

# CARACTERIZACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR, ACUMULADOR INTEGRADO CON PLANO, EN FUNCIÓN DEL ACUMULADOR<sup>1</sup>

**Amílcar Fasulo\***,\*\* – e-mail: [afasulo@unsl.edu.ar](mailto:afasulo@unsl.edu.ar)  
**Jorge Barral\*\*** – e-mail: [jbarral@ing.unrc.edu.ar](mailto:jbarral@ing.unrc.edu.ar)  
**Jorge Follari\*** – e-mail: [follari@unsl.edu.ar](mailto:follari@unsl.edu.ar)  
**Rodolfo Stoll\*\*** – e-mail: [rstoll@ing.unrc.edu.ar](mailto:rstoll@ing.unrc.edu.ar)  
**Javier Garnica\*\*** – e-mail: [jgarnica@ing.unrc.edu.ar](mailto:jgarnica@ing.unrc.edu.ar)

\*Universidad Nacional de San Luis, Departamento de Física, Argentina

\*\* Universidad Nacional de Río Cuarto, Facultad de Ingeniería, Argentina

**Resumen.** Este trabajo muestra las propiedades de un colector solar acumulador monotanque integrado con un colector plano, analizadas desde el acumulador. El acumulador se caracteriza por mantener su estado de estratificación en todo momento, incluso durante el proceso de extracción de agua caliente. Esta propiedad obtenida mediante un mecanismo muy simple resulta de fundamental importancia para obtener un mayor rendimiento del dispositivo y por otra parte permite simplificar su estudio. Un conjunto de termocuplas instaladas en el interior del dispositivo nos permite seguir la evolución de la temperatura en su interior, determinar como cambia durante el proceso de calentamiento, de enfriamiento nocturno y durante la descarga de agua caliente. Este proceso es seguido durante varios días, los suficientes para tener en el registro una secuencia de días claros, completamente y parcialmente nublados, cubriendo las principales estaciones del año. Estos muestran que durante la descarga el agua fría que ingresa ocupa la porción inferior del dispositivo y deslaza hacia arriba los estratos que se encuentran a mayor temperatura. Se presentan diagramas, fotografías, tablas y gráficas.

**Palabras-clave:** Energía Solar, Conversión Térmica, Colectores

## 1. INTRODUCCIÓN

Es común encontrar sobre los techos de las viviendas de la región centro oeste de la Argentina, caracterizada por su clima templado y seco, la instalación de dos tanques para la acumulación del agua potable que provee la red, donde uno de estos es para el circuito de agua caliente, contiene un calefactor eléctrico o a gas. Es común que este tanque se encuentre recubierto con pintura negro-mate, para ahorrar el uso del sistema convencional de energía, en la época estival da buenos resultados. Este procedimiento posee varias desventajas, donde la principal es que en los periodos nocturnos y de bajas temperaturas la pintura incrementa las pérdidas de calor. Del análisis de su funcionamiento, surgió la idea de construir un colector solar acumulador monotanque (Fasulo et al., 1997) que resultó en un nuevo dispositivo.

La bibliografía nos lleva a unos de los primeros dispositivos de esta naturaleza, desarrollado para la región central de Europa, donde el principal defecto que poseen los colectores solares de placa plana, destinados a la producción de agua caliente, es el congelamiento en los periodos nocturnos o de bajas temperaturas. Este dispositivo está constituido por un tanque, prismático rectangular de 1m x 0.96m x 0.1m, que cumple las funciones, además de acumulador, de receptor-conversor de la radiación solar. Este tanque, de 96 litros de capacidad, es encerrado en una caja con cubiertas aislantes, opacas en sus laterales y fondo (espuma de poliuretano). La superficie que se expone al sol, con una inclinación de 45° respecto a la línea horizontal, posee un absorbente selectivo (0,95 de absorbancia y 0,11 de emitancia). El cierre vidriado de la caja, contiene un aislamiento semitransparente (1 a 1,5 W/m<sup>2</sup> ° K) de transmitancia térmica y 64% de transmitancia de la radiación difusa, producida por una estructura de 0.1m de espesor, tipo panal de abejas, construida con películas de policarbonato muy delgadas (Schmidt et al., 1988). Este dispositivo produce 40 litros diarios de agua caliente con una eficiencia del 28 % al 36 % operando durante todo el año. La eficiencia de las cubiertas aislantes es puesta de manifiesto mediante la experiencia que muestra el agua contenida en el tanque en una temperatura estable (variando entre 9° C. y 12° C.) a lo largo de ocho días seguidos con baja radiación solar y con una temperatura ambiente fluctuando entre -10° C y 0° C. Posteriormente surgen otros modelos con uno o dos tanques (Tripanagnostopoulos y Yianoulis, 1992), con varios tubos de sección transversal cilíndrica (Barral y Wood, 1997). Nuevos modelos incluyen superficies reflectantes en el interior de la caja (Smyth et al., 2001), (Souliotis y Tripanagnostopoulos, 2004), (Stoll et al., 2007). Todos estos dispositivos son la solución para las regiones que presentan bajas temperaturas y para reducir los costos, pues poseen un único cuerpo y no requieren elementos de control.

<sup>1</sup> Trabajo parcialmente financiado por el ANPCyT; PICT 2005 – 30050

El clima donde se desarrolla la experiencia que se describe en este trabajo, es diferente. San Luís ubicado en el centro oeste de la argentina (33,29° S; 66,34° O y 724 m) que posee clima templado seco con temperaturas en verano de hasta 38° C., saltos térmicos de hasta 20° C. en el día. Una frecuencia de vientos del 89% con una velocidad media de 5,2 m/seg. Inviernos templados, cuatro a cinco periodos de tres a cinco días con temperaturas bajas, 3° a 7° C y excepcionalmente con valores bajo cero. Posee abundante radiación solar: Valores medios mensuales que van de los 8,6 MJ/m<sup>2</sup> en junio a 24,6 MJ/m<sup>2</sup> en enero y promedio anual de 17 MJ/m<sup>2</sup>. Estas características se pueden extender a todo el extenso territorio centro-oeste de la Argentina, (Fasulo et al 1994).

Consecuentemente el primer dispositivo desarrollado en nuestro laboratorio y que denominamos colector solar acumulador, CSA, es de características diferentes. No posee caja con materiales aislantes, no posee reflectores de la radiación solar, recibe toda la radiación solar, directa y difusa que llega al lugar, más la reflejada por el piso. Está constituido por un tanque de sección circular, de 0,78 m. de diámetro y 384 litros de capacidad. Está rodeado por una cubierta cilíndrica y tapa plana de policarbonato celular de 0,004m de espesor. Va apoyado sobre una superficie de material aislante. La evaluación experimental se llevó a cabo, a lo largo de un año, comparando su producción con la de dos calefones solares comerciales, compuestos por un colector solar de placa plana de dos metros cuadrados de superficie y tanque con cubiertas aislantes de 10 cm. de espesor. Los tres dispositivos fueron sometidos a la experiencia de extraer 150 litros de agua por día en tres tomas diarias de 50 litros: Una por la mañana antes de que salga el sol, una a medio día y la otra por la tarde después de la puesta del sol. La eficiencia se determinó en función de las temperaturas de la masa de agua extraída y la de entrada en la operación anterior, y la radiación solar incidente durante el periodo tomado. Se demostró que el CSA es competitivo para la producción de 150 litros de agua caliente por día, durante los seis meses estivales y queda fuera de competencia durante los restantes seis meses, en torno del periodo invernal. Durante este periodo mantiene valores de eficiencia en torno del 30 %, el agua caliente que produce reduce su temperatura a valores inferiores a 40 ° C., pasando entonces a cumplir funciones de precalentador (Fasulo et al., 1997).

En una segunda etapa se trabajó para mejorar el dispositivo y aumentar su producción. Para mejorar la calidad se buscó reducir sus pérdidas térmicas: 1) Reemplazando la pintura negra-mate por una superficie selectiva, cromo negro. 2) Incorporando dos cubiertas adicionales de policarbonato celular. Para incrementar la producción y competir con los calefones solares comerciales para uso doméstico diseñados para producir 300 litros de agua caliente por día. Estos están compuestos por tanque térmicamente aislado y dos colectores solares planos de dos metros cuadrados cada uno, se encaran dos opciones: A) Se incorpora al CSA un colector plano de dos metros cuadrados de superficie, para constituir lo que denominamos: Colector solar acumulador integrado con plano, CSAIP. B) Se duplica la capacidad de acumulación del tanque, duplicando su altura. Los resultados nos llevan a conclusiones similares a las del primer caso: producción estival de 300 litros por día, a temperaturas por encima de los 40° C y fuera de competencia durante el periodo invernal. (Fasulo et al., 1999 y 2001).

En todos los casos las experiencias fueron diseñadas y ejecutadas para generar una herramienta que permita al usuario determinar y dimensionar, tanto el dispositivo solar como el convencional complementario, al proyectar la aplicación. En consecuencia las experiencias se efectúan durante tres periodos del año que posean características diferentes (por ejemplo verano, otoño e invierno, de forma tal que permitan caracterizar todo el año) y en cada uno de estos, a lo largo de no menos de 10 días seguidos. La variable buscada será la temperatura a la salida de cada uno de los dispositivos, que será puesta en función de los días Julianos. Así el desempeño del calefón solar comercial compuesto por dos colectores de placa plana de 2 m<sup>2</sup> cada uno y acumulador con aislantes térmicos opacos es representado por la Ec.(1) y un colector solar acumulador integrado con un colector plano de 2 m<sup>2</sup>, mediante la Ec.(2). Ambas obtenidas desde 231 puntos producidos en experiencias efectuadas entre los días Julianos 22 y 174. (Fasulo et al. 2002). Donde:  $T_{out}$  es la temperatura del agua obtenida a la salida del dispositivo y  $t$ , los días Julianos.

$$T_{out} \text{ (Calefón solar comercial)} = 50,26 - 0,073 t \quad (1)$$

$$T_{out} \text{ (CSAIP)} = 47,11 - 0,097 t \quad (2)$$

En una tercera etapa, y buscando reducir las pérdidas térmicas, que constituyen el mayor defecto de los dispositivos experimentados, se buscó llevar la selectividad a las cubiertas semitransparentes que rodean el tanque. Se construye un segundo tanque de iguales dimensiones, 384 litros de capacidad. Se lo cubrió con pintura negra-mate y se reemplazó un cilindro intermedio de policarbonato y las dos tapas interiores por superficies de vidrio. Este nuevo CSAIP se lo evaluó experimentalmente con el primer CSAIP. Resultando que ambos presentan eficiencias, determinadas a partir del agua extraída, que van del 27 % al 40%, dependiendo de las condiciones climáticas imperantes. Resultan, en todos los casos, muy próximas entre sí, con un pequeño predominio de la selectiva de cromo negro, pero que en numerosas casos se invierten (Fasulo et al., 2005).

### 1.1 Objetivos, alcance, instrumentos y límites de la experiencia

El principal objetivo de este trabajo es determinar experimentalmente la evolución de la temperatura en el interior del acumulador. Disponer de un conocimiento de la distribución de estas temperaturas y como cambian durante los procesos de calentamiento, enfriamiento e incluso durante los intervalos de descarga-carga del fluido. Todo ello necesario para encarar el análisis teórico del dispositivo. Secundariamente la difusión de esta propuesta, por que consideramos que aplicada en regiones con condiciones climáticas menos severas que las locales en el periodo invernal, resultará competitivo con relación a los calentadores solares de agua basados en colectores de placa plana.

Las temperaturas se midieron con termocuplas conectadas a un termómetro digital Fluke, que se pone en marcha en los periodos en que se efectúan las determinaciones. La temperatura ambiente también son datos puntuales tomados con una termocupla ubicada a la sombra e inmediatamente por debajo del colector. La radiación solar es tomada con un piranómetro Eppley, con registros cada 15 segundos, acumulada y procesada en una PC. La presentación de los datos temperatura y radiación son solo al efecto de mostrar las características climáticas de cada uno de los días experimentados. Por otra parte se aclara que el análisis de eficiencia se efectuó en presentaciones anteriores, disponiendo para ello de datos de radiación solar normal directa. Global horizontal y difusa y a partir de las temperaturas del agua obtenida a la salida del colector. (Fasulo et al 2001). El colector solar de placa plana usado, fue desarrollado en nuestro laboratorio y es comercializado por una firma privada local. El receptor de la radiación está construido con dos placas de acero inoxidable, mantenidas muy próximas entre si, separadas mediante leves ondulaciones practicadas en una de ellas y unidas por soldaduras de punto. Este es alojado en una caja metálica con aislaciones apropiadas y la superficie que se expone al sol con una placa de policarbonato celular de 0,006 m de espesor, posee una eficiencia del orden del 50% (Fasulo et al 2002).

## 2. EL COLECTOR SOLAR ACUMULADOR INTEGRADO CON PLANO

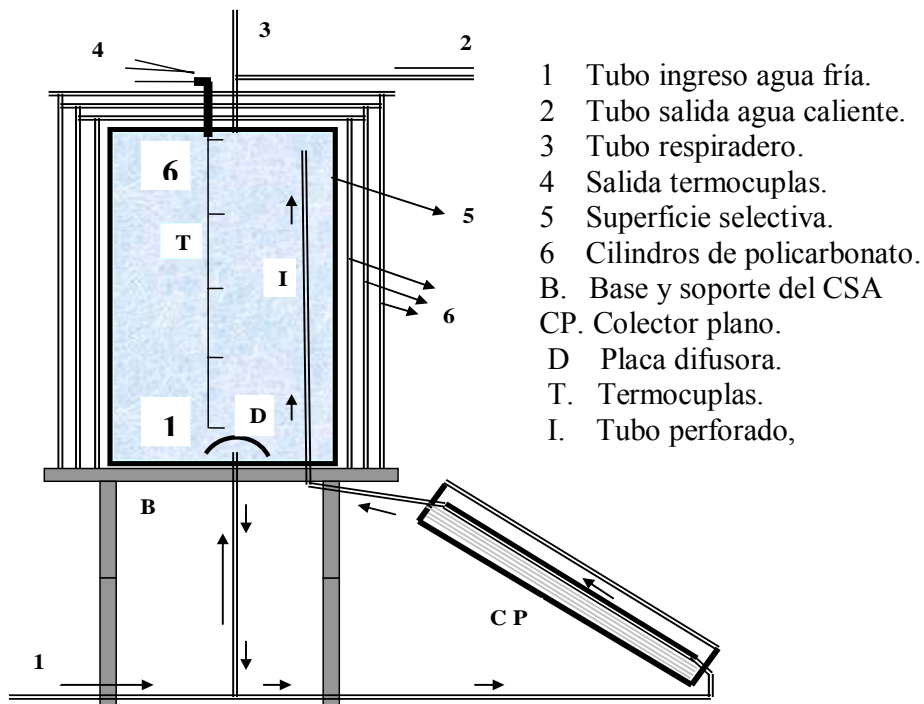


Figura 1 Diagrama, fuera de escala, del Colector Solar Acumulador Integrado con colector plano. Donde T indica las posiciones de las termocuplas: corresponde la primera, la próxima a la base T1 y la última en el extremo superior del tanque a T6, el resto T2 a T5 se ubican a igual distancia entre si y las extremas respectivamente.

El CSAI está constituido por un recipiente de sección circular, construido con placas de acero inoxidable austenítico de 1 mm. de espesor y 1 m. de ancho. Este tipo de acero permite soldaduras bajo atmósfera inerte sin afectar sus propiedades. Posee una capacidad de 384 litros. Las tapas se construyen mediante plegado a 90 grados para obtener una pestaña de unos 2 cm. que introducida en el cilindro, previamente construido, permite mediante soldadura continua

de esta con el borde exteriores del cilindro conformar el depósito. Éste es sometido a pruebas de resistencia bajo una columna de 5m de agua.

La tapa inferior posee dos orificios. Uno el ubicado en el centro, se le suelda un tubo destinado al ingreso del agua fría proveniente de un tanque de reserva ubicado por encima del dispositivo y a una altura lo suficiente para asegurar la presión necesaria para el flujo continuo de agua que requiere una vivienda. Enfrentando a este orificio se instala una pequeña placa circular, muy levemente curvada, tiene por finalidad dispersar el agua que ingresa, hacia los laterales. Esta placa juega un rol importante en el desempeño del dispositivo, pues evita que se rompa el estado de estratificación del fluido contenido en el depósito. El segundo orificio ubicado a dos centímetros del borde de la tapa posee una cupla soldada y tiene por función el ingreso de la conexión entre colectores, las características de esta conexión y la forma en que opera se describirá por separado. La tapa superior contiene dos perforaciones: Una de ellas, la ubicada en el centro posee un tubo soldado destinado a la instalación de una columna de termocuplas, seis en este caso, que se disponen: Dos de ella a unos 2 cm. de la tapa superior una y la otra e igual distancia de la placa dispersora de la tapa inferior. Las cuatro restantes se disponen separadas unos 16 cm. entre si y de las dos puestas en los extremos. Un segundo orificio practicado en la tapa superior contiene un tubo destinado a la extracción del fluido hacia el consumo y un tubo de respiración para eliminar los gases.

La superficie exterior y la tapa superior del cilindro se cubren con una delgada placa de aluminio autoadhesiva. Esta película que comercializa, una firma Europea, en tiras de 0,4 m. de ancho por varios metros de longitud, posee en una de sus cara una sustancia adhesiva que permite ligarla a la superficie del colector. En la otra cara, la que queda hacia el exterior del colector, contiene una superficie selectiva absorbente de la radiación solar de cromo negro. Esta posee una absorbancia de 0.9 a 0.92 del 95% del espectro solar y una emitancia de 0.2 a 0.25 en el rango térmico (Ohman et al., 1999).

El Depósito es sostenido por una base que contiene el parte superior un disco de fibra reforzada de madera. A este disco se le practican tres canales circulares concéntricos con el depósito y separados de este y entre si dos centímetros. Estos tienen la finalidad de alojar tres cilindros de policarbonato celular de 4 mm. de espesor. La parte superior de estos cilindros son cerradas mediante discos que atados y sellados mediante resinas plásticas le confieren la estanqueidad necesaria para evitar la circulación de aire. Cada disco de policarbonatos supera en su diámetro en unos dos centímetros al cilindro al cual tapa y se constituye en un soporte para el cilindro siguiente que posee unos dos centímetros más de altura. En la figura 1 podemos ver un diagrama de un corte transversal del dispositivo en el se incluye el corte del colector solar plano que es ligado a CSA mediante dos conductos uno común con el sistema de carga de agua fría y el segundo que parte del extremo superior del colector e ingresa al CSA por la parte inferior. En la figura 2 podemos ver una fotografía del primer CSAIP dispuesto para efectuar las experiencias.

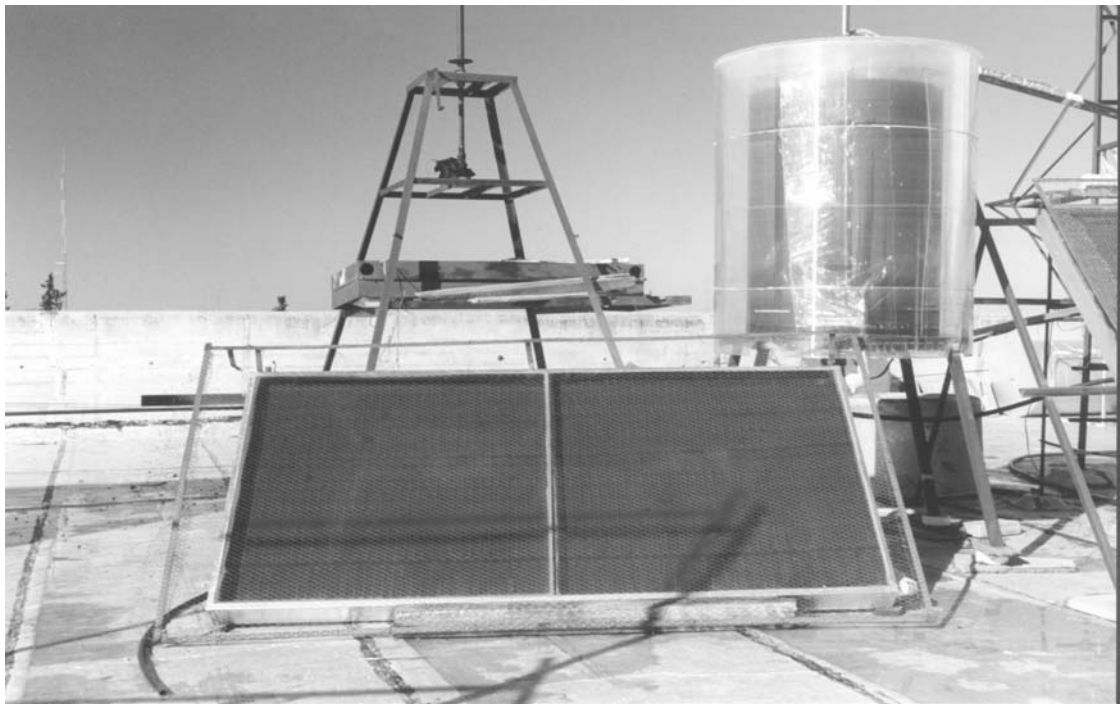


Figura 2 Vista frontal del CSAIP dispuesto para efectuar la experiencia diaria. En este caso el colector plano está equipado con cubierta de vidrio y se puede ver además una red de alambres muy finos para la protección del granizo

## **2.1 La conexión entre ambos colectores**

La conexión entre ambos colectores se efectúa mediante los dos conductos mostrados en la fig. 1. El que une las partes inferiores de ambos dispositivos tiene en ese tramo menor sección que el resto que conecta el tanque elevado con la base del CSA, de manera tal que cuando se produce el ingreso de agua desde el tanque elevado, por demanda del usuario que abre el grifo (que se encuentra por debajo de todo el sistema) el flujo de agua se efectúa solo por el CSA. Cuando no hay flujo de salida desde el sistema y está presente la radiación solar, el conducto inferior permite la alimentación del colector plano con agua desde la base del CSA estableciéndose el flujo termosifónico característico de los llamados calefones solares. El flujo de agua caliente proveniente del colector plano ingresa por la parte inferior del CSA y lo hace por medio de un conducto de material aislante, I en la fig. 1, que posee perforaciones de unos 0,007 m. de diámetro y de forma tal que permiten que el fluido se incorpore al contenido del CSA al nivel en que ambos poseen igual temperatura. En consecuencia vemos que la conexión entre ambos colectores no es en serie, tampoco lo es en paralelo, pues si bien ambos tienen en común la conexión inferior, la del extremo superior no existe, pues el fluido del CP se incorpora a lo largo del interior del CSA.

En las primeras horas del día, a la salida del sol la distribución de temperaturas en el interior del CSA presenta estratificación. La temperatura del agua contenida en el colector plano es siempre inferior a la contenida en la base del CSA, por que el extremo superior del CP se encuentra ubicado no menos de 0,2m debajo de la base del CSA. En estas condiciones los primeros rayos de la radiación solar inciden perpendicularmente sobre la superficie vertical del CSA, al calentar la superficie del tanque genera un movimiento convectivo en el fluido. Cuando comienza a operar el CP el flujo de agua caliente proveniente de este se suma al ya establecido en el CSA. Por todo ello denominamos integrado a la conexión entre ambos.

En el dispositivo de Schmid la integración es de diseño, pues el acumulador se encuentra incorporado al colector dentro de la caja, que paso a ser de mayor tamaño. En nuestro caso la integración no es de diseño, es física, está en el interior del dispositivo, en la forma en que se mezcla el agua caliente producida por cada uno de los colectores.

## **3. OPERACIÓN DEL COLECTOR SOLAR ACUMULADOR INTEGRADO**

Por las características del dispositivo, donde el colector acumulador y el plano con la masa total de agua contenida en el acumulador forman una unidad no podemos pretender evaluar el sistema de la forma en que se lo hace con los colectores solares planos, esto es determinación de la eficiencia instantánea. Donde el instante consiste en varios minutos, durante los cuales se registran los principales parámetros físicos del sistema en funcionamiento. En este caso se puede proceder de manera similar donde ahora los intervalos de tiempo que definen los instantes serán de varias horas. Como el objetivo central es determinar la capacidad del dispositivo para producir y entregar a un usuario agua caliente diseñamos el procedimiento de evaluación de forma tal que se interviene el sistema extrayendo el producto solo tres veces al día y simulando un usuario que concentra su uso en esos tres horarios del día. Definimos tales horarios de forma tal que faciliten los cálculos y en función de los tiempos normales de cambio de regimenes del sistema. Esto es paso del estado de enfriamiento al de calentamiento y viceversa. Se le incorpora una tercera intervención, al medio día solar que es compatible con un usuario muy sistemático, esto es: Un tercio del volumen de uso diario (100 litros) por la mañana antes de que salga el sol, un tercio (100 litros) a medio día y un tercio (100 litros) por la tarde, después de la puesta del sol. Para disponer de una evaluación del desempeño del dispositivo, en la localidad en que está instalado, lo más aproximada a la realidad, cada experiencia consistirá en la determinación sistemática diaria durante no menos de diez días, que se extenderán a más hasta obtener por lo menos una secuencia de tres días claros, días seminublados y al menos uno completamente nublado. Se efectúan al menos un par de experiencias al año cubriendo las dos estaciones extremas.

### **3.1 Recolección de datos**

Se inicia la experiencia: Primer día, primera lectura a primeras horas, esto es antes de que salga el sol. 1) se efectúa una lectura de las variables del medio ambiente: Temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento. 2) se registran las temperaturas de las seis termocuplas del interior del CSA. 2) Se procede a extraer agua caliente desde el CSAIP, registrando las temperaturas de entrada de agua fría al sistema y la caliente acumulada cada 20 o 30 litros hasta completar los 100 litros de la extracción. Los promedios de estas lecturas constituyen los valores del producto obtenido desde el sistema (función de la acumulación de energía del día anterior y conservada por el acumulador) y el valor de la temperatura con que se alimenta el sistema al iniciar el día respectivamente. 3) Concluida la extracción, no más de 10 minutos, se efectúa un nuevo registro de la temperatura de las termocuplas interiores del CSA. Este procedimiento se repite a las 13 horas y a las 20 horas, en verano, ó 19 horas en invierno. Con los datos temperatura del agua extraída y el valor medio de los registros de entrada de agua del día anterior obtenemos parte del valor energético de la ganancia

producida por el dispositivo. En la figura 3 podemos ver un registro de un día completo de las seis termocuplas del interior del CSA mas su valor medio. Donde se presentan con trazos gruesos las ubicadas en los extremos y la que corresponde a la temperatura media.

En la gráfica (fig. 3) vemos a la fracción 0.34 del día juliano 15 (8:15 horas) luego de efectuar una descarga de 100 litros de agua la temperatura a unos 2 cm. de la tapa superior queda a 46° C. y crece de forma tal que a medio día llega a 55° C., tiempo al cual se efectúa la segunda descarga del día y esta baja a unos 46° C. Durante la tarde crece hasta alcanzar al final unos 56° C. y cae, luego de la descarga a 51° C. En el extremo inferior del tanque vemos que la temperatura en la base (luego de la descarga matinal) queda en unos 23° C. que es la temperatura del agua fría que ingreso al sistema. Durante la mañana crece hasta alcanzar unos 37° C. y por la descarga de medio día cae a unos 24° C. Por la tarde crece llegando a 46° C. y cae a unos 23° C. que es próxima a la temperatura del agua fría de entrada. (El conducto que alimenta el sistema no posee aislaciones, esta es la causa por la cual se registran diferencia de hasta tres grados en las temperaturas de la base, a medio día resulta más alta). Todos los otros indicadores se desplazan en el mismo sentido.

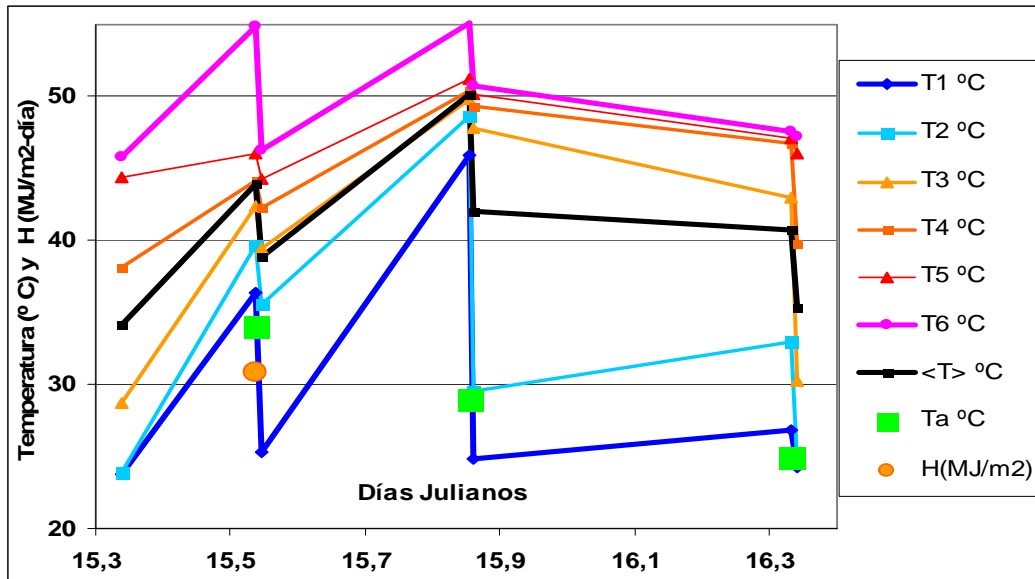


Figura 3 Las temperaturas en el interior del CSA entre los días julianos 15 y 16 donde las fracciones indican las horas. Donde T1 y T6 en ° C. son las temperaturas a 0,02 m de la base y de la tapa superior del CSA respectivamente. <T> en ° C. es la temperatura media entre las seis termocuplas. Ta ° C. es la temperatura ambiente y H (MJ/m<sup>2</sup>) la radiación solar global horizontal del día.

Crece por efecto de la conversión de la radiación solar y todos caen a valores más bajos cuando se produce la descarga. Esto nos indica que las capas de estratificación térmica del agua en el tanque se mantienen durante el proceso de descarga. Dicho de otra forma el agua fría que ingresa desde el depósito de reserva elevado irrumpe dentro del tanque del CSA rasante a la superficie de la tapa inferior, por efecto de la placa dispersora, ocupa el nivel inferior y desplaza hacia arriba el agua que se encuentra a mayor temperatura. Es oportuno ahora declarar el tiempo que lleva el proceso de descarga, unos diez minutos, este es el normal para un grifo común, que descarga unos 10 litros por minuto. En la gráfica y en la tabla, se redondean los tiempos a milésimas de día por razones prácticas. También vemos que todas las temperaturas evolucionan de la misma forma, lo que nos está indicando que no se rompe el estado de estratificación del agua contenida en el tanque del CSA. También hemos establecido que no se producen torbellinos, particularmente en torno de la termocupla ubicada en las proximidades de la tapa inferior. Esto lo verificamos observando la evolución de la temperatura durante los procesos de descarga de agua. Las fluctuaciones son lentas, no exceden las décimas de grado centígrado que es la precisión que posee el instrumento de medida.

En el periodo de enfriamiento nocturno nuevamente observamos que se mantiene el estado de estratificación térmica: Los indicadores de las cuatro termocuplas superiores muestran que en estos sectores la temperatura desciende, por efecto de las pérdidas térmicas laterales, por la tapa superior y hacia la porción inferior del depósito que según las dos termocuplas T1 y T2, aumentan sus temperaturas. Es decir que parte de las pérdidas térmicas del segmento superior (unos 70 cm. de la columna) es tomado por el segmento inferior (unos 30cm. de la columna). La temperatura media baja en unos 2 a 3 grados centígrados y su conocimiento nos permite calcular las pérdidas térmicas netas del CSA.

### 3.2 Comportamiento en días seminublados

En la figura 4 podemos ver un tramo mas extenso de la primera experiencia, donde hemos incorporado la radiación solar global diaria, H (MJ/m<sup>2</sup>) y la temperatura ambiente, Ta (° C.). Se trata de un periodo con tres días seminublados: El 7 con unos 16 MJ/m<sup>2</sup>, 8 y 9, que termina con un día claro el 11 con 31 MJ/m<sup>2</sup>. En primer lugar podemos ver que las temperaturas de las extracciones del día 7 están por encima de los 40° C. (aproximadamente 48° C. a medio día y 45° C. al final del día, a pesar de que la radiación solar fue de unos 16 (MJ/m<sup>2</sup>)). Para el día 8 con una radiación solar mayor, las temperaturas de agua caliente obtenida fue próxima a los 36° C. a partir de aquí se recupera parcialmente, pues las extracciones matutinas de los días siguientes 9,10 y 11 permanecen por debajo de los 40° C. Esto nos dice que la producción depende de la radiación diaria y la de los días anteriores.

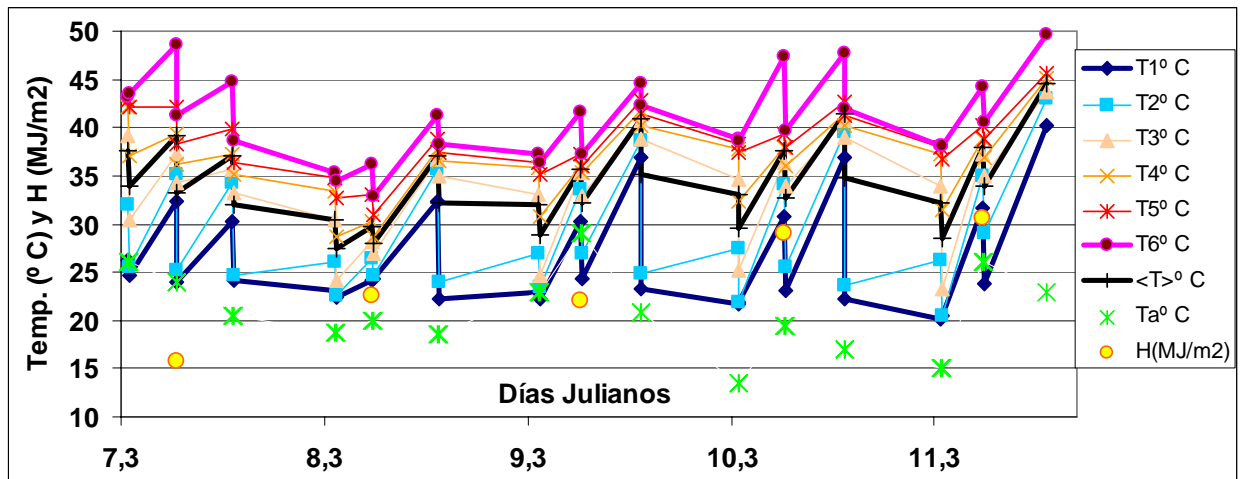


Figura 4 Temperaturas en el interior del CSAI, temperatura ambiente y radiación solar para los días Julianos 7 y 11. Donde T1 y T6 en ° C. son las temperaturas a 0,02 m de la base y de la tapa superior del CSA respectivamente. <T> en ° C. es la temperatura media entre las seis termocuplas. Ta ° C. es la temperatura ambiente y H (MJ/m<sup>2</sup>) la radiación solar global horizontal del día.

Si seguimos la trayectoria de la línea correspondiente al valor medio de temperatura en el CSA, vemos que durante todos los periodos nocturnos, excepto el correspondiente a las primeras horas del día 9, el sistema registra pérdidas térmicas. Observando la evolución de la temperatura ambiente vemos que en los periodos nocturnos desciende, excepto en el que del día 8 al 9. Empleando estos valores podemos calcular las pérdidas térmicas de la masa de agua contenida en el CSA, P, y las eficiencias, η, de la masa de agua contenida en el tanque:

$$P (\text{intervalo}) = - C m \Delta T \quad (3)$$

$$\eta (\text{intervalo}) = (C m \Delta T) / (A H) \quad (4)$$

Donde: C es el calor específico del agua (4,186 kJ/kg ° C), m es la masa de agua, Δ T (° C) es la diferencia de temperatura entre los estados final e inicial.

En la tabla 1 podemos ver parte de los datos adquiridos durante la primera experiencia efectuada entre los días Julianos 4 y 22. Tomamos solo una parte por razones de espacio, corresponde a los días julianos 7 a 11. En la primera columna la hora en que se efectúa la extracción de 100 litros de agua, en la segunda el tiempo: día del año y en fracciones la hora correspondiente. Para el periodo nocturno comprendido entre los tiempos 8,865 y 9,35 la temperatura ambiente paso de 18,5° C a 23° C. El salto térmico en la temperatura media del CSA fue de -0,1° C. en consecuencia la pérdida térmica de ese periodo fue de:  $P_{(8,865 \text{ a } 9,35)} = 160.7 \text{ kJ}$ . En cambio para el periodo que va entre las ultimas horas del día 10 y las primeras del día 11 la temperatura ambiente es de 17° C. a 15° C. tenemos que: El salto térmico en la temperatura media del CSA fue de -2,4° C. Haciendo los cálculos encontramos que la pérdida térmica de ese periodo fue:  $P_{(10,861 \text{ a } 11,333)} = 3840 \text{ kJ}$ . Esto nos dice que las pérdidas térmicas del dispositivo dependen fuertemente de la temperatura ambiente.

Con la aplicación de la Ec.(4) podemos efectuar una evaluación muy elemental de la eficiencia del dispositivo, para ello y como solo disponemos en este caso de la radiación global horizontal. En este caso se toma 3 m<sup>2</sup> y las eficiencias resultan entre 30 % y 60 %. No muy alejadas de las obtenidas mediante el procedimiento correcto esto es



mediante datos horarios de radiación global horizontal,  $I$  ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ); Radiación normal directa,  $I_n$  ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) y la consecuente deducción a partir de estas de la radiación difusa,  $I_d$  ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ). En estos casos podemos determinar en forma precisa la radiación sobre el colector plano de  $2\text{ m}^2$  de superficie inclinada  $45^\circ$  respecto de la horizontal y las componentes del CSA que son  $0,56\text{ m}^2$  del disco tapa del cilindro y  $0,85\text{ m}^2$  de sección transversal vertical del CSA y finalmente la superficie de toda la cubierta cilíndrica del CSA que es de  $2,70\text{ m}^2$ . Cada una de estas se multiplicaran respectivamente hora a hora durante todo el periodo con radiación solar por los correspondientes flujos de radiación calculados en los planos que presenta cada componente del dispositivo y el correspondiente flujo de radiación difusa sobre el total del cilindro. Esta tarea ya fue hecha para un CSA (Fasulo et al 2001) y escapa al alcance de este trabajo. Sin embargo es útil aclarar que los resultados obtenidos muestran una fuerte dispersión, debido a que los intervalos de tiempo son mayores, horas y en ellos todas las condiciones ambientales cambian fuertemente. La dispersión es muy alta por las razones señaladas, pero cuando como en este caso se toma como referencia el agua contenida en el tanque no solo es mayor, sino que en algunos casos puede dar valores mayores de la unidad como consecuencia de la inercia térmica del dispositivo. Así calculando las eficiencias para los días 7 y 8 respectivamente obtendremos valores de 0,31 y 0,27, esto nos da una diferencia de 5 puntos, inaceptables para una secuencia de valores de eficiencias instantáneas que hacemos para los CP.

Tabla 1. Temperaturas en el interior del CSAI, parte de la primera experiencia, tomada a partir del día juliano 7

Hora	Tiempo	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	<T>(°C)	Ta(°C)	H(MJ/m <sup>2</sup> )
08:00	7,333	26,3	32	39,2	42,1	42,8	43,2	37,6	26	
	7,34	24,6	25,6	30,4	37,1	42,1	43,5	33,9	26	
13:40	7,569	32,4	35,1	37,2	39,4	42,2	48,6	39,2	24	15,8
	7,576	23,9	25,2	34,2	36,2	38,3	41,3	33,2	24	
20:20	7,847	30,3	34,3	35,6	37,3	39,8	44,8	37,0	20,5	
	7,854	24,1	24,6	33,2	35,2	36,4	38,6	32,0	20,5	
08:30	8,354	23,1	26	30,4	33,4	34,8	35,3	30,5	18,8	
	8,361	22,4	22,5	24,2	28,7	32,7	34,4	27,5	18,8	
12:45	8,531	24,2	26,4	28,2	30,2	33	36,2	29,7	20	22,6
	8,538	24,3	24,6	26,9	28,7	30,9	32,8	28,0	20	
20:35	8,858	32,3	35,7	36,8	37,8	38,9	41,2	37,1	18,5	
	8,865	22,2	23,9	34,9	36,5	37,5	38,3	32,2	18,5	
08:25	9,35	22,9	27	33,1	35,8	36,4	37,3	32,1	23	
	9,357	22,3	23,4	24,7	30,8	35,2	36,3	28,8	23	
13:30	9,562	30,2	33,6	35,4	36	37,2	41,6	35,7	29	22
	9,569	24,4	27	32,8	35,3	36,1	37,2	32,1	29	
20:30	9,854	36,9	38,6	40,8	41,8	42,9	44,5	40,9	20,8	
	9,861	23,2	24,9	38,9	40,2	41,4	42,3	35,2	20,8	
08:00	10,333	21,7	27,4	34,6	37,7	38,3	38,8	33,1	13,5	
	10,34	21,8	21,9	25,2	32,4	37,4	38,7	29,6	13,5	
13:30	10,562	30,8	34,1	36,3	37,9	39,3	47,3	37,6	19,5	29,1
	10,569	23,1	25,6	33,9	36	37,9	39,7	32,7	19,5	
20:30	10,854	36,9	39,5	40,7	41,5	42,6	47,8	41,5	17	
	10,861	22,3	23,6	39	40,2	41,2	42	34,7	17	
08:00	11,333	20,1	26,3	33,9	37,2	37,9	38,2	32,3	15	
	11,34	20,5	20,5	23,2	31,4	36,8	38,2	28,4	15	
12:55	11,538	31,7	34,9	37,2	38,8	40,3	44,3	37,9	26	30,6
	11,545	23,8	29,1	34,9	36,9	38,8	40,6	34,0	26	
20:30	11,854	40,3	43	43,7	45,1	45,7	49,7	44,6	23	

### 3.2 Comportamiento con una secuencia de varios días claros

En la figura 5 vemos la secuencia correspondiente a los días 11 a 17, son días claros, con valores de H por encima de los  $30\text{ MJ}/\text{m}^2$  por día. Estos son secuencialmente: (30,6; 31,5; 30,0; 39,9; 30,9 y 30,6)  $\text{MJ}/\text{m}^2 - \text{día}$ . Obsérvese que:

1) La temperatura del agua entregada, a razón de 300 litros diarios, es en todos los casos a temperaturas por encima de los  $40^\circ\text{ C}$ . y crece hasta alcanzar los  $56^\circ\text{ C}$ . el día 16.

2) La temperatura ambiente está siempre por encima de los  $20^\circ\text{ C}$ .

3) La temperaturas en la base del CSAI durante los periodos nocturnos crece, excepto para el primero (11 a 12). Esto como ya lo vimos se hace a expensas de la capas superiores.



4) Las pérdidas térmicas, tomando los datos de  $\langle T \rangle$ , que generan la gráfica, para el último día de la serie nos da:  $P_{(15,86 \text{ a } 16,33)} = 2250,4 \text{ kJ}$ .

5) Tomando los saltos térmicos en  $\langle T \rangle$  por la mañana, sumando los de la tarde y el H correspondiente al día 16, tenemos que la eficiencia para la masa de agua contenida en el CSAI es:  $\eta_{(16,85 \text{ a } 16,35)} = 0,38$ . Compárese con el valor obtenido en el punto anterior y veremos ratificado que el procedimiento para conocer la eficiencia del dispositivo requiere una serie extensa de datos y solo válidos para determinados periodos del año.

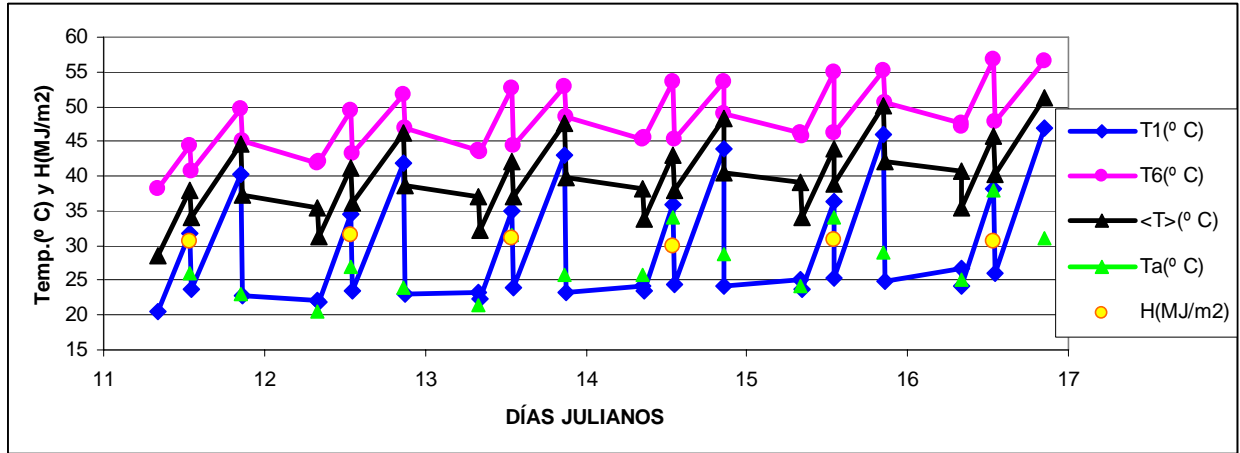


Figura 5 Temperaturas en el interior del CSAI, temperatura ambiente y radiación solar para los días Julianos 11 a 16.

### 3.3 Comportamiento con un día nublado

En la figura 6 podemos ver la evolución de las temperaturas en el interior del CSAI para el periodo que va de los días Julianos 16 a 22 que contiene un día con poca radiación el 17 con 7 (MJ/m2) esto es menos de una cuarta parte de la correspondiente a un día claro. Vemos que la producción se mantiene por encima de los 40° C. y que al día siguiente se pone de manifiesto, bajando en la primera extracción del día a 31° C., 35° C. a medio día y llega a los 42 en la última del día. Este día y el siguiente fueron siminublados (18, con 21,1 MJ/m2 –días y 19 con 28,8 MJ/m2-día.

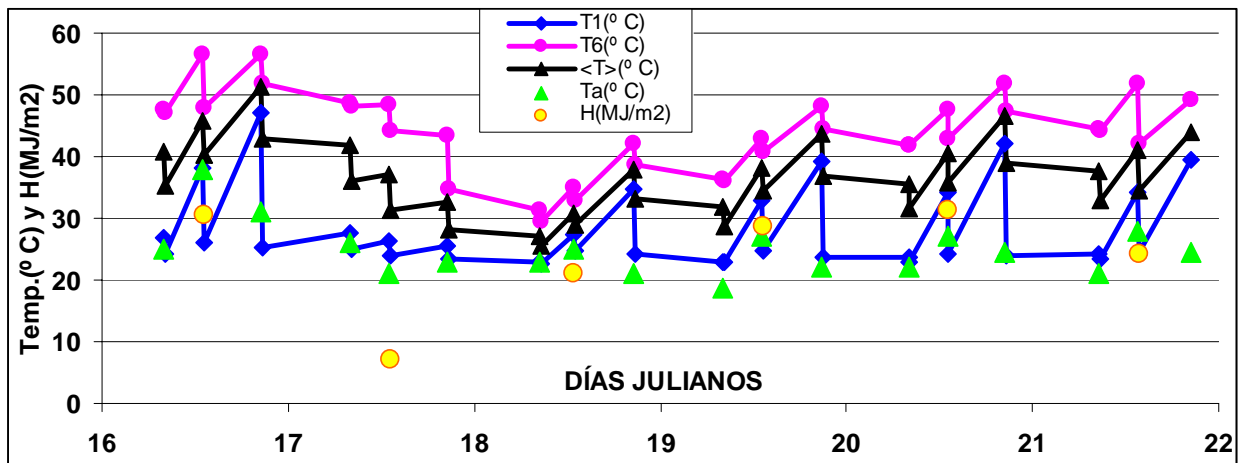


Figura 6 Temperaturas en el interior del CSAI, temperatura ambiente y radiación solar para los días Julianos 16 a 21

Si calculamos la eficiencia del CSAI, a partir de su masa de agua para esos día nublado, encontramos que esta es:  $\eta_{(17,85 \text{ a } 17,34)} = 0,17$ ; en cambio para el día siguiente esta es:  $\eta_{(18,86 \text{ a } 18,35)} = 0,37$ . Esta notable diferencia entre dos días consecutivos es consecuencia de: A) A pesar que se extrae la misma cantidad de fluido (300litros) la temperatura en el tanque es aun alta, la poca radiación solo le permite crecer en solo 2,2° C., luego de la última extracción del día la

temperatura media en el tanque queda por debajo de los 30° C. B) Para el día siguiente presenta mayor eficiencia solo por que la temperatura media inicial en el tanque es menor.

### 3.4 Comportamiento en otoño

Repitiendo la experiencia a mediados de otoño encontramos que el dispositivo está en límite en su capacidad para producir agua caliente por encima de los 40° C. Esto es consecuencia de que la radiación solar bajo a casi la mitad de la que tiene en el periodo estival, la temperatura ambiente esta entre 5 y 20° C. y en consecuencia la temperatura de entrada del agua fría es menor. El desempeño del dispositivo lo podemos apreciar en la figura 6. para una secuencia de 8 días entre los Julianos 112 y 121. El primer día es seminublado ( $H = 8,5 \text{ MJ/m}^2 \text{ -día}$ ) y los cinco días siguientes son claros con radiación global horizontal en los valores de (16,6; 16,8; 16,8; 16,2 y 15,7)  $\text{MJ/m}^2 \text{ - día}$  respectivamente. Vemos que las temperaturas en el extremo superior del tanque oscilan en torno de los 40° C. Calculando la eficiencia para el día 116 tenemos:  $\eta_{(116,89 \text{ a } 116,35)} = 0,69$ . Las pérdidas térmicas para ese mismo día dan:  $P_{(115,9 \text{ a } 166,35)} = 4340 \text{ kJ}$  Esto es el doble de la obtenida para el día Juliano 16. Comparando estos Resultados con los obtenidos en el mes de enero tenemos que: La eficiencia del dispositivo es mayor, casi el doble, por que trabaja con temperaturas del agua menores, pero las pérdidas térmicas también son mayores, el doble, por que la temperatura ambiente es menor.

En consecuencia podemos concluir que a partir de mediados de otoño el dispositivo requiere la incorporación de energía convencional para alcanzar los niveles de temperatura en el producto por encima de los 40° C. Podemos concluir que el dispositivo puede producir unos 300 litros de agua por día a temperaturas por encima de los 40° C, con condiciones meteorológicas de días claros y algunos seminublados durante unos 180 días al año, centrados en el periodo estival.

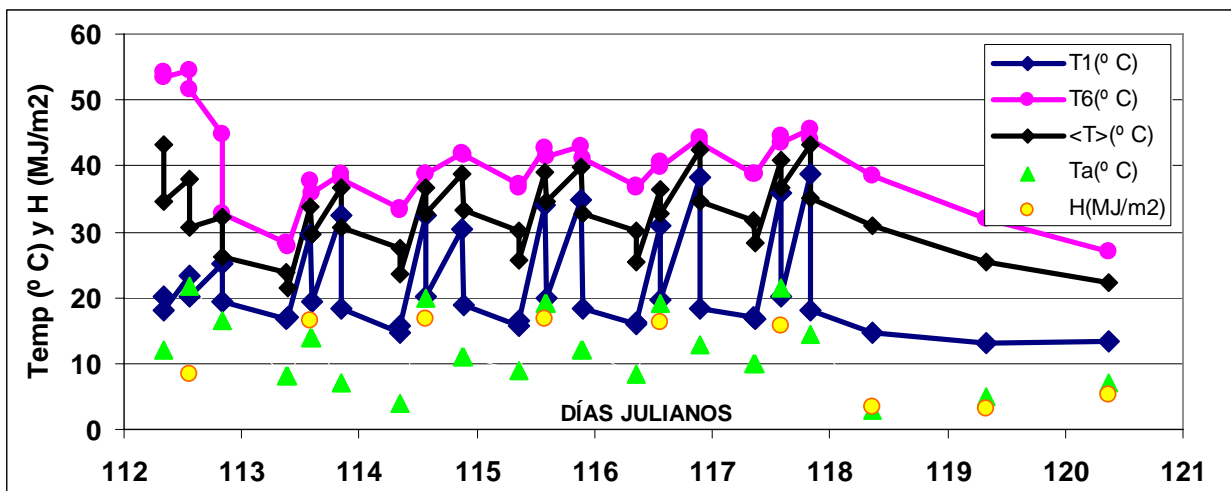


Figura 7 Temperaturas en el interior del CSAI, temperatura ambiente y radiación solar para los días Julianos 112 a 121

## 4 CONCLUSIONES

El CSAIP experimentado posee capacidad para la producción de 300 litros de agua caliente por día durante uno 180 días al año. El dispositivo, como todo otro similar que posee acumulación de calor, posee inercia térmica. Esta es suficiente para proveer de agua caliente al menos durante un día, con ausencia de radiación. El dispositivo posee una alta capacidad de recuperación a partir de un periodo nublado. Esta última característica es verificada por que muestra alta eficiencia para captar y transformar en calor la radiación solar en periodos de menores temperaturas. También en estos periodos muestra una elevada pérdida térmica. Resultando en su balance insuficiente para satisfacer los requerimiento de producción. Sin embargo en este periodo será útil como pre-calentador para un sistema convencional. La distribución de temperaturas en el interior del CSAIP mantiene en todo tiempo estados estratificados, incluso durante los periodos de extracción, efectuados a una velocidad de 10 litros por minuto. La herramienta apropiada para el cálculo en proyectos de uso del dispositivo, es la temperatura del agua producida en función del tiempo tomado en días.

## REFERENCIAS

- Barral J. R. y Wood, B.D. 1997. Modelo computacional analítico para el estudio de colectores acumuladores integrados tubulares. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol 1, n1, pp. 61-64.
- Fasulo A., Esteban C. y Perelló D. 1994; Variables ambientales para la aplicación de la energía solar en San Luís; *Anales de la Asociación Física Argentina*; Vol. 6, pp. 398 a 401.
- Fasulo, A., Perello, D. y Follari, J. 1997. Un collector solar acumulador. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol 1, n1, pp. 93-96.
- Fasulo, A., Follari, J. and Barral, J. 1999. Un collector solar acumulador integrado con uno plano. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol 3, n1, pp. 03-45 a 03-48.
- Fasulo, A., Follari, J. and Barral, J. 2001. Comparisson between a simple solar collector accumulator and conventional accumulator. *Solar Energy*, vol. 71, n. 6, pp. 389-401.
- Fasulo, A. y Follari, J. 2002; Efficiency and temperature distribution in flat plate collectors; *Proceeding of World Renewable Energy Congreso VII*, Colonia, Alemania.
- Fasulo A., Perelló D., Follari J. and Barral J. 2002; Solar collector accumulator integrated with plane collector; *Proceeding of EuroSun 2002*, Bologna, Italia.
- Fasulo A. y Barral J. 2005; Desarrollo de un colector solar acumulador (superficies selectivas - policarbonato Vs pintura negra - vidrio); *Energías Renovables y Medio Ambiente*; Vol. 17, pp. 11 a 20.
- Ohman, R., Gehlin, K., Wackelgard, E. y Bjorn K. Production and performance of a low cost selective foil (comunicación personal).
- Schmidt, Ch., Goetzberger, A. y Schmid, J. 1988. Test results and evaluation of integral collector storage systems with transparent insulation. *Solar Energy* vol. 41, n 5, pp. 487-494.
- Stoll, R. G., Garnica, J. H., Barral, J. R., y Fasulo, A. J. 2007. Estudio del comportamiento de colectores con acumulación integrada de dos tanques con y sin descarga de agua caliente. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol 11, pp. 3.53-3.60.
- Tripanagnostopoulos, Y. and Yianoulis, P. 1992. Integrated collector storage systems with suppressed thermal losses. *Solar Energy*. Vol. 48, n. 1, pp. 31-37.
- Souliotis, M. and Tripanagnostopoulos, Y. 2004. Experimental study of CPC type ICS solar systems. *Solar Energy*. Vol. 76, n. 4, pp. 389-408.

**Abstract.** This work shows the properties of an integral solar collector storage system that works in combination with a flat plate collector. The accumulator particularity is the maintenance of its stratification state all the time, including those periods when the hot water is extracted. This attribute is obtained by means a simple mechanism and results of fundamental importance to get a bigger efficiency from the equipment and to simplify the study of the prototype. A set of thermocouples installed in the inner part of the prototype are used to register the evolution of temperatures, to check how the system changes during the heating process, during the nocturnal chilling, and in the moment of hot water discharges. The behaviour of the system is followed during many days in order to get the recording of a sequence of clear days, completely and partially cloudy days, covering the different seasons of the year. The registered data showed that during the hot water discharges, the entering cold water occupies the inferior portion of the equipment and pushes upwards the layers of greater temperatures. Diagrams, photographs, tables and plots are shown.

**Keywords:** Solar Energy, thermal conversion, collectors