

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALENTADOR SOLAR DE AGUA OPERANDO POR TERMOSIFÓN

RESUMEN

En este artículo se presenta el proceso de diseño y construcción de un colector solar para calentamiento de agua de consumo doméstico, operando por termosifón. El diseño matemático, la selección de los materiales y el proceso de construcción, con base en las normas técnicas colombianas NTC 4368 y NTC 2461, se describen en este trabajo.

PALABRAS CLAVES: Colector solar, Termosifón.

ABSTRACT

In this paper, the design process and construction of a solar collector for heating of domestic use water operating by thermosiphon is presented. The mathematic design, materials selection and construction process, taking in account Colombian Technical Standards NTC 4368 and NTC 2461, are described in this work.

KEYWORDS: Solar collector, Thermosiphon.

1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento solar de agua para consumo doméstico, como alternativa para sustituir los calentadores tradicionales (eléctricos, a gas, etc), es una opción atractiva, si se toma en cuenta las bajas temperaturas necesitadas (40°C a 60°C), además, desde el punto de vista de ahorro energético es la opción más favorable, ya que en estos sistemas, la fuente de calor es la radiación solar, la cual sustituye los combustibles fósiles ó la electricidad.

Los sistemas solares para calentamiento de agua están constituidos por dos elementos principales [3]:

- *Colector*, encargado de recibir y transformar la energía incidente durante el día.
- *Tanque de almacenamiento*, aislado para el agua que ha sido calentada.

Existen dos tipos de sistemas para el calentamiento, los cuales se diferencian en la forma de circulación del agua: Sistema de circulación natural y Sistema de circulación forzada [3].

El colector, para el que se describe el diseño y construcción, opera por circulación natural, es decir, la circulación del agua entre colector y tanque, es producida por el principio de termosifón, presentado cuando, una masa de fluido es calentada, a través de la base de un recipiente, es decir, el agua al entrar al colector por la parte inferior es calentada, lo cual disminuye su densidad debido al incremento de la temperatura, entonces, la columna de agua fría en la tubería de retorno al colector y la columna de agua caliente dentro del mismo, se desequilibran haciendo que por gravedad la primera baje y empuje el agua caliente hacia el tanque.

La figura 1, muestra un esquema de un colector de este tipo.

JUAN CARLOS BURBANO J.

Ingeniero Mecánico, MSc.
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
jburbano@utp.edu.co

ÁLVARO HERNÁN RESTREPO

Ingeniero Mecánico, MSc.
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
arestrep@utp.edu.co

OSCAR JULIAN SABOGAL F.

Ingeniero Mecánico
Universidad Tecnológica de Pereira
asabogal@telecom.com.co

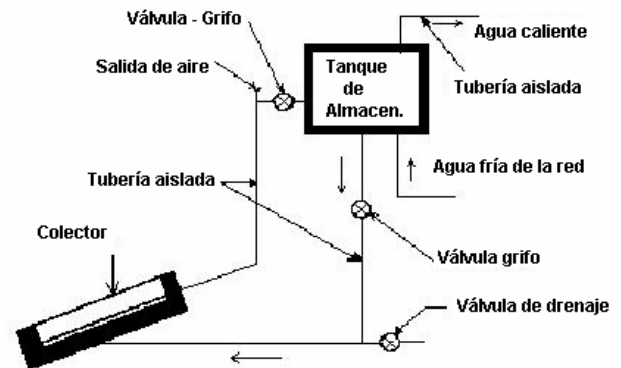


Figura 1. Distribución de un colector de circulación natural. [3]

Las viviendas que pueden utilizar este tipo de colector y para las cuales se realizó el diseño, son de tipo unifamiliar y la utilización de agua caliente es sólo para cubrir las necesidades básicas del baño y la cocina, por lo cual el consumo de agua caliente por persona, a una temperatura de 50°C, es de alrededor de los veinte (20) litros. La temperatura es alta para permitir que se mezcle con el agua fría proveniente de la red de acueducto, y permitir un mayor rendimiento del agua caliente almacenada en el tanque acumulador del sistema. El promedio de personas por vivienda en el país, de acuerdo al informe de reactivación social del Departamento Nacional de Planeación del año 2003, es de 3,9 personas [13]; tomando en cuenta este dato se asumirán 4 personas por cada vivienda para el diseño del colector.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL CALENTADOR SOLAR DE AGUA

Los componentes de un calentador solar de agua para uso doméstico básicamente son:

Placa de Absorción: Es el elemento encargado de absorber la energía disponible del sol y transformarla en

energía térmica para luego ser transferida al agua, generalmente esta hecha de un metal (cobre, acero, aluminio, etc). Las normas técnicas colombianas NTC 4368 y NTC 2461 [5], establecen que la placa de absorción deberá fabricarse en materiales que posean una conductividad térmica mayor a $125 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ y una absorptancia mayor a 0,9 y además, debe estar fabricada de acero, cobre o aluminio, y su espesor mínimo es 0,5 mm, 0,2 mm y 0,4 mm respectivamente según el material.

Cubierta: Es una lámina de material transparente montada en frente del absorbedor, en la parte superior del colector, creando un espacio (2 a 2.5 cm), entre la placa y ella. La función de la cubierta es permitir el paso de la radiación solar absorbida por la placa, igualmente disminuye la cantidad de radiación infrarroja que se escapa al exterior, disminuyendo de esta forma las pérdidas del colector. Tomando en cuenta estas funciones, el material utilizado en la cubierta debe poseer las siguientes características [3]: Elevada transmitancia dentro del espectro solar; Baja transmitancia para longitudes de onda largas (mayores a $3 \mu\text{m}$) y elevado índice de reflexión, además, bajo índice de absorción en cualquier longitud de onda.

Conductos para la circulación del fluido: El colector solar de placa plana debe poseer una serie de conductos por los cuales circula el fluido de trabajo, el cual recibe y transporta la energía absorbida por la placa hacia el tanque de almacenamiento. Existen dos formas de circulación del fluido, de Serpentin o de tubos colectores e igualmente existen diversas formas de disposición de la unión placa-conductos [11].

Aislante Térmico: Es el punto básico para disminuir las pérdidas de calor por conducción en la parte inferior y lateral del colector. Las características que debe poseer el material utilizado para ser un buen aislante son: No debe deteriorarse, gasificarse o vaporizarse a temperaturas alrededor de los 200°C , resistencia a la repetición de los ciclos térmicos entre 35°C y 120°C , baja conductividad térmica (menor de $0,040 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ en el rango de 20 a 120°C), no debe desplomarse, compactarse o adherirse cuando se repiten los ciclos térmicos y de humedad y no debe absorber o retener agua.

Caja, Juntas y Selladores: La caja es el elemento que soporta todos los componentes del colector, la cual impide que la humedad, polvo y aire penetren por el colector y disminuyan su eficiencia. Para su diseño se deben tomar en cuenta tres elementos: hermeticidad para los aislantes y la placa de absorción, posibilidad de fijación del colector a la estructura donde va ser instalado y apoyo seguro para la cubierta. Los materiales para su construcción son muy variados: aluminio, lámina galvanizada, madera, termoplásticos para alta temperatura o fibra de vidrio laminada.

La completa hermeticidad del colector se consigue con un perfil que rellene las juntas, como un buen sellador, el cual debe cumplir con las siguientes características: resistencia a la radiación ultravioleta y a la intemperie, no volverse quebradizo ni endurecerse, buena adhesión con

las distintas superficies, resistencia a la repetición de los ciclos térmicos y estirarse y comprimirse en forma adecuada para soportar las dilataciones y contracciones debidas a la diferencia entre los coeficientes de dilatación térmica de los elementos.

Tanque de Almacenamiento: El calor puede ser almacenado en el tanque por circulación directa entre el colector y el tanque ó el agua calentada en el colector puede circular por un serpentín dentro del tanque, transfiriendo así calor al agua que se encuentra dentro del mismo [7]. El mayor requerimiento técnico del tanque es su total aislamiento, con el fin de conservar la temperatura requerida en el agua. Debe cumplir con las siguientes especificaciones [13]: Evidenciar sellamiento, aislamiento y todas las precauciones de intemperismo, no deben ocurrir fugas de agua ni de vapor de agua, debe poder operar a presiones de red de distribución de acueducto y debería ser ensayado a 200 psi o 1378200 Pa durante 5 horas, disponer de los elementos que alivien al tanque y sus circuitos asociados de sobrepresiones originadas en golpes de presión de red hidráulica, adicionada a la presión por dilatación térmica del agua. La ubicación del tanque es importante, ya que de ésta, depende la eficiencia del termosifón y el evitar el fenómeno de flujo inverso.

3. DISEÑO DEL SISTEMA

Dimensionamiento Previo del Sistema

El parámetro más importante a determinar es el área de la placa de absorción, y el punto de partida para la evaluación de esta, es la carga térmica anual y la radiación promedio del lugar, de acuerdo con la siguiente expresión [11]:

$$A_C = \frac{L_{UA}}{hH_T} = \frac{\dot{Q}_{UA} + \dot{Q}_T}{h\bar{H}_T} \quad (1)$$

Donde:

A_C : área de la placa de absorción, [m^2]

L_{UA} : carga térmica mensual, [GJ/año]

\dot{Q}_{UA} : calor requerido para calentar el agua, [GJ/año]

\dot{Q}_T : Pérdidas en el tanque, [GJ/año]

η : eficiencia del colector (asumida)

\bar{H}_T : Radiación global promedio anual en la superficie inclinada, [$\text{kWh/m}^2\text{-día}$]

Para la evaluación de los términos de la expresión (1), se deben hacer las siguientes apreciaciones: 1) Se realizan los cálculos tomando en cuenta el promedio anual de la radiación solar, debido a la poca diferencia que se presenta entre cada uno de los meses. 2) El calentador será ubicado en la ciudad de Armenia, Quindío. 3) La inclinación del colector con respecto a la horizontal, es de cero grados, debido al sitio en el cual se hará el montaje y a que de esta manera la radiación incidente es mayor [11].

Para la radiación global promedio sobre la superficie (\bar{H}_T), se tomará como base, los datos registrados por el Manual de Radiación Solar en Colombia, en el municipio de Armenia, que para el caso de este trabajo, debido a la no inclinación del colector, se toma como el valor de H_T , el valor promedio de la radiación global sobre la superficie del colector, por tanto:

$$\bar{H}_T = H = 4,10 \text{ kWh/m}^2\text{-día} = 14,76 \text{ MJ/ m}^2\text{-día}$$

Para el dimensionamiento del colector y del tanque es necesario calcular la carga térmica mensual, la cual está conformada por el calor necesario para obtener los ochenta litros diarios de agua a 50°C, y las pérdidas en el tanque acumulador, de acuerdo con las siguientes expresiones [11]:

$$L_{CA} = \dot{Q}_{UA} + \dot{Q}_T \quad (2)$$

$$Q_{UA} = \dot{m} N C_p (T_f - T_o) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_T = (UA)_T \times (T_f - T_a) \quad (4)$$

Donde:

- \dot{m} : consumo diario de agua caliente en kg/día
- N: días del año
- C_p : Calor específico del agua en J/kg. °C
- T_f : temperatura final del agua en °C
- T_o : temperatura inicial del agua, aproximadamente tres grados menor a la temperatura ambiente ($T_o = 18^\circ \text{C}$)
- T_a : temperatura ambiente en °C

En un principio se supondrá que las pérdidas en el tanque son despreciables para el cálculo del área del colector, por lo cual sólo se necesita conocer la carga para el calentamiento del agua, entonces:

$$Q_{UA} = 80 \times 365 \times 4190 \times (50 - 18) = 3915,136 \frac{\text{MJ}}{\text{año}}$$

Se requieren entonces 3915,136 MJ anuales para satisfacer las necesidades de agua caliente de la vivienda, sin tener en cuenta las pérdidas presentadas en el tanque. Para la determinación del área de la placa de absorción se tiene que de acuerdo con la expresión (1), los datos obtenidos anteriormente y suponiendo una eficiencia media del cincuenta por ciento ($\eta = 0,5$), se obtiene:

$$A_C = \frac{3915,136 \frac{\text{MJ}}{\text{año}}}{0,5 \times 14,76 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{ dia}} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}}} = 1,454 \text{ m}^2$$

Se requerirá entonces un colector cuya placa de absorción sea de 1,5 m² para calentar el agua, teniendo en cuenta que aún no se han calculado las pérdidas en el tanque.

Para el tanque de acumulación, se utilizará un tanque cilíndrico, por facilidad de construcción, tanto del tanque como de los soportes del mismo, la altura se supondrá de 80 cm. La relación óptima entre área y volumen es [11]:

$$V_T = 66,2 \frac{l}{\text{m}^2} \times A_C \quad (5)$$

Por tanto, el diámetro del tanque será de 40 cm y su altura de 80 cm, con estos valores el volumen del tanque será de:

$$V_T = \frac{\pi D^2}{4} h = \frac{\pi (0,40)^2}{4} (0,80) = 0,100 \text{ m}^3 = 100 \text{ l} \quad (6)$$

Su área exterior, entonces es:

$$A_T = \frac{\pi D^2}{2} + \pi D h = \frac{\pi (0,40)^2}{2} + \pi (0,40)(0,80) = 1,257 \text{ m}^2$$

Conociendo el volumen del tanque y sus dimensiones, se puede entrar a calcular las pérdidas de calor que se producen en el mismo, para recalculer así el área del colector.

Para la evaluación de pérdidas de calor en el tanque, se sigue el procedimiento de Winn, citado por OROZCO [12], en donde el coeficiente de pérdidas en el tanque, utilizando el criterio de ASHRAE, es:

$$U_T = 763,346 \frac{J}{\text{m}^2 \text{ h}^\circ \text{C}} = 0,212 \frac{W}{\text{m}^2 \text{ }^\circ \text{C}} \quad (7)$$

Por tanto, con base en la ecuación (4), el calor perdido en el tanque durante un año es:

$$Q_T = 243687637,363 \frac{J}{\text{año}} \quad (8)$$

Conocido el valor de las pérdidas en el tanque se debe recalculer el área del colector de acuerdo a la expresión (1). Por tanto:

$$A_C = \frac{3915,136 \frac{\text{MJ}}{\text{año}} + 243,688 \frac{\text{MJ}}{\text{año}}}{0,5 \times 14,76 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{ dia}} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{mes}}} = 1,544 \text{ m}^2$$

El área de la placa de absorción será la encontrada en un principio de 1,5 m², ya que la diferencia no es significativa y el costo es menor si se mantiene.

Selección de Materiales

Para la caja, tomando como base las recomendaciones dadas en el numeral 2 de éste trabajo, además de las dadas por la Norma Técnica Colombiana 4368, el material que se utilizará será lámina galvanizada calibre 18 (espesor=1,2 mm), la cual, además de tener un costo moderado presenta mejores propiedades para ser trabajada (doblada y soldada). A nivel comercial esta lámina se encuentra en dos dimensiones distintas, 1 x 2 m ó 1,22 x 2,44 m.

De acuerdo con la dimensión del área de la placa de absorción, bastará con una sola lámina de 1,22 x 2,44m, cuyo peso es 28,10 kg. Con la utilización de una sola lámina se evita un mayor proceso de manufactura.

El material que se utilizará como aislante en el colector será espuma de poliuretano, la cual es un material de fácil consecución y bajo costo, además el trabajo con la misma es sencillo. A nivel comercial se encuentra de tres formas

distintas: Láminas preformadas con dimensiones específicas, Spray expandible y Químicos básicos para ser mezclados. Esta última opción es la más económica y es la que se utiliza en este trabajo, las características promedio del poliuretano son: Densidad 70 kg/m^3 y Conductividad térmica 0.026 W/m K .

El espesor que se utilizará en la parte inferior del colector es de 4 cm, mientras que el espesor en los laterales será de 2 cm. Estos dos valores se han obtenido teniendo en cuenta las dimensiones de la caja y las necesidades a cubrir.

El material que constituirá la cubierta del colector es vidrio plano claro, ya que presenta buenas propiedades de resistencia a la degradación, una transmitancia aceptable y facilidad de manejo y adquisición. Tomando en cuenta las recomendaciones dadas por Orozco [11], de acuerdo con la temperatura esperada del agua, sólo se requiere de una cubierta, la cual tendrá un espesor de 4 mm, esta escogencia del espesor se hace arbitrariamente, basándose en los distintos ejemplos encontrados en el mercado, igualmente la distancia entre la placa de absorción y la cubierta, se estableció tomando en cuenta las recomendaciones de Orozco [11] y Hurtado [3], que será de 2.5 cm.

Para los sellos, el material seleccionado es una masilla elástica sellante y adhesiva, de un componente con base en poliuretano, que en el mercado se encuentra con el nombre de Sikaflex-1a, el cual cumple con todos los requerimientos mencionados en el numeral 2 y tiene un bajo costo.

La placa de absorción y conductos de circulación del agua, son la parte más importante del colector, por tanto no sólo se debe seleccionar el material, sino también la configuración que van a tener los conductos, con el fin de buscar una mayor eficiencia. Se seleccionará el aluminio debido a su buena conductividad térmica y su bajo costo.

El espesor que se utilizará para la placa será de acuerdo con lo recomendado por la NTC 4368, 0,5 mm, y el tipo de aleación es AA 8112 H-14. El acabado que se dará a la placa es pintura negra mate, para obtener así una mejor absorción.

La configuración de los conductos seleccionada es la conocida como tipo "sándwich". En este tipo de configuración, el agua se mueve entre dos placas de aluminio, separadas mediante platinas del mismo material, las cuales de acuerdo a la literatura, deben tener un espesor entre 3 y 5 mm. La selección de este tipo de configuración se basa en que de esta forma es mayor el área de contacto del agua con la placa de absorción, reflejándose esto en una mayor y más eficiente transferencia de calor de la placa al fluido. El sistema de circulación del agua será de tubos colectores, los cuales se unirán al "sándwich" creado con las láminas y las platinas. Otro factor importante a definir es la distancia entre los centros de los canales creados por las platinas, el cual, de acuerdo con Orozco [11], debe ser

aproximadamente de 15 cm. La figura 2, muestra una disposición de un colector tipo "Sándwich".

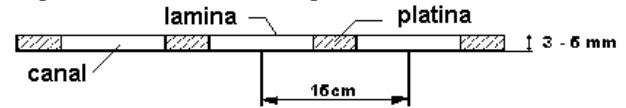


Figura 2. Disposición típica de un colector tipo "Sándwich"

Diseño Matemático del Colector

Para obtener valores promedio de los parámetros de funcionamiento del colector solar, se seguirá la metodología descrita por Manrique [7], la cual se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Suponer una temperatura promedio de la placa de absorción. (\bar{T}_p)
2. Calcular el coeficiente global de transferencia de calor (U_L)
3. Evaluar el factor de eficiencia del colector F' para la configuración geométrica.
4. Determinar el factor de remoción de calor F_R ó la temperatura del fluido a la salida (T_{fs}).
5. Calcular el calor útil (Q_u) en el colector y la eficiencia del mismo (?)
6. Verificar el valor de la temperatura de la placa (\bar{T}_p)
7. Repetir los pasos anteriores hasta que la temperatura supuesta y calculada sean iguales.

En los colectores solares, la superficie de la placa que no se encuentra en directo contacto con el agua, actúa como una superficie extendida (aleta), la cual transfiere calor hacia el fluido, pero igualmente se producen pérdidas por ella, el factor de eficiencia (F') pretende evaluar la eficiencia de la transferencia de calor desde toda la superficie hacia el fluido, y depende únicamente de la configuración geométrica y del valor del coeficiente de pérdidas.

En un colector tipo "sándwich" como es este caso se puede suponer que es toda la platina la que actúa como aleta, la determinación de este parámetro esta dada por la siguiente expresión:

$$F' = \frac{1}{U_L} \left\{ \frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{pD h_f} \right\} \quad (9)$$

Donde W es la distancia entre los centros de los canales, D es el ancho de los canales, D_i es el diámetro hidráulico del canal, h_f el coeficiente de transferencia de calor por convección hacia el fluido.

Para el cálculo de los parámetros necesarios, se utiliza la metodología y ecuaciones citadas por Orozco [11]. De esta manera se obtienen los siguientes resultados:

$$F' = 0,823$$

El factor de remoción es $F_R = 0,715$

El calor útil es: $Q_u = 837,936 \text{ W}$

La eficiencia del colector se determina mediante la relación entre el calor útil y la energía recibida, es decir:

$$h = \frac{Q_u}{I \times A_c} = \frac{837,936 W}{1093,333 \frac{W}{m^2} \times 1,5 m^2} = 0,5109 \quad (10)$$

Al verificar la temperatura promedio de la placa, de acuerdo con Manrique [7], ésta arrojó un valor de 328,56 K. Para el cálculo del coeficiente de convección placa-cubierta, se asumió una temperatura de placa de 55 °C, por tanto, los parámetros antes calculados se aceptan igualmente como promedios para el funcionamiento del colector, por lo tanto los parámetros son:

Ángulo de incidencia:	60°
Temperatura promedio de placa:	55,5°C
Coef. Global de transferencia de calor	5,832 W/m ² -K
Temperatura de cubierta:	32°C
Factor de eficiencia (F')	0,823
Factor de remoción de calor (F _R):	0,715
Calor útil (Q _u):	837,936 W
Eficiencia (?):	51,09%
Temperatura de salida del fluido (T _{fs}):	51,74°C

4. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

Para la construcción de la caja, se utilizó una lámina galvanizada calibre 18, de 1,22 m x 2,44 m. El aislante utilizado fue espuma de poliuretano, la cual se consigue en el mercado como dos líquidos A y B los cuales se deben mezclar hasta obtener una solución uniforme que se deposita en el molde, la cual se expande hasta obtener la forma del mismo. Para este caso se utilizaron 5 kilos de esta solución. Una fotografía del proceso de tallado del aislante se muestra en la figura 3.



Figura 3. Proceso de tallado del aislante

Dos aspectos básicos son los que se tuvieron en cuenta para la construcción del sistema placa-conductos, la difícil soldabilidad del aluminio y el pequeño espesor del mismo. Tomando en cuenta estos dos aspectos, varias pruebas realizadas y las sugerencias dadas por Cabirol [1] se decidió que la unión entre las dos placas y las platinas, sería atornillada y para el sellamiento lateral del “sándwich” y la unión del mismo a los tubos colectores se utilizó masilla sellante elástica.

Se usaron tornillos de 1/4” x 3/4” zincados de cabeza redonda. El número de tornillos utilizados de acuerdo a la presión sugerida por la UPME (1047432 Pa), se calcularon tomando en cuenta que el punto crítico es la lámina y el esfuerzo cortante que se produce en ella

alrededor de la arandela, y no el esfuerzo soportado por los tornillos.

Con el fin de mejorar la estanqueidad del sistema placa-platina alrededor de cada uno de los tornillos, se aplicó silicona para altas temperaturas, para con ella crear un empaque y obtener hermeticidad en cada punto, de acuerdo a lo mostrado en la figura 4:

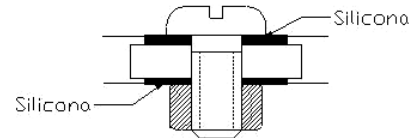


Figura 4. Esquema de la unión láminas platina

La figura 5 muestra el proceso de atornillado del colector.



Figura 5. Fotografía proceso de atornillado

Después de atornillar la unión placa-platina, se procedió a doblar los extremos de la lámina para poder asegurar los tubos colectores de entrada y salida del agua. Debido a su pequeño espesor, esta operación se realizó manualmente. La figura 6 muestra el proceso de pegado de los tubos.

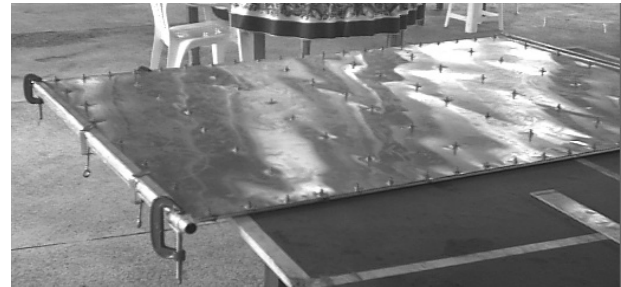


Figura 6. Proceso de pegado de los tubos

Teniendo todo el conjunto listo placa-platina-tubos y usando masilla sellante, se cerró todo el contorno hasta obtener una total hermeticidad del mismo, como último paso antes de dar el acabado, se pegaron los tapones de CPVC en los tubos, luego de ensayar el sistema para comprobar su hermeticidad se procedió a dar el acabado. El acabado final se muestra en la figura 7.



Figura 7. Proceso de pintura, acabado final

La unión entre caja y cubierta, se realizó tomando en cuenta las recomendaciones dadas por Cabirol [1]. Una fotografía del colector se muestra en la figura 8.

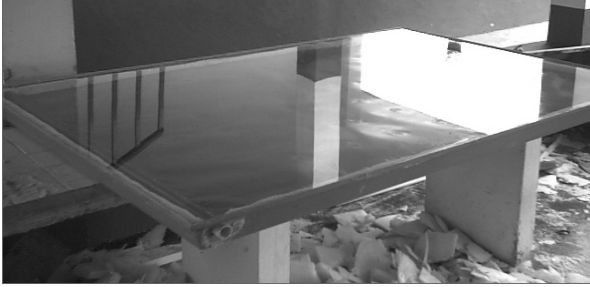


Figura 8. Colector solar terminado

Para la fabricación del tanque se contrató el trabajo metálico, es decir, rolado y soldado de los cilindros interior y exterior, así como soldado de las tapas laterales y los nipples de entrada y salida de agua. La Figura 9 muestra el tanque y cubierta.



Figura 9. Fotografía del tanque y cubierta lista para el vaciado del poliuretano.

Culminado el trabajo de manufactura de los dos componentes del sistema, es decir, colector y tanque, se unen para su funcionamiento.

La figura 10, muestra el sistema de calentamiento de agua para consumo doméstico operado por termosifón construido.



Figura 10. Fotografía panorámica del sistema de calentamiento

5. CONCLUSIONES

En el presente artículo se presentó el proceso de diseño y construcción de un colector solar para calentamiento de agua de consumo doméstico, operando por termosifón. En la construcción del sistema, el mayor problema que se presentó, fue la construcción del conjunto de placas y conductos del colector. Debido a la poca soldabilidad del

aluminio, se buscaron alternativas para realizar la unión de los tres elementos, placa superior de absorción, platinas para formar los conductos y placa inferior. La opción definitiva fue el uso de tornillos para unir los tres elementos reforzada con silicona para evitar fugas. Otro problema durante la construcción del colector fue el tallado de la espuma de poliuretano, aunque no implica una disminución de la eficiencia del sistema, sí se incurre en un mayor gasto de dinero como de tiempo en la fabricación. En la construcción del tanque, debido al poco espesor de la lámina exterior se presentaron problemas de deformación durante el vaciado del aislante.

De los ensayos iniciales, se puede afirmar que el sistema solar para calentamiento de agua alcanza las condiciones de temperatura requeridas para ser usada en el consumo doméstico de manera medianamente eficiente, e igualmente permite conservarla durante las noches y periodos de poca radiación, pero, es necesario adelantar pruebas y ensayos para la evaluación final del colector construido.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CABIROL, Thierry. "El Colector Plano de Efecto de Invernadero y el Calentador Solar de Agua". España: Editorial Continental, 1978.
- [2] DUFFIE, Jhon A. y William Beckman. "Solar Engineering of Thermal Process". New York: Jhon Wiley, 1980.
- [3] HURTADO M, Alejandro. "Colectores Solares de Placa Plana". Bogotá, Colombia: Universidad Autónoma de Colombia.
- [4] INTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas Colombianas para la presentación de trabajos de investigación. Quinta actualización. Santa fé de Bogota D.C.: ICONTEC, 2002, 34p. (NTC 1486.)
- [5] INTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Colectores Solares de Placa Plana para Calentamiento de Agua de Consumo Doméstico. Santa fé de Bogota D.C.: ICONTEC, 2004, 23p. (NTC 2461.)
- [6] INTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Sistemas de Calentamiento de Agua con Energía Solar y Componentes. Santa fé de Bogota D.C.: ICONTEC, 2004, 64p. (NTC 4368.)
- [7] MANRIQUE, José A. "Energía Solar". Méjico: Editorial Harla S. A. 1984.
- [8] MARGEVICIUS, Jose. "La Energía Solar y su Aplicación en Calentadores Solares". República Dominicana : Universidad Católica, 1981.
- [9] McCARTNEY, Kevin y FORD, Brian. Agua Caliente Solar. España : H. Blume Editions, 1978.
- [10] OROZCO HINCAPIE, Carlos A. Dimensionamiento Óptimo de Instalaciones Solares de Calentamiento, revista Scientia et Technica No 2, Universidad Tecnológica de Pereira.
- [11] OROZCO HINCAPIE, Carlos A. "Elementos de Ingeniería Solar". Pereira, Colombia: Publicaciones U.T.P. 1993. .
- [12] OROZCO HINCAPIE, Carlos A. "Aplicaciones de la Ingeniería Solar", seminario. Pereira, Colombia: Publicaciones U.T.P. 1990.
- [13] COLOMBIA.UNIDAD DE PLANEACION MIENRO ENERGÉTICA. Guía de Especificaciones de Sistemas de Calentamiento de Agua para uso Doméstico con energía solar en Colombia. Versión 01. Santa Fe de Bogota, Colombia. 2003.