

SISTEMA COLECTOR SOLAR DE AGUA, A ESCALA REDUCIDA, CONSTRUIDO CON POLICARBONATO

J. M. Bravo¹, V. Passamai²

¹Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa)

²CIUNSa, UNSa, CONICET-INENCO

C.P. 4400 – Salta. Tel. 0387-4255389 e-mail: jose.mnl.bravo@gmail.com

RESUMEN: Se estudiaron las condiciones de funcionamiento de un sistema colector solar de calentamiento de agua, de policarbonato. Se midió la temperatura del agua, en distintos puntos, para diferentes niveles de radiación desde los 600 hasta 1000 W/m². Se realizaron las mismas medidas con el agregado de aislamiento térmico. Se determinó la radiación mínima necesaria para que se establezca un termosifón, el tiempo en que se desarrolla, los valores de temperatura y el tiempo en que ésta se estabiliza en los distintos puntos, bajo diferentes condiciones. La radiación mínima necesaria para que se produzca el termosifón se ve notablemente afectada por la temperatura ambiente. Se observó que no es posible alcanzar un estado estacionario cuando se agrega aislamiento térmico al equipo.

Palabras clave: calentamiento solar de agua, policarbonato, termosifón.

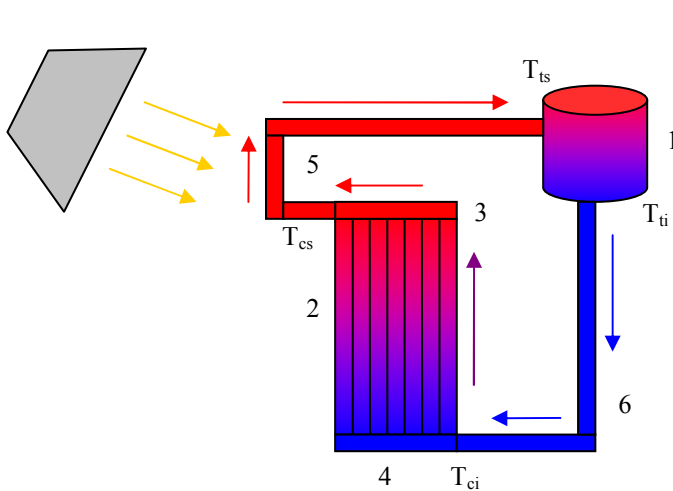
INTRODUCCIÓN

Una innumerable cantidad de estudios se han llevado a cabo con respecto al calentamiento solar de agua. Se ha avanzado mucho en la simulación de estos sistemas, logrando realizar una gran variedad de pruebas que permiten optimizar en un elevado grado estos equipos (Hobbi y Siddiqui, 2009). Así también, se crearon diseños que proponen nuevos sistemas arquitectónicos de viviendas para permitir un mejor aprovechamiento de la energía solar para calentar agua, ya sea de uso sanitario como para calefacción (Juanicó, 2008). Si bien el uso de este tipo de equipos disminuye el consumo de combustibles, su costo inicial inhibe una buena inserción en la sociedad. Además, otros estudios dan como resultado que el gas natural es un fuerte competidor por su bajo precio (Diakoulaki et al., 2001). Para contrarrestar esto, se han realizado diversos estudios sobre sistemas contruidos con materiales poliméricos, capaces de alcanzar el mismo objetivo, con costos constructivos menores (Tsilingiris, 1996).

Para estudiar y obtener un mayor control sobre los procesos involucrados en el calentamiento solar de agua, se decidió tomar un modelo de un sistema de calentamiento solar de agua (SCSA), realizado recientemente y cedido por su autor (Fasulo, 2009). El mismo posee un colector de pequeña superficie y un tanque de almacenamiento a escala laboratorio, funciona por termosifón y permite apreciar el movimiento del agua debido a la radiación incidente. En base a este equipo, fue posible obtener información con gran detalle. Se pudo tener acceso a los puntos más importantes de medición de temperatura, los tiempos involucrados en el proceso de calentamiento en función del volumen introducido y una idea inicial de la estratificación de temperaturas producida por el sistema. En base a lo explicado anteriormente, los objetivos del presente trabajo son: 1) Estudiar las condiciones de funcionamiento de un sistema colector solar de calentamiento de agua, de policarbonato; 2) evaluar el perfil térmico del agua y 3) estudiar los efectos del cambio en sus parámetros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales y el montaje del SCSA fueron muy simples. Consta de un colector solar (CS) y un tanque de almacenamiento (TA). El CS es una placa de policarbonato alveolar de 35cm de ancho y 52,5cm de largo. Por los tubos internos, de 25mm² de sección transversal cuadrada, circula el agua. La parte superior y la inferior poseen tubos colectores acoplados al resto del sistema. Estos tubos colectores están constituidos por alvéolos pertenecientes a la placa de policarbonato que deben cortarse adecuadamente. La placa se inclina para recibir la radiación y permitir la circulación del agua, con una diferencia de altura adecuada para lograr el termosifón con el tanque de almacenamiento. El tubo colector superior está conectado a una pequeña manguera que se introduce en la pared del TA, a dos tercios de su altura. Otra manguera, en la base del TA, está unida al tubo colector inferior del CS, como muestra la figura 1.



1. Tanque de almacenamiento
2. Colector solar
3. Tubo colector superior
4. Tubo colector inferior
5. Manguera de alimentación
6. Manguera de retorno

T_{ci} : Temperatura en la parte inferior del CS.
 T_{cs} : Temperatura de la parte superior del CS.
 T_{ti} : Temperatura de la parte inferior del TA.
 T_{ts} : Temperatura de la parte superior del TA.

Figura 1: Esquema del sistema de calentamiento solar de agua, su funcionamiento con indicación de color para las temperaturas (roja, mayor, azul, menor), y ubicación de los puntos de medición.

Una vez que el sistema se encuentra lleno de agua, la radiación incidente comienza a aumentar la temperatura del agua contenida en el CS. A medida que la temperatura se eleva, la densidad disminuye causando el paulatino ascenso del agua. A través de la manguera de alimentación, el agua ingresa en el TA generando estratificaciones de temperatura en el mismo. El agua contenida en el fondo del TA, a menor temperatura, abandona el mismo e ingresa por el tubo colector inferior del CS. De esta manera se repite el ciclo obteniéndose agua caliente. Se puede resumir que el agua fría ingresa por la parte inferior del CS y la caliente sale por la superior debido a la convección natural, como se muestra en la figura 1.

Para lograr una mejor idea de la respuesta del SCSA frente a la radiación solar, se realizaron pruebas de laboratorio, utilizando una lámpara, a distintos niveles de radiación. Luego de algunos ensayos preliminares, se decidió usar una lámpara incandescente de tungsteno, por razones de costo y facilidad de obtención. La lámpara tiene 1000 W de potencia y es del tipo usado en iluminación artificial para estadios. Con ella se pudo obtener una distribución uniforme de la radiación sobre el área del colector, con intensidades fácilmente regulables mediante un autotransformador marca Varitrans, utilizando un solarímetro (Kipp & Zonnen). El inconveniente que presenta la lámpara de este tipo es que su espectro, como se muestra en la figura 2, es muy diferente del solar, aun cuando la radiación total (en W/m^2) medida con solarímetro, tiene valores iguales. La radiación así regulada, se midió con solarímetro perpendicularmente al haz incidente. Las mediciones fueron realizadas, inicialmente, entre 200 y $1000 W/m^2$.

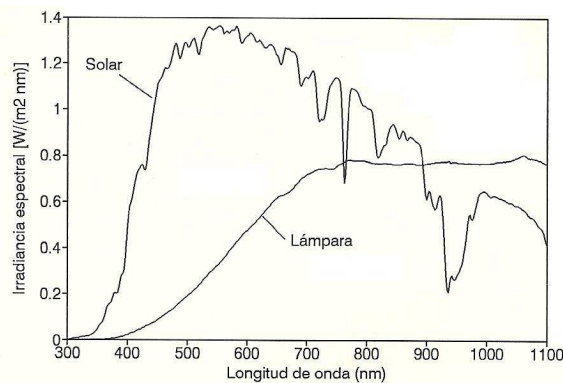


Figura 2: Espectros de radiación incidente sobre el colector solar y de lámpara, para comparar.

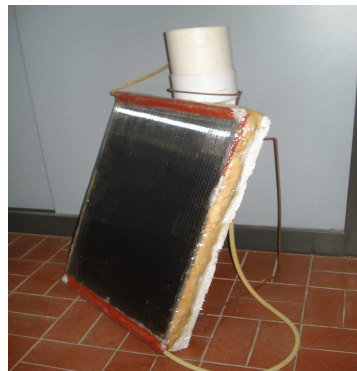


Figura 3: Fotografía del equipo empleado.

Características de las mediciones de temperaturas

Inicialmente se tomaron solo cuatro puntos característicos: las temperaturas de entrada y salida del CS (T_{ci} y T_{cs} , respectivamente) y las de entrada y salida del TA (T_{ts} y T_{ti} , respectivamente). Ver la figura 1. Las mismas fueron medidas con un data logger HOBO U12 4-External Channel, al que se colocaron termocuplas con una cubierta de acero inoxidable en la punta sobre el sensor.

Posteriormente, se realizaron medidas de temperaturas para radiaciones desde los 600 hasta los $1000 W/m^2$, con incrementos de $50 W/m^2$. Se determinaron los tiempos necesarios para que se establezcan las temperaturas en los respectivos casos, el valor máximo de las mismas, la radiación mínima para que se establezca el termosifón y la duración del mismo. Se agregó la temperatura ambiente a las mediciones realizadas para estudiar su influencia, tanto en el perfil de temperaturas como en la circulación natural del agua. Determinando los efectos que ocasionan cambios en otros parámetros, permitió elegir una buena combinación de los mismos y repetir las determinaciones anteriormente descritas. Por ejemplo, el agregado de aislamiento térmico realizado en la base del colector, luego de finalizar las medidas anteriores, permitió determinar la importancia de la

temperatura ambiente en los resultados anteriores. El mismo consistió en una capa de 2cm de lana de vidrio y 3,8cm de poliestireno expandido para el soporte mecánico. Cada una de las medidas que se tomó para cada parámetro se realizó por triplicado.

En la Figura 4 pueden verse las mediciones de Voltaje vs Radiación, para el rango de radiaciones de 200W/m² a 1000W/m². De la misma se obtuvo una dependencia lineal Radiación-Voltaje, con una regresión dada por:

$$I (\text{W/m}^2) = 5,6804 * \text{Voltaje (V)} - 290,57 \text{ con } R^2 = 0,9977 \quad (1)$$

La regresión realizada anteriormente correspondió a una distancia del SCSA a la lámpara de 35cm.

Respuesta del SCSA ante la exposición a la lámpara

Una primera prueba se realizó con una radiación aproximada de 850 W/m² durante una hora y diez minutos. Se colocó el TA a unos 10cm por encima del CS y el nivel del agua en el TA superaba los 2/3 de la altura del mismo. Luego de transcurridos los primeros treinta minutos, se estableció un termosifón que perduró durante los últimos cuarenta minutos. Puede verse en la figura 5, que cuando arrancó la circulación, tanto la Tci como la Tcs disminuyeron notablemente mientras que la Tts presentó un notable aumento. Se ve que en los últimos 10 minutos la Tes sufre una abrupta caída, podría deberse a la aparición de una burbuja de aire en la zona, lo cual condujo a la disminución de la temperatura del colector en el punto de medición. Por su parte, la Tti apenas aumentó durante el experimento.

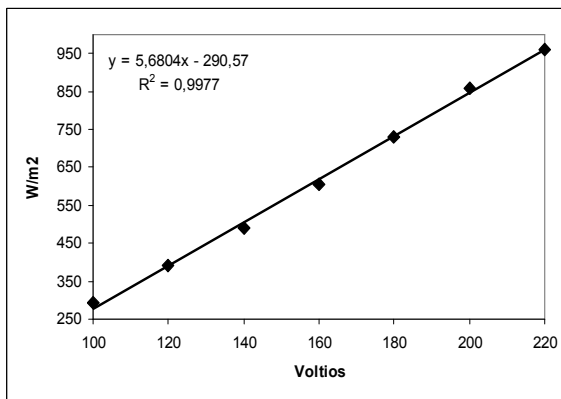


Figura 4: Curva de Radiación por metro cuadrado versus Voltaje de la lámpara utilizada

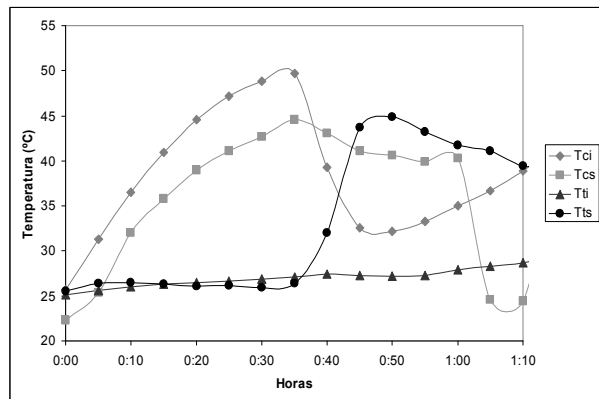


Figura 5: Medición de temperaturas resultantes de la primera experiencia

Efecto de duplicar el tiempo de exposición

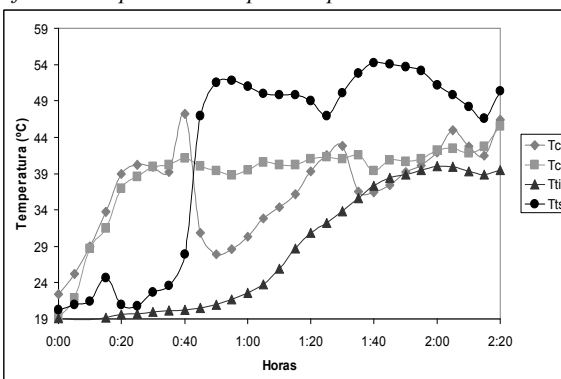


Figura 6: Medición de temperaturas luego de aumentar al doble el tiempo de exposición

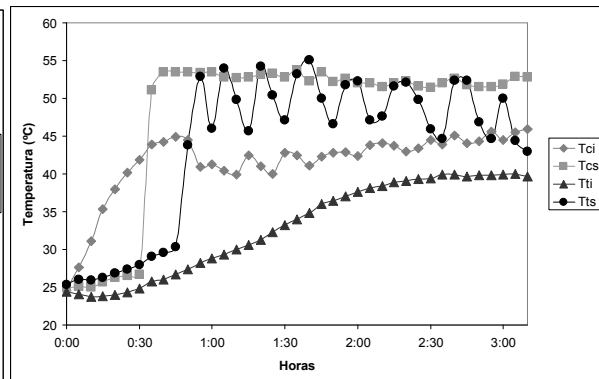


Figura 7: Medición de temperaturas luego de aumentar la radiación incidente y modificar el diseño

Se realizaron luego cuatro experiencias similares a la primera, encontrándose que la tendencia observada se mantenía. Por tal motivo, se decidió aumentar al doble el tiempo de exposición a la lámpara, es decir, dos horas y veinte minutos. En ese caso, se encontraron tendencias similares a las anteriores, salvo que, se notó un descenso de la Tts, lo cual indicaba que el termosifón dejaba de funcionar a los pocos minutos de haberse establecido. Esto presentó un primer inconveniente ya que se hacía necesario forzar la circulación cada cierto lapso de tiempo, lo cual eliminaba la idea de que el funcionamiento del SCSA fuera autónomo. A su vez, el hecho de forzar la circulación reiteradamente, logró que la Tti se incrementara notablemente como consecuencia de que la temperatura del agua dentro del CS era cada vez mayor. En la figura 6 puede verse claramente las veces que se debió forzar la circulación, observando los picos que presenta la Tts y los fuertes descensos de la Tci. A su vez, puede apreciarse que a los 40 minutos de llevarse a cabo la experiencia, la Tci sufre un notable aumento de temperatura. Esto pudo deberse a que en ese tiempo se realizó el forzado manual del flujo de manera peristáltica. Lo que podría haber causado un flujo inverso momentáneo, al presionar la manguera, que fue registrado por la termocupla.

Efecto de aumentar tres veces la altura del TA

Buscando más cambios significativos en el funcionamiento del SCSA a través del cambio de sus parámetros, se decidió aumentar considerablemente la altura del TA colocándolo a unos 30cm por encima del CS. No se pudieron apreciar notables cambios en el comportamiento del SCSA en lo que a convección o perfil de temperatura se refiere, durante una hora y diez minutos que duró la experiencia. Se forzó la circulación del agua tres veces sin lograr que la misma pueda autosostenerse. Por tal motivo, se desestimó por completo que aumentar la diferencia de altura entre el TA y el CS ayudara la convección natural.

Efecto de colocar a igual nivel la entrada al TA y la salida del CS

Utilizando de base la idea de que aumentar la diferencia de altura no produjo cambio alguno en la convección natural, se tomó la decisión de intentar dejar "a igual nivel" la altura del agua a la salida del CS con la de la entrada al TA. Para lograr esto, se redujo la cantidad de líquido contenido en el TA hasta los dos tercios de su altura, apenas por debajo de la entrada de agua. Este nuevo cambio tampoco ayudó a la convección natural a pesar de haberla forzado dos veces durante dos horas veinte minutos que duró la experiencia. Se duplicó el tiempo para aumentar la confiabilidad de la medición, al poder ver efectos posteriores. En cuanto al perfil de temperatura, la Tcs presentó un aumento de casi cinco grados centígrados. Esto puede deberse a que, al tener menor presión hidrostática sobre la entrada al CS, una menor cantidad de agua fresca ingresaba al CS permitiendo un mayor ascenso de la temperatura.

Efecto de triplicar el tiempo de exposición, aumentar la radiación incidente y modificar levemente el diseño

Para descartar la posibilidad de que el diseño del SCSA no fuera el adecuado para permitir la convección natural de agua, se hicieron cambios significativos en los parámetros y se modificó levemente el dimensionamiento del SCSA: se redujo un 30% la longitud de la manguera de entrada al TA, para disminuir las pérdidas de carga; se aumentó la radiación incidente hasta un valor de 1500 W/m^2 ; se mantuvo la altura del agua a la salida del CS igual que la de la entrada al TA, aunque esto último puede causar problemas posteriores por acercarse a una pendiente cero entre el CS y el TA ya que resultaría en facilitar la aparición de burbujas. Y se aumentó el tiempo de exposición hasta tres horas y diez minutos. En la figura 7 se observan los cambios. Transcurridos 50 minutos, la convección natural comenzó automáticamente logrando un ascenso de la Tts de casi 28°C en diez minutos. Pasado este tiempo, la convección natural se interrumpió espontáneamente durante otros diez minutos. Luego recomenzó. Este ciclo se repitió mientras duró la experiencia, presentando un período de diez minutos al principio y otro de veinte minutos hasta finalizar. Esto se debía principalmente a la formación de burbujas de vapor o aire dentro del CS, que obstruían la salida de agua y, por lo tanto, interrumpían el termosifón. Las burbujas generadas demoraban diez minutos en drenarse automáticamente, momento en que el termosifón podía restablecerse. La misma generación de burbujas tardaba, coincidentemente, diez minutos. Este ciclo, dio como resultado una curva sinusoidal con un período constante. A su vez, la Tcs alcanzó un aparente estado estacionario logrando un ascenso de la misma de 28°C . Si bien la Tci no se mantuvo perfectamente constante, presentó una leve pendiente que llegó hasta 20°C por encima de la temperatura inicial. Finalmente, la Tti presentó un paulatino aumento de temperatura de casi 15°C por encima de la inicial. Esta experiencia pudo repetirse, obteniéndose los mismos resultados para el mismo período de tiempo. La única diferencia fue que se agregó una medición más, que fue la temperatura ambiente. Esta última medición agregada se incluyó en los siguientes experimentos.

Combinación elegida para realizar las medidas con diferentes radiaciones incidentes

Utilizando como idea base los parámetros que mostraron cambios significativos, se decidió realizar las medidas sistemáticas de los efectos que ocasionan los diferentes valores de radiación incidente. La combinación elegida tuvo un volumen de agua de 1,7 litros y un tiempo de exposición de tres horas. Ya que las diferencias de altura casi no produjeron cambios en el funcionamiento de SCSA, se decidió dejar este parámetro constante con la altura del agua a la salida de CS casi a igual nivel que la de la entrada al TA apenas por debajo de la entrada de agua, a pesar de la problemática de esta elección explicada en el ítem anterior. El CS no poseía aislamiento térmico en su parte posterior, pero se encontraba pintado de negro, con pintura negro mate, salvo una franja que ocupaba un tercio de la superficie, transparente. El TA presentó una pantalla de material aislante que impidió la incidencia de la radiación proveniente de la lámpara al agua contenida en el mismo.

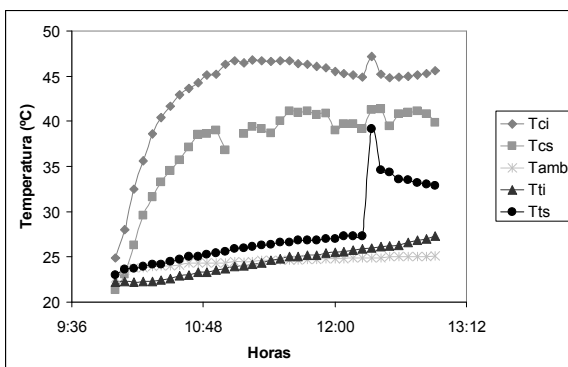


Figura 8: Medición de temperaturas con una radiación incidente de 600 W/m^2

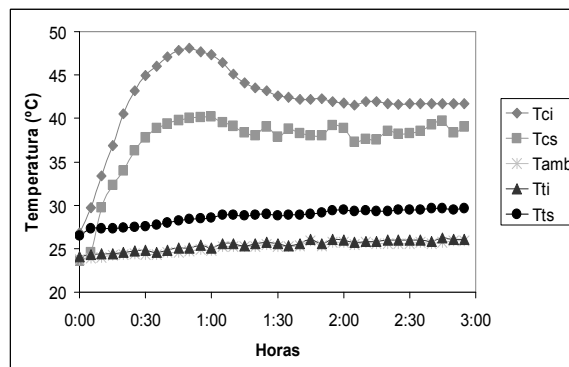


Figura 9: Medición de temperaturas con una radiación incidente de 650 W/m^2

Efecto de aplicar una radiación incidente de 600 W/m^2

Como se planteó inicialmente, se comenzó con una radiación incidente de 600 W/m^2 . Analizando la figura 8, se observa que, pasados 50 minutos, la Tci se mantuvo casi constante en 20°C por encima de la temperatura inicial, al igual que la Tcs. Luego de 2 horas y 15 minutos la Tts presentó un aumento de 4°C , momento en el cual el termosifón comenzó a funcionar, durante solo 5 minutos, alcanzando una temperatura de 16°C por encima de la inicial. Durante los restantes cuarenta minutos la

temperatura descendió paulatinamente hasta alcanzar casi 10°C más que la temperatura inicial. La Tti tuvo un aumento de casi 5°C por encima de la temperatura inicial y finalmente la temperatura ambiente aumentó 3°C. Solo una de tres medidas dio este resultado, el resto no logró desarrollar una convección natural. Quedó claro que, para que el termosifón pueda funcionar, en el diseño planteado, es necesaria una radiación mayor.

Efecto de aplicar una radiación incidente de 650 W/m²

Se realizaron incrementos de radiación de 50W/m², llevando la radiación incidente a 650W/m² para este experimento. Los resultados obtenidos no fueron los esperables. A partir de la figura 9 se denota que tanto Tcs como Tci presentaron un leve aumento de 15°C con respecto a la temperatura inicial y, tanto Tts como Tti solo aumentaron aproximadamente 3°C, producto del cambio en la temperatura ambiente. Las tres medidas fueron muy parecidas.

Efecto de aplicar una radiación incidente de 700 W/m²

Los resultados obtenidos fueron acordes a los anteriores. Como puede verse en la figura 10, la Tcs alcanzó, aproximadamente, una temperatura de 23°C por encima de la inicial, mientras que la Tci unos 17°C por encima de la inicial. La Tts presentó un aumento de 5°C con respecto a la inicial, sin lograr la convección natural, producto de una pequeña estratificación debido al agua caliente que se mueve “al revés” desde la entrada al CS hasta el TA. Finalmente, la Tti acompañó a la temperatura ambiente con un leve aumento de 2°C. Una de las tres mediciones presentó un comportamiento anómalo con respecto a las otras dos, ya que experimentó una convección natural que se activó a los veinticinco minutos de comenzado el experimento y se mantuvo durante treinta minutos más.

Efecto de aplicar una radiación incidente de 750 W/m²

Los resultados obtenidos fueron muy similares a los anteriores. En la figura 11, a partir de los primeros 45 minutos, la Tcs alcanzó una temperatura estable de 25°C por encima de la inicial, mientras que la Tci alcanzó 17°C por encima de la inicial, aunque presentó un aumento neto de casi 26°C. La Tts mostró un paulatino ascenso de su valor, alcanzando 8°C por encima de la inicial, por los mismos motivos explicados en el caso anterior. Finalmente, la Tti acompañó a la temperatura ambiente, con un aumento de 3°C. Las tres mediciones dieron resultados muy parecidos.

Efecto de aplicar una radiación incidente de 800 W/m²

Los resultados fueron similares a los de la experiencia anterior. La figura 12 muestra que, en los primeros 35 minutos, la Tcs comenzó a estabilizarse y luego se mantuvo constante en 28°C por encima de la inicial, mientras que la Tci llegó a 26°C por encima de la inicial, por poco coincidente con la Tcs. Nuevamente, la Tts mostró un paulatino ascenso de su valor logrando un aumento de casi 9°C. Por último, la Tti acompañó a la temperatura ambiente con un leve ascenso de 3°C. Las tres experiencias mostraron las mismas tendencias.

Efecto de aplicar una radiación incidente de 850 W/m²

En esta experiencia solo se realizaron dos medidas debido a que la primera experiencia se realizó con este valor de radiación incidente. De acuerdo a la figura 13, pasados los primeros treinta y cinco minutos la Tts empezó a estabilizarse y finalmente se logró una temperatura de 28°C por encima de la inicial, mientras que la Tti alcanzó un valor de 23°C por encima de la inicial. Estos resultados enunciados anteriormente se repitieron en las dos medidas realizadas. La principal diferencia radicó tanto en la Tts como en la Tti. En el primer experimento, el SCSA no presentó convección alguna y la Tts apenas logró un salto de 9°C. En el segundo experimento, luego de la primera hora, el SCSA presentó una convección natural que duró quince minutos. Volvió a establecerse la convección otras dos veces más, presentando una pequeña duración en la segunda y estableciéndose definitivamente en la tercera. Alcanzada la hora y 55 minutos la convección se estabilizó y duró hasta el final de la medición. La Tts pudo alcanzar un valor de 17°C por encima de la inicial. Puede decirse que el diseño se encuentra en el límite del funcionamiento del termosifón para la radiación planteada.

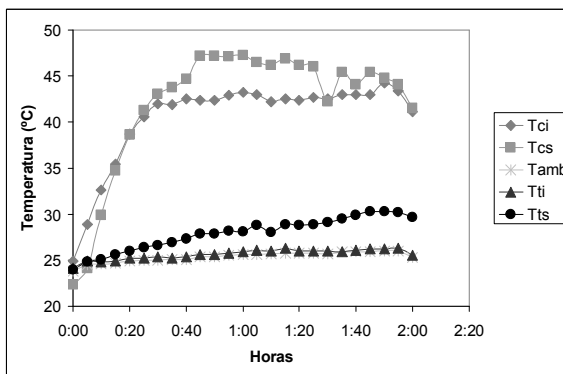


Figura 10: Medición de temperaturas con una radiación incidente de 700 W/m²

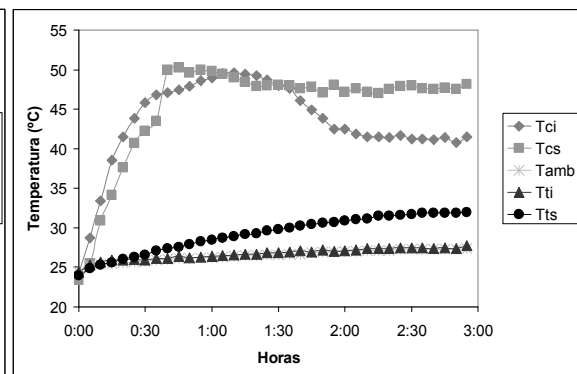


Figura 11: Medición de temperaturas con una radiación incidente de 750 W/m²

Efecto de aplicar una radiación incidente de 900 W/m²

En esta experiencia la radiación incidente fue de 900W/m², valor que según se podía inferir la convección natural podría llevarse a cabo sin ningún inconveniente (debido a los resultados obtenidos en el caso anterior), pero no fue así. Tras realizar tres experiencias con las mismas condiciones, solo la tercera logró una convección natural casi permanente, la única diferencia entre las pruebas fue la temperatura ambiente. La última medición se realizó con una temperatura ambiente 3°C

mayor que la primera y 1°C mayor que la segunda. Cabe destacar que en la segunda medida la convección natural se activó brevemente. Aparentemente, el SCSA aún se encuentra en el límite para la radiación planteada y se puede detectar una mínima dependencia con la temperatura ambiente. Analizando los casos anteriores, cuando la convección natural tuvo lugar, se puede detectar que la temperatura ambiente superaba los 22°C. Esto puede deberse a que, como el SCSA no posee aislamiento en su parte posterior, al haber menor temperatura ambiente se establece una mayor diferencia de temperatura entre el CS y el aire que lo rodea resultando en un flujo de calor saliente mayor. Si se ve la figura 14, se comprueba que la temperatura ambiente es mayor a los 20°C. A pesar de que no hubo formación de burbujas, al menos visibles, la convección natural se detuvo dos veces antes de establecerse definitivamente. La Tci alcanzó una temperatura de casi 30°C por encima de la inicial, al igual que la Tcs. En cuanto a la Tts, logró un aumento de casi 20°C. La Tti llegó hasta una temperatura de 14°C por encima de la inicial y finalmente la temperatura ambiente presentó un delta de casi 3°C. Los resultados obtenidos no son suficientes como para afirmar que con esta radiación incidente se puede asegurar la convección natural del agua y, por ende, el correcto funcionamiento del SCSA.

Efecto de aplicar una radiación incidente de 950 W/m²

Con esta radiación incidente, se constató que, para el modelo, es el mínimo requerido para que el SCSA funcione correctamente con las características planteadas. De las tres mediciones realizadas solo una de ellas no produjo convección natural, mientras que en las restantes fue permanente y alcanzaron un aparente estado estacionario. Se destaca nuevamente que, en la única medición que no se logró una convección natural, la temperatura ambiente fue menor que 20°C mientras que en las restantes fue de 21°C, valores muy parecidos a los establecidos para la experiencia anterior en donde la radiación incidente era menor. De la figura 15, se observa que Tci alcanzó un valor de casi 29°C por encima de la inicial, mientras que Tcs logró un aumento de 27°C. En cuanto a la Tts, se mantuvo constante en un valor de 22°C por encima de la temperatura inicial mientras que Tti superó en 16°C a la temperatura inicial. Se puede afirmar que la temperatura ambiente influyó poco en dicho aumento ya que solo incrementó 2°C. A partir del estudio de este caso, y sosteniéndose en los anteriores, se ratifica que 950W/m² es la mínima radiación con la que el SCSA (con las características dadas) puede funcionar correctamente. Por su parte, con estos niveles de radiación es posible que la temperatura ambiente esté alrededor de 21°C, valor para el cual se comprobó una adecuada circulación de agua.

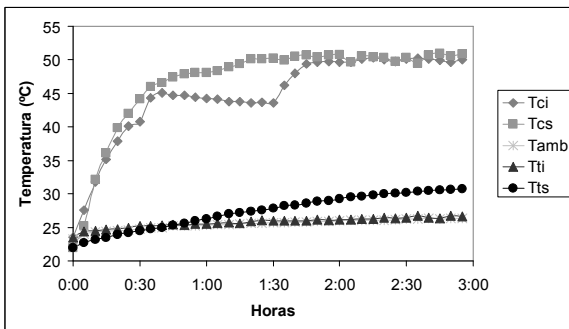


Figura 12: Medición de temperaturas con una radiación incidente de 800 W/m²

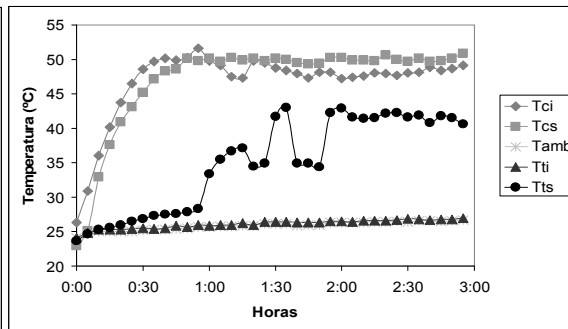


Figura 13: Medición de temperaturas con una radiación incidente de 850 W/m²

Efecto de aplicar una radiación incidente de 1000 W/m²

Solo una de las tres mediciones realizadas no logró la convección natural, mientras que las otras dos desarrollaron perfiles muy parecidos con estados casi estacionarios. Nuevamente, en la experiencia que no se logró la convección natural, la temperatura ambiente era muy inferior a las otras dos. En la figura 16 Tci alcanzó 32°C por encima de la inicial y Tcs 30°C por encima de la inicial. Tts se mantuvo casi constante a 20°C por encima de la inicial. Tti aumentó paulatinamente mostrando un cambio de concavidad en su curva como siempre, logrando 15°C por encima de la inicial. En cuanto a la temperatura ambiente se mantuvo constante durante toda la medición. Como se explicó, si bien en una de las medidas no se logró la convección natural, en el momento del día en que se alcanza la radiación incidente mencionada, la temperatura ambiente se encuentra en el rango adecuado.

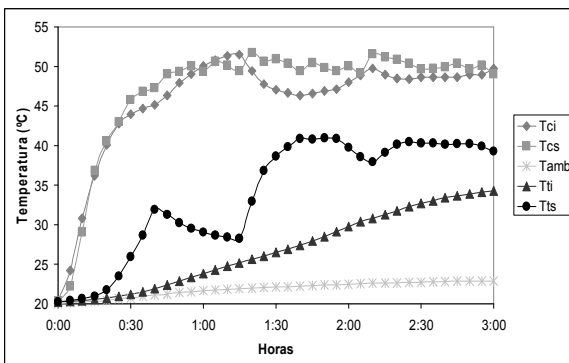


Figura 14: Medición de temperaturas con una radiación incidente de 900 W/m²

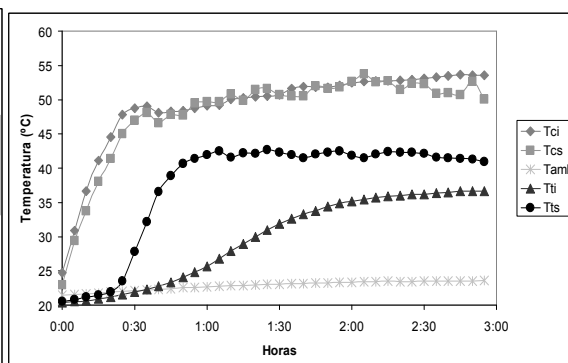


Figura 15: Medición de temperaturas con una radiación incidente de 950 W/m²

Efecto de agregar aislamiento térmico con una radiación incidente de 600 W/m²

Una vez realizados todos los cambios con respecto a la radiación incidente, se agregó aislamiento térmico para evitar pérdidas por la parte posterior del colector y se pintó de negro, con pintura negro mate, la totalidad de esta parte. Para determinar la influencia de la temperatura ambiente al proceso de convección natural, se aplicaron las mismas radiaciones incidentes, a partir de 600W/m². A pesar del agregado, las diferencias no fueron muy grandes. De la figura 17, Tci alcanzó 18°C por encima de la inicial mientras que el salto de la Tcs fue de 23,5°C. Esta última es de solo 3,5°C mayor al caso sin aislamiento y, por el contrario, Tci resultó ser 2°C menor. Prácticamente, estas temperaturas no se vieron afectadas. En cuanto a Tts, acompañó a Tti y llegaron a 2°C por encima de la inicial. Este resultado es muy pobre con respecto al que se obtuvo sin aislamiento, ya que el salto de la Tts alcanzado había sido de 10°C y para la Tti de 5°C. Puede deberse a que en las primeras medidas la temperatura ambiente sufrió un aumento de 3°C mientras que en esta última el mismo ni siquiera llegó a 2°C.

Efecto de agregar aislamiento térmico con una radiación incidente de 800 W/m²

Dada la poca diferencia, e incluso los resultados menores a los esperados, existente entre en la medidas con y sin aislamiento térmico para una radiación incidente de 600W/m², se decidió aumentar la misma hasta 800W/m². Para esta sí hubo ciertas diferencias. Solo una de las medidas realizadas logró una convección natural que no pudo mantenerse constante. Esta fue una primera diferencia, ya que en ninguna de las medidas sin aislamiento se logró una convección natural con dicha radiación. De la figura 18, una hora y media luego de someter al SCSA a la radiación, se logra una primera convección que no logra sostenerse. Hacia el final, Tcs alcanzó 35°C por encima de la inicial y logró un salto máximo de casi 38°C. Tci tuvo un salto de 36°C. Hasta aquí se tiene la segunda diferencia significativa, ya que los saltos térmicos han sido casi 10°C superiores a los anteriores. Se puede observar que la Tts logró una temperatura de 16°C por encima de la inicial, y llegó hasta un salto máximo de 38°C. Aquí se tiene la tercera y más importante de las diferencias ya que es la temperatura que realmente interesa. En el caso anterior, el salto fue 7°C inferior con respecto al valor final y 29°C inferior si se considera el máximo logrado. Finalmente, la Tts desarrolló un salto térmico de 13°C con un salto máximo de 18°C lo cual contrasta demasiado con los valores anteriores que fueron de tan solo 3°C y acompañaron a la temperatura ambiente. Esta última presentó un aumento menor a 1°C para esta nueva medida. A pesar de las marcadas diferencias obtenidas con el agregado del aislante para la radiación enunciada, el hecho de que solo una de las medidas lograra una convección natural y ni siquiera haya podido sostenerse indica que 800W/m² queda por debajo de la radiación mínima para que el SCSA funcione correctamente.

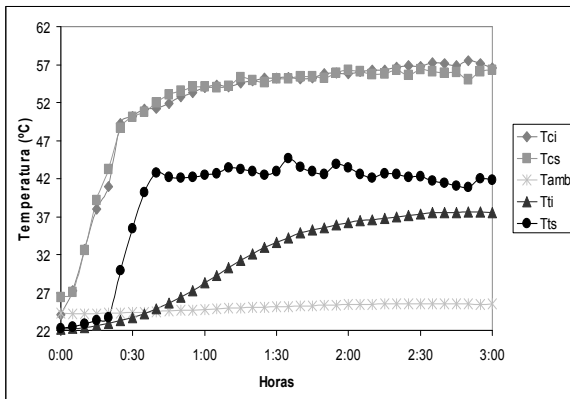


Figura 16: Medición de temperaturas con una radiación incidente de 1000 W/m²

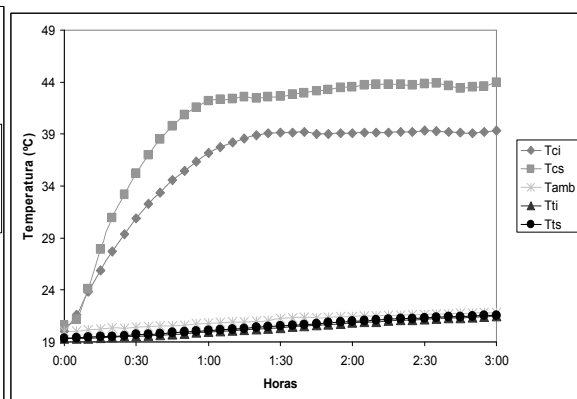


Figura 17: Medición de temperaturas con una radiación incidente de 600 W/m² y aislamiento térmico

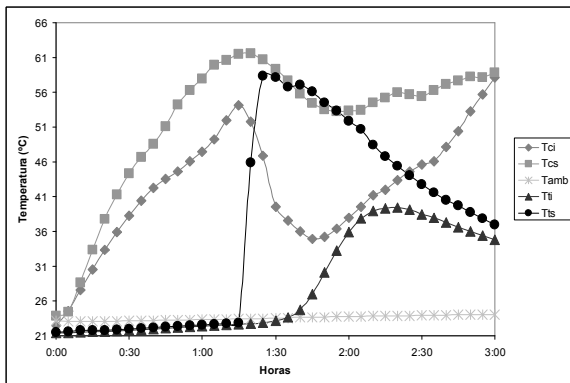


Figura 18: Medición de temperaturas con una radiación incidente de 800 W/m² y aislamiento térmico

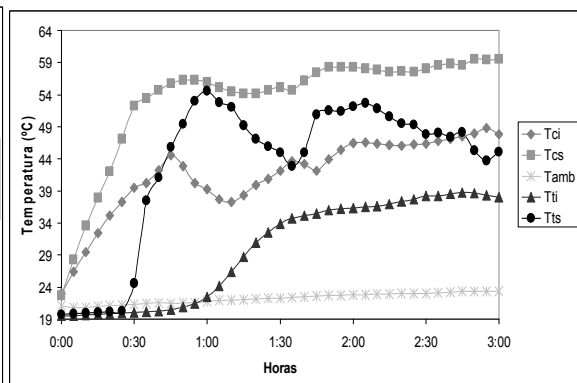


Figura 19: Medición de temperaturas con una radiación incidente de 850 W/m² y aislamiento térmico

Efecto de agregar aislamiento térmico con una radiación incidente de 850 W/m²

En busca de la mínima radiación para el correcto funcionamiento del SCSA con aislamiento, se realizaron las medidas para una radiación de 850W/m². Si bien no se lograron estados estacionarios, las tres mediciones realizadas revelaron convección natural que logró aumentar de manera notable la temperatura del agua contenida en el TA, es decir que cumple con el objetivo del equipo. Las tres mediciones realizadas fueron muy parecidas. Observando la figura 19, se puede ver que la Tci

llegó hasta una temperatura de casi 25°C por encima de la inicial, mientras que la Tcs logró un delta de 37°C. Si bien la Tci alcanzada en este caso es 3°C inferior con respecto a la misma radiación sin aislante térmico, la Tts es 13°C superior, y es ésta última la que está más relacionada con la temperatura que realmente nos interesa que es la del TA. En cuanto a la Tts, experimentó un salto térmico de casi 25°C logrando un pico de casi 30°C. Mientras que la Tti pudo ascender hasta 19°C por encima de la temperatura inicial. Para este par de temperaturas, ambas son mayores que las correspondientes al caso sin aislamiento térmico, siendo la Tts 4°C superior con un máximo de 9°C y la Tti 9°C más alta. La principal diferencia y el punto más importante quizás, es que todas las mediciones realizadas lograron desarrollar una convección natural, independientemente de la temperatura ambiente. Si bien no pudo mantenerse constante la mencionada convección, fue suficiente como para no solo superar las medidas obtenidas sin aislante, sino que también se obtuvieron temperaturas del agua muy acordes al uso que se le quiere dar. Por lo tanto, se concluye que si el SCSA se encuentra con aislamiento térmico, la mínima radiación para que funcione adecuadamente es de 850 W/m², que significan 100 W/m² menos que sin este último agregado.

CONCLUSIONES

Luego de realizar las mediciones anteriormente indicadas, se concluye que el SCSA construido con policarbonato alveolar, funciona mediante termosifón con una radiación mínima de 950 W/m² si no se agrega aislamiento térmico. Si se usa aislante térmico, la radiación mínima necesaria para el correcto funcionamiento del mismo es de 850 W/m². Si bien no se puede alcanzar estados estacionarios, las temperaturas obtenidas son acordes al uso que se le quiere dar. En este último caso, la temperatura ambiente no afecta al funcionamiento del SCSA. A su vez se determinó una fuerte dependencia del desarrollo de la convección natural con la temperatura ambiente, pudiendo determinarse que ésta última debiera ser mayor que 21°C para que el termosifón funcione sin inconveniente alguno, aunque se cumple con esta condición cuando se tiene la radiación indicada.

Cabe destacar la salvedad de que el policarbonato no es un material idóneo para un SCSA ya que la exposición continua con el agua produce la hidrólisis del mismo y su posterior disgregación.

REFERENCIAS

- Alireza Hobbi, Kamran Siddiqui, Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS, *Solar Energy* 83 (2009) 700–714.
- Luis Juanicó, A new design of roof-integrated water solar collector for domestic heating and cooling, *Solar Energy* 82 (2008) 481–492.
- D. Diakoulaki, A. Zervos, J. Sarafidis, S. Mirasgedis, Cost benefit analysis for solar water heating systems, *Energy conversion and management* 42 (2001) 1727-1739
- P. T. Tsilingiris, Design and performance of large low-cost solar water heating systems, *WREC* (1996) 617-621
- Amílcar Fasulo, Como y porqué funciona un calefón solar, *ASADES, Taller 3* (2009) Calentamiento de agua mediante energía solar; comunicación personal y cesión de un prototipo.

ABSTRACT

The study of the working conditions of a solar water heating system made of polycarbonate was carried out. The water temperature was measured, in some target points, applying different radiation levels from 600 to 1000 W/m². The same measures were made using thermal insulation. The necessary minimal radiation to establish a thermosiphon and the time it takes to develop under different condition were determined, the values and the time it takes for the temperature to stabilize at different points under those conditions were determined too. The necessary minimal radiation to establish a thermosiphon was noticeably affected by the environmental temperature. No steady state was reached when thermal insulation was added to the system.

Keywords: solar water heating, polycarbonate, thermosiphon.