



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
Facultad de Ciencias Físicas
Curso 2011/12

MÁSTER DE FÍSICA APLICADA
Módulo de Energías Renovables
Septiembre de 2012



Proyecto Fin de Máster:

CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE PANELES HIBRIDOS
TERMOFOTOVOLTAICOS
(CHARACTERIZATION AND STUDY OF HYBRID PANELL TPV)

Palabras clave: Energía, Solar, Fotovoltaica, Térmica, Panel, Híbrido, Renovable

Keywords: Energy, Solar, Photovoltaic, Thermal, Panel, Hybrid, Renewable

CONTENIDOS

- 1. Introducción de contenidos y fundamentos**
- 2. Desarrollo de los objetivos e innovación**
- 3. Metodología y temporalización de trabajo**
- 4. Dispositivo y procedimiento experimental**
- 5. Resultados obtenidos y análisis de los mismos**
- 6. Conclusiones y aplicaciones**
- 7. Bibliografía**
- 8. Autorizaciones**

Dirección del trabajo:

CARLOS ARMENTA DÉU

cardeu@fis.ucm.es

MOHAMED KHAYET SOUHAIMI

khayetm@fis.ucm.es

Estudiante:

ALEN DANIEL RIDA GONZÁLEZ

alenrida@gmail.com

RESUMEN

En el mundo en que vivimos es cada vez más necesaria la optimización de todos los recursos, en especial los energéticos; de hecho el consumo de energía es uno de los grandes medidores del progreso y bienestar de una sociedad. De un tiempo a esta parte hemos visto como muchas de las fuentes tradicionales de energía están próximas a agotarse y/o son en gran medida contaminantes, por lo que se requieren fuentes alternativas a medio y corto plazo. Por otro lado, las fuentes de energía, renovables, limpias y con un mayor potencial energético, no están lo suficientemente explotadas ni desarrolladas como para satisfacer por sí solas la demanda. De ahí la imperiosa necesidad de la investigación en este campo. El objetivo principal de este proyecto consiste en el desarrollo de un novedoso sistema de paneles híbridos termo-fotovoltaicos. Se pretende optimizar el rendimiento de una célula fotovoltaica por medio de un fluido refrigerante, reduciendo su temperatura y utilizar la energía extraída en un intercambiador térmico, para calentar un fluido secundario logrando, por tanto, una mayor eficiencia y vida útil del sistema, así como la producción de energía eléctrica y calorífica, reduciendo la superficie, los residuos y los costos. Por último, el trabajo busca encontrar las aplicaciones que mejor se adapten a este nuevo prototipo.

SUMMARY

In present world, the requirement of optimizing all kind of resources it's becoming increasingly necessary; especially the energy ones, in fact, the energy consumption is the most representative index of progress and welfare in our society. In recent times, we have seen that many of traditional energy sources are close to exhaustion, besides they are largely pollutants, so alternative sources are needed in medium and short term. On the other hand, renewable energy sources, clean and with great energy potential, are not exploited or developed enough to satisfy energy demand by themselves. Hence, the need for research on this field becomes urgent. The main goal of this project is the development of a new system of hybrid thermal photovoltaic panels. Is intended to optimize the performance of a photovoltaic panel by means of a cooling fluid, reducing its temperature and using the thermal energy extracted in a heat exchanger to heat a secondary fluid, thus achieving a greater efficiency and longer life, as well as reduction of surface, wastes and costs. Finally, the paper seeks the applications that fit to this new prototype in the best way.

CONTENIDOS Y FUNDAMENTOS

La energía solar se viene usando desde el principio de los tiempos, ya sea de manera natural, como en el crecimiento de plantas, hasta las más modernas técnicas de aprovechamiento solar. Estas técnicas están en constante evolución siempre tratando de mejorar los rendimientos y por tanto el porcentaje de energía solar aprovechada. Esta energía pudiera, y debiera, ser una solución al abastecimiento energético a medio y largo plazo; para hacernos una idea la energía solar recibida en la Tierra anualmente equivale al doble de toda la energía que producen otras fuentes no renovables tales como el petróleo, el carbón, el uranio y el gas natural.

La energía solar recibida sobre la superficie terrestre, abarca desde el infrarrojo, menos energético y comúnmente asociado a aplicaciones térmicas pero, que es en un cierto porcentaje absorbido por los distintos gases atmosféricos, hasta el ultravioleta, que constituye la porción más energética del espectro electromagnético que incide sobre la superficie terrestre, con mayor aplicación en el campo fotovoltaico, si bien es el rango del visible es el que se aprovecha en mayor medida, al constituir la fracción más relevante. Es por ello la importancia de crear una aplicación capaz de aprovechar todos los rangos del espectro.

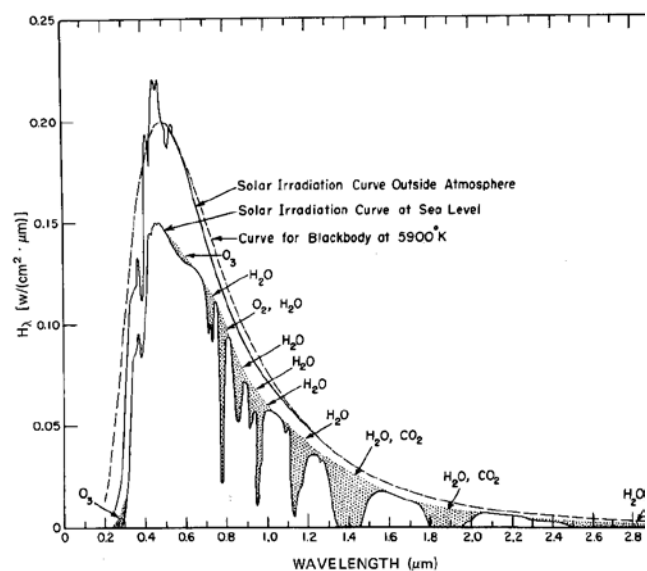


Ilustración 1. Espectro solar

El efecto fotoeléctrico, en el cual se basa la conversión fotovoltaica, es más eficiente cuanto mayor es el ajuste entre la energía de los fotones procedentes de la irradiancia solar y el gap del semiconductor que se utiliza para dicha conversión. Debido a que los fotones no tienen todos la misma frecuencia y, por tanto, la misma energía, es imposible obtener un perfecto ajuste, lo que motiva pérdidas de energía y reduce la eficiencia. Esta pérdida de energía se traduce, en su mayor parte en generación de energía calorífica, lo que genera un aumento de temperatura debido a distintos mecanismos sobre los que la temperatura influye de manera significativa. Como resultado de ello, una forma de mejorar la eficiencia del dispositivo

fotovoltaico sería reducir dichas pérdidas, disminuyendo así el aumento de temperatura, y mejorando el rendimiento global. Por otro lado, si la energía calorífica disipada puede ser aprovechada, el rendimiento conjunto se vería mejorado.

$\lambda(\text{\AA})$	$E_g \text{ (eV)}$	$\lambda(\text{\AA})$	$E_g \text{ (eV)}$
3000	4.14	5500	2.26
3500	3.55	6000	2.07
4000	3.11	6500	1.91
4500	3.00	7000	1.78
5000	2.49		

Tabla 1. Variación de la energía del fotón con el espectro solar visible

Un semiconductor es un material que en función de diversos factores, puede comportarse como conductor o como aislante, los semiconductores pueden ser dopados sustituyendo átomos del mismo material por otros diferentes con el fin de aumentar el número de portadores de carga libres, obteniendo un semiconductor extrínseco tipo n o tipo p (con exceso de electrones o huecos, respectivamente). Al unir dos cristales uno tipo p y otro tipo n, se produce una difusión de electrones de la parte n a la p, apareciendo una zona de cargas fijas (negativas en la parte p y positivas en la parte n) denominada “zona de carga espacial”, estas cargas generan a su vez un campo eléctrico que se opone a la difusión llegando al equilibrio, creando una diferencia de potencial entre ambas zonas. Al irradiar con luz la unión p-n, se generan en la unión, pares electrón-hueco de tal manera que el campo fuerza a los huecos a trasladarse a la región p y a los electrones a la región n.

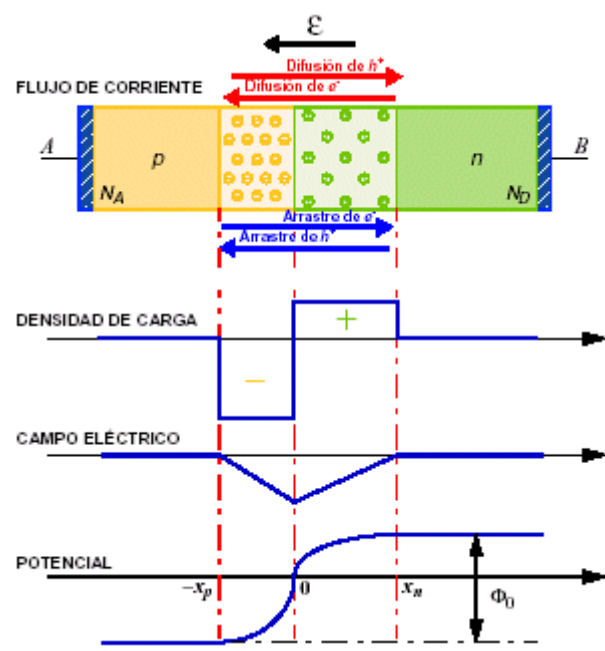


Ilustración 2. Esquema de la unión P-N

El calor puede ser transmitido por tres mecanismos, conducción, convección y radiación. La conducción, requiere un contacto directo y no se aprecia un movimiento macroscópico de la

materia, dependiendo por lo tanto de una propiedad de cada material denominada “conductividad térmica” que determina la capacidad que tiene cada material para transmitir calor a través de una superficie de contacto. El flujo de calor en una dirección (x) se rige según la ley de Fourier:

$$\frac{dQ_x}{dt} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

(Q_x , calor en la dirección de x; t, tiempo; k, conductividad térmica; A, superficie de contacto; T, temperatura)

La convección se produce únicamente en materiales fluidos, que se calientan variando su densidad, normalmente aumenta el volumen y por tanto disminuye su densidad produciendo un ascenso del mismo, pudiendo desplazar por tanto el fluido más frío (corrientes de convección). La transferencia de calor por convección se expresa mediante la ley de enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = -hA_s(T_s - T_f) \quad (2)$$

(Q, calor; t, tiempo; h, coeficiente de convección, A_s , superficie de contacto; T_s , temperatura en la superficie, T_f , temperatura del fluido)

En lo relativo al fenómeno de radiación, podemos determinar directamente la radiación térmica que emite un cuerpo real; para ello bastaría considerar la emisividad ϵ , relación entre la irradiación emitida y la que emitiría el cuerpo negro, mediante la ley de Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma(T^4 - T_a^4) \quad (3)$$

(E, potencia emisiva superficial; σ , constante de Stefan-Boltzmann $5,68 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$; T, temperatura; T_a , temperatura ambiente)

Para un cuerpo real que recibe radiación tenemos tres factores, absorbancia (α , relación entre la irradiación absorbida e incidente), transmitancia (τ relación entre la irradiación transmitida e incidente), y reflectancia (ρ relación entre la irradiación reflejada e incidente), que han de cumplir la siguiente relación:

$$1 = \alpha + \tau + \rho \quad (4)$$

Una vez transferida, la energía calorífica se almacena produciendo un efecto sobre el fluido refrigerante, ya sea causando un cambio en su temperatura; calor sensible, o provocando un cambio de fase; calor latente.

En el caso de utilizar tanto la energía fotovoltaica como la fototérmica en un dispositivo de carácter híbrido termosolar, obtenemos un mayor aprovechamiento del recurso solar recibido, ya que explotamos distintos rangos del espectro solar y además mejoramos el rendimiento y la durabilidad del sistema. En primera aproximación, sin tener en cuenta otros efectos de degradación del panel, la potencia de salida de un panel fotovoltaico viene determinada por la siguiente expresión:

$$P_t = P_p \left(1 - \frac{\delta(T_t - 25)}{100} \right) \quad (5)$$

(P_t , potencia de trabajo; P_p , potencia pico del panel; δ , coeficiente de degradación en % / °C; T_t , temperatura del panel)

por lo que a menor temperatura de trabajo, mayor potencia de salida. Por otro lado, tenemos un factor no suficientemente valorado habitualmente en los circuitos eléctricos, que es la variación de la resistencia eléctrica por efecto de la temperatura. Normalmente, la mayoría de los metales aumentan su resistencia eléctrica con la temperatura, al aumentar la energía cinética interna de sus partículas, pero existen también otros materiales como el carbono o el germanio donde la respuesta es inversa y también se da otro fenómeno en diversos materiales (cerámicas, semiconductores muy dopados, aleaciones, estaño, aluminio...) denominado superconductividad, en los que a temperaturas muy bajas la resistencia de estos materiales se vuelve nula. Para estudiar la respuesta de un conductor normal integrado un circuito eléctrico, y ver las ventajas de trabajar a baja temperatura, podemos guiarnos por la siguiente fórmula:

$$R_f = R_0 \left(1 + \alpha(T_t - 20) \right) \quad (6)$$

(R_f , resistencia final; R_0 , resistencia de referencia 20°C; α , coeficiente Olveriano del material; T_t , temperatura de trabajo)

OBJETIVOS E INNOVACION

En el campo del aprovechamiento energético solar, son bien conocidos los módulos fotovoltaicos para producir electricidad y los captadores térmicos que proporcionan ACS. Ambos sistemas son independientes y diferentes, pero no son en absoluto incompatible, pudiendo complementarse mediante un diseño híbrido que permita utilizar ambas fuentes de energía, térmica y eléctrica, en un proceso llamado de “cogeneración”. En esencia es lo que aquí se propone, acoplar a un panel fotovoltaico, un sistema de refrigeración que a su vez sea usado como sistema térmico, con un fluido refrigerante que actúe también como calorportador, pudiendo posteriormente generar agua caliente mediante un intercambiador.

Es de todos conocida la incompatibilidad existente entre temperatura y sistemas basados en electricidad, lo cual no siempre es tenido en cuenta como se debería. Un problema de esta índole es el uso de células fotovoltaicas convencionales, ya que éstas disminuyen su rendimiento en función de la temperatura de operación a la que estén trabajando, lo que significa que según aumente la irradiancia solar, la célula se vuelve menos eficiente. La solución, que en teoría en un principio parece sencilla, refrigerar la célula, en la práctica no lo es tanto, ya que un sistema de refrigeración requiere un consumo energético, con lo cual el rendimiento global igualmente baja. De ahí la ventaja de este novedoso sistema, no sólo se aumenta el rendimiento fotovoltaico sin un gasto energético extra, sino que además se genera energía térmica.

Es habitual encontrar en los paneles fototérmicos directamente agua como fluido calorportador, o incluso algunos aceites y refrigerantes. Dado que vamos a trabajar en el régimen de bajas temperaturas, el agua es la mejor opción, si bien se puede mejorar aún más el rendimiento usando otros refrigerantes, que sin elevar en gran medida los costos, sean más eficientes.

Por otro lado un inconveniente de la energía solar es la necesidad de grandes extensiones para obtener cantidades significativas de energía. Con este nuevo sistema podemos reducir la superficie requerida, con una ganancia en la capacidad y generando a su vez energía térmica, sin apenas residuos.

Otro aspecto que también se ha de tener en cuenta en la utilización de estos paneles solares híbridos, es la prolongación de la vida útil del mismo, ya que al operar a menor temperatura, se trabaja en una zona más adecuada, tanto para los semiconductores como para los demás componentes electrónicos, que forman las células y los paneles.

Un último aspecto que se debe considerar a favor de este método, es la reducción tanto en los costes de producción inicial como en los residuos generados al final de la vida útil de la instalación, ya que existen muchos elementos que son comunes en los paneles fotovoltaicos y térmicos (cubierta, marco, tapas aislantes, etc....) que utilizando el sistema híbrido propuesto no es necesario duplicar.

Por todo lo anteriormente expuesto, podemos decir que el objetivo es conseguir una explotación más eficiente del recurso solar, así como un mayor aprovechamiento de los materiales y medios utilizados, reduciendo los costos y la superficie de terreno explotada.

Siempre que se lleva a cabo un proyecto nuevo, es muy importante no perder de vista su utilidad práctica, por ello no debemos olvidar las posibles aplicaciones a nuestra empresa ni los rangos en los que nos encontramos. En nuestro caso, es de esperar que para la parte fotovoltaica simplemente obtengamos un mejor rendimiento del panel, por lo que su utilización no varía, pero para la parte térmica es de esperar que nos encontremos limitados a las aplicaciones de bajas temperaturas.

METODOLOGÍA Y TEMPORALIZACIÓN

Una vez tenidas en cuenta las consideraciones teóricas previas, procederemos a realizar los primeros ensayos, que servirán de verificación y calibración del sistema. En primer lugar se procede a la caracterización de una célula y posteriormente del panel fotovoltaico que, a posteriori, usaremos en los ensayos (Nousol 11000004). Para ello, dispondremos de un potenciómetro (25W, 2.5A y 250 Ω), diversos ventiladores (15W), un amperímetro, un voltímetro y un data-logger para el registro de la temperatura, la cual se medirá por medio de termopares tipo K.

En primer lugar, determinaremos la curva característica de la célula y el panel en condiciones controladas, mediante iluminación artificial, para seguidamente repetir el proceso en condiciones naturales, con iluminación solar. A partir de la curva de respuesta se determina la curva de potencia para diversos valores de irradiancia, en ambos casos con y sin refrigeración, comparando ambos valores, fundamentalmente en el punto de máxima potencia.

Para esta primera simulación se usará refrigeración por corrientes de aire, utilizando ventiladores, ya que como se ha dicho, el fin es conocer los rangos de actuación de los dispositivos que vamos a utilizar y obtener una primera aproximación de los resultados, para así poder determinar con mayor precisión las características y valores de los elementos que vamos a precisar para realizar las medidas. Las ventajas del uso del aire como fluido refrigerante son su abundancia, nulo coste, y facilidad de uso.

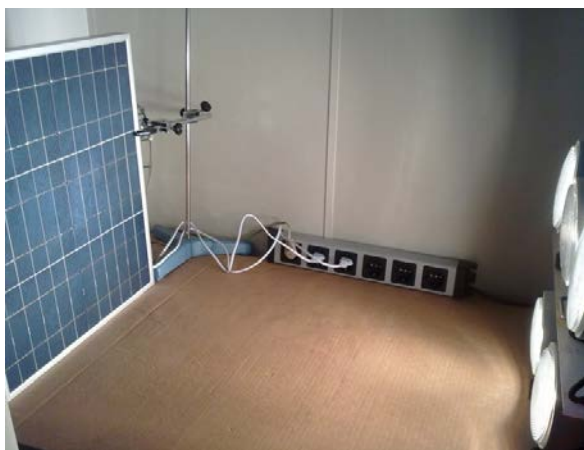


Ilustración 3. Simulación con iluminación artificial

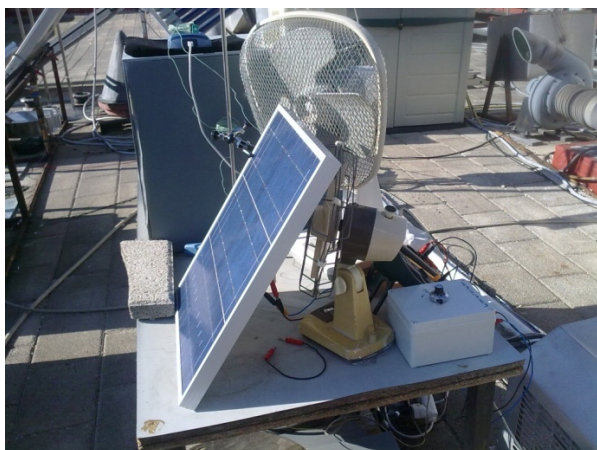


Ilustración 4. Iluminación natural

El esquema del circuito que vamos a utilizar para realizar la curva característica I-V (ver figura) consiste en un voltímetro, un amperímetro y un reóstato, con el que variaremos la carga del panel. Acoplaremos un piranómetro al panel para determinar la irradiancia recibida y se colocarán diversos termopares adheridos al mismo para determinar su temperatura de operación así como otro situado en el exterior para determinar la temperatura ambiente (este circuito es el mismo que se usará para la medida con refrigeración mediante la circulación de un fluido).

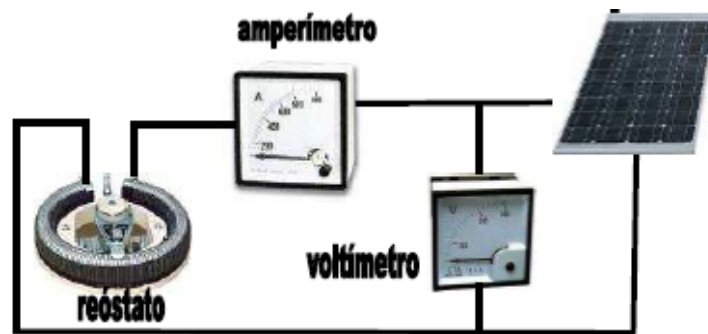


Ilustración 5. Circuito eléctrico

Mediante el potenciómetro, variaremos la tensión desde circuito abierto (OC) hasta cortocircuito (SC), para obtener la curva característica y la curva de potencia. Para la caracterización en laboratorio esperaremos a que la célula/panel adquiera una temperatura de equilibrio (estado estacionario). En el proceso de enfriamiento se mantendrá la configuración tanto de iluminación, como de distancia y orientación.

Para la refrigeración mediante un fluido se mantiene la estructura clásica del panel, impulsando el fluido mediante una bomba, hasta la parte posterior del panel el panel, donde se calienta; posteriormente el fluido caliente se lleva a un intercambiador para transferir la energía. Los termopares para la medida de la temperatura se colocarán tanto a la entrada como a la salida del fluido.

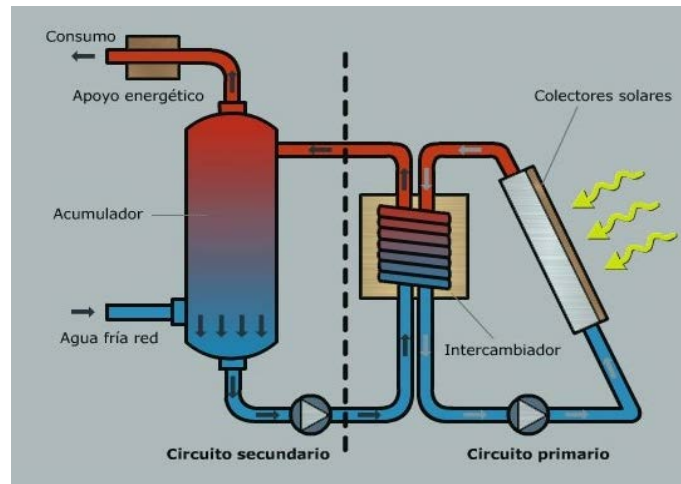


Ilustración 6. Circuito hidráulico

En caso de usar un refrigerante con cambio de fase a presión distinta a la atmosférica habría que implementar una válvula de expansión a la entrada y un compresor a la salida del circuito.

Las pruebas iniciales, una vez sellado el panel, se realizarán con un flujo de aire, a fin de determinar la fiabilidad y poder optimizar el diseño, al ser éste un fluido barato, fácil de manejar y sin peligro de fugas o roturas. Para ello dispondremos de un compresor, mediante el cual podremos realizar medidas a distintos flujos; así mismo también se realizarán pruebas para distintas irradiancias y posiciones del panel, obteniendo nuevamente las curvas de respuesta del panel.

Posteriormente, del mismo modo, introduciremos agua en el sistema a través de una bomba con la cual se controlará el caudal. En este caso es necesario implementar un nuevo diseño, capaz de soportar presiones mayores. Es muy importante llegados a este punto asegurar la estanqueidad del sistema, tanto por los componentes electrónicos, como por las posibles pérdidas al exterior.

Una vez determinados los valores de temperatura de actuación del panel podemos buscar posibles refrigerantes, además del agua, que puedan resultar útiles, fundamentalmente fijándonos en sus características de temperatura de ebullición (incluso a diferentes presiones), tales como el R-717 amoníaco (especialmente diluido en agua), el R-600a, R-611, etc., y analizar cuál es el más idóneo, seguro y barato, así como que sus propiedades físicas sean buenas dentro de los rangos de actuación (calor específico, calor latente, presión y temperatura de vaporización).

En caso de querer reducir la complejidad del diseño, se puede prescindir del uso de la válvula de expansión y del compresor, que encarecen el coste global, pudiendo trabajar con soluciones refrigerantes cuyo punto de ebullición a las temperaturas de trabajo se produzca a presiones próximas a la atmosférica, lo que evitaría el uso de circuitos presurizados de alta y baja presión. Una disolución al 25% de amoníaco en agua como refrigerante permite trabajar a unas temperaturas de vaporización de 35°C a presión de una atmósfera, siendo además el NH₃ uno de los refrigerantes menos tóxicos, baratos y con buenas propiedades térmicas^[11, 12].

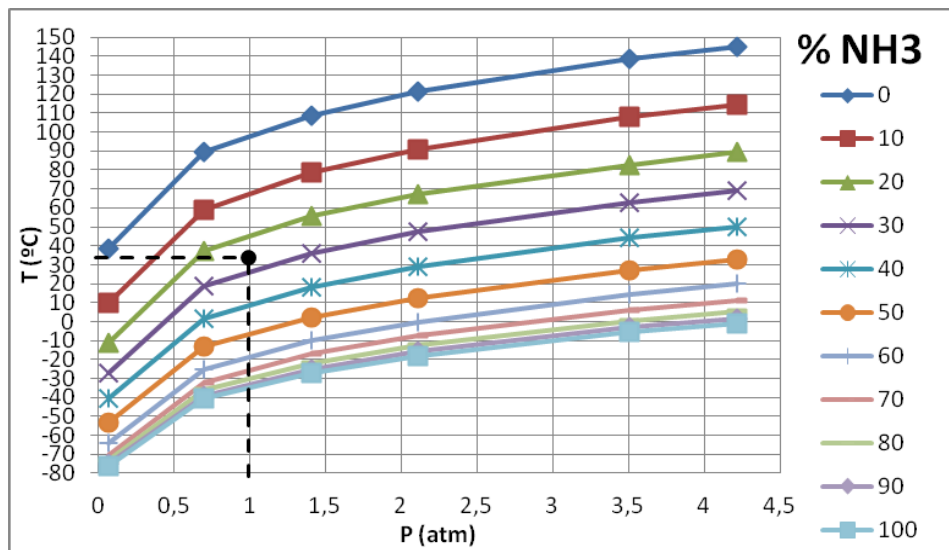


Ilustración 7. Temperatura y presión para distintas disoluciones de amoníaco en agua

DISPOSITIVO Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El montaje del dispositivo es el que aparece en la figura adjunta. La parte trasera del panel va sellada mediante una placa de PVC y un aro de silicona, constituyendo así una cámara cerrada. En el marco de dicha cámara se practican cuatro aberturas, dos inferiores a través de las cuales entra el fluido caloportador y dos superiores por las que sale. La cámara está dividida en dos secciones para evitar al máximo las posibles turbulencias. La caja de conexiones del circuito fotovoltaico está convenientemente aislada, a fin de evitar riesgos de cortocircuito.

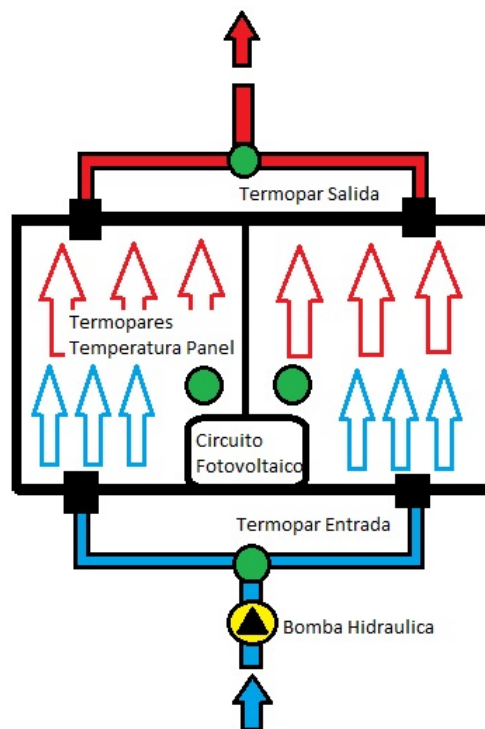


Ilustración 8. Esquema del panel

Este diseño presenta la ventaja de su sencillez y bajo coste, pero tiene el inconveniente que la circulación del fluido genera una capa límite en contacto con la parte posterior del panel, la zona caliente, reduciendo la superficie de contacto y limitando el intercambio entre placa y fluido. Esta capa límite se puede eliminar en caso de regímenes turbulentos, lo cual es únicamente posible en caso de inyectar fluidos gaseosos con una cierta velocidad, y caudal. Por tanto, en caso de querer utilizar fluidos líquidos, cuya capacidad calorífica es mucho mayor y permiten un mejor intercambio calorífico, se hace necesario modificar el diseño para mejorar el proceso de transferencia energética entre placa y fluido.

Para ello, se ha elaborado un segundo diseño consistente en un intercambiador de cobre en forma de parrilla, cuyas entradas y salidas están directamente conectadas a los orificios de entrada y salida de la cámara, respectivamente. Este intercambiador se acopla a la parte trasera del panel con un gel térmico para facilitar la transferencia de calor y salvar las posibles imperfecciones. La sujeción de la parrilla se realiza mediante espuma de poliuretano que no sólo cumple la función de fijar la placa al panel, sino que también aísla térmicamente la parte trasera, evitando pérdidas. Observamos el diseño a continuación:



Ilustración 9. Placa trasera de refrigeración adherida con gel y posterior sellado con espuma de poliuretano

La realización de los ensayos se ha llevado a cabo en dos localizaciones, una dentro del laboratorio bajo condiciones controladas de temperatura e irradiancia, donde únicamente se usó un panel, sin variar la configuración, y alimentando o no el circuito con un fluido refrigerante, esperando a que el sistema alcanzase el estado estacionario, y otra en condiciones naturales de iluminación y ambientales, en la azotea de la Facultad de Físicas de la UCM, para la cual se usaron al menos dos paneles, uno de referencia y otro experimental, ya que en caso de hacerlo con uno sólo las medidas se ven afectadas por los cambios ambientales.

Este segundo ensayo se ha realizado con orientación sur y una inclinación $\beta \approx 50^\circ$, con el fin de compensar la latitud ($\varphi \approx 40^\circ$) de nuestra localización y el ángulo de declinación óptimo para un uso de la instalación anual ($\delta \approx -10^\circ$), obteniendo incidencia próxima a normal.

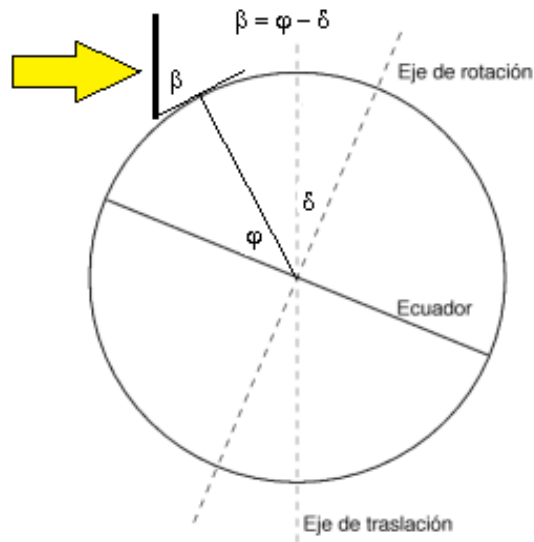


Ilustración 10. Inclinación de panel

Para los ensayos en el exterior, se montaron los paneles sobre un soporte, diseñado específicamente para albergar dos paneles de prueba, con salidas para las mangueras y ubicación para el circuito eléctrico, y uno de referencia, de manera que queden igualmente orientados y del mismo modo, pudiendo modificar la inclinación en función de la estación en la que nos encontremos.

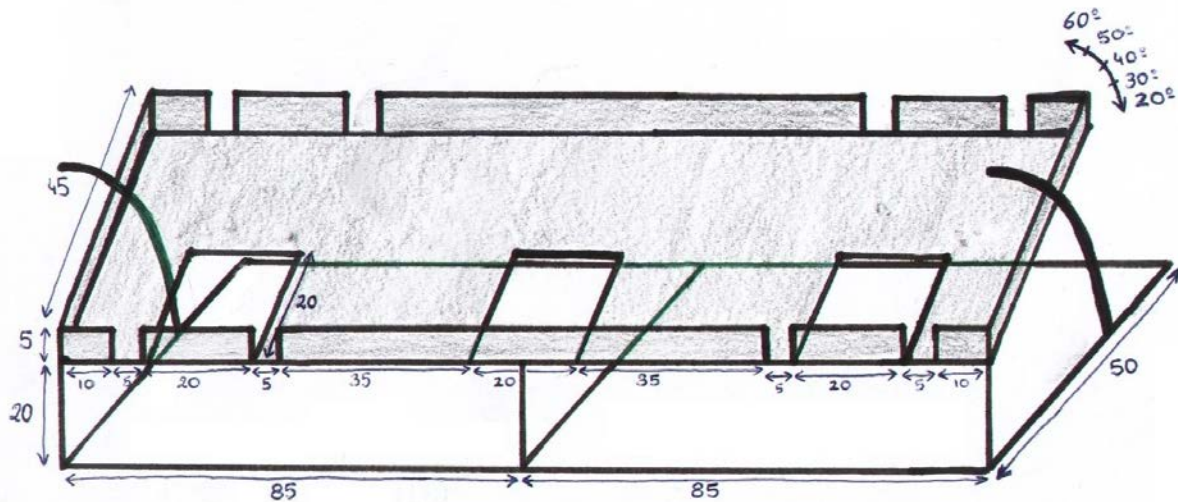


Ilustración 11. Soporte de paneles

Así mismo, se acoplaron a los paneles unos registradores, de manera que la toma de datos fuera automatizada, simplemente variando la carga que requiere el panel con el potenciómetro, desde circuito abierto a cortocircuito. La bomba hidráulica se alimenta a partir de una batería que se recarga con los propios paneles acoplando un regulador de carga entre el panel y la propia batería.

El esquema general que se propone para la implantación de este sistema a nivel de uso doméstico es el que a continuación se detalla.

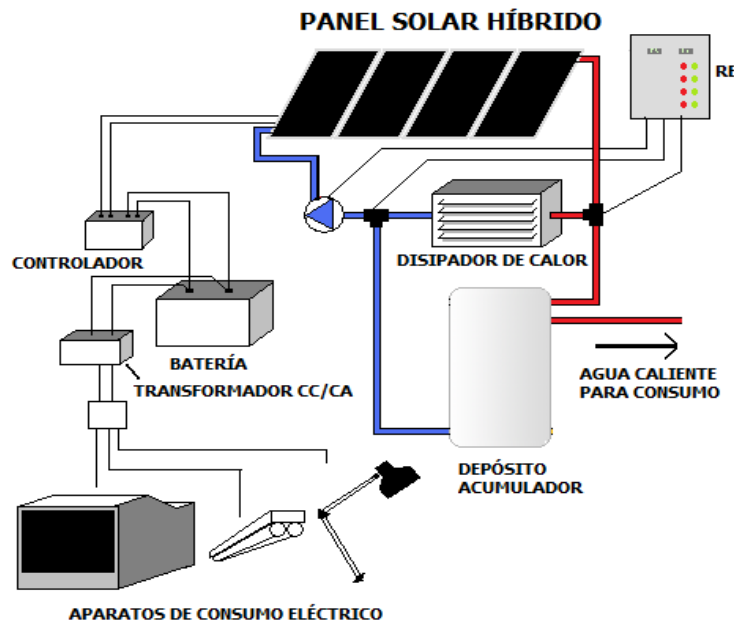


Ilustración 12. Esquema de uso real

Las características técnicas de los elementos utilizados en las pruebas, célula y panel, se describen a continuación:

Características técnicas de la célula en CEM (25°C y 1000W/m²)

P_{max}	V_{Pmax}	I_{Pmax}	V_{oc}	I_{sc}	FF	Superficie
2,2W	0,5V	4,4A	0,59V	4,84A	0,77	148,52 cm ²

Características técnicas del panel en CEM (25°C y 1000W/m²)

P_{max}	V_{Pmax}	I_{Pmax}	V_{oc}	I_{sc}	FF	Superficie
25W	17,4V	1,44A	21,5V	1,51A	0,77	1818,06 cm ²

Dado que ambos elementos están diseñados con el mismo material podemos determinar que la relación entre las superficies es, aproximadamente, 12,24.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Dependencia de V_{oc} en función de la temperatura de equilibrio

Se observa claramente, como era de esperar, que al modificar la temperatura de equilibrio de la célula fotovoltaica existe una fuerte dependencia del voltaje de manera inversamente proporcional, lo que nos confirma la necesidad de rebajar la temperatura de operación de los paneles fotovoltaicos para obtener un mayor rendimiento.

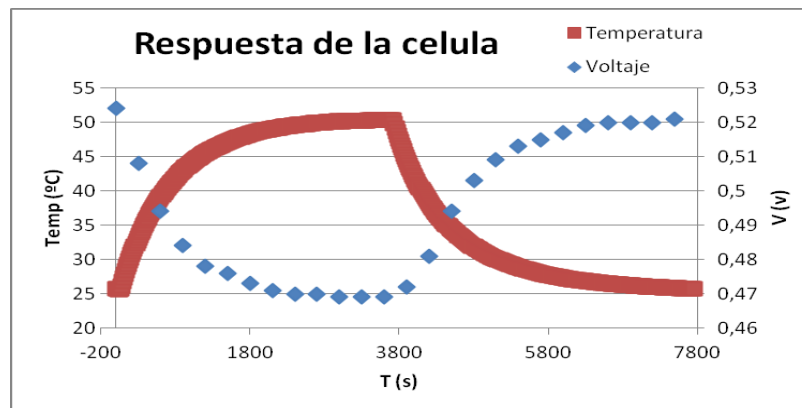


Gráfico 1. Respuesta Voc de la célula a una variación de la temperatura

En efecto, dado que la intensidad de la célula, y por tanto, del panel, apenas varía con los cambios de temperatura, la variación del rendimiento depende de los cambios en el voltaje, según la relación $\eta = \frac{IV}{GS}$, lo que nos indica que la variación de rendimiento es proporcional a la variación de voltaje.

Ensayo 1: Caracterización de la célula en laboratorio con ventilación forzada

Con objeto de caracterizar el comportamiento de las células en estudio bajo condiciones de refrigeración forzada, se procedió a realizar un conjunto de ensayos en laboratorio, proyectando una corriente de aire sobre la parte trasera de la célula mediante el uso de ventiladores que crearan movimiento de aire forzado. Los ensayos se llevaron a cabo para diferentes condiciones de operación, con temperaturas de trabajo distintas, con el fin de establecer el nivel de enfriamiento que se podía alcanzar mediante el uso de corrientes convectivas de aire forzado. Para ello, se trabajó con distintos valores de irradiancia, variando la distancia entre el foco y la célula. En las tablas que aparecen a continuación se muestran los resultados de dicha caracterización.

Ambiente	Refrigerado	Variación
T = 81,5°C	T = 61,5°C	20°C
P _m = 0,633W	P _m = 0,713W	12,577%
FF = 0,635	FF = 0,671	5,54%

Ambiente	Refrigerado	Variación
T = 70,5°C	T = 55,5°C	15°C
P _m = 0,589W	P _m = 0,684W	16,176%
FF = 0,655	FF = 0,719	9,76%

Ambiente	Refrigerado	Variación
T = 65,5°C	T = 50°C	15,5°C
P _m = 0,555W	P _m = 0,64W	15,347%
FF = 0,61	FF = 0,656	7,5%

Ambiente	Refrigerado	Variación
T = 60,5°C	T = 47,5°C	13°C
P _m = 0,478W	P _m = 0,526W	9,97%
FF = 0,614	FF = 0,639	9,76%

Tabla 2. Resultados para ventilación forzada con célula

Asimismo, se obtuvieron las curvas de respuesta para cada uno de los ensayos (ver figuras adjuntas). En dichas figuras se indican los valores de las temperaturas antes de la convección forzada, y al alcanzar el estado estacionario durante el proceso de refrigeración mediante corrientes de aire.

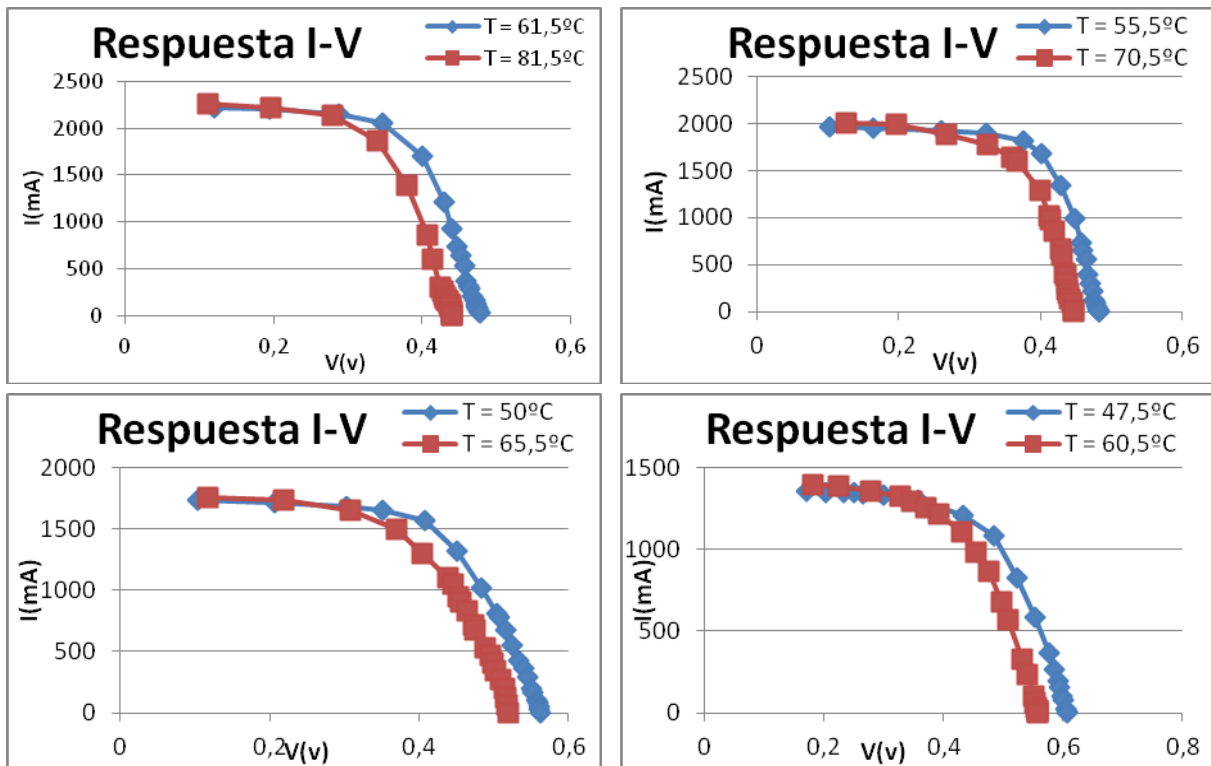


Gráfico 2. (a), (b), (c), (d). Respuesta de la célula a distintas temperaturas e irradiancias

De los resultados podemos concluir que, como era de esperar, la intensidad de cortocircuito se mantiene más o menos constante, en tanto que el voltaje de circuito abierto varía de forma apreciable, produciéndose un desplazamiento de la curva característica, de modo que se aumenta el valor del pico de potencia máxima, llegando a alcanzar aumentos en torno al 15%. Se ha podido comprobar, por otra parte, que el factor de forma también aumenta, lo que nos indica una mejora en el comportamiento global de la célula. Dichos datos, son totalmente extrapolables al panel.

Ensayo 2: Caracterización del panel en laboratorio y exterior con circulación forzada

En este segundo ensayo se procedió a repetir el proceso de caracterización llevado a cabo en el ensayo precedente, con los paneles fotovoltaicos (Ilustraciones 3 y 4). Al igual que en el ensayo 1, se modificaron las condiciones de operación, variando la distancia entre focos y panel, lo que motiva un cambio en la irradiancia y, por tanto, en la temperatura de trabajo.

Ambiente (l)	Refrigerado	Variación
T = 59°C	T = 42,5°C	16,5°C
P _m = 6,376W	P _m = 7,007W	9,893%
FF = 0,671	FF = 0,698	3,97%

Ambiente (l)	Refrigerado	Variación
T = 64,5°C	T = 48,5°C	16°C
P _m = 6,796W	P _m = 7,684W	13,075%
FF = 0,621	FF = 0,664	6,9%

Ambiente (e)	Refrigerado	Variación
T = 35°C	T = 23,5°C	11,5°C
P _m = 20,87W	P _m = 21,58W	3,365%
FF = 0,726	FF = 0,733	1,01%

Ambiente (e)	Refrigerado	Variación
T = 42,5°C	T = 26,5°C	16°C
P _m = 21,17W	P _m = 22,03W	4,064%
FF = 0,734	FF = 0,74	0,64%

Tabla 3. Resultados para ventilación forzada con panel

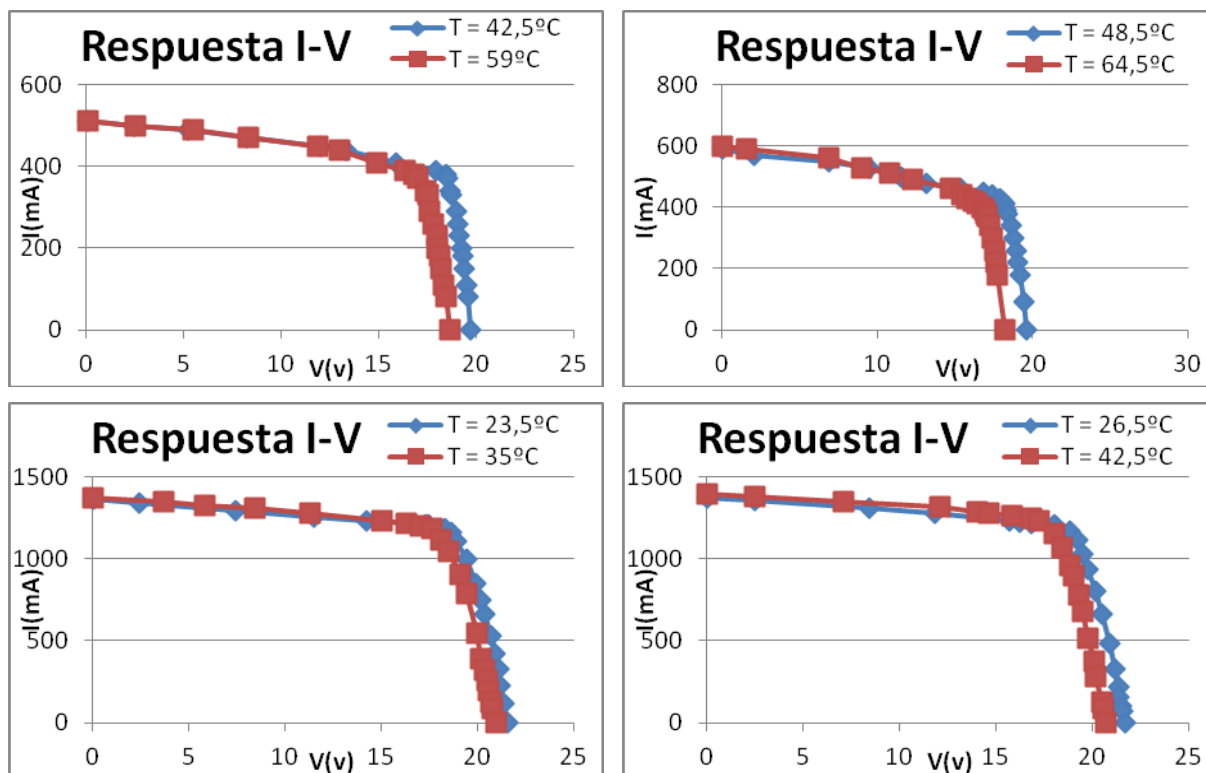


Gráfico 3. (a), (b), (c), (d). Respuesta del panel a distintas temperaturas e irradiancias

De estos resultados se deduce que el comportamiento sigue la línea de lo mostrado para la célula. Así mismo, al haber hecho medidas con luz natural en el exterior comprobamos que la potencia alcanzada es mayor que con el simulador solar, y que la temperatura del panel es muy inferior, lo que hace que la mejora sea también menor, dado que la temperatura ambiente es bastante baja.

Análisis del rendimiento en circulación forzada

El primer objetivo ha sido determinar el incremento de la potencia suministrada por el panel en función de la temperatura de operación. Para ello, se han analizado los resultados obtenidos para cada uno de los distintos ensayos, y se ha calculado el aumento porcentual de la potencia para cada caso. De este modo, se puede obtener el valor de la mejora específica de potencia, esto es, el incremento de la misma por cada grado de variación en la temperatura, lo que permite determinar el coeficiente de corrección del panel. Los resultados se muestran en el gráfico 4.

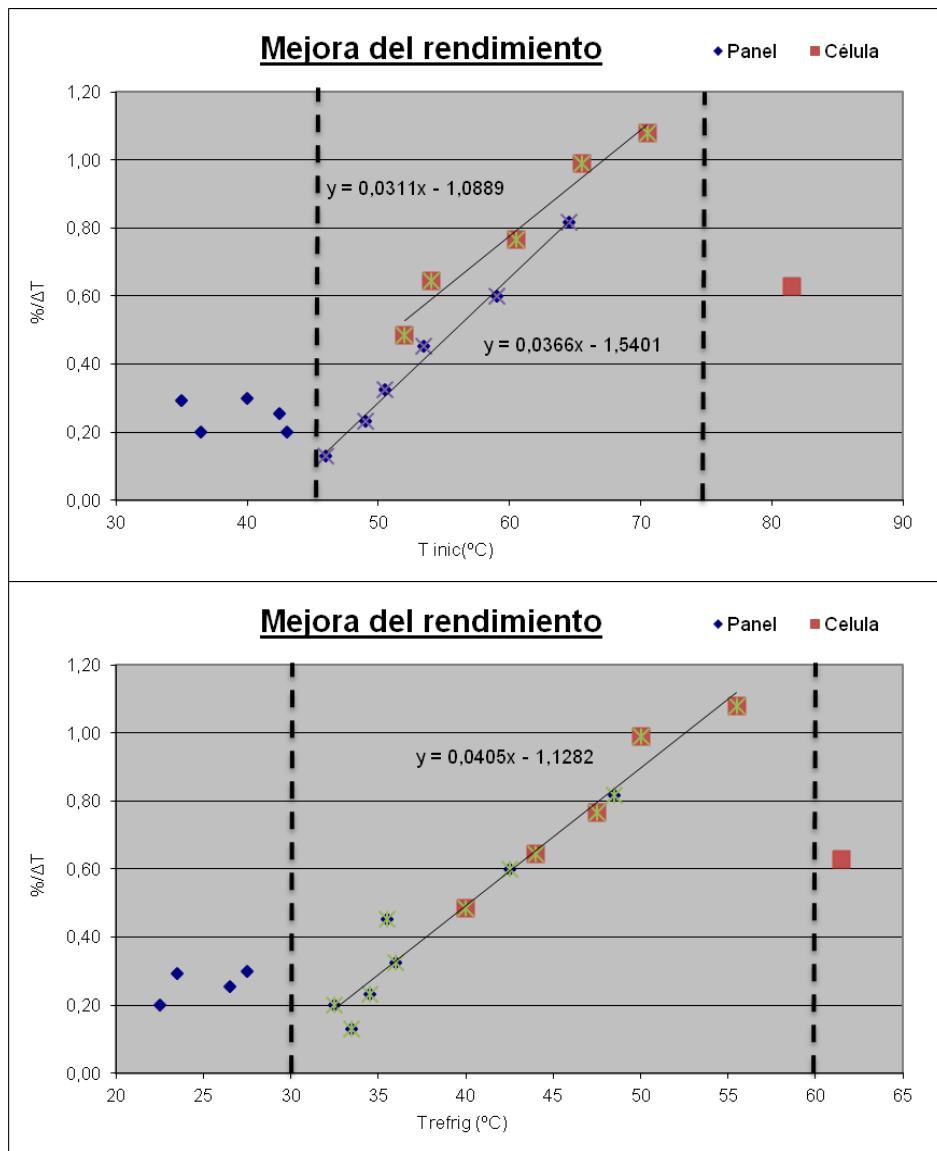


Gráfico 4. (a), (b). Mejora del rendimiento en función de la temperatura inicial y final

Es fácilmente observable que para los ensayos sin refrigeración, en el rango entre 45°C y 75°C el aumento específico de potencia es prácticamente lineal, pudiendo verificarse que el comportamiento es análogo entre la célula y el panel, misma pendiente, si bien los valores se encuentran ligeramente desfasados. Esto nos permite establecer una relación de proporcionalidad a partir de los valores de la célula, para cualquier panel que esté configurado a partir de la célula ensayada, con un nivel de aproximación bastante alto, lo que nos lleva a tener incertidumbres pequeñas en la predicción del comportamiento del panel.

Sin embargo, en el caso de los ensayos con refrigeración del panel, el desfase es prácticamente inexistente, manteniéndose la relación de linealidad esta vez entre 30°C y 60°C. Esto indica que cuanto más nos alejamos de la temperatura estándar de operación del

panel (25°C) el porcentaje de mejora por grado que podemos lograr mediante refrigeración para la parte fotovoltaica es mayor.

Los valores fuera de los rangos marcados han sido desechados, ya que se encuentran en unas zonas de actuación impropias para el panel, tanto por encima, casos con iluminación artificial en una habitación cerrada donde la temperatura ambiente aumenta fuera de los límites naturales, como por debajo, donde debido a la baja irradiancia, el rendimiento del panel es prácticamente nulo y por tanto, carece de sentido la mejora.

Una vez tenemos estos datos, que nos sirven para caracterizar los rangos de actuación y valores esperados, procedemos a realizar los ensayos comenzando con un flujo de aire controlado.

Ensayo 3: Caracterización del panel en el laboratorio con flujo de aire

Conocidos los rangos de actuación del panel, se procede a realizar una serie de experimentos con un mayor número de condiciones controladas, véase el flujo de aire utilizado. Acoplamos al panel el montaje anteriormente indicado (Ilustración 8), introducimos por las entradas inferiores del panel aire proveniente de un compresor, de manera que podamos controlar el flujo de aire con el que refrigeramos el panel, y repetimos las experiencias anteriores.

Realizamos la caracterización para distintas configuraciones, con incidencia normal a distintas distancias. Seguidamente, se muestran los resultados para dos configuraciones distintas:

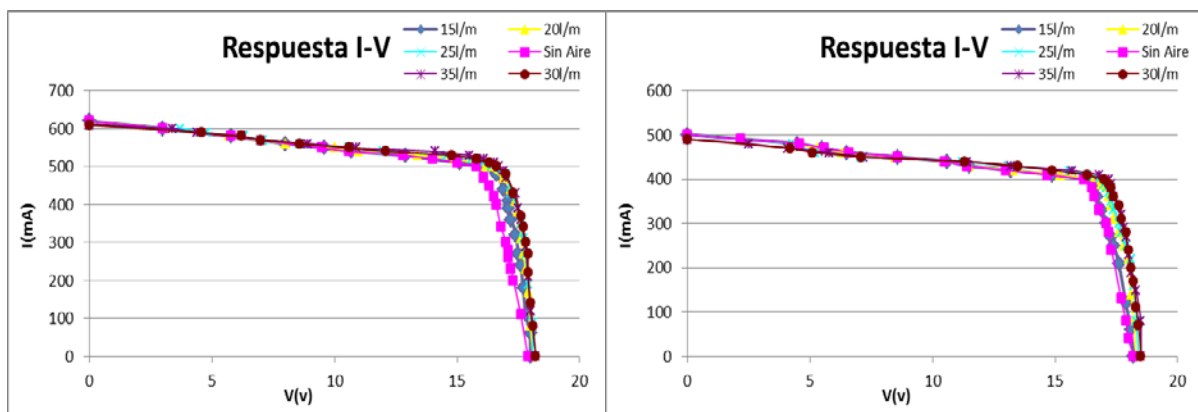


Gráfico 5. Respuesta I-V panel a distintas configuraciones con flujo de aire, 300 y 400 W/m²; 55 y 60°C

Como podemos apreciar, los resultados son muy semejantes a lo obtenido anteriormente, comprobándose que al aumentar el flujo de aire la potencia máxima aumenta ligeramente.

En primer lugar, se ha determinado la evolución de la temperatura del aire con la temperatura del panel, con objeto de verificar la capacidad de enfriamiento del aire como fluido caloportador. Los resultados se muestran en el gráfico adjunto, pudiendo observarse que la dependencia es prácticamente lineal.

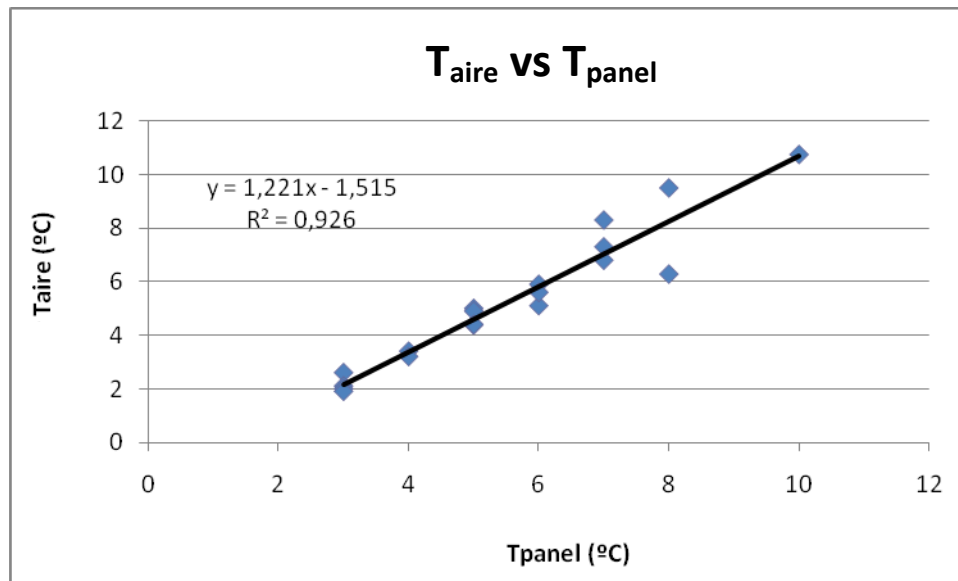


Gráfico 6, Taire vs Tpanel

Este ensayo nos muestra que el aumento de temperatura del aire es, aproximadamente, un 22% superior al enfriamiento del panel, lo que nos permite deducir que el aire se comporta como un buen fluido caloportador en nuestro dispositivo con la configuración y condiciones de trabajo adoptadas.

Una vez obtenida la ganancia térmica, se ha procedido a analizar la ganancia fotovoltaica del sistema. En el gráfico 7 se observa que la potencia del panel aumenta de manera linealmente proporcional al flujo de aire inyectado, con una ganancia de 0.264% por l/min. Este coeficiente puede ser utilizado como coeficiente de corrección de potencia del panel en función del flujo de aire.

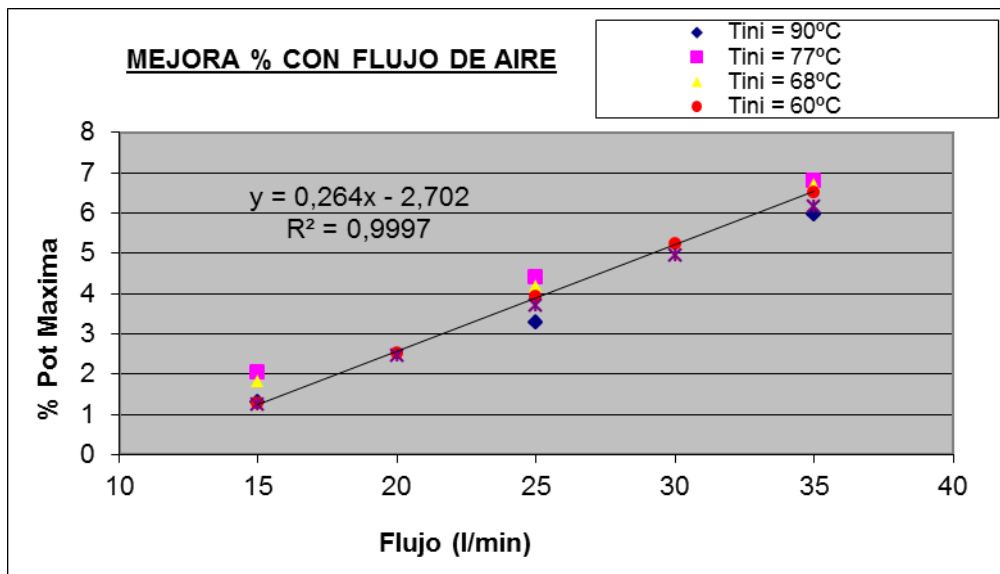


Gráfico 7, % mejora en potencia vs Flujo de aire

Para un flujo de 36 l/min., que está dentro de los márgenes aceptables, las ganancias se sitúan en torno al 6-7%. Para el caso del sistema utilizado, un panel con una potencia pico de 25W, el incremento es de 1,75W.

De acuerdo con los coeficientes de corrección por temperatura para paneles fotovoltaicos, la potencia aumenta en 0.44%/°C por encima de los 25°C de trabajo. Teniendo en cuenta que la temperatura promedio de nuestro panel está en torno a 60°C, estamos 35°C por encima de la temperatura óptima, por lo que la potencia perdida, frente a la ganancia obtenida en nuestros ensayos, sería:

$$\dot{W}_{\%} = 0.44 * 35 = 15,4\% \text{ que comparado con el valor obtenido } \dot{W}_{\%} = \frac{1,75}{25} 100 = 7\%$$

Lo que nos indica que nuestro sistema “extrae” únicamente el 45,5% de la energía térmica generada en el panel. Esto nos muestra, igualmente, que el aire no es capaz de eliminar completamente el calor generado en la lámina fotovoltaica.

Desde un punto de vista energético, es necesario tener en cuenta el consumo debido al sistema de impulsión del aire, el cual debe ser deducido del aumento producido por una mejora en la potencia de salida del panel. Para mantener un balance de energía positivo, es preciso que la potencia del impulsor sea inferior a la ganancia en el panel. Para el caso de un balance nulo de energía, y asumiendo que el aire se comporta como un fluido isoterma, y despreciando los términos cinético y potencial gravitatorio, el sistema de impulsión del aire deberá tener una

resistencia máxima dada por: $h_p = \frac{\dot{W}}{\rho Q} \rightarrow \Delta P = \frac{\dot{W}}{Q}$ siendo Q el caudal, y ΔP la variación de presión. Aplicando los valores de nuestro ensayo tenemos:

$$h_p = \frac{1,75W}{5,8x10^{-4} \frac{m^3}{s}} = 238Pa \approx 0,0024ATA$$

que representa un valor demasiado pequeño, lo que nos indica que el uso de compresores de aire no queda debidamente justificado, salvo en el caso de sistemas de gran tamaño. Para el caso de paneles de 280 W, los de mayor potencia en la actualidad, el valor de h_p . podría alcanzar un valor de:

$$h_p = \frac{19,6W}{5,8x10^{-4} \frac{m^3}{s}} = 3,4x10^4 Pa \approx 0,34ATA$$

valor que sí sería significativo y totalmente compatible con los sistemas convencionales de impulsión. Un cálculo sencillo del circuito hidráulico diseñado nos lleva a que las pérdidas de carga asociadas al circuito para un diámetro de 1" serían:

$$h_p = f \frac{Lv^2}{2gD} = f \frac{1}{2g} \left(\frac{4Q}{\pi D^2} \right) \frac{L}{D} = 0,025 \frac{1}{19,6} \left(\frac{4x5,8x10^{-4}}{\pi(2,5x10^{-2})^2} \right)^2 \frac{1}{2,5x10^{-2}} = 0,06m/m$$

Lo que representa el 1,7% de la máxima carga hidráulica admitida. Sin embargo, en el caso de sistemas de pequeño tamaño, como nuestro prototipo, las pérdidas aumentan al tener que utilizar conductos más estrechos, lo que reduce notablemente la ganancia haciendo poco recomendable el uso de un compresor. Sería más conveniente, pues, usar una bomba de circulación utilizando agua como fluido calo-portador, con un consumo mucho menor.

Por otro lado, se ha establecido la relación entre la variación de temperatura del aire en función del flujo introducido para diversas temperaturas del panel. En un principio, cabría esperar que el salto térmico del aire fuera inversamente proporcional al caudal introducido.

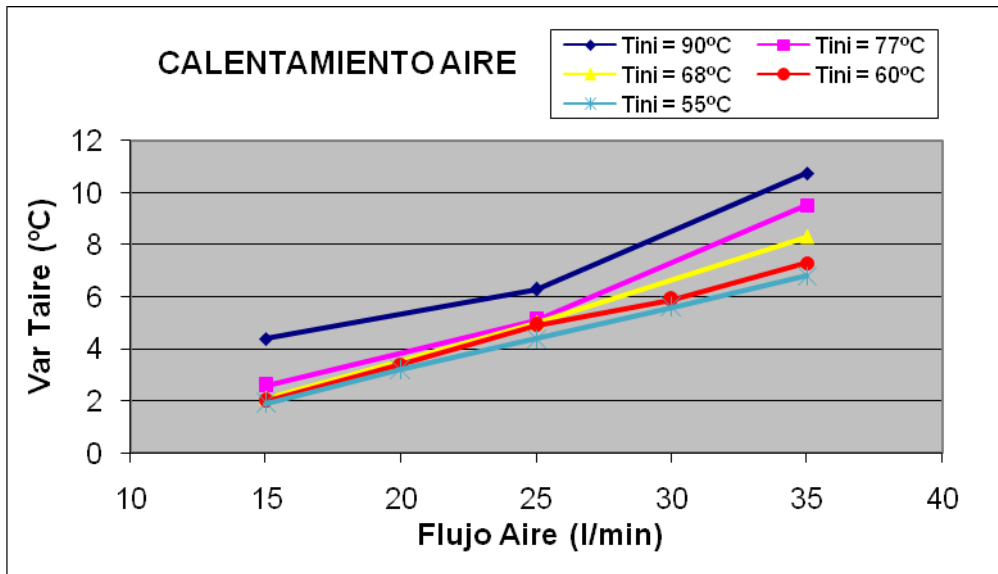


Gráfico 8, Taire vs Flujo de aire

Como se puede observar, al contrario de lo esperado, a mayor flujo a través del panel, mayor variación en la temperatura, es decir que a mayor flujo la transferencia de calor del panel al aire es mayor. Este fenómeno se puede explicar debido a la aparición de una capa límite entre el panel y el flujo de aire, que actúa como aislante, de manera que al aumentar el flujo se reduce dicha capa límite, favoreciendo el intercambio de calor. Por otro lado, observamos que, efectivamente, al aumentar la temperatura del panel también el intercambio de calor entre el panel y el aire es mayor, aunque quizá no lo suficiente, nuevamente debido al fenómeno anteriormente expuesto.

Con el fin de reducir el espesor de la capa límite antes mencionada, se han llevado a cabo los mismos ensayos, pero esta vez con el panel inclinado. Mantendremos la incidencia normal de la irradiancia, pero el aire incidirá directamente sobre la superficie trasera del panel, evitando ir paralela a ella de manera que no favoreceremos la aparición de la citada capa. Así mismo, también realizaremos las medidas bajo una misma configuración, aumentando primero el flujo de 0 a 35 l/min y posteriormente disminuyéndolo desde 35 l/min a 0, a fin de corroborar que este hecho no altera la medida.

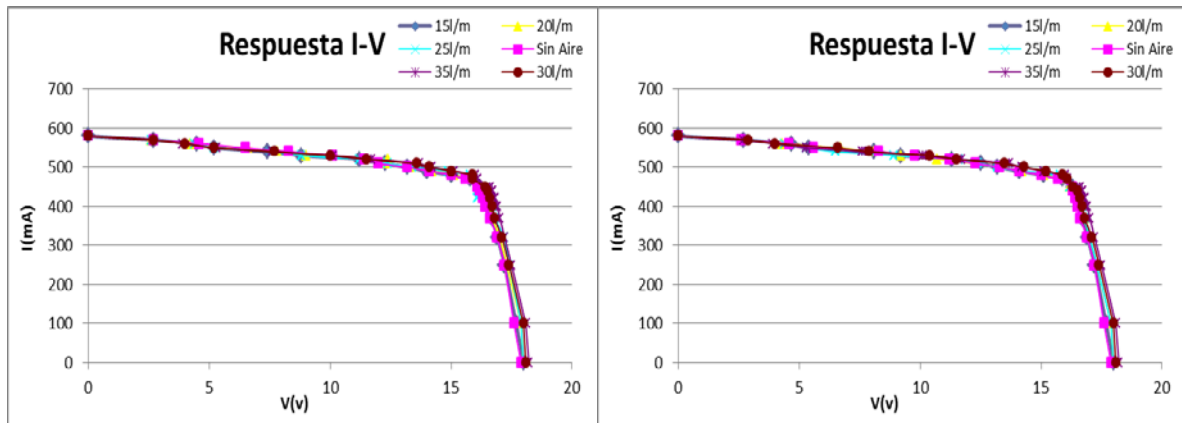


Gráfico 9. Respuesta I-V panel para la misma configuración, 70°C 350W/m2, aumentando y disminuyendo

Obtenemos una caracterización I-V muy similar a la ya obtenida y sin que se aprecie ningún cambio reseñable al realizar las medidas aumentando o disminuyendo el flujo, como era de esperar.

Mostramos a continuación, nuevamente, la variación de la temperatura del aire introducido, en función de la variación lograda sobre el panel. Nos encontramos con una distribución de puntos que nuevamente se puede ajustar a una recta con pendiente ligeramente superior a 1, pero con una dispersión mayor que antes, cosa normal, debido a que el flujo que introducimos en este caso es mucho más turbulento al entrar más perpendicular a la superficie del panel e incidir sobre él, como se pretende para tratar de evitar la capa límite.

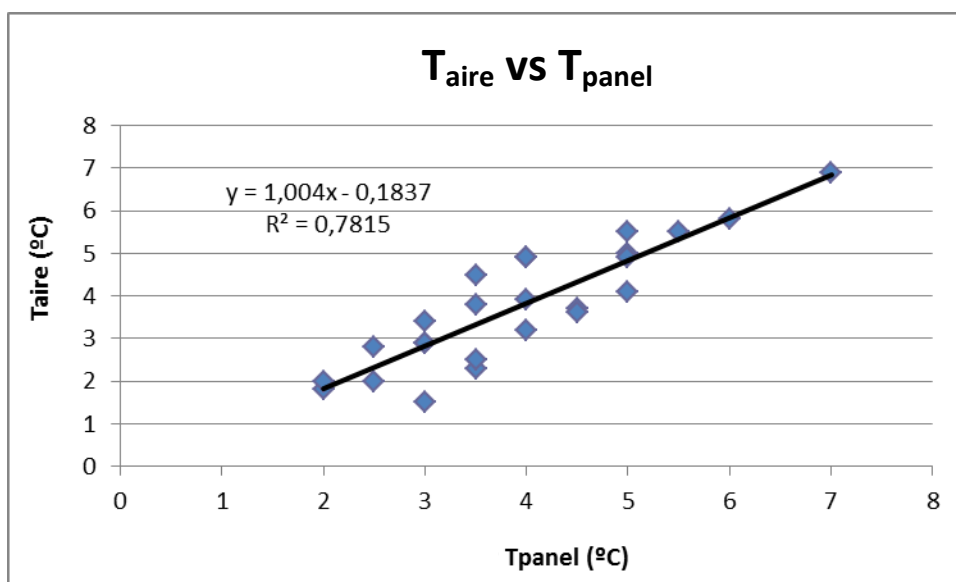


Gráfico 10. Taire VS Tpanel

Se vuelve a apreciar una dependencia lineal entre el salto térmico del aire y el enfriamiento del panel con una relación de proporcionalidad prácticamente equivalente a 1.

Comparando ahora el aumento de potencia del panel en función del flujo de aire introducido, volvemos a encontrar una semejanza directa, con una mejora de 0,2% cada l/min, aproximadamente.

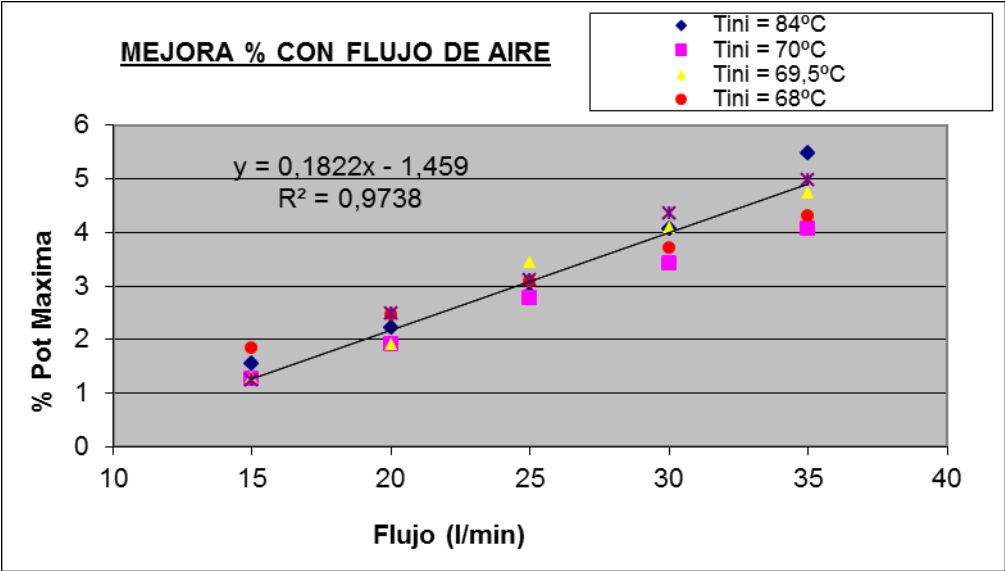


Gráfico 11. % mejora en potencia vs Flujo de aire

Por último compararemos la relación entre la propia variación de temperatura del aire en función del flujo de aire introducido para diversas temperaturas del panel, para evaluar cuanto hemos sido capaces de reducir la capa límite.

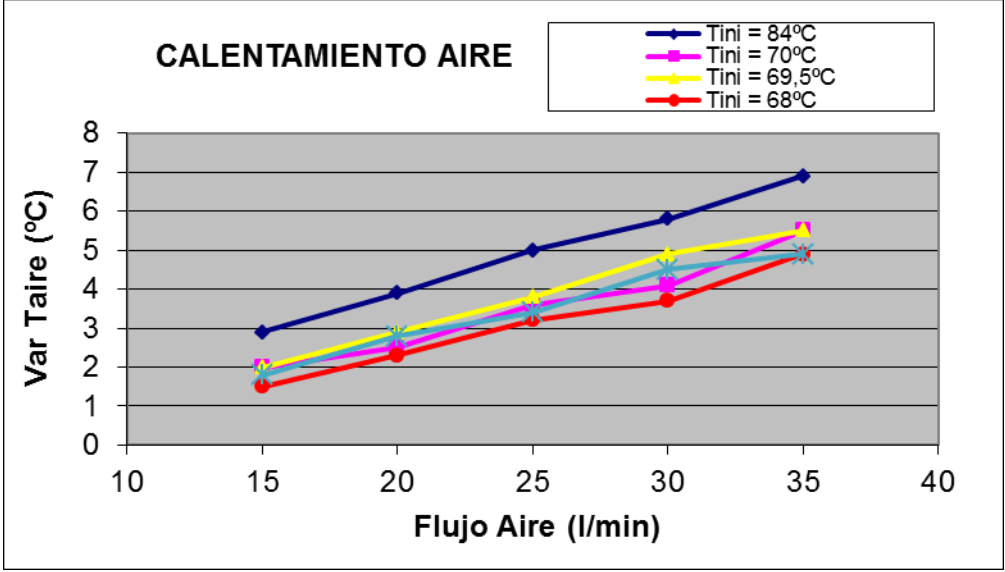


Gráfico 12. Taire vs Flujo de aire

Como se puede observar, la tendencia sigue siendo que la variación de la temperatura del aire se hace mayor a medida que el flujo de aire aumenta, si bien de un modo significativamente menor que en el caso de flujo paralelo, lo que significa que sí se ha conseguido reducir el efecto de la capa límite, aunque sigue estando presente éste u otro efecto, tal como la refrigeración conductiva por rozamiento, que favorece la mayor transferencia de calor con un menor tiempo de interacción.

Balance energético

Si ahora llevamos a cabo un balance energético del sistema diseñado podemos comprobar que la cantidad de energía proporcionada por el flujo de aire es despreciable frente a la ganancia en energía eléctrica por mejora del rendimiento del panel; en efecto, para los valores del ensayo se tiene:

$$\frac{\dot{m}c\Delta T}{W_{FV}} = \frac{(5,6 \times 10^{-4})(1,293)(0,5)(7)}{1,75} = 0,0025$$

Es decir, menos de un 3% del incremento de potencia en el panel. Este sencillo análisis nos lleva a concluir que para que el proceso de cogeneración sea verdaderamente efectivo y no solamente obtengamos una mejora del aumento de eficiencia del panel fotovoltaico, se hace preciso utilizar un fluido con una capacidad calorífica sensiblemente mayor; esto, combinado con el hecho de que el consumo energético disminuye notablemente cuando se usan bombas de circulación de fluido líquido en lugar de compresores de gas, nos ha llevado a sustituir el prototipo inicial por otro en el que el fluido caloportador es el agua y donde se emplea una bomba de circulación en lugar de un compresor de aire.

Ensayo 4: Caracterización del panel con fluido

En el caso de utilizar agua como fluido de transferencia térmica, teniendo en cuenta su elevada capacidad calorífica, es de esperar que la relación entre la energía térmica y el aumento de energía eléctrica aumente considerablemente, lo que justificaría un diseño más complejo y un mayor coste del sistema.

En efecto, es de esperar que el agua alcance una mayor eficiencia en la “extracción” de la energía térmica producida por calentamiento del panel, acercándose a los valores teóricos máximos, $0.44\%/^{\circ}\text{C}$; uno de los objetivos del nuevo diseño es, por tanto, verificar si la eficiencia en la remoción de la energía térmica ha aumentado y si su valor se acerca al límite teórico o no.

Para llevar a cabo los ensayos con agua inicialmente se aplicó el sistema mostrado en la “Ilustración 8”, haciendo que el agua circule en un circuito cerrado haciendo contacto directo con la parte trasera del panel, sellada con un panel de PVC y silicona, de manera forzada mediante una bomba de corriente continua entre un tanque y el panel fotovoltaico. El tanque tiene un volumen de 30 litros en tanto que la “cámara de refrigeración” del panel contiene apenas 2.7 litros, lo que permite mantener la temperatura del tanque sin grandes variaciones durante el tiempo de los ensayos.

Los primeros ensayos con inyección directa de agua en un panel comercial nos mostraron que la estructura del sistema no permitía este tipo de diseño, al no poder garantizarse la estanqueidad del dispositivo, produciéndose fugas y filtraciones al circuito fotovoltaico. Esto nos indica que, o bien se modifica la estructura del panel o se utiliza un sistema de enfriamiento mediante circuito cerrado utilizando un intercambiador en contacto directo con la parte posterior del panel.

Se procedió, pues, a diseñar un intercambiador en cobre, en forma de parrilla, tal y como muestra la Ilustración 9, que se adhirió a la parte posterior del panel mediante una pasta conductora térmica que hacía, al mismo tiempo, las funciones de soldadura. La entrada y salida del intercambiador se conectaron a los conductos del circuito de refrigeración externo. El sistema se selló mediante espuma de poliuretano que cumple una doble función, por un lado aísla térmicamente y por otro garantiza la sujeción del intercambiador a la estructura del panel.

Realizamos los ensayos tanto en iluminación artificial como natural, para un flujo constante de agua a través del intercambiador de $7,3\text{l}/\text{min}$. Utilizamos este alto caudal ya que la principal intención es determinar si mediante este sistema, se puede mejorar la capacidad fotovoltaica del panel alcanzando los $0.44\%/^{\circ}\text{C}$ de referencia. Un caudal alto provoca que la

absorción térmica del fluido se vea mermada, aunque también favorece la reducción de la capa límite, de manera que en los ensayos, el aumento en la temperatura del agua no supera en ningún caso los 0,5°C, aunque si se logra un aumento en la temperatura global del sistema de 3°C por hora de funcionamiento $Q = C_p \dot{m} \Delta T$. Para posteriores ensayos, se propone modificar el flujo de agua de manera que se optimice también la capacidad de transferencia térmica de extracción al fluido.

Para cada uno de los ensayos en el laboratorio se realizaron tres medidas bajo la misma configuración, dejando pasar una hora entre cada toma de datos, a fin de obtener unos resultados más fiables. Para las medidas en el exterior para tratar de reducir al máximo los cambios ambientales se realizaron medidas con dos paneles, uno con el intercambiador y otro de referencia, tomando medidas semejantes simultáneamente (Ilustración 12.)



Ilustración 12. Toma de medidas en el exterior

El tercer panel que aparece en la ilustración, se usó para cargar la batería que alimentaba la bomba de circulación, a través de un regulador.

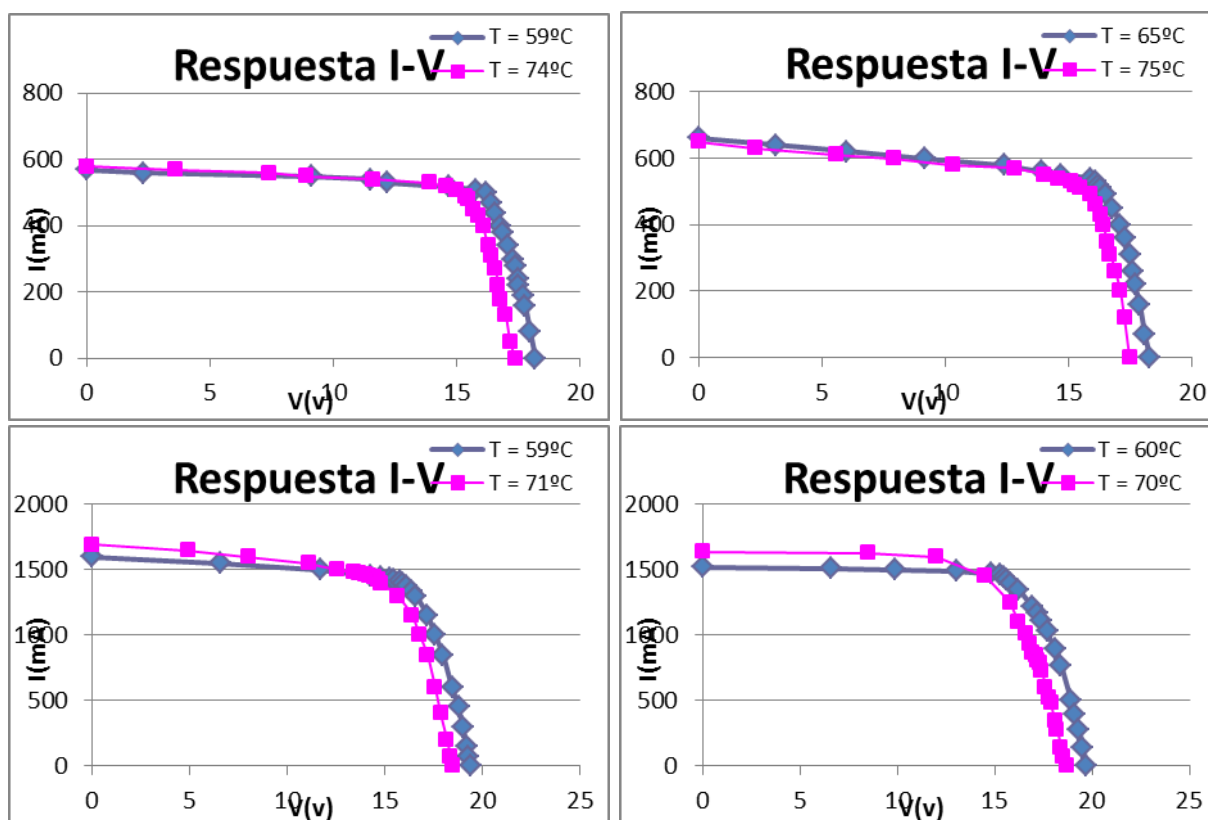


Gráfico 13.(a), (b) interior (c), (d) exterior. Respuesta del panel a distintas temperaturas

Como podemos observar, los valores obtenidos no difieren mucho de las curvas halladas en los anteriores ensayos con refrigeración por aire. Si atendemos a su factor de forma, observamos que se encuentra en todos los casos un valor en torno al 0.7 con una ligera mejora para el caso con refrigeración, en torno al 5%, como cabía esperar.

La Tabla 4. muestra los valores obtenidos, tanto para interior como exterior, respectivamente:

IRRAD	T_{panel}	$T_{\text{panel.refrig}}$	P_{max}	$P_{\text{max.refrig}}$	$T_{\text{agua.entrad}}$	$T_{\text{agua.salida}}$
400	74	59	7,65	8,1	29,5	30
400	75	61	7,55	8,01	31	31,5
400	78	63	7,59	8,06	33	33,5
500	75	65	8	8,59	31	31,5
500	74	66	7,9	8,42	33	33,5
500	77	68	7,95	7,43	35	35,5
550	77	70	8,16	8,75	31	31,5
550	76	69	8,26	8,8	33	33,5
550	80	73	7,74	8,23	35	35,5

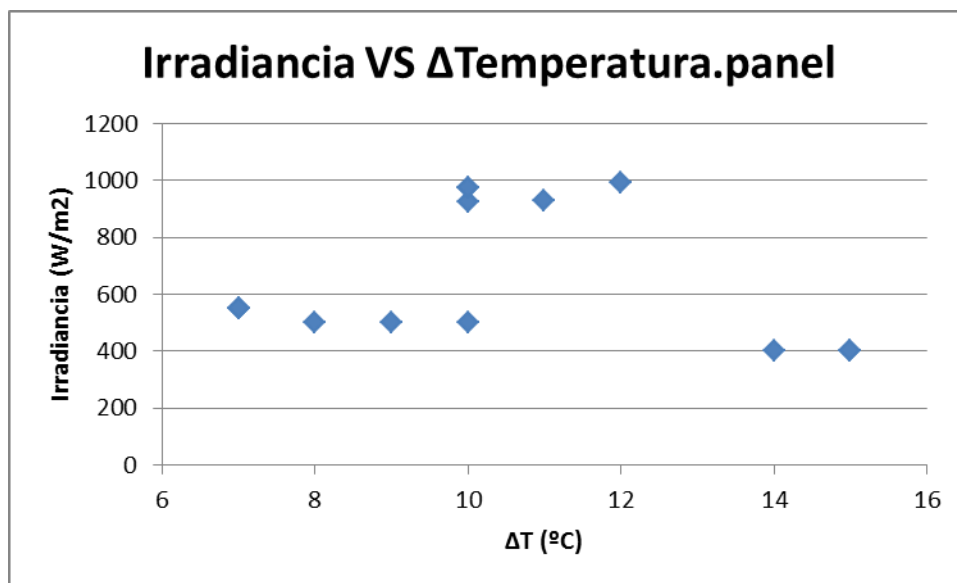
IRRAD	Tpanel	Tpanel.refrig	Pmax	Pmax.refrig	Tagua.entrad	Tagua.salida
924	70	60	21,02	22,34	33	33,5
930	71	60	20,59	21,84	35	35,5
977	73	63	20,86	22,12	38	38,5
977	72	62	21,56	22,9	33,5	34
991	71	59	20,88	22,28	31,5	32

Tabla 4. Valores obtenidos para circulación con agua. Interior y exterior.

Análisis del rendimiento en circulación forzada

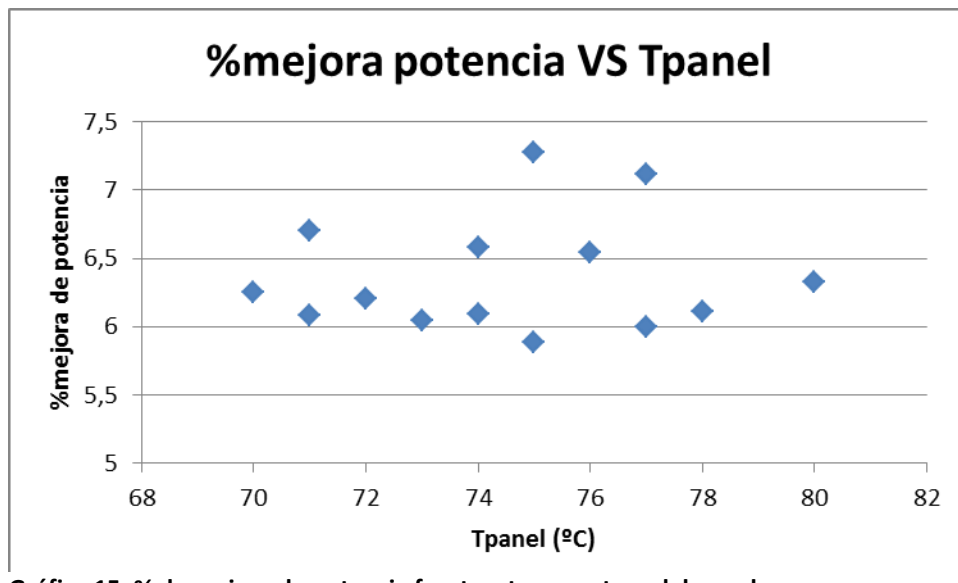
En primer lugar cabe destacar que, como ya se había avanzado, la temperatura de entrada y salida del agua no difiere, en ningún caso, más de 0,5°C, por lo que todo el análisis y el balance energético lo referiremos a la parte fotovoltaica.

A continuación se muestran distintas gráficas, representando las variaciones tanto en la temperatura como la potencia mejorada (Gráfica 14 y Gráfica 15.)



Gráfica 14. Irradiancia frente al enfriamiento del panel

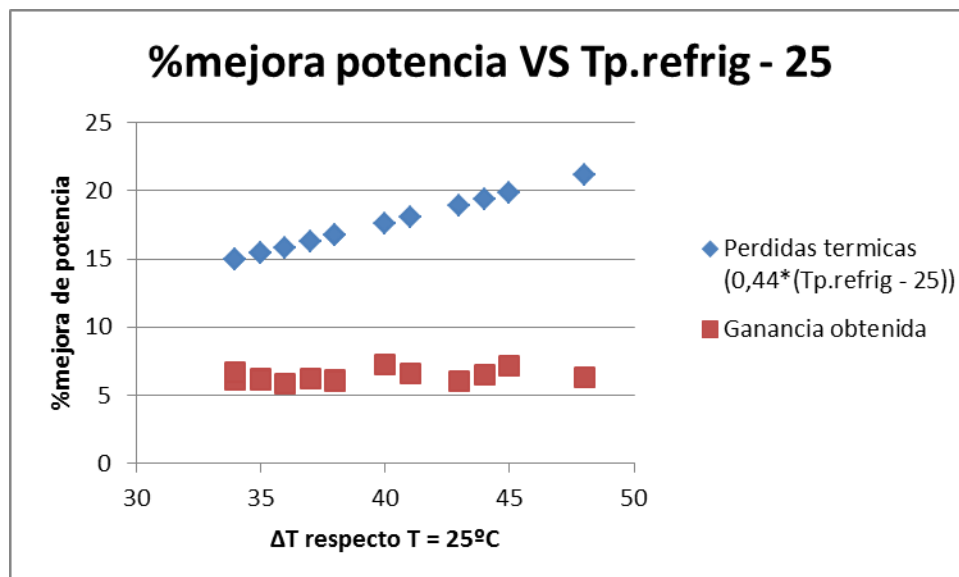
Aparentemente no se observa ninguna relación directa entre la irradiancia recibida por el panel y el enfriamiento que produce el intercambiador. Parece haber una ligera tendencia a aumentar la temperatura refrigerada al disminuir la irradiancia, fundamentalmente en las medidas en el laboratorio.



Gráfica 15. % de mejora de potencia frente a temperatura del panel.

Nos encontramos ante una situación muy similar a la refrigeración con aire. Pese a que es de esperar que con agua las medidas mejorasen, el hecho de tener el intercambiador en lugar de contacto directo, reduce el porcentaje de mejora dejándolo en torno al 6,5%.

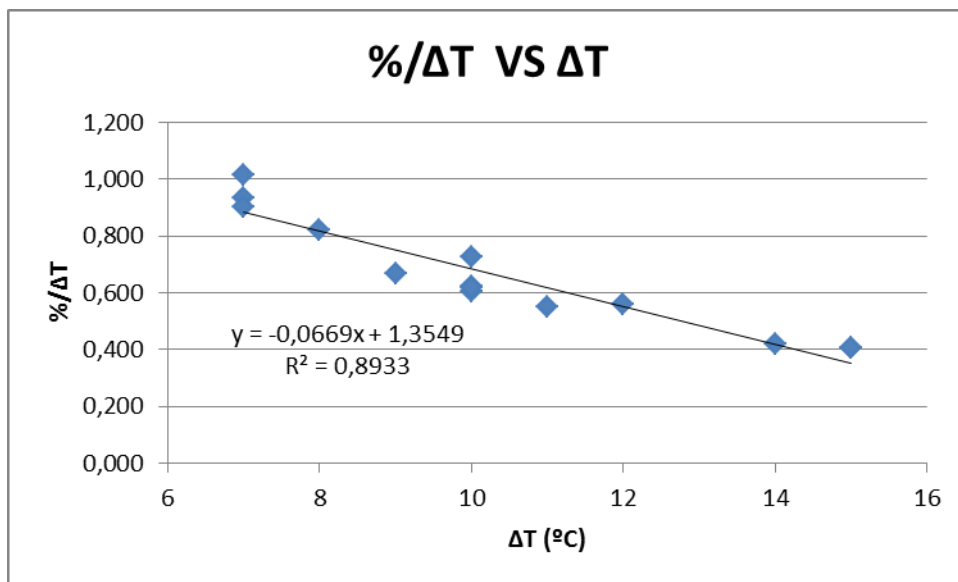
Si comparamos estos valores en la mejora de la potencia con las pérdidas por grado (0,44%/°C) respecto a la temperatura ideal de trabajo (25°C), Gráfica 16. podemos apreciar que seguimos estando lejos de obtener unos resultados óptimos.



Gráfica 16. % de mejora de potencia frente a aumento de la temperatura optima de trabajo (25°C)

Las pérdidas causadas por efectos térmicos, vienen determinadas de manera lineal como 0,44% por cada grado que la temperatura de trabajo sea mayor que la temperatura de operación óptima del panel (25°C). Mientras las pérdidas aumentan de manera lineal con la variación de la temperatura, podemos observar que las ganancias que obtenemos mediante nuestro sistema se mantienen constantes en un rango entre el 6 y el 7,5% sin tener una tendencia clara. Este hecho limita el uso del sistema bajo las condiciones de trabajo que hemos impuesto, flujo constante de agua alto, a temperaturas de operación bajas para llegar a recuperar al menos el 50% de las pérdidas.

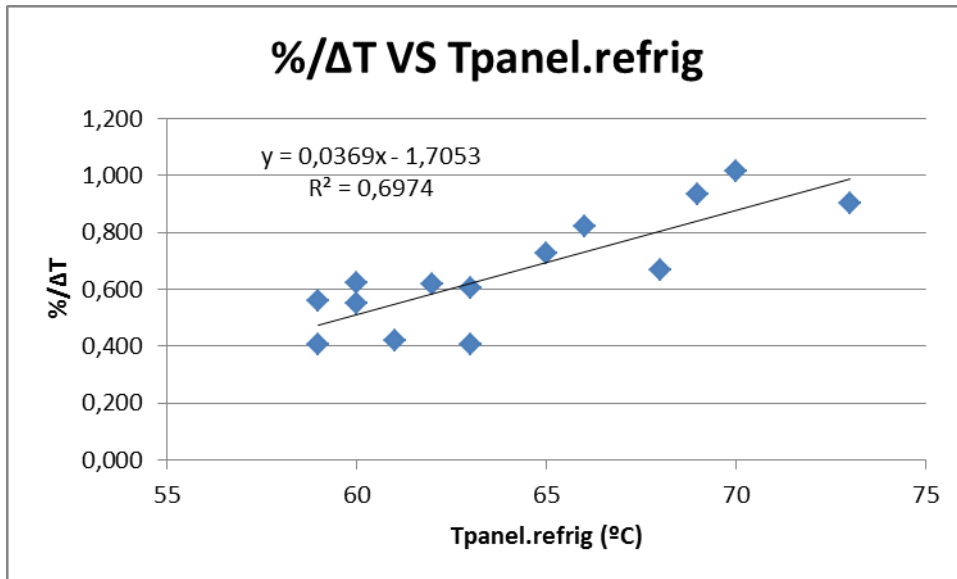
Resulta interesante también ver como se comporta el porcentaje de mejora en la potencia fotovoltaica por cada grado enfriado frente a la diferencia de temperatura que se logra en el panel.



Gráfica 17. % de mejora de potencia por °C enfriado frente a la variación en la temperatura del panel

Del gráfico podemos extraer, que cuanto más se logra enfriar el panel de manera forzada, la repercusión en la ganancia lograda es inversa, es decir, disminuye un factor 0,07%/°C la mejora en la potencia por cada grado que enfriamos.

Por último se muestra el porcentaje de mejora por grado de temperatura enfriado en función de la temperatura final del panel (Gráfica 18.)



Gráfica 18. % de mejora de potencia por °C enfriado frente a la temperatura del panel refrigerado

Realizando un ajuste lineal de los valores, se extrae que a mayor temperatura del panel el porcentaje de mejora por grado es ligeramente mayor; es decir, el potencial de mejora es mayor a mayor temperatura de actuación, pero evidentemente una mayor temperatura del panel también implica mayores pérdidas, como ya se ha visto en el Gráfico16, por lo que no compensan las ganancias obtenidas.

CONCLUSIONES Y APLICACIONES

De los primeros resultados, podemos extraer, que como se esperaba la temperatura de operación de la célula, afecta directamente al rendimiento de la misma, confirmando el hecho de que una buena refrigeración en los paneles fotovoltaicos permite obtener mejores resultados, al margen de que posteriormente este sistema de refrigeración se pueda aprovechar en otros fines o no. Por tanto la primera aplicación que podemos extraer de este estudio es, en los huertos solares actuales, la implementación de un sistema de refrigeración para los paneles, de modo que sin aumentar en gran medida los costos, se podrían obtener directamente mayores beneficios.

Tras la caracterización con un flujo de aire, a través del panel ya sellado, obtenemos unos resultados semejantes a la refrigeración con ventiladores, pero obteniendo una mejora considerablemente menor. Este hecho en un principio fue achacado a un posible menor flujo que con el panel abierto y los ventiladores, pero observando la relación entre la diferencia de temperatura de entrada y salida del aire en el panel con el flujo del mismo, a mayor flujo mayor diferencia, se puede concluir que se tiene un problema de capa límite, que actúa como aislante, entre la superficie interna del panel y el flujo de aire. Por tanto a la hora de realizar el diseño tanto del panel como de su colocación hay que tener en cuenta dicha circunstancia a fin de optimizar la instalación.

Existen distintas maneras de abordar el problema de la capa límite, si bien no se han implementado todas, pero idealmente permiten solucionar el problema:

- Introduciendo el flujo normal a la superficie del panel en lugar que desde abajo, de manera que el aire impacte directamente sobre esta, generando turbulencias y eliminando la capa límite.
- Inclinando el panel, que además es la posición natural cuando se utiliza bajo iluminación solar, de manera que evitamos tener un flujo vertical que favorezca la aparición de la capa límite.
- Acoplado tras el orificio de entrada una cuña que oriente el flujo directamente a la superficie del panel, haciéndolo circular junto a él.

Como vimos, el simple sellado trasero del panel no es suficiente como para soportar la presión de un fluido y mucho menos si pretendemos realizar cambios de fase, por lo que pese a encarecer ligeramente el prototipo, la implementación de tuberías por las que circule el fluido soluciona en gran medida el problema, dando como resultado un sistema mucho más seguro y funcional. El nuevo diseño, además, permitiría el uso de un refrigerante con cambio de fase al ser un sistema completamente estanco.

Observamos de los resultados con este nuevo sistema, una mejora en el rendimiento fotovoltaico, pero no lo suficiente como para lanzarlos a nivel comercial. Es posible mejorar los resultados optimizando la transferencia de calor entre el intercambiador y el panel, el diseño deja algunos capos de aire que como es bien sabido actúa como aislante, y variando el flujo de agua inyectado. La parte positiva de este último ensayo es la comprobación de que el nuevo sistema diseñado es estanco, funciona correctamente y cumple su función refrigerante como era de esperar.

A tenor de los resultados obtenidos, se hace necesario seguir la investigación en este campo, ya que pese a que dichos resultados no son del todo concluyentes, abren una puerta a la optimización y unificación de las tecnologías solares, fotovoltaicas y fototérmicas. Proponemos por tanto las siguientes líneas de investigación:

- Mejorar el diseño del intercambiador, ya sea mediante un modelo nuevo o resoldando el actual directamente al panel, de manera que se optimice el contacto, aumentando el rendimiento fotovoltaico y la extracción térmica.
- Realizar ensayos con distintos caudales para determinar el valor óptimo del mismo, de manera que la aplicación sea rentable tanto en su parte fotovoltaica como en la vertiente térmica.
- Probar diversos fluidos refrigerantes, tales como el ya propuesto amoniaco o cualquiera con buenas características térmicas y cuyo coste no dispare el precio del dispositivo.
- Sustituir el fluido por un refrigerante mediante cambio de fase, adjuntando al sistema un vaso de expansión y un compresor según se requiera, ya que el potencial con el calor latente es mucho mayor.

La aplicación de este tipo de paneles con un fluido como el agua u otro refrigerante, pueden ir desde los usos más cotidianos, como la de ACS de baja temperatura, hasta 50, 60°C, pasando por aplicaciones industriales como por ejemplo la desalación por osmosis inversa, como pre-tratamiento, hasta aplicaciones dentro de la investigación científica y tecnológica dentro del campo de las energías renovables u otros campos asociados.

Existen en la actualidad ya algunos prototipos y algún panel comercial, todos con un esquema de funcionamiento similar (Ilustración 13.) tales como, de Solimpeks, el Volther; de Sela Solar, el PVT-236, de Absilicon, el X-10... con esta idea de hibridar los sistemas fotovoltaicos y fototérmicos. La patente genérica está a nombre del español Luis López López, pero todavía se encuentran en una fase inicial de investigación y desarrollo, tanto en el diseño como en el refrigerante utilizado, y esperamos que nuestro trabajo contribuya a tal desarrollo. En estos estudios se afirma poder recuperar el 100% de la energía “extraída”, si bien, al ser puramente teóricos carecen de la necesaria verificación experimental. Nuestro estudio aporta, sin embargo, una comprobación de tipo práctico, habiendo mostrado la problemática asociada al sistema de extracción de energía térmica, al tiempo que se han propuesto soluciones de carácter práctico para mejorar el coeficiente de transferencia y aproximarse a los valores teóricos óptimos.

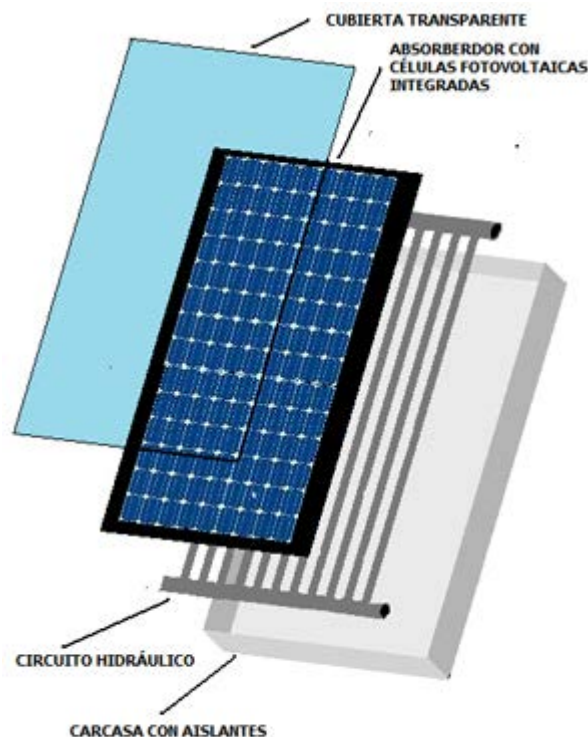


Ilustración 13. Esquema general de panel híbrido termo-fotovoltaico

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. <http://www.sitiosolar.com/panel%20hibrido.htm>
- [2]. <http://panelsolarhibrido.es/index.htm>
- [3]. Johon H. Perry. *Manual del Ingeniero Químico*, McGraw-Hill 1976.
- [4]. John A. Duffie and William A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd Ed., Wiley Interscience, 1991.
- [5]. M. Iqbal. *Solar Radiation*, 4th Ed., Academic Press. 1983.
- [6]. ASHRAE Standard. *Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors*. ANSI. B198.1-1977.
- [7]. AENOR. UNE-EN 12975-1:2006. Sistemas solares térmicos y componentes. Captadores solares. Parte 2: Métodos de ensayo. 2006.
- [8]. H.C. Hotel and B.B. Woertz, *Performance of Flat-Plate Solar-Heat Collectors*. Trans. ASME. 64,91. 1942.
- [9]. H. Tabor. *Radiation, Convection and Conduction Coefficients in Solar Collectors*. Bulletin of the Research Council of Israel, 6C, 155, 1958.
- [10]. Mohamed Essalhi, *Desalación por ósmosis inversa y energía solar*. Proyecto Fin de Máster. Universidad Complutense. 2008.
- [11]. Navarro,J.; Cabello,R.; Torrella,E. *Fluidos Refrigerantes. Tablas y diagramas*. A. Madrid Vicente Ediciones. 2003.
- [12]. Ilyd I. Redwood. *Theoretical and Practical Ammonia Refrigeration*. Blibliobazaar. 1895

ANEXO I

RENDIMIENTO

En el último ensayo, refrigeración con fluidos, al margen de los gastos económicos derivados de la fabricación y montaje del dispositivo, las únicas pérdidas que se tiene respecto a una instalación fotovoltaica estándar es el del consumo de la bomba de circulación, por tanto todas las ganancias tanto térmicas como eléctricas

Teniendo en cuenta las características de la bomba de circulación que usamos para refrigeración con fluido:

- Potencia 50W
- Altura 1m

Teniendo en cuenta que las ganancias obtenidas por nuestro panel experimental son de aproximadamente 1,5W, estamos muy lejos de que el sistema sea rentable. Pero, si analizamos bien la capacidad de la bomba podemos decir que está claramente sobredimensionada para la instalación experimental con la que estamos trabajando.

Dado que únicamente tenemos que vencer la resistencia del agua a ser movida, dicha bomba podría mover teóricamente un volumen de agua correspondiente al menos de 200 paneles, si tenemos en cuenta que la alimentación de la bomba se puede satisfacer con la carga de únicamente 2 ó 3 paneles, podríamos llegar a obtener un beneficio neto para este supuesto de casi 300W, al margen de la ganancia térmica.

Sería necesario un estudio más en profundidad de lo que aquí se expone para corroborar dichos valores.

ANEXO II

DISEÑO PROPUESTO

Idealmente, se desearía que el diseño del prototipo refrigerante, viniera implementado directamente desde la cadena de montaje, pero esto supone un gasto y un encarecimiento inicial en los costes de fabricación que evidentemente no se asumen hasta que se tienen unos resultados concluyentes.

Uno de los principales problemas que presentan los paneles comerciales para implementarle una refrigeración trasera, es la capa aislante con la que vienen fabricados, lo que dificultan la transferencia de calor con la parte delantera.

Al margen de usar en la construcción materiales termo-conductores apoyados con siliconas térmicas, es fundamental aumentar la superficie de contacto o interacción entre el panel y el fluido refrigerante, manteniendo la hermeticidad del sistema. Por lo que en esencia se propone, es sustituir las tuberías de cobre por una cavidad plana y estrecha, para evitar la capa límite, en forma de hexaedro encajado en la parte de atrás, de manera que se aumenta al máximo la superficie de contacto sin perder hermeticidad. Así mismo podrían implementarse en el interior de la cavidad diversos separadores, para forzar al fluido a circular, evitando estancamientos y gradientes de temperatura.