

DISEÑO Y PRUEBA DE UN CALENTADOR SOLAR DE AGUA DE BAJO COSTO

¹Yoali Berenice Gastélum Michel, ²Vicente Borja Ramírez

¹ GIMSA Construcciones Integrales del Golfo, S.A. de C.V.,
Paseo de la Reforma 389 piso 12, Col. Cuauhtémoc, Del. Cuauhtémoc
yoali_gastelum@gmail.com

² Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica, Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
México, D.F. CP. 04510
vicenteb@unam.mx

RESUMEN

Este artículo presenta el diseño y prueba de un calentador solar pasivo de uso doméstico de bajo costo para comunidades rurales en México. El calentador está basado en un prototipo de un grupo de estudiantes de la Universidad de California, Berkeley, llamado CalSolAgua que pretende bajar el costo de dicho calentador a la cuarta parte de un calentador comercial actual, resolviendo las necesidades de agua caliente de familias de escasos recursos, reduciendo el consumo de energía basada en la quema de combustibles fósiles y gases de efecto invernadero (1).

Este artículo resume información recopilada para identificar si el diseño propuesto por CalSolAgua es factible de ser usado por familias de escasos recursos del D.F. proponiendo posibles mejoras a éste en base a información propia del lugar. Presenta el rediseño de su calentador para adecuarlo a las condiciones de la Ciudad de México, y reporta la fabricación y prueba de un prototipo.

ABSTRACT

This paper reports on the design and testing of a low cost passive solar water heater for low-income rural areas in Mexico. The heater is based on a patent filed by a group of students of the University of California at Berkeley called CalSolAgua. The CalSolAgua retails for one quarter of the price of competing water tank heaters, addressing the need of hot water of low income families, reducing fossil fuel energy consumption and green house gasses emission ⁽¹⁾.

This paper summarizes collected data to identify the feasibility to use the design for low income families living in Mexico City, describes the redesign of the heater to adjust to the conditions of Mexico City and reports on the manufacture and test of a prototype.

Palabras Clave: Calentador de agua Solar Pasivo para uso doméstico (*domestic passive solar hot water system*), calentador solar de bajo costo (*low cost solar water heater*), aplicación de energía solar (*solar energy application*), ahorro de energía (*energy saving*), uso de energías renovables (*renewable energy applications*).

INTRODUCCIÓN

En México se tiene una radiación diaria de 5 kWh/m² (Figura 1). Esto es que, con un calentador solar de agua trabajando al 50% de eficiencia se tiene la misma cantidad de energía equivalente a un metro cúbico de gas natural, o bien, la de 1.3 litros de gas licuado de petróleo (5).

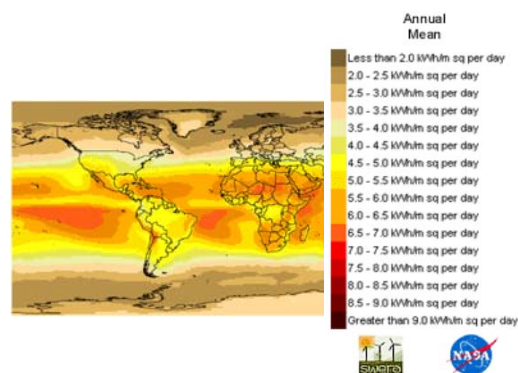


Figura 1. Mapa de promedio anual de radiación diaria Total (2)

En México se ha incrementado el costo del petróleo considerablemente, lo que ha favorecido el incremento en la compra de calentadores solares (8). Según la CONAE, tenemos un área potencial de 70 millones de metros cuadrados, los cuales, si se cubrieran, nos ahorrarían cerca de 4 millones de toneladas en emisiones de CO₂ equivalentes al año, sin contar, por supuesto las enormes cantidades de recursos de gas natural o LP ahorradas.

Las barreras que se tienen para adquirir calentadores solares son:

- Elevado costo inicial
- Desconfianza de la tecnología por los usuarios
- Existencia limitada de técnicos de instalación
- Son difíciles de encontrar

Los calentadores solares se venden con capacidad de almacenaje de 130 a 180 litros para una familia promedio. Hay diversas variantes de ellos dependiendo del tipo de tecnología que emplean (pasivo o activo), de si usan un sistema eléctrico para trasladar el agua caliente a su sitio de almacenaje o por el régimen de uso (estacional o permanente) (3).

Los calentadores solares más comunes en México trabajan bajo el efecto de termosifón. Un fenómeno físico utilizado por primera vez por Thomas Fowler en 1823. El fenómeno consiste en que los líquidos calientes pesan menos que los fríos, por lo que tienden a subir, es por eso que en un calentador solar actual sale agua caliente por la parte superior del calentador sin utilizar ninguna bomba o sistema de presión (3).

Aunque existe mucha información sobre el diseño e instalación de calentadores solares de agua (4, 5, 9) en siguen haciendo innovaciones e investigación alrededor de ellos. Por ejemplo, se investiga el uso de diferentes materiales en algunos de sus componentes (10, 11, 12), la inclusión de nuevos elementos (13) y se proponen diversas configuraciones (14, 15). Entre los temas de investigación, también se encuentra la evaluación de la factibilidad técnica y económica de calentadores solares para uso en hogares de familias de escasos recursos (16, 17), en los cuales se ha identificado como un inconveniente importante para la adopción de estos sistemas el costo inicial de un calentador. Se estima que un calentador de agua solar de los más comunes en México (de serpentín de tubos de cobre y termotanque de 110 litros) se puede fabricar por cerca de \$5,800.00 (9). Considerando los niveles de pobreza de varias regiones de América Latina, África y Asia, el desarrollar un calentador solar de bajo costo es un tema de interés.

En 2007 alumnos e investigadores de la Universidad de California iniciaron el proyecto CalSolAgua, con el propósito de aprovechar fuentes de energía renovable y en consecuencia disminuir el uso de combustibles fósiles. CalSolAgua pretende promover el

aprovechamiento de la energía solar mediante calentadores solares para ayudar a las familias que lo utilicen a disminuir los costos ocasionados al consumo de combustibles fósiles, al mismo tiempo que se disminuyen emisiones de CO₂. El calentador de CalSolAgua está destinado a familias de escasos recursos, por lo que se desarrolló para que su costo fuera de la cuarta parte de un producto comercial.

En 2008, CalSolAgua fabricó y probó prototipos de su diseño en Guatemala, con buenos resultados. La descripción de estos prototipos se describen más adelante. En el 2009 buscó la colaboración de la UNAM para desarrollar un diseño adecuado a las condiciones de México, y fabricar y evaluar un prototipo. Este artículo resume las actividades principales realizadas en el marco de esta colaboración.

En la siguiente sección de este artículo se resume información económico-social para identificar la posible necesidad de un calentador solar pasivo de bajo costo en el D.F. Posteriormente se reporta el diseño del calentador basándose en el sistema patentado por CalSolAgua para luego describir la fabricación de un prototipo y de pruebas realizadas. Al final del artículo se presentan algunas conclusiones de las actividades reportadas.

INFORMACIÓN SOCIO-ECONÓMICA.

La información socio-económica para evaluar la factibilidad del calentador de agua de CalSolAgua provino de fuentes públicas y de entrevistas realizadas por el equipo de la UNAM. La encuesta se centró en cuatro aspectos:

1. Cantidad de agua caliente utilizada en las casas.
2. Tipo de tecnología actual que se usa para calentar el agua así como costos del combustible utilizado.
3. Actitudes y conocimiento de las personas acerca de los calentadores de agua solares.
4. Viabilidad de compra e instalación del calentador.

Datos del INEGI indican que una de las delegaciones más marginadas del Distrito Federal es la Iztapalapa (7), la cual cuenta con buena radiación solar anual (6). Dentro de ella, el Pueblo de Santa María Aztahuacán, cuenta con características

de zona rural. Por ello fue seleccionada para ser estudiada por el proyecto. El Pueblo tiene una población de 12,374 de las cuales 6,850 tienen un alto grado de marginación, y en él viven 2,745 de las cuales 2,172 tienen techos firmes (concreto, tabique, ladrillo, etc.), y 563 tienen techos de materiales ligeros, precarios y/o naturales.

Se obtuvo información de 150 familias de Santa María Aztahuacán obteniendo los siguientes datos:

- Integrantes por familia 5.18, un poco más alta que el promedio nacional (4.3 integrantes)
- En la Figura 2, se muestra el nivel socio-económico de la población de acuerdo a la Tabla 1.
- Todas las familias usan agua caliente sólo para la ducha.
- El 75% calienta agua con boiler, 19% con estufa y 6% con resistencia
- El 41% se baña usando regadera normal, el 49% reportó usar una regadera ahorradora y 10% dijo bañarse con “jicarazos”.
- El promedio de tiempo de baño por integrante es de 14.33 minutos.
- Considerando 5.13 integrantes por familia, se tienen los siguientes consumos de agua acordes a la forma como se bañan: 103 litros si es con jícara, 373 si es con regadera ahorradora y 746 si es con regadera normal.
- Los criterios usados por las familias para evaluar un sistema calentador de agua son el costo, seguridad y el desempeño, aunque también, están conscientes del impacto ambiental.
- El conocimiento que tienen acerca de los calentadores solares es casi nulo, sólo los han visto por televisión, y el 29% de la población que sí los conoce no tiene idea de dónde se adquieren.

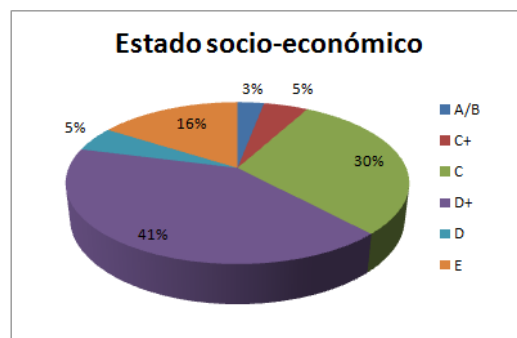


Figura 2. Nivel socio-económico de las familias entrevistadas

	MÍNIMO	MÁXIMO
A/B	\$ 85,000.00	
C+	\$ 35,000.00	\$ 84,999.00
C	\$ 11,600.00	\$ 34,999.00
D+	\$ 6,800.00	\$ 11,599.00
D	\$ 2,700.00	\$ 6,799.00
E	\$ -	\$ 2,699.00

Tabla 1. Clasificación de ingresos familiares

Considerando los datos obtenidos de la encuesta se concluyó que la cantidad de agua caliente por producir por un calentador de agua solar debería ser de 100 litros como mínimo, usando una regadera ahorradora. Se debe producir agua de cuando menos 30° C. Además el calentador debe ser fácil de adquirir y tener un valor aproximado de 3 mil pesos con instalación incluida.

DISEÑO DEL CALENTADOR SOLAR DE AGUA PASIVO

Al inicio del diseño se consideró un prototipo original de CalSolAgua usado en Guatemala (Figura 3). Éste consistía en una caja hecha de madera con fibra de vidrio usado como aislante térmico. A partir de esta información, de las condiciones geográficas y de los resultados del estudio socio-económico de familias en México se definieron las especificaciones del calentador a diseñar. Dentro de las más relevantes se encuentran la capacidad mínima de 100 litros, dimensiones de la caja de 90 x 260 x 20 [cm], la producción de agua de 30° C, y un costo de 3 mil pesos incluyendo instalación. Además, se consideró que las casas en que se instalaría contarían con tinaco en la azotea además de suficiente espacio para su instalación.



Figura 3. Calentador solar de agua CalSolAgua probado en Guatemala

Por otro lado, como regla general se tomó como un ángulo de inclinación promedio del captador solar el ángulo igual al de la latitud del lugar $\pm 10^\circ$. La orientación del captador en el hemisferio norte debería ser hacia el sur geográfico, es decir hacia el Ecuador.

La región estudiada durante el proyecto se encuentra aproximadamente en las coordenadas $19^\circ 20' 01''$ latitud Norte y $99^\circ 11' 54''$ longitud Oeste, a una altitud de 2268 MSNM. Por lo tanto, se definió una inclinación de 20° y una orientación hacia el sur para el calentador solar como especificación de diseño.

Lo original del calentador CalSolAgua es el elemento en el que se deposita y calienta agua en el calentador. El diseño usa un elemento llamado “*bladder*” que es de un plástico y forma especial y que está contenido en el interior de un tanque conformado por un armazón.

Considerando lo anterior, el calentador de agua pasivo se diseñó con los siguientes elementos principales (ver Figura 4):

- Caja contenedora de aluminio y acero. Se seleccionó este material debido a la facilidad de manufactura y a que se consideró que el costo no era elevado tomando en cuenta una sección transversal adecuada para soportar el peso del agua a contener.
- Unicel para aislar. Se consideró este material por ser fácil de conseguir y por cumplir con los requisitos para favorecer la conservación de calor en el calentador
- *Bladder* (contenedor de agua)
- Lámina corrugada recubierta por pintura negro mate usada como captador energético.

Se usó este tipo de material por su alto índice de captación solar y el área mayor que el de una lámina plana.

- Panel de vidrio
- Válvula controladora de presión
- Tubos y accesorios para agua fría y caliente



Figura 4. Fabricación de prototipo



Figura 5. Prototipo de calentador de agua

El prototipo de calentador terminado se muestra en la Figura 5.

INSTALACIÓN Y PRUEBAS DEL CALENTADOR

Para hacer las pruebas del calentador se decidió instalarlo en una casa habitación para que fuera usado en forma cotidiana por una familia.

Considerando las particularidades de la instalación hidráulica de la casa, se decidió hacer una instalación que permitiera tres maneras para emplear agua caliente: la primera usando el calentador doméstico de la casa, la segunda para usar sólo el calentador solar y la tercera para usar el calentador solar en serie con el calentador convencional. Este último caso se consideró

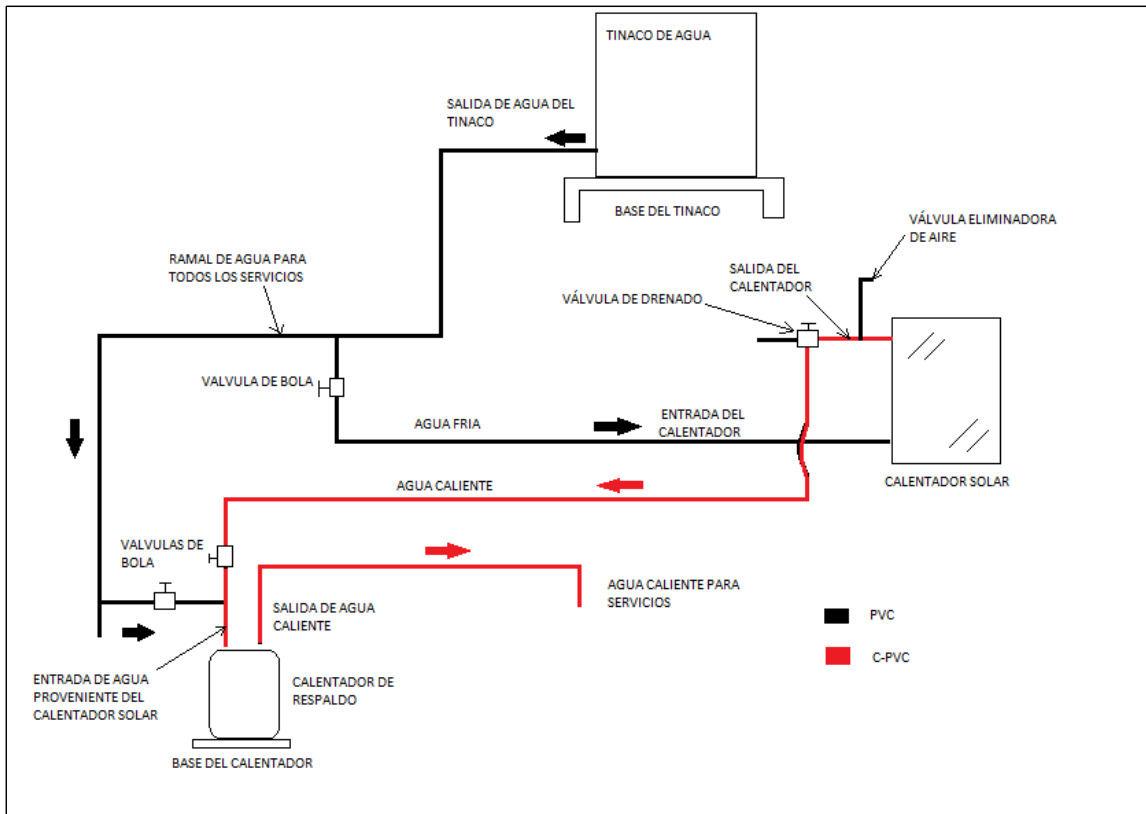


Figura 6. Diagrama de instalación de calentador

como el más viable para familias que desean garantizar el abasto de agua caliente independientemente de la hora de uso o de las condiciones ambientales, pero obteniendo un ahorro de consumo de energía. En esta configuración la temperatura del agua proveniente del calentador solar será elevada por el calentador de la casa sólo si el termostato de éste detecta una temperatura menor a la deseada por el usuario.

La instalación del calentador se muestra en la Figura 6.

Por otro lado, se especificó que la altura máxima del nivel de agua del tinaco de agua de la casa en que se instaló el calentador no debería estar por encima de la altura máxima que alcanzara el calentador solar. Esto debido a que no se deseaba emplear una válvula reguladora de presión que impidiera que el *bladder* (contenedora de agua) se rompiera por la presión de agua.

En la instalación se cuidó el que el calentador solar se encontrara lo más cerca posible del calentador de la casa para evitar pérdidas en la temperatura del agua debidas a una transferencia de calor a lo largo de los tubos que conectan a ambos calentadores.

Para apoyar la en la instalación del calentador, miembros del CalSolAgua visitaron México trayendo algunos componentes necesarios, incluido entre ellos el *bladder*.

RESULTADOS

Durante y después de la instalación del calentador solar de agua, se presentaron varios inconvenientes:

- **Válvula reguladora de presión:** El primer problema que se presentó durante la instalación fue con la válvula reguladora de presión. Dicha válvula fue importada por los integrantes de CalSolAgua después de haberle realizado pruebas en EEUU. Sin

embargo, los parámetros de diseño parecen ser diferentes para distintas alturas de trabajo por lo que la válvula no funcionó como se esperaba. Con esta experiencia, se identificó como fundamental el conocer las condiciones de altura y de presión de agua existentes en los lugares en que se desea instalar un calentador de este tipo. Es importante destacar que tanto en Guatemala, en EEUU y en México, los sistemas hidráulicos de las casa trabajan bajo presiones distintas. Para solucionar el problema relacionado con la válvula reguladora se bajó el nivel de agua del tinaco para disminuir la presión del agua que llegaba al calentador solar.

- Caja contenedora: El problema que se presentó con la caja fue debido a la presión que ejerció el *bladder* al expandirse contra la caja. Ésta fue diseñada para soportar el peso del agua contenida, pero se supuso que el *bladder* contendría la presión del agua. Sin embargo, el *bladder* estaba diseñado en un único tamaño para distintas capacidades confiando en que distintas cajas lo contengan dependiendo de la capacidad de almacenamiento de agua deseado. La solución empleada en este caso fue la utilización de solera de acero empleada a modo de abrazaderas de la caja, de esta manera evitamos que la caja se expandiera. En total se utilizaron 4 abrazaderas, dos de cada uno de los costados de la caja.
- *Bladder*: El problema que se presentó con la bolsa contenedora de agua ocurrió cuando ésta se quedó sin agua ya que se decidió quitar un poco de ella para que la caja en un principio no siguiera expandiéndose. Después de haberla expuesto un tiempo al Sol, las caras del *bladder* en contacto se pegaron. El *bladder* puede funcionar a pesar del problema que se presentó, sin embargo, la mejor solución al problema reemplazarlo.

A pesar de los problemas ocurridos en su instalación, el calentador funcionó correctamente. Sin embargo, es recomendable mejorar el diseño del calentador para obtener un funcionamiento más eficiente

Con base en la fabricación y en las pruebas realizadas del calentador, se propuso lo siguiente:

- Cambiar el aislante: Se pretende cambiar el unicel utilizado como aislante por uno más amigable con el medio ambiente (alguna celulosa o viruta de madera), esto debido a que el unicel no es un material biodegradable.
- Fabricación de una base para el calentador solar: Con el mismo material con que se haga la caja contenedora se le puede dar la inclinación necesaria al colector solar para darle la inclinación de captación solar al colector. El realizar esta modificación debe considerar el hacer un diseño tal que no complique el manipular la caja contenedora.
- Utilización de un termo-tanque: Se recomienda un tanque de almacenamiento en el cual se logrará almacenar más agua caliente y reducir las pérdidas de temperatura por la noche. La implementación de este tanque aumentaría los costos de fabricación del calentador solar, pero se podría manejar este elemento como uno opcional. De esta forma el usuario podría escoger entre mantener un precio bajo, o garantizar un abasto de agua caliente. La diferencia de costo se puede compensar con los ahorros de consumo de energía generada por otras fuentes.
- Construir la estructura de la caja con un material diferente al aluminio, con ello se obtendrán mejoras mecánicas en el diseño.
- Es conveniente que las dimensiones de la caja sean mayores que las del *bladder* totalmente lleno de agua. De acuerdo a las especificaciones de diseño, la caja contenedora se diseñó para la carga de un volumen de 100 litros, sin embargo, el volumen a contener por la caja sobrepasa los 100 litros previstos. La otra alternativa para solucionar esta situación es hacer el *bladder* más pequeño.
- Es recomendable encontrar una válvula reguladora de presión que opere de manera correcta a la altura de la Ciudad De México, y tener un estudio que permita identificar válvulas económicas que funcionen a las diferentes alturas a las que se desee instalar el calentador CalSolAgua.
- Las herramientas necesarias y los costos para la instalación del calentador varían de

acuerdo con la instalación de hidráulica de la casa en cuestión. Es recomendable considerar un estimado general para este costo pues puede variar sustancialmente.

CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado el diseño y prueba de un calentador de agua solar pasivo. El diseño está basado en una propuesta realizada por el grupo CalSolAgua para desarrollar un calentador de bajo costo que resuelva las necesidades de agua caliente de familias de escasos recursos.

En el artículo se ha recopilado información para identificar la factibilidad de explotar el calentador propuesto en México, así como información que permitió definir especificaciones de diseño para el calentador. Respecto a lo anterior, se puede concluir que sí hay un mercado para este tipo de tecnología en comunidades rurales de México, sin embargo, es necesario realizar más pruebas y definir un diseño de calentador que sea confiable y que resulte en un bajo costo de adquisición, así como también de instalación.

Además de lo anterior, se describió el diseño realizado y su instalación. Aunque se cuenta con un calentador funcional instalado en una casa habitación, con base en la experiencia obtenida, se identificaron oportunidades de mejora para el diseño.

RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue realizada gracias al patrocinio de CalSolAgua así como del Programa UNAM-DGAPA-PAPIIT IN118810-2.

Los autores también desean reconocer el trabajo de los participantes en este proyecto de la UNAM Apolo Cuevas de la Cruz, Álvaro Nuñez Flores, Oscar Rendón López y Juan Miguel Silva Acosta.

REFERENCIAS

(1) <http://www.me.berkeley.edu/calsolagua/index.html>

- (2) NASA Surface Meteorology and Solar Energy (SEE). Liberado en Enero 2008
- (3) Morales Benito, Tomás; Instalación de Paneles Solares Térmicos. Segunda Edición (2008)
- (4) William, J.R. (1983). "Design and installation of solar heating and hot water systems", Ann Arbor Science, EEUU, ISBN 0-250-40593-8
- (5) Platowsky Figueroa, I. (2009) "Sistemas de calentamiento solar de agua: una guía para el consumidor", México, Editorial Trillas, ISBN 9786071700025
- (6) Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)
- (7) <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx>
- (8) <http://www.gas.pemex.com/>
- (9) Rodea Vega, D.A. (2010) "Calentador solar de agua, elaboración y manual técnico de instalación hidráulica en uso doméstico", Tesis de licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM
- (10) Riazi, M.R., Razavi, J., Sadeghi, A., Javaheri, A. (2009) "An experimental evaluation of copper, steel and polypropylene tubes in solar water heaters with thermosyphonic flow", Applied Solar Energy, Vol. 45, No. 1, pp. 65-69, Allerton Press, Inc. ISSN 0003-701X
- (11) Mazman, M., Cabeza, L.F., Mehling, H., Evliya, H., Paksoy, H.Ö. (2009) "Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems", Renewable Energy, Vol. 34, Issue 6, June, pp. 1639-1643, Elsevier
- (12) Nwosu, P.N., Oparaku, O.U., Unachukwu, G.O., Agbiogwu, D. (2011) "Experimental study of a thermosyphon solar water heater couple to a fibre-reinforced plastic (FRP) storage tank", Applied Solar Energy, Vol. 47, No. 3, pp. 207-212
- (13) Xinian, J., Hongchuan, G., Harnshan, G., Xiaobo, Z. (2009) "Horizontal heat pipe vacuum tube collector application in balcony solar water heater", Proceedings of ISES Solar World Congress 2007: Solar energy and Human Settlement, Vol. I – Vol. V, pp 571-574
- (14) Fooladi, F., Taheriani, H. (2010) "Experimental study of a multi-tube ICS solar

water heating system in mild climates”, Applied Solar Energy, Vol. 46, No. 1, Allerton Press, Inc. pp. 20-28. ISSN 0003-701X

- (15) Kumar, R., Rosen, M.A. (2010), “Comparative performance investigation of integrated collector-storage solar water heater with various heat loss reduction strategies”, International Journal of Energy Research, Vol. 35, Issue 13, pp. 1179-1187
- (16) Napolini, H.F., y Rütther, R. (2012) "Assesing the technical and economic viability of low-cost domestic solar hot water systems (DSHWS) in low-income residential dwellings in Brazil", Renewable Energy, Vol. 48, December, pp. 92-99, Elsevier
- (17) Meimei, Z., Zhifeng, W., Mingyi, X., Yunsong X. (2009) “The method for economic evaluation about solar water heater”, Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V), 5, pp. 2115-2118