

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL TÉRMICO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE UNA INSTALACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS APLICADO A LA REGENERACIÓN EN RUEDAS DESECANTES

GONZÁLEZ TERUEL, Juan D.⁽¹⁾; VIEDMA, Antonio⁽¹⁾

GARCÍA CASCALES, José Ramón⁽¹⁾; VERA GARCÍA, Francisco⁽¹⁾

MAZÓN HERNÁNDEZ, Rocío⁽¹⁾; KÁISER, Antonio S.⁽¹⁾

Juando10_10@hotmail.com

⁽¹⁾Universidad Politécnica de Cartagena, ETSII, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

RESUMEN

El control de la humedad en el ambiente es un hecho que ha cobrado especial relevancia en los últimos años y que influye en la salud y el bienestar de las personas, así como en la calidad de ciertos servicios y procesos, presentando gran importancia en muchas industrias, sistemas de almacenamiento, transporte o preservación de productos. Es por ello que se está integrando en los sistemas de aire acondicionado un elemento deshumidificador denominado rueda desecante. La rueda desecante se encarga de reducir la humedad del aire de proceso y requiere de un foco caliente para su regeneración. Este foco caliente puede apoyarse en energía solar térmica. Este estudio se encarga de evaluar el potencial térmico del sistema de ventilación y refrigeración por aire de una instalación de paneles solares fotovoltaicos desde el punto de vista del aprovechamiento de la energía térmica transferida al refrigerante como apoyo al foco caliente para la regeneración de la rueda desecante. Para tal fin, se ha desarrollado una instalación experimental consistente en un panel fotovoltaico inclinado con un canal de paso de aire bajo el mismo, permitiendo la refrigeración de las células fotovoltaicas y su consecuente mejora del rendimiento eléctrico, así como el aprovechamiento del calor residual generado en este proceso de refrigeración. Se han realizado ensayos en convección libre y en convección forzada, para distintos tamaños del canal de paso y velocidades del aire y para distintas condiciones de irradiancia y temperatura ambiente. El análisis del potencial térmico de esta instalación bajo estas diferentes condiciones y su posible aplicación a la regeneración de ruedas desecantes se presenta en este trabajo.

Palabras clave: panel fotovoltaico ventilado, rueda desecante, potencial térmico.

1. Introducción

La refrigeración es un proceso que se ejecuta con el objetivo de preservar la calidad, el estado o el bienestar de ciertos elementos dentro de un sistema. Uno de los factores más importantes a tener en cuenta en este proceso es la humedad. Unos valores de humedad inadecuados presentes en procedimientos industriales, conservación de alimentos o refrigeración de espacios habitables, pueden dar lugar a la reducción de la vida útil de elementos de producción, a la alteración de los productos o a la disminución del confort de los individuos. El control de la humedad puede requerir de su incremento o de su reducción. Este trabajo hace hincapié en este último aspecto.

Existen diversos elementos que, adicionados a sistemas de refrigeración, permiten reducir la cantidad de agua en el aire. Uno de estos elementos que tiene un uso más extendido es la rueda desecante. Una rueda desecante es un dispositivo que se encuentra girando lentamente gracias a un aporte de energía externo. El principio básico de la rueda desecante es que se hace circular aire a través de su estructura y la humedad contenida en el aire es adsorbida por el elemento con el que está fabricado, por lo general un material corrugado de fibra de vidrio impregnado de sustancias higroscópicas con gran capacidad de retención de humedad; comúnmente, se utilizan el gel de sílice o el cloruro de litio para realizar esta tarea. La rueda desecante se divide en dos sectores circulares: uno dedicado al paso del aire de proceso y otro dedicado al paso del aire de regeneración. Cuando el aire que estamos deshumidificando pasa por el sector de proceso, el desecante va adsorbiendo el agua del aire hasta que llega un punto en el que se satura y ya no es capaz de adsorber más. Por ello la rueda va girando para que el desecante saturado llegue al sector de regeneración, donde se hace pasar un flujo de aire por la rueda que calienta al desecante y se elimina la humedad en éste. Una de las ventajas de este sistema es que permite el secado de forma continua.

Por lo general, se necesita una temperatura entre los 80 y los 90 grados centígrados para la regeneración de la rueda desecante. Este flujo de aire caliente se puede obtener de diversas formas. Últimamente se está recurriendo al apoyo de la energía solar térmica para este fin. La idea que se plantea en este trabajo es hacer pasar un flujo de aire bajo paneles solares fotovoltaicos. De esta forma se consigue un doble objetivo: obtener una etapa precalentadora del aire de regeneración y, por otro lado, refrigerar el panel fotovoltaico, cuya eficiencia se ve severamente reducida con el aumento de la temperatura. Para ello se evalúa el potencial térmico de una instalación experimental de paneles fotovoltaicos y se cuantifica la cantidad de energía calorífica que se puede aprovechar en el proceso de refrigeración de los mismos bajo distintas condiciones.

Se han encontrado diferentes estudios relativos al problema planteado. Kaiser et al. [2] estudió la variación del rendimiento eléctrico de paneles fotovoltaicos al ventilarlos a través de un canal bajo los mismos. Se realizaron ensayos en convección natural y en convección forzada mediante un ventilador de impulsión y a distintas velocidades. La instalación y los datos recogidos en dicho estudio se han aprovechado para elaborar el presente trabajo, persiguiendo, a diferencia del estudio original, una aplicación térmica de aprovechamiento del calor residual generado en la refrigeración de paneles fotovoltaicos. Por su parte, Brinkworth [1], hizo una estimación del flujo y de la transferencia de calor que tenían lugar en el conducto de refrigeración de paneles solares, una configuración similar a la que describimos en nuestro caso, pero su estudio trata de un caso específico, aunque pretende mostrar el orden de relación de las distintas variables que toman parte en el problema. Asimismo, Moshfegh y Sandberg [3], realizaron un estudio parecido al de Brinkworth [1], pero con otro enfoque, llegando a describir ciertos comportamientos térmicos en el canal de ventilación del panel referentes a la distribución de temperaturas en el mismo. Exponen que el perfil de velocidad del aire en el interior del conducto presenta unas crestas en las zonas próximas a las paredes, mientras que la velocidad se reduce considerablemente en la zona central. Esto se debe a un mayor calentamiento del panel en la periferia debido a la influencia de la capa límite. Sin embargo, este efecto es representativo en convección natural o a velocidades bajas.

Existen otras tecnologías basadas en el aprovechamiento de la energía solar térmica que, a priori, presentarían mayor rendimiento y permitirían obtener mayores temperaturas para calentar el aire de regeneración. Sin embargo, el hecho de utilizar paneles fotovoltaicos presenta la ventaja respecto a

otras alternativas, de tratarse de instalaciones que apenas requieren mantenimiento, resultan más económicas y las modificaciones que se proponen a partir de un módulo convencional son bastante sencillas. De antemano se conoce que la configuración presentada en este estudio no aporta la energía suficiente para la regeneración de una rueda desecante. El objetivo de este trabajo es evaluarla capacidad de apoyo que tendría a dicha aplicación y presentar unos resultados que pudieran destinarse a cualquier otro fin.

2. Descripción del proceso experimental

Los datos y la instalación sobre los que se ha trabajado corresponden al estudio desarrollado por Kaiser et al. [2] basado en la refrigeración de paneles solares fotovoltaicos por convección forzada. Se analizó el comportamiento eléctrico del panel ante diferentes valores de irradiancia y magnitudes ambientales, observando cómo variaba el rendimiento y la temperatura del panel cuando se sometía a ventilación por convección libre y por convección forzada a diferentes velocidades y para diferentes relaciones de aspecto (b/L), siendo “b” la altura del canal de ventilación y “L” la longitud del panel. En este caso, se han empleado los datos que se obtuvieron, para calcular la cantidad de energía térmica que se puede obtener del sistema, cuantificando el potencial térmico del mismo y el rendimiento global del sistema.

2.1. Descripción de la instalación experimental

La instalación empleada consta de un panel fotovoltaico (270W, ET Solar, ET P672270) de 0,992 metros de ancho y 1,956 metros de largo dispuesto sobre una estructura que permite una fácil regulación de la inclinación del panel. En paralelo al panel y bajo el mismo, formando entre ambos un canal de paso para el aire, se encuentra una plancha adiabática que se dispone de un sistema para facilitar la elevación del panel respecto a la plancha, modificando así, la sección de paso del aire de ventilación, tal y como muestra la Fig. 1. Para el funcionamiento en convección forzada, se colocó un ventilador de impulsión en la entrada del canal, acoplado al mismo mediante una tobera, tal como podemos observar en la Fig. 2.



Figura 1: Panel con canal de refrigeración.

La Fig. 3 presenta una imagen de varios sensores en la parte de atrás del panel, donde la plancha adiabática ha sido retirada para mostrar la disposición de los mismos. Puede observarse en la Fig. 3 que hay cinco Detectores de Temperatura por Resistencia (RTD) adheridos al módulo en su parte trasera para medir la temperatura de éste. Además, se instalaron cuatro sensores para medir la temperatura del aire a la entrada y a la salida del módulo, y dos anemómetros de hilo caliente para medir su velocidad en el interior del canal. Las componentes horizontales de la radiación solar se midieron con dos piranómetros, mientras que otras condiciones ambientales como temperatura, presión atmosférica, humedad y velocidad del viento, se midieron con una estación meteorológica situada en el tejado del laboratorio, justo detrás de la instalación experimental. Todos los datos fueron registrados y guardados por medio de un “data logger”.

2.2. Descripción de ensayos

Los ensayos se llevaron a cabo a lo largo de varios meses con condiciones favorables para el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos. El sistema de adquisición de datos se encargó de recoger las medidas de los distintos sensores, obteniendo pares de valores cada 15 minutos y obteniendo su media, todo ello diariamente. A partir de todos estos datos se ha hecho una selección, desechando muestras en presencia de nubes o carencia de radiación y se ha trabajado con las muestras más representativas.

La instalación se ensayó para tres relaciones de aspecto diferentes: $b/L=0,0525$; $b/L=0,0675$ y $b/L=0,0825$. Para cada una de ellas se realizaron medidas en convección libre del aire y en convección forzada. El ventilador empleado para la impulsión del aire permite su funcionamiento a tres niveles de velocidad diferentes, para los cuales se realizaron los ensayos.



Figura 2: Ventilador para convección forzada.

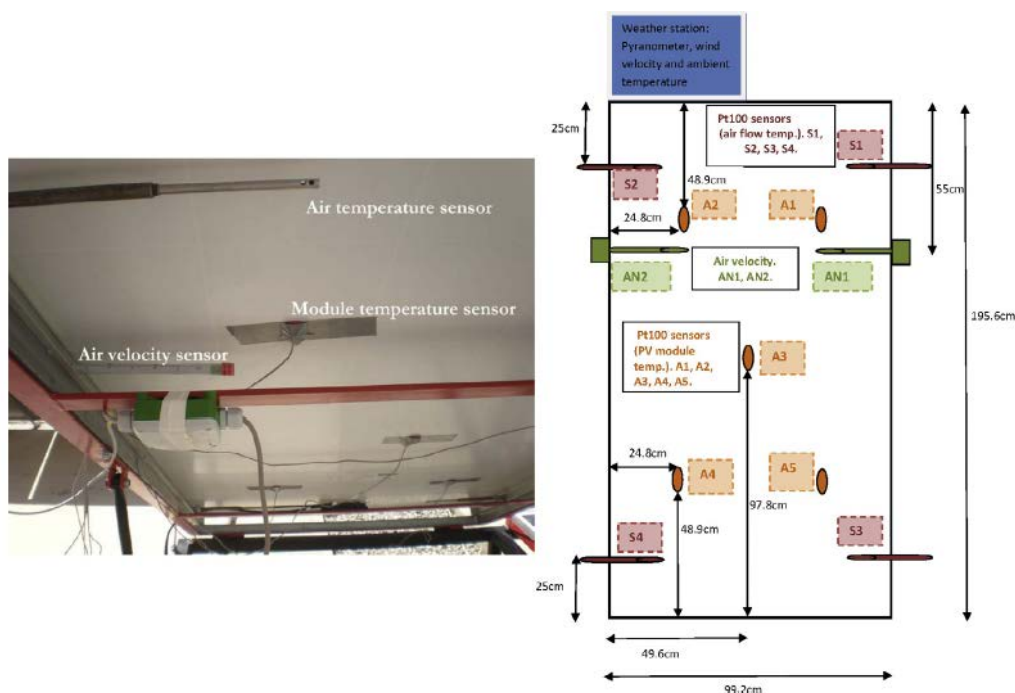


Figura 3: Sensores situados en la parte trasera del panel.

3. Resultados experimentales

Teniendo en cuenta que se ha ensayado con tres relaciones de aspecto distintas, esto va a modificar la sección de paso del aire por el conducto, de forma que, para una misma regulación del ventilador, la velocidad en el interior del conducto es distinta, dependiendo de la relación de aspecto presente.

Se ha analizado la evolución de la potencia térmica obtenida, el rendimiento térmico y el incremento de la temperatura del aire frente a la irradiancia, mostrando ciertas tendencias que se exponen a continuación.

La potencia térmica se ha calculado a partir de la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del panel, mediante la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Donde el flujo másico \dot{m} , se ha calculado a partir de la densidad del aire a las condiciones ambientales, de la sección de paso del aire y del valor medio de las velocidades marcadas por los anemómetros en el interior del conducto.

El rendimiento térmico se entiende como el cociente entre la potencia térmica obtenida y la irradiancia medida, multiplicada por la superficie del panel.

$$\eta_{term} = \dot{Q} / (G_T \cdot S_{panel})$$

Esto nos dará información de qué proporción de la energía que llega al módulo, es aprovechable térmicamente.

3.1. Influencia de la irradiancia y la velocidad en el incremento de temperatura del aire

La temperatura del panel se incrementa a medida que aumenta la irradiancia. Esto hace que el aire se caliente en mayor medida a su paso bajo el panel, tal como podemos observar en la Fig. 4. En este gráfico se presenta la evolución de la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del panel respecto a la irradiancia de forma experimental, para una relación de aspecto $b/L=0,0825$ y para distintos niveles de velocidad. Los niveles de velocidad identificados en el gráfico como “Vel1”, “Vel2” y “Vel3”, hacen referencia a la posición del regulador de velocidad del ventilador. Por su parte, la etiqueta “ConvNat” se identifica con los datos en convección natural.

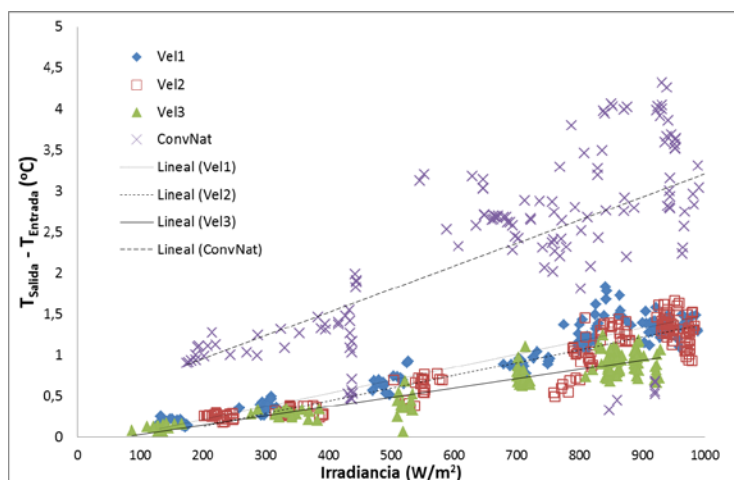


Figura 4: Datos experimentales de diferencia de temperatura entre entrada y salida para diferentes velocidades con $b/L=0,0825$.

Los niveles de velocidad del aire para la relación de aspecto mostrada en la Fig. 4, tienen unos valores medios de: ConvNat $\approx 0,57$ m/s; Vel1 ≈ 2 m/s; Vel2 $\approx 2,8$ m/s y Vel3 $\approx 3,8$ m/s.

Se puede ver que, a medida que aumenta la velocidad del aire, menor incremento de temperatura sufre éste, ya que el tiempo de residencia en el conducto es menor. Sin embargo, a pesar de reducirse el salto de temperatura, la transmisión del calor por convección aumenta al ser el gasto másico de mayor magnitud. Esto implica un descenso de la temperatura del panel. La Fig. 5 muestra la temperatura del panel frente a la irradiancia para las mismas condiciones de la Fig. 4. Se observa que, ventilando en convección natural, se alcanzan en el panel temperaturas próximas a los 60°C para valores de irradiancia entre 900 y 1000 W/m^2 . En cambio, aumentando la velocidad del aire de ventilación, esta temperatura se ve reducida de forma directamente proporcional a la velocidad. Esto supone una mejora en el rendimiento eléctrico del panel, que se ve afectado por las altas temperaturas. En la Fig. 6 se representa la evolución del rendimiento eléctrico frente a la irradiancia para distintas velocidades del aire. Tal y como observamos

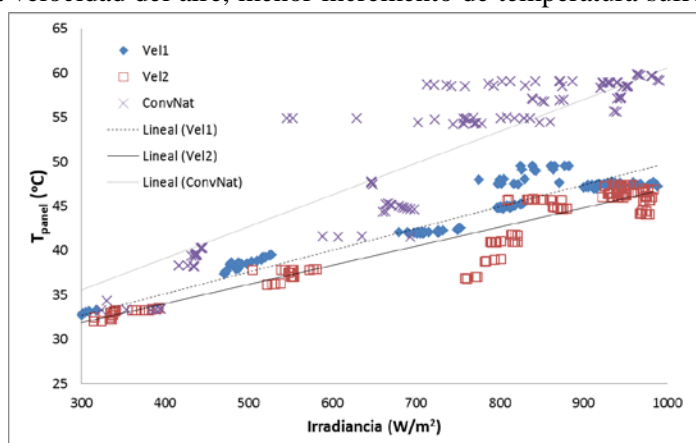


Figura 5: Datos experimentales de temperatura del panel para diferentes velocidades con $b/L=0,0825$.

en la Fig. 5, la temperatura del panel crece con la irradiancia, reflejándose este hecho en una disminución del rendimiento eléctrico, como podemos ver en la Fig. 6. Además, mayores velocidades de ventilación, involucran mayor rendimiento eléctrico.

3.2. Influencia de la relación de aspecto y la velocidad del aire en la potencia térmica

Se observa que la potencia térmica aumenta cuanto mayor es el valor de la irradiancia para cualquier caso, ya que, como acabamos de ver, la diferencia de temperatura del aire entre la entrada y la salida, también lo hace.

La potencia térmica depende de dos términos variables, que son el caudal y el salto de temperatura. El hecho de haber utilizado un ventilador de

impulsión para generar el flujo forzado, ha ocasionado un comportamiento del aire bajo el panel que ha impedido una transferencia de calor eficiente, ya que el flujo no ha podido abarcar toda la superficie del módulo, produciéndose irregularidades en su presencia. Por otra parte, se ha percibido una clara asimetría del perfil de velocidades en el conducto a partir de los datos registrados. Este fenómeno introduce un error de incertidumbre en el cálculo de la potencia térmica, provocando que los resultados obtenidos difieran de la realidad, impidiendo hacer un análisis detallado de la influencia de las variables. A pesar de ello, se puede visualizar, a grandes rasgos, que la potencia térmica obtenida del sistema, aumenta con el crecimiento del caudal. Las Figs.7 y 8 muestran la tendencia de esta potencia con la irradiancia para unas relaciones de aspecto de $b/L=0,0675$ y $b/L=0,0825$.

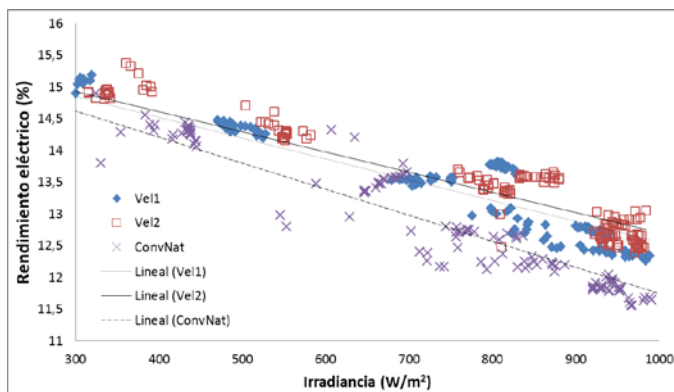


Figura 6: Datos experimentales de rendimiento eléctrico del panel para diferentes velocidades con $b/L=0,0825$.

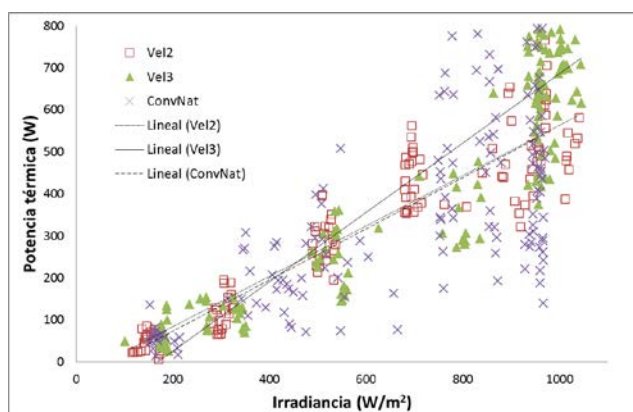


Figura 7: Datos experimentales de potencia térmica frente a irradiancia para diferentes velocidades con $b/L=0,0675$.

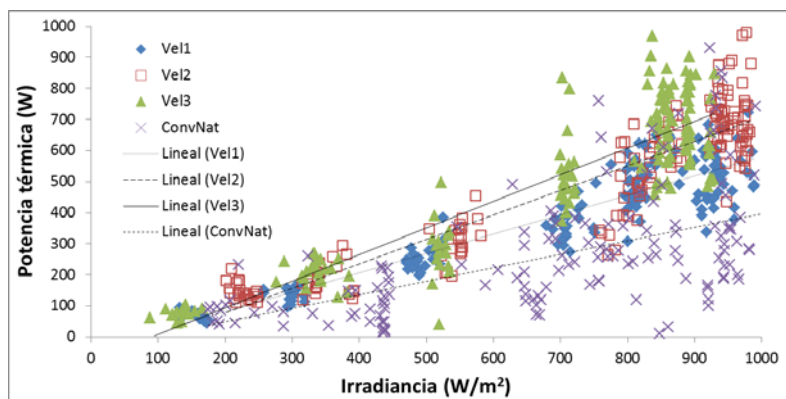


Figura 8: Datos experimentales de potencia térmica frente a irradiancia para diferentes velocidades con $b/L=0,0825$.

Como puede apreciarse en las Figs. 7 y 8, la incertidumbre es mayor que la diferencia que pueda generarse como consecuencia de un cambio de velocidad.

3.3. Evolución del rendimiento térmico

El rendimiento térmico evoluciona de manera similar a como lo hace la potencia térmica respecto de la irradiancia. En cuanto a términos cuantitativos, se ha observado que los mayores rendimientos se alcanzan para la relación de aspecto $b/L=0,0825$, es decir, aquella que aporta una mayor sección de paso del aire. Se logran rendimientos entorno al 20% en convección libre y entre el 30 y el 40% para la mayor velocidad aportada por el ventilador (Vel3). La Fig. 8 muestra los resultados descritos.

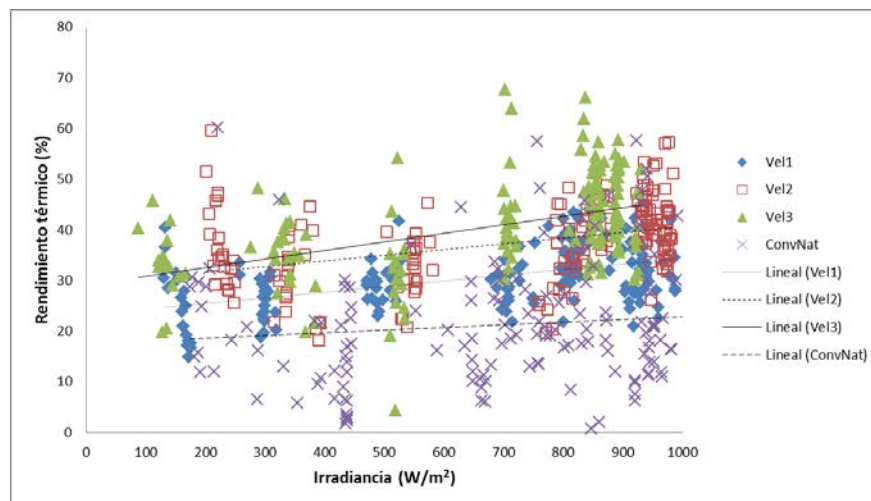


Figura 8: Datos experimentales de rendimiento térmico frente a irradiancia para diferentes velocidades con $b/L=0,0825$.

4. Conclusiones y consideraciones finales

El objetivo principal del estudio era comprobar la idoneidad del uso de paneles fotovoltaicos para la regeneración de ruedas desecantes. Como ya se comentó, son necesarias temperaturas del orden de los 80°C . Es evidente, que el aire usado para ventilar estos paneles no puede aportar este nivel de temperatura, pero se propone que sirva de apoyo a la consecución de dicho objetivo. El estudio ha mostrado que no se consigue aumentar la temperatura ambiente más de 4°C . Sin embargo, se ha observado que, en términos de potencia y rendimiento térmicos, se han obtenido resultados interesantes.

La incertidumbre en la medida de la velocidad impide vislumbrar con detalle el efecto de ésta en la capacidad de obtener potencia térmica del sistema. El procedimiento utilizado es adecuado para estudiar la mejora del rendimiento eléctrico del módulo fotovoltaico, como se hizo en el estudio original llevado a cabo por Kaiser et al. [2], pero en el cálculo del potencial térmico de la instalación es necesario conocer el gasto másico que tiene lugar en el proceso de ventilación. La medida local de velocidad en dos puntos no aporta la información suficiente como para determinar el flujo másico de aire en el conducto. Una de las propuestas futuras a partir de este trabajo es mejorar la instalación introduciendo un sistema que permita medir la velocidad de forma global en el plano perpendicular al desplazamiento del aire. Para ello se ha previsto utilizar un tubo de Venturi acoplado en serie a la salida del panel.

El rendimiento térmico que se obtiene del sistema es considerable. Si atendemos a la experimentación con relación de aspecto $b/L=0,0825$, la cual presenta los mayores valores de rendimiento, se puede comprobar que, en convección libre, que no supone ningún gasto energético externo, el rendimiento alcanzado es del 20%. Teniendo en cuenta que el rendimiento eléctrico del panel en esas mismas

condiciones es del 13%, es un hecho a tener en cuenta. Por otra parte, aumentando la velocidad del aire en convección forzada, se consiguen mayores rendimientos, tanto eléctricos como térmicos, ya que hay una mayor disipación de calor en el panel y esto implica una menor temperatura de funcionamiento de las células fotovoltaicas y una mayor evacuación del calor por convección a través del aire en el conducto. La ventilación forzada requiere de un aporte de energía externo y, por tanto, un incremento de la energía a introducir en el sistema, factor que favorece la disminución del rendimiento. Sin embargo, hay ciertos valores de irradiancia a partir de los cuales es rentable el uso de energía externa para la convección forzada, de tal forma que la potencia térmica obtenida a través del aire de ventilación puede llegar a ser de 1,5 veces la consumida por el ventilador, teniendo en cuenta que éste posee un rendimiento en torno al 30%.

Resultaría interesante ampliar este estudio probando otras condiciones de operación y observar el comportamiento para otras relaciones de aspecto y otras velocidades, a parte de la ya propuesta mejora de medición de la velocidad. También podrían estudiarse modificaciones estructurales en la instalación que aumenten el tiempo de residencia del aire en el conducto y ver cómo influyen en el rendimiento del sistema, ya que, para la aplicación en la regeneración de ruedas desecantes, es más importante el salto de temperatura que se pueda lograr, que la potencia que se pueda extraer. Otra de las mejoras que se propone es, a la hora de generar la convección forzada, instalar un ventilador que funcione en aspiración en lugar de en impulsión, mejorando así el desplazamiento del aire bajo el panel y consiguiendo un flujo más homogéneo y estratificado que favorezca la transmisión del calor por convección entre el panel y el aire.

5. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del gobierno español y por los fondos europeos FEDER, a través del proyecto ENE2013-48696-C2-2-R.

6. Referencias

- [1] BRINKWORTH, B.J. *Estimation of flow and heat transfer for the design of PV cooling ducts*. Revista Solar Energy, 2000, vol. 69, No. 5, pp. 413-420.
- [2] KAISER, A. S. et al. *Experimental study of cooling BIPV modules by forced convection in the air channel*. Revista Applied Energy, 2014, vol. 135, pp. 88-97.
- [3] MOSHFEGH, B, SANDBERG, M. *Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels*. Revista Renew SustainEnergy, 1998, vol. 2, pp. 287-301.