



Universidad
Politécnica
de Cartagena

ESCUELA DE INDUSTRIALES

DEPARTAMENTO DE FLUIDOS

**Comparación del rendimiento térmico en la
refrigeración de placas solares fotovoltaicas con la
de una placa solar térmica de aire**

TFG realizado por Joaquín Ángel Pérez López para el Grado en
Ingeniería Eléctrica

Directores:

Antonio Viedma Robles y Antonio Sánchez Kaiser

2016-2017

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias a todas las personas involucradas en este proyecto, empezando por mis directores de proyecto, Dr. Antonio Viedma y Dr. Antonio Kaiser, por su constante ayuda y dedicación a resolver juntos los problemas que han ido surgiendo a lo largo de estos meses de trabajo.

A José Antonio Villarejo, quien ha estado siempre dispuesto para ayudarme en la reparación de cualquier dispositivo electrónico que no funcionase.

A los técnicos Julio y Paco Solano, que han sido una gran ayuda a la hora de mover o instalar cualquier dispositivo que necesitase.

Y a mi compañero Paul, quien en los últimos meses de trabajo, su ayuda fue imprescindible para poder desempeñar el trabajo en el tiempo establecido.

ÍNDICE GENERAL

NOMENCLATURA.....	4
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 Origen del estudio.....	5
1.2 Objetivos de resultados	7
2. ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1. Ruedas desecantes	9
2.2. Influencia de la temperatura en el funcionamiento de paneles fotovoltaicos... 10	
2.3. Sistema de refrigeración de paneles fotovoltaicos	12
2.3.1. Agua como fluido caloportador.....	12
2.3.2. Aire como fluido caloportador	14
3. LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	16
3.1. Selección de variables a medir	18
3.2. Equipo utilizado	22
3.2.1. Condiciones ambientales.....	22
3.2.2. Variables de operación	26
3.2.3. Otros elementos de la instalación.....	34
3.3. Adquisición de los datos	37
3.3.1. Programa de adquisición de datos	38
3.3.2. Protocolo de actuación de la instalación	39
3.4 Aspecto final de la instalación	43
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	45
4.1. Planificación de ensayos.....	45
4.2. Análisis de resultados	45
4.2.1. Flujo másico	48
4.2.2. Incrementos de temperatura Aire.....	50
4.3. Potencia térmica.....	53
4.5. Temperatura del panel fotovoltaico.....	60
4.5.1. Incremento de temperatura en el panel A.....	60
4.5.2. Incremento de temperatura en el panel B.....	62
4.6. Análisis de datos eléctricos.....	64
4.6.1. Potencias eléctricas	64
4.6.2. Rendimientos eléctricos	67

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	69
6. CONCLUSIÓN	73
BLIBLIOGRAFÍA.....	75

NOMENCLATURA

A	Sección de paso del aire
A_1	Sección inicial del tubo de Venturi
A_2	Sección de estrechamiento del tubo de Venturi
C_p	Calor específico a presión constante
g	Gravedad
G	Irradiancia
I	Corriente generada por una célula fotovoltaica, dada por $I = I_L - I_0 \cdot \exp\left(\frac{V+I \cdot R_s}{m \cdot v_t} - 1\right)$
I_0	Corriente de saturación del diodo
I_D	Corriente de diodo
I_L	Corriente fotogenerada
I_{mp}	Corriente en el punto de máxima potencia
I_p	Corriente de resistencia paralelo
I_{sc}	Corriente de cortocircuito
k	Constante de Boltzman
m	Factor de idealidad del diodo
\dot{m}	Flujo másico
P_1	Presión en la sección del tubo de Venturi
P_2	Presión en la sección de estrechamiento del tubo de Venturi
P_{atm}	Presión atmosférica
P_{mp}	Potencia eléctrica en el punto de máxima potencia
q	Carga del electrón
Q	Potencia térmica, dada por $Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$
R_{aire}	Constante universal de los gases ideales para el aire
R_{cable}	Resistencia del cable
R_p	Resistencia paralelo
R_s	Resistencia serie
R_x	Resistencia del sensor
S_f	Superficie de captación del módulo fotovoltaico
S_t	Superficie de captación del módulo térmico
T_{amb}	Temperatura ambiente
T_c	Temperatura de la célula en Kelvin
ΔT	Salto de temperatura entre la entrada y la salida del canal
V	Tensión en bornes de la célula fotovoltaica
V_{mp}	Tensión en el punto de máxima potencia
V_{oc}	Tensión de circuito abierto
v_m	Velocidad del aire en el tubo de Venturi
v_t	Voltaje térmico, dado por $v_t = \frac{k \cdot T_c}{q}$
ρ	Densidad del aire
η_{elect}	Rendimiento eléctrico, dado por $\eta_{elect} = \frac{P_{mp}}{G \cdot S}$
η_{term}	Rendimiento térmico, dado por $\eta_{term} = \frac{Q}{G \cdot S}$
η_{TOTAL}	$\eta_{TOTAL} = \eta_{elect} + \eta_{term}$

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se enmarca dentro de la transmisión del calor y más concretamente, en su aplicación a sistemas de refrigeración. Cada vez es más habitual la búsqueda de soluciones para el ahorro energético en el diseño y construcción de edificios basados en el aprovechamiento de la energía solar incidente para la climatización y ventilación. Este concepto es también aplicable a cualquier sistema de ventilación y climatización industrial, donde la reducción de la energía consumida es un factor determinante. Uno de los elementos influyentes en el rendimiento de estos sistemas es la humedad. El control de la humedad es vital en los sistemas de climatización y acondicionamiento de aire para procurar un estado de confort adecuado de los individuos y para preservar la integridad de ciertos elementos. Además, cambiar el estado térmico de un flujo de aire húmedo requiere de mayor aportación energética que para otro con menor nivel de humedad. Esto es debido a que la presencia de moléculas de agua en el aire aumenta la capacidad calorífica del mismo, es decir, la cantidad de energía necesaria para modificar su temperatura.

En los últimos años se ha experimentado un crecimiento, cada vez más notable, del uso de materiales desecantes en este ámbito. Uno de los dispositivos que integran esta tecnología es la rueda desecante. Este elemento, compuesto generalmente por una matriz de material desecante, se encarga de adsorber la humedad del aire. Sin embargo, el alcance de la saturación le impide continuar con el proceso de adsorción, de naturaleza superficial. Por este motivo, se somete a un proceso de regeneración donde se requiere un flujo de aire a temperaturas próximas a los 80°C. para obtener un foco caliente orientado a la regeneración de la rueda desecante se suele acudir a la energía solar en sus diferentes métodos de aprovechamiento, conformando las llamadas aplicaciones de refrigeración solar mediante desecantes. Se propone en este trabajo el empleo de energía solar térmica mediante el uso de aire como fluido caloportador, con distintas variantes, para su aplicación en la regeneración de ruedas desecantes.

1.1 Origen del estudio

Como ya se ha comentado anteriormente, el punto de partida de este estudio es la aplicación de la energía solar térmica de aire en la consecución de un foco caliente para la regeneración de ruedas desecantes, todo ello integrado en un sistema de climatización por enfriamiento evaporativo.

La rueda desecante es un dispositivo que dispone en su interior de un material desecante, tal como el gel de sílice o la zeolita, unido a un sustrato de fibra de vidrio, celulosa o aluminio. La rueda posee una geometría interna que fuerza la trayectoria del aire para un mayor aprovechamiento de la superficie del

desecante. El material desecante tiene la capacidad de adsorber las moléculas de agua presentes en el aire gracias a sus microporosidades. El proceso de adsorción, basado en la atracción superficial de partículas permite reducir la humedad del aire hasta que el desecante alcanza la saturación. Por este motivo, la rueda se divide en dos sectores circulares. Uno de ellos se destina a la circulación del aire procesado, es decir, del aire cuya humedad se desea reducir. El otro se destina a la circulación del aire de regeneración, el cual se encarga de desaturar el desecante para mantenerlo operativo en la zona de proceso. La rueda gira lentamente alternando el paso del desecante por los dos sectores. Para la regeneración de la rueda es preciso un flujo de aire de mayor nivel térmico, con una temperatura situada entre 80°C y 90°C.

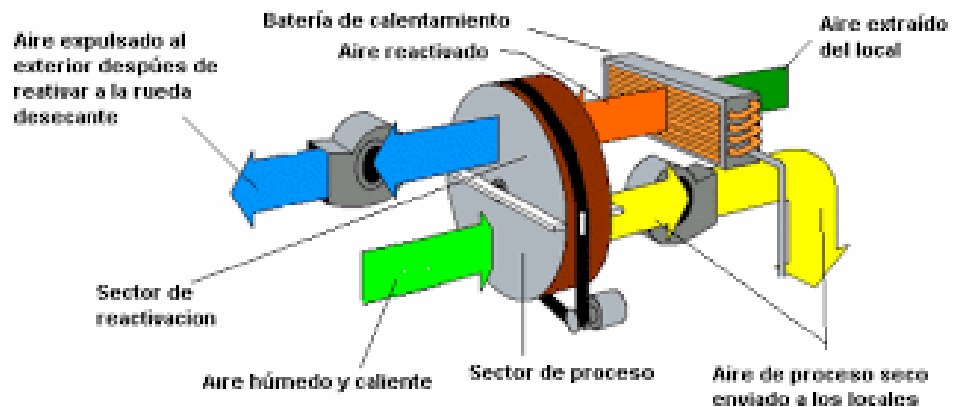


Figura 1.1. Esquema de flujos en una rueda desecante.

Entre las tecnologías de aprovechamiento de energía solar se suele recurrir, en este ámbito, a la energía solar térmica. Se usan básicamente dos tipos de colectores solares en función del fluido de trabajo: colectores solares de agua y colectores solares de aire. En el primer caso, se consiguen altos flujos de calor debido al uso de agua como fluido caloportador, el cual presenta mayor inercia térmica que el aire, consiguiendo así un mayor rendimiento en la transmisión y un almacenamiento térmico más efectivo. Sin embargo, la aplicación de esta tecnología al propósito planteado requiere, además, la incorporación de un intercambiador de calor agua-aire. Esto incrementa la complejidad de la instalación y el coste de la misma. Además, este tipo de instalaciones precisan de un mantenimiento continuo, viendo reducida su vida útil en regiones secas y áridas como ocurre en el sur de la península ibérica. Por su parte, los colectores solares de aire no requieren de un intercambiador de calor adicional, haciendo del sistema de refrigeración por desecantes un sistema más sencillo y compacto. Surge, entonces, la necesidad de analizar experimentalmente la capacidad de los sistemas de aprovechamiento de la energía solar térmica por aire en su aplicación a la regeneración de ruedas desecantes.

Se propone en este trabajo el estudio del sistema de refrigeración por aire de paneles fotovoltaicos y de un panel solar térmico como elementos capaz de apoyar al foco caliente necesario en la regeneración de ruedas desecantes. En este sentido, se da al panel fotovoltaico un uso distinto a aquél para el cual se diseñó, consiguiendo además la refrigeración del mismo y, por tanto, una

mejora de su eficiencia eléctrica. El uso de un colector solar térmico de aire en su forma convencional, se plantea como alternativa a los paneles fotovoltaicos, realizando una comparativa de ambos para determinar qué sistema es el más rentable en su totalidad.

Para dar respuesta al problema planteado se acude inicialmente a los datos experimentales obtenidos en trabajos anteriores, en concreto en el trabajo desarrollado por Juan Domingo González Teruel (2015). En este trabajo se utilizó el mismo sistema de paneles fotovoltaicos refrigerados por aire, haciendo pasar éste entre el panel y la superficie en la que se encuentra instalado. En el estudio de los datos de esta instalación no se pudo hacer una adquisición de ciertos valores como el gasto másico de la instalación, así como de los datos eléctricos de los paneles fotovoltaicos. Surge entonces la necesidad de actualizar la instalación con la que se trabajó además de la utilización de la placa solar térmica de aire para su posterior ensayo y análisis de resultados.

1.2 *Objetivos de resultados*

Este trabajo tiene como objetivo principal conocer el potencial térmico del sistema de ventilación y refrigeración por aire de una instalación fotovoltaica. Se establecen una serie de objetivos secundarios que permiten, en conjunto, la consecución del objetivo principal, entre los que se encuentran el análisis de datos experimentales previos, el diseño y construcción de una instalación solar térmica experimental, el ensayo de la misma y el análisis y evaluación de todos los resultados obtenidos en ambas instalaciones.

Se persigue la observación del comportamiento termodinámico de este tipo de instalaciones ante diferentes condiciones y configuraciones establecidas. El objetivo principal es evaluar la cantidad de energía térmica que se puede aprovechar del sistema a través del aire como fluido refrigerante, siendo de especial relevancia el salto de temperatura que se pueda producir en éste tras el proceso de ventilación, ya que el fin del estudio es proporcionar un incremento de temperatura del aire que para su aplicación en ruedas desecantes. Para tal fin, se plantea una instalación experimental compuesta por dos módulos fotovoltaicos situados en paralelo y elevados sobre una superficie de material aislante, dejando un canal de paso de sección rectangular entre el módulo y la superficie. En una de las dos configuraciones, se intercala, en el canal de paso del aire, una serie de obstáculos que modifican la trayectoria y el tiempo de residencia del aire bajo el módulo, con el objetivo de aumentar de la temperatura del aire a la entrada y salida del canal, la medida de la temperatura del módulo y de la superficie aislante y la cuantificación del caudal trasegado y de otras magnitudes permiten adquirir la información necesaria para cumplir con el objetivo principal del trabajo. Las tres configuraciones estudiadas son independientes y, para evitar la interferencia de agentes externos, los laterales de cada canal quedan sellados, de manera que existe solo una sección de entrada y una sección de salida del aire en cada caso.

La búsqueda de un conocimiento amplio acerca de la respuesta de esta instalación ante diferentes condiciones lleva a la necesidad de establecer el barrido de ciertas variables, en principio influyentes. Uno de los factores críticos, en este sentido es la velocidad del aire bajo el módulo. Por este motivo, se plantea analizar el comportamiento de la instalación para diferentes velocidades del aire. Se ensayan las configuraciones de las placas fotovoltaicas en convección libre y en convección forzada, y la placa solar térmica de aire en convección forzada. Para llevar a cabo la convección forzada se instala en cada caso un ventilador en aspiración con un regulador de velocidad que permite generar distintos caudales de trabajo.

En definitiva, este estudio tiene el propósito de evaluar la posibilidad de llevar a cabo un aprovechamiento térmico eficiente de una instalación fotovoltaica a partir de pequeñas modificaciones en la misma, de manera que una instalación ya existente, sin necesidad de verse sometida a grandes cambios, mejore su rendimiento energético de forma global, además de comparar este rendimiento energético con el que se obtiene de una placa solar térmica. Asimismo, a pesar de tratarse de un estudio orientado a la regeneración de ruedas desecantes, los resultados obtenidos se pueden extrapolar a cualquier otra aplicación en la que se requiere de una etapa de precalentamiento.

Se analiza a continuación un resumen de los objetivos planteados.

Objetivo principal:

- Evaluar el potencial térmico del sistema de refrigeración de paneles fotovoltaicos.
 - Determinar el salto de temperatura del aire en el proceso de refrigeración.
 - Caracterizar el rendimiento térmico de la instalación.
 - Comparar dichos rendimientos térmicos con el obtenido de en la instalación formada por el panel solar térmico.

Objetivos secundarios.

- Proponer mejoras que incrementen el potencial térmico del sistema de refrigeración.
- Actualizar la instalación experimental utilizada en trabajos anteriores.
- Diseño y construcción de la instalación solar térmica.
- Analizar el comportamiento eléctrico de los paneles fotovoltaicos en su refrigeración.
- Adquirir conocimientos referentes al procedimiento de ensayo de instalaciones experimentales.

2. ESTADO DEL ARTE

En todo estudio es necesario realizar una revisión bibliográfica previa para situar el problema planteado dentro de las líneas de conocimiento existentes y evaluar su grado de innovación y trascendencia. Por este motivo se presenta, a continuación, un análisis de trabajos e investigaciones relaciones con nuestros propósito.

Resulta conveniente clasificar los estudios bibliográficos desarrollados sobre el tema en cuatro bloques diferentes. Por un lado, es necesario profundizar en el funcionamiento de las ruedas desecantes y en su aplicación a sistemas de refrigeración, además de conocer sus aspectos más críticos, ya que los resultados de este estudio se pretenden aplicar en las mismas. Por otro lado, como el sistema planteado en este estudio se basa originalmente en la refrigeración de paneles fotovoltaicos, conviene conocer la influencia de la temperatura en el funcionamiento de los mismos para entender la importancia de este proceso y su alcance. Por su parte, se deben estudiar los diferentes métodos de refrigeración de los paneles fotovoltaicos, haciendo especial hincapié en el uso de aire como fluido refrigerante, permitiéndonos ver el comportamiento del fluido y los procedimientos y métodos empleados para llevar a cabo este proceso. Finalmente, es necesario hacer una revisión de aquellos trabajos que propongan el uso de paneles fotovoltaicos para la regeneración de ruedas desecantes, observar las distintas alternativas planteadas y las características que presentan.

2.1. Ruedas desecantes

El control de la humedad es uno de los factores más importantes a tener en cuenta en los sistemas de climatización y acondicionamiento de aire, tanto a nivel doméstico como industrial. De él depende conseguir un estado de confort adecuado de los individuos y preservar la integridad de ciertos elementos. Los materiales desecantes han cobrado especial importancia en los procesos de deshumidificación. Uno de los elementos con un uso creciente en los últimos años es la rueda desecante.

Estos dispositivos se suelen acoplar a sistemas de refrigeración por enfriamiento evaporativo (Preisler y Brychta, 2012). Su funcionamiento depende de diversos factores. Entre ellos se encuentra la naturaleza del material desecante que compone la rueda. Numerosos estudios, como el de Enteria et al. (2012), se encargan de analizar la eficiencia en el proceso de deshumidificación para diferentes desecantes empleados. En el caso citado, se compara la Sílica-Gel (SiO_2) con el dióxido de titanio (TiO_2), obteniendo mejores resultados con éste último al conseguir menores ratios de humedad y menor temperatura del aire de proceso. Otro de los aspectos estudiados en torno a su eficiencia es la velocidad a la que se hace girar la rueda. Ruivo et al

(2014) muestra con sus simulaciones en TRNSYS que las velocidades de rotación intermedias son las óptimas en este aspecto.

Otros estudios, como el de Bourdoukan et al. (2009) tratan de maximizar la eficiencia de una instalación de este tipo en cualquier época del año e independientemente de las condiciones exteriores. En este caso se comparó el funcionamiento de un ciclo de desecante convencional y en modo recirculación. Obtuvo que mientras que el ciclo convencional es muy sensible a cualquier variación de las condiciones ambientales exteriores, trabajando con un ciclo de recirculación se obtenía un funcionamiento más estable de esas mismas variaciones.

Finalmente, en cuanto al empleo de las llamadas aplicaciones de refrigeración solar mediante desecantes, cabe citar que existe una tendencia al uso de las tecnologías de captación solar para abastecer el proceso de regeneración de las ruedas desecantes. Diversos estudios como el de Henning et al. (1999) muestran que el empleo de energía solar térmica para asistir un sistema de refrigeración por desecantes resulta una opción bastante rentable económicamente hablando para aquellas zonas que dispongan de un clima cálido y húmedo. Por su parte, el empleo de energía solar fotovoltaica en este mismo sentido se aborda más adelante.

2.2. Influencia de la temperatura en el funcionamiento de paneles fotovoltaicos.

Las células fotovoltaicas comerciales actuales no son capaces de convertir más del 15-20% de la energía solar incidente en energía eléctrica, valores que dependen esencialmente del tipo de célula. El resto de energía es tanto reflejada como absorbida en forma de calor. Esto ocasiona un aumento de la temperatura de funcionamiento de la célula. En la siguiente figura se muestra un esquema del intercambio de calor existente entre el módulo fotovoltaico y el ambiente (Skoplaki y Palivos, 2009).

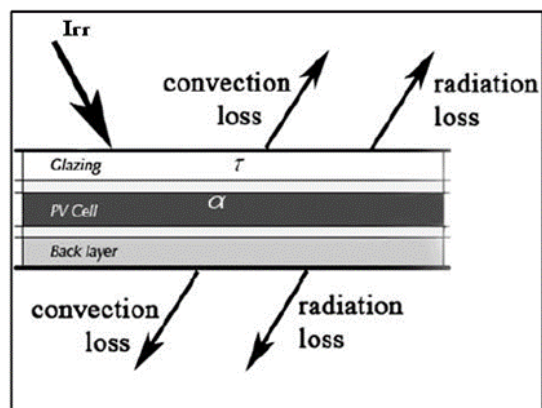


Figura 2.1. Esquema simple de energía en un módulo fotovoltaico (Skoplaki y Palivos, 2009).

Las células fotovoltaicas se utilizan hoy día en aplicaciones muy variadas que las llevan a estar expuestas a valores de temperatura que podemos situar entre los 10 y los 70°C, según la región en la que se encuentren y las condiciones de funcionamiento.

Altos valores de temperatura en los paneles fotovoltaicos se traducen en un efecto negativo en sus parámetros eléctricos, tales como la tensión de circuito abierto (V_{oc}), la intensidad de cortocircuito (I_{sc}) y, consecuentemente el rendimiento (η). Por lo tanto, la temperatura juega un papel importante en el proceso de conversión de la radiación solar en energía eléctrica. Tanto el rendimiento como la potencia generada dependen de la temperatura de funcionamiento de la célula, disminuyendo ambas con el aumento de ésta. La eficiencia en la conversión de energía desciende 0,4 – 0,5% por cada grado que asciende la temperatura (Brinkworth et al, 1997).

De forma básica, la radiación incidente en una célula fotovoltaica es la principal culpable de que ésta genera una fotocorriente, obteniendo así energía eléctrica, y también de que su temperatura aumente. Sin embargo, la radiación no es la única variable que afecta a la temperatura alcanzada por la célula. Condiciones ambientales como la temperatura ambiente o la velocidad del viento, así como otros factores entre los que se pueden encontrar la conductividad del material o las características eléctricas, tienen cierta influencia en este aspecto.

Las características eléctricas de una célula fotovoltaicas dependen, en gran parte, del material con el que se fabriquen. Se ha estudiado que la eficiencia en la conversión de energía por parte de las células fotovoltaicas se ve reducida cuando la temperatura de la célula es elevada. Este fenómeno, según Maycock y Stirewalt (1985) es más pronunciado en células de silicio que en células fabricadas de otro material como el arseniuro de galio.

En general, la dependencia del rendimiento de módulos fotovoltaicos con la temperatura es un problema muy estudiado y analizado. Kozak et al. (2009) establecen diferentes ecuaciones teóricas que permiten determinar la temperatura, eficiencia y energía producida por el panel a partir de variables características de la célula y de variables ambientales. Además, contrastan las correlaciones teóricas con valores experimentales medidos. Se puede observar cómo los valores medidos del rendimiento del panel son inferiores a los teóricos, presentando una caída brusca para temperaturas superiores a los 44°C. Para valores inferiores, la dependencia se puede considerar prácticamente lineal.

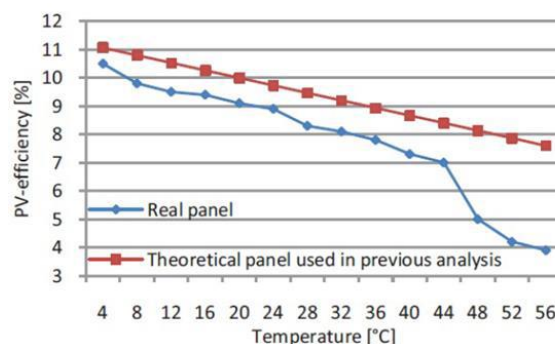


Figura 2.2. Efecto de la temperatura de funcionamiento de un panel fotovoltaico sobre su eficiencia, comparando resultados experimentales con el modelo teórico (Kozak et al., 2009).

En definitiva, la temperatura de funcionamiento de las células fotovoltaicas afecta negativamente a la producción eléctrica. Se ha observado en este análisis la influencia que tiene la temperatura sobre ciertas variables inherentes al comportamiento eléctrico de la célula.

2.3. Sistema de refrigeración de paneles fotovoltaicos

Vista la negativa influencia de la temperatura en el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos, surge la necesidad de analizar los métodos de refrigeración estudiados y empleados. Existen básicamente dos métodos a seguir: la refrigeración pasiva y la refrigeración activa. La refrigeración pasiva se basa en la utilización de sólidos de alta conductividad térmica o en el empleo de elementos tales como aletas para la disipación de calor. Incluso en los casos más complejos, se plantea el cambio de fase. La aplicación de esta investigación trata, además, obtener un flujo de aire en unas condiciones térmicas determinadas. Por este motivo, resulta más interesante que el análisis se centre en el estudio de la refrigeración activa, que consiste en el empleo de algún tipo de fluido, como aire o agua, para reducir la temperatura del panel.

A continuación se describen diferentes técnicas de refrigeración activa, haciendo especial hincapié en aquellas en las que se emplee aire como fluido caloportador, que es el caso que nos atañe.

2.3.1. Agua como fluido caloportador

En la refrigeración de los paneles fotovoltaicos líquidos, el más utilizado es el agua. Una de las razones del uso del agua como fluido refrigerante es su bajo índice de refracción ($n=1,3$), valor intermedio entre el vidrio ($n=1,5$) y el aire ($n=1$), siendo también el fluido más abundante en la Tierra y, por tanto, el menos costoso. Además de ayudar a mantener limpia la superficie, el agua reduce la reflexión entre el 2 y el 3,6% disminuyendo la temperatura de la célula y aumentando su rendimiento.

Abdolzadeh y Ameri (2008), estudiaron el efecto de la pulverización de agua sobre paneles fotovoltaicos en una instalación de bombeo, lo que producía una disminución en la temperatura de la célula y de la reflexión (Short y Oldach 2003; Argaw 1995). Se observó que el agua producía un aumento del rendimiento en torno al 3%, tanto para la transmitancia óptica como la generación eléctrica.

Otros estudios, como el de Krauter (2004), optan por hacer circular un flujo de agua en forma de capa delgada sobre la cara frontal del módulo fotovoltaico. El agua absorbe gran parte del calor generado por el módulo y, además, su evaporación contribuye aún más a la disminución de la temperatura. Se consiguen mejoras de rendimiento de hasta el 12%. La capa de agua se generaba a través de su rocío sobre la cara anterior del panel, mediante una serie de boquillas situadas en la parte superior tal como se puede ver en la Figura 2.3.

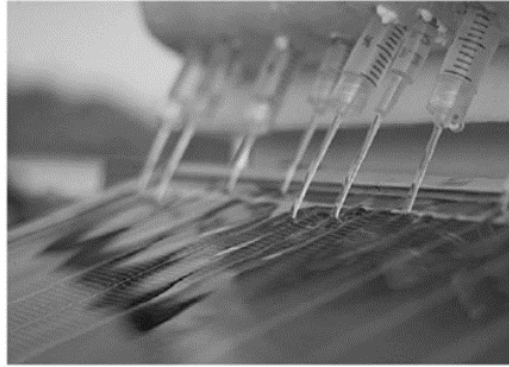


Figura 2.3. Creación de la capa de agua sobre el módulo fotovoltaico a través de las boquillas (Krauter, 2004).

Otro método de refrigeración de los paneles empleando agua es haciéndola pasar por su parte posterior, como estudió Wilson (2007), que además lo llevó a cabo aprovechando un salto hidráulico. En su estudio se logra obtener un modelo matemático que se ajusta a los resultados experimentales, obteniendo una reducción de la temperatura desde los 60°C hasta los 28°C, lo que supone un aumento del 12,8% de la eficiencia sin reducir la tensión de circuito abierto, V_{oc} . Esta reducción de 32°C en la temperatura de la célula se compara con los 22°C obtenidos por Krauter (2004), que hacía circular el agua por la parte frontal del módulo.

Brogren y Karlsson (2002) hacen un balance de los distintos sistemas de refrigeración por agua estudiados y sugieren que la circulación de agua mediante conductos por la parte de atrás de la célula es la más eficaz. Sin embargo, como se ha visto, Krauter (2004) o Abdolzadeh y Ameri (2008), demuestran más tarde que la distribución de agua en la parte frontal del panel consigue buenos resultados. Este método, por el contrario, corre el riesgo de que se creen depósitos de cal sobre la cara de las células, reduciendo por tanto su eficacia.

Conviene finalmente señalar que, aunque se produzcan importantes mejoras de eficiencia empleando agua como fluido refrigerante, para implementar este tipo de sistemas se requiere de equipos que incluyan bombas, en la mayoría de los casos, y es necesaria una labor de mantenimiento continua de conducciones y calidad de agua. Es preciso recordar que puede existir el riesgo de aparición de bacterias, como la legionela, al tratarse de circuitos cerrados de agua sin renovar y a altas temperaturas. Por este motivo, la refrigeración por aire, que veremos a continuación, puede suponer un salto de sencillez y facilidad en la refrigeración de paneles fotovoltaicos.

2.3.2. Aire como fluido caloportador

Existen numerosos estudios que tratan la refrigeración de paneles fotovoltaicos empleando aire. Este proceso se puede llevar a cabo mediante convección natural o convección forzada, presentando cada uno de ellos sus ventajas e inconvenientes.

El presente trabajo se origina a partir del estudio desarrollado por Mazón (2014), el cual analiza la variación del rendimiento eléctrico de paneles fotovoltaicos al ventilarlos con aire 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, variando también la relación de aspecto del canal. La velocidad máxima de ensayo fue de aproximadamente 10 m/s. La instalación experimental con la que se trabajó se puede ver en la Figura 2.4. en paralelo se ensayó también un panel fotovoltaico de las mismas características, pero sin ningún canal de refrigeración bajo el mismo para determinar las mejoras logradas con la ventilación. Algunos resultados muestran comportamientos como el aumento del 19% de la potencia generada entre niveles de velocidad del aire de refrigeración de 6 m/s y de 0,5m/s, correspondiendo este último valor a convección natural, para el módulo refrigerado. Se muestra, además que a mayores valores de relación de aspecto se consigue reducir la temperatura del panel en mayor medida.



Figura 2.4. *Instalación experimental. Panel simple (izquierda), panel con canal de refrigeración (derecha) (Mazón, 2014)*

Otro estudio similar al descrito es el que desarrollaron Tiwari et al. (2006), llevando a cabo la evaluación del rendimiento de los módulos fotovoltaicos integrando un conducto de aire en su cara posterior, del mismo modo que Mazón (2014), con lo que se obtenía una mayor eficiencia en la generación de energía eléctrica.

Pr norma general, los métodos de refrigeración por aire de paneles fotovoltaicos suelen implementarse con circulación de éste bajo el panel a través de canales o conductos, haciendo que el aire contacte con la cara posterior del módulo. En este sentido, algunos estudios se centran en analizar el comportamiento térmico del sistema, tal como se pretende en el presente estudio.

Brinkworth (2000) hace una estimación del flujo y de la transferencia de calor que tienen en un conducto inclinado de refrigeración de módulos fotovoltaicos. Analiza el

comportamiento del flujo en este conducto ante diferentes condiciones de convección natural, según la presencia de viento y en función de los valores de temperatura. Relaciona las distintas variables que toman parte en el problema con la generación de regímenes laminares o turbulentos en el interior del canal.

Por su parte, Moshfech y Sandberg (1998) realizan un estudio similar al de Brinkworth (2000), aunque desde un punto de vista diferente, llegando a describir ciertos comportamientos térmicos en el canal de ventilación del panel referentes a la distribución de temperaturas en el mismo. Se expone que el perfil de velocidad del aire en el interior del conducto presenta unos máximos 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.

Un trabajo bastante relacionado con las líneas planteadas en el estudio presente es el de Tonui y Tripanagnostopoulos (2007). Este trabajo trata de buscar un sistema aplicado a paneles fotovoltaicos convencionales que mejore la transmisión de calor entre el panel y el aire que se hace pasar bajo el mismo. El objetivo es, al igual que en nuestro caso, obtener una modificación sencilla y de bajo coste que permita su aplicación a una instalación ya existente. Se propone, por un lado, intercalar entre el panel y la superficie, una plancha metálica que mejore la transferencia de calor de las paredes del canal al flujo de aire. Otra de las mejoras propuestas consiste en unas aletas metálicas rectangulares situadas en la superficie sobre la que se instala el panel, aumentando el área involucrada en la transmisión del calor. Colocar las aletas en la parte posterior del panel produce un mayor rendimiento térmico. Sin embargo, lo que realmente pretende este estudio es adoptar una solución sencilla que ponga la menor complejidad de instalación posible y que, a la vez, mejore la eficiencia energética.

Uno de los campos de estudio más extendidos dentro de la energía solar fotovoltaica es la integración de la misma en edificios, las aplicaciones conocidas como BIPV (Building Integrated Photovoltaics). Estos estudios pueden aportar información desde el punto de vista de la energía térmica en este tipo de instalaciones, acercándose en mayor medida al objetivo de este trabajo. Sanvicente (2013) estudia el potencial térmico de una instalación fotovoltaica integrada en un edificio, con la idea de dar uso a la morfología típica de módulos fotovoltaicos para favorecer la transferencia de calor al aire o a la superficie sobre la que se instala el módulo, a la vez de mejorar la eficiencia eléctrica de los mismos. En este caso, diferentes configuraciones son ensayadas, modificando las condiciones térmicas de contorno y la inclinación del panel, con el objetivo de determinar la situación que mejores prestaciones térmicas aporte. Por su parte, Sandberg y Moshfech (2002) analizan el comportamiento del flujo de aire en módulos fotovoltaicos situados en fachadas de edificios, identificando el efecto que produce la geometría del canal de paso del aire, así como la situación de los paneles.

Finalmente, una de las tecnologías ya existentes es la de paneles solares híbridos, los cuales combinan el efecto del panel solar térmico de aire con el del panel fotovoltaico en un mismo módulo. Entre los múltiples estudios dedicados a este propósito,

encontramos el de Srinivas y Jayaraj (2013). Este estudio ensaya un prototipo experimental que integra en un mismo módulo las células fotovoltaicas y una serie de canales de paso del aire. Evalúa el rendimiento eléctrico y térmico del sistema, implementando las condiciones de ensayo y el sistema de medición de variables de una forma muy similar a la prevista en nuestro trabajo.

3. LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Una vez presentado el problema general y analizados los estudios relacionados con el mismo, se describe a continuación el proceso de diseño llevado a cabo para la implementación experimental así como las modificaciones y actualizaciones llevadas a cabo en la instalación existente.

Como se describe en capítulos anteriores, la función principal del sistema es aumentar la temperatura del aire empleado en la ventilación de paneles fotovoltaicos.

La instalación experimental consta de dos placas fotovoltaicas y de una placa solar térmica. Para potenciar el efecto del aumento de temperatura en una de las placas fotovoltaicas se introducen en el canal de refrigeración una serie de placas intercaladas que obstaculizan el paso del aire. Esto aumenta el tiempo de residencia del aire bajo el panel y permite una transmisión de calor más efectiva, aumentando así el salto de temperatura del aire entre la entrada y la salida. De este modo en la instalación tenemos tres configuraciones distintas, la configuración A, la cual dispone de un canal de refrigeración libre de paso para el aire, la configuración B, es aquella en la que se intercalan las placas obstaculizantes, y la configuración C, que hace referencia a la placa térmica de aire.

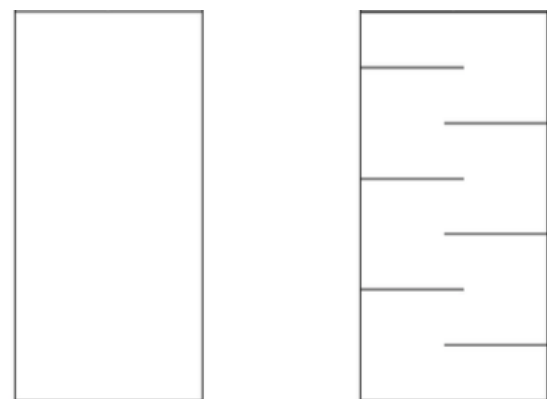
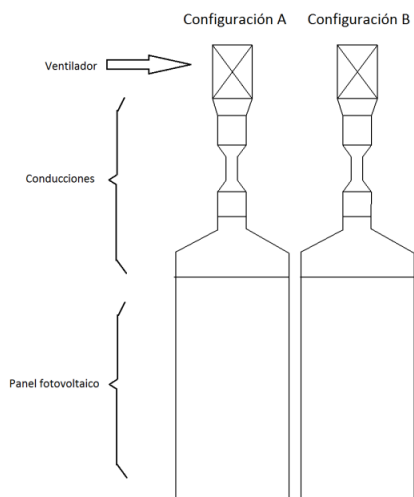


Figura 3.1. Vista en planta del esquema general de la instalación experimental

Figura 3.2. Esquema del canal de aire en configuración A y configuración B.

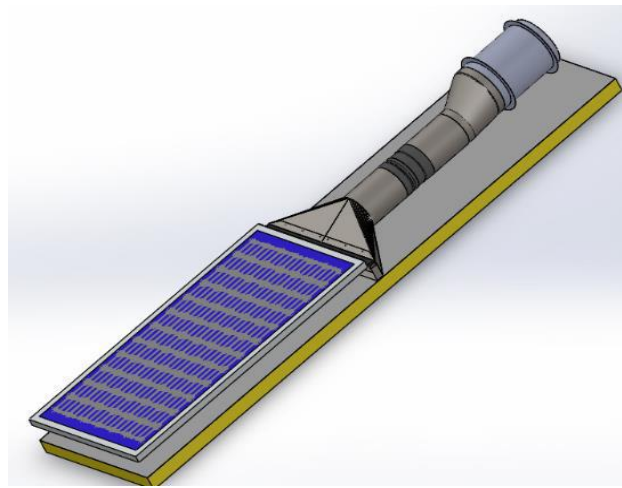


Figura 3.3. Simulación en 3D de la configuración A

Bajo los paneles y en paralelo a los mismos, se dispone una placa aislante a una cierta distancia, quedando así un canal rectangular para el paso del aire entre el aislante y los paneles fotovoltaicos. El canal bajo cada panel es independiente y queda separado del otro por una pared intermedia. La parte alta del canal, que constituye la salida del aire, se conecta a través de una serie de conducciones a un ventilador de sección circular, por lo que se pueden distinguir dos secciones de distinta naturaleza en el sistema: la sección rectangular bajo los paneles y la sección circular entre los paneles y el ventilador.

A continuación se muestra la imagen de la placa térmica utilizada en nuestro estudio, con los datos de esta se realiza una comparativa con las otras dos configuraciones de manera que se pueda observar que rendimientos son más rentables para nuestro fin.



Figura 3.4. Imagen de la placa Solar Térmica utilizada en la instalación

Para lograr el objetivo principal de este estudio es necesario caracterizar la potencia térmica extraída del sistema a través del aire en el proceso de refrigeración. Esta potencia es función de las condiciones ambientales, del gasto másico de aire y del salto de temperatura que se produce entre la entrada y la salida del sistema, por lo que también será objeto de estudio la determinación de estas variables. Por otro lado,

resulta interesante conocer la distribución de temperaturas en las superficies que componen el sistema, permitiendo así, realizar un estudio térmico exhaustivo. Como un objetivo secundario, presenta especial interés aprovechar el proceso experimental para determinar la mejora de la eficiencia eléctrica de los paneles fotovoltaicos en su proceso de refrigeración.

Pasamos ahora a establecer una selección de variables susceptibles de ser medidas para caracterizar el problema. El siguiente paso es establecer los rangos de estas variables en función de las condiciones de ensayo previstas. A continuación se hace una presentación de la instrumentación utilizada. Posteriormente se describe el diseño del sistema de adquisición y acondicionamiento de datos.

3.1. Selección de variables a medir

El objetivo principal del estudio es determinar la potencia térmica obtenida de la instalación. Su valor viene dado por

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

Donde \dot{m} representa el gasto másico en el interior del canal, C_p el calor específico del aire a presión constante y ΔT el salto de temperatura del aire entre la entrada y la salida.

El valor del gasto másico viene determinado, a su vez, por

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v_m,$$

donde ρ representa la densidad del aire, A la sección de paso del mismo y v_m su velocidad media.

Por su parte, para el cálculo de la densidad del aire se recurre a condiciones atmosféricas, quedando su expresión del siguiente modo:

$$\rho = \frac{P_{atm}}{R_{aire} \cdot T_{amb}},$$

siendo P_{atm} la presión atmosférica, R_{aire} la constante universal de los gases ideales para el aire y T_{amb} la temperatura ambiente.

Una función obtenida a partir de la potencia térmica es el rendimiento térmico, el cual viene expresado por

$$\eta_{term} = \frac{Q}{G \cdot S}$$

Donde G es la Irradiancia y S la superficie del panel fotovoltaico o térmico expuesta a la misma.

Como objetivo secundario de este estudio, se planteaba el análisis de la respuesta eléctrica de los paneles. El indicador más representativo al que se puede acudir es el rendimiento eléctrico.

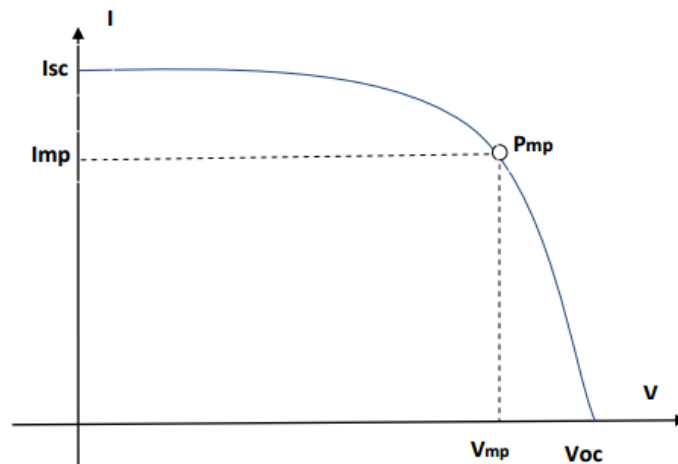


Figura 3.5. Curva I-V de un módulo fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos presentan una curva característica (curva I-V), tal como se muestra en la Figura 3.5. donde se enfrentan su intensidad y su tensión de funcionamiento medidos experimentalmente en unas condiciones determinadas de radiación y de temperatura.

Variando el punto de funcionamiento del panel desde la intensidad de cortocircuito, I_{sc} , hasta la tensión de circuito abierto, V_{oc} , se pueden medir diversos pares de valores I-V que, interpolando, dan lugar a la curva I-V.

El punto de funcionamiento del panel en la curva delimita, como vértice superior derecho, un rectángulo cuya área se encuentra geoméricamente relacionada con la potencia generada por el panel. Existe un determinado punto de funcionamiento, denominado punto de máxima potencia P_{mp} , que cumple que el área del rectángulo descrito, tal como se muestra en la Figura 3.5, es máxima. Los valores de tensión e intensidad alcanzados por el panel en ese punto se corresponden con la tensión de máxima potencia V_{mp} , y la intensidad de máxima potencia I_{mp} , respectivamente. El producto de ambas variables define la potencia máxima del panel en esas condiciones:

$$P_{mp} = V_{mp} \cdot I_{mp} ,$$

Para determinar el punto de máxima potencia es necesario acudir al circuito simplificado de la célula solar.

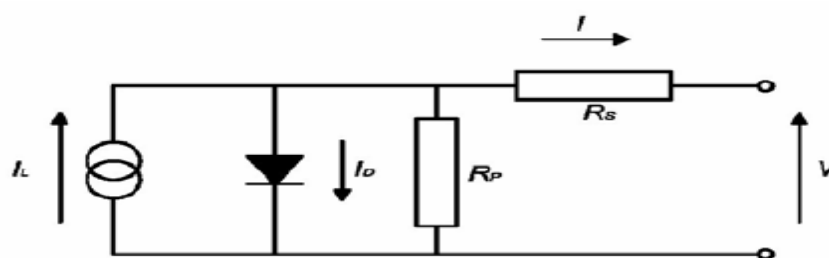


Figura 3.6. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica.

El comportamiento de una célula cuando funciona como generador de corriente puede explicarse como la diferencia entre la corriente fotogenerada I_L , debida a la generación de portadores en la iluminación, y a la corriente del diodo I_D , que corresponde a la corriente en oscuridad por la recombinación de portadores que produce el voltaje externo. Si se considera el valor de la resistencia paralelo R_p muy elevado, como suele ocurrir en la mayoría de los casos, se puede despreciar el término de corriente paralelo I_p y la corriente generada por la célula quedaría:

$$I = I_L - I_0 \cdot \exp\left(\frac{V+I \cdot R_s}{m \cdot vt} - 1\right),$$

Donde I_L es la corriente fotogenerada; I_0 es la corriente de saturación del diodo; R_s es la resistencia serie; m es el factor de idealidad del diodo; vt es el voltaje térmico ($vt=k \cdot T_c/q$; k es la constante de Boltzman, T_c la temperatura de la célula en Kelvin y q la carga del electrón).

La potencia es, por tanto:

$$P = V \cdot I = V \cdot I_L - V \cdot I_0 \cdot \exp\left(\frac{V+I \cdot R_s}{m \cdot vt} - 1\right),$$

El punto de máxima potencia es aquél en el que la derivada de la potencia es nula. El valor de la tensión en el punto de máxima potencia V_{mp} se obtiene entonces de esa ecuación.

$$\frac{dP}{dV} = 0$$

Se define, el rendimiento eléctrico de un panel fotovoltaico como el cociente entre la potencia máxima que puede generar en unas condiciones determinadas y la potencia lumínica captada en dichas condiciones:

$$\eta_{elect} = \frac{P_{mp}}{G \cdot S},$$

Finalmente realizaremos un análisis del rendimiento total aportado por las configuraciones A y B, el cual será la suma de los rendimientos Térmicos y Eléctricos conseguidos.

$$\eta_{TOTAL} = \eta_{elect} + \eta_{term},$$

De esta forma, se establece una lista de variables primarias que es necesario medir para trabajar con las ecuaciones planteadas.

Condiciones ambientales

Las variables ambientales empleadas en el desarrollo de este estudio son cinco. Dos de ellas, la temperatura ambiente, T_{amb} , y la presión atmosférica, P_{atm} , se requieren para el cálculo de la densidad del aire. Además, la temperatura ambiente aporta información acerca del estado térmico del aire a la entrada del canal de ventilación. En tercer lugar encontramos la Irradiancia. Esta variable resulta muy útil para visualizar el

comportamiento del sistema con su variación, ya que de ella depende la energía de entrada en el mismo. Su medida resulta imprescindible para determinar los rendimientos térmico y eléctrico. Por otra parte, la medida de variables tales como la velocidad y la dirección del viento resultan necesarias para evaluar su efecto sobre el sistema.

Temperatura

Para calcular la potencia térmica obtenida del sistema es necesario medir la temperatura del aire a la entrada y a la salida del canal. Además, como se comentaba al inicio de este capítulo, la medida de la temperatura de la superficie del módulo fotovoltaico en la cara orientada al interior del canal y la medida de la temperatura de la superficie del material aislante sobre el que se instala resultan de especial interés para conocer en profundidad el comportamiento térmico del sistema y de algunos sensores. Se busca, en este sentido, caracterizar el perfil térmico en distintas zonas y analizar la distribución de temperaturas en el sistema.

Velocidad

La velocidad del aire en el canal es uno de los factores determinantes de este estudio. A parte de ser una de las variantes propuestas en el ensayo de la instalación, su medida nos aportará información relevante para entender el comportamiento de variables como el gasto másico en la instalación.

Presión

La presencia de obstáculos en el canal de la configuración B va a producir, una pérdida de carga a considerar, del mismo modo, debido al diseño de la configuración C, en la placa solar térmica tendremos otros ratios de presión a la salida del sistema diferentes a tener en cuenta. Para establecer el flujo forzado se van a requerir distintas condiciones en cada una de las dos configuraciones propuestas y los niveles de presión que se van a generar en los canales no van a ser iguales. Se proyecta la configuración B como una mejora del sistema básico, pero se prevé que la sobrepresión que se pueda producir en el interior del canal, en este caso, pueda resultar un efecto negativo, tanto para la integridad de la instalación como para la energía necesaria en la generación del flujo forzado. Con el fin de caracterizar este efecto, surge la necesidad de medir la presión para cuantificar la pérdida de carga en las tres configuraciones y comparar así los efectos que se producen en cada una.

Variables eléctricas

Para determinar el rendimiento eléctrico de los paneles fotovoltaicos es necesario conocer la potencia que generan en el punto de máxima potencia. Para lograr este fin es necesario trazar la curva I-V del panel, donde quedan implícitos los valores de tensión e intensidad en el punto de máxima potencia.

3.2. Equipo utilizado

A continuación se desglosa el equipo utilizado en función de la variable a medir y se describen sus características.

Se hace una diferencia entre:

- a) Condiciones ambientales: aquellos instrumentos que nos permiten obtener los valores de radiación solar y otras variables meteorológicas representativas.
- b) Variables de operación: medición de los parámetros propios específicos que posibilitan la caracterización de la instalación experimental del estudio.
- c) Otros elementos de la infraestructura: componentes de la instalación, tales como los paneles fotovoltaicos y el panel térmico, o los ventiladores, que son necesarios para desarrollar el estudio.

Algunos de los elementos utilizados en este estudio habían sido utilizados en estudios anteriores, por lo que tras la comprobación de su correcto funcionamiento han sido reutilizados en el nuestro. En algunos casos el paso del tiempo ha provocado que algunos elementos no funcionasen correctamente, por lo que han sido reparados o reemplazados por otros. A lo largo de este epígrafe se expondrá cuál de ellos ha sido reemplazado y/o reasignado a otro punto para facilitar labores de actualización de la instalación experimental.

3.2.1. Condiciones ambientales

Temperatura ambiente

La medida de temperatura ambiente se realiza mediante un transductor que emplea un sensor de temperatura Pt1000 clase A (Figura 3.5.), basado en la variación de la resistencia del platino con la temperatura. Para obtener el dato de temperatura, el transductor lleva incorporado un detector de temperatura por resistencia (RTD). En este caso se trata de una Pt1000 clase A, DDIN-EN 60571. Este tipo de RTD se caracteriza por presentar una resistencia de 1000Ω cuando se encuentra a 0°C . La principal característica del platino en este sentido es que su resistencia se comporta de una forma prácticamente lineal con la temperatura, lo que permite conocer el valor de la temperatura en función de su resistencia. En cuanto a la precisión, alrededor de los 0°C , Clase A es $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ y Clase B es $\pm 0.30^{\circ}\text{C}$.



Figura 3.7. Sensor de temperatura ambiente

La normativa recoge que el sensor no debe estar expuesto a la radiación solar directa para efectuar la medida, sino que debe encontrarse sombreado respecto a la misma. El transductor lleva incorporado como accesorio una pantalla o protector de radiación solar, tal como se puede observar en la esquina superior derecha de la Figura 3.6.

A continuación se resumen las características del sensor de temperatura ambiente.

Instrumento	SENSOR Tª AMBIENTE
Ref.	TAHR
FABRICANTE	E+E ELEKTRONIK
MODELO	EE21-FT1A56/T24
Tipo de sensor	PT1000 Clase A
Precisión	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ a 20°C $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ a 0°C y 45°C
Alimentación	10-35 Vcc
Salida	0-1 Vcc

Tabla 3.1. Resumen de características del sensor de temperatura ambiente

NOTA: en todas las tablas de características de equipos mostradas en este capítulo, el identificativo "Ref". hace referencia al nombre que se adjudica a cada elemento de la instalación para su identificación en la misma. En el caso de que aparezcan varios nombres quiere decir que se emplean tantos elementos de ese tipo como nombres haya.

Presión atmosférica

Para medir la presión atmosférica se emplea un barómetro electrónico (Figura 3.6) que utiliza un sensor piezoresistivo compuesto por una membrana cuya deflexión nos proporciona el valor de la medida de la presión. La señal de salida de este sensor está condicionada para proveer un voltaje o corriente de salida linealmente proporcional a la presión atmosférica.



Figura 3.8. Barómetro de presión atmosférica

Las especificaciones técnicas del sensor se recogen en la Tabla 3.2.

Instrumento	BARÓMETRO
Ref.	PA
Fabricante	DELTA OHM
Modelo	HD 9408T BARO
Tipo de sensor	Piezoresistivo
Rango de funcionamiento	800 a 1100 mbar
Precisión	$\pm 0,4$ mbar a 20°C
Temperatura de operación	-40 a +60°C
Alimentación	9-30 Vcc
Salida	0-5 Vcc
Demanda de corriente	14,5 mA

Radiaci **Tabla 3.2.** Resumen de características del barómetro de presión atmosférica

Para medir la radiación solar es necesario disponer de un piranómetro. En este caso se va a medir la radiación global, y para ello se utiliza un equipo basado en el efecto termoeléctrico, que consiste en la conversión directa de la diferencia de temperatura a voltaje eléctrico. El piranómetro utilizado se encuentra en la estación meteorológica situada en las instalaciones del edificio perteneciente a la Universidad Politécnica de Cartagena, ELDI, debido a que el piranómetro utilizado en estudios anteriores en nuestra instalación no se encuentra disponible, se comprobó su funcionamiento y se detectó que el problema residía en el amplificador de corriente situado a la salida del mismo, puesto que la corriente medida en la salida del amplificador era nula. La falta de tiempo imposibilitó la reparación de este elemento, por lo que se utilizó el dispositivo ya descrito en la estación meteorológica más cercana a nuestra instalación.



Figura 3.9. Piranómetro de radiación global.

Velocidad y dirección del viento



Figura 3.10. Sensor de velocidad y dirección del viento

Para la medida de la velocidad y dirección del viento se dispone de un anemómetro ultrasónico, tal como se muestra en la Figura 3.9. La principal ventaja de este dispositivo es que unifica la medida de la velocidad y la dirección en un mismo elemento. Además, no posee partes móviles.

Las características técnicas del anemómetro ultrasónico se muestran a continuación.

Instrumento	SENSOR ULTRASÓNICO DE VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO	
Ref.	VDW	
Fabricante	GILL INSTRUMENTS	
Modelo	WINDSONIC	
Magnitud específica	Velocidad	Dirección
Rango de funcionamiento	0 a 60 m/s	0 a 359°
Precisión	±2%	±3°
Resolución	0,01 m/s	1°
Temperatura de operación	-35 a +70°C	
Alimentación	9-30 Vcc	
Demanda de corriente	14,5 mA	

Tabla 3.4. Resumen de características del sensor de velocidad y dirección del viento

3.2.2. Variables de operación

Temperatura

Como se comentaba anteriormente, se desea la temperatura del aire a la entrada y a la salida del canal de refrigeración, la temperatura de la superficie del material aislante sobre el que se instalan los paneles y la temperatura de la cara posterior de los paneles fotovoltaicos.

Temperatura de superficie

La temperatura de la superficie se ha podido llevar a cabo en las configuraciones A y B de los paneles fotovoltaicos, no así en el panel térmico debido a su geometría interior. Para las mediciones de temperatura de superficie se recurre a sondas de temperatura flexibles adhesivas Pt100 como la mostrada en la figura 3.10. Se trata de detectores de temperatura resistencia (RTD), basados en la variación de la resistencia del platino con la temperatura. Las Pt100 se caracterizan por presentar una resistencia de 100Ω a 0°C .

Se ha escogido este tipo de sonda por estar compuesta por una lámina robusta de silicona que presenta alta resistencia en el ambiente exterior. Además, su característica adhesiva y su geometría la hacen especialmente diseñada para medir la temperatura de superficies.



Figura 3.11. Sonda de temperatura de superficie Pt100

Una posible desventaja que afecta al uso de este dispositivo para medir la temperatura es el valor de la resistencia del elemento RTD. Al ser tan baja, la resistencia de los hilos conductores que conectan el sensor puede provocar errores importantes. En la denominada técnica de dos hilos (Figura 3.11a), la resistencia se mide en los terminales del sistema de adquisición que se pretende medir. Por el contrario, la medición a cuatro hilos (Figura 3.11b) mide la resistencia en los terminales del sensor, con lo cual la resistencia de los hilos queda eliminada de la medida. La contrapartida es que se necesita el doble de cables y el doble de canales de adquisición de datos. También es posible medir usando tres hilos, eliminando un cable, opción que ofrece una solución intermedia.

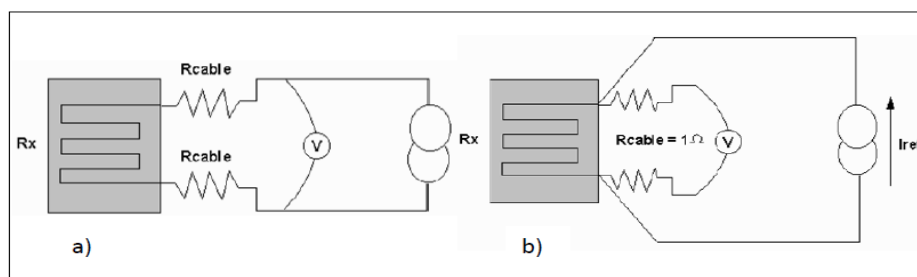


Figura 3.12. Principio de funcionamiento del detector de temperatura por resistencia. A (conexión a dos hilos). B (conexión a 4 hilos).

En nuestro caso, las sondas empleadas son de 4 hilos y sus características son las siguientes.

Instrumento	SONDA Tª SUPERFICIE			
Situación	PANEL A	PLANCHA A	PANEL B	PLANCHA B
Ref.	TPA1-TPA9	TPLA1-TPLA9	TPB1-TPB12	TPLB1-TPLB12
Fabricante	TC Direct			
Modelo	PT100 Flexible adhesiva robusta			
Tipo de sensor	PT100 CLASE B (IEC 60751)			
Material	Silicona flexible			
Configuración	Pasivo 4 hilos			
Cable conexión	6 metros aislado con teflón en malla metálica de acero inoxidable			
Rango de funcionamiento	-50 a +150°C			
Precisión	±0,3°C a 20°C			

Tabla 3.5. Resumen de características de la sonda de temperatura de superficie

Están situadas en las configuraciones A y B, el mismo número de sondas en el panel y en la superficie aislante. En el caso de la configuración A se emplearán 9 sondas en cada superficie y, en la configuración B, 12 sondas en cada superficie. Las posiciones de las mismas serán idénticas en la cara posterior de cada panel y en la superficie aislante enfrentada, tal como se muestra en la Figura 3.13 y la Figura 3.14.

CONFIGURACIÓN A

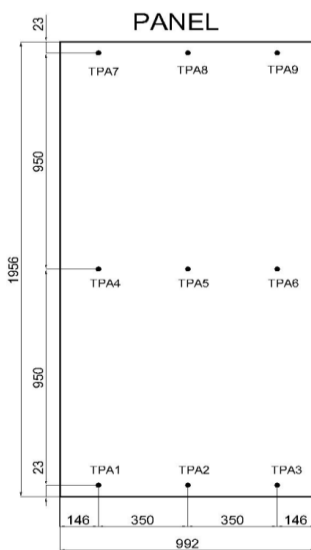


Figura 3.13. Distribución de sondas de temperatura de superficie en la Configuración A.

CONFIGURACIÓN B

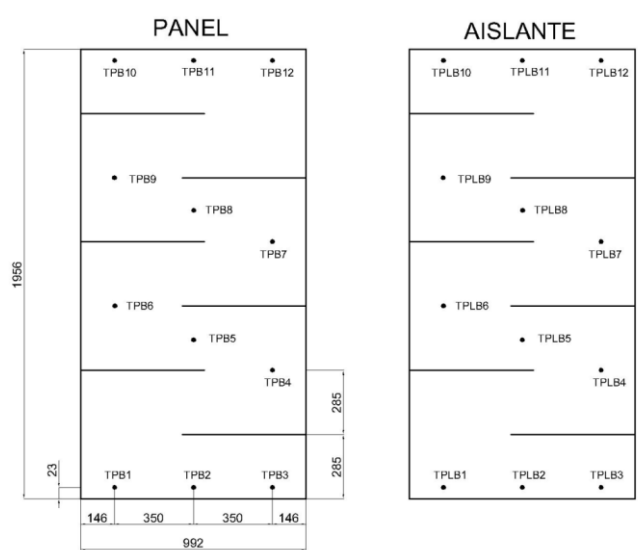


Figura 3.14. Distribución de sondas de temperatura de superficie en la Configuración B.

Temperatura del aire en el canal

Para la medida de temperatura del aire a la entrada y a la salida de los canales, se utiliza un determinado número de sondas de las utilizadas en trabajos anteriores. Estas sondas presentan el aspecto mostrado en la Figura 3.15.



Figura 3.15. Sonda de temperatura de aire EE16

Se trata de sondas RTD con un sensor Pt100, cuya naturaleza y funcionamiento es similar en el caso de las sondas de temperatura de superficie. La diferencia radica en que en este caso, el componente de platino que determina el valor de la temperatura no se encuentra protegido por una cápsula de silicona, sino que se sitúa en la punta de la varilla del sensor y queda expuesto al aire con una pequeña protección plástica.

Las características de este tipo de sensor se describen a continuación.

Instrumento	SONDA Tª AIRE
Ref.	TAA1, TAA2, TAA6, TAA7, TAB1, TAB2, TAB6, TAB7
Fabricante	E+E ELEKTRONIK
Modelo	EE16 TypeA
Tipo de sensor	PT100 CLASE B
Rango de funcionamiento	-5 a +50°C
Precisión	±0,3°C a 20°C
Configuración	Pasivo 4 hilos

Tabla 3.6. Resumen de características de la sonda de temperatura de aire modelo EE16

En el estudio anterior llevó a cabo con la utilización de un mayor número de sensores de este tipo. Se contó con la aportación adicional de datos aportados por los sensores EE431, mostrados en la figura 3.16. no se tuvo en cuenta que estos sensores eran sensores de inmersión y por lo tanto no apropiados para nuestro estudio, debido a que al realizar los ensayos posteriores los datos registrados por este tipo de sensores aparecían muy sobredimensionados, problema que se achaca a que no solo aportaban la temperatura del aire, sino que recibían un aporte de calor proveniente de la radiación que desprenden los paneles fotovoltaicos. Por este motivo en este estudio solo se han tenido en cuenta los datos aportados por los sensores EE16.



Figura 3.16. Sonda de temperatura de aire EE431

Los sensores de temperatura de aire utilizados recogen datos a la entrada del canal y a la salida, tal y como se recoge en la siguiente tabla.

Panel A		Panel B		Panel C
Entrada	Salida	Entrada	Salida	Salida
TAA1, TAA2	TAA6, TAA7	TAB1	TAB6, TAB7	TAB2

Tabla 3.7. Disposición de los sensores de temperatura de aire en las tres configuraciones

Para determinar la velocidad del aire en el canal se utiliza un tubo de Venturi. El tubo de Venturi consiste en un tubo formado por dos secciones cónicas unidas mediante un tramo más estrecho. El fluido que circula por él, aumenta su velocidad al ver reducida la sección, cumpliendo así con la ley de conservación de la masa. El aumento de la velocidad del fluido en el interior del conducto cerrado se traduce en una disminución de la presión, tal como describe el efecto Venturi. De esta manera, midiendo la diferencia de presión entre las dos secciones diferentes, se obtiene, a través de la ecuación de Bernoulli y la ecuación de conservación de la masa o ecuación de continuidad, la velocidad del fluido en cualquiera de las dos secciones.

$$\text{Ec. Bernoulli: } \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2}{2 \cdot g} + z_2,$$

$$\text{Ec. conservación de la masa: } A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2,$$

Donde P_1, v_1, z_1 y A_1 son la presión, la velocidad, la cota y el área de paso del fluido, respectivamente, en la sección 1 y P_2, v_2, z_2 y A_2 son la presión, la velocidad, la cota y el área de paso del fluido en la sección 2. Por su parte, ρ es la densidad del fluido y g la gravedad. Considerando nula la diferencia de cotas y combinando las dos ecuaciones anteriores se obtiene la expresión de la velocidad en la sección 1.

$$v_1 = A_2 \cdot \sqrt{\left(\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)} \right)},$$

La idea de usar el tubo de Venturi para medir la velocidad en el canal tiene su origen en la búsqueda de una medida global y uniforme del caudal. El uso de otras herramientas como anemómetros de hilo caliente o tubos de Pitot, aporta medidas localizadas en puntos concretos, quedando el resultado de la medición sujeto a peculiaridades eventuales del flujo o a las características que éste tenga en los puntos de medida. La velocidad medida en el tubo de Venturi, situado entre el panel fotovoltaico y el ventilador de aspiración,

permite obtener, por medio de la ecuación de conservación de la masa, el valor de la velocidad en el canal rectangular bajo el panel.

Para el diseño del tubo de Venturi en nuestra instalación experimental se parte de los niveles de velocidad que se desean medir. Tras la revisión bibliográfica se llega a la determinación de que el rango de velocidad de ensayo que se va a establecer abarca desde los niveles más bajos, en convección natural, hasta una velocidad máxima, en el canal rectangular, próxima a los 10m/s. El caudal máximo a ensayar se sitúa, en torno a los $3600 \text{ m}^3/\text{h}$ es decir, $1\text{m}^3/\text{s}$.

Los tamaños normalizados y las características de diseño de cada fabricante llevan a tener que realizar una búsqueda del material donde el rango de funcionamiento y el diámetro del tubo de Venturi se ajusten a los del ventilador y, a su vez, que ambos sean compatibles con nuestra instalación y con el rango de caudal de diseño. Finalmente, se eligen dos tipos de ventiladores, cuyas características se describen más adelante.



Figura 3.17. *Tubo de Venturi*

Instrumento	TUBO DE VENTURI
Ref.	VENT-A VENT-B VENT-C
Fabricante	PCE INSTRUMENTS
Modelo	VENT A-B → DN 250 VENT C → NW 160
Diámetro nominal	250 mm
Rango	300 a 3500 m^3/h
Capacidad de lectura	50 m^3/h
Temperatura de operación	0 a +80°C
Precisión	±2%

Tabla 3.8. *Resumen de características de los tubos de Venturi*

En el apartado ANEXO podemos encontrar la ficha técnica de los tubos de venturi utilizados en las tres configuraciones, así como las curvas aportadas por el fabricante para la obtención de los caudales medidos en función de la diferencia de presión recogida en el tubo de Venturi.

Como se puede observar en la Figura 3.18. la medida del caudal en el tubo de Venturi viene dada mediante la lectura visual de un indicador de aguja tipo Bourdon. Nuestra intención es poder registrar los datos para poder trabajar con ellos. En este sentido, buscamos un transductor de presión diferencial electrónico que se pueda conectar a las tomas de presión del tubo y que permita registrar los datos. Los parámetros de diseño de este transductor son el rango de presión abarcable y la resolución. Según la curva de funcionamiento del tubo de Venturi, la diferencia de presión máxima es de 1500Pa, por lo que el rango de medida debe cubrir desde 0 hasta 1500 Pa. En cuanto a la resolución, se pretende que suponga un número suficiente de particiones del rango. En este sentido, se opta por un sensor de presión diferencial de la marca KIMO, modelo CP113. Este sensor (Figura 3.18) dispone de varios rangos configurables, entre ellos, de 0 a 2500 Pa.

Se trata, por tanto, de un rango adecuado a nuestra necesidad. Además, presenta una resolución de 1 Pa, lo que permite obtener una medida bastante representativa. El resto de característica se muestra a continuación.



Figura 3.18. Transductor de presión diferencial.

Instrumento	TRANSDUCTOR PRESIÓN DIFERENCIAL
Ref.	MDA MDB MDC
Fabricante	KIMO
Modelo	CP113-AO
Material	ABS V0 según norma UL94
Rango de funcionamiento	-10000 a +10000Pa (Configurable)
Precisión	±1,5% Lectura ±3mmH2O
Resolución	1Pa; 0,1mmH2O; 0,01mbar
Temperatura de operación	0 a +50°C
Salida/Alimentación	Salida analógica 0-10V ó 4-20mA en activo con alimentación a 24Vac/Vdc (3 ó 4 hilos)

Tabla 3.9. Resumen de características del transductor de presión diferencial

Variables eléctricas

Para obtener las variables eléctricas más representativas de los paneles fotovoltaicos, es necesario trazar su curva I-V. Para tal fin, se dispone de una carga electrónica diseñada por personal del Departamento de Tecnología Electrónica.

Debido a que la característica de un generador fotovoltaico es una función decreciente, la tensión en el panel disminuirá siempre que se aumente la corriente o viceversa. Gracias a esta propiedad puede asegurarse que, mediante una fuente de corriente, se puede obtener cualquier tensión en bornes de un sistema fotovoltaico. Se puede simplificar el modelo para un panel fotovoltaico y linealizarlo, como se ve en la siguiente figura, aproximando la curva característica a una recta de pendiente negativa.

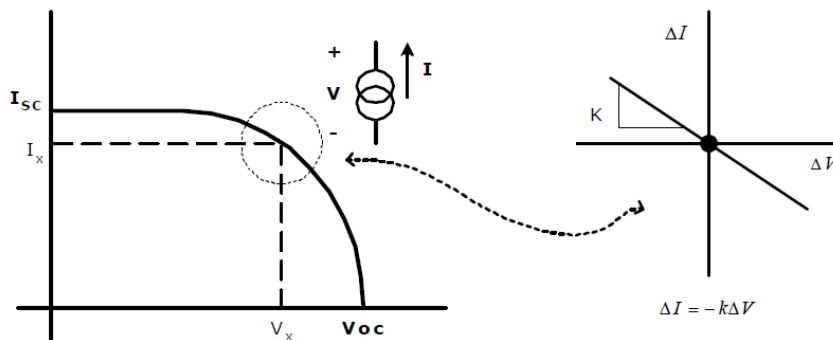


Figura 3.19. Curva característica y linealización.

De esta forma, la carga actúa como una fuente de corriente variable que, en el momento de su disparo genera el cortocircuito y seguidamente va disminuyendo el valor de corriente en pro del incremento de la tensión, hasta llegar al estado de cortocircuito abierto, donde la resistencia en bornes del panel es infinita y se obtiene la tensión de circuito abierto.



Figura 3.20. Carga electrónica.

La disponibilidad de una sola carga para dos paneles plantea una ventaja y un inconveniente. La ventaja es que las condiciones de ensayo serán las mismas para los dos paneles. El inconveniente consiste en que será necesario implementar una conmutación para que se pueda trazar la curva de un panel y acto seguido la del otro. Además, esto implica que las curvas de ambos paneles no se toman simultáneamente. El sistema de conmutación de la conexión de los paneles a la carga consiste en el esquema planteado a continuación.

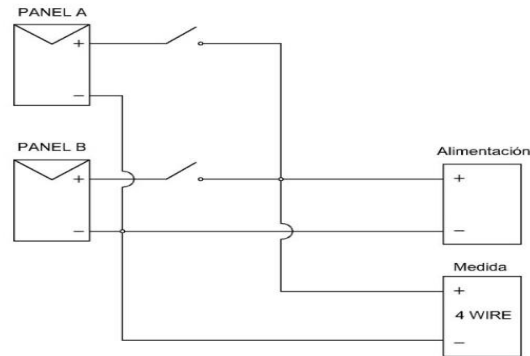


Figura 3.21. Esquema de conexión de los paneles fotovoltaicos.

Como se puede observar, la alimentación y la medida de las variables de tensión e intensidad se realizan por separado, estableciendo una configuración a 4 hilos, aportando una mayor precisión en la medida.

Los elementos de conmutación mostrados en la figura anterior se implementan mediante relés. El circuito de alimentación y operación de cada relé se muestra a continuación.

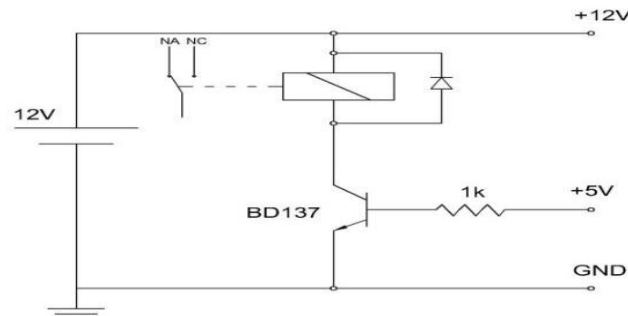


Figura 3.22. Esquema eléctrico del circuito de alimentación del relé.

Cada relé lleva una alimentación de 12 V en corriente continua y un diodo de by-pass en paralelo para protección frente a posibles corrientes de retorno. El relé se encuentra en posición de normalmente abierto (NA) hasta que se da la orden de cerrar el circuito que conecta al panel con la carga, momento en el que conmuta a normalmente cerrado (NC). Esta orden se ejecuta mediante una tarjeta de National Instrument, la cual proporciona en algunos de sus puertos una salida de 5 V. se emplea esta señal de 5 V para conmutar el transistor y que el relé cierre el circuito de trabajo. Esta tarjeta es también la encargada de ejecutar el disparo de la carga electrónica para iniciar el trazado de la curva I-V de los paneles.

3.2.3. Otros elementos de la instalación

Paneles fotovoltaicos

Se trata del elemento en torno al cual se proyecta la instalación. En este caso se dispone inicialmente de varios módulos empleados anteriormente en otros trabajos. Por la semejanza de este estudio con los anteriores, se emplea el modelo ET-P672270, siendo éste el modelo usado en el trabajo citado.

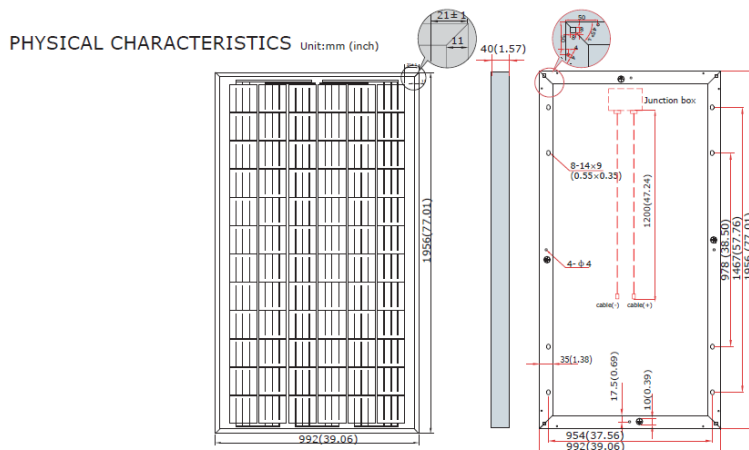


Figura 3.23. Planos del módulo fotovoltaico.

Instrumento	PANEL FOTOVOLTAICO
Ref.	PANEL A PANEL B
Fabricante	ET SOLAR
Modelo	ET-P672270
Pmax	270W
Tipo de célula	Silicio policristalino, 156mm x 156mm
Nº de células	72 en serie
Peso	23 kg
Dimensiones	1956 x 992 x 50mm
Vmp	36,4 V
Imp	7,42 A
Voc	43,63 V
Isc	8,1 A
Máxima tensión del sistema	DC 1000 V
Coef. Temp. Isc	0,09 %/°C
Coef. Temp. Voc	-0,34 %/°C
Coef. Temp. Pmax	-0,37 %/°C
TONC	44,4±2°C

Tabla 3.10. Resumen de características del panel fotovoltaico.

Panel solar Térmico

Se muestra a continuación el esquema del panel solar térmico utilizado.

El extractor del panel solar térmico ha sido sustituido por el que se muestra en el siguiente apartado, con un caudal máximo igual al utilizado en los paneles fotovoltaicos de $3600\text{m}^3/\text{h}$.

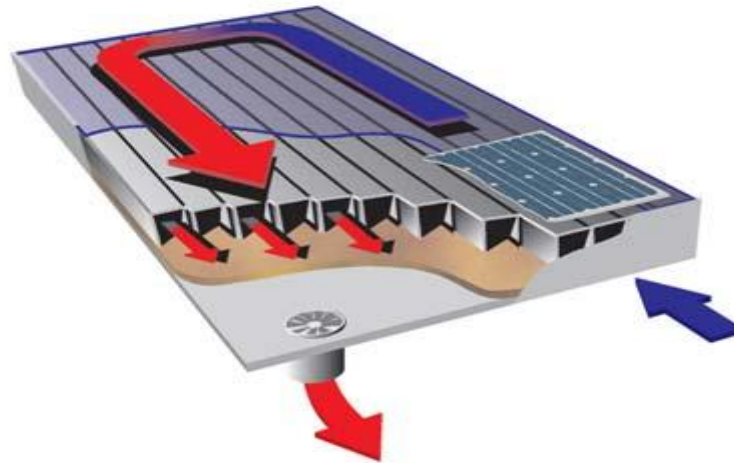


Figura 3.24. Planos del módulo solar térmico.

Instrumento	PANEL SOLAR TÉRMICO
Ref.	PANEL C
Fabricante	GRAMMER SOLAR
Modelo	Twinsolar
Potencia Térmica	1,4 kWp
Peso	47 kg
Dimensiones	2000 x 1000 mm
Incremento de temp	35 K

Tabla 3.11. Resumen de características del panel solar térmico.

Ventiladores

Para generar el flujo forzado se requiere de un ventilador en cada configuración. Tal como se describía anteriormente, el diseño del ventilador se realiza de forma conjunta al diseño del tubo de Venturi. El ventilador que mejor se adapta a las dimensiones y condiciones de caudal impuestas para los paneles fotovoltaicos es el S&P TD4000/355. Este ventilador es capaz de generar un caudal de hasta $3600\text{m}^3/\text{h}$ y presentar un diámetro nominal de 355 mm.



Figura 3.25. Ventilador de aspiración.

Se utiliza, además, un generador de velocidad conectado a cada ventilador para poder ensayar a distintas velocidades.

Para la configuración C, en la placa solar térmica utilizamos el ventilador que se muestra a continuación, debido a que se adquirió posteriormente a los otros, utilizamos un modelo diferente. El inconveniente de este ventilador es que solo posee dos modos de funcionamiento, a velocidad máxima o media. El ventilador utilizado es el S&P Modelo DA 9/9 con un caudal de hasta $3610\text{m}^3/\text{h}$ y un diámetro de la turbina de 252mm.



Figura 3.26. Ventilador de aspiración utilizado en panel solar.

Data logger

El data logger es el elemento que nos permite registrar la información de los sensores en una CPU y crear una base de datos para su posterior tratamiento y análisis.

El instrumento empleado es el Data logger 34980A de Agilent. Se trata de una unidad de medida compacta para recoger una alta densidad de información en aplicaciones de verificación de diseño, de pruebas automatizadas y de adquisición de datos. Una computadora central puede acomodar hasta 560 mediciones de 2 hilos ó 1024 canales multiplexor. El data logger 34980A tiene capacidad para 8 módulos. El módulo multiplexor presente para incorporar al sistema de adquisición es el 34921A de Agilent, al ser el único que nos ofrece la posibilidad de recoger todo tipo de medidas: tensión e intensidad AC/DC, frecuencia/período, resistencia a 2 y 4 hilos, termopares, termistores y RTD a 2 y 4 hilos. Cada módulo cuenta con 40 canales a configurar a 2 ó 4 hilos y 4 canales de corriente. En este caso se dispone de 4 módulos.

3.3. Adquisición de los datos

Una vez que están todos los sensores que utilizamos en nuestros ensayos comprobados y/o reemplazados, se realiza el conexionado al sistema de adquisición de datos, data logger. Los sensores se distribuyen entre las distintas tarjetas del data logger y se conectan, aquellos que lo requieren, a fuentes de tensión de corriente continua. Son sensores que necesitan alimentación aquellos cuya señal de salida es en tensión o en intensidad, como los transductores de presión, los anemómetros o los sensores que miden variables ambientales. Ante la disponibilidad de varias fuentes de tensión, teniendo en cuenta la intensidad de trabajo de cada una y la corriente demandada por cada sensor, se hace una distribución de los mismos para que no exista sobrecarga en ninguna de ellas. Se realiza también la conexión de los paneles fotovoltaicos a la carga electrónica a través del circuito de conmutación por relés, cuya fabricación forma parte de este proceso de montaje. Para implementar físicamente este circuito, descrito en el capítulo anterior, se emplea una placa perforada donde se sueldan los distintos componentes electrónicos.



Figura 3.27. Datta logger.

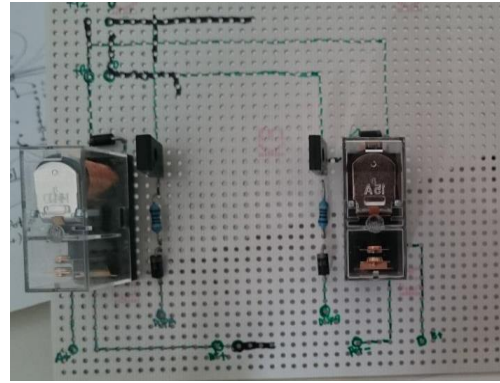


Figura 3.28. Fuente alimentación salida 24V de los

Figura 3.29. Circuito de conmutación por relés

3.3.1. Programa de adquisición de datos

La adquisición se logra mediante un programa que, en combinación con el data logger, permite registrar las medidas de los distintos sensores de la instalación y generar una base de datos. Se trata de un programa elaborado en el entorno LabView por personal del Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos para trabajos anteriores.

Consiste en un algoritmo que actúa sobre los canales del data logger, leyendo sus señales y registrando en archivos de texto, en intervalos de tiempo determinados por el usuario. Además, actúa sobre la carga electrónica provocando su disparo y registrando los puntos de la curva I-V durante el tiempo específico por el usuario. Las variables de entrada al programa son el número de ensayos, el tiempo entre los mismos (t entre medidas), el tiempo de pulsado de la carga (t pulsado), durante el cual genera el cortocircuito, y el tiempo durante el cual mide la curva I-V de los paneles fotovoltaicos (t final).

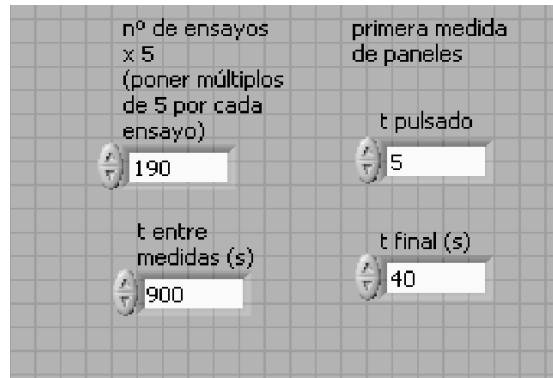


Figura 3.30. Panel frontal del programa de adquisición en LabView.

En este caso se ha retocado el programa para la introducción de nuevos sensores y para realizar la conmutación de los relés, midiendo así dos curvas I-V distintas.

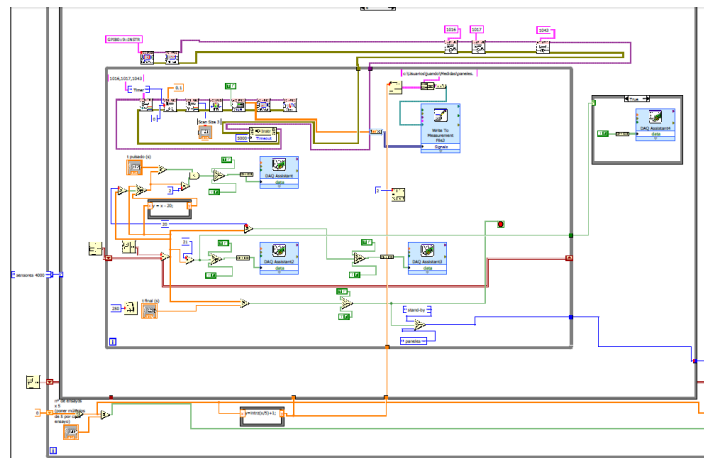


Figura 3.31. Diagrama de bloques de una página del programa de adquisición en LabView

La modificación de algunos sensores ha llevado a la redistribución del programa original, destinando una página distinta a cada tarjeta del data logger.

La conmutación de los relés implica la introducción en el programa de un algoritmo que actúa sobre una tarjeta externa generando un impulso de 5 V para cerrar uno de los relés, a la vez que ejecuta el disparo de la carga y se obtienen los puntos de la curva del panel durante 20 segundos. Una vez que transcurren estos 20 segundos, se abre el relé y se cierra el otro, ejecutando de nuevo el disparo de la carga y obteniendo la curva del otro panel.

Una vez que LabView genera los archivos de datos, éstos se tratan con un programa elaborado en lenguaje Fortran90. Este programa se encarga de reunir en un mismo archivo todos los datos de un mismo día y de aplicar a los datos obtenidos el tratamiento adecuado para transformar valores de resistencia, tensión o intensidad, en valores de temperatura, velocidad, presión, etc.

3.3.2. Protocolo de actuación de la instalación

En este apartado se realizará detalladamente una explicación de la manera que hay que proceder para la correcta recogida de los datos.

Se trabaja con el ordenador que se encuentra en el laboratorio donde está ubicada la instalación, puesto que en ese terminal se encuentran los programas con los que se realiza la adquisición y el posterior tratamiento de los datos. Una vez que todos los sensores se encuentran en pleno funcionamiento, y que se comprueba su correcto cableado al dispositivo de data logger, se realiza la adquisición de los datos.

- *Carpeta de trabajo*: a la carpeta en la que se encuentran los accesos directos a los programas con los que vamos a trabajar, se accede desde el acceso directo que

encontramos en el escritorio con el nombre de “Acceso directo a Usuarios”. Dentro de la misma se encuentran las carpetas pertenecientes a los alumnos que han participado en el desarrollo de proyectos similares al que estamos tratando aquí. Para la realización de este trabajo, nos centraremos en las carpetas de “juando” y “Joaquín”.

- *Adquisición de datos*: dentro de la carpeta “juando”, nos encontramos con diferentes subcarpetas con información importante para comprender el funcionamiento de la instalación. Para la adquisición de datos debemos acceder a la carpeta “LabView”, en su interior aparecen archivos de las diferentes versiones que se han ido realizando y actualizando de la inicial, debemos abrir la última versión que aparece “adquisición29-11-16.vi”. Una vez que tenemos abierto el programa Labview debemos proceder a programar las medidas que queremos recoger. A continuación se muestra un ejemplo de una tanda de medidas.

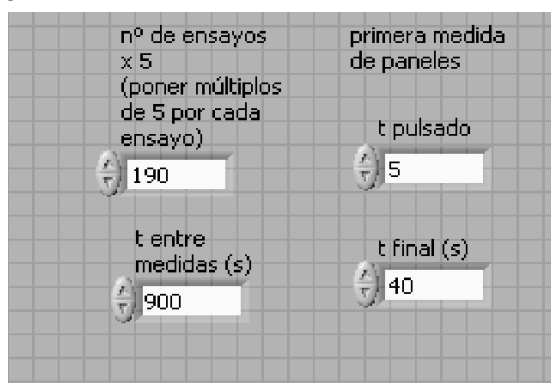


Figura 3.32. Panel frontal del programa de adquisición en LabView.

En la celda superior izquierda aparece el número que se quieren realizar, en el ejemplo aparece el número 190, dado que como indica ahí, se deben poner múltiplos de 5 por cada ensayo, en realidad los ensayos que aparecen son 38 en vez de 190. En la celda inferior lo que se escribe es el tiempo en el que se deben recoger las medidas entre cada ensayo, como se ve en el ejemplo aparece un tiempo de 900(s), esto quiere decir que cada 15 minutos, se van a recoger una tanda de medida de todos los sensores, así hasta completar los 38 ensayos que hemos puesto antes. En las celdas de la derecha siempre debe aparecer como en el ejemplo un 5 en la superior y un 40 en la celda inferior, puesto que el diagrama de adquisición de datos se ha programado de ese modo.

- *Tratamiento de los datos*: una vez realizada la adquisición de dichos datos, estos se almacenan dentro de la carpeta que hemos visto anteriormente “juando” pero ahora dentro de la subcarpeta “Medidas”. En esta carpeta nos encontraremos con todas las medidas que se hayan realizado de todos los sensores.

Observación: Hay que aclarar que los sensores se cablean en las diferentes tarjetas de datos que posee el dispositivo de datalogger, estas tarjetas se dividen cuatro: tarjeta 1, tarjeta 4, tarjeta 5, y tarjeta 8. Por lo tanto las medidas que hemos tomado vendrán nombradas del siguiente modo: “sensores1.1” siguiendo con el ejemplo anterior, este archivo contendrá las medidas que se han recogido de los sensores que están cableados en la tarjeta 1, y además corresponderá a la primera medida recogida de las 38 que hemos programado anteriormente, de este modo seguiremos encontrando

archivos sensores1.X hasta llegar a la última medida que sería “sensores1.38”. lo mismo sucede para los demás casos, con sensores4.X, sensores5.X, y sensores8.X. Además de los archivos sensores, se crean otra serie de archivos que hacen referencia a los datos eléctrico de los paneles, son nombrados así: paneles.1 etc. Hasta llegar a paneles.38

Para mayor claridad, conviene cortar todos estos archivos que se han creado y llevárnoslos a otra carpeta en la cual nosotros vayamos a trabajar. Una vez que tengamos estos archivos en la nueva carpeta hay que realizar un cambio en el nombre de los archivos creados, debemos sustituir el carácter “.” Por una “_”, este cambio se debe a que el ejecutable, (del que ahora hablaremos) solo lee los archivos que se encuentran con “_”. De este modo sensores1.1 pasa a llamarse sensores1_1 y así con todos, incluidos los de paneles.

- Tratamiento de los datos: una vez que tenemos los archivos en nuestra nueva carpeta y con los nombres cambiados, procedemos a tratar dichos datos, para ello, accediendo de nuevo en la carpeta “juando” encontramos un ejecutable del programa Fortran llamado “lectura2016v4.exe”, debemos copiar el ejecutable y pegarlo en la carpeta que hemos creado antes, junto con los archivos de paneles y sensores. Una vez que tenemos todos los archivos y el ejecutable en la misma carpeta, procedemos a ejecutar el mismo. Aparecerá una pantalla como la mostrada a continuación.

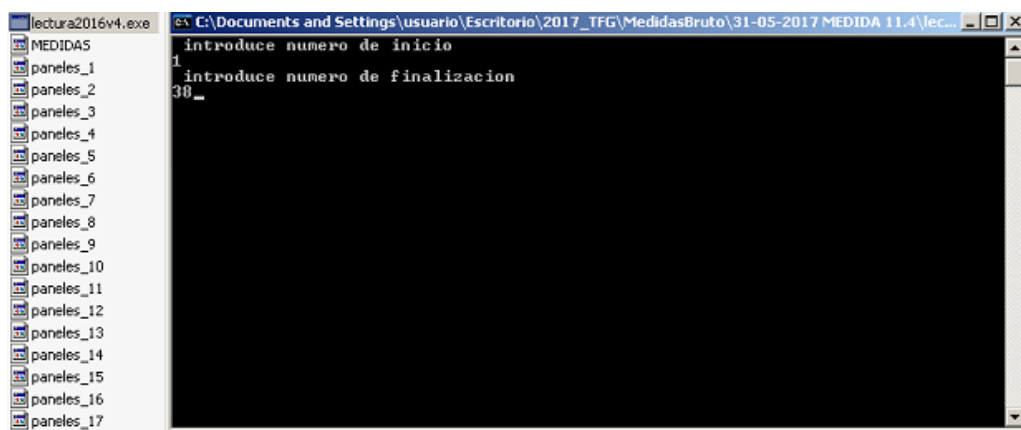


Figura 3.32. Pantalla del ejecutable de Fortran.

En la que nos pide, por un lado el número de inicio, y por otro el número de finalización. Debemos en primer lugar introducir el número 1, puesto que será la medida número 1 la que debe tratar y en segundo lugar la última medida que tengamos, continuando con el ejemplo sería 38. Al pulsar intro, se debe crear un archivo como el que podemos apreciar en la figura 3.32. con el nombre MEDIDAS, este archivo, al abrirlo con el programa Excel debería contener todas las medidas de todos los archivos anteriores ya tratadas, en sus correspondientes unidades.

Observación: debido a un fallo en la programación del programa Fortran que no se ha podido corregir, en algunas ocasiones el archivo generado MEDIDAS no posee ningún tipo de información en su interior, dado este caso se debe ir realizando el tratamiento de los datos por tandas, es decir si en el primer intento no aparece ningún tipo de información quiere decir que la primera medida que se ha tomado es errónea y no se puede tratar, por lo que se deben eliminar todos los archivos correspondientes a las

medidas recogidas en la primera tanda de medidas, de este modo deberíamos borrar los archivos: paneles_1, sensores1_1, sensores4_1, sensores5_1, sensores8_1. Y volveremos a abrir el ejecutable, pero ahora empezando con el número de inicio 2. También es posible que aparezca información dentro del archivo MEDIDAS, pero no toda la que debería, siguiendo con el ejemplo, imaginemos que una vez que hemos vuelto a ejecutarlo empezando ahora con 2 y terminando con 38, aparecen solamente 4 líneas en el archivo MEDIDAS, (cuando deberían de aparecer 37, ya que la primera la hemos descartado), tendremos que quedarnos con esas 4 líneas de datos puesto que corresponderían en este caso, a los datos de las medias dos, tres, cuatro, y cinco, pero el programa no ha continuado tratando las medidas por el mismo motivo que ocurría con la primera medida, pero en este caso con la sexta medida, ahora tendremos que borrar los archivos paneles_6, sensores1_6, sensores4_6, sensores5_6, y sensores8_6, y volver a ejecutar el archivo de Fortran, así hasta que consigamos llegar a la última medida que hemos programado, y juntar todas las MEDIDAS que hemos ido consiguiendo dentro de un mismo archivo de Excel.

- *Organización de los datos tratados*: las medidas que hemos conseguido tratar mediante el ejecutable y que hemos unificado en un mismo Excel debemos ahora cortarlas y copiarlas en otro Excel que se ha preparado expresamente para poder identificar cada medida. Este Excel lo encontramos dentro de carpeta “juando” con el nombre de “Plantilla intermedia(GENERAL).xlsx”. Conviene realizar una copia de este excel y pegarlo en otro lugar para no sobrescribirlo, puesto que esta será la plantilla que utilizemos para todos los casos. Al pegar las medidas en la nueva plantilla, los datos aparecen desordenados, debemos proceder de la siguiente forma: seleccionar la primera columna, solo con los datos de medidas que aparezcan, abrir la pestaña de Excel Datos, y seleccionar la opción Texto en columnas, aparecerá una ventana en la que debemos aceptar todo lo que nos pidan y finalizar, de este modo ya tendremos los datos tratados y organizamos para comenzar a trabajar con ellos.

3.4 Aspecto final de la instalación

Como se puede ver en la siguiente imagen los tubos de Venturi utilizados se instalan a la salida del canal rectangular en las configuraciones A y B. Además de los transductores de presión definidos anteriormente, los cuales se colocan encima de los venturis, acoplando sus terminales a dichos venturis.



Figura 3.33. Tubos de Venturi en configuración A y B

Del mismo modo en la siguiente imagen se muestra el venturi utilizado para la configuración C, colocado lo más próximo posible a la salida del panel solar térmico para intentar tener las menos pérdidas posibles, la sección de salida de esta configuración es bastante menor que en las otras dos configuraciones. También se puede apreciar el sensor de temperatura colocado a la salida del panel térmico, para futuros estudios sería conveniente utilizar más sensores a la salida para tener una medida más precisa del mismo.



Figura 3.34. Tubos de Venturi en configuración C



Figura 3.35. *Aspecto final de la instalación*

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez realizado la puesta a punto de la instalación, ésta se encuentra operativa para proceder a la recogida de datos y al tratamiento de los mismos en busca de resultados. Para tal fin se realiza una planificación de ensayos y se lleva a cabo un acondicionamiento de la información recogida. Esta información se procesa y se obtienen una serie de resultados en los que se evalúa el comportamiento de las distintas variables que toman parte en este estudio.

4.1. Planificación de ensayos

La planificación de ensayos se realiza en base a las distintas velocidades del aire en el canal con las que se desea experimentar. Los reguladores de los ventiladores de los paneles fotovoltaicos disponen de hasta diez niveles de velocidad diferenciados y ajustables de forma analógica. Se establecen así cinco niveles distintos de velocidad en los ensayos. Se pretende ensayar la instalación en convección natural y, para convección forzada, se determinan cuatro posiciones distintas del ventilador. Estas son las posiciones 1, 3, 6 y 9, cubriendo así el rango de caudal que puede proporcionar el ventilador. Para el caso del ventilador en la placa solar térmica solo disponemos de dos posiciones de funcionamiento, por lo tanto los ensayos se reducen a un nivel medio y otro máximo de velocidad, puesto que a convección natural el flujo de aire que atraviesa el canal es nulo debido a la geometría interna de la placa.

Existen otras variables, como la radiación o la velocidad del viento, que no son controlables y con las que resulta interesante ensayar para sus distintos valores. Por este motivo, se decide asignar a cada nivel de velocidad un periodo de tres días de ensayo. De este modo, ante la presencia, por ejemplo de un día nuboso restan dos días en los que las medidas son válidas, ya que las condiciones, a priori, óptimas para ensayar esta instalación son aquellas en las que la radiación es elevada.

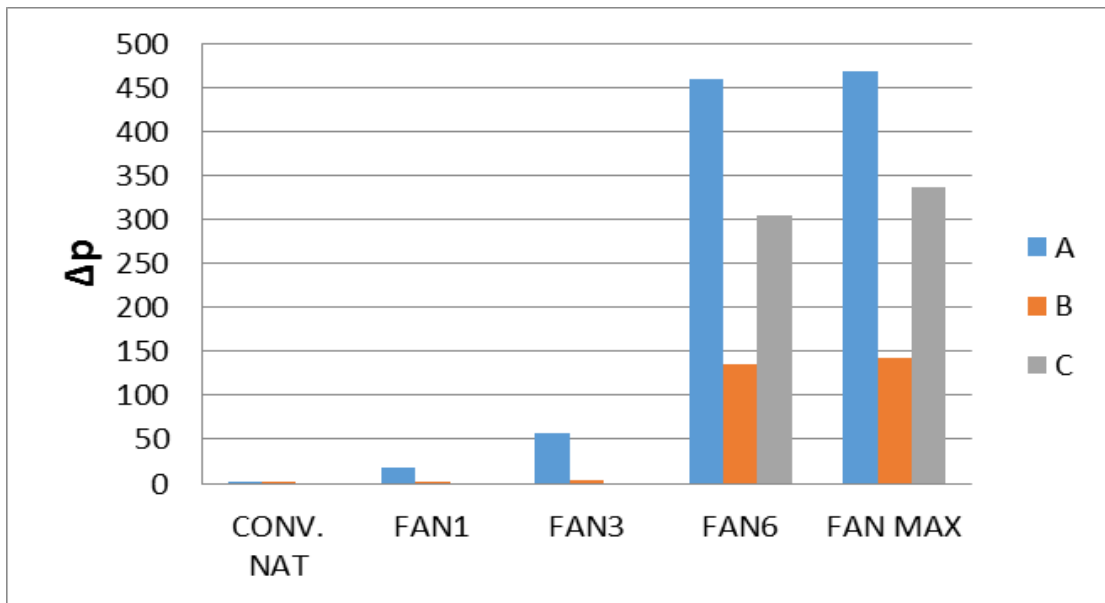
En este sentido, los ensayos se realizan en la última semana del mes de mayo y en las dos primeras del mes de junio. Los ensayos cada día abarcan desde las 10:00 de la mañana hasta las 19:00 de la tarde y se realizan en intervalos de 10 minutos. Como se comenta anteriormente, cada velocidad se ensaya durante tres días diferentes.

4.2. Análisis de resultados

En primer lugar vamos a presentar los diferentes valores de presión relativa, así como los caudales con los que se han obtenido los resultados posteriores para las diferentes configuraciones de trabajo.

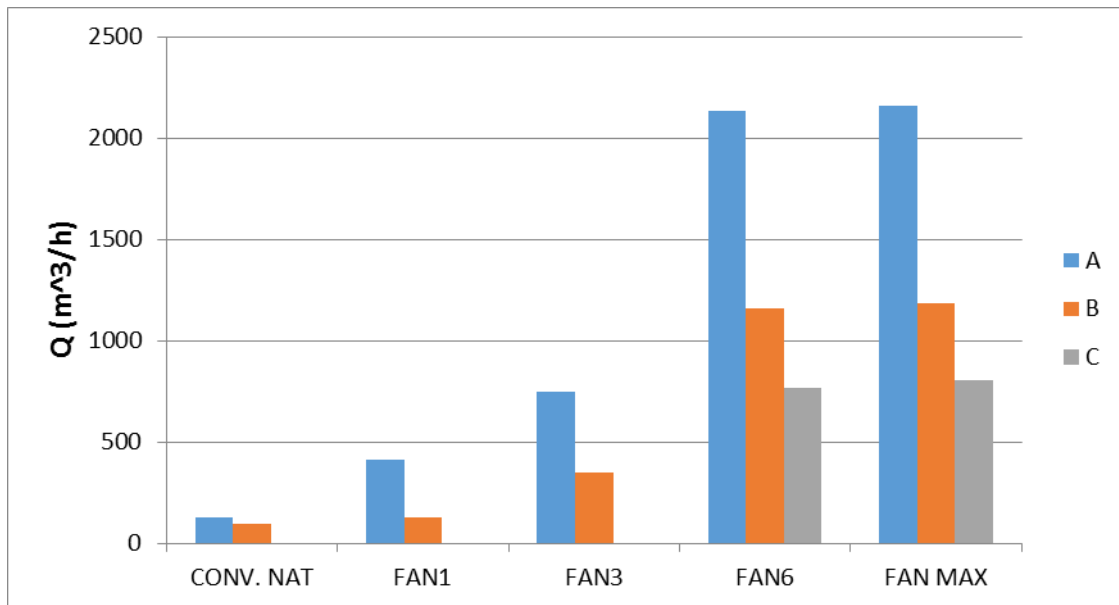
En la gráfica 4.1 podemos observar como la presión relativa medida en la sección circular del Venturi no se hace visible en la configuración B hasta alcanzar los niveles más elevados de potencia de los ventiladores en la posición 6 y MAX, llegando a valores para ambos casos cercanos a los 150(Pa), mientras que en la configuración A tenemos un aumento gradual en las primeras posiciones de los ventiladores, aunque con valores pequeños, llegando a alcanzar 60(Pa) para la posición FAN3 del ventilador.

Continuando con este aumento gradual de la presión relativa en la configuración A vemos como se alcanzan los valores de presión más altos en ésta para las posiciones más elevadas de los ventiladores, llegando a los 450(Pa) en la posición 6 y MAX. En la configuración C, debido a que solo podemos hacer un estudio de dos de las posiciones de su ventilador, hemos decidido incluir sus valores de nivel medio dentro de los valores correspondientes a FAN6. Mientras que el nivel máximo del ventilador en la configuración C lo incluimos dentro de FANMAX en el que se llegan a valores próximos a los 350 Pa.



Gráfica 4.1. Valores de presión Relativa medidos en los venturi.

Con estos datos de presión, utilizando las gráficas proporcionadas por el fabricante de los venturi procedemos a realizar una extrapolación de los datos de caudal para cada configuración y en las diferentes posiciones de los ventiladores, como se puede ver en la gráfica 4.2.



Gráfica 4.2. Valores de caudal.

Estos resultados tan asimétricos entre unos valores de caudal y otros, para las distintas posiciones de potencia de los ventiladores en las configuraciones A y B, se deben a la geometría interna de cada canal, debido a que en la Conf. A, tenemos el canal libre de obstáculos y por tanto la circulación de un flujo de aire a través de este se produce de manera mucho más acentuada. En la Conf. B al tener las placas intercaladas a lo largo de todo el recorrido del canal esta circulación se produce de manera más forzada como se puede comprobar en la gráfica 4.2.

Se puede observar como en convección natural, el flujo se establece de forma natural por diferencia de temperatura entre las masas de aire. Tenemos unos caudales muy parecidos tanto para la configuración A y B, entre los 100 y los 130 (m^3/h), siendo mayores los caudales referentes a la configuración A, debido a la propia configuración del sistema sin obstáculos dentro del canal.

Una vez conectados los ventiladores, en las posiciones más bajas de los mismos, vemos como para la posición 1 del ventilador y en la configuración A, aparece una dispersión elevada en los datos de caudal, que fluctúan entre 200 y 400 (m^3/h), sin embargo en la configuración B tenemos unos datos de caudal uniformes, sobre los 100 (m^3/h) para la configuración B.

Es a partir de la posición 3 de los ventiladores cuando los caudales siguen una correlación constante en sus valores para las siguientes posiciones de los ventiladores, tanto en la posición 6 como a su máximo nivel, Fan Max. Obteniendo los mayores caudales en la configuración A seguidos por la configuración B y los datos de caudal más bajos se obtienen en la configuración C.

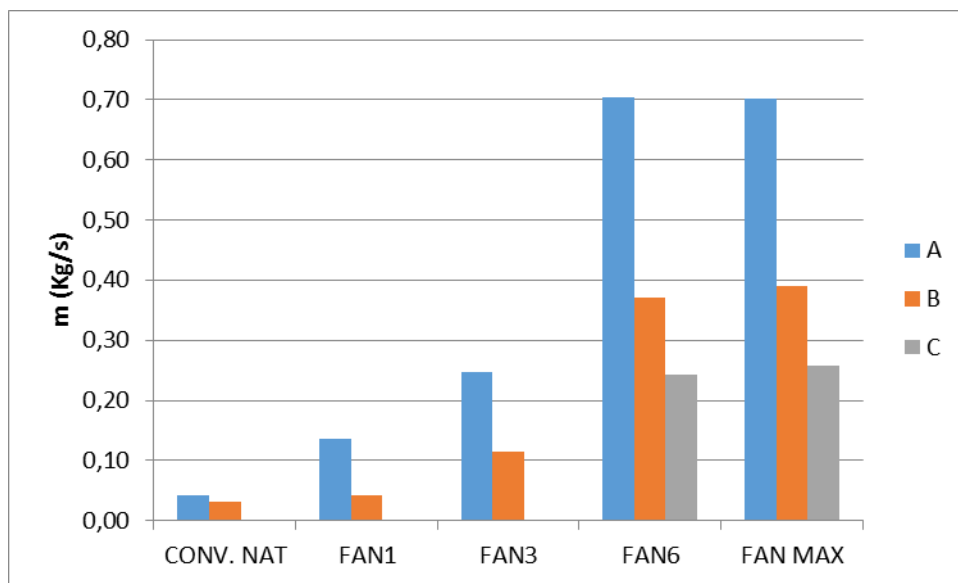
4.2.1. Flujo másico

Los ensayos se realizan a distintos niveles de velocidad del aire. Estos niveles vienen dados según la forma en la que se genera el flujo y a la posición del regulador del ventilador en el caso de flujo forzado. Sin embargo, es necesario determinar de forma cuantitativa a que valores corresponden a estos niveles de velocidad o caudal. En este sentido, se representa el flujo o gasto másico generado en cada caso. Dado que la densidad del aire se mantiene prácticamente constante. La relación entre el caudal y el flujo másico es lineal como podemos ver. El gasto másico calculado a la salida de los paneles en la sección reducida de los venturi, es el mismo en cualquier sección del canal respondiendo a la ley de conservación de la masa.

Los valores de flujo másico se obtienen a partir de la siguiente fórmula:

$$m = \frac{Q}{\rho} \text{ (kg/s)}$$

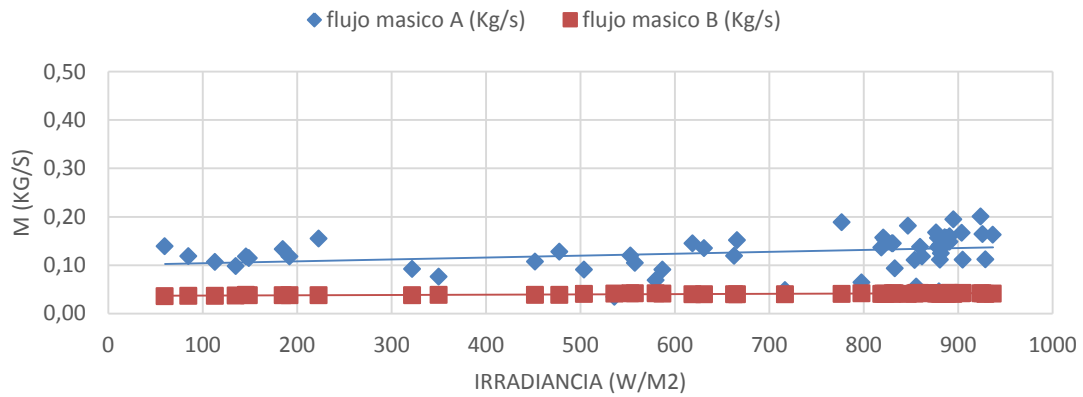
En convección libre, el flujo se establece de forma natural por diferencia de temperatura entre las masas de aire. Esto, unido a la influencia del viento exterior, hace que el flujo másico a través del canal adopte valores bajos y dispares. En cambio, cuando se genera de forma forzada mediante el ventilador en aspiración, los valores tienden a mantenerse y la velocidad del viento apenas es influyente. Esto lo podemos advertir en la gráfica 4.3.



Gráfica 4.3. Valores de Flujo másico.

Se observa como el flujo másico crece a medida que se incrementa la velocidad del ventilador. En la configuración A, el valor del flujo másico es siempre mayor al de la configuración B para una misma posición del ventilador. Se aprecia que tanto en B como en A el flujo se estabiliza a partir de la posición 6 del ventilador, llegando en A, a un valor de 0,7 kg/s, y en B, a un valor de 0,4kg/s.

Los valores dados en la gráfica 4.3. Corresponden a los valores de flujo másico para un valor de Irradiancia correspondiente a los $900(W/m^2)$. Por lo que no se advierte la consideración que mostraremos a continuación correspondiente a los valores de flujo másico en la posición FAN1 del ventilador para la configuración A.



Gráfica 4.4. Valores de Flujo másico para FAN1 en conf. A y B.

En todas las medidas realizadas tenemos unos valores lineales de flujo másico para ambas configuraciones y en todas las posiciones de potencia de los ventiladores. Pero en este caso se puede advertir como para la configuración A, tenemos valores muy dispersos.

Se muestra a modo de resumen una tabla con los valores de flujo másico alcanzado en las 3 configuraciones.

FLUJO MÁSSICO / IRRADIANCIA (W/m^2)					
	CONV. NAT	FAN1	FAN3	FAN6	FAN MAX
A	0,04	0,14	0,25	0,70	0,70
B	0,03	0,04	0,12	0,37	0,39
C				0,24	0,26

Tabla 4.1. Resumen de valores de flujo másico en función de los niveles de velocidad.

Llegados a este punto queda advertir los valores de velocidad del aire que se han alcanzado en nuestros ensayos, los cuales se han calculado a partir de los valores de flujo másico, dividiendo dichos valores por el producto de la superficie circular de los venturi y por la densidad del aire a presión atmosférica.

$$v = \dot{m} / (S \cdot \rho) \text{ (m/s)}$$

A continuación mostramos la gráfica en la que se pueden ver los cambios en las velocidades del aire en función de las diferentes configuraciones en los ventiladores:

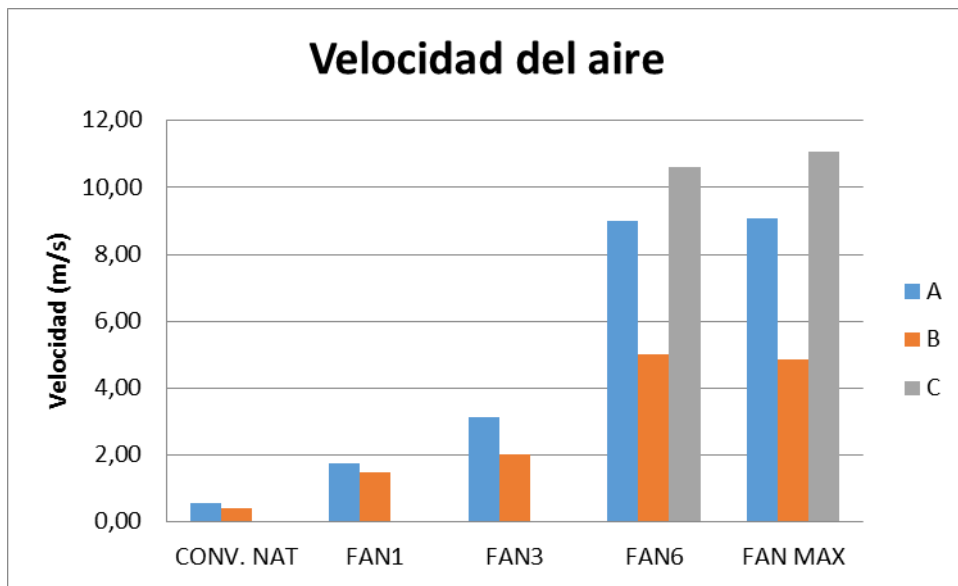
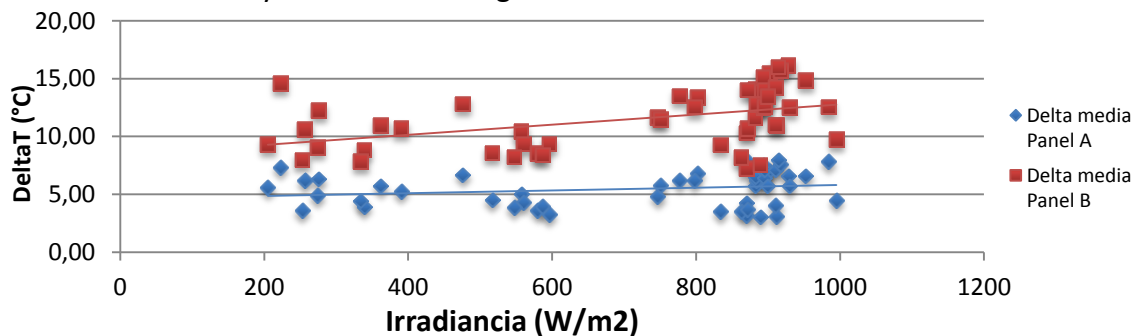


Tabla 4.4. Resumen de valores de velocidad del aire en función de los niveles de velocidad.

Se puede observar como a partir de la posición 6 hasta el máximo de los ventiladores, las velocidades se mantienen prácticamente constantes, también podemos decir que para la configuración C, al tener un modelo diferente de ventilador no se consigue una diferencia notable entre las distintas posiciones. Esto hace que no podamos valorar los datos obtenidos con el criterio usado para las configuraciones A y B de los paneles fotovoltaicos.

4.2.2. Incrementos de temperatura Aire

El salto de temperatura del aire cobra especial importancia debido a que este salto va a determinar en gran parte, la cantidad de energía térmica obtenida del sistema. Se muestran a continuación, los resultados obtenidos en este aspecto para las distintas velocidades de ensayo en ambas configuraciones.

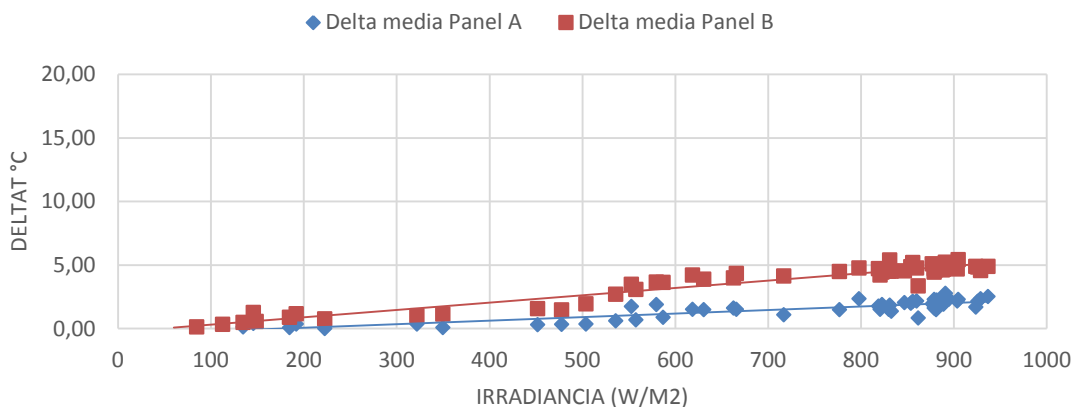


Gráfica 4.5. Salto de temperatura del aire en el canal a velocidad 0 del ventilador (Convección natural), para las 3 configuraciones, A, B y C.

Vemos como las diferencias de aire entre la entrada y la salida de los canales para la convección libre se presenta de manera muy uniforme para las 2 configuraciones, aunque se puede observar que el mayor salto de temperatura se obtiene en la configuración B, donde los valores más altos se encuentran por encima de los 14°C y para las configuraciones A y C los valores de temperatura se encuentran entre 4 y 8°C.

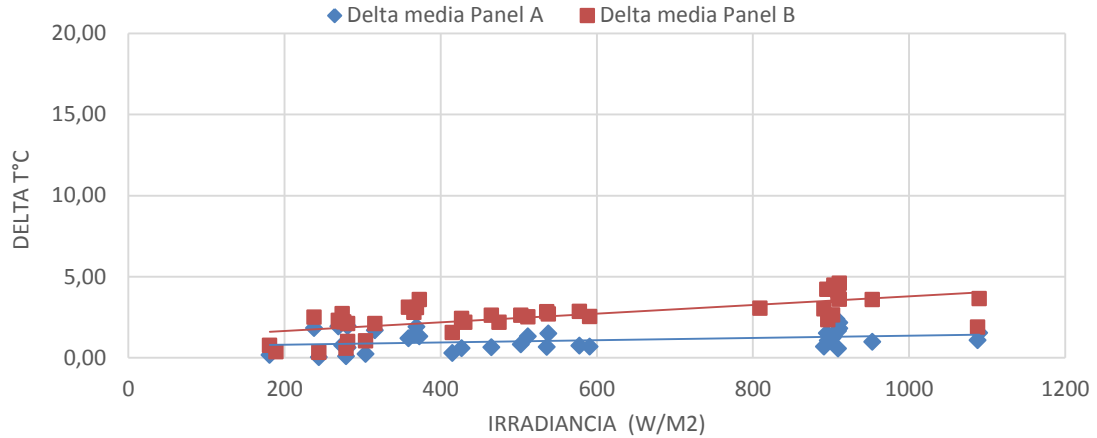
Una vez conectados los ventiladores, cuando comienza a aparecer un flujo uniforme de aire dentro de los canales, comprobamos como en todos los casos es la configuración C la que obtiene un mayor salto de temperatura, seguidos por los saltos de temperatura de la configuración B y finalmente de A. Se ve claramente como conforme aumentamos la velocidad de aire que circula dentro del canal el salto de temperatura de aire es menor.

Vemos como para la posición 1 de los ventiladores se aún se alcanzan valores altos en lo que respecta al incremento de temperatura, aunque en este caso tenemos que el incremento de temperatura en la configuración B llega a un máximo de 5,5°C y para la configuración A, tenemos unos valores máximos de este incremento en torno a los 3°C. Tal y como podemos ver en la gráfica 4.6.



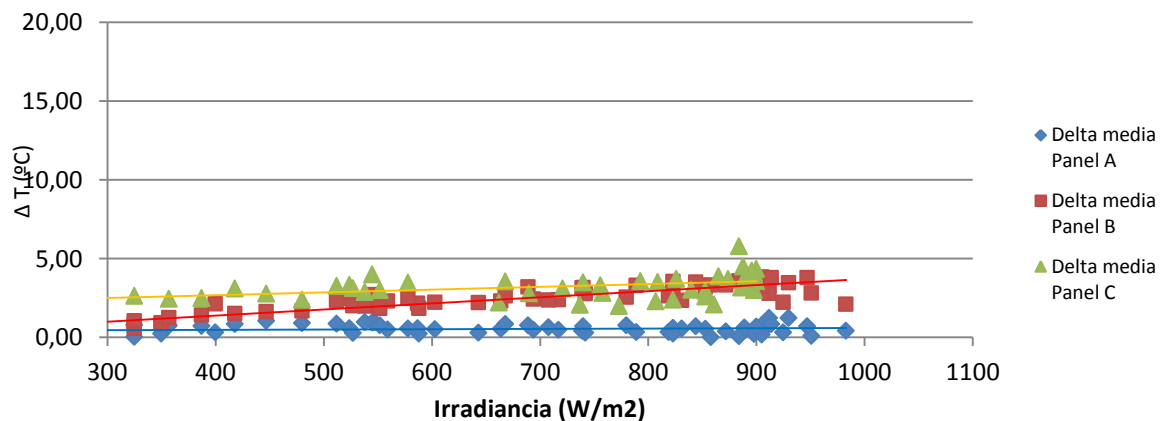
Gráfica 4.6. Salto de temperatura del aire en el canal a velocidad 1,8m/s conf. A y 1,5m/s conf. B. **FAN1**

Podemos comprobar como a medida que aumentamos la velocidad del aire dentro de los canales de refrigeración, los incrementos de temperatura del aire van disminuyendo, por ejemplo en el siguiente caso en posición FAN3 de los ventiladores donde ahora tenemos un incremento máximo de la configuración B en torno a los 4,5°C y para la configuración A el incremento de temperatura máximo se advierte por encima de los 2°C.



Gráfica 4.7. Salto de temperatura del aire en el canal a velocidad 3,2m/s conf. A y 2,1m/s conf. B. **FAN3**

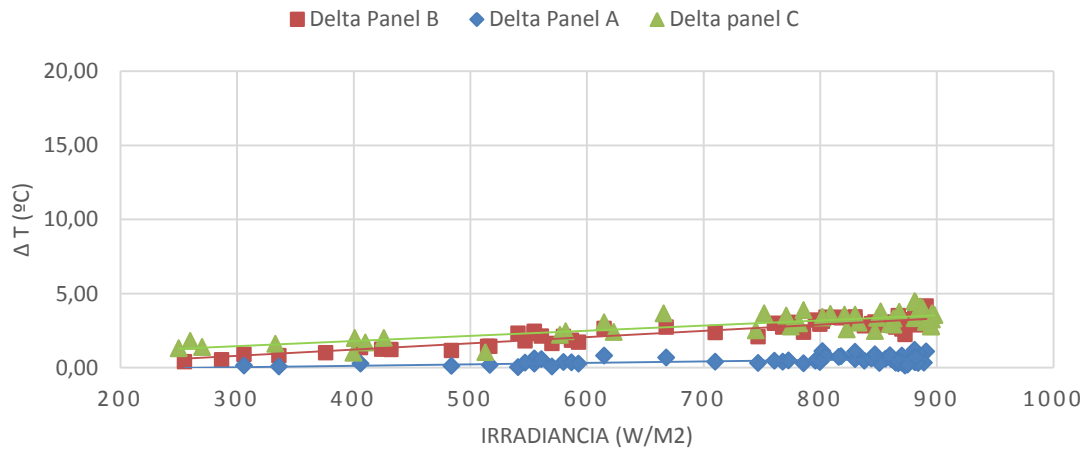
En la gráfica 4.8. Incluimos la referencia de la placa solar térmica, configuración C. La cual nos va a aportar más adelante, información de especial interés para poder realizar una comparativa en torno a los rendimientos térmicos de los mismos. En esta gráfica se ve como ahora los incrementos de temperatura del aire en la configuración A, son muy pequeños, entre 0 y 1°C, además se advierte como en la configuración B se mantiene prácticamente igual el incremento de temperatura del aire para la posición 6 del ventilador que para la posición 3, aunque en el caso de la posición 6 el salto de temperatura se observa de un modo mucho más constante y en ningún caso se sobre pasan los 4°C. Sin embargo, la configuración C nos aporta un incremento mayor de temperatura a todos los niveles de Irradiancia en la posición media de su ventilador, esta posición es la que hemos considerado más parecida a la posición Fan6 de los ventiladores de las conf. A y B, para poder realizar la correspondiente comparativa.



Gráfica 4.8. Salto de temperatura del aire en el canal a velocidad 9m/s conf. A y 5m/s conf. B y 10,6m/s para conf. C. **FAN6**

Finalmente se muestran los datos de temperatura en la posición FANMAX de los ventiladores para las tres configuraciones, al igual que para la posición FAN6 los

valores más elevados se encuentran en la configuración C, llegando a unos incrementos de temperatura en torno a los 4°C.



Gráfica 4.9. Salto de temperatura del aire en el canal a velocidad 9m/s conf. A y 5m/s conf. B y 11m/s para conf. C. **FANMAX**

Con todos estos datos, queda visto que la configuración C es la que adquiere el mayor salto de temperatura en todos los casos como era de esperar ya que ese es el propósito de dicha placa térmica, menos en convección natural, ya que debido a su diseño no se consigue hacer circular un flujo de aire a través de la placa y por tanto no se realiza un uso adecuado de la misma al no tener aire que calentar. Por otro lado en la configuración B se consiguen mayores saltos de temperatura que la configuración A en todos los casos. La presencia de placas intercaladas en B obliga al aire a describir un recorrido tal que el tiempo empleado en desplazarse desde la entrada hasta la salida del canal es mayor que en A donde no encuentra ningún obstáculo. Queda comprobado que el aumento del tiempo de residencia del aire bajo el panel fotovoltaico contribuye a mejorar el intercambio calorífico. Esta disposición interior del canal en B provoca, un mejor aprovechamiento de la superficie disponible para el intercambio de calor entre la cara posterior del panel fotovoltaico y el aire. Es decir, el aire entra en contacto de forma efectiva con prácticamente toda la superficie de la cara interna del panel fotovoltaico. En cambio, en la configuración A, donde el paso del aire es libre, a pesar de generarse la convección por aspiración, el aire no se adapta de igual forma al volumen del canal al no estar su sección de paso restringida.

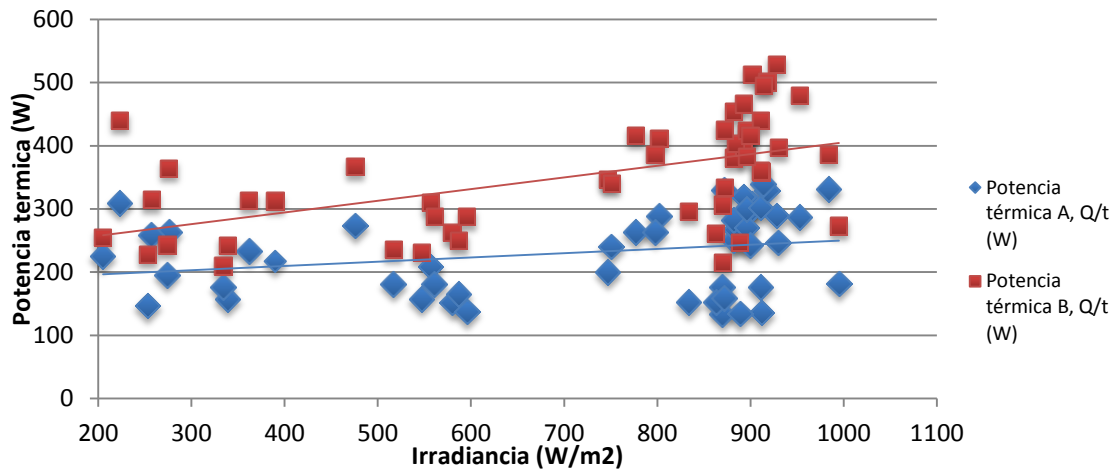
4.3. Potencia térmica

Una vez definidos los niveles de velocidad y salto térmico alcanzados en cada situación, se procede al análisis de la potencia térmica obtenida del sistema.

Las potencias térmicas se han obtenido como el producto de un C_p del aire, calor específico del aire a presión constante, el cual hemos considerado con un valor de 1004, el valor de flujo másico obtenido anteriormente y el salto de temperatura del aire que se produce a la entrada y a la salida de los paneles:

$$Q = C_p \times m \times \Delta T$$

En convección libre, podemos comprobar como los valores de potencia térmica responden con una dispersión muy elevada, en la configuración B las potencias son las más altas, comprendidas entre 370W y 520W seguidos por los valores de la configuración A, los cuales alcanzan valores cercanos a los 300W.



Gráfica 4.10. Valores de potencia térmica en **convección natural** para las configuraciones A y B

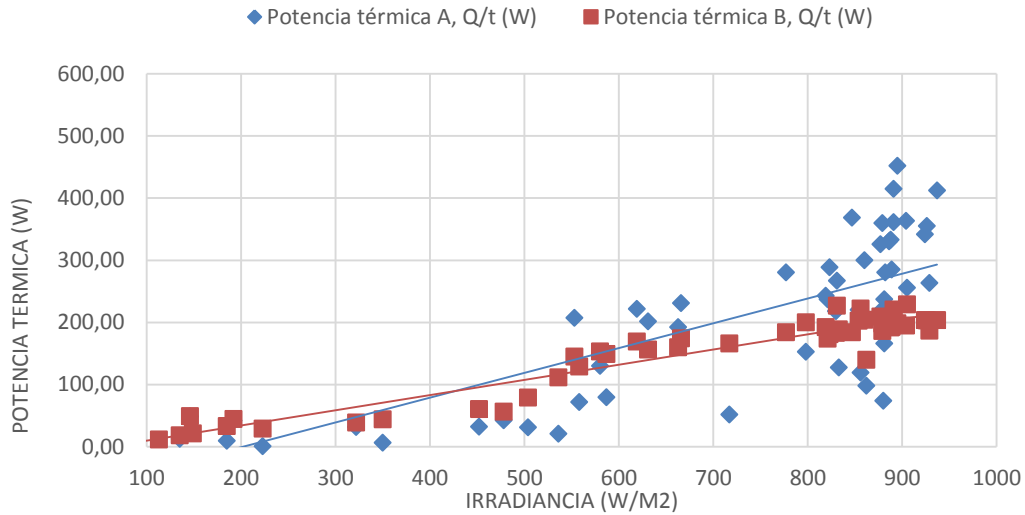
No se puede, por tanto, determinar un comportamiento específico o predecible de la potencia térmica en convección natural, aunque se observa que, a pesar de que las velocidades del aire en el canal son bajas, el salto térmico conseguido permite obtener potencias incluso superiores a los 500W en los casos más favorables.

En convección forzada se puede ver una tendencia lineal de la potencia térmica con la irradiancia. El aumento de la energía solar recibida da lugar a un incremento del salto de temperatura, repercutiendo en una mayor potencia térmica.

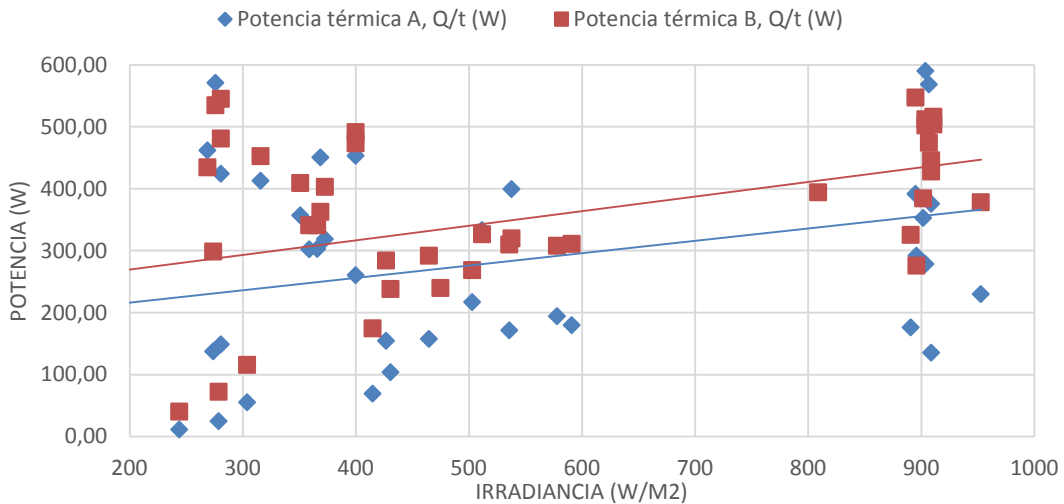
Al calcular la potencia a partir del gasto másico y del salto de temperatura, la pequeña incertidumbre que presentan los datos de estas variables se ve multiplicada en gran medida al realizar el producto con el calor específico a presión constante, cuyo valor es de 1004 J/Kg·K.

Por norma general se obtienen niveles de potencia térmica mayores en la configuración B, debido a que el término de temperatura adquiere un mayor peso que las variaciones de flujo másico en la potencia térmica.

En el ensayo realizado a FAN1 se advierte que los valores de potencia son mayores en la configuración A, este comportamiento difiere del resto de ensayos.

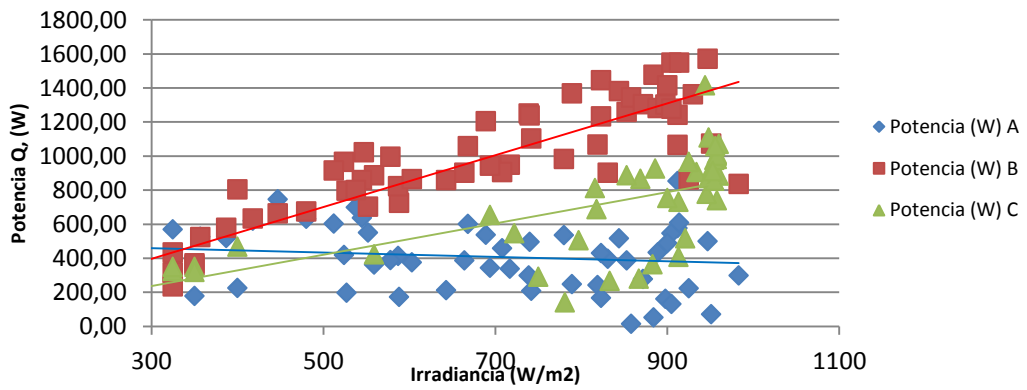


Gráfica 4.11. Valores de potencia térmica para velocidad del aire de 1,8m/s conf. A y de 1,5m/s conf. B FAN1

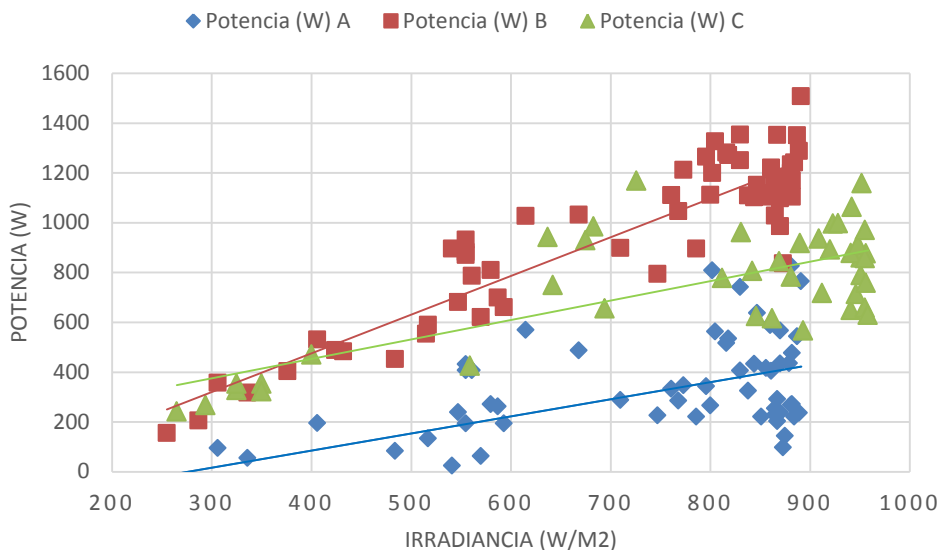


Gráfica 4.12. Valores de potencia térmica para velocidad del aire de 3,2m/s conf. A y de 2,1m/s conf. B FAN3

A continuación se muestran los resultados de las potencias para las tres configuraciones. La configuración B es la que mayores valores de potencia aporta, seguidos por los valores de la configuración C y finalmente A.



Gráfica 4.13. Valores de potencia térmica para velocidad del aire de 1,8m/s conf. A, de 1,5m/s conf. B y 10,6m/s conf. C FAN6

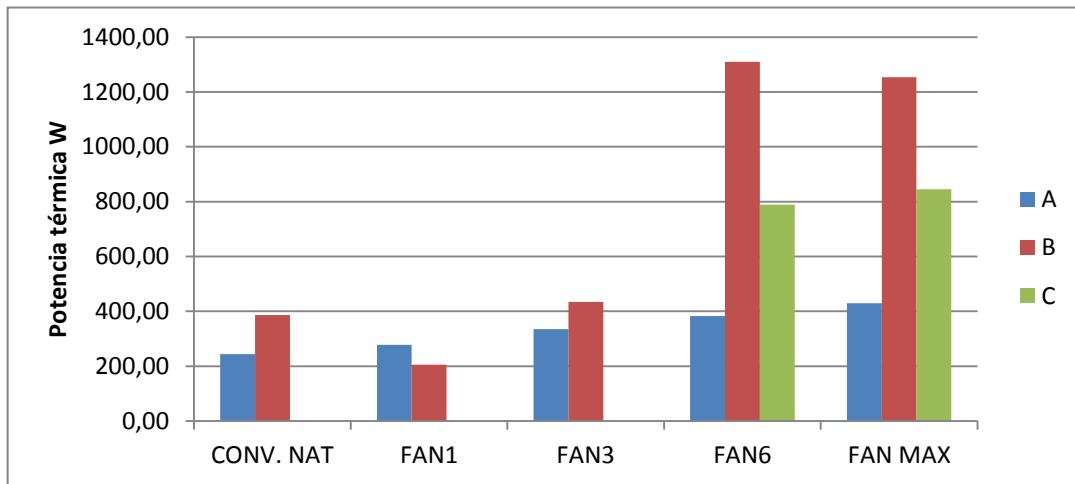


Gráfica 4.14. Valores de potencia térmica para velocidad del aire de 1,8m/s conf. A, de 1,5m/s conf. B y 11m/s conf. C FANMAX

Se aprecia que la potencia térmica en la configuración A, apenas sufre cambios en todas las posiciones del ventilador. Se debe esto, a que a pesar de que los incrementos de temperatura en convección natural alcanzan valores de hasta 6°C, en las demás posiciones de los ventiladores, los valores de temperatura van desde 2°C hasta 0,6°C, y esto contrarresta los niveles de flujo másico, donde en convección natural este valor es prácticamente nulo y en para las posiciones más altas de los ventiladores se alcanzan valores de hasta 0,70 kg/s.

Los valores más altos de potencia se registran en la configuración B, tanto para las posiciones FAN6 y FANMAX, la potencia térmica en C se mantiene prácticamente constante para los dos ensayos que hemos llevado a cabo con valores cercanos a los 800W.

A continuación se muestra una tabla con los valores de potencia obtenidos para una Irradiancia óptima de 900 (W/m²).

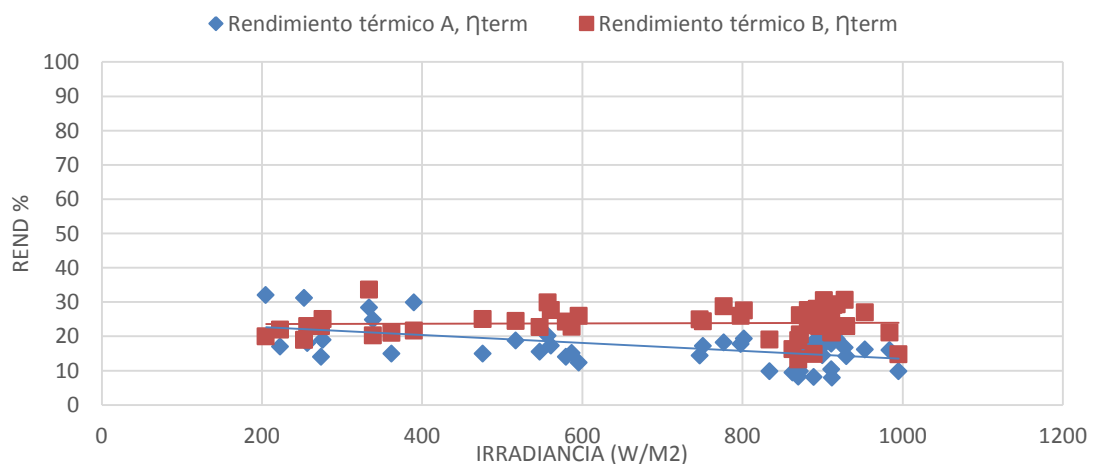


Gráfica 4.5. Resumen de valores de las potencias térmicas para un valor de Irradiancia de 900(W/m²)

Definimos el rendimiento térmico como la potencia térmica obtenida del sistema entre la potencia procedente de la radiación medida con el piranómetro. El rendimiento térmico es una variable que sólo resulta útil de analizar a partir de ciertos valores de irradiancia, ya que para valores bajos, la energía térmica de entrada al sistema llega a ser inferior a la energía extraída. La potencia que recibimos del exterior viene dada por la irradiancia (W/ m²) por la superficie sobre la que actúa, en nuestro caso la superficie de las placas fotovoltaicas y la superficie de la placa solar térmica.

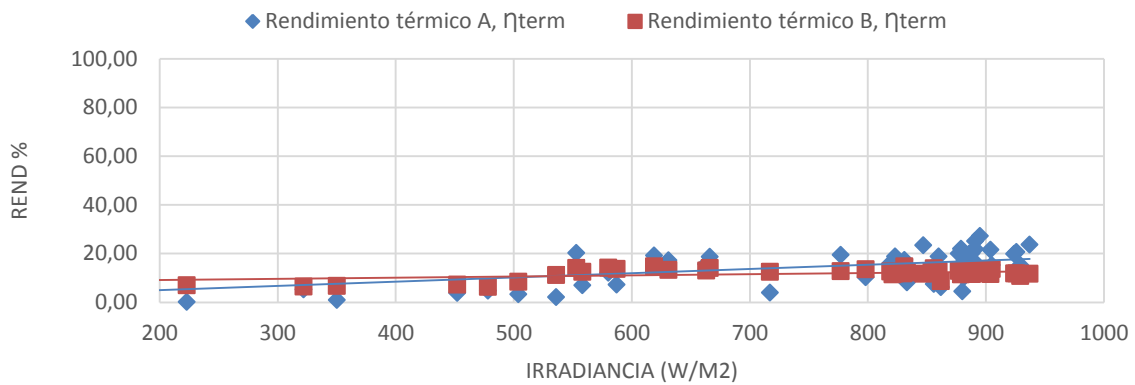
$$\eta = \frac{Q_{\text{térmica}}}{\text{Irradiancia} * S}$$

En convección natural, se aprecia unos rendimientos para la configuración B próximos al 25%, mientras que los rendimientos para la configuración A siguen una trayectoria descendiente llegando a niveles por debajo del 10%.



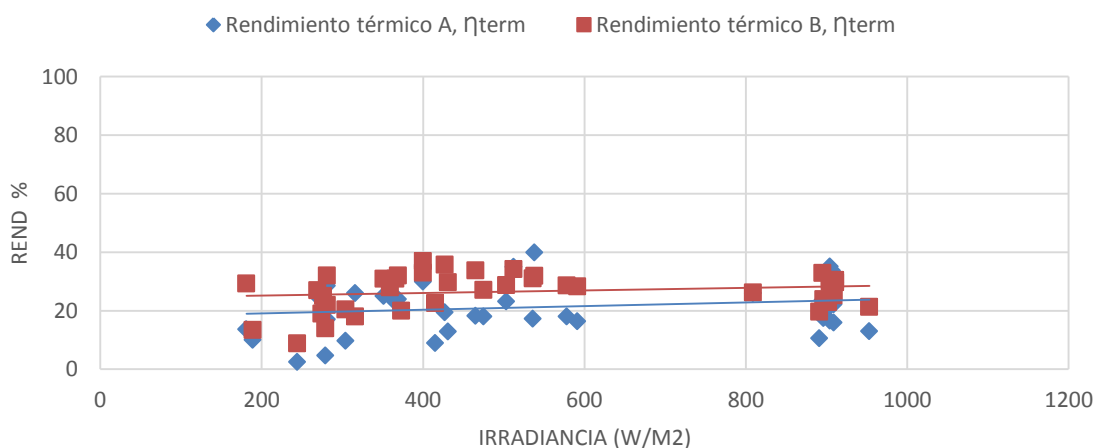
Gráfica 4.15. Valores de $\eta_{\text{térmico}}$ en **convección natural** para las configuraciones A y B

Podemos comprobar como el rendimiento térmico para la posición uno del ventilador, sigue la misma tendencia que la potencia, observándose mayores resultados en la configuración A.



Gráfica 4.16. Valores de $\eta_{\text{térmico}}$ para la velocidad del aire de 1,8m/s en conf.A y de 1,5m/s en conf.B
FAN1

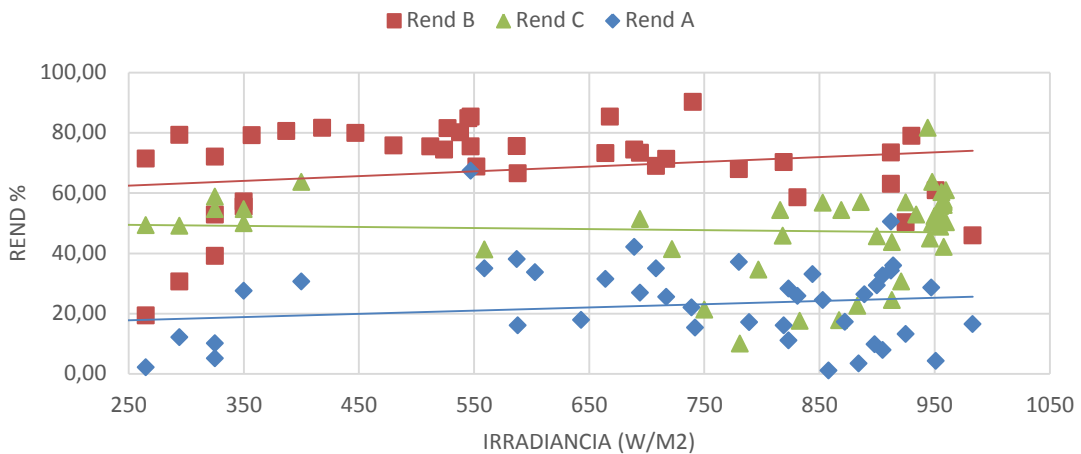
En convección forzada se observa cómo el rendimiento térmico sigue una cierta linealidad en función de la irradiancia, apreciando una ligera tendencia ascendente en la configuración A. En la configuración B esta tendencia se muestra de manera más pronunciada. De nuevo, la configuración B alcanza mejores resultados obteniéndose mayores rendimientos.



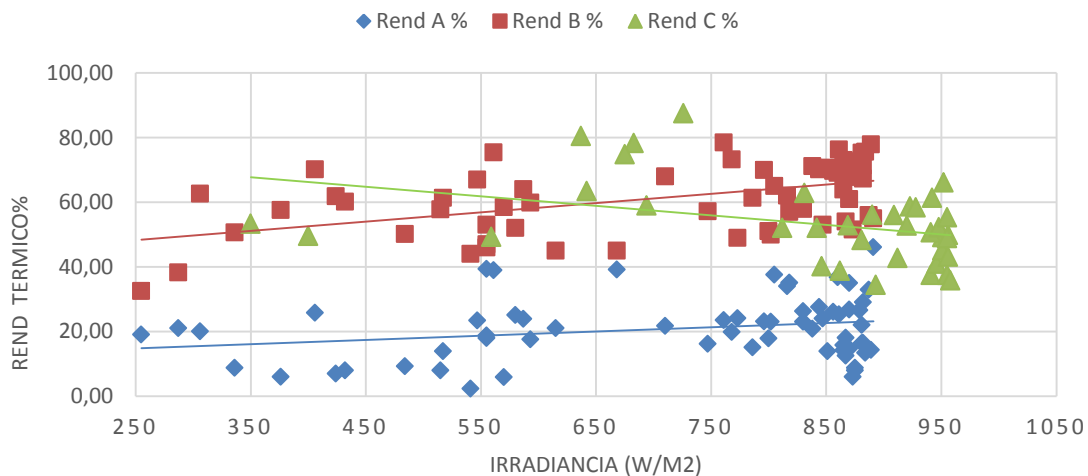
Gráfica 4.17. Valores de $\eta_{\text{térmico}}$ para la velocidad del aire de 3,2m/s en conf.A y de 2,1m/s en conf.B
FAN3

En las siguientes gráficas se muestran los valores obtenidos en las tres configuraciones ensayadas. Podemos comprobar cómo se sigue obteniendo los mayores valores de rendimiento en la configuración B, seguidos por la configuración C y finalmente la

configuración A. Al realizar la comparativa en posiciones altas de velocidad de los ventiladores, y debido a que los valores de flujo másico son diferentes no se puede hacer una comparativa real de los rendimientos obtenidos.



Gráfica 4.18. Valores de $\eta_{\text{térmico}}$ para la velocidad del aire de 9m/s en conf.A, de 5m/s en conf.B y de 10,6m/s en conf. C FAN6



Gráfica 4.19. Valores de $\eta_{\text{térmico}}$ para la velocidad del aire de 9m/s en conf.A, de 5m/s en conf.B y de 11m/s en conf. C FANMAX

Hay que tener en cuenta que para la configuración C se los días de ensayo válidos han sido menores y con otras condiciones ambientales, aunque se ha intentado coger los datos recogidos en las condiciones más parecidas posibles a las de los demás ensayos.

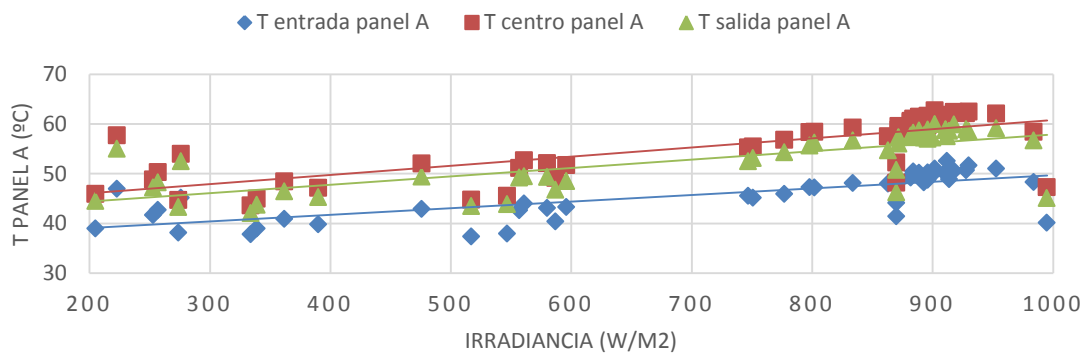
Al margen de lo comentado anteriormente, se observan tendencias altas de los valores de rendimientos conseguidos, especialmente en la configuración B. Esto tiene su explicación en que esta variable se calcula como el cociente entre la potencia térmica aprovechada por el sistema y la potencia captada a partir de la radiación solar

incidente. Para los niveles de velocidad más altos, la potencia térmica parte de valores superiores, al ser mayor el flujo másico. Esto hace que con un pequeño salto de temperatura se alcancen potencias mayores a las captadas a partir de la radiación solar.

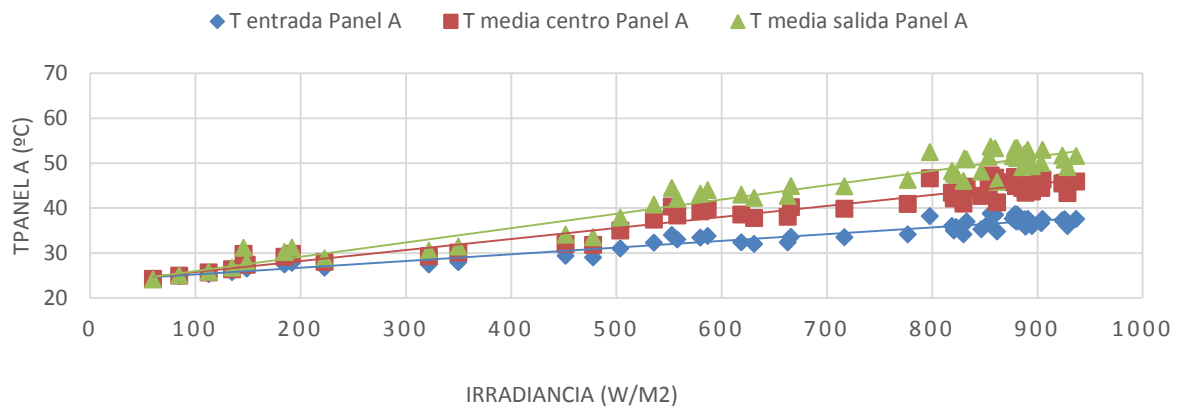
4.5. Temperatura del panel fotovoltaico.

4.5.1. Incremento de temperatura en el panel A.

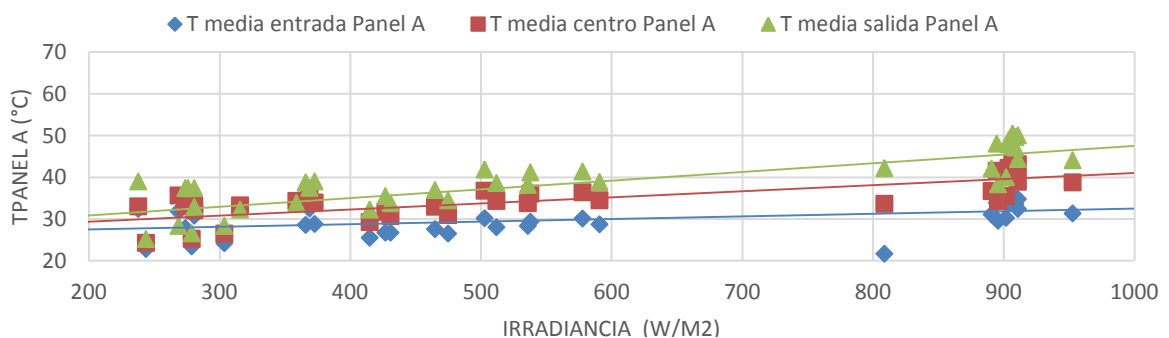
Se aborda ahora el análisis de las temperaturas en los paneles y en las placas aislantes de las configuraciones A y B.



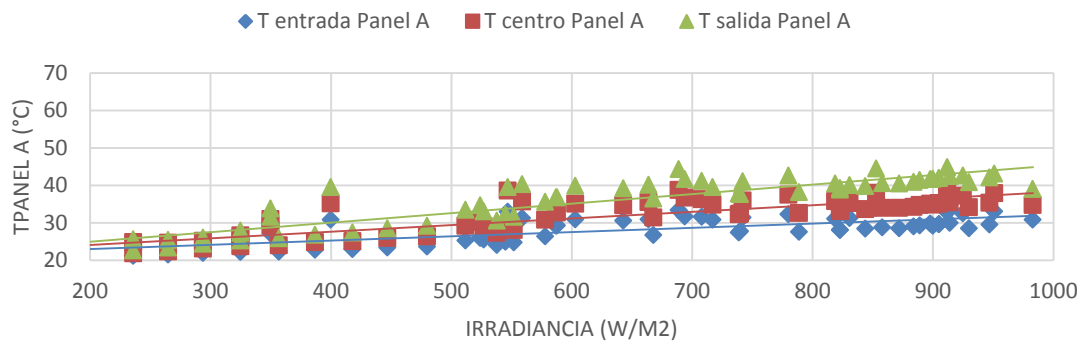
Gráfica 4.20. Incremento de la temperatura en **panel A** para posición del ventilador 0, convección natural.



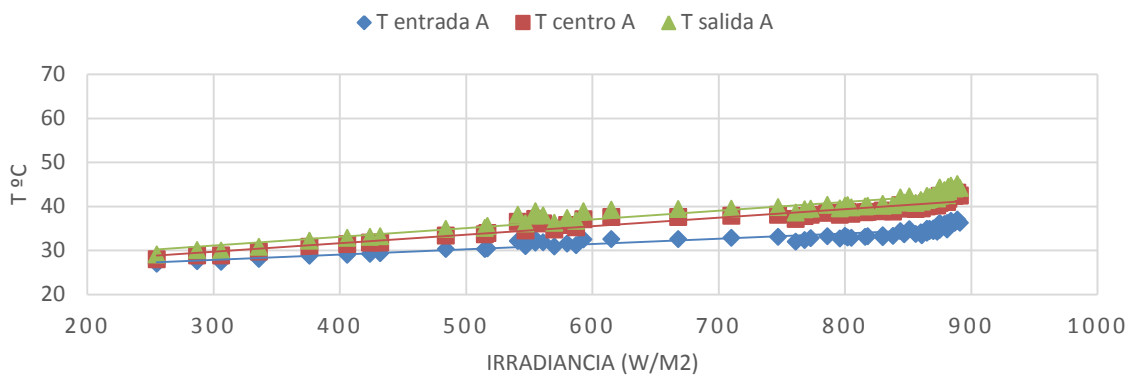
Gráfica 4.21. Incremento de la temperatura en **panel A** para posición **FAN1** del ventilado, velocidad del aire de 1,8m/s conf. A



Gráfica 4.22. Incremento de la temperatura en **panel A** para posición **FAN3** del ventilado, velocidad del aire de 3,2m/s conf. A



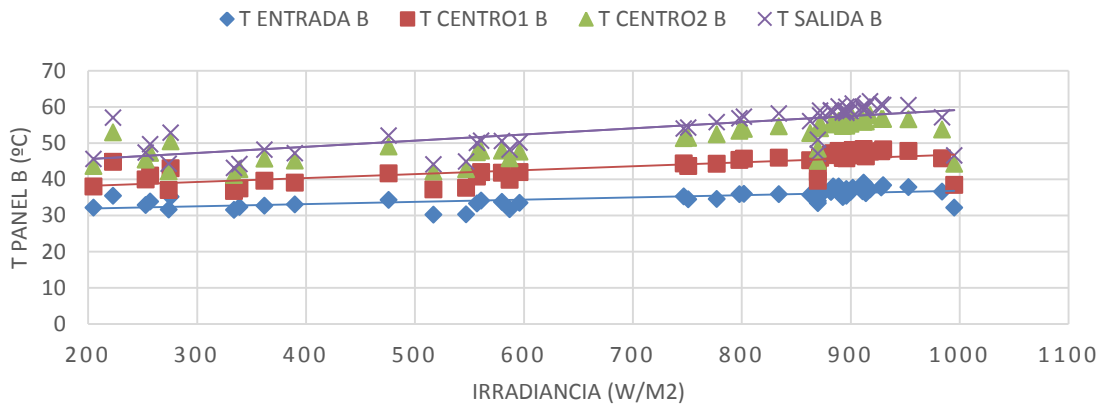
Gráfica 4.23. Incremento de la temperatura en **panel A** para posición **FAN6** del ventilado, velocidad del aire de 9m/s conf. A



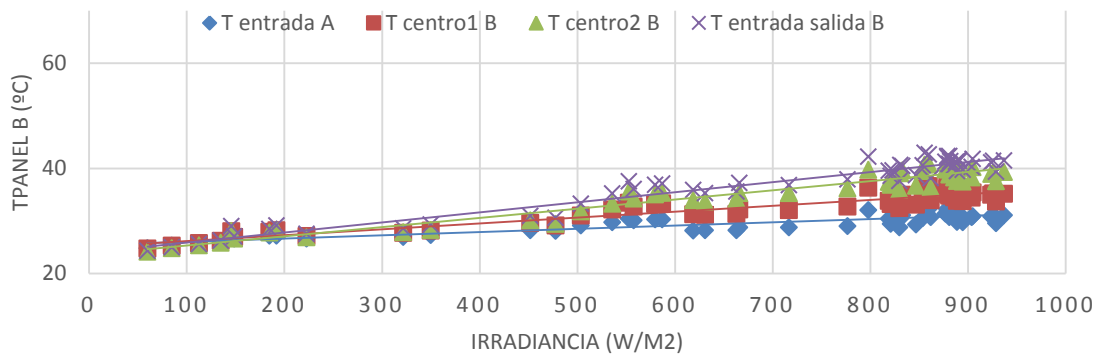
Gráfica 4.24. Incremento de la temperatura en **panel A** para posición **FANMAX** del ventilado, velocidad del aire de 9m/s conf. A

Se puede advertir que en la configuración A, se alcanzan los valores más altos en convección natural, con un rango de temperaturas que abarca valores desde 36°C a la entrada y de 44°C a la salida, hasta unos 37,5°C en la entrada para los valores más altos de Irradiancia y unos 56°C a la salida para estos mismos valores de Irradiancia. Con forme se aumenta la velocidad del aire en el interior de los canales de refrigeración la temperatura alcanzada en los paneles disminuye. Además podemos ver como el salto de temperatura entre la entrada y la salida también disminuye al aumentar la velocidad de los ventiladores.

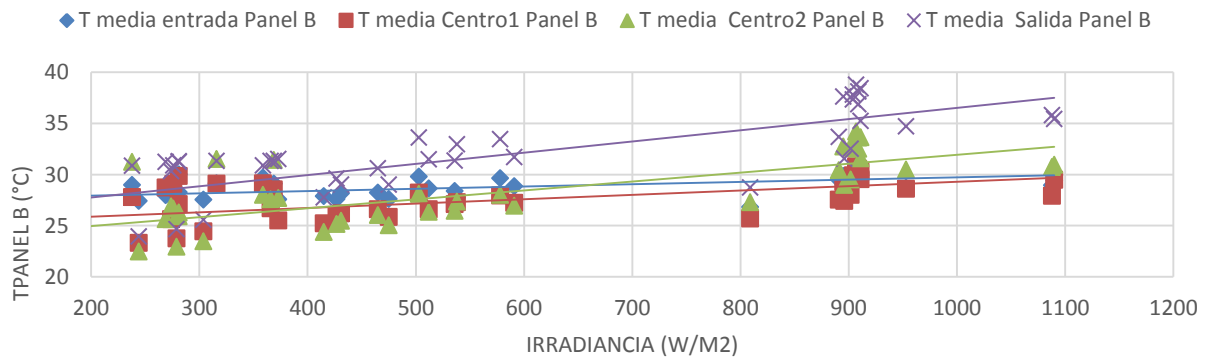
4.5.2. Incremento de temperatura en el panel B.



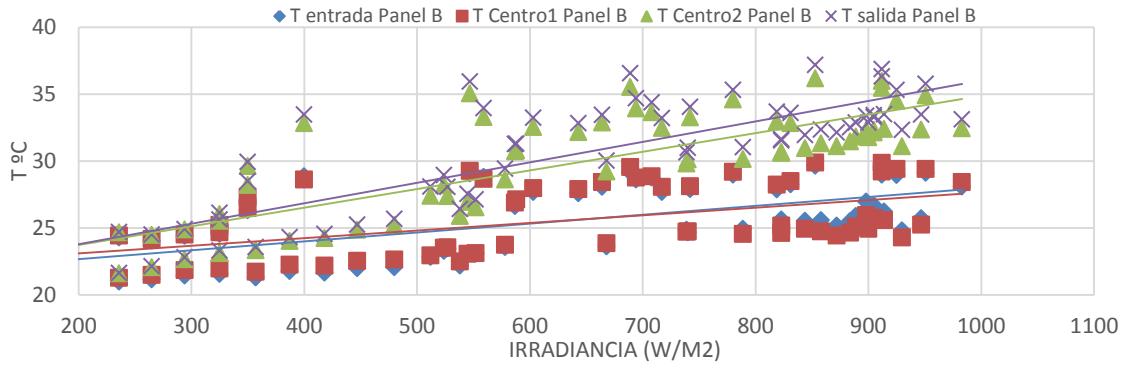
Gráfica 4.25. Incremento de la temperatura en **panel B** para posición del ventilador **0**, convección natural.



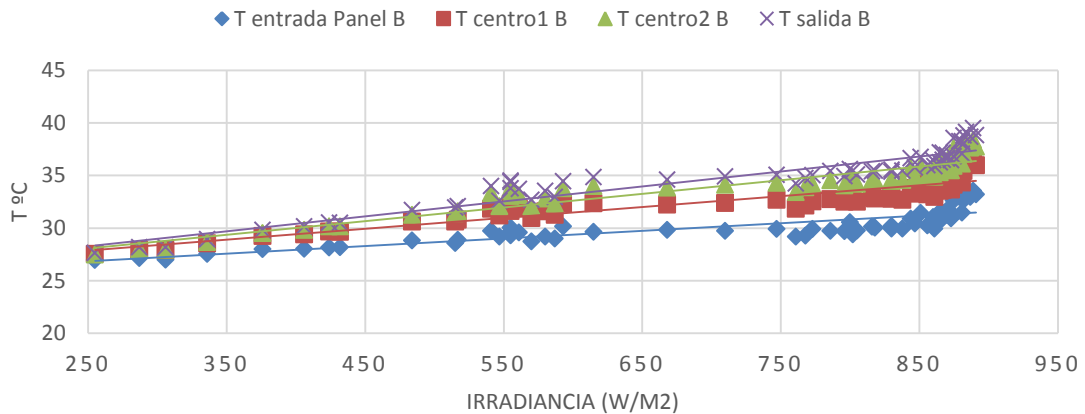
Gráfica 4.26. Incremento de la temperatura en **panel B** para posición **FAN1** del ventilado, velocidad del aire de 1,5m/s conf. B.



Gráfica 4.27. Incremento de la temperatura en **panel B** para posición **FAN3** del ventilado, velocidad del aire de 2,1m/s conf. B.



Gráfica 4.28. Incremento de la temperatura en **panel B** para posición **FAN6** del ventilado, velocidad del aire 5m/s conf. B.



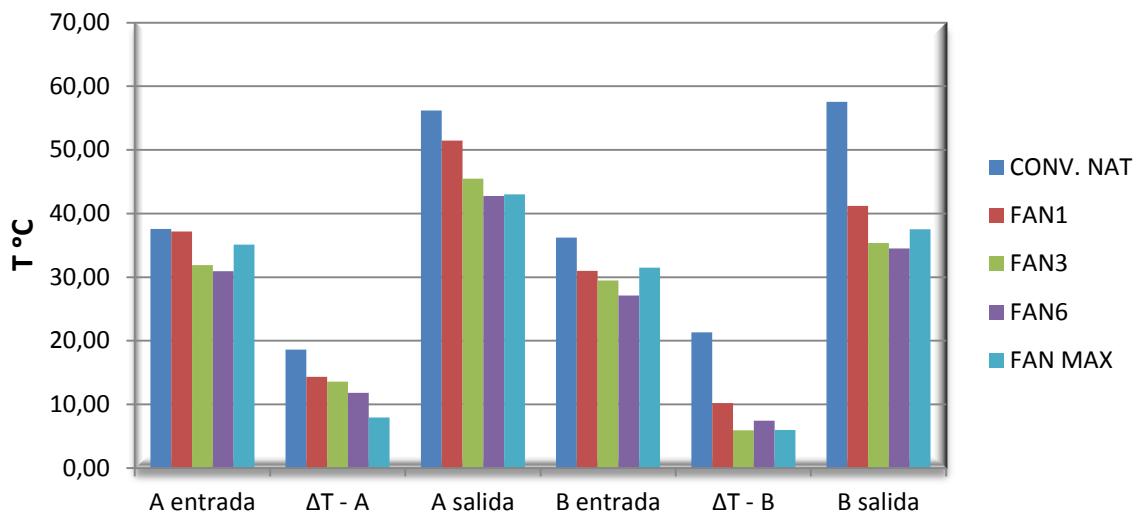
Gráfica 4.29. Incremento de la temperatura en **panel B** para posición **FANMAX** del ventilado, velocidad del aire de 5m/s conf. B.

Del mismo modo que en el panel A, para la configuración B la temperatura desciende conforme disminuye la velocidad del aire en el panel.

En la gráfica 4.30. se resumen las temperaturas alcanzadas a la entrada y a la salida de ambas configuraciones A y B, además de los saltos de temperatura que se encuentran en cada punto, para un valor alto de Irradiancia igual a 900W/m².

Se puede ver como la temperatura más alta del panel se alcanza en convección natural para la configuración B, para el resto de posiciones de los ventiladores las mayores temperaturas de los paneles se consiguen en la configuración A. Por lo que queda comprobado que con los resultados comentados anteriormente sobre los incrementos de la temperatura del aire en el interior de los paneles, en los cuales se puede ver como se alcanzan las temperaturas más altas del aire en la configuración B, repercuten directamente en estos resultados, puesto que a mayor temperatura del aire se

advierte una reducción en la temperatura de los paneles, consiguiendo así el propósito del estudio.



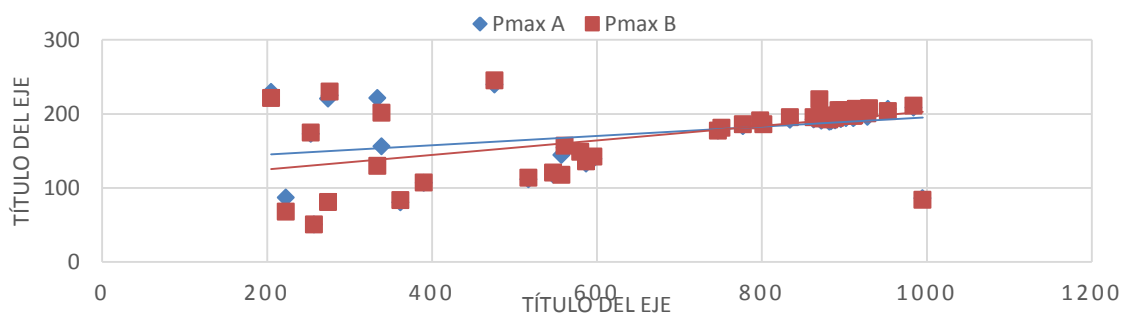
Gráfica 4.30. Resumen de temperaturas alcanzadas en los paneles A y B.

4.6. Análisis de datos eléctricos

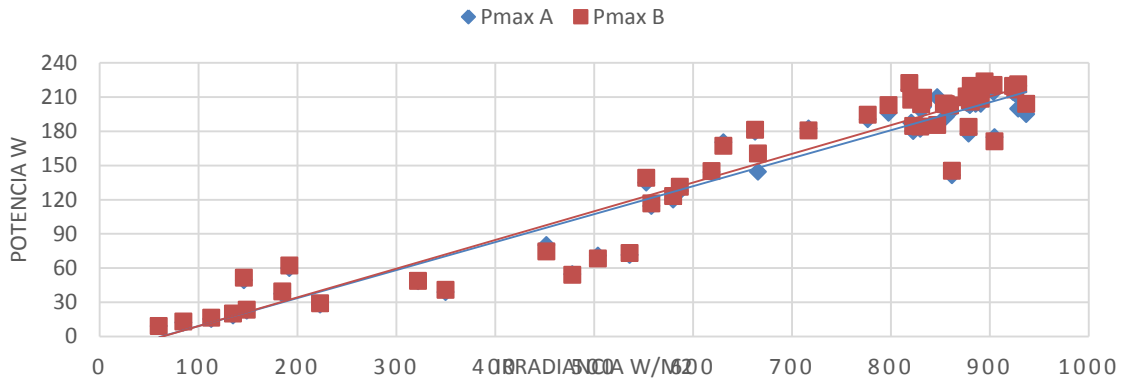
4.6.1. Potencias eléctricas

Para obtener las variables eléctricas más representativas de los paneles fotovoltaicos han sido tratados datos de tensión e intensidad obtenidos de los mismos.

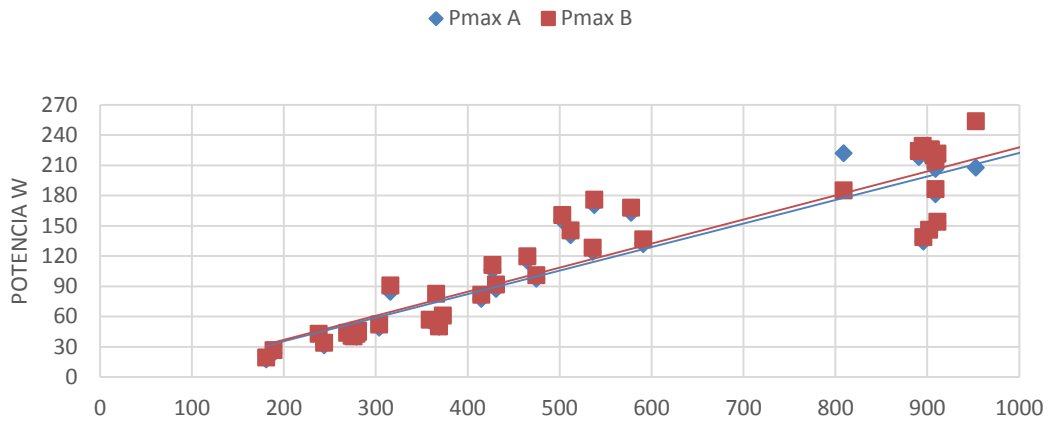
Hay que tener en cuenta que el funcionamiento de la carga con la cual conseguimos dichos valores no se ajusta a la realidad, puesto que dicha carga solo entra en funcionamiento el momento en el que registra los valores de tensión e intensidad. Para que actuase correctamente, debería estar en constante funcionamiento, ya que al no ser así, los datos quedan falseados puesto que el tiempo que no se activa la misma hay un aumento de la temperatura producido por la tensión producida en los paneles fotovoltaicos al no disiparse la potencia acumulada. Aun así podemos ver en rasgos generales como actúan las potencias eléctricas conseguidas en función de la configuración en la que se miden.



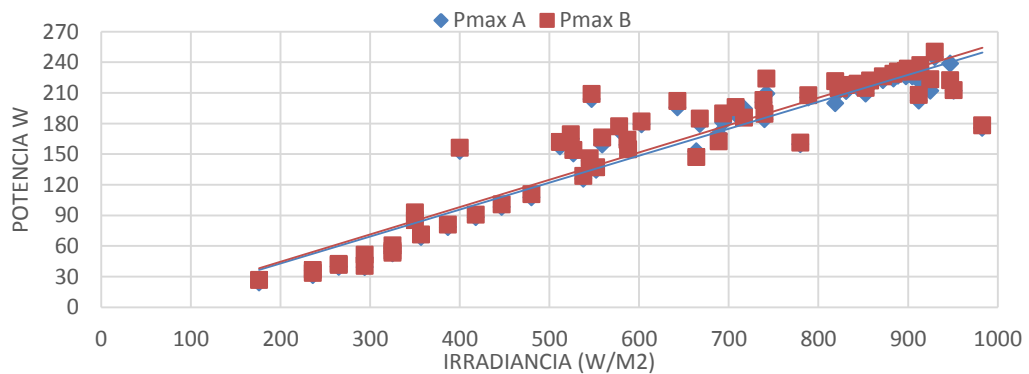
Gráfica 4.31. Potencias eléctricas máximas conseguidas en **convección natural**.



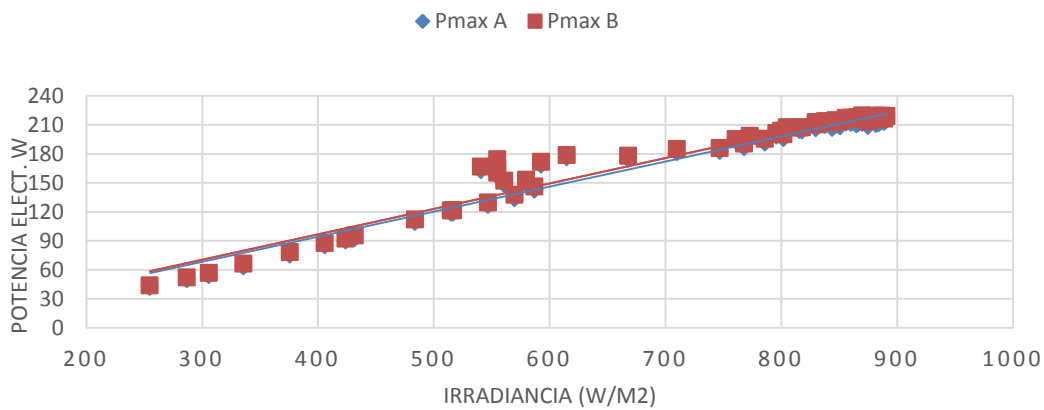
Gráfica 4.32. Potencias eléctricas máximas conseguidas en la posición **FAN1** velocidad del aire de 1,8m/s conf. A y de 1,5m/s conf. B



Gráfica 4.33. Potencias eléctricas máximas conseguidas en la posición **FAN3** velocidad del aire de 3,2m/s conf. A y de 2,1m/s conf. B

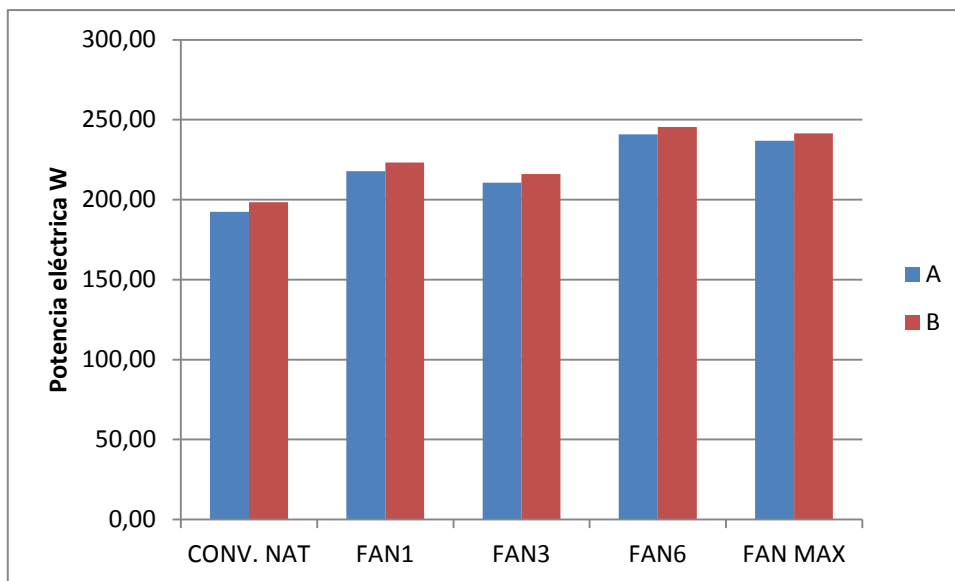


Gráfica 4.34. Potencias eléctricas máximas conseguidas en la posición **FAN6** velocidad del aire de 9m/s conf. A y de 5m/s conf. B



Gráfica 4.35. Potencias eléctricas máximas conseguidas en la posición **FANMAX** velocidad del aire de 9m/s conf. A y de 5m/s conf. B

Con las gráficas presentadas se puede ver como la potencia eléctrica conseguida aumenta de manera significativa en el momento que ponemos en funcionamiento la convección forzada, puesto que los valores más bajos se consiguen en convección natural, y los valores más altos de potencia los encontramos en cuando la posición de los ventiladores es más alta. A continuación se muestra una gráfica representativa de los valores de potencia que obtenemos para un nivel de Irradiancia de $900\text{W}/\text{m}^2$.



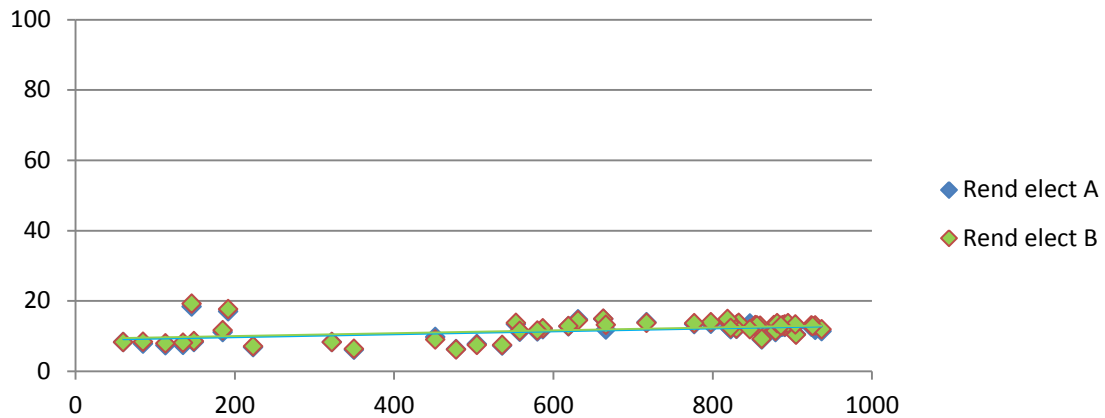
Gráfica 4.36. Resumen de las potencias eléctricas para una Irradiancia de $900\text{W}/\text{m}^2$.

Como hemos comentado antes, las potencias que aparecen son superiores a las reales, pero se puede ver como conseguimos dicho aumento de la potencia al refrigerar los paneles fotovoltaicos.

A continuación realizaremos un estudio de los rendimientos eléctricos y totales conseguidos por nuestro sistema.

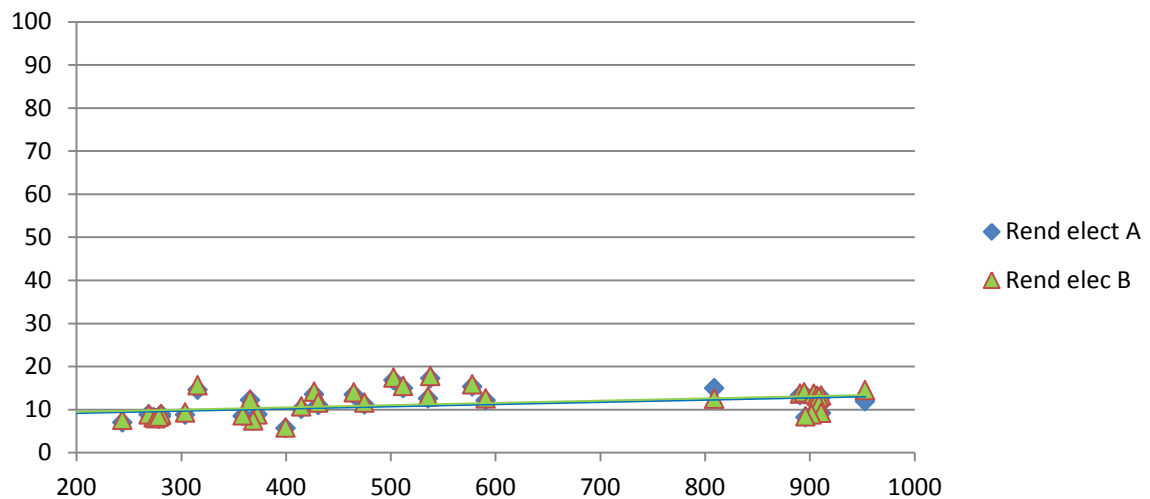
4.6.2. Rendimientos eléctricos

Los rendimientos eléctricos conseguidos se encuentran entre un 8% y un 14% para los valores más altos.

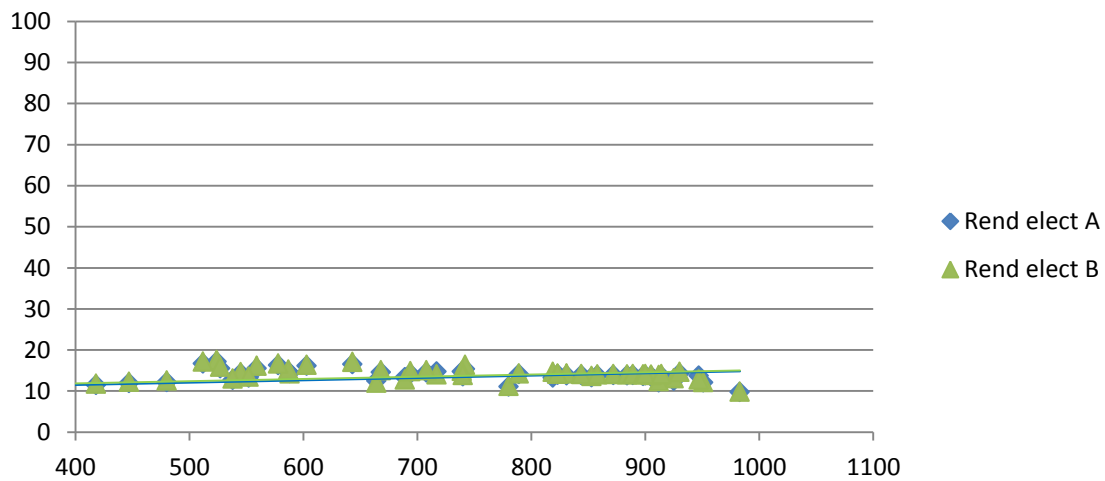


Gráfica 4.37. Rendimiento eléctrico conseguidos en la posición **FAN1** velocidad del aire de 1,8m/s conf. A y de 1,5m/s conf. B

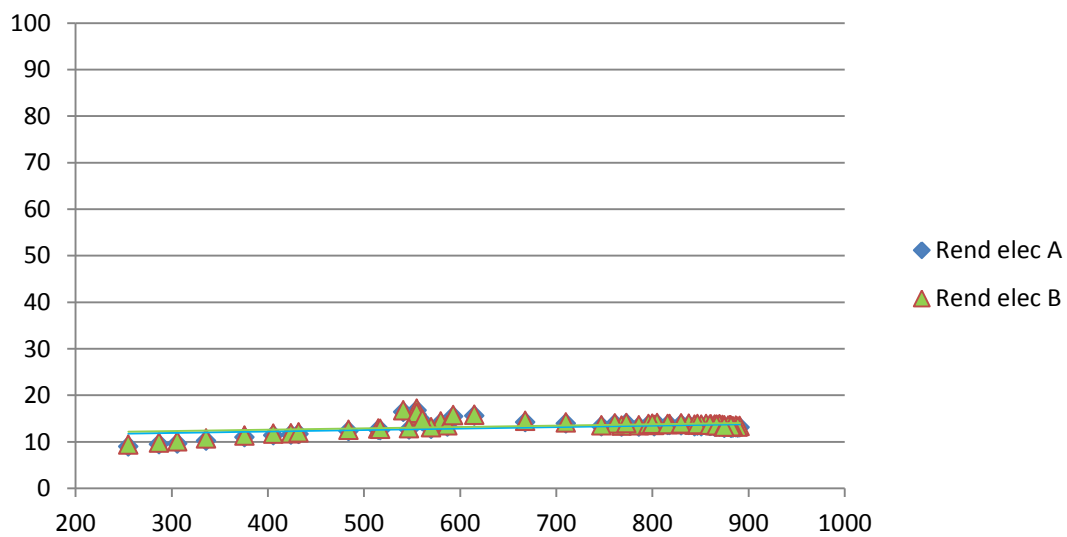
Podemos comprobar como el rendimiento eléctrico va aumentando conforme los niveles de Irradiancia son mayores, de este modo se llegan a valores de rendimiento altos para los paneles fotovoltaicos, del orden del 15%.



Gráfica 4.38. Rendimiento eléctrico conseguidos en la posición **FAN3** velocidad del aire de 3,2m/s conf. A y de 2,1m/s conf. B



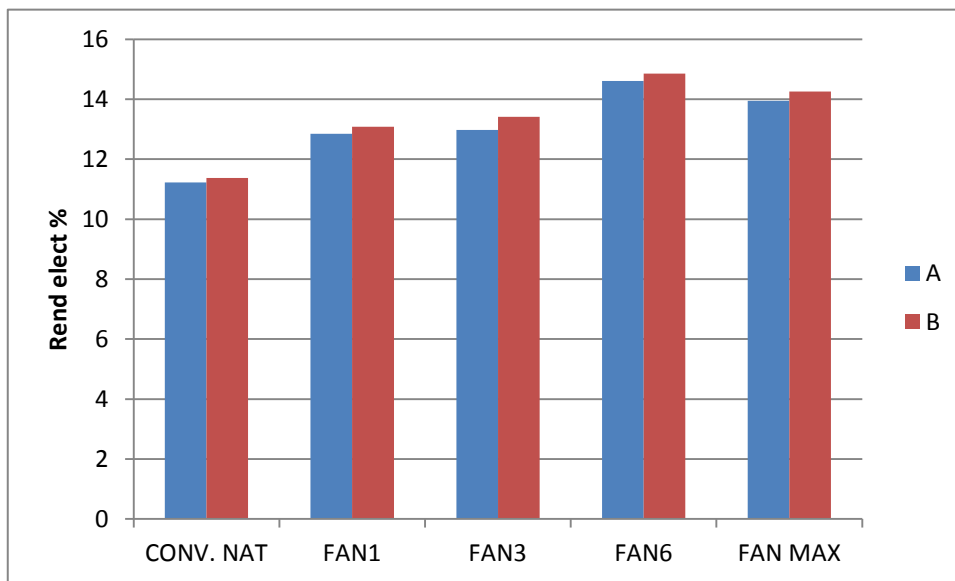
Gráfica 4.39. Rendimiento eléctrico conseguidos en la posición **FAN6** velocidad del aire de 9m/s conf. A y de 5m/s conf. B



Gráfica 4.40. Rendimiento eléctrico conseguidos en la posición **FANMAX** velocidad del aire de 9m/s conf. A y de 5m/s conf. B

Se puede comprobar en las gráficas presentadas como los rendimientos eléctricos, tanto para la configuración A como para la B son muy similares, aunque en valores absolutos tomando puntos concretos de las gráficas se puede visualizar como en todos los casos se obtiene unos valores mayores de rendimiento para la configuración B, en torno a un 2 – 4%.

A continuación se muestra una gráfica con los valores de rendimiento en el punto de Irradiancia de $900\text{W}/\text{m}^2$.



Gráfica 4.41. Rendimiento de los rendimientos eléctricos.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de caudal $Q(\text{m}^3/\text{h})$ obtenidos a través de los datos de presión relativa, recogidos en los tubos de venturi que hemos instalado para las tres configuraciones en la instalación, nos dan una visión de como el flujo de aire fluye por los canales en las distintas configuraciones, obteniendo resultados con muy pocas fluctuaciones excepto para convección natural, donde el caudal recogido presenta bastantes dispersiones y con valores muy pequeños, en algunos casos despreciables. Hemos podido comprobar como tanto en la configuración A con el canal libre, y en la configuración B con las placas intercaladas en el canal, el caudal de aire aumenta de manera lineal obteniendo los mayores valores para la configuración A, con resultados por encima de los $2000\text{m}^3/\text{h}$ en esta. Para la configuración B los valores más elevados se encuentran por encima de los $1100\text{m}^3/\text{h}$, este decremento de caudal se debe claro está, a que las placas intercaladas en el panel B obstaculizan la circulación del aire. Sin embargo en la configuración C, con la placa solar térmica de aire, aun teniendo instalado un ventilador cuyo caudal máximo está al nivel del utilizado en las otras dos configuraciones, sobre los $3600\text{m}^3/\text{h}$, los valores que hemos podido recoger máximos se sitúan por debajo de los obtenidos en las otras dos configuraciones, sobre los $800\text{m}^3/\text{h}$ de aire, se debe esto a varios factores, por un lado se tenemos que el área de entrada al canal en la configuración C es menor que al que tenemos en las otras dos, y por otro lado, al diseño de la placa térmica en si mismo, ya que el recorrido del aire entre la entrada y la salida es menor. Los valores descritos de caudal en la

configuración A y en la B, son los mismos para las dos últimas posiciones de los ventiladores tanto a FAN6 como a FANMAX. Para las posiciones más pequeñas de los ventiladores comprobamos como el caudal aumenta en menor medida, es a partir de la posición seis donde encontramos el salto significativo del mismo.

Del mismo modo, el flujo másico establecido en cada canal muestra cómo en convección natural existe una gran dispersión de esta variable, mientras que en convección forzada, los valores se ordenan en torno a un nivel determinado. Sucede en las tres configuraciones que la velocidad registrada en los canales llega a un cierto límite a pesar de aumentar la potencia suministrada al ventilador. Tanto en la configuración A como en la configuración B, este límite se alcanza a partir de la posición 6 de los ventiladores donde tenemos un valor máximo de flujo másico de 0,70(Kg/s) para la configuración A y de 0,40(Kg/s) en la configuración B, en la configuración C el flujo másico que se ha obtenido está en torno a 0,25(Kg/s). El hecho de no poder superarlos puede deberse a la geometría propia del sistema, donde una reducción brusca de la sección de paso del aire entre el canal de refrigeración y el ventilador impide establecer regímenes superiores.

Uno de los efectos de mayor relevancia en este estudio es el salto de temperatura del aire entre la entrada y la salida del canal de refrigeración, dada su vital importancia en la obtención de la potencia térmica del sistema. El incremento de temperatura del aire presenta una tendencia creciente con la Irradiancia, como era de esperar. Por otro lado muestra una relación inversamente proporcional al flujo másico, es decir, a menores velocidades de aire se consigue incrementar su entalpía en mayor medida gracias a un mayor tiempo en contacto con la superficie del panel fotovoltaico. En convección natural, es donde se han obtenido los datos más elevados de este incremento de temperatura del aire, llegando a valores por encima de los 12°C en la configuración B frente a unos casi 6°C para la configuración A, sin embargo en las posiciones más altas de los ventiladores el mayor incremento de aire se consigue en la configuración C, con valores de 3,6°C, en la configuración B tenemos valores muy cercanos a los conseguidos en la configuración C, este hecho nos hace dudar sobre algún error que se haya podido cometer a la hora de registrar los datos de temperatura, puesto que en la configuración C, la temperatura de aire debería ser bastante más elevada ya que la placa está diseñada para este fin. Pero también hay que tener en cuenta que la placa térmica original estaba diseñada para funcionar con unos valores de caudal mucho más reducidos, de 125m³/h, al realizar el cambio en la ventilación de la misma para conseguir valores de caudal mucho más elevados, próximos a los que tenemos en las otras dos configuraciones, se podría justificar la poca variación en el incremento de la temperatura del aire de la configuración C, respecto al de la configuración B. Para poder corroborar los datos obtenidos se deberían planificar futuros ensayos en los cuales se trabaje con caudales bajos en la configuración C.

En cuanto a la potencia térmica obtenida del sistema, cabe citar que los resultados presentan una incertidumbre algo elevada. Se debe este fenómeno a que la potencia es una variable secundaria, calculada a partir del flujo másico y el salto de temperatura del aire. Estas dos variables presentan una incertidumbre relativamente baja en su medida, pero al multiplicar por el calor específico a presión constante, que es del

orden del millar, los errores se hacen mucho más notables. A pesar de ello, se puede identificar un comportamiento claro de la potencia en función de los niveles de irradiancia y de velocidad del aire en el canal. En la configuración A, vemos como la potencia máxima obtenida aumenta de manera progresiva partiendo en convección natural con un valor de 240W y finalmente en la posición de velocidad del aire máxima tenemos un valor de 430W. En cambio, en la configuración B, la progresividad en el aumento de la potencia máxima obtenida se mantiene hasta la posición tres del ventilador donde en convección natural tenemos valores del orden de 380W y en la posición tres se alcanzan los 430W, pero en las posiciones más altas del ventilador la potencia obtenida llega a los 1300W. Esto se debe a que para la configuración A aun teniendo los valores de flujo másico más elevados, los incrementos de temperatura son muy bajos en las posiciones más altas de los ventiladores, mientras que en la configuración B, tenemos valores de flujo másicos menos elevados, pero siguen siendo altos, y los incrementos de temperatura son bastante más notables. En la configuración C la potencia térmica obtenida ronda los 850W en la posición más elevada del ventilador, este valor es menor que el conseguido en la configuración B, debido a que en esta configuración tenemos los valores más pequeños de flujo másico.

Respecto al rendimiento térmico, podemos comprobar como hemos conseguido valores en torno al 20% para la configuración A, para todos los casos excepto en convección natural, donde tenemos los un rendimiento que se acerca al 15%. En la configuración B, los valores de potencia térmica obtenidos fluctúan de manera mucho más significativa que en la configuración A, los valores de rendimiento en la posición uno de los ventiladores son los menores, con rendimientos térmicos cercanos al 10%, en convección natural y en la posición tres de los ventiladores estos valores están entre el 21% y el 27%, pero una vez que nos encontramos en las posiciones máximas de los ventiladores, los rendimientos térmicos aparecen con valores muy elevados por encima del 70%. Este salto en el rendimiento se debe como hemos explicado antes al hablar de la potencia térmica obtenida, debido a que los flujos másicos con los que trabajamos son muy elevados, por lo tanto para el cálculo de la potencia como para la posterior consecución del rendimiento aparecen valores muy elevados. En la configuración C, los valores de rendimiento térmico obtenidos son del orden del 50%.

Uno de los objetivos secundarios del trabajo es analizar el comportamiento eléctrico de la instalación, en concreto, de la mejora de la eficiencia eléctrica de los paneles fotovoltaicos. Teniendo en cuenta que este rendimiento depende de la temperatura del panel, se ha analizado esta variable en función de las distintas condiciones de ensayo a las que se ha sometido la instalación. Los resultados muestran que a mayores velocidades del aire de refrigeración se consiguen menores temperaturas del panel. Tanto en la configuración A como en la configuración B, obteniendo una diferencia significativa de temperatura entre los valores obtenidos tanto a la entrada como a la salida del panel B respecto del panel A, diferencias de entre 6 y 7°C entre uno y otro, siendo los valores del panel B los más bajos en todos los casos excepto en convección natural donde la temperatura de los paneles es prácticamente igual. Este descenso de la temperatura del panel se ha reflejado en los datos de potencia y rendimiento eléctricos obtenidos en ambos paneles, donde se puede observar como para la configuración B, tenemos valores de potencia mayores, con rendimientos eléctricos mayores, del orden de un 1,5% en los casos más favorables.

Se deduce, por tanto, que la mejora propuesta por medio de la configuración B, no sólo es capaz de conseguir mayores saltos de temperatura del aire, sino que también al reducir la temperatura de los paneles fotovoltaicos, se consiguen niveles de potencia eléctrica obtenida superiores, aunque con poca relevancia. La configuración C, con los datos ensayados no ha aportado la suficiente claridad sobre su eficiencia a la hora de conseguir valores de rendimiento térmico, aunque se puede observar como el rendimiento térmico obtenido es superior al que encontramos en la configuración A, la que posee para todos los casos los peores resultados de rendimiento.

6. CONCLUSIÓN

Se ha llevado a cabo la instalación de la placa solar térmica de aire y la puesta a punto de los sensores utilizados en nuestro estudio, incluyendo la nueva actualización de los tubos de venturi, lo que nos ha permitido adquirir conocimientos en instrumentación de equipos electrónicos.

Las dos placas fotovoltaicas se han estudiado bajo las mismas condiciones atmosféricas y en los mismos días, a diferencia de la placa solar térmica de aire, en la cual se realizaron los ensayos más tarde, y con el problema de no conseguir datos para sus condiciones de funcionamiento óptimas con caudales más bajos. Esto ha supuesto que los datos adquiridos no se pueden evaluar de la misma manera que en las otras dos configuraciones.

Los resultados muestran el salto de temperatura de aire entre la entrada y la salida del canal de refrigeración, los cuales son de gran interés debido a que los saltos de temperaturas obtenidos en la configuración B son elevados, por lo que se puede afirmar que la utilización de las placas intercaladas en el canal cumplen con su propósito de conseguir un mayor tiempo de residencia del aire en el interior del canal y por lo tanto aumentar su temperatura. Si analizamos los datos de potencia térmica obtenida se puede observar como en las posiciones más elevadas de los ventiladores se consiguen potencias superiores en la configuración B que en la C, por lo que queda demostrado que para estos niveles de velocidad de aire, como así queda reflejado en los rendimientos térmicos también, es la configuración B la más eficaz.

En lo que concierne a la regeneración de ruedas desecantes, los resultados de potencia térmica y de salto de temperatura registrados pueden ser útiles en este sentido. Aunque no se consigue aumentar directamente la temperatura del aire hasta los 80-90°C necesarios para el proceso de regeneración, sí que se ha conseguido cuantificar el salto que se produce en función de distintas condiciones. La información recaudada permite, por ejemplo, conocer el grado de apoyo que el sistema de refrigeración de paneles fotovoltaicos puede dar al proceso de regeneración. Esta información también permite hacer una estimación del salto de temperatura que se podría conseguir al alargar el canal de refrigeración haciendo que el aire pasase por varios paneles en serie.

En cuanto a la mejora del rendimiento eléctrico podemos decir que gracias al descenso de la temperatura del panel en la configuración B, conseguimos mejores rendimientos eléctricos. Las temperaturas más bajas de los paneles se consiguen en las posiciones de velocidad de aire más elevadas, por lo que los ventiladores están funcionando a su máxima potencia, por lo que no resultaría del todo rentable la utilización de este sistema para aumentar el rendimiento eléctrico. Sin embargo, en términos generales podemos observar como si además de conseguir un rendimiento térmico elevado se adquiere un incremento del rendimiento eléctrico, la configuración B aporta valores muy interesantes a tener en cuenta.

Para futuros trabajos, siguiendo esta línea de investigación se propone volver a ensayar esta instalación durante un mayor período de tiempo, aportando más datos en la configuración C, como podría ser la temperatura de entrada en el canal, además de conseguir realizar ensayos en su configuración óptima de funcionamiento, con caudales más bajos, y de este modo poder comparar los rendimientos térmicos obtenidos en las tres configuraciones de manera más detallada.

BLIBLIOGRAFÍA

Abdolzadeh, M., & Ameri, M. (2008). Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells. *Renewable Energy*, *37*, 91-96.

Argaw, N. (1995). Optimal load matching in photovoltaic water pumps coupled with DC/AC inverter. *International Journal of Solar Energy*, *18*, 41-52.

Bourdoukan, P., Wurtz, E., & Joubert, P. (2010). Comparison between the conventional and recirculation modes in desiccant cooling cycles and deriving critical efficiencies of components. *Energy*, *35*, 1057-1067.

Brinkworth, B. (2000). Estimation of flow and heat transfer for the design of PV cooling ducts. *Solar Energy*, *69*, 413-420.

Brinkworth, B. J., Cross, B. M., Marshall, R. H., & Yang, H. (1997). Thermal regulation of photovoltaic cladding. *Solar Energy*, *61*, 169-178.

Brogren, M., & Karlsson, B. (2002). Low-concentrating water-cooled PV-thermal hybrid systems for high latitudes. *The twenty-ninth IEEE photovoltaic specialists conference*, (pp. 1733-1786).

Enteria, N., Yoshino, H., Mochida, A., Satake, A., Yoshie, R., Takaki, R., . . . Tanaka, Y. (2012). Performance of solar-desiccant cooling system with Silica-Gel (SiO₂) and Titanium Dioxide (TiO₂) desiccant wheel applied in East Asian climates. *Solar Energy*, *89*, 1261-1279.

Ge, T. S., Dai, Y. J., & Wang, R. Z. (2014). Review on solar powered rotary desiccant wheel cooling system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *39*, 476-497.

Henning, H.-M., Erpenbeck, T., Hindenburg, C., & Santamaria, I. S. (2001). The potential of solar energy use in desiccant cooling cycles. *International Journal of Refrigeration*, *24*, 220-229.

Kaiser, A. S., Zamora, B., Mazón, R., García, J. R., & Vera, F. (2014). Experimental study of cooling BIPV modules by forced convection in the air channel. *Applied Energy*, *135*, 88-97.

Kozak, T., Maranda, W., Napieralski, A., De Mey, G., & De Vos, A. (2009). Influence of Ambient Temperature on the Amount of Electric Energy Produced by Solar Modules. *MIXDES 16th International Conference 'Mixed Design of integrated Circuits and Systems'*, (pp. 351-354).

Krauter, S. (2004). Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, *82*, 131-137.

Marco, B., Pietro, F., & Bettina, N. (2012). Energy performance evaluation of a demo solar desiccant cooling system with heat recovery for the regeneration of the adsorption material. *Renew Energy*, *44*, 40-52. 76

Juan Domingo González Teruel. (2011-2015). Evaluación del potencial térmico del Sistema de ventilación y refrigeración de una instalación de placas solares fotovoltaicas, 53-70

- Maycock, P., & Stirewalt, E. (1985). *A guide to the photovoltaic revolution*. Pennsylvania: Rodale Press.
- Mazón, R. (2014). *Estudio de la influencia de la refrigeración con aire de forma natural e inducida en el comportamiento de instalaciones fotovoltaicas*. Tesis doctoral: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Mei, L., Infield, D., Eicker, U., Loveday, D., & Fux, V. (2006). Cooling potential of ventilated PV façade and solar air heaters combined with a desiccant cooling machine. *Renewable Energy*, *31*, 1265-1278.
- Moshfegh, B., & Sandberg, M. (1998). Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels. *Renew Sustain Energy*, *2*, 287-301.
- National Instruments. (s.f.). Obtenido de Soporte y Servicios: <http://www.ni.com>
- Preisler, A., & Brychta, M. (2012). High potential of full year operation with solar driven desiccant evaporative cooling systems. *Energy Procedia*, *30*, 668-675.
- Ruivo, C. R., Angrisani, G., & Minichiello, F. (2015). Influence of the rotation speed on the effectiveness parameters of a desiccant wheel: An assessment using experimental data and manufacturer software. *Renewable Energy*, *76*, 484-493.
- Sandberg, M., & Moshfegh, B. (2002). Buoyancy-induced air flow in Photovoltaic façades effect of geometry of the airgap and location of solar cell modules. *Build Environ*, *37*, 211-218.
- Sanvicente, E. (2013). *Experimental investigation of thermal and fluid dynamical behavior of flows in open-ended channels: Application to Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems*. PhD thesis: INSA de Lyon.
- Short, T., & Oldach, R. (2003). Solar powered water pumps: the past the present and the future. *Journal of Solar Energy Engineering*, *125*, 76-82.
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy*, *34*, 23-29.
- Srinivas, M., & Jayaraj, S. (2013). Investigations on the performance of a double pass, hybrid - type (PV/T) solar air heater. *International Journal of Energy and Environment*, *4*(4), 687-698.
- Tiwari, A., Sodha, M. S., Chandra, A., & Joshi, J. C. (2006). Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, *90*, 175-189.
- Tonui, J. K., & Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renewable Energy*, *32*, 623-637.
- Wilson, E. (2007). Theoretical and operational thermal performance of a 'wet' crystalline silicon PV module under Jamaican conditions. *Renewable Energy*, *34*, 1655-1660.

