

Mejoramiento de la eficiencia de un panel solar fotovoltaico con el uso de energía geotérmica de baja entalpía

Jaime Guerrero-Fernández¹ y Rubén J. Camargo-Amado²

¹Climatizar Ingeniería, Asociación Colombiana de Energías Renovables (ACER), E-mail: presidencia@asociacionenergiasrenovables.org. ²Universidad del Valle, A.A., 25360, Cali-Colombia, E-mail: ruben.camargo@correounivalle.edu.co

Resumen

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar una alternativa al enfriamiento de paneles solares empleando energía geotérmica superficial (de baja entalpía) para mejorar la eficiencia de los paneles. Esta tecnología, que es ambientalmente amigable, reduce el consumo de energía primaria y las emisiones de CO₂ comparada con otros métodos de enfriamiento. Las celdas fotovoltaicas tienen rendimientos entre un 15% y un 25%, pero la eficiencia disminuye al aumentar la temperatura, hasta en un 0.3% por grado centígrado. En términos prácticos la parte térmica de la radiación solar puede aumentar en unos 30°C la temperatura al interior de un panel solar, y disminuir a su vez el rendimiento hasta valores insostenibles. Dicho de otro modo, en lugares muy soleados se tiene la enorme ventaja de disponer de energía solar en abundancia, pero la grave desventaja de la disminución del rendimiento debido al aumento en la temperatura del panel solar. Se han propuesto diversos mecanismos para reducir la temperatura de las celdas fotovoltaicas. Este trabajo presenta un estudio que analiza la aplicación de energía geotérmica de baja entalpía como sistema de enfriamiento de paneles solares para evitar la pérdida de rendimiento. Se estudió un panel solar con un intercambiador de cobre adosado a la cara oscura del panel conectado a un sistema de agua fría tipo “chiller” para simular el efecto de un sistema de enfriamiento geotérmico de baja entalpía. La temperatura del agua de enfriamiento a la entrada del intercambiador es la temperatura promedio medida en pozos de agua caliente del Valle del Cauca a una profundidad de 12 metros.

Palabras clave: Sistemas híbridos, recursos de baja temperatura, celdas fotovoltaicas, eficiencia energética, pruebas experimentales.

Eficiencia energética de paneles solares

La energía solar es una de las fuentes renovables, limpias e inagotables a aprovechar en la zona tropical y en esta región en particular tiene un gran valor: muchas horas de sol y buena radiación incidente (hasta 12 horas promedio de sol al día todo el año), que permiten una buena “cosecha” de energía durante todo el año. Pero en los sistemas fotovoltaicos se tiene una insuficiencia: el efecto de la temperatura sobre el panel genera que el dispositivo disminuya su rendimiento, a la vez que el calentamiento puede generar problemas por degradación térmica que acorte la vida útil del mismo.

El rendimiento de las celdas fotovoltaicas que se comercializan en la actualidad está comprendido entre un 15% y un 25%, es decir, que sólo una pequeña parte de la energía lumínica se aprovecha realmente en forma de energía eléctrica. Este rendimiento es menor cuánto más alta es la temperatura. El aumento de temperatura en las celdas supone un incremento en la corriente, pero al mismo tiempo una disminución mucho mayor, en proporción, de la tensión. El efecto global es que la potencia del panel solar disminuye al aumentar la temperatura de trabajo. Una radiación de 1000 W/m² es capaz de

calentar un panel al menos 30 grados por encima de la temperatura del aire circundante, lo que reduce la tensión.

En la práctica, las celdas fotovoltaicas no operan bajo las condiciones de certificación estándar. Los dos parámetros de mayor influencia sobre la curva I – V de una celda fotovoltaica **FV** son la radiación y la temperatura (Ibáñez y Rosell, 2004). Por un lado, dado que la corriente de cargas eléctricas generadas a partir de la radiación luminosa es proporcional al flujo de fotones con energía superior a la anchura de la banda prohibida (E_g), la intensidad de cortocircuito de una celda es directamente proporcional a la intensidad de iluminación incidente: ante un determinado aumento o disminución porcentual de la iluminación, la intensidad se ve modificada con un cambio porcentual similar en el mismo sentido (Fig. 1).

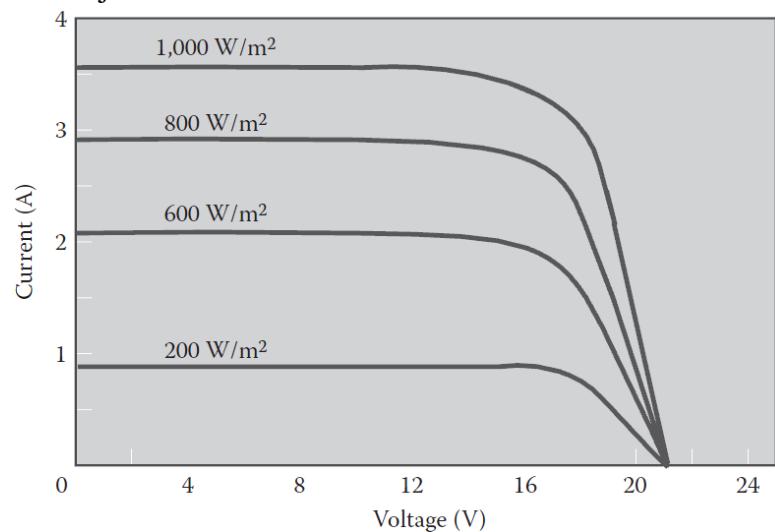


Fig. 1. Efecto de la radiación solar incidente sobre la corriente del panel FV. (Fuente: Foster et al., 2010)

En cambio, la tensión de circuito abierto no experimenta grandes variaciones al modificarse las condiciones de la radiación solar. En consecuencia, la potencia generada es prácticamente proporcional a la irradiancia. Estos hechos tienen consecuencias interesantes. Por una parte, la proporcionalidad con la radiación permite el cálculo de la producción diaria. Por otra parte, la estabilidad de las tensiones facilita el diseño de módulos para conseguir tensiones determinadas aunque las radiaciones sean pequeñas. Con todo, a radiaciones menores a 200W/m^2 la producción eléctrica de celdas fotovoltaicas es prácticamente despreciable (Foster et al., 2010).

El efecto de la temperatura sobre la curva I – V es significantemente diferente (Figura 2). Así, al aumentar la temperatura, la tensión de circuito abierto disminuye del orden de unos pocos mV por cada grado centígrado que aumenta la temperatura ($2.3\text{mV/}^\circ\text{C}$ para el Si y entre 2 y $2.2\text{ mV/}^\circ\text{C}$ en el caso de GaAs). Además, como consecuencia de esta variación de V_{ac} , el factor de forma FF también disminuye a medida que aumenta la temperatura, lo que provoca, a su vez, que la eficiencia de la celda haga lo mismo: disminuir al aumentar la temperatura (se reduce entre 0.4 y 0.5 \% por $^\circ\text{C}$ en las celdas de Si y alrededor de 0.3 \% por $^\circ\text{C}$ en las de GaAs).

La intensidad de corriente de cortocircuito, en cambio, permanece prácticamente constante (en realidad, aumenta ligeramente al hacerlo la temperatura). La Figura 3 ilustra las variaciones de las principales características eléctricas de una celda fotovoltaica en función de la temperatura, tales como el voltaje en circuito abierto V_{oc} y corriente a cortocircuito I_{sc} (Ibáñez y Rosell, 2004).

Se hace necesario entonces buscar técnicas que permitan evitar o reducir el incremento de la temperatura en las celdas fotovoltaicas. Algunos estudios proponen integrar estos dispositivos a colectores solares térmicos (Zakharchenko et al., 2004), otros sumergir el panel fotovoltaico en un tanque con agua o en corrientes de agua (Wilson, 2008) o integrar los paneles en estructuras que permitan ser llenadas con agua para que el panel al calentarse lo haga igualmente con el agua y se

disponga de un calentador de convección sin elementos mecánicos que impulsen el agua contenida en el tanque (Krauter, 2004; Krauter et al., 1999). Para el enfriamiento de celdas fotovoltaicas también se ha desarrollado un sistema donde el calor generado en la superficie de la celda solar evapora el líquido en un tubo de calor o “heat pipe” (Russell, 1982). Todos estos sistemas buscan reducir al máximo el efecto de la temperatura sobre la potencia eléctrica producida por el panel fotovoltaico y conseguir así mayores potencias eléctricas de salida y una mejor eficiencia del dispositivo.

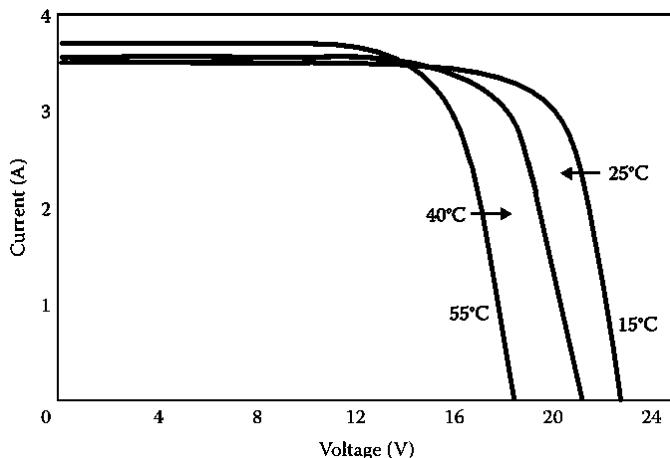


Fig. 2. Efecto de la temperatura sobre la tensión del panel FV.
(Fuente: Foster et al., 2010)

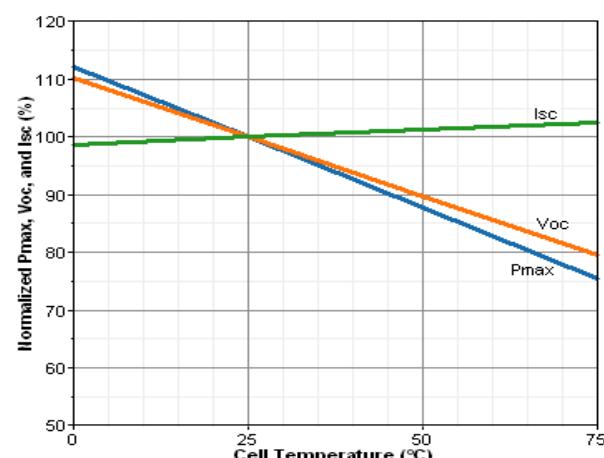


Fig. 3. Efecto de los parámetros eléctricos de una celda FV en función de la temperatura.
(Fuente: www.homerenergy.com)

Este trabajo presenta estudios controlados en sistemas modelo, donde se analizó la aplicación de energía geotérmica de baja entalpía como sistema de enfriamiento de paneles solares para evitar la pérdida de rendimiento. Específicamente, se trabajó con un panel solar que fue caracterizado midiendo la temperatura del panel solar sin ningún mecanismo de enfriamiento, la temperatura ambiente y el voltaje producido (con una resistencia constante). Se implementó un intercambiador de cobre adosado a la cara oscura del panel, conectado a un sistema de agua fría tipo “chiller”, para simular el efecto de un sistema de enfriamiento geotérmico de baja entalpía. Se midieron la temperatura del panel solar con sistema de enfriamiento, la temperatura del fluido de enfriamiento a la entrada y a la salida del intercambiador, la temperatura ambiente y el voltaje producido (con una resistencia constante). La temperatura del agua de enfriamiento a la entrada del intercambiador es la temperatura promedio medida a una profundidad de 15 metros, en pozos de la región del Valle del Cauca en Colombia.

Diseño metodológico

En la caracterización del panel se utilizó un recolector de datos de temperatura y voltaje. Primero se tomaron medidas de temperatura alrededor del panel, voltaje del panel en funcionamiento, temperatura dentro panel y temperatura ambiente de referencia.

Se hicieron varias perforaciones geotérmicas con el fin de determinar un perfil de temperaturas de operación y características del terreno. A una profundidad de 15 m se obtuvieron temperaturas de 24 °C promedio, temperatura usada en el agua de enfriamiento.

Luego de implementar el enfriador e intercambiador al panel solar como simulador de las condiciones de intercambio geotérmico, se hizo una segunda medición de temperaturas y voltajes, a los mismos horarios para comparar la producción de energía del panel con y sin enfriamiento geotérmico. La recolección de datos duró cinco meses.

Finalmente se procedió a corroborar los parámetros esperados de funcionamiento del panel en cuanto a la relación temperatura-voltaje de circuito abierto, temperatura-corriente a corto circuito y temperatura-eficiencia con radiación variable, y se establecieron comportamientos de la eficiencia del panel a las condiciones de Cali.

Se construyó un sistema enfriador-intercambiador de calor que se adosó a un panel solar para simuladas las condiciones esperadas en un intercambio geotérmico (Fig. 4).



*Fig. 4.
Partes y
accesorios
del
simulador
geotérmico.*

Resultados

Producción de energía

En septiembre de 2011 se instaló un panel solar FV de 85 W, cuyas características son las siguientes:

Rs:	4.95 kWh/m ² /día
Área del panel:	0.657 m ²
Pin:	325.215 W/m ²
FF:	0.734
η nominal:	13%

Se recolectaron datos cada 15 minutos, y en las figuras siguientes se muestran gráficamente los resultados reflejados en el comportamiento de las temperaturas del panel y ambiente y la tensión producida.

En la Figura 5 podemos observar la correspondencia en el comportamiento similar de la temperatura tanto del panel como del ambiente con relación a la producción de energía (o su componente: la tensión), sin ningún tipo de enfriamiento. En la Figura 6 observamos que una vez que ha sido implementado el sistema de enfriamiento, la temperatura del panel disminuye y la producción de energía aumenta.

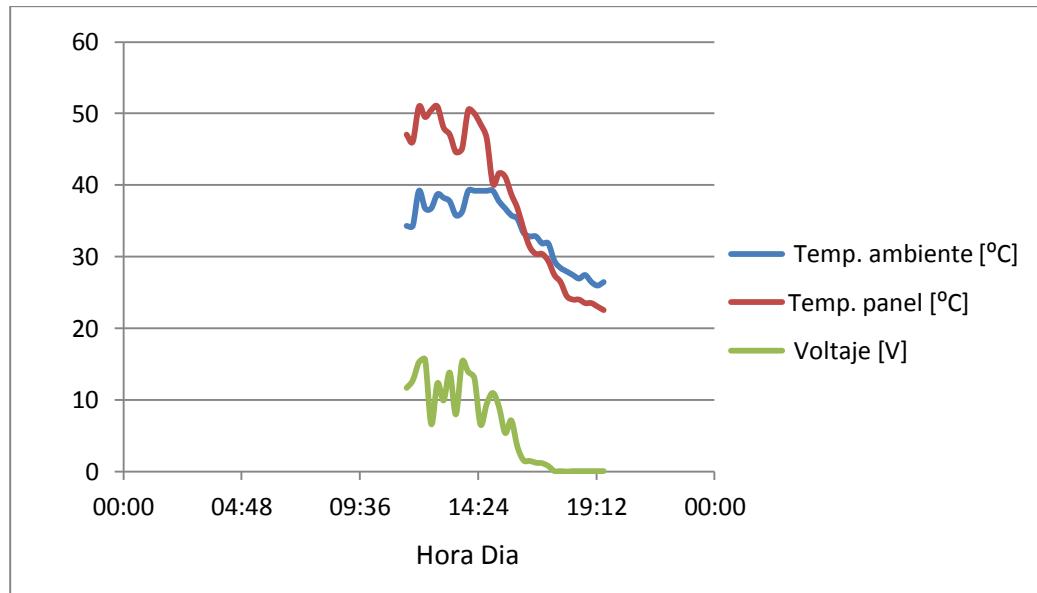


Fig. 5.
Comportamiento
del panel
fotovoltaico sin
ningún tipo de
enfriamiento.

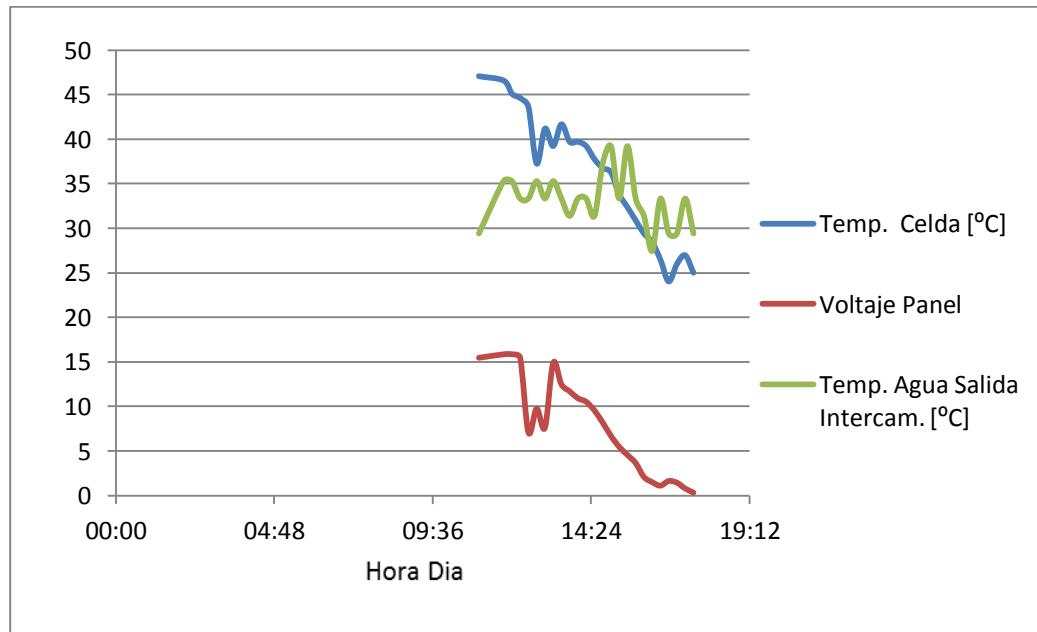


Fig. 6.
Comportamiento
del panel
fotovoltaico con
enfriamiento.

Los resultados comparativos de producción de energía diaria obtenidos con un sistema sin enfriamiento y una vez implementado el simulador geotérmico se muestran en la Figura 7.

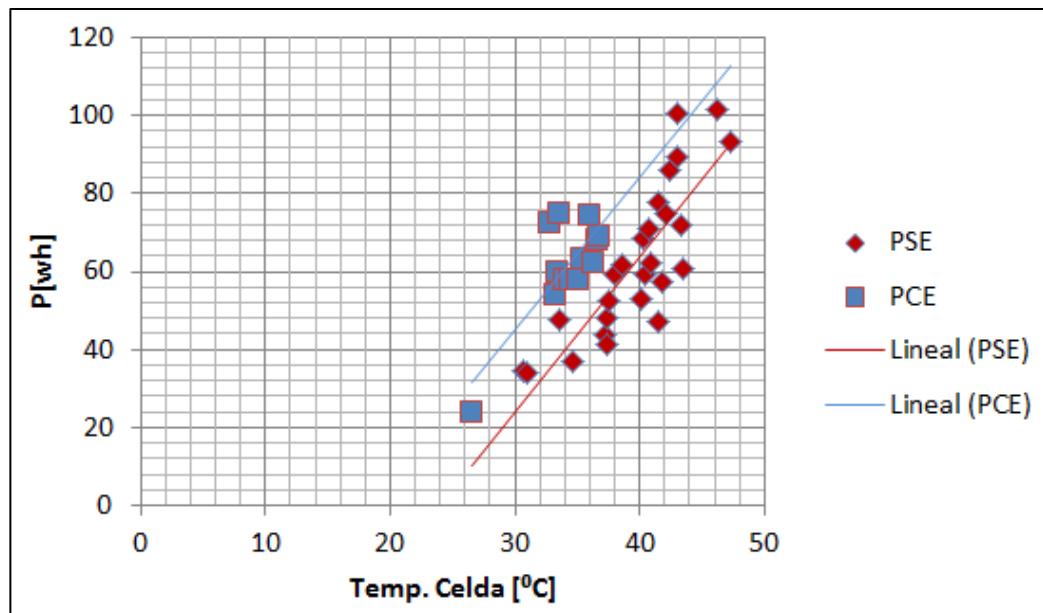


Fig. 7. Potencia producida con y sin enfriamiento geotérmico vs temperatura de la celda.

El comportamiento fue el esperado: a condiciones nubladas, poca producción de energía. La producción podía variar de un segundo a otro dependiendo de cuán despejado estuviera el cielo (radiación directa). Al medio día se producía mayor energía coincidiendo con los datos diarios del Ideam (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia).

Cuando se implementó el intercambiador de calor al panel y se le suministró agua a 24°C se observó que mejoraba la producción de energía instantánea. Debemos tomar un criterio de promedio de energía, debido a los cambios de radiación, para comparar un comportamiento.

Eficiencia

La eficiencia de la celda solar está definida según Hu (1983) como:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_x \times FF}{\text{incident solar power}}$$

Donde V_{oc} es el voltaje o tensión a circuito abierto e I_{sc} es la corriente a corto circuito.

El factor de llenado o de forma FF está dado por:

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

Para el panel utilizado en la investigación, puede establecerse que su FF es:

$$FF = \frac{17.2V \times 4.95A}{21.6V \times 5.37A} = 0.734$$

Una vez registrados los valores de V_{oc} a diferentes temperaturas de panel en diferentes días, se procedió a construir una gráfica de convergencia teniendo en cuenta que los valores V_{oc} obtenidos son a

diferentes valores de radiación. Se obtuvieron gráficas con dos parámetros V_{oc} : sin enfriamiento y con enfriamiento, las cuales se presentan en las figuras 8 y 9 respectivamente.

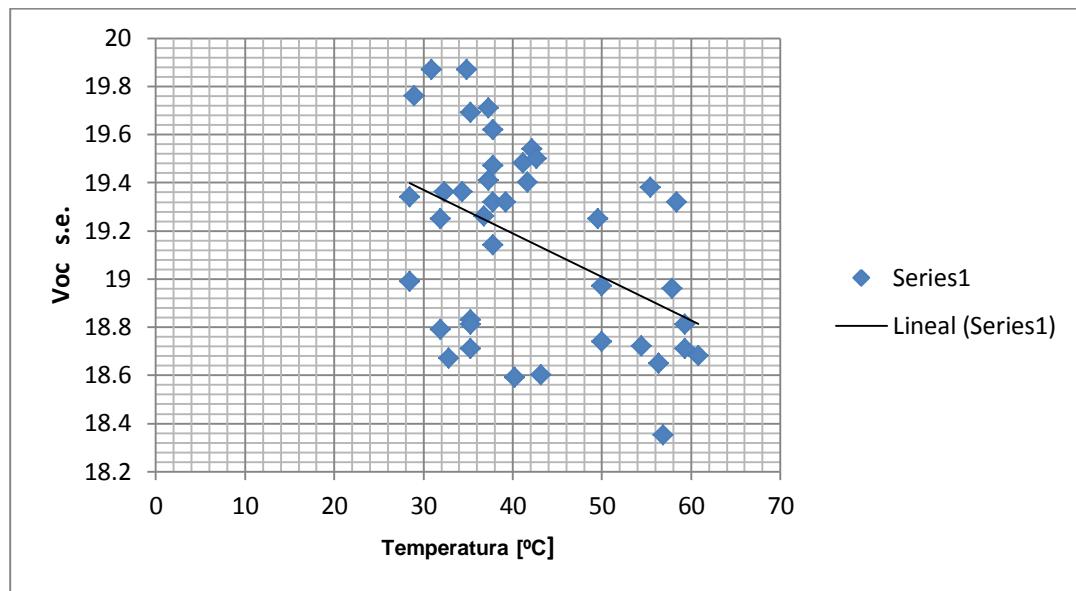


Fig. 8. Relación V_{oc} con la Temperatura del Panel sin enfriamiento.

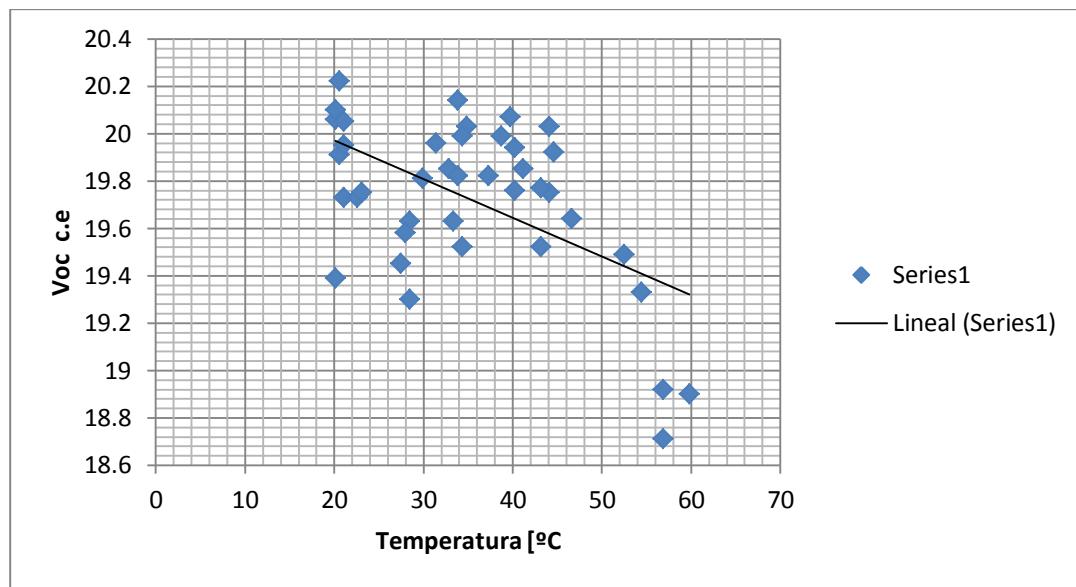


Fig. 9. Relación V_{oc} con la Temperatura del Panel con sistema de enfriamiento.

Ya contando con el V_{oc} y el I_{sc} (obtenido en un proceso no destructivo) podemos evaluar los valores de eficiencia. En la Figura 10 se muestran los resultados de la manera en que disminuye la eficiencia del panel fotovoltaico a medida que aumenta la temperatura, pero se observa una menor pendiente si el panel es enfriado. La eficiencia, por su parte, también aumenta con el enfriamiento para un valor de radiación alto.

Conclusiones

Con temperaturas de entrada de 24°C, el intercambiador de calor logró reducir las temperaturas de operación del panel solar un promedio de 12°C, aunque incluso así se mantiene lejos de la temperatura nominal de 25°C de operación para su máxima eficiencia.

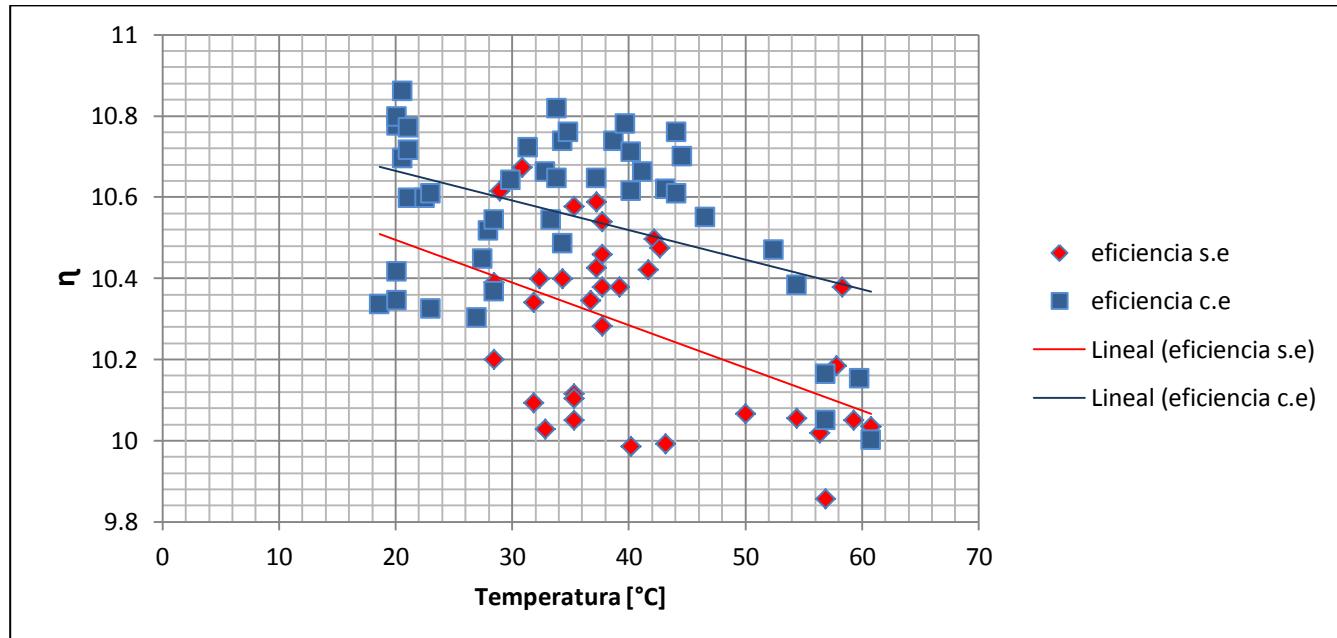


Fig. 10. Comparación del comportamiento de la eficiencia de panel fotovoltaico con enfriamiento y sin enfriamiento.

La posibilidad real de obtener mejores temperaturas geotérmicas a mayor profundidad y mejores conductividades en el subsuelo alientan a continuar en la investigación.

Se puede obtener una mejoría de hasta en un 5% en la eficiencia del panel solar al enfriarlo con el uso de energía geotérmica, y también se puede obtener hasta un 25% más energía producida.

Referencias

- Foster, R., et al., 2010. *Solar Energy – Renewable Energy and the Environment*. CRC Press, 2010.
- Hu, C., 1983. *Solar cells - From Basics to Advanced Systems*. University of California, Berkeley.
- Ibáñez, M. y J.R. Rosell, 2004. *Tecnología Solar*. Grupo Mundi Prensa, 2004.
- Krauter, S.C.W., 2004. Development of an integrated solar home system. *UECE, Departamento de Física*, Grupo de Energías Alternativas, Campus Itaperi, Fortaleza 60740-000 CE, Brasil.
- Krauter, S., et al., 1999. Combined photovoltaic and solar thermal systems for facade integration and building insulation. *Programa de Pos-graduação de Engenharia da Universidad Federal do Rio de Janeiro*, Brasil, e Institute for Electrical Energy Systems, Berlin, Germany.
- Russell, R.F., 1982. *Uniform temperature heat pipe and method of using the same*. Patent US4320246, 1982, USA.

Wilson, E., 2008. Theoretical and operational thermal performance of a ‘wet’ crystalline silicon PV module under Jamaican conditions. *School of Engineering, University of Technology*, West Indies, Jamaica.

Zakharchenko, R., et al., 2004. Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system. *Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro*, e Instituto Tecnológico del Istmo, Depto. de Ingeniería Electromecánica, Oaxaca, México.