

# CALENTAMIENTO DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA SOLAR CON PANELES TIPO CELDAS HEXAGONALES

Segundo R. Chicaiza Tayupanta [segchicaiza@unita.edu.ec](mailto:segchicaiza@unita.edu.ec)  
Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad Tecnológica América UNITA  
Oriente 536 y Guayaquil, Quito, Ecuador

## Resumen

En los sistemas de calentamiento, a más de considerar la energía solar como una alternativa a las energías convencionales, y en vista de que es una energía que no contamina el aire y es de bajo costo entre otras ventajas, se propone optimizar su utilización en el proceso de calentamiento de agua, adaptando transformaciones fundamentales en el panel colector solar. El objetivo del presente trabajo es por lo tanto, diseñar un panel colector de energía solar que permita la mayor concentración de rayos solares, evitando que los mismos por reflexión sean proyectados al medio ambiente. El diseño del sistema de calentamiento consiste en incorporar al panel solar convencional, celdas hexagonales de vidrio, que el rayo solar reflejado por incidencia primaria sea captado por la celda y orientado su reflexión hacia el panel solar. Se modeló el sistema considerando como variables: el espesor del vidrio, el alto de la celda hexagonal y la arista del hexágono acorde con la posición geográfica del Ecuador y en particular a la ciudad de Quito. El panel construido fue sometido a un proceso continuo de pruebas partiendo de condiciones ambientales con características de radiación difusa y radiación directa, variando la distancia entre la parte superior del colector y la base del depósito. Los resultados promedio de temperatura, obtenidos en condiciones próximas de radiación sobre los paneles convencionales, determinaron el rendimiento del equipo.

## FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La duración de la insolación y la intensidad de la radiación solar, sea directa o difusa, dependen localmente de la estación del año, de las condiciones del tiempo y de la situación geográfica. Por lo que para Quito se tiene una radiación global de  $4\,962\text{ W/m}^2$ , valor que permitirá establecer la tasa real de calor absorbido por el panel.

La medición práctica de la radiación la realiza el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) con la utilización de los siguientes instrumentos: pirheliómetro que mide la radiación directa del sol, piranómetro que mide la radiación difusa y el heliógrafo que mide la “heliofanía” o el tiempo que el sol ha brillado sin presencia de nubes u otros obstáculos entre el sol y el sitio de observación. Con los parámetros de radiación y la probabilidad de insolación que es: la exposición del sol en un determinado tiempo, se puede comprobar en el presente trabajo, que aún cuando se tenga una probabilidad de insolación inferior al 20%, se obtendrá efectivamente el calentamiento del agua. Los datos proporcionados por el INAMHI determinan que para Quito la probabilidad anual de insolación corresponde a 2040 horas. La temperatura, parámetro de diseño para el panel solar, corresponde a un promedio anual de  $13,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para el sector en tratamiento.

## SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA

Las recomendaciones de los investigadores referente al mayor rendimiento del efecto del principio de “termosifón”, que determina la pérdida del peso del fluido por el incremento de la temperatura, establecen que la distancia entre la parte superior del colector y la base del depósito  $H$  (Fig.1) puede variar desde cero hasta 0,6 m, con un rendimiento que va del 40% al 85%, lo que ocurre cuando el flujo del agua es óptimo. Estas recomendaciones han sido comprobadas experimentalmente (D. Farrington, 1986) obteniéndose los siguientes resultados:

Temperatura acumulada, $^{\circ}\text{C}$	Altura $H$ , m	Rendimiento, %
18,7	0	43,88
35,27	0,6	82,75
25,2	0,8	59,13

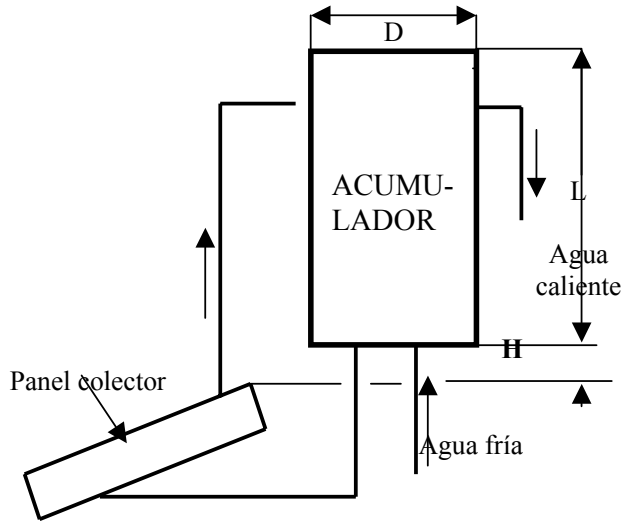


Fig. 1. Esquema del sistema de calentamiento

Los valores tabulados corresponden únicamente al panel de 20 cm de espesor, sin embargo la comprobación experimental de los valores teóricos se ha desarrollado con paneles de 30 cm y 40 cm.

### PANEL COLECTOR CONVENCIONAL Y EFECTO INVERNADERO

En la determinación de la temperatura que alcanza un panel colector convencional, se considera el valor de la radiación global en un día solar medio y tomando en cuenta las pérdidas de transmisión de la luz en los vidrios, 0,88% en 7 mm y 0,91% en 2 mm de espesor, igual a 661,6 W/m<sup>2</sup>. Asumiendo que esta radiación es la que recibe directamente el panel colector, entonces se puede calcular la temperatura con la siguiente relación (N. Ozisik, 1977):

$$q = \xi \sigma (TD)^4 \quad (1)$$

Donde:  $q$  = tasa de transferencia de calor por unidad de área,  $\xi$  = Emisividad de la superficie (0,92),  $\sigma$  = Constante de Boltzman ( $5,6697 \times 10^{-8}$  W / m<sup>2</sup>K),  $TD$  = Temperatura final placa colectora en °C. Por lo tanto la temperatura teórica que alcanzaría la placa colectora es sería de:  $TD = 62,59$  °C.

En este sistema también se debe considerar el calor que se genera por “efecto invernadero” y se utiliza la ecuación de Ozisik que modela matemáticamente el esquema de la figura 2.

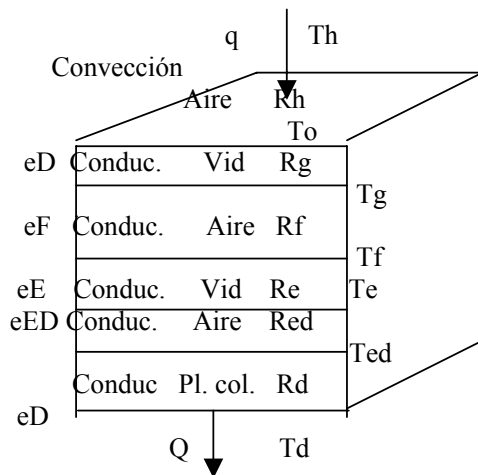


Fig.2 Modelación de la ecuación de Ozisik

De donde:

$$Q = \frac{Td - To}{Rh} = \frac{To - Tg}{Rg} = \frac{Tg - Tf}{Rf} = \frac{Tf - Te}{Re} = \frac{Te - Ted}{Red} = \frac{Ted - Td}{Rd} \quad (2)$$

En la que la resistencia de cada elemento se define como:  $R_h = 1/AKH$ ;  $R_g = eG /AKG$ ;  $R_f = eF /AKF$ ;  $R_e = eE/AKE$ ;  $R_{ED} = e_{ED}/AK_{ED}$ ;  $R_D = e_D/AK_D$ . Por lo tanto, la tasa total de flujo de calor será:

$$Q = \frac{Th - Td}{R} \quad (3)$$

Y la resistencia total:  $R = R_h + R_g + R_f + R_e + R_{ed} + R_d$  (4)

Si se define  $U = 1/AR$  y  $q = Q/A$ , entonces:  $Q = U (Th - Td)$  (5)

Los valores de cada uno de los parámetros indicados son los siguientes:  $K_H = 30,6 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $eG = 0,002 \text{ m}$ ,  $KG = 1,18 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $eF1 = 0,1 \text{ m}$  (panel de 20 cm.),  $eF2 = 0,2 \text{ m}$  (panel de 30 cm.),  $eF3 = 0,4 \text{ m}$  (panel de 40 cm.),  $eE = 0,004 \text{ m}$ ,  $KE = 1,18 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $e_{ED} = 0,002 \text{ m}$ ,  $K_{ED} = 0,0298 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $e_D = 0,0004 \text{ m}$ ,  $k_D = 45 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Con los datos anteriores, se calcula la tasa de calor que circula por cada panel, y se obtienen los siguientes resultados:

$q_1 = 10,23 \text{ W/m}^2$  para el panel de 20 cm .  $q_2 = 5,61 \text{ W/m}^2$  para el panel de 30 cm y  
 $q_3 = 3,87 \text{ W/m}^2$  para el panel de 40 cm de espesor.

El calor total  $q_{ri}$  que se tiene en el panel es la suma del calor por radiación  $q_r$  y el calor por el efecto invernadero  $q_i$  en cada panel. Por lo tanto los valores totales de temperatura en la placa colectora determinados por la ecuación:

$$T_D = 66,17 \times \sqrt[4]{q_{ri}} \quad (6)$$

para los paneles son:  $T_{D1} = 64 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{D2} = 63,3 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $T_{D3} = 63,1 \text{ }^\circ\text{C}$

### TEMPERATURA DEL AGUA EN EL CENTRO DE LA TUBERÍA SECUNDARIA

La tubería seleccionada para el sistema de calentamiento del agua es de “cobre” y tiene los siguientes parámetros:

$R1$ , radio interior, igual a 6,25 mm . -  $R2$ , radio exterior, igual a 8,1 mm . -  $T_D$ , temperatura en el panel colector, en la zona de contacto con la tubería. -  $T_a$ , temperatura real del agua en el centro de la tubería. -  $R_a$ , resistencia térmica del agua. -  $R_c$ , resistencia térmica de la tubería de cobre. -  $R_D$ , resistencia térmica del aire que fluye a través de la placa colectora.

Despejando la ecuación (5), se obtiene la temperatura del agua en el centro de la tubería:

$$T_{ai} = T_{Di} - q_{ri} / Un \quad (7)$$

Donde:  $Un = Ua + Uc + Ud$ , resistencia térmica de cada uno de los elementos, respectivamente:

Resistencia térmica del agua:  $Ua = 1 / 2\pi R1 L h_a$ . Con  $h_a = 1,217 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ , para una velocidad del agua de 1,25 m/s<sup>2</sup> (Ozisik, 1977). Entonces:  $Ua = 19,022 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$ . (8)

La resistencia térmica del cobre;  $Uc = (1/2\pi L Kc) \times \ln R2 / R1$ ; Con  $Kc$ , coeficiente de conductividad térmica = 0,65 W/m<sup>2</sup> °C y  $L$ , largo del tubo = 1,1m . Entonces:  $Uc = 0,0577 \text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$  .

Resistencia térmica de la placa colectora;  $UD = 1/ 2\pi R2 L hD$ , con  $hD = 2h1$  y el número de Nusselt  $Nul = h1xL / kD = 0,332 Re^{1/2} Pr^{1/3}$ .

De la ecuación anterior:  $Re$ , número de Reynolds =  $\frac{ve * l}{\nu_i}$  (9)

y se determina con:  $ve$ , velocidad del aire caliente sobre la placa colectora =  $0,072\text{m/s}$ ,  $\nu_i$ , viscosidad cinemática del aire =  $1,956 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . Además, la relación incluye:  $kD$ , coeficiente de convección del aire =  $0,031 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $Pr$ , Número de Prandtl =  $0,692$ ;  $l$ , Región térmica e hidrodinámica desarrollada =  $0,55 \text{ m}$ , con lo que obtiene el valor de  $hD = 1,447 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$ .

Entonces:  $UD = 31,425^\circ\text{C/W}$

Los valores así obtenidos permitirán calcular la temperatura del agua en cada panel, obteniéndose los siguientes resultados:  $Ta1 = 42,62^\circ\text{C}$  para el panel de  $20 \text{ cm}$ .  $Ta2 = 42,00^\circ\text{C}$  para el panel de  $30 \text{ cm}$  y  $Ta3 = 41,80^\circ\text{C}$  para el panel de  $40 \text{ cm}$ .

Estas temperaturas calculadas son “ideales” pues se considera con “radiación directa” al 100%, sin embargo las temperaturas reales son menores debido a las pérdidas que se generan por el fenómeno de “estratificación”, que se produce en el tanque acumulador. Sin embargo se ha considerado los estudios realizados por Levan Thompson Y J. Sliswinshi acerca de los parámetros que intervienen en el fenómeno de estratificación para obtener un buen efecto y se ha los siguientes aspectos:

El ingreso del fluido caliente debe ser por la parte superior del tanque y la del fluido frío por el fondo. Disminuir en lo posible la velocidad de ingreso tanto del fluido caliente como del frío, debido a que esta velocidad está relacionada con el número de Reynolds. Aumentar la diferencia de temperaturas entre el fluido almacenado en el tanque y el fluido que ingresa, lo que implica un aumento del número de Grashof. Escoger una relación  $L/D$  mayor que 2, donde  $L$  es la altura del depósito y  $D$  es el diámetro del mismo. Disminuir la conducción térmica a través de las paredes del tanque para lo cual el material debe ser de baja conductividad térmica y aislar el tanque de almacenamiento del agua.

### PANEL COLECTOR CON CELDAS HEXAGONALES

La diferencia en su construcción del panel colector convencional con el tipo celdas hexagonales radica fundamentalmente en insertar un panel en forma de colmena con paredes hexagonales de vidrio en el espacio que se genera el efecto invernadero, como se esquematiza en la figura 3. Esta celda hexagonal, con similar comportamiento al plástico, absorbe la emisión infrarroja en un porcentaje mayor en relación el del fundamento del efecto invernadero. El funcionamiento de este sistema está relacionado con el diámetro de las celdas y su altura. Por esta razón se han realizado tres modelos experimentales teniendo en cuenta el diámetro de  $17,6 \text{ cm}$  constante y la variación de la altura a  $20 \text{ cm}$ ,  $30 \text{ cm}$  y  $40 \text{ cm}$ .

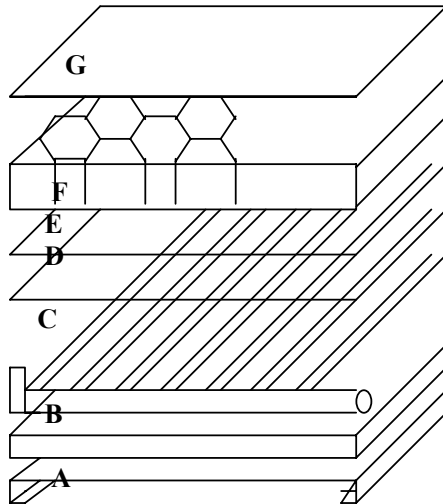


Fig. 3. Esquema del colector antirradiación

Donde  $A$  = Soporte de aislante,  $B$  = Aislante térmico,  $C$  = Intercambiador de calor,  $D$  = Placa colectora principal,  $E$  = Lámina de vidrio claro,  $F$  = Panel antirradiación,  $G$  = Lámina de vidrio claro.

## PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Los ensayos realizados sobre el panel tipo celdas hexagonales, 13 por cada panel durante doce horas y manteniendo constante el caudal 10 L/min. determinaron fundamentalmente la temperatura a la salida del acumulador, que en condiciones similares de radiación permitirán comparar y establecer el rendimiento del panel colector propuesto, con el convencional.

*Resumen de las tablas de pruebas*

Panel cm	$P.T.A.A$	$P.R.Dr$	$P.R.Df.$	$P.T.A.R$	$P.T.A.$
20	35,27	23,7	76,3	14,1	16,54
30	32,17	33,3	66,7	14,7	18,17
40	28,98	23,02	76,98	14,25	17,16

Las siglas de la tabla tienen la siguiente correspondencia:

$P.T.A.A$  = Promedio de temperatura del agua en el acumulador, °C, -  $P.R.Dr.$  = Promedio de radiación directa, % INAMHI, -  $P.R.Df.$  = Promedio de radiación difusa, % INAMHI, -  $P.T.A.R.$  = Promedio de temperatura del agua en la red, °C, -  $P.T.A.$  = Promedio de la temperatura ambiente, °C

## RESULTADOS

Considerando que la radiación total o global es la suma de la radiación directa y difusa, se procede al análisis y determinación de temperaturas.

Para el panel de 20 cm, se obtiene una temperatura ideal a la salida del colector de 64 °C con una radiación directa del 100%, sin embargo, considerando los datos del INAMHI los días de pruebas reflejaron valores promedios de 23,7% de radiación directa, obteniéndose aproximadamente por este porcentaje una temperatura de 15,17 °C. Por otro lado, la temperatura que se obtiene por la radiación difusa, considerando para su cálculo en días nublados, 100% de radiación difusa y una tasa de transferencia de calor  $q$  de 100 W/m<sup>2</sup> (Sabady, 1982), se obtiene para 76,3 % de radiación difusa un valor de  $q$  aproximado de 132 W/m<sup>2</sup>.

Con similar criterio de Sabady, que considera que para 523,61 W/m<sup>2</sup> se tiene una temperatura de 37 °C, se calcula la temperatura en radiación difusa y se obtiene igual a 9,26 °C. Por lo tanto, la suma de temperaturas por radiación difusa y directa será 24,43 °C.

Mediante un análisis igual se obtienen las temperaturas globales para los paneles de 30 y 40 cm, resumiéndose en la siguiente tabla:

Panel cm	$T.T$	$PRDi$	$PRDf$	$TRDi$	$TRDf$	$TG$
20	64	23,7	76,3	15,17	9,26	24,43
30	63,3	33,3	66,7	21	10,6	31,6
40	63,1	23,02	76,98	14,53	9,18	23,71

Las siglas utilizadas en la tabla corresponden a:

$T.T.$  = temperatura teórica, en °C -  $PRDi$  = Promedio de radiación directa, en % -  $PRDf$  = Promedio de radiación difusa, en % -  $TRDi$  = Temperatura por radiación directa, °C -  $TRDF$  = Temperatura por radiación difusa, °C -  $TG$  = Temperatura global o total, °C.

## **CONCLUSIONES**

En los sistemas experimentales de 20; 30 y 40 cm, el de mayor rendimiento es el de 20 cm.

Los valores de temperatura global, determinados teóricamente de acuerdo con los resultados presentados en las tablas, son inferiores en aproximadamente 9 °C a los valores experimentales obtenidos el modelo propuesto con celdas hexagonales, obteniéndose un factor de diferencia de 1,4 aproximadamente.

Estos valores inferiores no consideran, los de las pérdidas que se generan en el tanque acumulador, lo que ocasionaría una diferencia significativa entre los dos modelos.

Además se compararon experimentalmente los dos sistemas: el propuesto y uno similar de propiedad de los Padres Combonianos Carcelén Alto. En similares condiciones ambientales y simultáneamente se obtuvo como temperatura final del convencional igual a 30 °C, y del tipo celdas hexagonales igual a 32 °C, a pesar de corresponderle un área de captación en el convencional de 1,36 m<sup>2</sup> y al de celdas hexagonales de 1 m<sup>2</sup>. Por lo que el factor que diferencia las dos propuestas permanece en una relación en este caso de áreas, de 1,36/1 siendo igual a 1,36.

## **REFERENCIAS**

- Farrington, D., Uso directo de la energía solar, Ed. Española, Madrid, 1997.  
Geografía energética del Ecuador, Quito, julio 1987.  
Kadamsy V., Conversión de energía, Limusa, México D.F.,s/f.  
Ozisik, N., Transferencia de calor, McGraw-Hill, México, 1977.  
Primeras jornadas de energía solar del Ecuador, Quito, 25 al 29 de junio de 1984.  
Sabady, P, Arquitectura solar, CEAC, Barcelona, España, 1982.  
Sabady, P., Práctica de la energía solar, CEAC, Barcelona, España, 1983.