

**EFICIENCIA DE CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA DE LA READIACIÓN
SOLAR EN ENENERGÍA INTERNA TÉRMICA DEL AGUA EN
CALENTADORES SOLARES DE TUBOS AL VACÍO**

**EFFICIENCY OF CONVERSION OF ENERGY FROM SOLAR
RADIATION INTO INTERNAL THERMAL ENERGY OF WATER
IN VACUUM TUBE SOLAR HEATERS**

**Francisco García Reina¹, Roberto Rodríguez Rojas²,
Tamara Martínez Zamora², Lázaro Y. Hernández Mora³,
Francisco Hernández Rodríguez¹.**

¹Universidad de Ciego de Ávila, UNICA

² MINTUR, Cayo Coco, Ciego de Ávila.

³ Fábrica de Calentadores Solares, RENSOL.

Resumen: Los problemas medioambientales y el incremento del precio del petróleo han promovido el ahorro energético y estimulado el desarrollo de las energías renovables. Las energías renovables son aquellas que se regeneran de manera permanente. Cuba, que no dispone de grandes reservas de hidrocarburos, ha generado un cambio de la matriz energética que ha ponderado el uso de la energía renovable. La reflexión sobre el uso de la energía solar en las instalaciones hoteleras, hospitales, escuelas, domésticas, etc., ha revelado el siguiente problema científico: ¿Cómo determinar la eficiencia de conversión de energía solar en calórica en colectores solares de tubos al vacío? Para evaluar la eficiencia de esta instalación solar se desarrollará un diseño experimental que incluye los siguientes pasos: medir el caudal de agua que circula por el colector; medir la temperatura del agua a la entrada y salida del colector; calcular la potencia calórica que absorbe el agua del sol en el colector; determinar la irradiancia solar en la zona de estudio; calcular la potencia solar a partir de la irradiancia solar en el punto de localización y del área efectiva del colector; y por último calcular la eficiencia de conversión de energía solar en calórica en el colector de tubos al vacío. Los problemas medioambientales y el incremento del precio del petróleo han promovido el ahorro energético y estimulado el desarrollo de las energías renovables. Las energías renovables son aquellas que se regeneran de manera permanente. Cuba, que no dispone de grandes reservas de hidrocarburos, ha generado un cambio de la matriz energética que ha ponderado el uso de la energía renovable. La reflexión sobre el uso de la energía solar en las instalaciones hoteleras, hospitales, escuelas, domésticas, etc., ha revelado el siguiente problema científico: ¿Cómo determinar la eficiencia de conversión de energía solar en calórica en colectores solares de tubos al vacío? Para evaluar la eficiencia de esta instalación solar se desarrollará un diseño experimental que incluye los siguientes pasos: medir el caudal de agua que circula por el colector; medir la temperatura del agua a la entrada y salida del colector; calcular la potencia calórica que absorbe el agua del sol en el colector; determinar la irradiancia solar en la zona de estudio; calcular la potencia solar a partir de la irradiancia solar en el punto de localización y del área efectiva del colector; y por último calcular la eficiencia de conversión de energía solar en calórica en el colector de tubos al vacío.

Palabras clave: radiación solar, energía térmica, calentador solar, irradiancia solar, celdas solares, calibración.

Abstract: Environmental problems and the increase in the price of oil have promoted energy savings and stimulated the development of renewable energies. Renewable energies are those that are permanently regenerated. Cuba, which does not have large hydrocarbon reserves, has generated a change in the energy matrix that has weighed the use of renewable energy. Reflection on the use of solar energy in hotel facilities, hospitals, schools, domestic facilities, etc., has revealed the following scientific problem: How to determine the efficiency of conversion of solar energy into heat in vacuum tube solar collectors? To evaluate the efficiency of this solar installation, an experimental design will be developed that includes the following steps: measure the flow of water that circulates through the collector; measure the temperature of the water at the inlet and outlet of the collector; calculate the caloric power absorbed by the water from the sun in the collector; determine the solar irradiance in the study area; calculating the solar power from the solar irradiance at the location point and the effective area of the collector; and finally, calculate the efficiency of conversion of solar energy into heat in the vacuum tube collector.

Keywords: solar radiation, thermal energy, solar heater, solar irradiance, solar cells, calibration..

1. INTRODUCCIÓN

La explotación indiscriminada de los recursos naturales disponibles en nuestro planeta, pone en peligro la sostenibilidad de la vida humana en la Tierra. Las nuevas necesidades generadas por la vida en sociedad, el progreso tecnológico y el acelerado crecimiento demográfico han alterado el medio ambiente que rodea a los seres vivos, hasta quebrantar el equilibrio biológico del planeta (Romero, 2012).

Para potenciar el uso racional de los recursos naturales y mitigar la contaminación atmosférica, en la mayoría de los países del mundo, se ha impulsado programas de investigación y desarrollo de energías renovables o alternativas. Las energías renovables son aquellas que se renuevan o regeneran de manera permanente y entre ellas se encuentran la energía solar, la energía eólica, la energía hidráulica y el biogás.

Las energías renovables ofrecen la oportunidad de obtener energía útil para aplicaciones diversas, tiene menores impactos ambientales que las fuentes convencionales y poseen el potencial para satisfacer nuestras necesidades de energía presentes y futuras (Berri, 2014; Morales, 2014; Kapoor, 2017; Opálková et al, 2018) Más del 80 por ciento de la

energía que se utiliza en el mundo actual, se genera mediante la quema de combustibles fósiles y más del 35 por ciento, se genera mediante la combustión de petróleo (Machín y Riverón, 2013).

En el caso de Cuba, que no dispone de grandes reservas de hidrocarburos, alrededor del 45 por ciento del consumo de petróleo se destina a la generación de electricidad y menos de un 15 por ciento al transporte. La utilización de la energía solar en Cuba es una realidad y se ha convertido en el mayor recurso potencial para la generación de electricidad a largo plazo (Beltran, 2015). Cuba se caracteriza por tener una buena radiación solar promedio de alrededor de 5 kWh/m² día, con una variabilidad aproximada de ± 10 por ciento a lo largo y ancho de la isla, y con poca diferencia relativa durante el año, lo que es muy positivo, a diferencia de otras latitudes (Beltran, 2015).

La energía solar es una fuente renovable de energía que se puede dividir en: energía solar pasiva, que es una forma de aprovechamiento que capta la energía solar, la almacena y distribuye de forma natural, sin mediación de elementos mecánicos; la energía solar térmica, basada en el transporte del flujo solar que puede aprovecharse para secar productos, calentar agua; y la energía solar fotovoltaica, en su concepto más simple es el uso de la energía solar para la generación de electricidad (Díaz, 2018).

El análisis del impacto que ha tenido el desarrollo de las fuentes renovables de energía, especialmente la energía solar y el análisis de las implicaciones económicas y ambientales del alto consumo de energía eléctrica y de gas licuado en el calentamiento de agua en instalaciones hoteleras de la cayería norte de Ciego de Ávila; se reconoce el problema científico: ¿Cómo determinar la eficiencia de conversión de energía solar en calórica en colectores solares de tubos al vacío en el Hotel Pilar 2?

DESARROLLO

Materiales y Métodos utilizados

• Calentadores solares.

Los calentadores solares usados en la medición se encuentran instalados en un bloque del Hotel Pilar 2 en la Cayería Norte de Ciego de Ávila como se muestra en la figura 1:



Figura 1. Calentadores solares en Pilar 2.

En el sistema solar térmico instalado en el Hotel Pilar 2 se utilizaron 32 colectores solares de tubos al vacío del modelo LPC47-1530 (en 8 bloques de 4 paneles c/u), que se recomienda emplearlo en sistemas donde se requieren grandes volúmenes de agua, tales como industrias de alimentos, hoteles, hospitales y lavanderías. El colector solar de tubos al vacío modelo LPC47-1530 se puede emplear tanto en instalaciones termosifónicas como en sistemas con circulación forzada. Los colectores fueron ubicados en dirección sur y con 5° de inclinación con respecto a la horizontal.

Las dimensiones del colector solar de tubos al vacío modelo LPC47-1530 son las siguientes: tiene un largo de 3,065 m y un ancho de 1,220 m, para un área bruta total de 3,74 m²; su área de captación es de 4,88 m² y su área efectiva es de 3,00 m². Tiene un peso cuando está vacío de 23 Kg, una capacidad de líquido de 52,7 L y un peso cuando está lleno de 81 Kg. En la figura 2 aparece la representación esquemática de las características técnicas generales de este modelo.

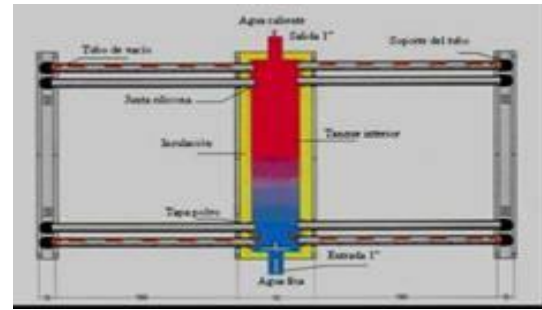


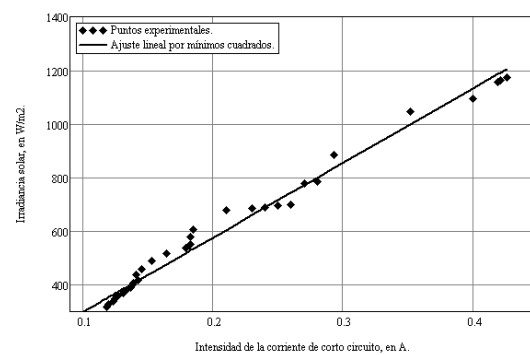
Figura 2. Representación de colector solar de tubos al vacío modelo LPC47-1530

• Medición de la irradiancia solar.

Para la medición de la irradiancia solar incidente en los paneles solares se usó un panel NUMEN DSM-5L calibrado con un piranómetro de alta precisión Kipp and Zonen en la Estación meteorológica de Fallas. Este panel se muestra en la figura 3:



Figura 3. Panel solar NUMEN calibrado para medir irradiancia solar.



La recta de calibración se obtuvo por mínimos cuadrados:

$$I_{rad}(I_{scm}) = 2693.85702 \cdot I_{scm} + 50.46152$$

Expresión para determinar la irradiancia solar I_{rad} en W/m^2 en función de la corriente de cortocircuito medida I_{scm} en A.

Luego, midiendo la corriente de corto circuito I_{sc} que da el panel solar a una irradiancia dada y usando la expresión anterior se determina el valor numérico de la misma. Para esta medición se desarrolló el siguiente montaje (figura 5) para obtener el registro continuo y automatizado de la irradiancia solar.

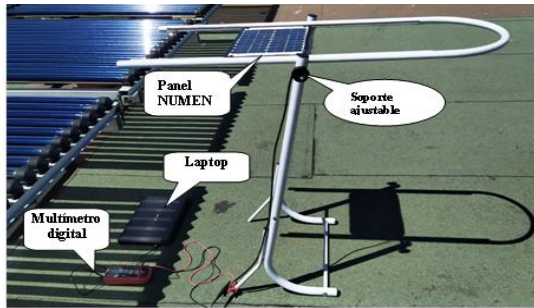


Figura 5. Montaje para medir irradiancia.

El panel NUMEN se monta en un soporte ajustable para ponerlo a la misma inclinación que el panel solar, como se aprecia en la figura. La corriente de corto circuito se mide con el multímetro digital UNI-T UT61E, el cual se pone en interface con la laptop para el registro continuo y automatizado de la I_{sc} , con lo cual se tiene entonces el registro de la irradiancia solar.

Conociendo el área de captación total de los tubos del panel se determina la potencia luminosa en W incidente en los 468 tubos que tiene la instalación (se restaron 12 tubos que se habían deteriorado con el tiempo de uso). Luego la potencia solar se calcula por:

$$P_s = I_s \cdot A_t \cdot \tau \quad \text{en } W \quad (1)$$

donde I_s es la irradiancia solar en W/m^2 y A_t es el área total en m^2 y τ es la transmitancia del vidrio del tubo e igual a 0,91, dado por el fabricante.

• Medición de la potencia calorífica captada por el agua de la radiación solar.

El caudal de agua que circula por el panel solar se midió con un caudalímetro digital GE TransPort PT878, el cual se muestra en la figura 6.



Figura 6: Caudalímetro digital GE TransPort PT878

Este caudalímetro también se conecta en interface con una PC y registra automáticamente los valores del caudal en m^3/h ó L/s . Tomando la densidad del agua aproximadamente a 1 kg/L , el caudalímetro realmente da el flujo de masa en kg/s .

La temperatura de entrada y salida del agua al sistema se midió con los termómetros del sistema, como se muestra en la figura 7:

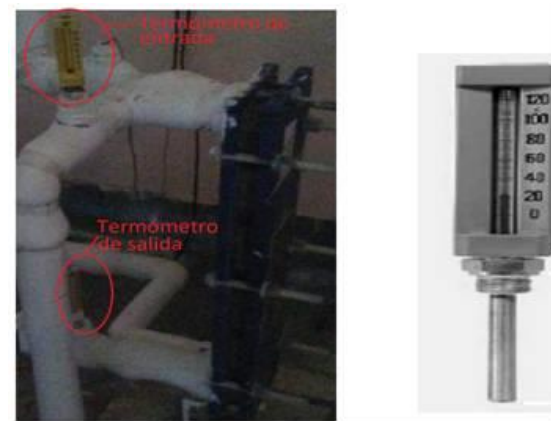


Figura 7: Termómetros de entrada y salida

Realmente, esta medición de temperatura es la única que se hizo de forma manual, es decir no digital automatizada, lo cual se cambiará en las próximas mediciones usando sensores interfaseados a PC, completamente automatizados. Conociendo que el calor específico del agua a esta temperatura es de $c_w = 4,1813 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, se tiene que para la potencia calorífica absorbida por el agua en el calentador solar viene dada por:

$$P_c = C_w \cdot c_w \cdot (T_o - T_i) \quad \text{en } W \quad (2)$$

Donde C_w es el caudal de agua en kg/s, c_w es el calor específico del agua, T_o es la temperatura de salida y T_i es la de entrada del agua.

• **Determinación de la eficiencia energética del calentador solar.**

Está claro que la potencia térmica que absorbió el agua dada por la ecuación (2) proviene de la potencia solar incidente dada por la expresión (1). Luego la eficiencia de conversión de la energía solar en energía térmica interna del agua viene dada por:

$$\eta = \frac{P_c}{P_s} 100 \quad (3)$$

La cual se expresa en %.

• **Resultados y su discusión:**

Las mediciones se hicieron durante varios días en las instalaciones de calentadores solares de uno de los bloques del hotel Pilar 2. Se escogió las mediciones del día 24 de marzo de 2020, durante 150 minutos alrededor de las 12 m, por la estabilidad de los parámetros de irradiancia y caudal, lo cual garantiza que la respuesta del sistema no varíe por los diferentes tiempos de respuesta de los mecanismos de intercambio de calor. En la figura 8 se presenta los valores de irradiancia solar y caudal en los 150 minutos de la medición:

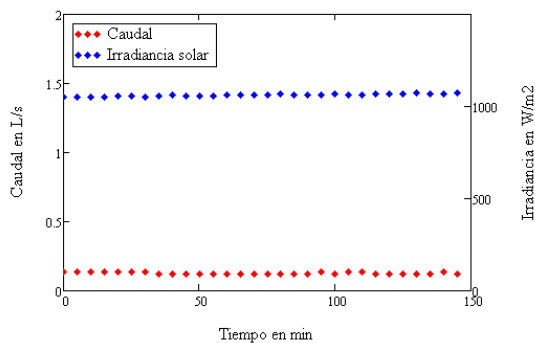


Figura 8. Irradiancia solar y caudal de agua en la medición

Como puede apreciarse ambas magnitudes varían muy poco en este intervalo, la media del caudal fue de $0,21 \pm 0,01$ kg/s y la de la irradiancia fue de 1060 ± 10 W/m².

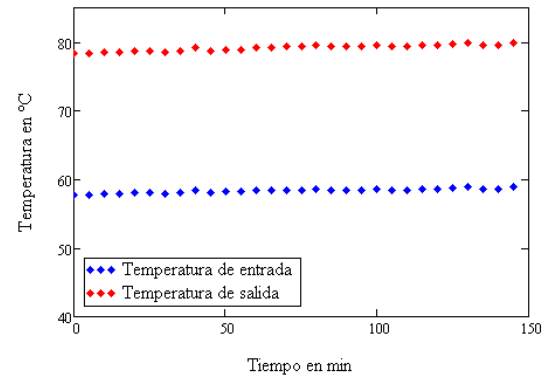


Figura 9. Temperatura de entrada y salida del agua.

De igual manera, ambas temperaturas varían muy poco en el intervalo. El valor medio de la temperatura de entrada es de $59,6 \pm 0,8$ °C y la de salida en de $72,3 \pm 0,7$. La temperatura de entrada es tan alta debido a que antes pasa por el tanque de calentamiento con resistencia eléctrica, la cual la eleva hasta ese valor desde los $25,6$ °C que viene del acueducto.

Con estos valores se calcula la potencia solar incidente y la potencia calórica absorbida por el agua en los calentadores, como se presenta en la figura 10:

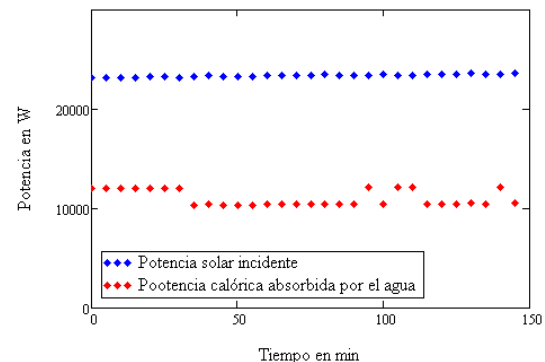


Figura 10. Potencias solar incidente y calórica absorbida por el agua.

Usando las ecuaciones (1), (2) y (3) se calculó la eficiencia de conversión de energía solar en energía térmica interna del agua, lo cual se presenta en la figura 11.

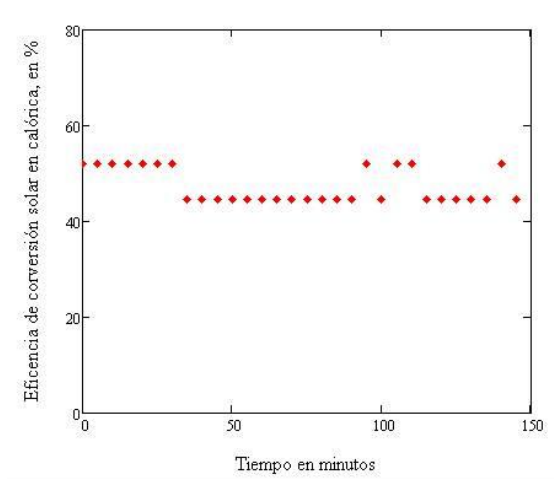


Figura 11. Eficiencia de conversión de la energía solar en térmica del agua.

Usando los valores medios de las magnitudes medidas se calculó el valor medio de la eficiencia energética de los calentadores solares:

$$\eta = 49 \pm 1 \%$$

CONCLUSIONES

Se diseñó, montó y se puso a punto un sistema de alta precisión para medir la eficiencia de los calentadores solares, el cual permite evaluar el funcionamiento de estos en las diferentes aplicaciones y condiciones ambientales donde se emplean, propiciando un uso más racional de los mismos, disminuyendo los costos y propiciando una mayor durabilidad.

REFERENCIAS

- Águila, A. (2010). Evaluación del ahorro de energía eléctrica en el calentamiento de agua por la introducción de colectores solares. Tesis de Maestría en Eficiencia Energética, Universidad de Ciego de Ávila, Cuba.
- Al-Taani, H. & Arabasi, S. (2018). Solar Irradiance Measurements Using Smart Devices: A Cost-Effective Technique for Estimation of Solar Irradiance for Sustainable Energy Systems. *Sustainability* 2018, 10, 508. (pp. 1-11). ID
- Beltran, Y. (2015). Evaluación del sistema de bombeo solar fotovoltaico para el riego del frijol en la UBPC Delia del municipio Primero de Enero. Tesis de Maestría en

- Eficiencia Energética, Universidad de Ciego de Ávila, Cuba.
- Bérriz, L. & Madruga, E. (2008). Cuba y las fuentes renovables de energía. La Habana: Editorial CUBASOLAR.
- Bérriz, L. & Álvarez, M. (2008). Manual para el Cálculo y Diseño de Calentadores Solares. La Habana: Editorial CUBASOLAR.
- Conibeer, G. (2015). Hot carrier solar cell absorber prerequisites and candidate material system. *Sol. Energy. Mater.* (pp. 124-129).
- Díaz, C. (2018). Desarrollo de un sistema de medición de la irradiancia solar y su uso en el aprovechamiento de esta energía renovable. Tesis de Maestría en Eficiencia Energética, Universidad de Ciego de Ávila, Cuba.
- Dominico, D. (2015). Diseño de una estación fotovoltaica para el suministro de energía eléctrica al bombeo en una planta de tratamiento de aguas residuales. Tesis de Maestría en Eficiencia Energética, Universidad de Ciego de Ávila, Cuba.
- Ekici, C. & Teke, I. (2017). Total Global Solar Radiation Estimation with Relative Humidity 2 and Air Temperature Extremes in Ireland and Holland. *Geoscientific. Instrumentation Method. Data System.* Discuss, Discussion started: 21 November 2017. Extraído de: <https://doi.org/10.5194/gi-2017-52>
- Gupta, C. & Garg, Ch. (1971). Diseño de calentadores solares de agua con circulación natural (en idioma ruso). *Heliotécnica*, No. 5. (pp. 22-34).
- Locatelle, A. (1962). Captación de la energía solar para propósitos de calentamiento de agua (en idioma italiano). *Termotécnica*, Vol. 12. No.12. (pp. 657-467).
- Meinel, A. & Meinel, B. (2013). *Solar Energy*. Addison Wesley. New York, USA.
- Martínez, T. (2010). Disminución del consumo específico neto de GLP en el sistema de agua caliente del Hotel Oasis Playa Coco a partir del aprovechamiento de la energía térmica solar. Tesis de Maestría en Eficiencia Energética, Universidad de Ciego de Ávila, Cuba.
- Opálková, M. et al (2018). A Database of 10 min Average Measurements of Solar Radiation and Meteorological Variables in Ostrava, Czech Republic. *Earth System. Sci. Data.* 5, (pp.345-356).
- Sayago, S., Bocco, M., Ovando, G & Willington, E. (2011). Radiación solar horaria: modelos de estimación a partir de variables

meteorológicas básicas. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 15, 2011. (pp. 51-57).