44  $^{\circ}\text{C}$ .