

CÁLCULO DE SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA ACTIVOS QUE UTILIZAN COLECTORES DE TUBOS EVACUADOS DEL TIPO WATER-IN-GLASS

J. R. Barral, J. M. Lucchini, J. H. Garnica

Universidad Nacional de Río Cuarto - Facultad de Ingeniería - Departamento de Mecánica

Ruta Nacional 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto

Tel./Fax: (0358) 4676246 - e-mail: jbarral@ing.unrc.edu.ar

Recibido 25/07/17, aceptado 22/09/17

RESUMEN: Este trabajo detalla las acciones realizadas para arribar a una propuesta de metodología de cálculo para el diseño de sistemas de calentamiento de agua activos que utilizan colectores del tipo water-in-glass. La motivación del mismo se origina en la solicitud de una empresa que comercializa este tipo de equipos en la provincia de Córdoba, la cual sigue recomendaciones de fabricantes y método de prueba y error, sin tener a disposición un método de cálculo preciso para estos sistemas cuando funcionan de manera activa. Siguiendo la línea de razonamiento de ensayo de colectores planos, se perfeccionó un método para poder poner a estos equipos en estado estacionario y así determinar valores característicos de rendimiento térmico, que son requeridos por el método clásico f-chart, que calcula sistemas activos en función de la fracción solar mensual. Se presentan los resultados de la aplicación del método mediante la recta de rendimiento térmico correspondiente.

Palabras clave: tubos evacuados, colector water-in-glass, ensayo normalizado, diseño sistema activo.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de calentamiento de agua mediante energía solar, basados en tubos evacuados se están popularizando cada vez más en el mercado nacional. Esta tecnología presenta la gran ventaja de sus bajas pérdidas convectivas por la ausencia de medio material entre la superficie absorbadora del tubo y el vidrio en contacto con la atmósfera (Budihardjo et al., 2007) y bajas pérdidas radiativas por el uso de una superficie selectiva. Si bien fueron caros en un principio, la mejora en los procesos de fabricación y la economía de escala, han hecho que rápidamente se abarataran y fueran muy competitivos respecto a los sistemas basados en el clásico colector de placa plana. Hoy se importan en el país provenientes en su gran mayoría de China (Qiu et al., 2015), y en sus distintas variantes están siendo comercializados por varios importadores y distribuidores brindando soluciones convenientes a usuarios que no tienen acceso a energías convencionales competitivas en su lugar de residencia (Niemborg, 2010) (Placco et al., 2010).

Con algunas variantes, el principio de funcionamiento básico de los más usados, se esquematiza en la Fig. 1. Todos constan de un vaso de doble pared de vidrio (borosilicato) donde se ha hecho vacío, siendo la pared interna recubierta de un material selectivo, que absorbe la radiación solar. Al haber vacío entre dicha pared interna y la externa, se minimizan las pérdidas de calor por conducción y convección. De las bajas pérdidas radiativas da cuenta el material selectivo que absorbe mucho en el espectro electromagnético visible e infrarrojo de onda corta y emite poco en a partir del infrarrojo de onda larga. Se muestran allí un sistema del tipo heat-pipe (a), U-pipe (b) y water-in-glass (c). Se les llama en su denominación en inglés por la cual son ya internacionalmente conocidos. Otras de las ventajas que presentan estos sistemas es su resistencia a las heladas, la captación angular más beneficiosa por su forma circular y asimismo una mayor versatilidad angular en su posicionamiento respecto al Norte (Kalagirou, 2014).

Profundizando en las características de cada uno, el primer sistema, que traducido al español sería "tubo de calor", consiste en un tubo metálico sellado, habitualmente de cobre, que contiene en su interior un líquido de baja presión de vapor, que ante la exposición a la radiación solar vaporiza, trasladándose por gravedad a la parte superior, donde en una zona más fría, se condensa entregando energía calórica. Suele haber aletas adosadas al tubo para incrementar su superficie de captación de energía radiante. La zona de condensación es un bloque de cobre donde se inserta el condensador, el cual puede estar conectado a un tanque de almacenamiento con agua o a un cabezal por donde circula agua. De la primera manera, forma parte así de un sistema "compacto" de calentamiento de agua, o si tiene un cabezal por donde se hace circular agua, se comporta de manera similar a la de un colector solar de placa plana.

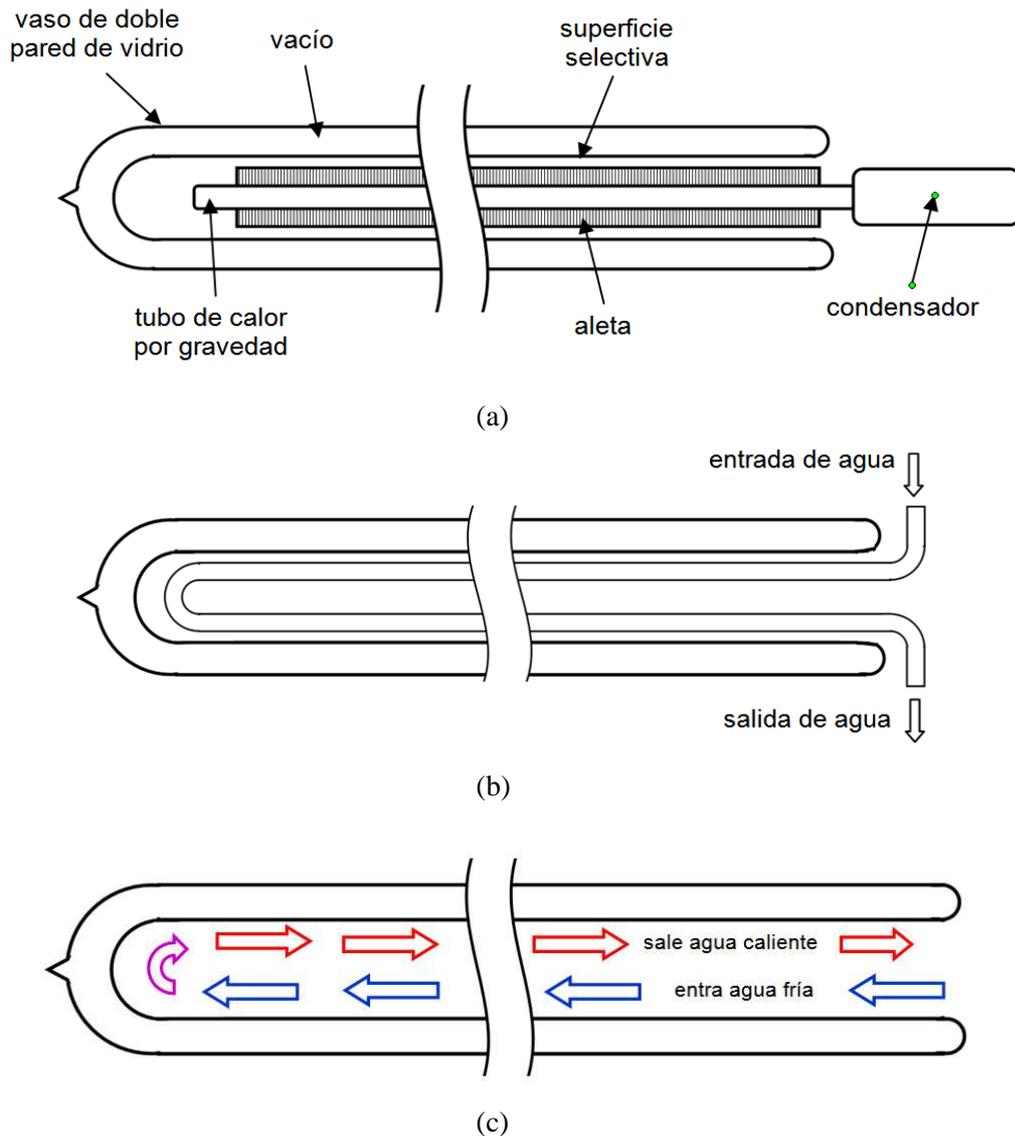


Figura 1: Tecnologías de: (a) tubo de calor, (b) tubo en U, y (c) agua en el vidrio.

El segundo sistema esquematizado, Fig. 1 (b), muy simple en su concepción, cuya traducción vendría a ser "Tubo en U" y la razón de este nombre se ve claramente en el esquema, consiste en una cañería que se introduce dentro del vaso de doble pared, recibiendo allí la radiación solar, saliendo luego de allí el líquido a mayor temperatura. Por último, en la Fig. 1 (c) se muestra el esquema más sencillo de todos, consistente en un tubo en el cual directamente entra el agua a ser calentada, la cual está en contacto con la pared de vidrio con superficie selectiva, de allí su nombre water-in-glass (agua en el vidrio). También se le nombra en inglés como tubo "All glass" y en español se le suele decir sistema de "tubos inundados". Esta última tecnología es la más sencilla en cuanto a cantidad de componentes,

y por ende, los sistemas de calentamiento de agua basados en ella son los más económicos, siendo los que más se importan en la República Argentina.

En el armado de sistemas "compactos", tanque de almacenamiento en contacto casi directo con los tubos, se ofrecen los equipos "prefabricados", ya pensados para una determinada cantidad de usuarios, como se muestra en la Fig. 2 (a). Si no, se pueden diseñar "sistemas a medida" con bloques de colectores solares, como el de la Fig. 2 (b), donde el tanque de almacenamiento está separado. El primer caso es de los más utilizados habitualmente, y se pueden ver infinidad de ofertas en internet, donde ya vienen prediseñados para una cierta cantidad de personas, habitualmente con el criterio de 50 litros por persona. Estos funcionan por convección natural, de allí la necesidad de que el tanque esté por sobre los tubos. Para el segundo caso, en muchas aplicaciones, se utiliza lo que se denomina "sistema activo", en el cual la circulación del agua se logra mediante una bomba, el almacenamiento se diseña por separado y no es necesario que el tanque aislado se ubique por encima de los tubos. Estos últimos equipos se utilizan hoy para calentamiento de agua sanitaria, climatización de piscinas y sistemas de calefacción, mayormente en sistema de losa radiante.

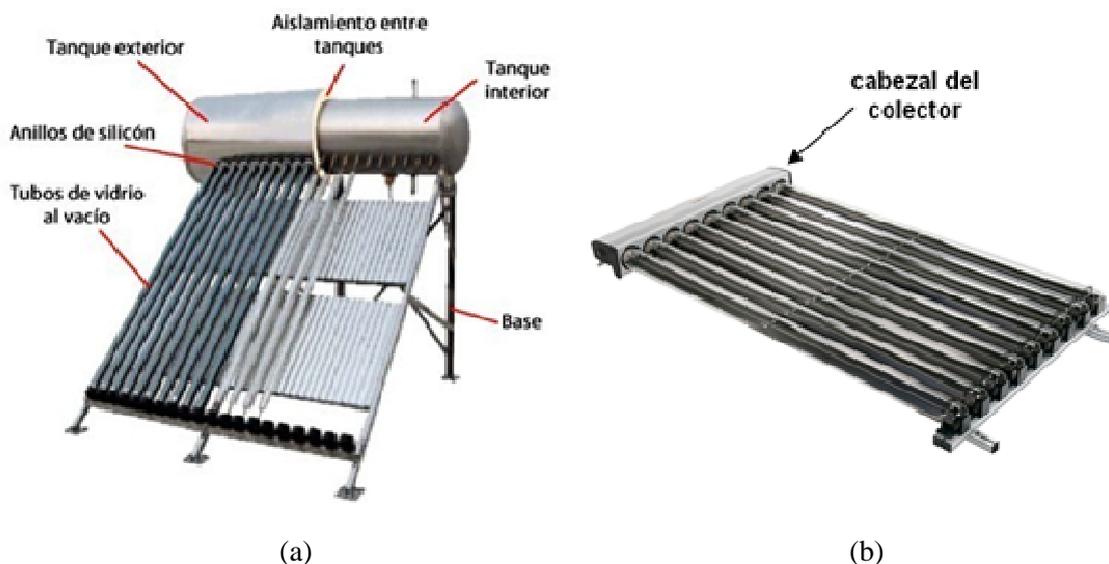


Figura 2: (a) Sistema compacto o prefabricado; (b) colector solar de tubos evacuados.

Las recomendaciones de los fabricantes permiten la implantación de los sistemas compactos sin demasiados problemas. Incluso, es posible realizar una predicción de las performances de los mismos utilizando las normas internacionales que así lo prevén, como la ISO 9459-2 (ISO, 1995), adaptada para la República Argentina por la Norma IRAM 210004 (IRAM 2016a). Por otro lado, un criterio básico impuesto por la experiencia de fabricantes e instaladores es utilizar la asignación aproximada de un tubo cada 10 litros de agua, a razón de 50 litros por persona por día, lo cual se puede chequear por varios canales electrónicos de venta en internet, viendo los equipos y contando la cantidad de tubos.

Para el caso de los sistemas de tipo colector, tampoco hay demasiada complicación para determinar su performance mediante las normas de colector de placa plana cuando se trata del sistema tipo heat-pipe o U-pipe, dado que funcionan con muy poca cantidad de agua, la que entra en el cabezal para el caso del heat-pipe y la que circula por el caño muy finito que entra al tubo en el caso de U-pipe. Para ello se puede utilizar la norma de ASHRAE (ASHRAE, 2003), que prevé con los colectores funcionando en estado estacionario, la realización de un ensayo que cristaliza en la determinación de una recta de rendimiento térmico instantáneo. Luego, con los valores de pendiente y ordenada al origen de dicha recta, se pueden utilizar un método muy conocido, denominado f-chart para el diseño de sistemas activos (Duffie y Beckman, 2013). El ensayo bajo norma ASHRAE se realiza en un día claro, a lo sumo dos días si se desea obtener muchos puntos para la regresión lineal. Con algunas variantes, entre ellas el agregado de un término cuadrático, la norma ASHRAE ha evolucionado a la ISO 9806-2 (ISO,

2013), que fuera recientemente adaptada para la República Argentina por el Instituto Argentino de Normalización y Certificación, en la IRAM 210002-1 (IRAM 2016b).

En cambio, se complica el cálculo de los sistemas activos cuando se trata de un sistema del tipo water-in-glass, ya que estos tienen una inercia térmica muy grande. Hay que considerar que cada tubo de 58 mm de diámetro por 1,80 m de largo, llega a contener 2,8 litros de agua. Así, un sistema de 25 tubos, tendrá en total unos 70 litros de agua en el colector, por lo cual es muy difícil obtener varios puntos de estado estacionario en un mismo día. Por lo tanto, ante la solicitud de una empresa dedicada a la comercialización de estos equipos, se trabajó para lograr una propuesta de cálculo, basada en el método f-chart, determinando la curva de comportamiento de un colector del tipo water-in-glass provista por dicha empresa.

Se presentan en este trabajo el método utilizado para la determinación de dicha curva, explicándose los pasos seguidos para lograr la estabilización del sistema, mediante el uso de la máquina universal de ensayo que posee el Laboratorio de Energía Solar de la UNRC.

EQUIPO ENSAYADO E INFRAESTRUCTURA DISPONIBLE

En la Fig. 3 (a) se muestra el equipo provisto por la empresa HITEC Solar de la ciudad de Córdoba para realizar el estudio. Es un equipo de 25 tubos, lo cual implica que tiene una masa de agua de unos 75 kg cuando está en funcionamiento, la de los tubos más el cabezal donde están conectados. El equipo tiene una estructura soporte que lo posiciona a 45° respecto a la horizontal, que es un ángulo adecuado para esta región del país. Los tubos se inervan en la parte superior a un cabezal de sección cuadrada, donde quedan sellados por la acción de dos O-rings internos de silicona, siendo el aro de plástico negro que se ve desde afuera solamente para cuestiones estéticas y evitar la entrada de polvo. El equipo está pensado para funcionar en forma activa con la impulsión de una bomba.



(a)

(b)

Figura 3: (a) Equipo ensayado; (b) Máquina de ensayo y tanque auxiliar de 400 litros.

Se muestra en la Fig. 3 (b) la máquina de ensayo universal que construyó el Grupo de Energía Solar de la UNRC para realizar ensayos de colectores y sistemas completos. En este caso, se le ha adicionado un tanque extra de 400 litros, que se ve a la izquierda, ante la necesidad de contar con cantidad suficiente de agua a temperatura estabilizada para sostener durante mucho tiempo una temperatura de entrada constante al colector. La máquina de ensayo cuenta con un sistema de tres tanques aislados y seis resistencias calefactoras (9000 W en total), dos caudalímetros con regulación, dos bombas de impulsión y un sistema de válvulas y tuberías que permiten realizar distintas conexiones internas y externas para adecuar la máquina a los ensayos que correspondan. Los datos de temperatura se recogen mediante sensores de distinto tipo, conectados a adquirentes de datos y las variables climáticas se determinan mediante una estación meteorológica del Laboratorio.

En la Fig. 4 se muestra el esquema de inserción del tubo en el cabezal colector, con un esbozo aproximado del movimiento de fluido caliente y frío entre el tubo y el cabezal colector (Budihardjo et al., 2007). Cabe aclarar que a estos sistemas se les suele denominar en los catálogos como "manifold", que deviene del inglés técnico, donde en distintas acepciones se le traduce como múltiple, tubo, distribuidor o colector. Se observa así, que si bien la impulsión en el cabezal de sección cuadrada es realizada por la bomba, el movimiento de calentamiento del fluido, que se da en el interior de los tubos, sigue siendo por convección natural. Esta interpretación es esencial para entender el pre-acondicionamiento del equipo de medición para lograr los distintos puntos de la curva de rendimiento térmico del manifold. De esta manera, si bien por la sección cuadrada circulan unos pocos litros de agua, el sistema tiene también en circulación permanente los 70 litros de agua que se encuentran en los tubos. La circulación natural por los tubos estará gobernada por la temperatura del agua fría que provenga del almacenador y la intensidad de la radiación (variable durante el día), mientras que la circulación por el cabezal dependerá de la regulación que se le dé a la bomba impulsora, que provee en general un caudal de valor constante.

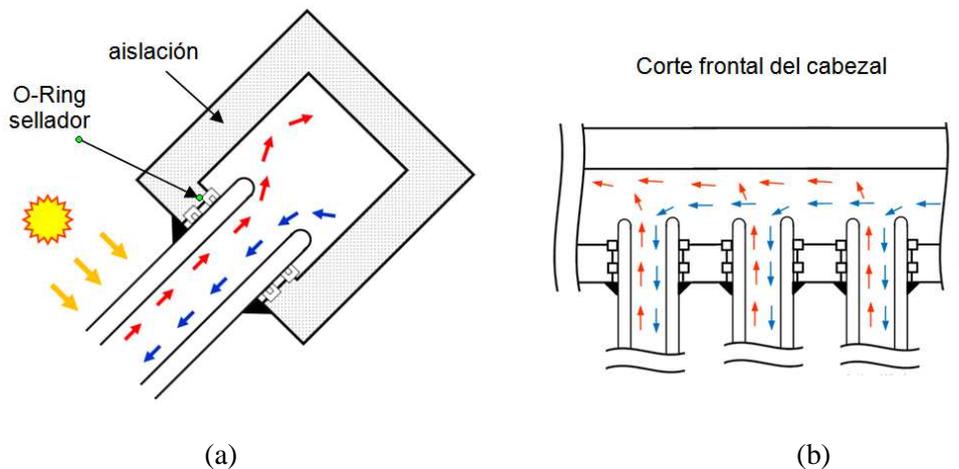


Figura 4: Cabezal colector: (a) vista transversal esquematizando circulación en tubo; (b) corte frontal con circulación en tubos y pasaje interior del cabezal colector.

NORMAS UTILIZADAS PARA EVALUACIÓN DE EQUIPOS SOLARES

En este caso, y siguiendo las necesidades que plantea el método de cálculo f-chart, se ha decidido utilizar la norma ASHRAE 2003, que prevé una relación lineal entre el rendimiento térmico del colector y una variable en abscisas dada por una diferencia de temperatura entre la entrada y el medio ambiente, divididas por la radiación global incidente en el colector. Este ensayo computa la eficiencia instantánea que es la razón entre el calor útil que está entregando el colector y la radiación solar que está recibiendo en su plano de absorción mientras circula por él un caudal constante de fluido que recomienda el fabricante. Dicho valor de eficiencia se calcula con la ecuación 1, donde todos los términos que allí figuran son datos conocidos o se miden durante el ensayo. Los símbolos de todas las ecuaciones de aquí en adelante, si no están explicados en el texto, se pueden entender de la lectura de la sección "Nomenclatura", ubicada al final del artículo, lo cual se ha hecho así para evitar la extensión innecesaria de la publicación.

$$\eta_i = \frac{\dot{m} c_p (T_o - T_i)}{A_c G_T} \quad (1)$$

En esta ecuación, el numerador representa la potencia de calentamiento que recibe el agua al circular por el colector, siendo un cómputo netamente calorimétrico, resultado del producto del flujo másico por el calor específico del agua y por el salto térmico que experimenta el agua desde la entrada hasta la salida. Dado que el denominador computa la potencia radiativa recibida en el plano del colector, la ecuación es finalmente un cociente entre la potencia calórica que se obtiene y la potencia radiativa que

llega al equipo. Si bien el término η_i indica rendimiento térmico instantáneo, para la determinación del mismo, el colector debe estar operando en estado estacionario, con el flujo másico recomendado por el fabricante, o el que establezca la norma en su defecto.

De un desarrollo teórico para colectores solares planos, dicha ecuación se puede expresar en función de ciertos factores que acomodados convenientemente permiten graficar una recta. En este acomodamiento, la resta entre la temperatura de entrada del colector menos la temperatura ambiente dividida por la radiación global incidente pasa a ser la variable independiente de dicha recta. Entonces, se tiene que:

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c G_T} = F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{G_T} \quad (2)$$

Siendo el primer término de la derecha, la ordenada al origen de la recta, y el segundo término de la derecha el producto de la pendiente de la recta por la variable independiente. Con la ecuación (2) y realizando mediciones en las horas cercanas al mediodía solar (desde las 10:00 a las 14:00 aproximadamente), se obtiene una nube de puntos a partir de la cual por una regresión lineal se puede obtener una recta representativa. La recta que se obtiene es única para cada colector aunque se realicen las mediciones en distintas regiones y con distintas condiciones climáticas (dentro de los límites establecidos por la norma). Otras normas se han desarrollado, ISO e IRAM mencionadas anteriormente, la cuales del análisis realizado por Klein et al. (2007) responden al mismo principio, algunas de ellas con el agregado de un término cuadrático, lo cual redundaría en un término más para la ecuación de la recta (ecuación 2), realizándose prácticamente las mismas mediciones.

MÉTODO DE CÁLCULO DE SISTEMAS ACTIVOS

En esta sección se describe en forma resumida el método f-chart (Duffie y Beckman, 2013), donde se ve la utilización de la ordenada al origen y la pendiente de la ecuación (2) para efectuar el diseño y cálculo del sistema activo. Las ecuaciones (3), (4) y (5) son las más importantes, donde se ve la aplicación de dichos parámetros. El resto, de las ecuaciones (6) a la (16), es una explicación de la aplicación del método, con sus datos requeridos, que se puede extraer de la bibliografía, sin ser un aporte original de este trabajo y puede saltarse sin pérdida de continuidad en el seguimiento del trabajo. Se ha reproducido para aquel lector que desee entender en forma completa la aplicación del método. Todas las ecuaciones se encuentran distribuidas en el libro de Duffie y Beckman (2013).

El método f-chart, determina la fracción solar mensual que puede cubrir una determinada área de colector solar plano con una cierta capacidad de almacenamiento en tanque aislado, dadas ciertas condiciones climáticas y de demanda energética total. Se ha comprobado la eficacia de este método para los cálculos de provisión de agua caliente sanitaria y calefacción solar (Haberl y Cho, 2004) y es usado para el cálculo de sistemas activos en todo el mundo. Se basa en la utilización de dos números adimensionales X e Y (ecuaciones 3 y 4) que se calculan para cada mes del año, y que se han correlacionado mediante regresiones lineales para obtener los valores de la fracción solar mensual f, mediante la ecuación (5).

$$X = F_R U_L \frac{F_R'}{F_R} (T_{ref} - \bar{T}_a) \Delta t \frac{A_c}{L} \quad (3)$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \frac{F_R' (\overline{\tau\alpha})}{F_R (\tau\alpha)_n} \bar{H}_T N \frac{A_c}{L} \quad (4)$$

$$f = 1.029 Y - 0.065 X - 0.245 Y^2 + 0.0018 X^2 + 0.0215 Y^3 \quad (5)$$

Como se ve, para la aplicación del método f-chart es necesario contar con los valores de radiación diaria media mensual sobre el plano de los colectores, lo cual se puede obtener a partir de:

$$\bar{H}_T = \bar{H} \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) \bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H} \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (6)$$

Donde, \bar{R}_b se calcula para el hemisferio Sur mediante

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + (\pi/180) \omega'_s \sin(\phi + \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180) \omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (7)$$

y el ángulo de puesta (o salida) del sol para una superficie inclinada para el día medio del mes responde a la ecuación,

$$\omega'_s = \min \left[\begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi + \beta) \tan \delta) \end{array} \right] \quad (8)$$

La componente difusa de la radiación diaria media mensual se puede obtener a partir de:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,775 + 0,00606(\omega_s - 90) - [0,505 + 0,00455(\omega_s - 90)] \cos(115 \bar{K}_T - 103) \quad (9)$$

En la cual, el índice de claridad diario medio mensual es

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (10)$$

y el ángulo de salida (o puesta) del sol para el día medio del mes, se expresa mediante

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (11)$$

Por otro lado, el producto transmistencia-absortancia diario medio mensual se puede calcular mediante

$$(\bar{\tau\alpha}) = \frac{\bar{S}}{\bar{H}_T} \quad (12)$$

Donde la radiación solar media mensual absorbida por la combinación de la superficie transparente y la superficie absorbidora es:

$$\bar{S} = \bar{H}_b \bar{R}_b (\bar{\tau\alpha})_b + \bar{H}_d (\bar{\tau\alpha})_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H} \rho_g (\bar{\tau\alpha})_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (13)$$

$(\bar{\tau\alpha})_d$ y $(\bar{\tau\alpha})_g$ se pueden calcular utilizando el ángulo de incidencia equivalente θ_e , que para un ángulo de inclinación fijo de los colectores, tendrán el mismo valor para todos los meses del año. Para ello se puede utilizar las ecuaciones (21) para la reflexión del suelo y (22) para la radiación difusa:

$$\theta_e = 90 - 0,5788\beta + 0,002693\beta^2 \quad (14)$$

$$\theta_e = 59,7 - 0,1388\beta + 0,001497\beta^2 \quad (15)$$

Para colectores que apuntan hacia el Ecuador, $(\overline{\tau\alpha})_b$ puede aproximarse utilizando el ángulo de incidencia que ocurre 2,5 horas después del mediodía solar para el día característico del mes. O sea, $\omega \cong 37^\circ$ y se puede usar la siguiente ecuación que corresponde al hemisferio Sur:

$$\cos \theta = \cos(\phi + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi + \beta) \sin \delta \quad (16)$$

Para sistemas de calentamiento, se sugiere tomar $(\overline{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n$ como constante en un valor de 0,96 para sistemas de una cubierta, que apuntan al ecuador con una pendiente igual a la latitud más aproximadamente 15° . Para dos cubiertas en la misma situación, se sugiere $(\overline{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n = 0,94$.

Una vez obtenidos los valores correspondientes, para la aplicación del método se debe contar con los valores medios mensuales de temperatura ambiente, radiación solar global horizontal y humedad relativa (Adaro et al., 2002), lo cual permitirá predecir mes por mes la fracción solar que entregará el equipo solar activo para un almacenamiento típico de 75 litros por metro cuadrado de colector.

ENSAYOS REALIZADOS AL EQUIPO

Dada la alta inercia térmica del manifold, resulta necesario pre-acondicionar el sistema antes de poder determinar un punto de ensayo, ya que el cambio de un punto a otro para que se pueda considerar al sistema en estado estacionario es un proceso relativamente lento. Luego de una serie de ensayos tentativos para tratar de lograr un funcionamiento estable del sistema, se arribó a la conclusión de que la única forma de lograr una estabilización del sistema era poner el manifold en régimen antes de comenzar con el ensayo propiamente dicho, y asimismo, realizar la entrada de agua al colector en un valor tal que esté muy próxima al valor del propio colector al momento del inicio del ensayo.

Otro de los problemas a enfrentar es que no se cuenta con una recomendación del fabricante acerca del caudal a hacer circular por el equipo. Se optó por el caudal mínimo establecido en la Norma IRAM 210002-1, de $0,02 \text{ kg s}^{-1}$ por metro cuadrado de área bruta del colector. A fin de lograr una temperatura de funcionamiento uniforme, se hizo circular agua por el manifold hasta lograr su estabilización, mientras se le mantenía cubierto por una media sombra. En esas condiciones, la salida y entrada se estabilizan con una diferencia de 1°C (mayor a la entrada por el calentamiento de la bomba). Simultáneamente, se busca la temperatura de entrada que se desea de acuerdo al punto de ensayo a determinar, precalentando el tanque de almacenamiento de 400 litros. Así, de tratarse de un punto de temperatura elevada, se destapa el manifold para que por radiación solar comience a calentarse, mientras se le va siguiendo de cerca con la temperatura del tanque de almacenamiento.

Se realizaron los ensayos a razón de un punto por día, centralizando el ensayo al mediodía solar, de manera tal de poder garantizar una radiación casi constante durante el término de al menos una hora. Simultáneamente se fue monitoreando la temperatura ambiente, para poder sincronizar las temperaturas de entrada y ambiente y lograr el espaciado adecuado entre los puntos del diagrama. Como siempre el denominador resultó un valor de radiación alto, y se tenía el pronóstico de la temperatura ambiente para el mediodía solar, fue relativamente sencillo predecir con relativa certeza el lugar en que se ubicaría cada punto de absisas, que es el último factor de la ecuación (2).

El problema que se tuvo que sobrellevar es el de no trabajar con el manifold caliente, porque después resultaba sumamente difícil lograr la estabilización del sistema, ya que debía lograrse que toda el agua del colector circulase. Por otro lado, la entrada de agua a temperatura elevada tampoco es conveniente, ya que al entrar el agua muy caliente, no se establecerán las corrientes convectivas de agua fría bajando y agua caliente subiendo por los tubos. En otras palabras, el agua caliente a la entrada, se posiciona a lo largo de todo el cabezal y "bloquea" el funcionamiento termosifónico del sistema. Así, la manera que se halló para poder determinar los puntos de funcionamiento del equipo, fue de tener el agua de entrada a un par de grados por debajo de la de estabilización del manifold, de forma tal de iniciar el sistema con las corrientes termosifónicas de los tubos en acción y poder hacer trabajar al equipo de la forma que naturalmente lo hace.

Los datos fueron relevados mediante el uso de termocuplas tipo "T" convenientemente colocadas a la entrada y salida del manifold. Se montaron los tubos de entrada y salida de manera de garantizar el llenado y mezclado para una lectura correcta de los valores. La radiación solar fue determinada mediante un piranómetro de precisión marca EKO y todos los datos fueron transmitidos a una computadora mediante un sistema de adquisición de datos Agilent modelo 34970A. Dicho adquisidor, además de grabar los datos en la computadora, tiene un software soporte que permite la visualización de los datos en tiempo real, lo cual resultó muy útil para lograr la sincronización de temperaturas de cabezal y tanque mencionada anteriormente.

Atentos a lo expresado anteriormente, podría suponerse que a medida que aumenta la temperatura a lo largo del cabezal, los últimos tubos tenderían a bloquearse, o al menos a tener una degradación en su rendimiento. No se toman las temperaturas adentro del cabezal para tener una idea de la distribución de temperaturas en el mismo, ya que se aplica la norma en el concepto de "caja negra" y sólo se miden temperaturas de entrada y salida, donde el agua se encuentra bien mezclada. Lo que se observa es que el salto térmico entre entrada y salida es muy pequeño, hasta un máximo de 7 °C, y además, aunque la temperatura media del agua va aumentando a lo largo del cabezal, siempre la más densa (más fría) se ubicará en la parte inferior del cabezal y continuará entrando en los subsiguientes tubos, del primero al último. Lo que va a suceder es que la temperatura de salida del último tubo será superior a la de salida del primer tubo, pero el efecto de convección natural seguirá ocurriendo, aunque con diferentes temperaturas entre los tubos (Li et al., 2010). Asimismo, dadas las bajas pérdidas de calor, no se presume una degradación de la eficiencia de cada tubo.

RESULTADOS OBTENIDOS

La Fig. 5 muestra los resultados de la aplicación de las ecuaciones (1) y (2) a los datos recolectados de temperatura ambiente, temperatura de entrada del líquido, radiación solar medida en el plano del colector y caudal másico. Se representa en el gráfico la recta resultante de la aplicación del método de los mínimos cuadrados, como así también el coeficiente de correlación, que da cuenta de una aproximación más que aceptable. Cabe acotar que se realizaron muchas mediciones, pero solo fueron considerados como aceptables los puntos aquí graficados.

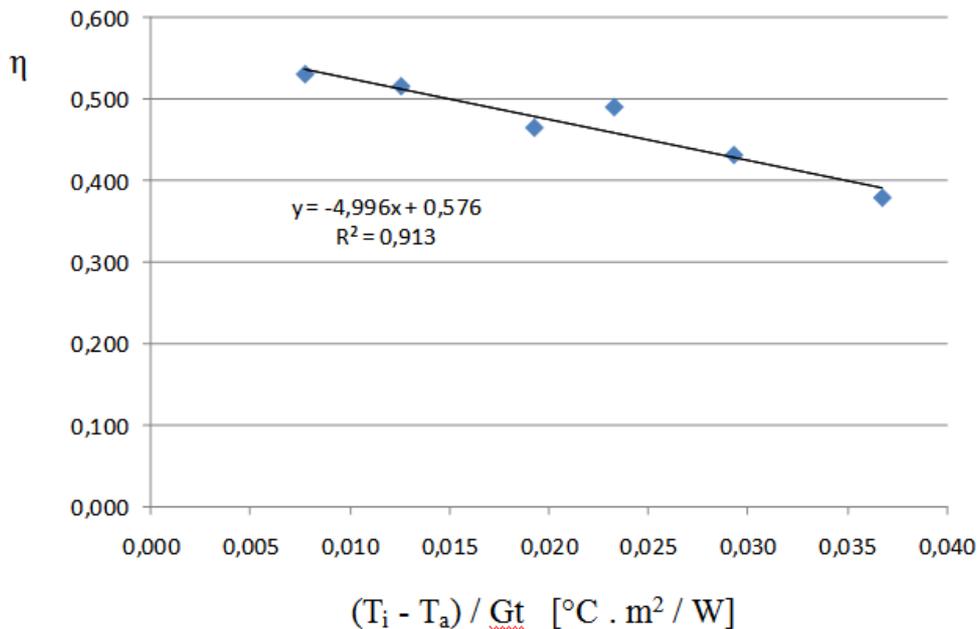


Figura 5: Curva de rendimiento térmico del manifold, pensado como colector de placa plana en funcionamiento de estado estacionario.

Se descartaron los puntos de trabajo a "manifold caliente", que no es posible de estabilizar y los de temperatura de entrada caliente, que impiden el funcionamiento termosifónico de los tubos. Estos puntos ocurrían por la dificultad de predecir el comportamiento del manifold en función de la radiación solar y a veces, por más esfuerzo que se puso, no fue posible llegar a la situación deseada de congruencia entre los valores de temperaturas del manifold y los de temperatura de entrada el tanque de 400 litros.

CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados de los ensayos y de la operación en general del equipo, se pueden inferir las siguientes conclusiones:

- a) Se ha propuesto un método para poder determinar la curva de rendimiento térmico de un colector solar tipo water-in-glass, que si bien demanda varios días de ensayo, pone a disposición los valores de $-F_R U_L$ y $FR(\tau\alpha)$ que son necesarios para la aplicación del método f-chart de cálculo de sistemas activos.
- b) De la observación de la recta y proyectando el punto de corte con el eje de ordenadas, se verifica un rendimiento óptico bajo para este tipo de equipos. Aún así, la pendiente de la recta es baja, como es de esperar en estos equipos con bajas pérdidas térmicas.
- c) El método es muy sensible a la variación del caudal: si el mismo se baja, se produce lógicamente un salto térmico muy grande entre la entrada y la salida. Si bien se usa el caudal recomendado por la norma, podría pensarse en otros valores tendientes a optimizar el funcionamiento del equipo.
- d) Si bien se propone la utilización del f-chart como complemento a estos ensayos, aún falta afinar la metodología de cálculo, habida cuenta de que el f-chart recomienda 75 litros por metro cuadrado de área bruta de colector, y aquí no se ha hecho trabajar al equipo con un almacenamiento determinado, sino que solamente se la ha ingresado una temperatura constante para cumplir con los requisitos de estado estacionario previstos por la norma.
- e) Podría suceder que la temperatura de entra tenga variaciones importantes, en el supuesto de que el usuario está demandando agua caliente sanitaria y la misma es reemplazada por agua fría proveniente de la red, en cuyo caso, agua muy fría podría estar entrando al equipo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló en la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC) y ha sido subsidiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNRC y la Facultad de Ingeniería de la UNRC. Se agradece especialmente a la empresa HI TEC SOLAR de la ciudad de Córdoba, por la provisión del equipo sobre el cual se realizaron los ensayos.

NOMENCLATURA

Q_u = Calor útil provisto por el colector [kJ]	[adimensional]
\dot{m} = flujo másico [kg/s]	$F_R(\tau\alpha)$ = ordenada al origen de la recta de eficiencia instantánea [adimensional]
η_i = eficiencia instantánea del colector [adimensional]	$-F_R U_L$ = pendiente de la recta de eficiencia instantánea [W/m ² °C]
A_c = área efectiva del colector [m ²]	σ_{yr} = desviación estándar de temperaturas medias mensuales.
F_R = Factor de remoción de calor del colector [adimensional]	σ_m = desviación estándar de la temperatura ambiente media mensual.
U_L = coeficiente global de pérdidas del colector [W/(°C . m ²)]	\bar{T}_a = temperatura ambiente media mensual [°C].
$(\tau\alpha)$ = producto transmitancia-absortancia	

\bar{T}_{anual} = temperatura media anual [°C].
 T_b = temperatura base [°C].
 m = número de días en el mes.
 \bar{T}_a = temperatura ambiente media mensual
 L_{ACS} = energía necesaria para calentar el agua [MJ].
 C_3 = coeficiente para convertir en MJ la energía empleada en el ACS = 24/1000.
 $c_{p_{H_2O}}$ = calor específico del agua = 4,18 [kJ/kg °C].
 G_{H_2O} = Caudal de agua a emplear como agua caliente sanitaria [kg/ pers. día].
 $T_{c_{H_2O}}$ = temperatura deseada en el agua [°C].
 L = energía total requerida [MJ].
 \bar{H}_T = radiación diaria media mensual por una superficie inclinada [MJ/m²]
 \bar{H} = radiación diaria media mensual sobre superficie horizontal [MJ/m²]
 \bar{H}_d = radiación difusa diaria media mensual en la superficie horizontal [MJ/m²]
 \bar{R}_b = relación entre rad. directa sobre un plano inclinado y rad. directa en el plano horizontal [adimensional]
 ρ_g = reflectancia del suelo [adimensional]
 β = ángulo de inclinación de superficie inclinada [rad]
 ω'_s = ángulo de puesta (o salida) del sol para una superficie inclinada para el día medio del mes.
 \bar{K}_T = índice de claridad diario medio mensual [adimensional]

\bar{H}_0 = radiación extraterrestre diaria media mensual sobre superficie horizontal [MJ/m²]
 ω_s = ángulo de salida (o puesta) del sol para el día medio del mes [rad].
 \bar{S} = radiación absorbida media mensual por una superficie inclinada [MJ/m²]
 $(\overline{\tau\alpha})_d$ = producto transmitancia-absortancia medio mensual para la radiación difusa [adimensional]
 $(\overline{\tau\alpha})_g$ = producto transmitancia-absortancia media mensual para rad. reflejada por la tierra [adimensional]
 θ = ángulo de incidencia [rad]
 ϕ = latitud [rad]
 δ = declinación solar [rad]
 θ_e = ángulo de incidencia equivalente para radiación difusa o reflejada
 F'_R = eficiencia del intercambiador de calor [adimen.]
 U_L = coef. de pérdidas global del colector [W/m² °C]
 Δt = número total de segundos en el mes [s].
 \bar{T}_a = temp. ambiente media mensual [°C].
 T_{ref} = temperatura de referencia (empírica) [°C].
 \bar{H}_T = radiación incidente sobre la superficie del colector diaria media mensual por unidad de área [J/m²].
 N = días en el mes [adimensional].
 $(\overline{\tau\alpha})$ = producto transmitancia-absortancia medio mensual.

REFERENCIAS

- Adaro J. A., Fasulo A. J. , Lema A. I., Marchesi J. O. (2002) Cartas de radiación global media mensuales para la región centro-oeste de la República Argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 6, Nro 2, pág. 11.01-11.06.
- ASHRAE (2003) Standard ANSI/ASHRAE 93-2003, Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, USA.
- Budihardjo I., Morrison G. L., Behnia M. (2007) Natural circulation flow through water-in-glass evacuated tube solar collectors. Solar Energy, Vol. 81, pág. 1460–1472.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes, Fourth Edition, John Wiley and Sons, Inc.

- Garnica J. H., Lucchini J. M., Stoll R. G. y Barral J. R. (2010) Ensayos normalizados de colectores solares y sistemas de calentamiento de agua en argentina: análisis de la situación, avances y dificultades. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 14, pág. 3.147 – 3.154.
- Haberl J. S. y Cho S. (2004) Literature review of uncertainty of analysis methods, F-Chart Program. Report to the Texas Commission on Environmental Quality. Energy Systems Laboratory, Texas Engineering Experiment Station, Texas A&M University System. <http://repository.tamu.edu/handle/1969.1/2062>.
- IRAM (2016a). Norma 210004, Métodos de ensayos exteriores para la caracterización y predicción del rendimiento anual de los sistemas solares. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- IRAM (2016b). Norma 210002-1, Colectores solares. Parte 1 - Métodos de ensayo para determinar el rendimiento térmico de los colectores solares con cubierta para el calentamiento de líquidos. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, Argentina.
- ISO (1995) International Standard ISO 9459-2 Solar heating – Domestic water heating systems – Part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems. International Organization for Standardization, Suiza.
- ISO (2013) International Standard ISO 9806:2013 Solar energy -- Solar thermal collectors -- Test methods. International Organization for Standardization, Suiza.
- Kalogirou S. A. (2014) *Solar Energy Engineering, Processes and Systems*. Academic Press.
- Klein S.A., Reindl D. T. y Beermann J. (2007) Alternative methods for performance testing of solar thermal collectors. *Proceedings of 36th ASES Annual Conference*, Cleveland, Ohio.
- Li Z., Chen C., Luo H., Zhang Y., Xue Y. (2010) All-glass vacuum tube collector heat transfer model used in forced-circulation solar water heating system. *Solar Energy*, Vol. 84, pág. 1413–1421.
- Nienborg B. (2010) *El Mercado para Calentadores Solares en la Argentina – Estado actual, Rentabilidad, Potencial, Barreras y Posibles Soluciones*.
- Placco C., Saravia L., Cadena C. (2010) *Informe Técnico sobre Colectores Solares para Agua Caliente*. Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO), Salta, Argentina.
- Qiu S., Ruth M., Ghosh S. (2015) Evacuated tube collectors: A notable driver behind the solar water heater industry in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 47, pág.580–588.

ABSTRACT

This work shows the actions performed to arrive to a proposal of a calculation methodology for the design of active solar water heating systems, which use water-in-glass collectors to provide the energy. The motivation of this work was originated by the demand of a company that sells this type of equipments in the city of Córdoba, and follows factory recommendations and try and error method, without not having a precise calculation method for these systems working in active manner. By following the reasoning line of flat plate collectors, a method was developed in order to put these systems in stationary form, and in this way to determine de characteristic values of thermal performance, which are required by the traditional f-chart method of monthly solar fraction. The results are shown by means of the corresponding line of thermal efficiency.

Keywords: evacuated tubes, water-in-glass collector, normalized testing, active systems design.