

EVALUACIÓN TÉRMICA DE COLECTOR SOLAR DE BAJO COSTO CONSTRUIDO CON TUBOS DE POLIETILENO NEGRO, SEGÚN PROTOCOLO DE ENSAYO PMI

E. Marino¹, P. Bertinat², J. Salerno³, A. Pifferetti⁴, C. Giordani⁵, J. Chemes⁶, I. Arraña⁷, M. Barone⁸,
Observatorio de Energía y Sustentabilidad, Departamento Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica Nacional Facultad
Regional Rosario – Zeballos 1341 CP 2000 – Rosario, Pcia de Santa Fe - Tel. 0341-4484909
e-mail: emarino0@rosario.gov.ar

RESUMEN: Proponemos mediante este trabajo, analizar las posibilidades de utilización de energía solar en ámbito urbano, particularmente en hogares de bajos recursos, mediante el calentamiento de agua para usos sanitarios y en este sentido se plantea la evaluación térmica de un colector de bajo costo construido con 20 tubos de PVC de 1" de diámetro y 1 metro de largo según protocolo de ensayo PMI del INTI (PMI, Plataforma de Muestra INTI). Dicho colector presenta una superficie de 2 m² de captación, contiene aproximadamente 10 litros de agua y esta asociado a un tanque térmico de 160 lts. Se sitúa en la Ciudad de Rosario, (Lat -32,956278, Lon -60,680735).

Se adoptaron métodos cuantitativos y estadísticos, con datos obtenidos y almacenados por equipos de tecnología de punta con recolección prácticamente continua (valores promediados cada 5 minutos).

El diseño de colector adoptado arrojó una eficiencia aceptable, no requiere de tecnología específica para su armado y es de fácil construcción (autoconstrucción).

Palabras clave: energía solar, colector, autoconstrucción, ensayo, bajo costo.

INTRODUCCIÓN

Las opciones planteadas hasta el momento en nuestro país para abordar el problema de la crisis energética están asociadas en general a planes de ahorro de energía. Más allá de los buenos o malos resultados de los mismos aún no se han implementado planes de sustitución de fuentes de energía para dejar de lado las de origen fósil e incorporar energía solar.

La utilización de energía solar térmica, para el calentamiento de agua de uso sanitario es una tendencia marcada y definida a nivel mundial y existen numerosos países donde esta tecnología tiene gran difusión, apoyada por respectivas legislaciones vigentes, políticas públicas y subsidios específicos para su desarrollo. En nuestro país, la ausencia de dichas políticas, ayudas e incentivos, determina un retraso en la introducción de este recurso energético, retraso basado en dos aspectos fundamentales que son el económico y el cultural. Puede decirse entonces que tiene tanto peso la barrera del costo de los equipos como la del desconocimiento de este recurso por parte de la población en general.

Los colectores solares de factura industrial, ya sea nacionales o importados, que se comercializan en nuestro medio tienen un costo que aún los deja fuera del alcance de un gran sector de la población, sector de recursos medios, medios bajos y bajos.

La posibilidad de construir un colector solar, con elementos disponibles localmente, de tecnología sencilla y manejable y que a la vez funcione con parámetros de rendimiento y aprovechamiento comparables a los comerciales, satisfaciendo las necesidades básicas de una familia tipo, fue la idea que se persiguió en este trabajo, entendiendo también que sería deseable la alternativa de autoconstrucción o de construcción en talleres locales con muy pocas herramientas para facilitar la adopción por parte de sectores de bajo recursos, así como su inclusión en programas centralizados de construcción de viviendas.

El sistema se montó tomando como ejemplo el banco de ensayo móvil de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, de la Universidad Nacional de La Plata, (San Juan et al., 2006), adaptado a una vivienda social. Se destaca que se analizaron otras alternativas de ensayo entre ellas una que no requiere descargas de fluido (Fasulo et al., 2010), optándose por el protocolo PMI por tener todo dispuesto para su rápida implementación.

1 Investigador Cat V,
2 Investigador Cat III
3 Investigador Cat III
4 Investigador Cat III
5 Investigador Cat IV
6 Docente UTN
7 Becario UTN
8 Becario UTN

DETALLE CONSTRUCTIVO DEL COLECTOR ENSAYADO

Los distintos prototipos ensayados, desarrollados y mejorados se plantearon con el objetivo de alcanzar y mantener temperaturas del agua de almacenamiento que rondan los 40° C (protocolo de ensayo PMI - INTI)

El prototipo presentado en este trabajo es un colector de 20 tubos verticales de PVC, de caño de polietileno negro de 1" de diámetro y 1 metro de largo que ocupa una superficie de captación solar de 2 m², almacena algo más de 10 lts de agua y se encuentra asociado a un tanque de almacenamiento de 160 lts, aislado térmicamente. La premisa fue utilizar materiales de bajo costo, de disponibilidad local y construcción simple y sencilla, que no requiriese el auxilio de una tecnología compleja.

El colector propiamente dicho se encuentra montado sobre una tabla de multilaminado fenólico de 2,30 x 1,30 mts. Entre el colector y esta tabla se colocaron planchas de telgopor de 20 mm de espesor y la placa y las planchas se forraron en plástico tipo agrotileno negro.

Rodeando el colector se armó un bastidor con perfilera galvanizada (tipo perfilera de construcciones secas) y sobre el mismo se colocaron placas de policarbonato alveolar, conteniendo en su interior al colector, generando un ambiente de efecto invernadero.

El sistema de medición adoptado respondió a las premisas solicitadas por el protocolo del INTI, que permite recoger datos necesarios para los cálculos respectivos. Este sistema funcionó satisfactoriamente y su aplicación se considera exitosa. Se adaptó y utilizó integralmente el sistema para medición de las propiedades de funcionamiento del colector, permitiendo de esta forma evaluar su comportamiento en condiciones reales. Se registraron temperaturas y se realizaron mediciones de radiación solar.

A partir de comprobaciones surgidas durante el trabajo previo con los sucesivos prototipos, se construyó este colector donde todos los caños se unieron con accesorios de conexión espiga. Gracias al tipo de unión no se registraron pérdidas, principal inconveniente de los colectores construidos con placas de policarbonato alveolar. Se destaca que este prototipo apuntó a registrar temperaturas del agua y la factibilidad de crear un colector que abastezca a una familia tipo.

A medida que se analizaban los datos recogidos se introdujeron mejoras básicas que permitieron en todos los casos elevar la temperatura del agua almacenada.

En este sentido:

Se aumentaron las secciones de los caños del colector hasta 1". Se ensayaron colectores de caños de ½" y ¾" de diámetro.

Se aplanaron unos 80 cm longitudinales de los caños de 1" para conseguir una mayor superficie de captación de energía del sol y menor espesor de la cantidad de agua contenida a calentar. Entiéndase que el caño dejó de ser cilíndrico adoptando una forma rectangular cercana a un rectángulo con su lado menor redondeado.

Se corrigieron las inclinaciones (pendientes) de los caños de salida del colector hacia el termo, para mejorar la circulación por termosifón y elevar la temperatura del termo.

Se armó con restos de placas de policarbonato de los prototipos anteriores y con perfilera galvanizada tipo construcción seca, una cubierta de 2 m², que oficia de caja y permite elevar la temperatura del agua, tanto en la parte inferior y superior del colector, con la lógica mejora en el calentamiento del agua del termo o tanque de almacenamiento.

Se acomodó la termorresistencia del sistema de medición de la parte superior del colector para que no interfiera con el movimiento natural que por termosifón se genera en el sistema.

El sistema de almacenamiento del agua calentada está formado por dos tanques de PVC, uno introducido dentro del otro y aislados con perlas de telgopor. Para mejorar la aislación se revistió el conjunto con dos vueltas de lana de vidrio de 5 cm de espesor protegida con plástico tipo agrotileno.

DETALLE DEL SISTEMA DE MEDICIÓN UTILIZADO

El sistema de medición está integrado por un datalogger marca NOVUS, Modelo Fieldlogger con su software correspondiente Fieldchart, al que se le conectaron cinco termorresistencias tipo PT100 y un solarímetro provisto y calibrado por la Comisión Nacional de Energía Atómica CNEA. Con este sistema se midieron, la temperatura en la parte superior e inferior del colector, la temperatura del tanque térmico, la temperatura del tanque de reserva, la temperatura ambiente y la radiación solar.

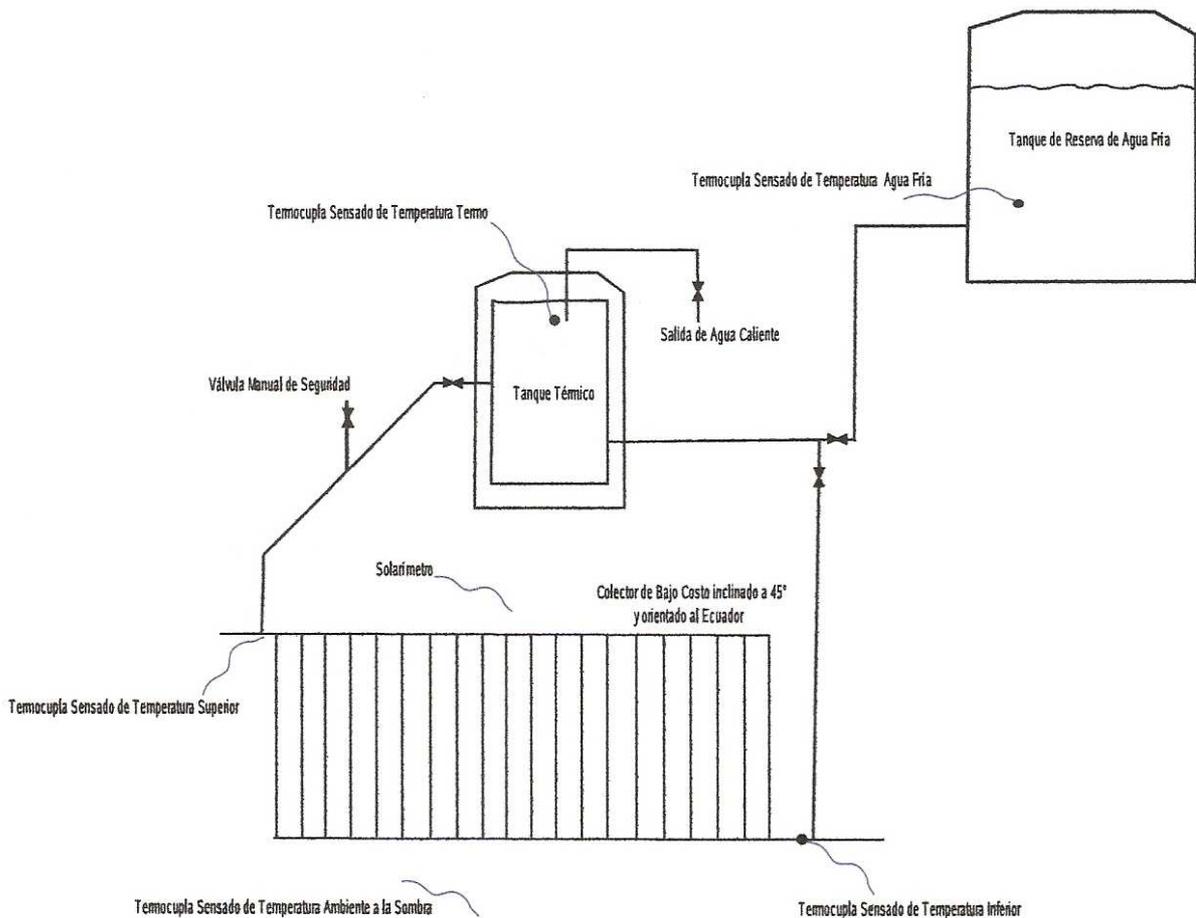


Figura 1: Sistema de general de calentamiento de agua sanitaria donde se pueden observar las ubicaciones de los puntos de sensado

ENSAYO Y RESULTADOS OBTENIDOS

En virtud de datos alentadores obtenidos en los primeros prototipos, se sometió al sistema descrito a los ensayos propuestos por el INTI. Este ensayo, como determina el protocolo, está orientado hacia una visión USUARIO, en el cual se decide analizar la producción de agua caliente a temperatura de uso, fijada en un valor posible de 40°C, en forma diaria con tres extracciones (simulando 2 duchas y 1 lavado de platos).

Los cálculos técnicos fueron:

1. Cálculo de Capacidad de Captación de Energía Solar (Rendimiento térmico con extracciones de agua).
2. Cálculo del Coeficiente Global de Pérdidas de calor, que indica la capacidad del equipo y el sistema en su totalidad, de mantener el agua caliente por un período prolongado.

CÁLCULO DE CAPACIDAD DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR. PROCEDIMIENTO

Día de ensayo, 26 de Julio de 2011. Se realizaron tres extracciones según se detalla a continuación

1. Se extrajeron 40 lts de agua caliente a las 7 hs.
2. Se extrajeron 20 lts de agua caliente a las 14 hs.
3. Se extrajeron 40 lts de agua caliente a las 21 hs.

Las extracciones se realizaron por tiempo de apertura de una válvula y medición de volumen recolectado. Se registraron: Tiempos de descarga (apertura manual) de la válvula para poder obtener el volumen indicado, la temperatura del termo y la temperatura del agua extraída, esta última con termómetro apropiado.

El abastecimiento de agua fría se hizo desde un tanque de reserva de 500 lts, montado en un soporte más elevado y a la intemperie. Se registró continuamente la temperatura del agua de ingreso desde el mismo.

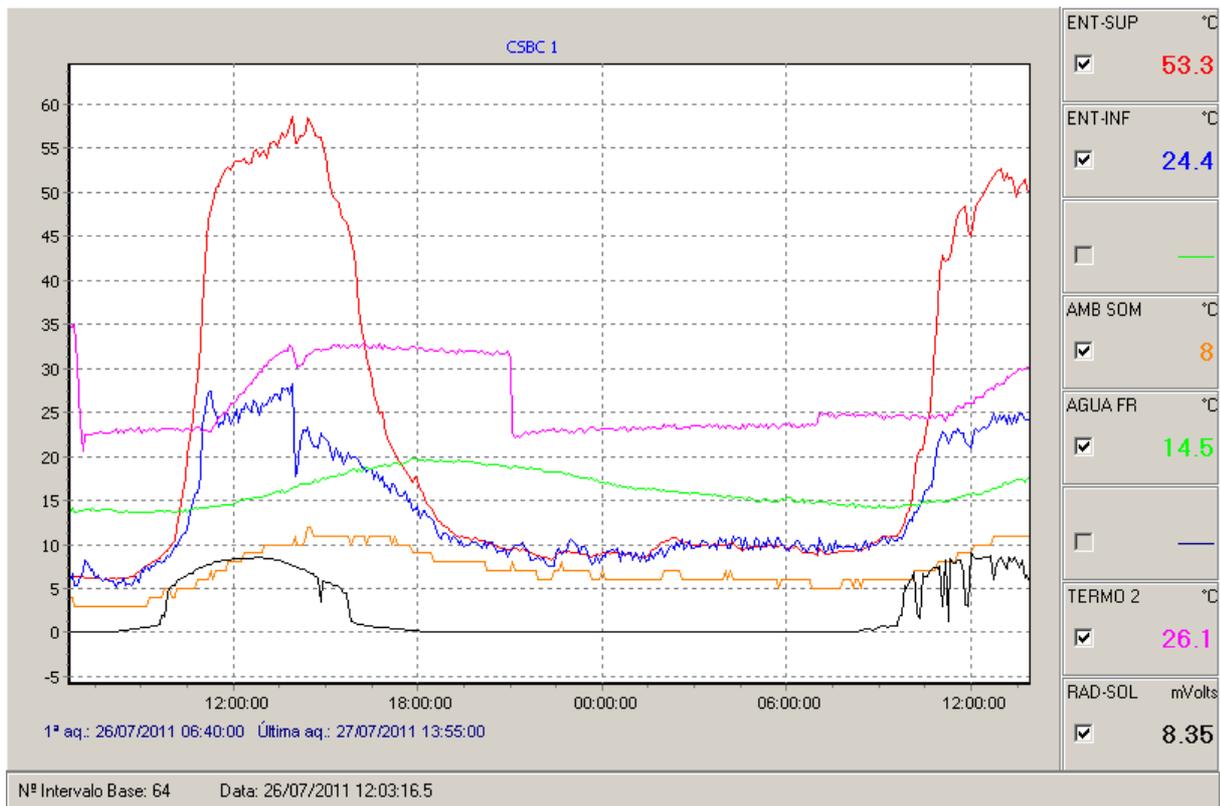


Figura 2: Curvas extraídas de dataloger según registros de los días 26 y 27 de Julio de 2011

En la figura se observan los datos recolectados los días 26 y 27 de Julio. Si observamos las curvas y considerando que el documento sea impreso u observado sin colores, es decir en escala de grises, diremos, parándonos en el día 26 a las 16:00 hs aproximadamente que, la curva superior corresponde a la temperatura registrada en la parte superior del colector, debajo tenemos a continuación la temperatura del agua del tanque térmico, le siguen la temperatura inferior del colector, la temperatura del agua del tanque de reserva, la temperatura ambiente y por último la curva que representa la radiación solar captada con el solarímetro.

Durante el primer día se realizó el ensayo y en el mismo se pueden observar los descensos de temperatura del agua del termo por inyección de agua fría cuando se realizaron las extracciones. Por la lógica de armado del sistema completo, es necesario para una extracción de agua, el ingreso de agua a temperatura inferior proveniente del tanque de abastecimiento (en nuestro caso tanque de 500 lts.).

Los datos obtenidos son los siguientes

Hor a	Extracción	Etapa	Temperatura del agua extraída	Tiempo de extracción	Temperatura del termo	Temperatura de tanque de reserva
07:00	1°	1° Etapa 20 lts	26 °C	3'50''	30,7 °C	13,7 °C
	1°	2° Etapa 20 lts	26 °C	4'54''	23,9°C (al final de la extracción)	13,7 °C
14:00	2°	20 lts	32 °C	4'22''	32,3 °C	16,3 °C
					30,1°C (al final de la extracción)	16,3 °C
21:00	3°	1° Etapa 20 lts	31 °C	3'05''	31,9 °C	18,8 °C
	3°	2° Etapa 20 lts	31 °C	3'10''	22,6°C (al final de la extracción)	18,8 °C

Tabla 1: Datos de temperaturas registradas antes y después de cada extracción

Obsérvese que para la 1° y 3° extracción se dividió en dos etapas ya que se contaba con un recipiente que recolectaba 20 lts.

CALCULOS

La expresión a utilizar para el cálculo de capacidad de captación de la energía solar será:

$$\eta_{diurno} = \frac{C_p \left[M_t (T_{19} - T_7) + \sum_{i=1}^{i=3} m_i (T_s - T_e) \right]}{R \times A} \quad (1)$$

Donde

Mt = masa o volumen total del agua de producción del tanque térmico

T19 = temperatura media del tanque a las 19 hs del día del ensayo, en °C.

T7 = temperatura media del tanque a las 7 hs del día del ensayo, en °C.

Ts = temperatura media del agua extraída durante cada extracción, en °C.

Te = temperatura media del agua fría ingresada al tanque, en °C.

A = área total de colección solar en m².

R = radiación global incidente durante todo el día sobre la superficie colectora, en KJ/m².

Cp = calor específico del agua, en KJ/°C*kg

Datos de ensayo

T19 = 31,8 °C

T7 = 20,6 °C

Ts = Ver tabla 2

Te = Ver tabla 2

A = 2 m²

R = [KJ/m²] (ver cálculo)

Cp = 41,8 KJ/°C*kg

	T 7 hs	T 14 hs	T 21 hs
Ts (°C)	30,7	32,3	31,9
Te (°C)	13,9	16,3	18,8

Tabla 2: Temperaturas registradas durante cada extracción, utilizadas para calcular el rendimiento diurno

Cálculo del término sumatoria

$$\sum_{i=1}^{i=3} m_i (T_{si} - T_{ei}) = 40 \text{ lts} (30,7^\circ\text{C} - 13,9^\circ\text{C}) + 20 \text{ lts} (32,3^\circ\text{C} - 16,3^\circ\text{C}) + 40 \text{ lts} (31,9^\circ\text{C} - 18,8^\circ\text{C})$$

$$672 + 320 + 524 = 1516 \text{ lts}^\circ\text{C} = 1516 \text{ Kg}^\circ\text{C}$$

Cálculo de producción de agua caliente (Mt) a temperatura de uso

$$M_t = M_c + M_f \quad (2)$$

$$M_f = \frac{M_c (T_c + T_t)}{T_t - T_f} \quad (3)$$

Donde

Mc o **Vc**: Masa o volumen de agua caliente: extracciones de 40lts (2 por día) y 20 lts (una por día).

Mf o **Vf**: Masa o volumen frío: a calcular

Tt: Temperatura total de Mt: se fija a 40°C (temperatura de baño).

Tc: Temperatura promedio de agua caliente de extracción de Mc, a medir a la salida del tanque térmico del equipo.

Tf: Temperatura promedio de agua fría de Mf, a medir en tanque de reserva.

$$M_c = 40 \text{ lts} + 20 \text{ lts} + 40 \text{ lts} = 100 \text{ lts}$$

$$T_{c\text{promedio}} = \frac{30,7^\circ\text{C} + 32,3^\circ\text{C} + 31,9^\circ\text{C}}{3} = 31,63^\circ\text{C}$$

$$T_{f\text{promedio}} = \frac{13,9^\circ\text{C} + 16,3^\circ\text{C} + 18,8^\circ\text{C}}{3} = 16,33^\circ\text{C}$$

$$M_f = \frac{100 \text{ lts} (31,63^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C})}{(40^\circ\text{C} - 16,33^\circ\text{C})} = \frac{100 \text{ lts} \times 8,37^\circ\text{C}}{23,67^\circ\text{C}} = 35,36 \text{ lts}$$

$$M_t = M_c + M_f = 100 \text{ lts} + 35,36 \text{ lts} = 135,36 \text{ lts}$$

Cálculo de la radiación total

Integral de curva de solarímetro = 45,58 mVh (sale de integrar la curva de medición obtenida con el solarímetro, Figura 2)

Cte de solarímetro = 10,3 $\mu\text{V}/\text{w}/\text{m}^2$

$$\text{Radiación Total} = \frac{45,58 \text{ mVh}}{0,0103 \text{ mV} / \text{w} / \text{m}^2} = 4425,24 \text{ wh} / \text{m}^2 = 4,425 \text{ Kwh} / \text{m}^2 \quad (4)$$

Equivalencia $\text{Kj}/\text{m}^2 = \text{Kwh}/\text{m}^2$

1 kwh = 3600 Kj

$$4,425 \text{ Kwh} / \text{m}^2 \times 3600 \text{ Kj} / \text{Kw} = 15930 \text{ Kj} / \text{m}^2$$

$$\eta_{\text{diurno}} = \frac{4,18 \text{ Kj} / \text{Kg}^\circ\text{C} [135,36 \text{ kg} (31,8 - 20,6) + 1516 \text{ Kg}^\circ\text{C}]}{15930 \text{ Kj} / \text{m}^2 \times 2 \text{ m}^2} = \frac{12266 \text{ Kj}}{31860 \text{ Kj}} = 0,385$$

$$\eta_{\text{diurno}} = 38,5\%$$

CÁLCULO DE COEFICIENTE GLOBAL DE PÉRDIDAS DE CALOR

Para el cálculo del coeficiente global de pérdidas se tomaron los datos extraídos a partir del día 25/07/2011, para los cuales se consideran las temperaturas interiores del tanque durante un periodo mínimo de 8 horas, sin radiación solar incidente y sin extracciones de agua, registrándose también la temperatura ambiente. Periodo comprendido entre las 20:00 hs del día 25 y las 03:55 hs del día 26. (Ver Figura 3)

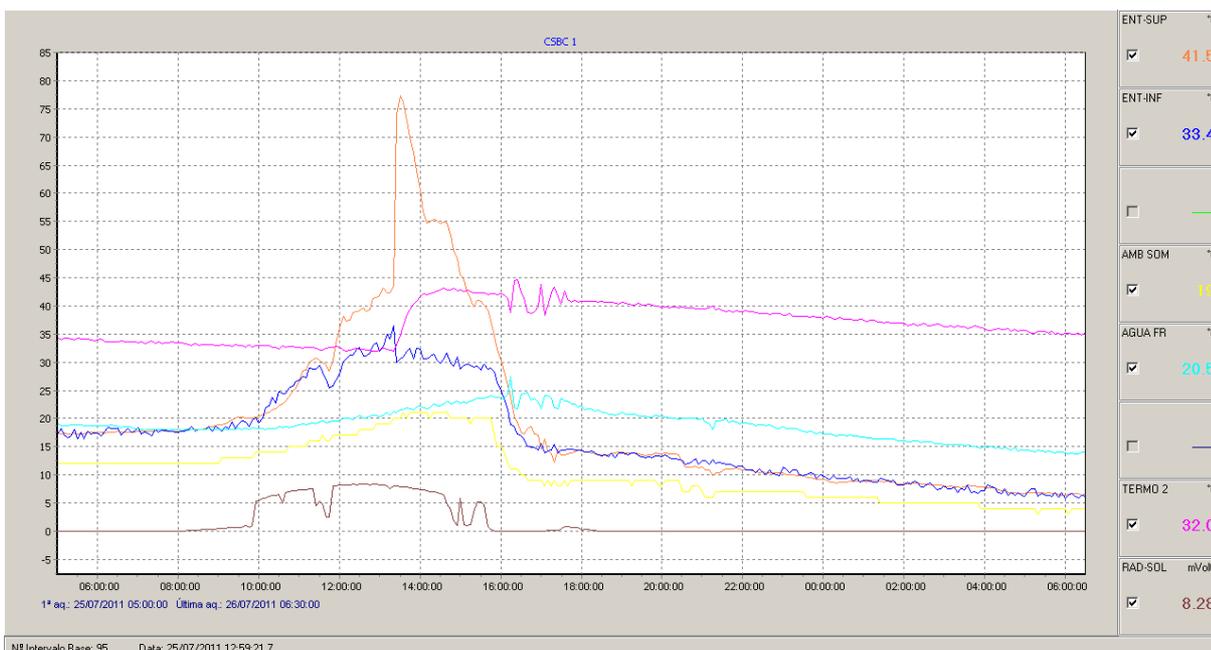


Figura 3: Registros desde la 05:00 hs del día 25/07/2011 hasta las 06:30 hs del día 26/07/2011

En base a los datos obtenidos se calculó el coeficiente global de pérdidas del tanque, refiriéndolo a su área externa y aplicando la expresión

$$\alpha = \frac{M_t \times C_p \times (T_7 - T_{19})}{12 \times A_t \times (T_m \times T_a)} \quad (5)$$

Donde

At = Área externa del tanque de almacenamiento, en m²

Mt = masa del agua contenida en el tanque, en Kg.

T19 = temperatura media del tanque a las 19 hs del día del ensayo, en °C.

T7 = temperatura media del tanque a las 7 hs del día del ensayo, en °C.

Tm = Temperatura media del tanque en el periodo considerado (período comprendido entre las 20:00 hs del día 25 y las 03:55 hs del día 26).

Ta = temperatura ambiente media en el periodo considerado (período comprendido entre las 20:00 hs del día 25 y las 03:55 hs del día 26).

Cp = calor específico del agua, en KJ/°C.Kg

Datos de nuestro ensayo

At = 2,41 m²

Mt = 160 Kg.

T19 = 40,6 °C

T7 = 33,4 °C

Cp = 4,18 KJ/°C*kg

Tm Promedio = 37,97 °C

Ta Promedio = 11,5 °C

$$\alpha = \frac{160 \text{ Kg} \times 4,18 \text{ KJ} / ^\circ\text{C} \cdot \text{Kg} (33,4^\circ\text{C} - 40,6^\circ\text{C})}{12 \times 2,41 \text{ m}^2 (37,97^\circ\text{C} - 11,5^\circ\text{C})} = \frac{4815,36}{765,51} \text{ KJ} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} = 6,29 \text{ KJ} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

CONCLUSIONES

El ensayo final realizado, siguiendo el protocolo de ensayo PMI, propuesto por el INTI, adecuado a nuestras posibilidades, arrojó resultados satisfactorios que alientan a promover la autoconstrucción de colectores de bajo costo de este tipo en barrios periféricos o carenciados de la Ciudad de Rosario y zonas aledañas.

Los valores calculados de capacidad de captación de energía solar y coeficiente global de pérdidas de calor, que indican la capacidad y eficiencia del equipo y de la instalación asociada para calentar y mantener el agua caliente por un período prolongado son aceptables para mejorar las necesidades básicas de una familia tipo. El rendimiento diario es de 38,5% y el coeficiente de pérdidas de 6,29 KJ/m²°C.

A la vez, comparado con equipos comerciales este equipo presenta ventajas técnico económicas por su bajo costo, el cual es una pequeña fracción del costo de un equipo comercial.

Al mismo tiempo, con este diseño se pudieron comprobar experimentalmente detalles constructivos que deben ser tenidos en cuenta en los desarrollos, como ser: Las condiciones para mejorar el efecto de termosifón y la captación de energía solar, entre las que destacamos:

- Secciones de caños adecuadas para no interferir en la circulación natural de fluido
- Pendientes de caños adecuadas para mejorar la circulación natural de fluido
- Extensiones de caños adecuadas para no interferir y mejorar la circulación natural de fluido
- Mínima distancia de montaje, entre colector propiamente dicho y tanque térmico de almacenamiento de agua calentada, para mejorar la circulación natural de fluido
- Mejora alcanzada de elevación de temperaturas con la colocación de una cubierta transparente y sellada sobre el área ocupada por el colector.

Apuntamos que aún se pueden seguir realizando mejoras sobre todas las partes del sistema que no implicarían significativamente elevación de costos y que han sido aportados por los integrantes del grupo, como ser aumento área de captación solar, aumento de la aislación de la instalación y el tanque térmico, entre ellas.

REFERENCIAS

- Anexo II, Protocolo de Ensayo PMI. (2009). INTI Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Programa de Desarrollo Energías Renovables.
- Manual de Instrucciones de Manufactura e Instalación Experimental de Calefón Solar de Bajo Costo. Versión 2.0 Beta. (2004). Elaborado por SoSol – Sociedade do Sol. sitio: www.sociedadadosol.org.br.
- Censolar (1991). Instalaciones de Energía Solar, Tomo III, Centro de Estudios de la Energía Solar, 2da. Edición.
- Fasulo A., Odicino L., Zizzias J., Marchessi J., Venier F. (2010). Un método de evaluación para calefones solares. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 14. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184
- San Juan G., Discoli C., Hall M., Gentile C., Viegas G., Barros V., Arévalo J. (2006). Ensayo de Colectores de Bajo Costo para Calentamiento de Agua. Unidad de Investigación N°2 del Instituto de Estudios del Hábitat (IDEAHAB), Laboratorio de Modelos y Diseño Ambiental (LAMbDA-I), Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de La Plata. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 10. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184
- San Juan G., Discoli C., Barros V., Viegas G. Hall M., Esparza J., Gentile C., Arevalo J., Obach M., Ameri C., Baffonni P., Maya J. (2007) Curso Teórico-Práctico de Colectores Solares de Bajo Costo; Grupo de Productores del Parque Pereira Iraola Unidad de Investigación N°2 del Instituto de Estudios del Hábitat (IDEAHAB), Laboratorio de Modelos y Diseño Ambiental (LAMbDA-I), Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de La Plata. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 10. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184
- Salerno J., Bertinat P., Marino E., Pifferetti A. (2009). Construcción de colector solar de bajo costo para uso familiar. Observatorio de Energía y Sustentabilidad (O.E.S.). Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rosario. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 10. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184
- Energía solar térmica, manuales de energías renovables, IDEA España, 2006.
- Raichijk C., Grossi Gallegos H. y Righini R. (2008). Cartas Preliminares de Irradiación Directa para Argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 12, 2008. ISSN 0329-5184. Secretaría de Energía (2008). Resolución SE 1417/2008

ABSTRACT:

Through this paper we propose to analyze the possibilities of using solar energy in urban areas, particularly in low-income households, using water heating for sanitary purposes, and for this matter it was thought the thermal evaluation of a low-cost collector built with 20 PVC pipe 1" diameter and 1 meter long test protocol as PMI INTI. (Platform of sample INTI). This collector has a 2 m² surface and contains approximately 10 liters of water and is associated to a thermic water store of 160 liters. It is situated in the city of Rosario, (Lat. -32.956278, Lon. -60.680735). Quantitative and statistical methods were adopted using data collected and stored for high-tech equipment and with almost continuous collection (values averaged over 5 minutes) The collector design adopted showed an acceptable efficiency, it doesn't require specific technology for assembly and is easy to set (self set).

Keywords: Solar energy, collector, self set, test, low-cost.