

## EVALUACIÓN TÉCNICA DE UNA BOMBA DE CALOR FOTOVOLTAICA AUTÓNOMA SIN BATERÍAS

**Lorenzo C.\*, Narvarte L.\*, Martínez-Moreno F.\***

\*Universidad Politécnica de Madrid, Comunidad de Madrid, 28031 (Madrid) España,  
celena.lorenzo@ies.upm.es

### RESUMEN

El objetivo de este trabajo es efectuar la evaluación técnica de una bomba de calor fotovoltaica, autónoma y sin baterías. Para ello, se ha instalado un prototipo de pequeña potencia (bomba de calor de 1,5 kW y un generador FV de 2,2 kW) en Madrid (España) y se han realizado unos ensayos de caracterización. En este artículo se describe dicho prototipo y se muestran brevemente los resultados de los primeros ensayos. Finalmente, se proponen unos indicadores de rendimiento específicos para bombas de calor fotovoltaicas ( $PR_{BC-FV}$ ,  $COP_{BC-FV}$  y  $EER_{BC-FV}$ ), adaptando los indicadores utilizados tradicionalmente.

**PALABRAS CLAVE:** Fotovoltaico, Bomba de Calor, Sistema Autónomo

### ABSTRACT

The objective of this work is to perform the technical evaluation of a photovoltaic heat pump system, operating stand-alone and without batteries. For achieving this purpose, a small-power prototype (heat pump of 1.5 kW and PV generator of 2.2 kW) has been installed and characterized in Madrid (Spain). In this paper, such prototype is described and the results of the preliminary characterization tests are shown. Finally, specific performance indicators are proposed for evaluating PV heat pump systems ( $PR_{BC-FV}$ ,  $COP_{BC-FV}$  y  $EER_{BC-FV}$ ), modifying the traditional ones.

**KEYWORDS:** Photovoltaic, Heat Pump, Stand-alone System

## INTRODUCCIÓN

La climatización (frío y calor), tanto para aplicaciones residenciales como industriales, es una actividad que implica un alto consumo energético y que cada vez necesita cubrir una mayor demanda a nivel mundial, debido en parte al calentamiento global. Las bombas de calor ayudan a reducir significativamente el consumo eléctrico necesario para cubrir una determinada necesidad térmica, por lo que cada vez son más utilizadas para aplicaciones de climatización. En Europa, el mercado de bombas de calor creció un 12% en 2016 en términos de unidades instaladas, lo que supuso la instalación de 2,11 GWe (EHPA, 2016). En 2017, este crecimiento volvió a ser del 12%, que ahora supuso la instalación de 2,37 GWe (EHPA, 2017). El problema es que, en la mayoría de los casos, la electricidad consumida por las bombas de calor procede de la red eléctrica, por lo que el porcentaje de energía renovable que consumen depende del mix energético de cada país. Las bombas de calor solares térmicas, que emplean colectores solares, han sido ampliamente estudiadas: está demostrado que ayudan a reducir aún más el consumo de las bombas de calor, pero de nuevo no garantizan que dicho consumo proceda de fuentes de energía renovables. Las investigaciones más recientes relacionadas con bombas de calor solares están orientadas precisamente al uso de generadores fotovoltaicos para alimentar el compresor que mueve el circuito del refrigerante (Aguilar et al., 2017; Romani et al., 2018; Toradmal et al., 2018).

El objetivo de este trabajo es describir el prototipo instalado para llevar a cabo la validación técnica de una bomba de calor fotovoltaica, operando de forma autónoma y sin baterías, tanto en modo frío como en modo calor. Se presentarán los resultados de los primeros ensayos de caracterización del sistema. Finalmente, se proponen unos indicadores adaptados a bombas de calor fotovoltaicas para evaluar mejor este tipo de sistemas desde el punto de vista fotovoltaico.

## DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Para poder llevar a cabo la validación técnica de una bomba de calor fotovoltaica, operando de forma autónoma y sin baterías, se ha instalado un prototipo en el Campus Sur de la Universidad Politécnica de Madrid (España), cuyo esquema simplificado se muestra en la Fig. 1. Dicho prototipo consiste en un generador FV de 2,2 kW de potencia nominal (compuesto por dos ramas de módulos de capa delgada, cada una de 1,1 kW), que alimenta una bomba de calor aire-aire de 1.5 kW de potencia eléctrica a través de un variador de frecuencia de 4 kW. El variador de frecuencia seleccionado permite arrancar motores *brushless* de velocidad variable, como el que alimenta el compresor de la bomba de calor utilizada. La unidad exterior de la bomba de calor está situada en una pequeña habitación aislada térmicamente, que simula el ambiente. La unidad interior está situada en otra habitación similar, que en este caso simula el espacio a climatizar. Adicionalmente, se han instalado dos bombas de calor auxiliares (también aire-aire) en ambas habitaciones para poder controlar sus temperaturas. De esta forma, el efecto de la bomba de calor FV se puede contrarrestar o acelerar para simular distintas condiciones de ensayo (por ejemplo, un ambiente de verano o de invierno o distintas cargas térmicas en el espacio a climatizar). Ambas bombas de calor auxiliares están alimentadas directamente con la red eléctrica.

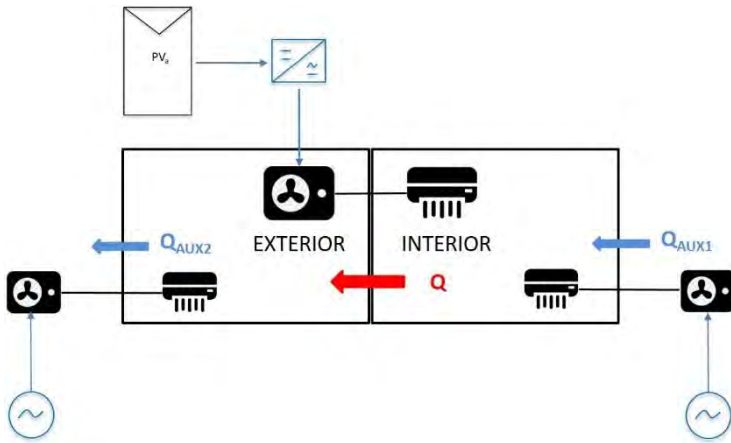


Fig. 1. Esquema simplificado del prototipo de bomba de calor fotovoltaica instalado en el Campus Sur de la UPM (España).

La Fig. 2 muestra imágenes reales de los elementos descritos: generador FV (a), variador de frecuencia (b), interior del cerramiento que simula el espacio a climatizar, donde se pueden ver las unidades interiores de la bomba FV y de la bomba AUX1 (c), e interior del cerramiento que simula el ambiente, donde se distinguen la unidad exterior de la bomba FV y la unidad interior de la bomba AUX2 (d).



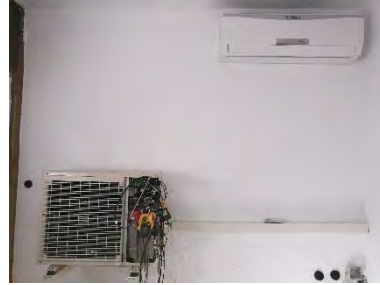
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2. Imágenes de los elementos del prototipo de bomba de calor fotovoltaica instalado en el Campus Sur de la UPM (España).

## ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

La bomba de calor estudiada en este trabajo consta de un compresor con regulación tipo *inverter*, que se caracteriza por adaptar en cada momento la frecuencia de rotación a la demanda de energía térmica. De esta forma se optimiza el consumo de electricidad, por lo que este tipo de regulación ya está presente en casi la totalidad de los equipos comerciales. El objetivo de los primeros ensayos de caracterización del prototipo descrito es conocer la lógica de la placa de control del fabricante que efectúa esta regulación. Posteriormente, el variador de frecuencia conectado al generador FV tendrá que ser capaz de replicar esta lógica de regulación, teniendo en cuenta la demanda de energía térmica y la potencia FV disponible en cada momento. Además, hay que minimizar el número de arranques y paradas del compresor debido a las intermitencias de potencia FV por paso de nubes. Finalmente, se diseñará un control lo más optimizado y general posible, para poder implementarse en bombas de calor FV de distintos fabricantes y tamaños.

La placa de control del sistema a ensayar, insertada en la unidad exterior de la bomba de calor, sólo puede trabajar con una frecuencia de entrada constante e igual a 50 Hz, por lo que estos ensayos han sido realizados con la red eléctrica y no con el generador FV. Se han monitorizado las señales eléctricas a la salida de la placa de control para los modos de operación de frío y de calor, y para distintas situaciones (temperatura exterior de invierno o de verano, temperatura interior variable o constante, temperatura inicial cercana o no a la temperatura de consigna...).

A modo de ejemplo, las Fig. 3 y 4 muestran la frecuencia de rotación del compresor (a la salida de la placa de control) y  $\Delta T$  (diferencia entre la temperatura interior medida y la temperatura de consigna) para una prueba efectuada con la temperatura exterior constante. En la Fig. 3, la bomba FV trabaja en modo frío, enfriando la sala desde 38°C hasta 18°C, y la temperatura del cerramiento que simula el exterior se mantuvo a 30°C (condiciones de verano). En la Fig. 4, la bomba FV calienta la sala interior desde 18°C hasta 30°C y la sala que simula el exterior se mantuvo a 18°C. En ambos casos, el compresor arranca y la frecuencia sube hasta su valor máximo (160 Hz en modo calor y algo superior en modo

frío) cuando  $\Delta T$  es alta. Después, la frecuencia va bajando a medida que  $\Delta T$  disminuye (es decir, a medida que nos aproximamos a la temperatura de consigna) hasta que el compresor se para. Sin embargo, una diferencia importante es que, cuando la bomba está operando en modo frío (Fig. 3), hay muchos menos niveles de frecuencia de operación disponibles que en modo calor (Fig. 4). Es decir, el control está más optimizado para el modo calor que para el modo frío. Esto se debe, seguramente, a que la mayoría de los equipos comerciales han sido diseñados para el norte de Europa, donde hay mayor demanda de calefacción que de refrigeración.

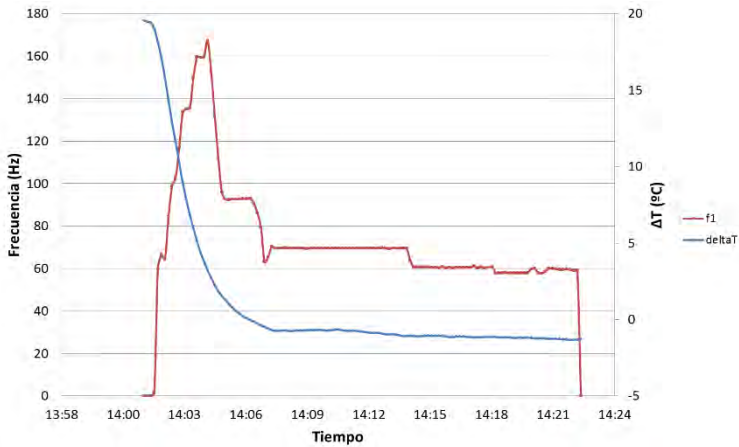


Fig. 3. Resultados de una prueba de caracterización en modo frío y con la temperatura exterior constante.

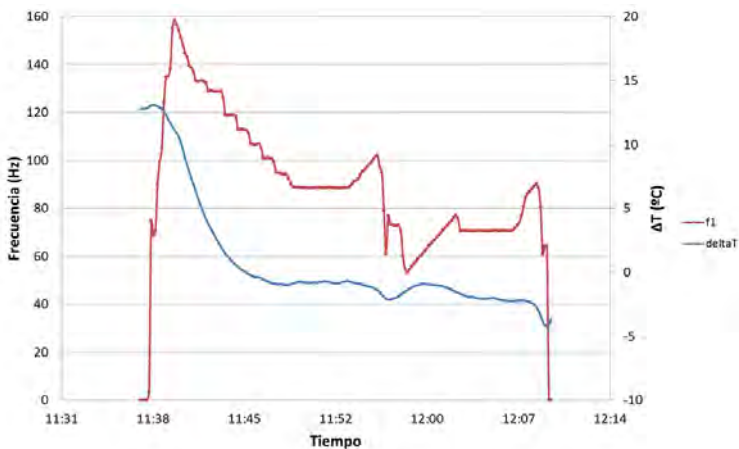


Fig. 4. Resultados de una prueba de caracterización en modo calor y con la temperatura exterior constante.

## INDICADORES DE RENDIMIENTO DEL SISTEMA

### Indicadores tradicionales

Para evaluar el buen funcionamiento de un generador FV se utiliza el *Performance Ratio* (PR), que es la relación entre la energía producida ( $E_{FV}$ ) y la que se podría haber producido idealmente en un periodo de tiempo. El PR tradicional viene dado por la Ec. (1):

$$PR = \frac{E_{FV}}{\frac{P^*}{G^*} \int G(t) dt} \quad (1)$$

donde  $P^*$  es la potencia nominal del generador,  $G^*$  es la irradiancia en Condiciones Estándar de Medida (1000 W/m<sup>2</sup>) y  $G(t)$  es la irradiancia en el plano del generador en cada instante de tiempo.

Para evaluar la eficiencia de una bomba de calor se utilizan el *Coefficient of Performance* (COP) en modo calor y el *Energy Efficiency Ratio* (EER) en modo frío, que vienen dados por las Ecs. (2) y (3):

$$COP = \frac{Q_c}{W_{com}} \quad (2)$$

$$EER = \frac{Q_e}{W_{com}} \quad (3)$$

donde  $Q_c$  es el calor liberado en el condensador en modo calor,  $Q_e$  es el calor absorbido en el evaporador en modo frío y  $W_c$  es la potencia eléctrica consumida por el compresor.

Finalmente, el aprovechamiento del generador FV para alimentar otro sistema se suele evaluar a través del *Self-Consumption Ratio* (SCR) –porción de la energía FV generada que es consumida por el sistema- y del *Photovoltaic Penetration Rate* (PVPR) –porción de la energía consumida por el sistema que procede del generador FV-.

### Indicadores propuestos

En una bomba de calor FV, pueden obtenerse PR's con valores reducidos debido a causas ajenas al funcionamiento del generador FV, como por ejemplo la falta de demanda de energía térmica en momentos de irradiancia elevada. Por ello, se propone adaptar el PR tradicional para considerar sólo aquellas horas en las que el compresor de la bomba de calor esté funcionando ( $t_{com}$ ). El nuevo  $PR_{BC-FV}$  para bombas de calor FV viene dado por la Ec. (4):

$$PR_{BC-FV} = \frac{E_{FV}}{\frac{P^*}{G^*} \left( \int_{t_{com}} G(t) dt \right)} \quad (4)$$

Por otra parte, puede resultar de gran utilidad combinar los indicadores ya mencionados. De esta forma, se pueden evaluar de forma conjunta el buen funcionamiento de la bomba de calor y del generador FV, así como el acoplamiento entre ambos para maximizar el aprovechamiento FV. Para ello, se propone utilizar los indicadores  $COP_{BC-FV}$  y  $EER_{BC-FV}$  en modo calor y frío, respectivamente, los cuales vienen dados por las Ecs. (5) y (6):

$$COP_{BC-FV} = COP(1 + PR_{BC-FV} \times SCR \times PVPR) \quad (5)$$

$$EER_{BC-FV} = EER(1 + PR_{BC-FV} \times SCR \times PVPR) \quad (6)$$

De esta forma, en caso de no haber generación FV, los indicadores  $COP_{BC-FV}$  y  $EER_{BC-FV}$  serán iguales a los tradicionales COP y EER; si el generador FV funciona idealmente y está perfectamente aprovechado por el compresor, los indicadores  $COP_{BC-FV}$  y  $EER_{BC-FV}$  serán iguales al doble de los tradicionales.

## TRABAJO FUTURO

Para completar la validación técnica del prototipo de bomba de calor FV descrito en este trabajo (autónomo y sin baterías), se realizarán las siguientes tareas futuras:

- Identificar cómo actúan las distintas protecciones de la bomba de calor, para así poder incorporarlas en la lógica de control del variador de frecuencia. Dichas protecciones incluyen: frecuencias de rotación mínima y máxima del compresor, ciclo de deshielo (cuando las condiciones exteriores permiten la formación de hielo, se fuerza a la máquina a operar en modo frío para liberar calor en la unidad exterior), entrada de líquido al compresor (se debe evitar siempre) y posibles fugas en el circuito del refrigerante.
- Diseñar una lógica de control en el variador de frecuencia que optimice el consumo eléctrico para la demanda de energía térmica y la potencia FV disponible en cada momento. Esta lógica de control debe minimizar el número de paradas y arranques debidos a fluctuaciones de potencia FV por paso de nubes. Además, debe funcionar indistintamente en modo frío o calor, y poder ser implementada en sistemas de distintos tamaños y fabricantes.
- Calcular los valores de los indicadores propuestos para sistemas de bombas de calor FV ( $PR_{BC-FV}$ ,  $COP_{BC-FV}$  y  $EER_{BC-FV}$ ) para el prototipo estudiado, en distintas condiciones de operación.

## REFERENCIAS

Aguilar F. J., Aledo S., Quiles P. V. (2017) Experimental analysis of an air conditioner powered by photovoltaic energy and supported by the grid. *Applied Thermal Engineering* 123, 486-497.

European Heat Pump Agency (2016) Heat Pump Market and Statistics Report, sep. 2016.

European Heat Pump Agency (2017) Heat Pump Market and Statistics Report, nov. 2017.

Romani J., Belusko M., Alemu A., Cabeza L. F., Gracia A., Bruno F. (2018) Control concepts of a radiant wall working as thermal energy storage for peak load shifting of a heat pump coupled to a PV array. *Renewable Energy* 118, 489-501.

Toradmal A., Kemmler T., Thomas B. (2018) Boosting the share of onsite PV-electricity utilization by optimized scheduling of a heat pump using buildings thermal inertia. *Applied Thermal Engineering* 137, 248-258.