



Diseño y evaluación de un panel solar fotovoltaico y térmico para poblaciones dispersas en regiones de gran amplitud térmica

Design and evaluation of a photovoltaic and thermal solar panel for dispersed populations in regions of large temperature range

Cabezas-Maslanczuk Marcelo Daniel

Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa
Departamento de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables
Correo: mdcabezas@gmail.com

Franco-Brazes Juan Isidro

Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa
Departamento de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables
Correo: jfranco@citedef.gob.ar

Fasoli-Tolosa Héctor José

Facultad de Ingeniería del Ejército (Escuela Superior Técnica)
Universidad Nacional de la Defensa, Laboratorio de Hidrógeno
Correo: hfasoli@yahoo.com

Resumen

Se presenta la evaluación de un panel solar diseñado para proveer energía eléctrica y agua caliente en regiones de buena insolación y gran amplitud térmica (clima continental, zonas de altura). El dispositivo propuesto es un panel que actúa a la vez como fotovoltaico y térmico, el que se construye colocando una capa de agua por encima de las celdas solares fotovoltaicas ("matriz fotovoltaica" construida modificando paneles fotovoltaicos comerciales). El agua actúa como refrigerante de las celdas reduciendo las pérdidas en la generación eléctrica producidas por el incremento de la temperatura del panel. Se aprovecha además la complementariedad en cuanto a absorción de energía de las celdas fotovoltaicas y el agua. De este modo es posible proveer electricidad y agua caliente en un dispositivo único, para uso doméstico en regiones de difícil llegada de las redes de provisión de energía, con poblaciones dispersas (no concentradas), ya sea para consumo familiar, puestos de vigilancia, de guardaparques, tanto para instalaciones fijas como portátiles. Se presentan los fundamentos teóricos y los resultados obtenidos con un prototipo de laboratorio instalado en Buenos Aires. Estos resultados se correspondieron con los predichos en los fundamentos teóricos, obteniéndose además de agua caliente, una importante mejora en el rendimiento fotovoltaico. La combinación de ambos efectos conduce a un mejor aprovechamiento del recurso solar.

Descriptores: Formas renovables de energía, energía solar, panel solar fotovoltaico y térmico.

Abstract

The evaluation of a solar panel designed to provide electricity and hot water in regions of high insolation and high thermal amplitude (continental climate, high altitudes) is presented. The proposed device is a panel that acts both as photovoltaic and thermal, which is constructed by placing a layer of water above a modified array of commercial photovoltaic solar cells. The water acts as a coolant of the cells reducing losses in the power generation produced by the increase in panel temperature. The fact that the absorption spectra of water and photovoltaic panels are complementary is an advantage for this design. Thus it is possible to provide electricity and hot water in a single device, for household use in regions far from the electric network, with dispersed populations (not concentrated); the system can be useful for fixed or mobile installations not only for family use but also for rural schools, border crossing points guards, etc. The theoretical foundations and the results obtained with a laboratory prototype installed in Buenos Aires are presented. The results were consistent with those predicted in the theoretical foundations: a significant improvement in the photovoltaic panel performance is also obtained in addition to the expected production of hot water. The combination of both effects leads to a better utilization of the solar resource.

Keywords: Renewable energy, solar energy, thermal and photovoltaic solar panel.

INTRODUCCIÓN

Es bien conocida la necesidad de incrementar la utilización de energías renovables y limpias en todo el mundo, complementándola con el uso racional del recurso; la bibliografía es especialmente abundante en los últimos años (Alstone *et al.*, 2015; Pillai y Banerjee, 2009; Erisman *et al.*, 2015; Yan *et al.*, 2013; García, 2013; Yan *et al.*, 2014a y b; Ahuja, 2008; Meier, 2014; Hauser *et al.*, 2014).

Existen vastas regiones en la Argentina y en el mundo con baja densidad de población donde se hace muy difícil proveer energía a través de las redes de distribución. En muchos casos, se trata de territorios montañosos o semidesérticos, de clima continental con mucha insolación (aún en invierno) y de gran amplitud térmica diaria y estacional. En particular, para estos casos, se hace imprescindible disponer de un sistema sencillo de conversión de energía solar para provisión de electricidad y agua caliente para uso doméstico (Pillai y Banerjee, 2009; García, 2013; Ahuja, 2008).

Desde hace muchos años son bien conocidos y comercializados los sistemas solares de calentamiento de agua (Colangelo *et al.*, 2016; Energy Saving Trust Uk y US; Bataineh, 2016; Li *et al.*, 2016; Hassanien *et al.*, 2016; Arthur y Karim, 2016; Teodorescu y Vartires, 2016); continuamente se dan a conocer nuevos prototipos de construcción relativamente sencilla y económica (Colangelo *et al.*, 2016; Energy Saving Trust Uk y US). En los últimos tiempos, se han instalado sistemas solares tanto fotovoltaicos como térmicos para provisión independiente de energía eléctrica y agua caliente en casas y escuelas rurales de nuestro país (Argentina) (Proyecto PERMER; Pueblos solares Andinos). Ambos sistemas resultan útiles y colaboran para dar solución a la problemática del aislamiento energético mencionado.

Sin embargo, los sistemas fotovoltaicos comerciales actuales (basados en celdas de silicio amorfo, policristalino o monocristalino) garantizan conversiones en el rango de 10 a 26% donde los de 15-16% (policristalinos) son ampliamente difundidos y accesibles para usos no especializados (Parida *et al.*, 2011; Semonin *et al.*, 2012; Solar Efficiency limits; Razykov *et al.*, 2011; Acevedo, 1996; Green *et al.*, 2016); estos valores están determinados por la energía necesaria de los fotones incidentes para pasar electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción del semiconductor utilizado, fenómeno que permite la obtención de energía eléctrica a partir de la incidencia de ondas electromagnéticas sobre una juntura p-n (Queisser y Shockley, 1961). El resto de la energía radiante que recibe el panel no se aprovecha, pues se refleja y, principalmente, transformada en calor que se disipa a través del propio panel (Semonin *et al.*, 2012; Solar Efficiency

limits). Es un hecho bien conocido que el aumento de temperatura disminuye el rendimiento de las celdas solares (Skoplaki *et al.*, 2008; Skoplaki y Palyvos, 2009a y b). Para evitar este efecto se han realizado numerosos estudios y se han desarrollado dispositivos que proponen reducir la temperatura de los paneles mediante la circulación de agua o aire en distintas configuraciones y, solo eventualmente, aprovechar el calor extraído (Chow, 2008; Panaras *et al.*, 2013; Chow, 2010; Tyagi *et al.*, 2012; Rosa *et al.*, 2011; TESPI, 2008).

Por otra parte, en todo el mundo se estudian materiales, diseños y configuraciones destinados a alcanzar mayor eficiencia de las celdas. Entre estos estudios se destacan la introducción de nuevos materiales orgánicos e inorgánicos y su aplicación en dispositivos de capas múltiples capaces de convertir en electricidad la mayor parte del espectro solar, incluso la radiación próxima a la infrarroja (Parida *et al.*, 2011; Semonin *et al.*, 2012; Razykov *et al.*, 2011; Best Reserch Cell Efficiencies; Landsberg y Markvart 2012; Lewis *et al.*, 1997). Sin embargo, estas mejoras a escala de laboratorio no han contribuido aún al aumento de la eficiencia ya citada de los paneles fotovoltaicos comerciales (Best Reserch Cell Efficiencies; Saga, 2010).

Es sabido que el agua es transparente en la región del espectro solar que las celdas fotovoltaicas (CF) convierten en energía eléctrica y tiene mayor absorción en el infrarrojo, radiación que en el panel solo produce calor, disminuyendo su eficiencia (Skoplaki *et al.*, 2008; Skoplaki y Palyvos, 2009a y b). Sobre esta base proponemos colocar una capa de agua por encima del panel en una cámara sellada que permita su circulación por termosifón (circulación natural). Este complemento produce un doble efecto: aprovecha la energía solar que los paneles desechan y refrigera las celdas mejorando su rendimiento. De este modo, es posible un mejor aprovechamiento del recurso y proveer en un único dispositivo electricidad y agua caliente a poblaciones que, teniendo alta incidencia de radiación solar, no alcanzan la disponibilidad de energía para las necesidades humanas básicas.

En el presente trabajo se propone la utilización de un dispositivo del tipo descrito, y se presenta la evaluación de un prototipo diseñado y construido en nuestro laboratorio. El objetivo es emplearlo en regiones de buena insolación y de bajas temperaturas nocturnas, típicas de altura y regiones continentales, como las del noroeste de la Argentina (NOA). Los resultados muestran la factibilidad y ganancia de su utilización en estas condiciones. En las aplicaciones de energías primarias, en particular en este caso, la utilidad de un sistema es absolutamente dependiente de su ubicación geográfica y condiciones ambientales (latitud, amplitud térmica, variables climáticas locales, insolación). También es importante su correcto

dimensionamiento para conseguir el rendimiento y la complementación esperados.

FUNDAMENTOS

La Tabla 1 muestra el salto energético (*band gap*) característico para diversos materiales utilizados en CF de acuerdo con datos conocidos y documentados (Lewis *et al.*, 1997; Saga, 2010; Bücher *et al.*, 1998).

Tabla 1. *Band gap* correspondiente a algunos materiales utilizados en CF

Material	<i>Band gap</i> (eV)
Si cristalino	1,12
Si amorfo	1,75
CdTe	1,45
GaAs	1,42
CdS	2,4

Si ahora se considera la irradiancia espectral solar a nivel terrestre (según ASTM G173-03 Reference Spectra Derived from SMARTS v. 2.9.2) que se observa en la Figura 1, se comprueba que para un material de *band gap* de 1,5 eV (valor intermedio tomado como referencia entre los de los materiales más usuales citados), correspondiente a una longitud de onda de 827 nm, la energía que podría convertir de ese espectro se encuentra graficada en la Figura 2 (curva de trazo negro, “Absorbible por las celdas fotovoltaicas”). Como puede observarse, la energía convertible por este material crece rápidamente en la zona del espectro visible a partir de los 380 nm hasta alcanzar valores de máximo aprovechamiento hacia el límite con la región del infrarrojo (780 nm). A partir del IR cercano la energía de los fotones resulta insuficiente para arrancar los electrones de la banda de valencia a la de conducción y no es aprovechable por el material para generar transporte de cargas, disipándose en forma de calor. Esto se puede observar en la misma Figura 2, donde se representa el resultado de la diferencia de la energía incidente y la que podría aprovechar el material como “No absorbible por las celdas fotovoltaicas” (curva de trazo gris): tenemos por una parte el exceso de la zona del visible de menor longitud de onda y prácticamente todo el espectro del IR que, como ya se dijo, se disipa principalmente en forma de calor.

Sobre este punto de partida, consideremos ahora la absorción del agua en estado líquido. Según datos de Pope y Fry (1997), Palmer y Williams, 1974; Chaplin; Muaddi y Jamal, 1991; Hollis; Hale y Querry (1973) la absorptividad del agua es mínima en todo el ámbito del espectro visible (380-780 nm) y aumenta hacia la zona del IR y del UV (Figura 2: Coeficiente de absorción del

agua a_w , línea de puntos), en el primer caso por interacción de longitudes de onda larga con niveles vibracionales del agua, y en el segundo, al tener los fotones la energía necesaria para excitar transiciones electrónicas (Mobley, 1994). Queda entonces la “ventana” del espectro visible (entre el UV y el IR) donde ambos fenómenos se minimizan y el agua resulta transparente a la radiación fotovoltaica: el índice de absorción se reduce en hasta 8 órdenes de magnitud, justamente en la zona de mayor aprovechamiento fotovoltaico de los materiales utilizados en paneles comerciales. Es decir, que el agua no solo es “transparente” a la energía útil para las CF sino que absorbe radiación infrarroja que produciría calor bajando el rendimiento de las CF. Por otra parte, el agua también absorbe calor por conducción y convección, lo que contribuye a enfriar el panel (Rosa *et al.*, 2011; TESPI, 2008).

En la Figura 2 se compara entonces la región del espectro solar en el que absorben las CF, la absorptividad del agua para el mismo ámbito de longitudes de onda y el espectro de radiación solar no convertible por las CF. En la región del UV la absorptividad del agua es muy alta, pero la intensidad de la irradiancia espectral solar a nivel terrestre en esa región no es significativa, como se observa en la Figura 1; sin embargo, existe radiación solar incidente en la región del IR cercano, como se ha visto en la Figura 1, que, de no ser captada por el agua, se transformaría en calor en el panel (lo mismo ocurre con el exceso de energía de los fotones por sobre el *band gap* del material). El agua, como se observa en la Figura 2, no resulta una barrera relevante para la radiación que se convierte en energía eléctrica en las CF.

De acuerdo con lo dicho, una capa de agua sobre el panel solar puede cumplir la doble función de:

- 1) Aprovechar la energía solar que no puede convertirse en electricidad, utilizándola como energía térmica.
- 2) Refrigerar el panel solar fotovoltaico mejorando el rendimiento fotovoltaico.

PARTE EXPERIMENTAL

Se emplearon cuatro paneles solares fotovoltaicos comerciales de igual marca (Solartec), modelo (KS-3T 3W) y serie de fabricación; a todos se les comprobó experimentalmente la homogeneidad de respuesta, que nunca superó la diferencia de 3% entre ellos. Para esta determinación, se obtuvo la potencia entregada por los módulos a distintas irradiancias midiendo la caída de potencial sobre una carga resistiva; de este modo se pudo establecer una correlación entre la irradiancia so-

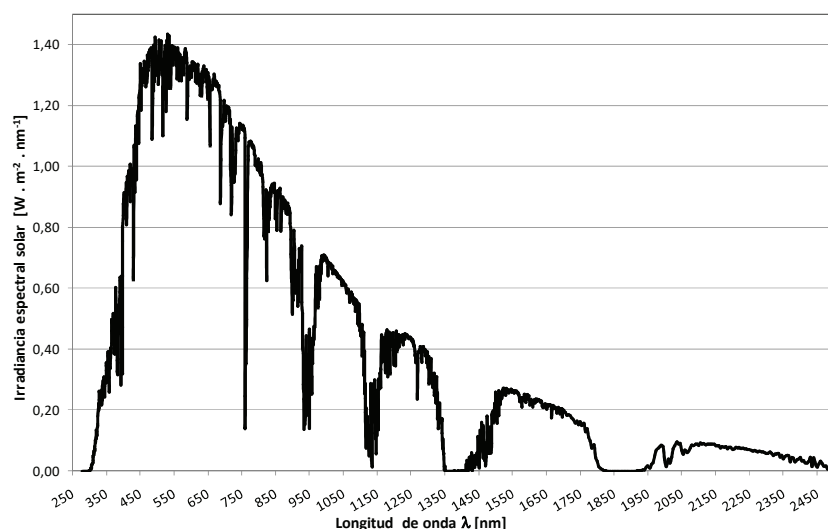


Figura 1. Irradiancia espectral solar de referencia a nivel terrestre (ASTM G173-03 Reference Spectra Derived from SMARTS v. 2.9.2.)

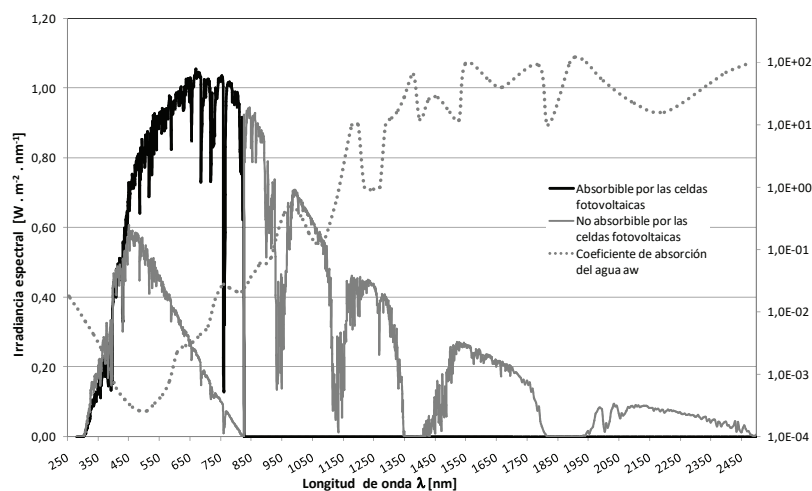


Figura 2. Superposición de las componentes absorbible y disipada de la irradiancia espectral solar a nivel terrestre con el coeficiente de absorción del agua (en escala logarítmica, eje secundario) (Pope y Fry, 1997; Palmer y Williams, 1974; Chaplin; Muaddi y Jamal, 1991; Hollis; Hale y Querry 1973; Mobley, 1994). Se observa que el agua es transparente en el intervalo de la radiación utilizable por las CF, principalmente en el espectro visible (380-780nm)

lar y la potencia obtenida; esto permitió calcular la irradiancia total incidente en cada instante en que se midió la potencia entregada por los paneles durante toda la experiencia (Cabezas *et al.*, 2014).

Los paneles se agruparon en dos pares, a manera de obtener la respuesta más homogénea entre los dos conjuntos.

Con cada par se conformó entonces un panel doble; uno de los pares se destinó a la construcción del prototipo de Panel Solar Térmico (PST, PVT) objeto de este trabajo; el otro par de paneles se empleó como Panel Solar de Referencia (PSR, PVR).

El esquema de la modificación realizada al panel fotovoltaico para incluir la etapa térmica se muestra en la Figura 3. Para construir las paredes laterales se cortaron cuatro piezas de acrílico, las que se montaron sobre el par de paneles con el propósito de construir una cámara aislada del exterior mediante un segundo vidrio de

características idénticas a las de la cubierta original del panel. A dos de las piezas laterales de acrílico se les practicaron agujeros roscados para colocar conectores a tubos flexibles que permitan la circulación del agua adentro de la cámara. El PST construido y el sistema de evaluación completo utilizado se observa en la fotografía de la Figura 3.

ETAPA TÉRMICA

El esquema de la etapa térmica del dispositivo propuesto se muestra en la Figura 4. Por claridad no se incluye el circuito eléctrico que puede consistir tanto en un adaptador para carga de acumuladores y acondicionamiento de la energía fotovoltaica para el consumo, como en un equipo de acumulación por vector hidrógeno, aplicando el excedente de energía eléctrica a un sistema de electrólisis y acumulando el combustible en

depósitos de baja presión. El primer método es el convencional, en tanto que el segundo aún se desarrolla en el laboratorio, complementando el sistema con una batería de tipo PEM para la conversión en energía eléctrica de la energía almacenada en el combustible hidrógeno, lo que permite su utilización en ausencia de la fuente primaria (luz solar) (Cabezas *et al.*, 2014).

El sistema instrumentado en este trabajo como una mejora de costo bajo y mantenimiento sencillo consiste en conectar el dispositivo a un acumulador de agua caliente de la manera que se muestra en la Figura 4; el agua circula por termosifón entre el panel fotovoltaico y térmico (PVT) y el tanque de almacenamiento. La capacidad máxima del tanque de almacenamiento es de 10,0 dm³; el volumen total de agua empleado en este trabajo es de 11,8 dm³ (capacidad de la cámara del PST: 1,8 dm³). Esta configuración, con el agregado de una válvula antirretorno, constituye un esquema básico aplicable a un prototipo funcional.

SISTEMA DE EVALUACIÓN

El conjunto preparado para la evaluación de desempeño, basado en el esquema de la Figura 4, se instaló en una ubicación libre de sombras. Junto al PST se colocó el PSR, montado sobre un único bastidor. Tanto el circuito de agua como los tanques de reserva se aislaron para evitar pérdidas de calor.

Las potencias entregadas por ambos sistemas fotovoltaicos se obtuvieron por medio de dos *EL-USB-3 Lascar Electronics Data Loggers*. Las temperaturas superior e inferior de los tanques de agua se registraron con dos *EL-USB-TC Lascar Electronic (thermocouple) Data Loggers*.

Se realizaron evaluaciones entre el 15 de julio y el 30 de septiembre (invierno) de 2014 en Buenos Aires (BA). Durante estos meses, si bien la insolación no es la óptima en BA, se reproducen las condiciones de operación de base previstas para el dispositivo (buena insolación durante el día y bajas temperaturas nocturnas), quizás con cierta desventaja considerando la irradiancia solar incidente limitada y la amplitud térmica diaria moderada. BA en invierno resulta entonces una buena latitud de referencia para caracterizar el dispositivo.

Se realizaron mediciones de potencia fotovoltaica del PST y del PSR con una frecuencia de un registro por minuto.

Para la evaluación térmica del panel se midieron las temperaturas de entrada y salida de agua de los tanques de reserva con la misma frecuencia (una muestra por minuto) día y noche durante todo el período de evaluación.

Como se dijo, el agua circula en forma natural por efecto termosifón. Las evaluaciones se realizaron sin quita-reposición de agua de los depósitos (sistema cerrado). Se permitió además la circulación del agua en

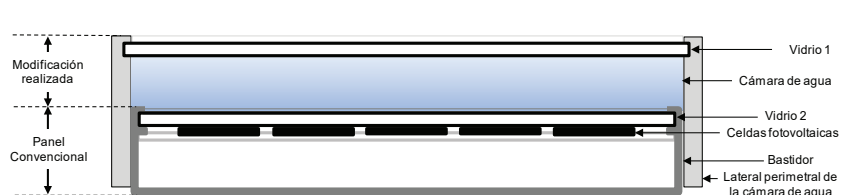


Figura 3. Corte esquemático y fotografía del PST. El espesor de la capa de agua es de 2 cm

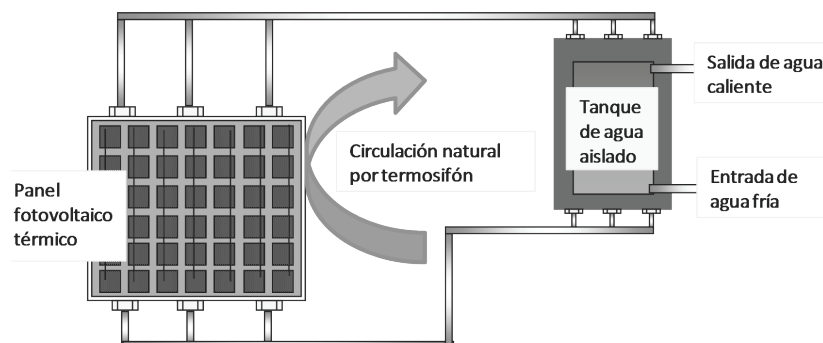


Figura 4. Esquema de la etapa térmica del sistema utilizado, el agua circula por termosifón por encima de las celdas y se acumula en un tanque aislado térmicamente

forma inversa (termosifón inverso); este proceso ocurre durante la noche y prepara al dispositivo para funcionar en forma directa desde la mañana del día siguiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA

La evolución de los registros de potencia fotovoltaica del PVT y del PVR obtenidos durante los meses en que se realizó la evaluación se presenta en las Figuras 5 y 6.

La Figura 5 muestra la potencia por unidad de área entregada por el PVT “en vacío” (sin agua) y el PVR entre los días 16 de julio (16-07) y 5 de agosto (05-08) de 2014: se observa la similitud de ambos perfiles; el nivel de correlación en energía total de cada sistema resultó además excelente.

Aun cuando puede observarse que algunas potencias máximas diarias del PVT en vacío resultan algo mayores que las del PVR, el resultado de la integración de las curvas (energía) muestra que esas diferencias se compensan con la mayor respuesta del PVR a lo largo de cada día. Estas pequeñas diferencias en la distribución de la densidad de potencia pueden atribuirse al apantallamiento parcial durante las primeras y últimas horas del día y a cambios en la refracción o reflexión del haz incidente por el agregado del sistema térmico. En nuestro caso, el interés se centra en la energía total obtenida de los dispositivos. No obstante, resulta una interesante propuesta de trabajo futuro el estudio específico y sistemático de la distribución de densidades de potencias, para determinar el origen de estas pequeñas variaciones, lo que podría realizarse mediante el control y cambios precisos de las variables mencionadas.

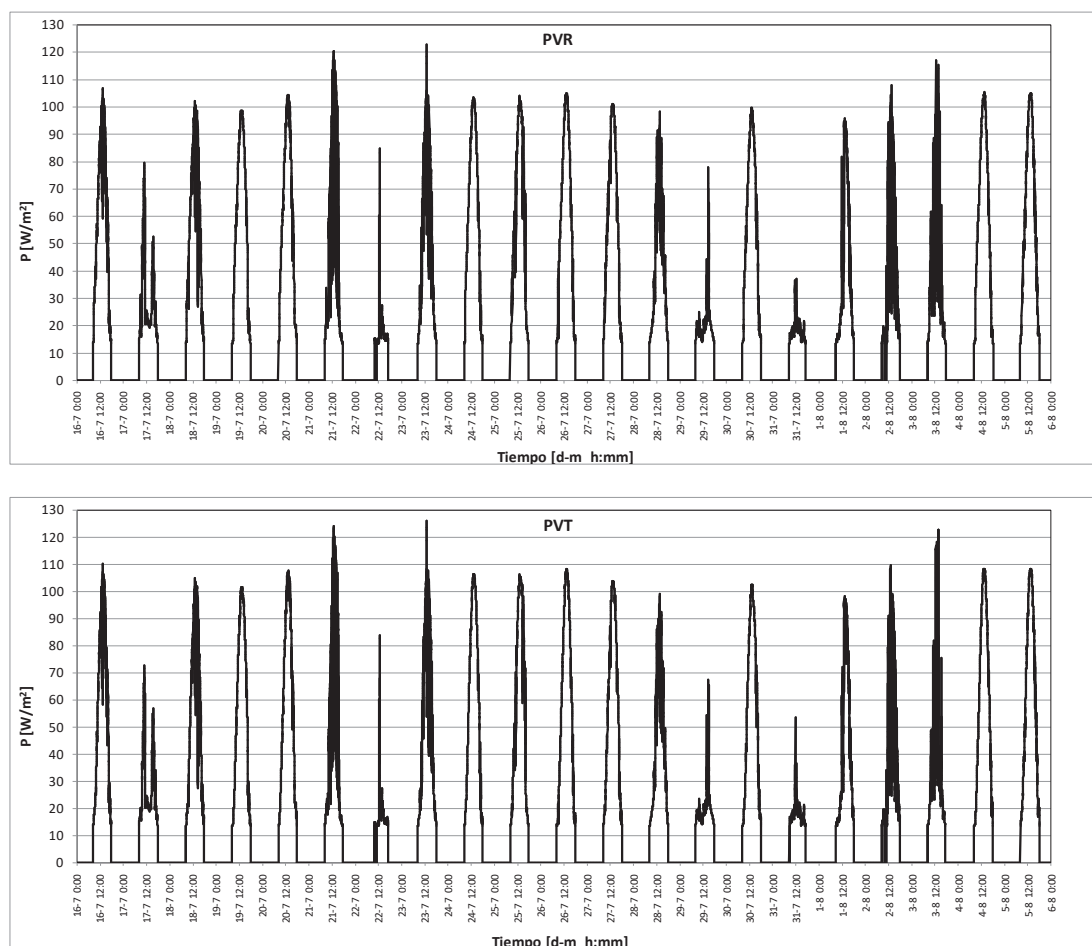


Figura 5. Registros de potencias fotovoltaicas (expresadas por unidad de área) para el PVR (sistema de referencia) y el PVT (sistema propuesto evaluado) sin agua, realizados para verificar la equivalencia en respuesta de ambos sistemas. Solo se consideran los valores por encima de 5% de la potencia nominal

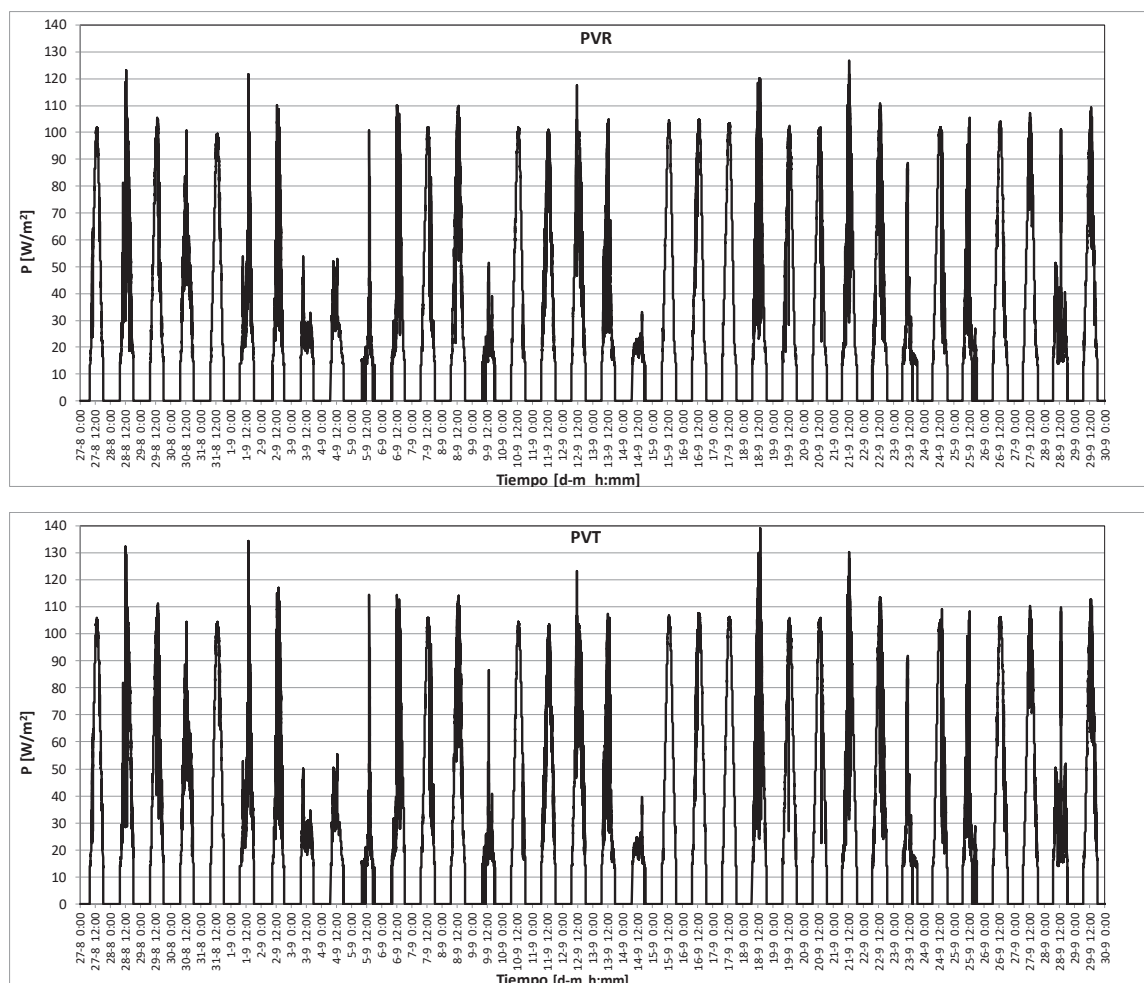


Figura 6. Resultados de las evaluaciones de respuesta fotovoltaica (potencia por unidad de área de panel) de los sistemas PVR y PVT en pleno funcionamiento del sistema de calentamiento de agua. Solo se consideran los valores por encima de 5% de la potencia nominal

Tras un breve período de mediciones discontinuas en el que se hicieron pruebas y ajustes, se iniciaron las determinaciones comparativas con el PVT con agua.

En la Figura 6 se muestran los resultados del comportamiento fotovoltaico del PST en funcionamiento con circulación con agua por termosifón entre el 27-08 y el 29-09; se presenta también el comportamiento del PSR entre los mismos días. Como es de esperar, las curvas muestran perfiles semejantes, pero la integración de las potencias en el tiempo (energía) pone en evidencia la ganancia del PST.

Los resultados para los sistemas PST y PSR resultan prácticamente equivalentes cuando el PST funciona vacío, donde la energía fotovoltaica se suministra por este, algo menor que la que se obtiene con el PSR. Con la etapa térmica del PST en funcionamiento con agua se

observa el aumento de su respuesta fotovoltaica en todos los casos (en torno a 10%) inclusive durante los días en que se registró discontinuidad del sistema de circulación (entre el 08-08 y el 20-08).

En el gráfico de la Figura 7 se observan claramente los “cruces” en las respuestas de los sistemas PST y PSR debidos al agregado o no de la etapa térmica (para mayor claridad se incluyen solamente los días con registros de densidad de energía total mayor que 500 Wh/m²).

Las diferencias en la ganancia dependen de distintos factores como la nubosidad y su distribución horaria, pero principalmente de las diferencias de temperatura que son objeto del análisis que se realiza a continuación.

EVALUACIÓN DE LA ENERGÍA TÉRMICA

La Figura 8 muestra las temperaturas superior e inferior (de entrada y salida, respectivamente, funcionando en termosifón directo) del agua de los tanques de reserva entre el 27-08 y el 30-09. Se aprovecha el termosifón inverso durante la noche para enfriar el agua y preparar así la experiencia del día siguiente.

Al comenzar una evaluación, las temperaturas superior e inferior se encuentran prácticamente iguales. Al incidir la radiación solar, aumenta la temperatura superior manteniéndose la inercia de la inferior debido a la temperatura inicial del gran volumen de agua del depósito, lo que pone en evidencia el buen funcionamiento del termosifón.

Al alcanzarse el máximo registro en la termocupla superior (normalmente en días soleados al mediodía) y comenzar a descender, el registro de la termocupla inferior sigue aumentando, circunstancia que señala el

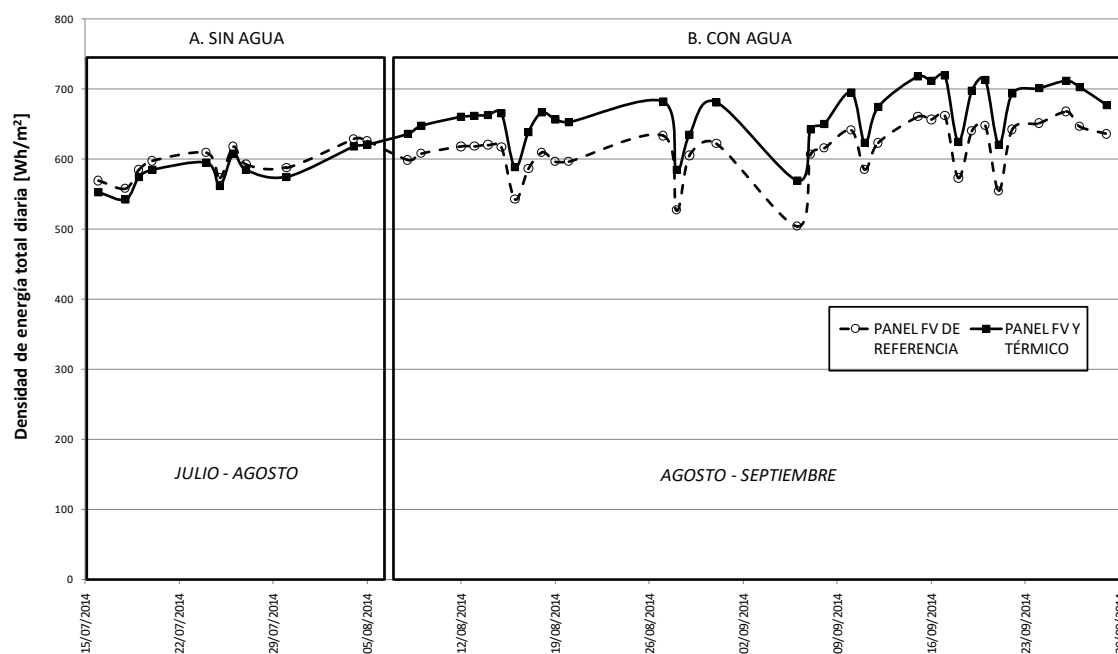


Figura 7. Densidades de energía diarias calculadas por integración de las potencias registradas. Se muestran los resultados para los días con valores superiores a los 500 Wh/m²

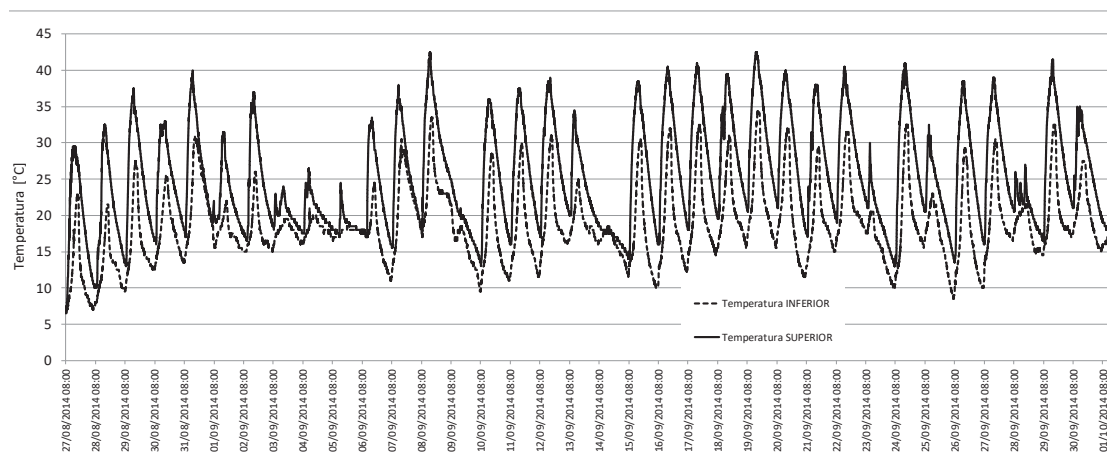


Figura 8. Registros de las temperaturas del agua a la entrada de los depósitos: Temperatura SUPERIOR y a la salida: Temperatura INFERIOR; considerándose “entrada” y “salida” según el funcionamiento del termosifón en directa

comienzo de funcionamiento a la inversa. Es de notar que sin consumo-reposición resulta una situación desfavorable, pero permite cuantificar un total de energía térmica (también eléctrica) en las circunstancias más desfavorables posibles.

La temperatura máxima registrada por el *datalogger* superior y la temperatura que en ese momento registra el *datalogger* inferior se promediaron para obtener la temperatura máxima de referencia. De hecho, los promedios de las temperaturas consideran un valor medio aceptable de la temperatura del agua minuto a minuto y se representan en la Figura 9, aunque a los efectos de cuantificar la energía térmica total solo se utilizarán el

máximo citado y el promedio de los mínimos que, como también se ha dicho, son prácticamente iguales. De estos resultados se obtiene que para días soleados, en las condiciones de evaluación, es posible elevar entre 15 y 20°C la temperatura de 130 litros de agua por día por metro cuadrado de panel.

INTEGRACIÓN DE LOS RESULTADOS FOTOVOLTAICOS Y TÉRMICOS

Los resultados integrados del período evaluado se muestran en la Figura 10. Se observa que en todos los casos la energía fotovoltaica entregada por el panel fotovoltaico modificado es superior, y se obtiene energía

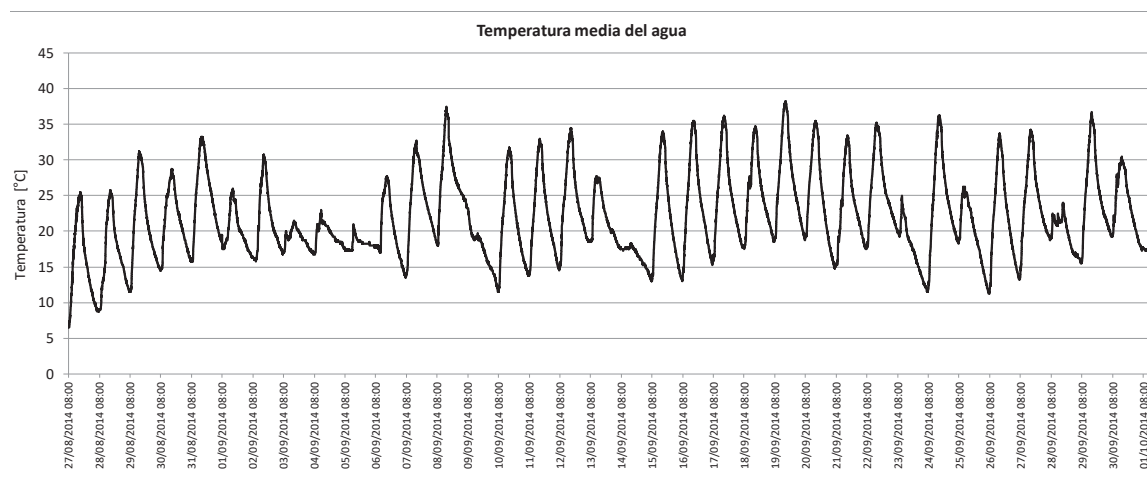


Figura 9. Temperaturas medias del agua calculadas para el período evaluado

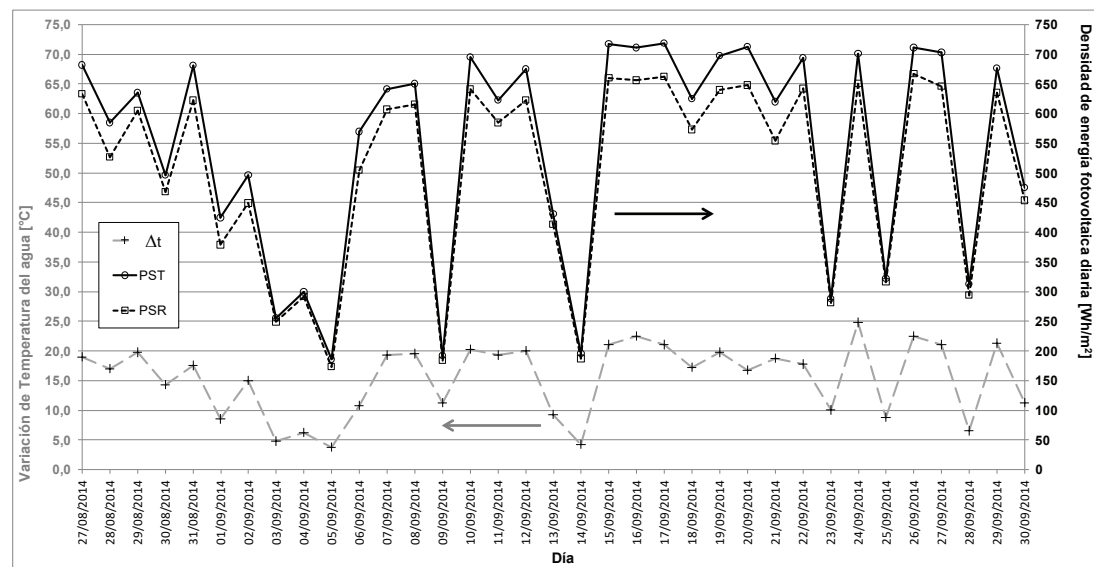


Figura 10. Cuadro comparativo de respuestas fotovoltaicas de ambos sistemas PST y PSR y térmica de este último (Δt = variación de temperatura), para días con diversa intensidad de radiación solar. Solo se representan los días de correcto funcionamiento del termosifón

térmica adicional, aunque en los días de baja irradiancia ambas mejoras resultan poco significativas.

Como se ha dicho, la aplicación de este sistema está prevista para regiones de buena irradiancia y gran amplitud térmica.

Una salvedad acerca de la amplitud térmica y temperaturas mínimas es que, de acuerdo con las características de la región, se debe dimensionar la cámara y los depósitos para evitar que el agua se caliente por encima de 60°C, en desmedro del rendimiento fotovoltaico. Si bien se trata de características de cuidado en el dimensionamiento de cualquier sistema de captura de energías primarias, esto es de especial importancia en esta instalación.

Realizando una selección de días representativos de las condiciones previstas para la instalación del sistema, en la Figura 11 se observa claramente la efectividad del dispositivo para la mejora energética complementaria. Esta mejora puede ser mucho mayor en el NOA debido a que en esa región la irradiancia y la amplitud térmica entre el día y la noche son mayores que en BA.

Tomando como referencia un rendimiento fotovoltaico de 12% para los módulos utilizados es posible estimar la energía solar total incidente sobre los paneles. Por otra parte, mediante los registros de variación de temperatura del agua se puede calcular la energía solar utilizada para este proceso de calentamiento. Sobre esta base, el promedio de las energías térmicas obtenidas para los días representados en la Figura 11 es de 58% de

la energía solar incidente, lo que totaliza un aprovechamiento de 70% del total de la energía solar recibida.

CONCLUSIONES

El sistema propuesto ha demostrado tanto en teoría como en la práctica su capacidad de proveer agua caliente y energía eléctrica en forma simultánea en lugares con considerable amplitud térmica entre el día y la noche.

Con un correcto dimensionamiento (depósitos de agua, volumen y espesor de la cámara), de acuerdo con las condiciones del clima de la zona de instalación, el sistema mejora el rendimiento fotovoltaico.

El dispositivo propuesto mejora el rendimiento de la captura de energía solar por unidad de área, satisfaciendo mediante la producción de electricidad y agua caliente necesidades básicas de los usuarios.

El sistema aquí propuesto se concibe para instalaciones domésticas y de pequeños establecimientos (educativos, puestos de vigilancia, de pequeños productores, etcétera).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Taller de Prototipos del Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF) por el apoyo brindado en la fabricación de los prototipos y al Ministerio de Defensa por los subsidios PIDDEF 21/11 y 22/11.

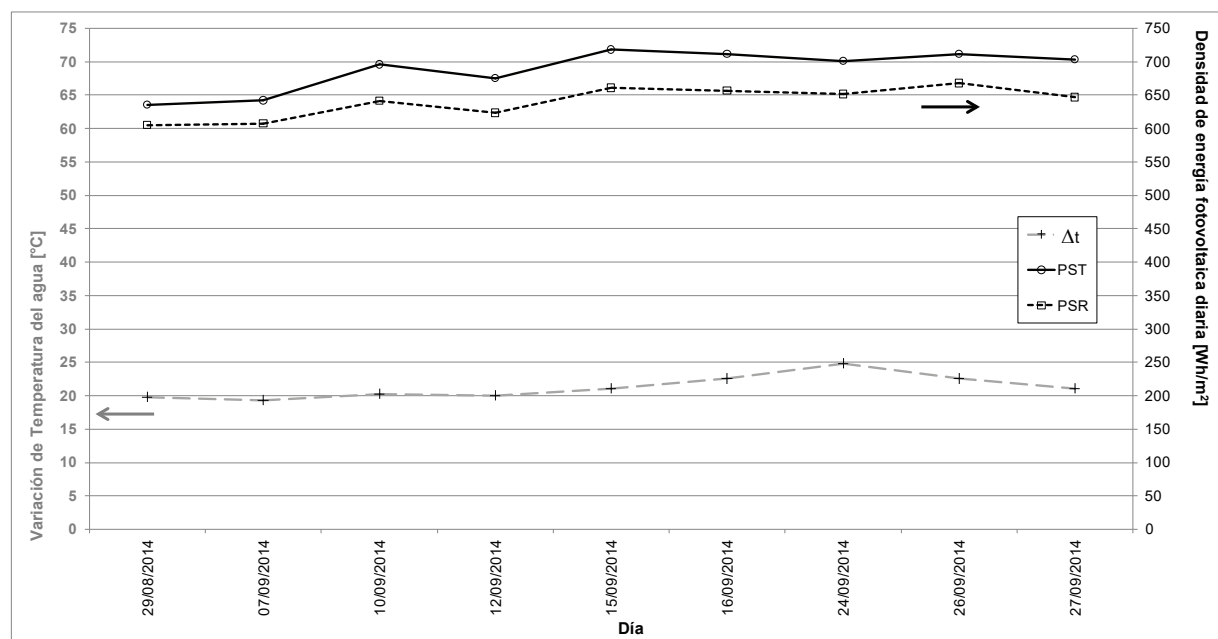


Figura 11. Selección de días representativos de las condiciones previstas para la instalación del dispositivo (densidad de energía fotovoltaica capturada diaria mayor a 600 Wh/m²)

REFERENCIAS

- Ahuja D. People Power. *Nature*, volumen 456, 2008: 25, ISSN: 0028-0836 [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/twas08.25a>
<http://www.nature.com/nature/journal/v456/n1s/full/twas08.25a.html>
- Acevedo A. Límites para la máxima eficiencia de celdas solares de silicio: efectos debidos a la generación Auger y a niveles profundos. *Revista Mexicana de Física*, volumen 42 (número 3), 1996: 449-458 [en línea]. Disponible en: http://rmf.smf.mx/pdf/rmf/42/3/42_3_449.pdf
- Alstone P., Gershenson D., Kammen D.M. Decentralized energy systems for clean electricity Access. *Nature Clim. Change*, volumen 5 (número 4), 2015: 305-14. ISSN 1758-678X [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2512><http://www.nature.com/nclimate/journal/v5/n4/full/nclimate2512.html>
- Arthur O. y Karim M. An investigation into the thermophysical and rheological properties of nanofluids for solar thermal applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volumen 55, 2016: 739-755, ISSN 1364-0321 [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.065><http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115011442>
- Bataineh K. Optimization analysis of solar thermal water pump. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volumen 55, 2016: 603-613, ISSN 1364-0321 [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.146><http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115012253>
- Best Research Cell Efficiencies. National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy [en línea]. Disponible en: http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
- Bücher K., Kleiss G., Dätzner D. Photovoltaic modules in buildings: Performance and safety. *Renewable Energy*, volumen 15 (números 1-4), 1998: 545-551, ISSN 0960-1481, doi:10.1016/S0960-1481(98)00222-5
- Cabezas M., Hawryluk J., Franco J., Fasoli H. A simple and inexpensive method for evaluating the photovoltaic potential: Its validation in Buenos Aires and Antarctica. *Journal of Solar Energy*, Artículo ID 8019083, 2016: 8, doi:10.1155/2016/8019083
- Cabezas M., Frak A., Sanguinetti A., Franco J., Fasoli H. Hydrogen energy vector: Demonstration pilot plant with minimal peripheral equipment. *International Journal of Hydrogen Energy*, volumen 39 (número 32), 2014: 18165-18172, ISSN 0360-3199 [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.09.040><http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319914025610>
- Chaplin M. Water Absorption Spectrum, publicación web de la London South Bank University [en línea]. Disponible en: <http://www.lsbu.ac.uk/water/vibrat.html>
- Chow T., He W., Chan A., Fong K., Lin Z., Ji J. Computer modeling and experimental validation of a building-integrated photovoltaic and water heating system. *Applied Thermal Engineering*, volumen 28, (números 11-12), 2008: 1356-1364, ISSN 1359-4311, doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.10.007
- Chow T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, volumen 87 (número 2), 2010: 365-379, ISSN 0306-2619, doi:10.1016/j.apenergy.2009.06.037
- Colangelo G., Favale E., Miglietta P., de Risi A. Innovation in flat solar thermal collectors: A review of the last ten years experimental results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volumen 57, 2016: 1141-1159, ISSN 1364-0321 [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.142><http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115015257>
- Energy Saving Trust, UK [en línea]. Disponible en: <http://www.energysavingtrust.org.uk/domestic/solar-water-heating>
- Energy Saver, U.S. Department of Energy, Washington, USA [en línea]. Disponible en: <http://energy.gov/energysaver/solar-water-heaters>
- Erisman J., Brasseur G., Ciais P., Van-Eekeren N., Theis T. Global change: Put people at the centre of global risk management. *Nature*, volumen 519, 2015: 151-153 [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/519151a>
<http://www.nature.com/news/global-change-put-people-at-the-centre-of-global-risk-management-1.17066>
- García-Rodríguez E. World Energy Insight 2013. World Energy Council, First, London, 2013 [en línea]. Disponible en: <http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/11/WEI2013.pdf>
- Green M., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E. Solar cell efficiency tables (versión 48). Prog. Photovolt: Res. Appl. volumen 24, 2016: 905-913, doi: 10.1002/pip.2788.
- Hale G. y Querry M. Optical constants of water in the 200nm to 200um wavelength region. *Applied Optics*, volumen 12, 1973: 555-563. doi: 10.1364/AO.12.000555 [en línea]. Disponible en: https://www.osapublishing.org/view_article.cfm?gotourl=https%3A%2F%2Fwww%2Eosapublishing%2Eorg%2FDirectPDFAccess%2FA528CDFC-D0CC-4063-4D5D9A84B2E2968D_17737%2Fao-12-3-555%2Epdf%3Fda%3D1%26id%3D17737%26seq%3D0%26mobile%3Dno&org=
- Hassanien R., Hassanien E., Li M., Lin W. Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volumen 54, 2016: 989-1001, ISSN 1364-0321 [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.095><http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115011740>
- Hauser O., Rand D., Peysakhovich A., Nowak M. Cooperating with the future. *Nature*, volumen 511, 2014: 220-223, ISSN: 0028-0836 [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/nature13530>
<http://www.nature.com/nature/journal/v511/n7508/full/nature13530.html>
- Hollis V. Thesis Chapter 5: Characterisation of the NIR Water Absorption Spectrum, University College London (UCL), Department of medical physics and bioengineering, faculty of

- engineering sciences [en línea]. Disponible en: <http://www.medphys.ucl.ac.uk/research/borl/homepages/veronica/thesis/chapter5.pdf><http://www.medphys.ucl.ac.uk/research/borl/homepages/veronica/thesis/chapter5.pdf>
- Landsberg P. y Markvart T. *Ideal Efficiencies, Practical Handbook of Photovoltaics*, Chapter 1A-3 -, 2a ed., Academic Press, Boston, 2012, pp. 63-75, ISBN 9780123859341. doi:10.1016/B978-0-12-386964-7.00003-2
- Lewis C., Phillips W., Shields V., Stella P. Multi band gap high efficiency converter (rainbow), Jet Propulsion Laboratory Technical Report, California Institute of Technology, NASA, 1997, N 97228 [en línea]. Disponible en: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/22164/1/97-0625.pdf>
- Li J., Li X., Wang N., Hu Y., Feng R. Experimental research on indoor thermal environment of new rural residence with active solar water heating system and external wall insulation. *Applied Thermal Engineering*, volume 95, 2016: 35-41, ISSN 1359-4311 [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.013><http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111501248X>
- Meier T. Innovative business models and financing mechanisms for PV deployment in emerging regions. International Energy Agency-Photovoltaic Power System Programme (IEA PVPS), 2014, IEA PVPS Task 9, Subtask 5 Report IEA-PVPS T9-14:2014 [en línea]. Disponible en: <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=311>
- Mobley C. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*, Chapter 3: Optical Properties of Water, Academic Press Inc., 1994, pp. 61-142, ISBN 0-12-502750-8 [en línea]. Disponible en: <http://www.oceanopticsbook.info/view/references/publications>
- Muaddi J. y Jamal M. Solar spectrum at depth in water. *Renewable Energy*, volumen 1 (número 1), 1991: 31-35, ISSN 0960-1481, doi:10.1016/0960-1481(91)90100-4
- Palmer K. y Williams D. Optical properties of water in the near infrared, *JOSA (Journal of the Optical Society of América)*, volumen 64 (número 8), 1974: 1107-1110, doi: 10.1364/JOSA.64.001107
- Panaras G., Mathioulakis E., Belessiotis V. Investigation of the performance of a combined solar thermal heat pump hot water system. *Solar Energy*, volumen 93, 2013: 169-182, ISSN 0038-092X, doi:10.1016/j.solener.2013.03.027
- Parida B., Iniyar S., Goic R. A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volumen 15 (número 3), 2011: 1625-1636, ISSN 1364-0321, doi:10.1016/j.rser.2010.11.032
- Pillai I. y Banerjee R. Renewable energy in India: Status and potential. *Energy*, volumen 34 (número 8), 2009: 970-980, ISSN 0360-5442. [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2008.10.016><http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544208002922>
- Pope R. y Fry E. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. *Applied Optics*, volumen 36 (número 33), 1997: 8710-8723, doi: 10.1364/AO.36.008710 [en línea]. Disponible en: https://www.osapublishing.org/view_article.cfm?gotourl=https%3A%2F%2Fwww%2Eosapublishing%2Eorg%2FDirectPDFAccess%2FA49DFE34-9B47-7022-C07746F7864A05FF_63107%2Fao-36-33-8710%2Epdf%3Fda%3D1%26id%3D63107%26seq%3D0%26mobile%3Dno&org=
- Proyecto PERMER, Ministerio de Energía y Minería, Presidencia de la Nación, Argentina [en línea]. Disponible en: <https://www.se.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=1571><https://www.se.gov.ar/permer/http://www.bancomundial.org/projects/P110498/ar-permer-renewable-energy-additional-financing?lang=es>, <http://www.bancomundial.org/projects/P110498/ar-permer-renewable-energy-additional-financing?lang=es&tab=documents&subTab=projectDocuments>
- Pueblos Solares Andinos, Fundación Ecoandina, Argentina [en línea]. Disponible en: <http://www.ecoandina.org/proyectos/proyectos-rurales/pueblos-solares-andinos><http://www.ecoandina.org/blog>, <http://www.ecoandina.org/>
- Queisser H. y Shockley W. Some theoretical aspects of the physics of solar cells, en: Nathan Snyder, Editor(s), *Energy Conversion for Space Power*, Academic Press, 1961, pp. 317-323, ISBN 9780123955609 [en línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123955609500264>
- Razykov T., Ferekides C., Morel D., Stefanakos E., Ullal H., Upadhyaya H. Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, volumen 85 (número 8), 2011: 1580-1608, ISSN 0038-092X, doi:10.1016/j.solener.2010.12.002
- Rosa-Clot M., Rosa-Clot P., Tina G. TESPI: Thermal Electric Solar Panel Integration. *Solar Energy*, volumen 85 (número10), 2011: 2433-2442, ISSN 0038-092X, doi:10.1016/j.solener.2011.07.003
- Semonin O., Luther J., Beard M. Quantum dots for next-generation photovoltaics. *Materials Today*, volumen 15 (número 11), 2012: 508-515, ISSN 1369-7021, doi:10.1016/S1369-7021(12)70220-1
- Skoplaki E., Boudouvis A., Palyvos J. A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, volumen 92 (número11), 2008: 1393-1402, ISSN 0927-0248, doi:10.1016/j.solmat.2008.05.016
- Skoplaki E. y Palyvos J. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy*, volumen 34 (número 1), 2009a: 23-29, ISSN 0960-148, doi:10.1016/j.renene.2008.04.009
- Skoplaki E. y Palyvos J. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, volumen 83 (número 5), 2009b: 614-624, ISSN 0038-092X, doi:10.1016/j.solener.2008.10.008
- Solar Efficiency Limits [en línea]. Disponible en: http://solarcell-central.com/limits_page.html

- Saga T. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production (Review). *NPG Asia Mater*, volumen 2 (número 3), 2010: 96-102, doi:10.1038/asiamat.2010.82
- Teodorescu D. y Vartires A. A Study of the influence of solar panels coupled with thermal systems for a residential building, by applying methods of evaluation as EN 15316-4-3:2014 and TRANSOL. *Energy Procedia*, volumen 85, 2016: 530-538, ISSN 1876-6102 [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.240>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215029057>
- TESPI patent No BO2007A000094 submitted in February 2007 and then extended at european level in 2008.
- Tyagi V., Kaushik S., Tyagi S. Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volumen 16 (número 3), 2012: 1383-1398, ISSN 1364-0321, doi:10.1016/j.rser.2011.12.013
- Yan J., Chou S., Desideri U., Tu S., Jin H. Research, development and innovations for sustainable future energy systems. *Applied Energy*, volumen 112, 2013: 393-395, ISSN 0306-2619. [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.019>
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913006545>
- Yan J., Chou S., Desideri U., Xia X. Innovative and sustainable solutions of clean energy technologies and policies (Part I). *Applied Energy*, volumen 130, 2014a: 447-449, ISSN 0306-2619 153 [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.052>
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914005571>
- Yan J., Chou S., Desideri U., Xia X. Innovative and sustainable solutions of clean energy technologies and policies (Part II). *Applied Energy*, volumen 136, 2014b: 756-758, ISSN 0306-2619 [en línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.078>
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914010265>

Citación sugerida:

Citación estilo Chicago

Cabezas-Maslanczuk, Marcelo Daniel, Juan Isidro Franco-Brazes, Héctor José Fasoli-Tolosa. Diseño y evaluación de un panel solar fotovoltaico y térmico para poblaciones dispersas en regiones de gran amplitud térmica. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIX, 02 (2018): 209-221.

Citación estilo ISO 690

Cabezas-Maslanczuk M.D., Franco-Brazes J.I., Fasoli-Tolosa H.J. Diseño y evaluación de un panel solar fotovoltaico y térmico para poblaciones dispersas en regiones de gran amplitud térmica. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XIX (número 2), abril-junio 2018: 209-221.

SEMBLANZAS DE LOS AUTORES

Marcelo Daniel Cabezas-Maslanczuk. Es analista programador. Se especializó en el diseño y construcción de pilas a combustible de óxido sólido y de electrolito polimérico (PEM) desde 1989. Está a cargo del área de energías renovables e hidrógeno del Departamento de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables del CITEDEF. Desde 2011 trabaja en la integración de energía solar al vector hidrógeno en la Base Esperanza de la Antártida.

Juan Isidro Franco-Brazes. Es doctor en ciencias químicas. Especializado en electroquímica aplicada, desarrolló diversos tipos de pilas de estado sólido. Co-dirige el equipo que en 2007 puso en funcionamiento una pila a combustible hidrógeno PEM con tecnología totalmente argentina en la Base Esperanza de la Antártida. Es director del Departamento de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables del CITEDEF.

Héctor José Fasoli-Tolosa. Es doctor en ciencias químicas. Se especializó en temas ambientales, incluyendo formas renovables de energía y vector hidrógeno. Co-dirige el equipo que en 2007 puso en funcionamiento una pila a combustible hidrógeno PEM con tecnología totalmente argentina en la Base Esperanza de la Antártida. Es director del Laboratorio de Hidrógeno de la Facultad de Ingeniería del Ejército (Universidad de la Defensa Nacional).