

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN DISPOSITIVO PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO DE PANELES FV EN SISTEMAS DE BOMBEO DE AGUA ¹

Ricardo Echazú y Carlos Cadena
INENCO – Instituto UNSa. – CONICET
Universidad Nacional de Salta
Av. Bolivia 5150 – A4408FVY Salta, República Argentina
FAX 54 387 4255489 – e-mail: ricardo.echazu@gmail.com

RESUMEN: El trabajo presenta el diseño y estudio experimental de un sistema para aumentar la eficiencia de paneles fotovoltaicos, mediante enfriamiento con agua, aplicable a sistemas de bombeo. Se construyó un prototipo y se lo ensayó midiendo las variables de operación: Temperaturas representativas, caudal, radiación solar y la respuesta del panel en tensión y corriente. Se presentan los resultados en forma gráfica, mostrando que el sistema alcanza un aumento en la eficiencia de hasta 20 % en el período estudiado. Se concluye que la operación del equipo no ofrece dificultades y que es aplicable para bombeo de agua, especialmente en zonas de clima cálido.

Palabras clave: energía solar, fotovoltaico eficiencia, panel híbrido

INTRODUCCIÓN

Los paneles solares fotovoltaicos convierten la energía radiante que llega del sol en energía eléctrica, la que puede ser transportada hasta el lugar donde se consume, o bien es aprovechada in situ. En este último caso, los sistemas se conocen como dispersos o descentralizados y dentro de esta categoría ocupan un lugar de importancia los de extracción de agua del subsuelo con bombas accionadas por motores eléctricos conectados a sistemas solares fotovoltaicos, conocidos sencillamente como “bombeo FV”.

En estos sistemas, habitualmente el agua se extrae de un pozo por medio de una bomba sumergida conectada al sistema fotovoltaico y es enviada a un tanque que puede estar a nivel del suelo, como es el caso de los tanques australianos, o bien elevada sobre una torre para facilitar su distribución.

Generalmente se emplean motores de corriente continua en los sistemas de poca potencia, mientras que en los de mayores dimensiones se usan motores de corriente alterna con inversores de corriente alimentados por el sistema fotovoltaico. Puesto que la acumulación en el tanque permite el abastecimiento de agua en forma independiente de la radiación solar, no es necesario el uso de baterías.

Para el dimensionamiento de los equipos de bombeo fotovoltaico, deben tenerse en cuenta la profundidad del pozo y el caudal requerido, lo que determina la potencia de la bomba. Conocida esta potencia, se dimensiona el subsistema de captación FV en función del emplazamiento, ya que éste determina el recurso solar y por último se fija la capacidad del tanque, que estará determinada por los períodos de baja radiación solar esperados.

1 Parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta

Del total de radiación solar que recibe un panel FV, solo 15 % o menos se aprovecha como energía eléctrica, el resto es calor que se disipa al ambiente.

La eficiencia depende de la temperatura de las celdas, la que a su vez depende fuertemente de la temperatura ambiente y disminuye a medida que ésta aumenta.

La eficiencia en condiciones estándar se obtiene con una temperatura de celda de 25 °C, mientras que la variación con la temperatura es aproximadamente de 0,4 % por cada °C y cuando la temperatura de celda alcanza los 65 °C, la eficiencia se reduce un 16 % Estas condiciones son habituales en regiones de clima cálido.

Visto lo anterior, está claro que si se disminuye la temperatura de los paneles durante el funcionamiento, aumentará su eficiencia. En consecuencia se han propuesto diversos sistemas de refrescamiento incorporados en los paneles, que en algunos casos aprovechan el calor extraído para otros usos, por lo que se los conoce como tecnología de paneles híbridos.

En principio, estos diseños incorporan el uso de un intercambiador de calor unido al panel fotovoltaico y por cual circula un fluido, agua, aire u otro que forma parte de un circuito cerrado para aprovechar el calor para otro uso, como calentamiento de agua para uso doméstico, calefacción de ambientes, etc.

Se han propuesto también sistemas que no aprovechan el calor extraído, priorizando en el diseño el objetivo de bajar la temperatura de los paneles y asimismo, métodos de acumulación de calor por cambio de fase y otros de mayor complejidad. Se mencionan los mas relevantes en los párrafos siguientes.

Abdolzadeh M., Ameri M. (2009) estudiaron un sistema de enfriamiento de la cara superior de los paneles mediante pulverización de agua. Además de bajar la temperatura por contacto con el agua fresca, el sistema mantiene limpia la superficie disminuyendo la reflexión.

Arcuri, Reda et al (2014) Estudiaron mediante simulación y ensayos de laboratorio, diferentes métodos de enfriamiento de paneles FV por circulación de aire o agua por un intercambiador adosado a la cara inferior.

Dupré, Vaillon et al (2016) desarrollaron un modelo térmico completo para dispositivos fotovoltaicos que describe la física de las pérdidas de conversión debidas a la disipación de calor y expresiones analíticas de las fuentes de calor asociadas.

González Peña et al (2017) presenta una revisión y clasificación de las diferentes tecnologías de hibridación PVT, en función del fluido térmico utilizado así como de la tipología y geometría del recuperador de calor empleado.

Hanco Apaza Oswaldo E. y otros (2016) diseñaron y experimentaron un panel híbrido obteniendo aumentos de eficiencia de hasta 14 %

Hasan A., Sarwar J., Alnoman H., Abdelbaqi S.(2017) estudiaron un sistema de enfriamiento de paneles por cambio de fase en un clima extremadamente cálido alcanzando aumentos en el rendimiento eléctrico de 6 %

Husam y Kamaruzzaman (2017) investigaron el efecto de las nanopartículas (SiC, TiO₂ y SiO₂) en el agua como fluido base sobre el rendimiento eléctrico y térmico de un panel híbrido refrigerado en su cara posterior.

Poorya, Kamaruzzaman y Saleem (2017) estudiaron distintas configuraciones de circulación de aire para refrescamiento de paneles FV.

Radziemska E. (2003) describe el efecto de la temperatura y de la longitud de onda sobre la potencia en celdas de silicio cristalino.

Rosa-Clot M y otros (2011), (2016) proponen un sistema de enfriamiento de la cara superior del panel mediante una película de agua que absorbe la fracción solar del espectro solar.

Skoplaki et al, (2009) presentan una revisión de las correlaciones entre la temperatura de los paneles y su rendimiento eléctrico.

Tripathi Rohit , Tiwari G.N. (2017) En la presente comunicación, se diseña y se fabrica un conjunto experimental de una sola unidad de colector térmico fotovoltaico concentrado (CPVT) completamente cubierto para obtener una ganancia tanto térmica como eléctrica.

Wenke et al (2017) desarrollaron un modelo dinámico para sistemas enfriados por aire.

Woei-Chong Tan et al (2017) presentan la performance de un sistema de enfriamiento con agua para

un sistema de Fv de alta concentración.

Yang Li et al (2017) estudiaron un sistema combinado térmico fotovoltaico mediante simulación con TRNSYS y CFD.

Yazdanifard Farideh, Ebrahimnia-Bajestan Ehsan, Mehran Ameri (2016) estudiaron mediante simulación un sistema fotovoltaico / térmico de placa plana a base de agua con y sin cubierta de vidrio en régimen laminar y turbulento e investigaron los efectos de la irradiación solar y las condiciones de flujo sobre el rendimiento de este sistema.

Los autores de este trabajo y otros investigadores de INENCO, han participado en distintos proyectos de investigación y desarrollo de sistemas de aprovechamiento solar fotovoltaico (Cadena et al 2013), Farfán et al (2014), una simulación eléctrica y térmica mediante SIMUSOL, (Gea et al 2006), como así también en las instancias de control de calidad previos a las compras de los PERMER (Cadena et al 2011).

EL PROTOTIPO ESTUDIADO

La propuesta motivo del presente trabajo es el desarrollo de un sistema para disminuir la temperatura de los paneles mediante circulación de agua directamente en contacto con el fondo, sin emplear ningún elemento intermedio de modo que el mismo gabinete, con una tapa posterior sellada forma un canal para el agua de refrescamiento. A pesar de su sencillez, no se ha encontrado en la bibliografía ninguna referencia a esta modalidad, aunque es claro que el contacto directo es lo óptimo desde el punto de vista de la transferencia de calor.

Por el momento se limita la propuesta al uso en bombeo FV, debido a que en estos sistemas ya se cuenta con agua en circulación proveniente de un pozo a una temperatura considerablemente mas baja que la ambiente.

En el diseño del prototipo se tuvieron en cuenta los puntos en que se prevén las mayores dificultades: La estanqueidad del gabinete, los riesgos de fugas eléctricas y el diseño del circuito hidráulico para evitar presiones excesivas.

Para una primera evaluación experimental se acondicionó un panel KS80 de Solartec, con las características de fabrica indicadas en la tabla 1.

Dimensiones: 971 x 651 x 36 mm	Pmax: 80.0 W	Ipmax: 4.60 A
Vpmax: 17.4 V	Isc: 5.0 A	Vcc: 21.7 V

Tabla 1: Datos del fabricante para el panel KS80 ensayado.

Se colocaron dos caños perforados en el interior, para la entrada y salida del agua. Estos caños, de sección cuadrada de 12 mm de lado, se conectaron al circuito externo mediante piezas de polipropileno del tipo espiga-rosca. En la figura 1 se aprecian detalles del montaje.

Se agregó al gabinete una tapa trasera de poliéster reforzado con fibra de vidrio sujeta con un contramarco de perfiles de aluminio y sellada con silicona para alta temperatura. El conjunto se fijó al marco y a la caja de conexiones del panel dejando una separación de 13 mm entre el fondo del panel y la cara interior de la tapa como se muestra en la figura 1.

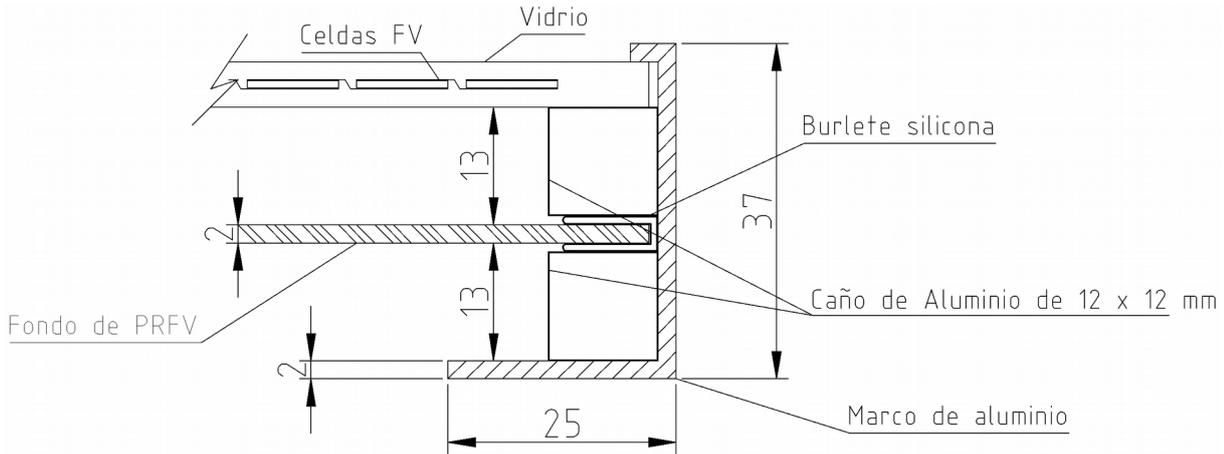


Figura 1: Detalle en corte del panel con el sistema de distribución de agua.

El panel con la tapa colocada se fijó a un marco externo de perfiles de aluminio y este a su vez a un bastidor de caños de acero.

Para el refrescamiento, una parte de la corriente de agua bombeada se hace circular por el fondo del panel y como no es posible someter éste a una presión elevada, se ha diseñado un circuito en el que la corriente de refrescamiento circula por gravedad desde un tanque auxiliar, como se indica en la figura 2.

El agua es elevada por la bomba hasta el tanque auxiliar, desde el cual la mayor parte rebalsa hacia el tanque principal, mientras que una fracción desciende por una cañería secundaria hasta la entrada del panel, atraviesa la cámara de refrescamiento y es descargada también en el tanque principal. De este modo, la presión es limitada por la altura del tanque auxiliar y el caudal es regulado por la diferencia de alturas entre el nivel superior y el inferior del circuito secundario. La descarga desde el tanque auxiliar hacia el circuito de refrescamiento, se realiza por medio de un sifón para evitar que ingrese aire a la cañería.

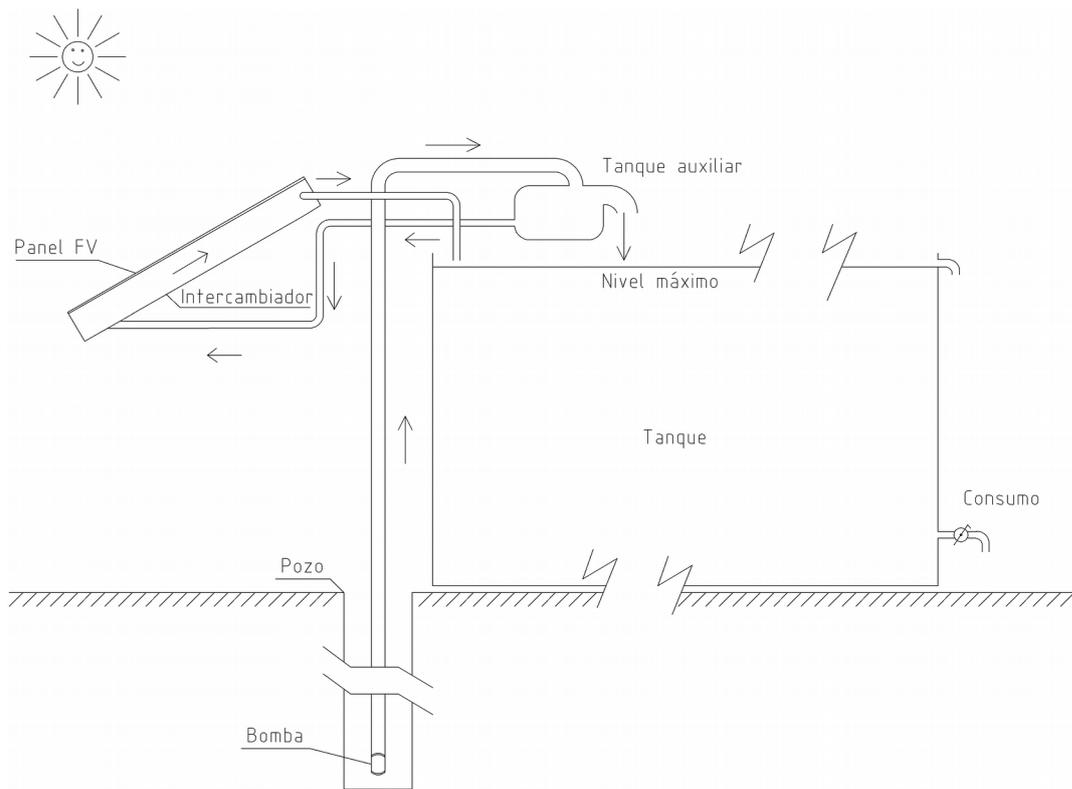


Figura 2: Circuito hidráulico.

INSTRUMENTACIÓN

Radiación solar: Para cada determinación se midió, la radiación solar global sobre el plano del panel en estudio con un piranómetro Li-Cor 250 calibrado previamente con un patrón secundario Kipp Zonen CM21.

La radiación solar sobre plano horizontal en un lugar cercano al de las experiencias, es registrada con frecuencia de 300 segundos con un solarímetro Kipp Zonen CM3 conectado a un equipo de adquisición de datos de 10 bits desarrollado en el instituto (Echazú, Hoyos, 2015).

Para esta experiencia se utilizaron también datos de radiación solar, con frecuencia de 900 segundos, de la estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 instalada también en la terraza de INENCO. Se agradecen estos datos a Silvina González y Silvana Flores Larsen.

Temperatura: Se midieron las temperaturas del fondo del panel, del circuito de agua y del ambiente, con sensores TMP 35 conectados a un equipo de adquisición de datos similar al ya mencionado para las medidas de radiación solar. Para las medidas de temperatura del fondo del panel, se fijó la cara plana del sensor con grasa de silicona en su cara posterior, mientras que las de temperatura del agua se midieron con los sensores colocados en un tubo de aluminio con un relleno de la misma grasa y fijando el tubo, con su extremo cerrado, a la cañería de modo que quede sumergido en la corriente. La figura 5c muestra un detalle del montaje.

Los sensores de temperatura se calibraron previo a su instalación, con un calibrador de dos bloques Hart Scientific 9009, Fluke, (2016)

Se emplearon también datos de temperatura de la estación Davis.

Tensión y Corriente: Se midieron con un multímetro Brymen BM 515 con resolución de 10 microvolts. Se siguió el procedimiento indicado en la norma IRAM 210013 - 2

Carga eléctrica: Para la obtención de la curva I-V se emplearon, por simplicidad tres lámparas halógenas de 12 V 55 W, en serie, conectando al panel, sucesivamente: una lámpara, dos o tres. Puesto que la medida de tensión y corriente son casi simultáneas, la variación de la resistencia con la temperatura es despreciable.

Aislación eléctrica: Fue medida con un medidor digital de aislación Sew ST – 2551 y una fuente de 750 V CC.

Caudal – Presión: Se midió el caudal en el circuito de enfriamiento con una probeta graduada de 2000 ml un cronómetro. La columna de agua se determinó como la diferencia de alturas entre la boca de descarga y el nivel del tanque auxiliar.

EL CIRCUITO HIDRÁULICO

Para las primeras experiencias que se detallan mas adelante, se conectó el panel en estudio a un circuito como el descrito, pero sin pozo ni bomba, sino alimentando directamente el tanque auxiliar con agua corriente. Para la determinación de la altura de descarga, se midió previamente el caudal en función de la altura, obteniéndose los valores que se presentan en el gráfico de la figura 3.

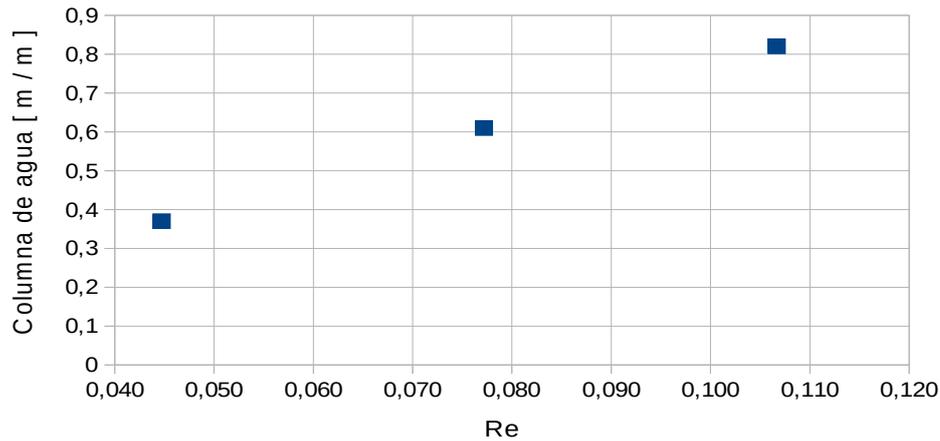


Figura 3: Curva caudal presión del circuito hidráulico ensayado.

El gráfico representa los valores del caudal de agua para distintas presiones en un dispositivo como el de la figura 2, con una longitud total del circuito de 2,80 m y diámetro de cañería 12 mm. Los valores en abscisas indican el número de Reynolds correspondiente al caudal medido, considerando las propiedades del agua a 20 °C mientras que en ordenadas se representan los valores correspondientes de presión, como fracción de una columna de agua de 1 m.

Todos los ensayos se realizaron fijando una altura de 0,75 m, manteniendo el caudal en aproximadamente 0,060 L/s (3,6 L/min).

ESTUDIOS PREVIOS

Antes de las mediciones, se sometió el panel a la inspección visual indicada en la norma IRAM 210013 – 1, sin que se detecte ninguna de las fallas mencionadas en la misma. El ensayo se hizo al aire libre cerca del mediodía para asegurar que la iluminación supere los 1000 lx indicados por la norma. Previo a las modificaciones en el panel, se controló la aislación eléctrica entre los bornes y el gabinete, según lo indica la norma IRAM210013 – 3 se conectó la fuente de alta tensión ente los bornes del panel y el marco de aluminio del gabinete, determinándose la ausencia de fugas. Como medida adicional, no prevista en la norma, se midió con el medidor de aislación, con idénticos resultados.

Se repitió el procedimiento después de las modificaciones del panel y con el circuito hidráulico cargado con igual resultado.

En las figuras 4a y 4b se muestra el equipo experimental completo, con el tanque, conexiones e instrumentación.



Figura 4a: Vista NE del equipo.



Figura 4b: Vista NO del equipo.

En las figuras 5a se ve la conexión de ingreso de agua al panel, mientras que en 5b puede observarse el dispositivo para medir la temperatura de la corriente de agua.



Figura 5a: Detalle conexión entrada de agua.



Figura 5b: Detalle sensor de temperatura.

En la figura 6a de muestra el sistema de toma de datos: Raspberry Pi, conversor AD, fuente de 5V y dos de las lámparas usadas como carga resistiva para los ensayos. En la figura 6b se puede ver el tanque con la entrada de agua para los ensayos en la parte superior izquierda y la boca de descarga a la derecha. En primer plano, el sensor de radiación solar y la esquina superior derecha del panel con la conexión de salida de agua.



Figura 6a: Detalle de la toma de datos.

Figura 6b: Salida de agua y sensor de radiación.

MEDIDAS ELÉCTRICAS

Todas las medidas se realizaron en Vaqueros, Salta ($24^{\circ} 42,27' S$ - $65^{\circ} 25,03' O$) entre 10 de junio y el 16 de julio de 2017. En los párrafos siguientes se muestran los resultados mas relevantes.

1 - Panel solo.

Se ensayó el panel, inclinado al norte con un ángulo de 45° , en un lapso de aproximadamente 3 horas cercanas al mediodía. Se midió sucesivamente tensión y corriente de un conjunto de puntos de trabajo y se registró en forma simultanea la radiación solar sobre el plano del panel con las temperaturas ambiente y del fondo del panel.

En la figura 7 se presentan estos datos en forma gráfica. Como es habitual, en ordenadas la tensión y en abscisas la corriente para cada punto. En la parte superior de cada gráfico se indican fecha y hora, radiación solar en W/m^2 y temperatura ambiente.

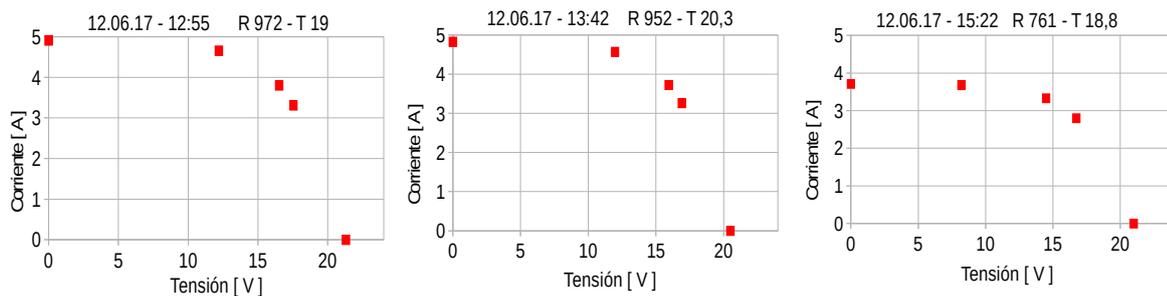


Figura 7: Curvas I-V del panel con distintos niveles de radiación solar.

La potencia máxima alcanzada en esta serie de medidas, fue de 65 W, algo menor a la correspondiente para la radiación solar recibida.

2 - Panel con tapa.

Una vez instalado el sistema de enfriamiento, se realizó un segundo ciclo de medidas sin circulación de agua, con similares condiciones de radiación solar y temperatura ambiente algo menor. En la figura 8 se muestran los resultados obtenidos.

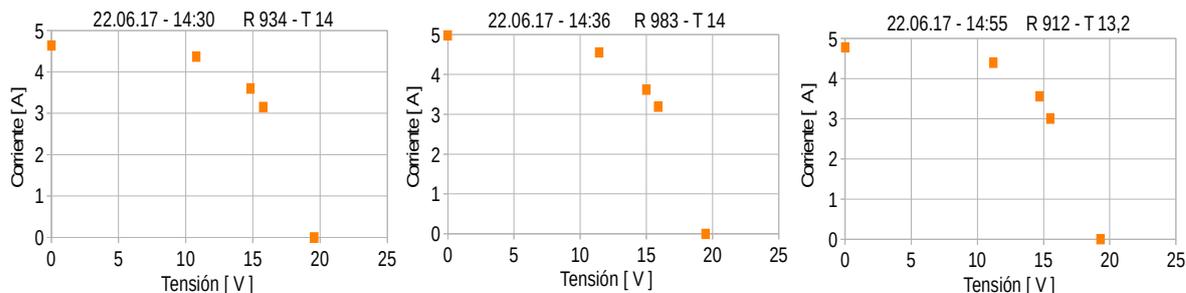


Figura 8: Curvas I-V del panel modificado sin circulación de agua.

Se aprecia el descenso de la tensión de circuito abierto y la consiguiente disminución de la potencia, debido al aumento de temperatura del panel.

3 - Panel con refrigeración.

Se midió el panel con el circuito de enfriamiento conectado en un período de 3 horas de un día con temperatura ambiente algo mayor a la habitual para el invierno de Salta. La figura 9 muestra el registro de temperatura y radiación solar medidos cada 900 segundos.

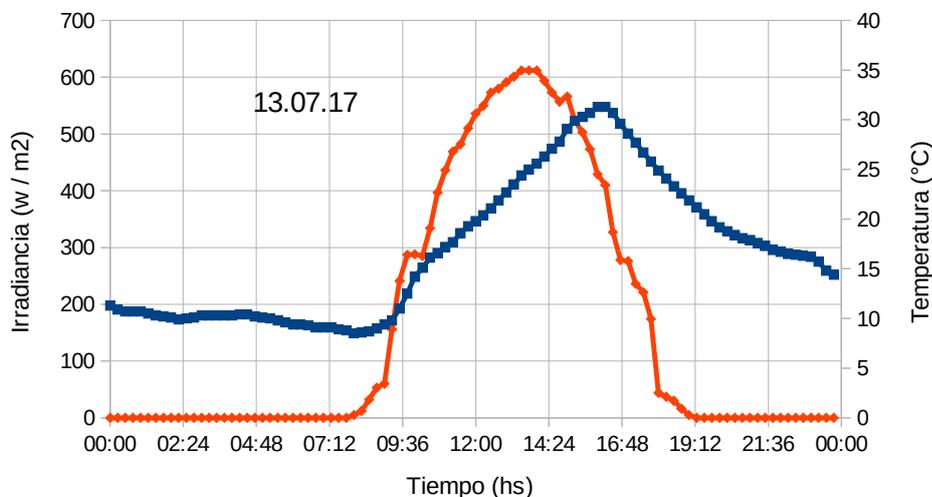


Figura 9: Radiación solar y temperatura ambiente.

Durante la primera serie de medidas, cuyos resultados se muestran en la figura 10, la temperatura del agua proveniente de la red, que ingresa al tanque auxiliar, se mantuvo en un valor cercano a los 17 °C como se indica en la parte superior de cada gráfico. La potencia máxima fue 68 W.

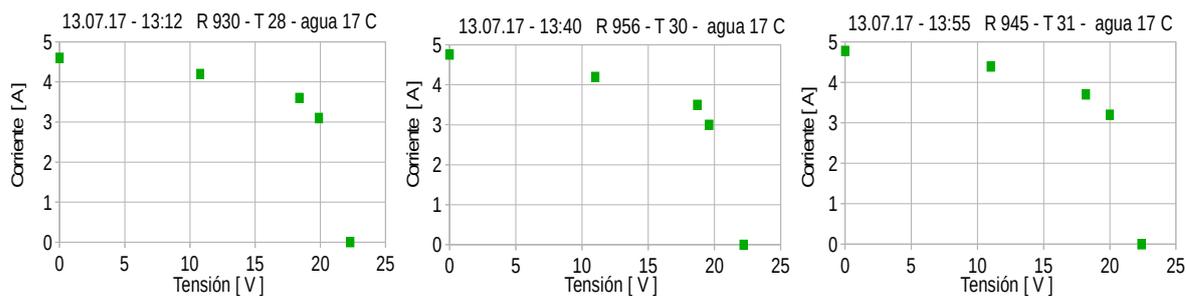


Figura 10: Curvas I-V del panel modificado con circulación de agua.

4 - Panel con refrigeración a menor temperatura.

Con el objeto de obtener datos en condiciones diferentes, se continuó la medición agregando hielo en el tanque auxiliar, para disminuir la temperatura de ingreso al sistema. De ese modo se registraron temperaturas de ingreso entre 6 y 8 °C y se obtuvieron los datos que se presentan en la figura 11.

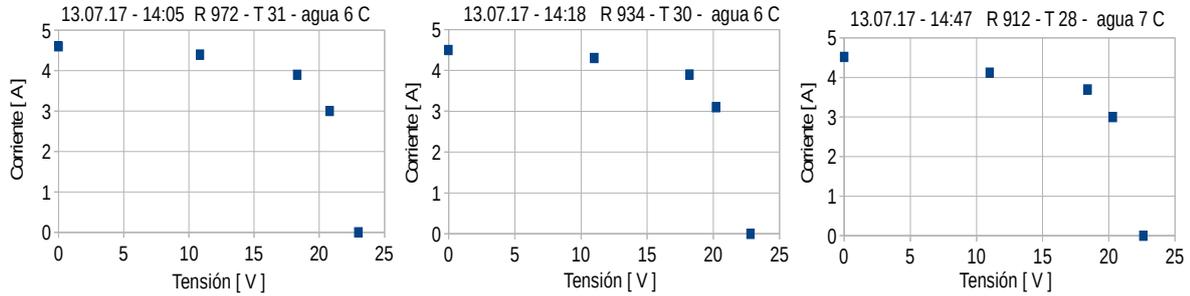


Figura 11: Curvas I-V del panel modificado con circulación de agua a menor temperatura.

CONCLUSIONES

Puesto que todos los ensayos se realizaron con el mismo panel, con las modificaciones y sin ellas, en diferentes momentos, a los efectos de contar con una base única de comparación, se representaron los datos mas relevantes de las cuatros series de medición, en un único gráfico, “eficiencia vs delta T” en la figura 11, donde las abscisas corresponden a la diferencia entre la temperatura ambiente y la del panel mientras que las ordenadas a la razón $V_{m\acute{a}x} * I_{m\acute{a}x} / Rad$, proporcional a la eficiencia.

El grupo de puntos enmarcados en rojo, corresponde al conjunto de datos de la figura 8 con las medida del panel solo, mientras que y el de marco anaranjado representa los de la figura 7 con la tapa del panel colocada y sin circulación de agua. En ambos casos la temperatura del panel es medida con el sensor en contacto con el fondo.

El grupo de puntos enmarcados en color verde corresponde a los datos de la figura 10, esto es el panel refrigerado con agua a 17 °C. Por último, los puntos enmarcados en azul representan los datos de la figura 11 con agua a 6° C. En éstos la temperatura del panel se mide como la media logarítmica entre las temperaturas de entrada y de salida.

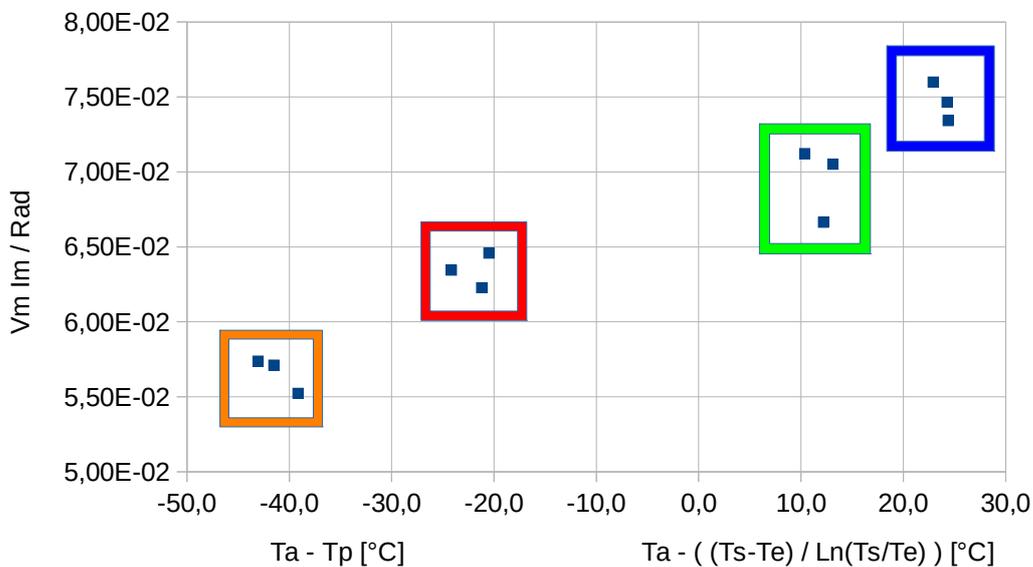


Figura 12: Potencia relativa en función de la temperatura del panel.

De la relación entre el grupo de puntos correspondientes al panel refrigerado con los del panel sin refrigeración, se obtiene, en forma aproximada un aumento del 20% en la eficiencia.

En la siguiente etapa de este estudio se planea ensayar en forma simultánea, dos paneles iguales: uno con sistema de refrescamiento y el otro sin él, en un período más prolongado, para establecer una comparación de mayor validez.

REFERENCIAS

- Abdolzadeh M., Ameri M. (2009), Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells, *Renewable Energy* 34 , 91–96
- Arcuri N., Reda F. , De Simone M. (2014), Energy and thermo-fluid-dynamics evaluations of photovoltaic panels cooled by water and air *Solar Energy* 105 (2014) 147–156
- Dupré O., Vaillon R., Green M., A full thermal model for photovoltaic devices *Solar Energy* 140 (2016) 73–82
- Cadena C. Echazú R. Hoyos D. et al (2011) Laboratorio de ensayos de equipos eléctricos solares del inenco: caracterización de equipos FV provistos a través del PERMER AVERMA Vol. 15, ISSN 0329-5184
- Cadena, C., Ottavianelli E., (2013), Inclusión de indicadores sociales en el análisis de requerimientos energéticos. el caso de la provincia de Salta AVERMA Vol. 1, pp. 08.87-08.96, 2013. ISBN 978-987-29873-0-5
- Echazú R. Hoyos D. (2015), Sistema de medición de radiación solar, almacenamiento y publicación web, AVERMA Vol. 3, pp. 08.33-08.41, 2015 ISBN 978-987-29873-0-5
- González Peña D., Alonso et al (2017), Clasificación de los paneles solares híbridos (pvt) <https://www.researchgate.net/publication/305391800>
- Farfán R. , Cadena C. (2014) Desarrollo de un sistema predictivo de potencia fotovoltaica para su utilización en sistemas híbridos, AVERMA Vol. 2, pp. 11.109-11.118, 2014. ISBN 978-987-29873-0-5
- Fluke (2016), www.fluke-direct.com/pdfs/cache/www.fluke-direct.com/9009-b-156/datasheet/9009-b-156-datasheet.pdf
- M. Gea, M. T. Montero, C. Cadena (2006), Simulación eléctrica y térmica de paneles fotovoltaicos AVERMA Vol. 10, ISSN 0329-5184
- Hanco Apaza Oswaldo E., Luque Alvarez Raúl, Montoya Portugal Alberto, Palo Tejada Ernesto, Vizcardo Cornejo Miguel (2016) Diseño, construcción y evaluación de un sistema solar híbrido fotovoltaico/ térmico para aumentar la eficiencia de un panel solar. <http://www.perusolar.org>
- Hasan A., Sarwar J., Alnoman H., Abdelbaqi S.(2017) Yearly energy performance of a photovoltaic-phase change material (PV-PCM) system in hot climate *Solar Energy* 146 (2017) 417–429
- Husam Abdulrasool Hasan, Kamaruzzaman Sopian, Ahed Hameed Jaaz, Ali Najah Al-Shamani (2017) Experimental investigation of jet array nanofluids impingement in photovoltaic/thermal collector *Solar Energy* 144 (2017) 321–334
- IRAM - Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2017) Norma IRAM210013 – 1 <http://www.iram.org.ar/index.php?id=Catalogo-de-normas>
- IRAM - Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2017) Norma IRAM210013 – 3 <http://www.iram.org.ar/index.php?id=Catalogo-de-normas>
- Poorya Ooshaksaraei, Kamaruzzaman Sopian, Saleem H. Zaidi, Rozli Zulkifli (2017) Performance of four air-based photovoltaic thermal collectors configurations with bifacial solar cells *Renewable Energy* 102 (2017) 279e293
- Radziemska E. (2003) The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells *Renewable Energy* Volume 28, Issue 1, January 2003, Pages 1–12
- Rosa-Clot M, Rosa-Clot P., Tina G. M. (2011) TESPI: Thermal Electric Solar Panel Integration *Solar Energy* 85 (2011) 2433–2442
- Rosa-Clot M., Rosa-Clot P., Tina G.M., Ventura C. (2016) Experimental photovoltaic-thermal Power Plants based on TESPI panel. *Solar Energy* 133 (2016) 305–314
- Skoplaki E., Palyvos J.A. (2009) On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy* 83 (2009) 614–624
- Tripathi Rohit, Tiwari G. N. (2017), Annual performance evaluation (energy and exergy) of fully covered concentrated photovoltaic thermal (PVT) water collector: An experimental

- validation. *Solar Energy* 146 (2017) 180–190
- Wenke Fan, Georgios Kokogiannakis, Zhenjun Ma, Paul Cooper (2017) Development of a dynamic model for a hybrid photovoltaic thermal collector e Solar air heater with fins *Renewable Energy* 101 (2017) 816e834
- Woei-Chong Tan, Kok-Keong Chong, Ming-Hui Tan (2017) Performance study of water-cooled multiple-channel heat sinks in the application of ultra-high concentrator photovoltaic system. *Solar Energy* 147 (2017) 314–327
- Yang Li, Dengwei Jing (2017) Investigation of the performance of photovoltaic/thermal system by a coupled TRNSYS and CFD simulation *Solar Energy* 143 (2017) 100–112
- Yazdanifard Farideh, Ebrahimnia-Bajestan Ehsan, Mehran Ameri (2016) Investigating the performance of a water-based photovoltaic/thermal (PV/T) collector in laminar and turbulent flow regime. *Renewable Energy* 99 (2016) 295e306

ABSTRACT: The paper presents the design and experimental study of a system to increase the efficiency of photovoltaic panels, by cooling with water, applicable to pumping systems. A prototype was constructed and tested by measuring the operating variables: Representative temperatures, flow, solar radiation and panel response in voltage and current. Results are presented graphically, showing that the system reaches an increase in efficiency of up to 20% in winter. It is concluded that the operation of the equipment offers no difficulties and that it is applicable for pumping water, especially in warm climate zones.

Keywords: Solar energy, photovoltaic efficiency, hybrid panel.