

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PARA ENSAYO DE PANELES SOLARES HÍBRIDOS (PVT)

GONZÁLEZ PEÑA, David ⁽¹⁾; ALONSO TRISTÁN, Cristina ⁽¹⁾; DÍEZ MEDIAVILLA, Montserrat ⁽¹⁾

GARCÍA CALDERÓN, Teófilo ⁽¹⁾; RODRIGUEZ AMIGO, Carmen ⁽¹⁾

davidgp@ubu.es

⁽¹⁾Grupo de Investigación SWIFT (Solar and Wind Feasibility Technologies), Dpto.Ingeniería Electromecánica
Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos

Avda. Cantabria s/n, Burgos, 09006, España.

RESUMEN

La tecnología solar híbridatérmica y fotovoltaica consigue la producción simultánea de calor y energía térmica a partir de la Radiación solar. Además de conseguir una eficiencia energética superior al sumar la de los dos equipos, la ventaja fundamental del sistema frente a la producción energética mediante sistemas fotovoltaicos y térmicos separados, se encuentra en la reducción del espacio físico requerido así como la posibilidad del uso de estructuras de soporte comunes [1,2].

En la actualidad existen varios diseños de prototipos [3]algunos de ellos en fase experimental, pero otros muchos en fase teórica y de desarrollo. Una etapa fundamental en la optimización de los diseños es la validación experimental de los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones. Para ello es imprescindible contar con una instalación de ensayo que permita simular las distintas condiciones de funcionamiento a las que se verá sometido el sistema.

Se propone en el trabajo el diseño y construcción de una instalación para la prueba de paneles solares híbridos. Esta instalación permitirá medir la producción tanto térmica como fotovoltaica de diferentes prototipos pudiendo ser variados los parámetros más influyentes para el rendimiento, como son el caudal de fluido circulante, la temperatura de impulsión y la inclinación del panel. Con ello se pretende conseguir testar los diferentes prototipos ante diferentes escenarios.

REFERENCIAS.

- [1] Fraisse, G., C. Menezo, and K. Johannes, "Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor type", *Solar Energy*, 2007, 81(11): p. 1426-1438.
- [2] Ibrahim, A., et al., "Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1): p. 352-365.
- [3] Zhang, X., et al., "Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(1): p. 599-617

1. Introducción

Las necesidades energéticas de la sociedad actual aumentan continuamente. Es por ello que se debe hacer un mayor esfuerzo en buscar nuevos recursos capaces de satisfacer, de manera sostenible, una demanda energética creciente [1]. Las energías renovables son los recursos más apropiados para ello y por tanto constituyen la mejor alternativa al modelo energético actual basado en combustibles fósiles.

Una forma innovadora de aprovechamiento de la energía solar es mediante la hibridación de paneles solares fotovoltaicos (PV) y térmicos. Mediante esta tecnología se consigue la producción simultánea de calor y energía eléctrica a partir de la radiación solar. El calor captado por el panel solar fotovoltaico que no es transformado en electricidad, puede ser utilizado para otros usos, consiguiendo mejorar simultáneamente la eficiencia fotovoltaica y el rendimiento energético global del panel.

Esta tecnología se encuentra actualmente en la etapa de desarrollo y optimización de prototipos. Es por ello necesario poder contrastar los datos teóricos obtenidos mediante simulación con los de valores de escenarios reales. En este trabajo se describe la instalación de ensayo diseñada para la prueba y caracterización de paneles solares híbridos (PVT) construidos por el grupo de investigación SWIFT de la Universidad de Burgos.

2. Localización.

El emplazamiento escogido para la instalación experimental se encuentra en Astudillo, Palencia. En esta localidad, la empresa CIDESOL S.L[2] (Figura 1) cuenta con una instalación solar fotovoltaica de 900 kW. Esta instalación está montada sobre estructuras soportes de paneles orientadas al sur y que cuenta con la posibilidad de variar la inclinación de forma manual (Figura 2).



Figura 1: Instalación CIDESOL S.L.

Figura 2: Estructura soporte de paneles.

Para el trabajo, la empresa cede el uso de una de las estructuras libres. El emplazamiento presenta características muy recomendables para el ensayo de paneles fotovoltaicos e híbridos: está adecuadamente orientada, no hay sombras por elementos naturales ni artificiales, ofrece una ligera inclinación que favorece la generación de corrientes que ventilan adecuadamente la instalación y se dispone de agua y electricidad (230 V AC) en toda la extensión de la parcela.

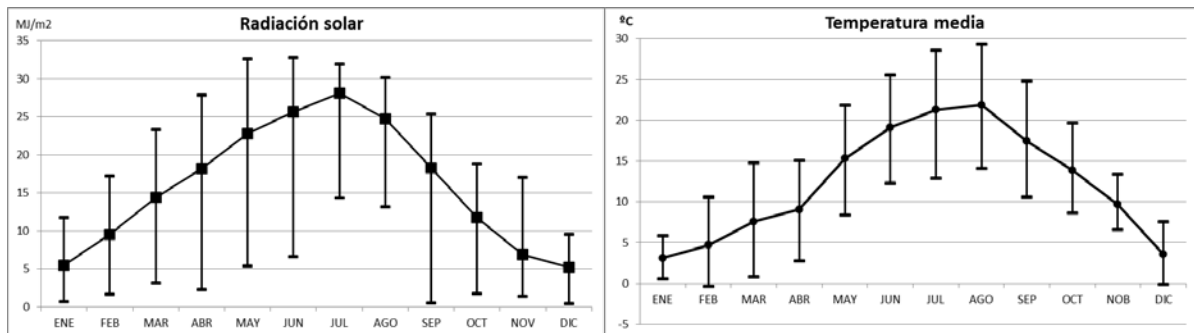


Figura 3: Temperatura media mensual.

Figura 4: Radiación solar.

La climatología del emplazamiento es adecuada para el ensayo de los diferentes prototipos de paneles PVT. La variabilidad a lo largo del año permite disponer de medidas de funcionamiento para un amplio rango de temperaturas y radiación solar. En las figuras 3 y 4 podemos observar registros de temperaturas ambiente y de valores de radiación solar. Estos valores se han obtenido de la estación climatológica que el grupo de investigación tiene instalada en la parcela y que cuenta con sensores de radiación solar, temperatura ambiente, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento y pluviometría.

3. Parámetros de diseño de la instalación

Se pretende ensayar los prototipos de paneles PVT en diferentes condiciones pudiendo simular escenarios de funcionamiento reales con un amplio rangos de medida. Para ello, la instalación de pruebas debe permitir modificar las condiciones de ensayo a voluntad del experimentador. Considerando estos aspectos, la instalación se ha diseñado bajo atendiendo a las siguientes características:

- Temperatura constante del fluido a la entrada del panel: Para ello es necesario disipar toda la energía que se capta a través del panel PVT.
- Rango de temperaturas: Se trata de disponer de un amplio rango de temperaturas del fluido en la entrada al panel. Se pretende incluso poder hacer pruebas por debajo de la temperatura ambiente.
- Caudal variable: El flujo que hacemos circular por el panel es uno de los parámetros que se pretende variar en los diferentes escenarios. Es por tanto imprescindible que la instalación permita variar el caudal bombeado. Con ello se pretende conseguir variar la temperatura del fluido y del panel.
- Autónomo: el control de los diferentes elementos de la instalación deber ser de forma automática.
- Registro de datos: Para poder comprobar los resultados la instalación debe contar con diferentes sensores que permitan medir diferentes parámetros. Además se contará con un datalogger que será el dispositivo encargado de medir y almacenar los datos de los diferentes sensores.
- Medidas a lo largo de todo el año: Teniendo en cuenta la localización se debe utilizar un fluido anticongelante ya que la temperatura baja por debajo de 0°C varios días al año.

4. Esquema hidráulico de la instalación.

Teniendo en cuenta todas las características definidas en el apartado anterior, se diseñó la instalación cuyo esquema hidráulico se observa en la figura 5.

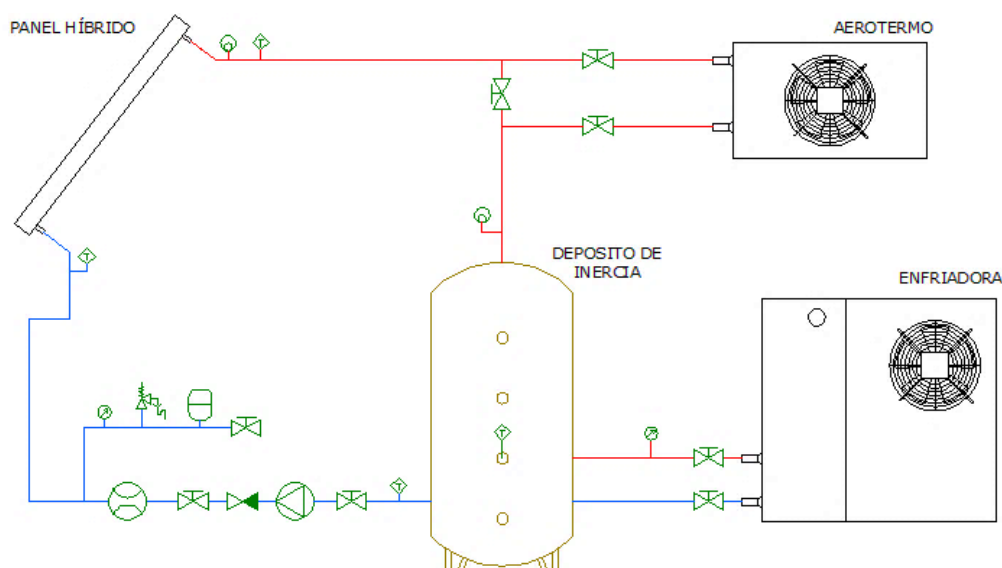


Figura 5: Esquema hidráulico de la instalación de ensayo de paneles PVT.

El circuito hidráulico principal está formado por el panel solar híbrido, el depósito de inercia y la bomba. Todos estos elementos van colocados en serie. El punto de entrada en el panel está colocado en la parte inferior y la salida en la parte superior para facilitar la recuperación de calor del panel. Posteriormente el circuito hidráulico conduce el fluido térmico hasta la parte superior del depósito de inercia. Con ello se consigue estratificar dentro del depósito el fluido a diferentes temperaturas. En la parte superior se situará el fluido más caliente y en la parte inferior el fluido tendrá una temperatura ligeramente inferior. La salida del caudal se realiza por la conexión inferior del lateral. Después, el fluido frío es conducido hasta la bomba, la cual se ocupa de hacer circular el caudal que necesitamos directamente hacia el panel.

Paralelamente a este circuito se dispone de un bypass que permite la circulación del fluido térmico por el aerotermo colocado entre la salida del PVT y la entrada al depósito. Este bypass se puede activar mediante una serie de válvulas manuales. Generalmente haremos pasar el fluido por el aerotermo para poder disipar el calor hacia el ambiente. Sólo se anulará el paso por el aerotermo en el caso de que queramos acumular el calor en el depósito y ver el comportamiento del prototipo a altas temperaturas.

Para poder realizar un enfriamiento del fluido por debajo de la temperatura ambiente se ha dispuesto en la instalación una unidad enfriadora de agua de 5kW. Este elemento se conecta al depósito de inercia de forma directa, captando el fluido frío de la parte media del depósito y retornándola por la parte inferior.

Tal y como se aprecia en la Figura 6, de forma paralela al panel PVT se coloca un panel fotovoltaico estándar. Con esto se consiguen valores de referencia del panel PV que pueden ser comparados con los obtenidos en el panel híbrido PVT para cuantificar las mejoras de rendimiento del panel híbrido respecto del panel fotovoltaico.



Figura 6: Instalación de ensayo de paneles PVT.

5. Esquema eléctrico de medida del rendimiento eléctrico.

Mediante el circuito hidráulico descrito anteriormente podemos analizar el rendimiento térmico del panel híbrido PVT. Para poder determinar la producción eléctrica del panel existen diversas técnicas. Una de ellas es mediante una máquina trazadora de curvas para paneles fotovoltaicos. Si bien es un método muy fiable y exacto, el coste de estos dispositivos es elevado. Una forma económica de caracterizar el rendimiento eléctrico del panel es mediante una pequeña instalación alimentada con la producción fotovoltaica aislada conectada a cada panel.

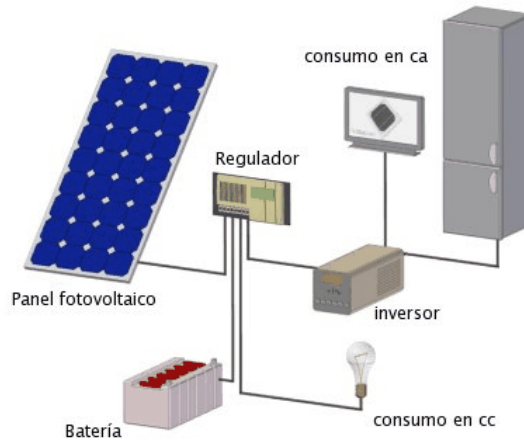


Figura 7: Esquema instalación PV aislada.

Como podemos ver en la Figura 7 estas instalaciones cuentan con un regulador de carga, una batería y un elemento de consumo. En este caso se prescindirá del inversor ya que la carga que se ha colocado va alimentada en DC. Mediante esta instalación se asegura que toda la energía generada por los paneles se consume o es almacenada temporalmente.

El elemento principal de la instalación es el regulador. Existen numerosos reguladores en el mercado, pero sin duda los de mejor eficiencia son aquellos con tecnología MPPT[3]. Esta tecnología hace un seguimiento ultra rápido del Punto de Máxima Potencia, pudiendo controlar el voltaje y la corriente de salida del panel para obtener la mayor energía posible. Esto nos permite asegurar que en todo momento se está absorbiendo la mayor potencia del panel. Algunos reguladores también incorporan un controlador de carga de la batería buscando que sea eficiente y alargando la vida de la misma.

En la elección de los diferentes componentes se ha tenido en cuenta los parámetros eléctricos del panel fotovoltaico suministrados por el fabricante (V_{oc} , V_{mp} , I_{sc} , I_{mp} y P_{max}). Debido a que esta tecnología incrementa la eficiencia del panel, es necesario que los parámetros del regulador sean ligeramente superiores a los nominales del panel PV estándar. En este caso se optó por el modelo BLUESOLAR MPPT 75/50 del fabricante VICTRON ENERGY (Figura 8).

Para el dimensionado de la batería se debe considerar que su capacidad sea suficiente para almacenar la energía generada de, al menos, un día completo. El voltaje debe ser el mismo que el de la carga ya que ésta va conectada directamente a la batería. Es por ello que en este caso se ha colocado una batería del tipo AGM de 12V con una capacidad de 95Ah (Figura 9).

Como elemento de consumo se han colocado focos LED de 60W (Figura 10). El funcionamiento de este elemento es controlado por el regulador de carga de batería, para evitar que estas cargas produzcan una descarga excesiva de la batería y conseguir así alargar la vida de la misma.



Figura 8: Regulador PV.



Figura 9: Batería.



Figura 10: Foco LED (carga)

6. Elementos de medida y registro de datos

La misión principal de toda instalación de ensayo y medida es la de disponer de registros suficientes para poder determinar y evaluar el funcionamiento del dispositivo ensayado ante diferentes parámetros

climatológicos cambiantes a largo de un año. En la instalación propuesta la medida y registro de los diferentes parámetros, así como del control de los sensores se lleva a cabo mediante un datalogger CR1000[4] de la compañía Campbell Scientific. Este dispositivo cuenta con hasta 16 entradas de voltaje y 2 de pulsos.



Figura 11: Datalogger CR1000.

5.1 Medida del rendimiento térmico del panel PVT.

El rendimiento térmico del dispositivo se calcula mediante los parámetros de temperaturas de entrada y salida del fluido en el panel PVT así como el caudal circulante por el mismo. Para poder calcular este rendimiento mediante estos parámetros se debe mantener constante la presión del circuito para que el calor específico del fluido sea únicamente dependiente de la temperatura, lo que se consigue gracias al vaso de expansión. Las temperaturas de fluido se registran mediante sondas PT-1000 tanto a la entrada como a la salida del panel PVT. El caudal se mide mediante un caudalímetro de vórtice que se ha colocado antes de la bomba. El rango de medida de este dispositivo es de 1,1-15l/min, que es mayor que el rango de caudal bombeado. El modelo instalado es LIQUI-VIEW lite FLP08-L1PA del fabricante OVAL. Este dispositivo tiene una precisión de 0,4408ml por pulso.

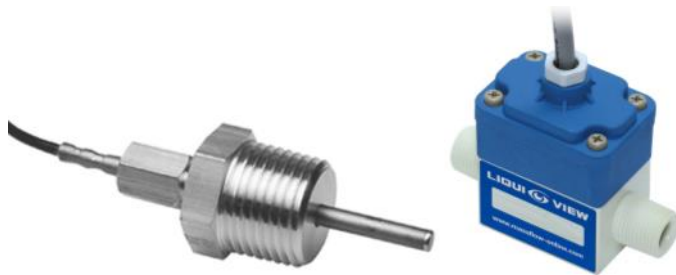


Figura 12: Sonda PT1000. Figura 13: Caudalímetro.

5.2 Medida de la producción eléctrica.

El rendimiento eléctrico de ambos paneles se determina mediante dos parámetros: la tensión y corriente del panel. Con ello podemos obtener la potencia instantánea generada. Para la medida de la tensión del panel PVT se ha usado indirectamente el propio datalogger. Una de las funciones programables del CR1000 es la de medida diferencial de tensión entre dos entradas. Debido a la limitación de tensión del datalogger de $\pm 5V$, que es considerablemente inferior a la tensión de salida de los módulos fotovoltaicos de 36,7V, se tuvo que implementar un circuito auxiliar.

En concreto, la misión de este circuito auxiliar es la de reducir de forma proporcional la tensión del panel para que esté dentro del rango de medida. Se decidió colocar dos potenciómetros en serie permitiendo ajustes en función de la tensión de los diferentes prototipos de paneles PVT. En la Figura 14 se muestra el esquema del circuito auxiliar diseñado. La relación entre ambas resistencias se determina en las ecuaciones siguientes:

$$V_{\text{datalogger}} = 5V = R_1 * \frac{V_{\text{pv}}}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{V_{\text{pv}}}{V_{\text{datalogger}}} - 1 \quad (2)$$

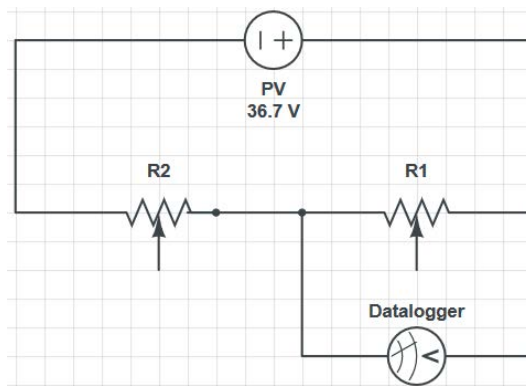


Figura 13: Esquema del circuito auxiliar para la medida de la tensión del panel.

Para evitar que los potenciómetros colocados se quemen y generen un error en la medida final, la corriente circulante por el circuito auxiliar se ha limitado a 0,5mA. Con esta corriente se obtienen un error inferior a 2,5mW. Mediante la expresión 3 podemos calcular el valor mínimo de R1 para que se cumpla esta limitación.

$$R_1 = \frac{V_{pv}}{\left(\frac{V_{pv}}{V_{datalogger}} - 1\right) \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} A} \quad (3)$$

$$R_2 = \left(\frac{V_{pv}}{V_{datalogger}} - 1\right) \cdot R_1 \quad (4)$$

La medida de la corriente se realiza mediante unos transductores de efecto Hall. Este sensor proporciona una salida en tensión que varía linealmente con la corriente que circula por el conductor. Existen varios tipos y formas de estos sensores. En este caso se optó por la colocación de los transductores HAS 50-S del fabricante LEM. La principal ventaja que presentan es la facilidad de montaje, ya que simplemente hace falta pasar el conductor por el orificio con el que cuenta sin la necesidad de realizar conexiones intermedias.



Figura 14: Transductor de corriente por efecto Hall.

En la selección del transductor se debe considerar el rango de medida del dispositivo, que en el modelo elegido es de hasta 50Amp(rms). Para aumentar la precisión de la medida se puede colocar el conductor realizando varios pasos a través del dispositivo, de tal forma que la tensión de salida es proporcional al de la corriente circulante y al número de pasos del conductor por el sensor. Esto reduce el rango de medida pero se aumenta la precisión ya que la pendiente de la recta de calibración aumenta.

La electrónica de estos transductores precisa de una alimentación externa de -15V, +15V y Masa (0V). Es por ello que es necesario contar con una pequeña fuente de alimentación auxiliar ya que el datalogger solo cuenta con alimentación de hasta 12V.

7. Control automatizado de la instalación

Es imprescindible garantizar el buen funcionamiento de la instalación de una forma autónoma a lo largo de la campaña de medidas. Para esta labor se ha colocado un módulo lógico PLC LOGO! 24RC del fabricante SIEMENS. Mediante este dispositivo se controla la puesta en funcionamiento de la bomba, el aerotermo y la enfriadora en función de los rangos de temperatura a ensayar. En la figura 15 se observa el control y los relés que activan el control de los diferentes elementos de la instalación.



Figura 15: Control lógico programable.

8. Conclusiones

Se ha diseñado y construido una instalación de ensayo y medida para prototipos de paneles solares híbridos en exterior. Esta instalación permite caracterizar independientemente el rendimiento eléctrico y térmico del panel así como la medida de otros parámetros de funcionamiento del dispositivo, como por ejemplo, temperaturas superficiales del panel. El diseño se ha automatizado para permitir el funcionamiento de modo autónomo durante largos periodos de ensayo.

El sistema está dotado de una enfriadora para realizar ensayos con temperaturas del fluido térmico que circula por el panel de hasta 6°C en la entrada, lo que permite, en muchas ocasiones, trabajar con temperaturas inferiores a la ambiental.

Es posible comparar el funcionamiento eléctrico del prototipo frente a otro panel fotovoltaico de las mismas características, cuantificando el incremento en el rendimiento obtenido.

Mediante la prueba de los diferentes prototipos en la instalación experimental es posible comprobar los valores obtenidos mediante las simulaciones con ordenador, además de poder optimizar tanto el diseño como los rangos de funcionamiento del dispositivo.

9. Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado con la financiación presupuestaria del proyecto de investigación autonómico BU358A12-2

10. Referencias.

- [1] Ministerio de Industria, E.y.T., "*Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) 2011-2020*".
- [2] Solar, C.-C.d.I.y.D.d.E.; Available from: <http://cidesol.com/>.
- [3] Eltawil, M.A. and Z. Zhao, "*MPPT techniques for photovoltaic applications*", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 25: p. 793-813.
- [4] Scientific, C. "*Measurement and Control Datalogger*". Available from: <https://www.campbellsci.es/cr1000>.