

CARACTERIZACIÓN DE UNA BOMBA DE CALOR FOTOVOLTAICA CON CONEXIÓN A LA RED ELÉCTRICA PARA GENERACIÓN DE FRÍO

Lorenzo C.*, Narvarte L.*, Almeida R.H.*

* Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur c/ Nikola Tesla S/N, 28031 (Madrid), Spain, celena.lorenzo@ies.upm.es

<https://doi.org/10.34637/cies2020.2.4150>

RESUMEN

Este artículo describe los resultados de la caracterización técnica de un prototipo de bomba de calor fotovoltaica (BC-FV) hibridada con la red eléctrica, para aplicaciones de generación de frío para climatización de espacios. Esta caracterización se ha realizado con un algoritmo de control “inverter”, caracterizado por regular la frecuencia del compresor de la BC para mantener una temperatura de consigna en la habitación. Se han efectuado dos ensayos para dos temperaturas de consigna de 18 °C y 24 °C. Se han calculado indicadores de rendimiento del generador FV $-PR$, $PR_{PV,CEM}$ y 3 factores de utilización-, de la BC $-EER$ y SPF - y de todo el conjunto del sistema $-SF_{FV}$ y $SPF_{BC-FV,CEM}$, que se obtienen combinando todos los anteriores-. Los resultados muestran un buen comportamiento de los componentes del sistema. La calidad del acoplamiento entre ellos viene determinada fundamentalmente por el aprovechamiento del generador FV por parte del compresor que, a su vez, depende del dimensionado y de la temperatura de consigna establecida.

PALABRAS CLAVE: Sistema fotovoltaico, Bomba de calor, Generación de frío

ABSTRACT

This paper presents the results of the technical characterization of a photovoltaic heat pump (PV-HP) prototype connected to the electric grid, for space cooling applications. This characterization has been performed for an “inverter” control that regulates the frequency of the compressor for maintaining a certain temperature set point. Two test have been implemented for two different temperature set points, 18 °C and 24 °C. Several performance indicators have been calculated for the PV generator $-PR$, $PR_{PV,CEM}$ y 3 utilization ratios-, for the HP unit $-EER$ y SPF - and for the whole system $-SF_{FV}$ y $SPF_{BC-FV,CEM}$, which is obtained as a combination of all the others-. The results show a good performance of the system components. The quality of the coupling between them mostly depends on the utilization of the PV generator, that is determined by the sizing of these components and by the temperature set point value.

KEYWORDS: Photovoltaic system, Heat pump, Cooling

INTRODUCCIÓN

En la última década, el mercado de bombas de calor en Europa ha experimentado un crecimiento significativo y cada vez más rápido. Entre 2007 y 2018, el número de unidades de bombas de calor vendidas anualmente ha aumentado en un 120% (EHPA, 2020), siendo este aumento del 12,5% sólo en el último año (EHPA, 2019). Al tratarse de una tecnología que consume electricidad para generar energía térmica, este aumento del mercado implica un mayor consumo eléctrico asociado a aplicaciones de generación de frío y de calor. En concreto, las aplicaciones de frío son las que están experimentando un mayor crecimiento: más de la mitad de las bombas de calor instaladas en Europa en el último año están en Francia, España e Italia (EHPA, 2019), que se caracterizan por un clima cálido con temperaturas muy altas en verano. Al mismo tiempo, es cada vez más importante aumentar la penetración de fuentes de energías renovables en el sistema eléctrico europeo para combatir el cambio climático (EU, 2020). Por ello, resulta de gran interés el uso de generadores fotovoltaicos para alimentar bombas de calor, en particular para aplicaciones de generación de frío (ya que las horas más cálidas suelen coincidir con horas de alta irradiancia).

En el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid se ha instalado un prototipo de una bomba de calor fotovoltaica (BC-FV) hibridada con la red eléctrica. La red eléctrica se utiliza para complementar al generador FV cuando su potencia no es suficiente para satisfacer la demanda de frío, pero no se utiliza para exportar excedente FV. El sistema no dispone de acumulación eléctrica. Se ha diseñado e implementado un algoritmo de control del compresor (que es el componente que más electricidad consume) con dos objetivos principales: realizar una regulación de frecuencia similar a la de los sistemas conocidos como “inverter” y maximizar la penetración fotovoltaica. A diferencia de un sistema para autoconsumo tradicional, con esta solución es posible limitar el consumo desde la red eléctrica a determinadas horas, pudiendo llegar a eliminar la potencia contratada durante los tramos centrales del día. Este trabajo presenta los resultados de la validación técnica del prototipo descrito, que debe cumplir los siguientes objetivos principales:

- El algoritmo de control “inverter” debe estar correctamente implementado, variando la frecuencia de consigna del compresor para conseguir mantener la temperatura de consigna en la sala.
- Los distintos componentes que integran el sistema deben operar de forma correcta y eficiente, así como todo el sistema en su conjunto. Para ellos se proponen y calculan una serie de indicadores de rendimiento.

METODOLOGÍA

Para la validación técnica de una BC-FV con conexión a la red eléctrica se ha instalado un prototipo de ensayos en el Campus Sur de la Universidad Politécnica de Madrid (España), se ha implementado un algoritmo de control del compresor para generación de frío y se han calculado una serie de indicadores de rendimiento, tanto de los principales componentes (BC y generador FV) como de todo el conjunto.

Configuración experimental

La Fig. 1 muestra un esquema del prototipo instalado, que consta de dos habitaciones térmicamente aisladas en las que se han instalado las unidades interior y exterior de una bomba de calor aire-aire, alimentada por un generador FV y por la red eléctrica a través de un variador de frecuencia (VF). De esta forma, dichas salas simulan el espacio a climatizar y la calle, estableciéndose un flujo de calor desde el interior hacia la calle para un ensayo de generación de frío. Para poder controlar las condiciones de ensayo se han instalado dos bombas de calor auxiliares, una por sala, que en este caso son alimentadas exclusivamente por la red eléctrica y no intervienen en los balances de energía de la BC-FV.

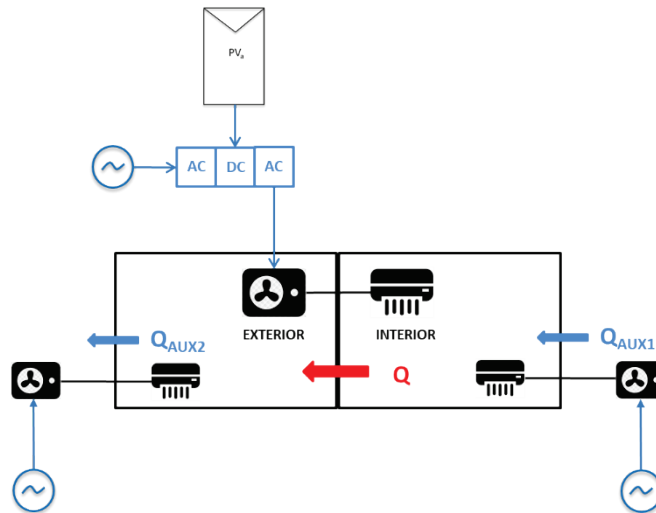


Fig. 1. Esquema del prototipo de bomba de calor fotovoltaica con conexión a red instalado en el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid.

La Tabla 1 indica las especificaciones técnicas de los principales componentes del sistema BC-FV: la BC, el moto-compresor y el generador FV.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los principales componentes del sistema BC-FV.

Bomba de Calor	
Fabricante	Fujitsu
Modelo	ASYG12LLCE (int) / AOYG12LLCE (out)
Energy Efficiency Ratio nominal (EER)	3.15
Potencia térmica nominal (kW)	3.40
Potencia AC nominal (kW)	1.08
Moto-compresor	
Fabricante	GMCC
Modelo	ASM98D10UFZA
Número de polos	4
Potencia AC nominal (kW)	0.67
Generador FV	
Orientación	8°E
Inclinación	30°
Potencia DC nominal, P_{MPP} (kWp)	0.8
Coefficiente de variación de la potencia con la temperatura, γ (%/°C)	-0.38
Módulos en serie por rama	16
Ramas en paralelo	1
Fabricante módulos	Atersa
Modelo módulos	ESPMC050

Algoritmo de control

Se ha implementado un algoritmo de control similar al de los sistemas comerciales llamados “inverter”, en los que la frecuencia del compresor se regula para mantener una cierta temperatura de consigna en la habitación, según la Ec. (1):

$$freq_{SP} = 40Hz + \frac{90Hz}{8^{\circ}C} \Delta T_{int} \quad \forall \Delta T_{int} \geq 0 \quad (1)$$

donde $freq_{SP}$ es la frecuencia de consigna del compresor y ΔT_{int} es la diferencia entre la temperatura de la sala interior (T_{int}) y la temperatura de consigna a la que se desea llegar ($T_{int,SP}$). Cuando $\Delta T_{int} = 0$ °C, se mantiene el compresor funcionando a su frecuencia mínima (40 Hz) hasta alcanzar $\Delta T_{int} = -2$ °C. En ese momento se apaga el compresor y

no se vuelve a arrancar hasta que la temperatura aumenta hasta $\Delta T_{int}=+2$ °C. Este tipo de histéresis es típico de los equipos comerciales y su objetivo es evitar un exceso de arranques y paradas cuando se trabaja cerca de $T_{int,SP}$.

Indicadores de rendimiento

El funcionamiento de la BC, en términos de su conversión de energía eléctrica a energía térmica, se evalúa en función del Energy Efficiency Ratio (EER) -en términos de potencia- y del Seasonal Performance Factor (SPF) -en términos de energía:

$$EER = \frac{P_{evap}}{P_{com}} \tag{2}$$

$$SPF = \frac{E_{evap}}{E_{com}} \tag{3}$$

donde P_{evap} es la potencia térmica absorbida en el evaporador de la BC, P_{com} es la potencia AC consumida por el compresor, E_{evap} es la energía total absorbida en el evaporador en un periodo de tiempo y E_{com} la energía AC consumida por el compresor en el mismo periodo de tiempo.

El funcionamiento del sistema FV se evalúa en función del Performance Ratio (PR):

$$PR = \frac{E_{AC,FV}}{\frac{P_{MPP}^*}{G^*} \int G(t)dt} \tag{4}$$

donde $E_{AC,FV}$ es la energía alterna aportada por el generador FV en un periodo de tiempo, P_{MPP}^* es la potencia nominal del generador, G^* es la irradiancia global en el plano del generador en Condiciones Estándar de Medida (CEM) y $G(t)$ es la irradiancia global en el plano del generador en cada instante.

Cuando el sistema FV se acopla a un sistema con carga variable, como es el compresor de la BC, se pueden obtener valores de PR menores que los esperados para un sistema con conexión a red, ya que no será posible aprovechar toda la irradiancia recibida a lo largo del día. Para distinguir cuándo un PR bajo indica un defecto en el sistema y cuándo no, se ha propuesto la siguiente factorización de este indicador (Lorenzo y Narvarte, 2019), donde los factores que lo componen están definidos en la Tabla 2:

$$PR = PR_{FV} \times UR_{Cp} \times UR_{BC-FV} \times UR_{EF} \tag{5}$$

Tabla 2. Factores en los que se descompone el PR, teniendo en cuenta la utilización del generador FV por la BC.

$PR_{FV} = \frac{E_{AC,FV}}{P_{MPP}^*/G^*} \times \frac{1}{\int G_{used} dt}$	<p>PR considerando las pérdidas estrictamente asociadas al generador FV: potencia real vs. nominal, suciedad, pérdidas térmicas y de conversión DC/AC. G_{used} es la irradiancia utilizada por el sistema, considerando sólo los periodos de tiempo en los que el compresor está funcionando.</p>
$UR_{Cp} = \frac{\int_{Cp} G dt}{\int G dt}$	<p>Ratio entre la irradiación recibida a lo largo del periodo de generación de frío (Cp) y a lo largo de todo el año. Es intrínseco a la aplicación del sistema de BC-FV. Evalúa las pérdidas asociadas a que la BC-FV solo está funcionando cierto periodo del año (Cp) por ser en el que existe necesidad de generación de frío.</p>
$UR_{BC-FV} = \frac{\int G_{useful} dt}{\int_{Cp} G dt}$	<p>Ratio entre la irradiación útil para el compresor y la recibida a lo largo del Cp. Es intrínseco al diseño del sistema BC-FV; depende principalmente del rango de potencias de operación del compresor, de la potencia nominal del generador y del tipo de seguimiento (si existiera). G_{useful} es la irradiancia considerando sólo los periodos en los que la potencia FV está dentro del rango de operación del compresor. Evalúa las pérdidas no achacables al sistema FV, sino las que se producen por los condicionamientos que impone el sistema de generación de frío.</p>
$UR_{EF} = \frac{\int G_{used} dt}{\int G_{useful} dt}$	<p>Ratio entre la irradiación demandada por el compresor y la útil en un mismo periodo de tiempo. Evalúa las pérdidas impuestas por el algoritmo de control de temperatura y por la utilización de la BC por parte del usuario final.</p>

Para eliminar la dependencia del PR con las condiciones climáticas locales se calcula el $PR_{FV,CEM}$, de forma que se excluyan las pérdidas térmicas y por baja irradiancia (Dierauf et al, 2013):

$$PR_{FV,CEM} = \frac{E_{AC,FV}}{\frac{P_{MPP}^*}{G^*} \int G_{used}(t) [1 + \gamma(T_c(t) - T_c^*)] \frac{\eta(G)}{\eta^*} dt} \quad (6)$$

donde T_c es la temperatura de célula del generador, T_c^* es 25°C (CEM), $\eta(G)$ es la eficiencia del generador en las condiciones de operación y η^* es la eficiencia a CEM.

Finalmente, se propone un indicador de rendimiento del conjunto del sistema ($SPF_{BC-FV,CEM}$) que se obtiene combinando el SPF , el $PR_{FV,CEM}$, los URs de la Tabla 2 y la fracción solar fotovoltaica (SF_{FV}), que es la porción de toda la energía AC consumida por el compresor (E_{AC}) que es aportada por el generador FV ($E_{AC,FV}$):

$$SPF_{BC-FV,CEM} = SPF(1 + PR_{FV,CEM} \times UR_{Cp} \times UR_{PV-HP} \times UR_{EF} \times SF_{FV}) \quad (7)$$

De esta forma, si toda la energía FV es aprovechada por la BC con un rendimiento ideal y toda la energía consumida por el compresor es aportada por el generador FV, $SPF_{BC-FV,CEM}$ será igual al doble del SPF . Si, por el contrario, no hay ninguna generación de energía FV, ambos SPF s serán iguales. Es decir, el $SPF_{BC-FV,CEM}$ integra el rendimiento de los componentes del sistema y la calidad del acoplamiento entre ellos (aprovechamiento del generador FV y cómo de renovable es el conjunto).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El prototipo híbrido de BC-FV para generación de frío ha sido caracterizado para dos temperaturas de consigna distintas, 18 °C y 24 °C, funcionando durante tres semanas en cada caso entre las 9 a.m. y las 18 p.m. (horario de oficina estándar) y con un periodo de registro de 10 segundos. Como el ensayo fue implementado entre octubre y diciembre (del 04/10/2019 al 08/12/2019, con una interrupción entre los días 6/10/2019 y 18/10/2019), fue necesario utilizar las BC auxiliares para simular temperaturas de verano. AUX1 se utilizó para calentar la sala interior a 24 °C y AUX2 para mantener la sala exterior a 30 °C. Cuando los valores de consigna de AUX y de la BC-FV coincidan a 24°C, AUX1 intenta calentar la sala hasta unos 26°C antes de pararse (tiene una histéresis similar a la implementada en la BC-FV), mientras que la BC-FV intenta enfriarla hasta los 22°C. Se establece así un pulso entre ambas que permite que estén funcionando la mayor parte del tiempo.

Implementación del algoritmo de control

Las Fig. 2(a) y 2(b) muestran la potencia FV entregada al compresor (P_{FV}) y la entregada por la red eléctrica (P_{red}) para dos días soleados (5/10/2019 y 7/12/2019) con dos temperaturas de consigna (18 °C y 24 °C respectivamente). El consumo total del compresor es la suma de ambas. En ambos casos la penetración fotovoltaica fue del 80%, aunque con $T_{int,SP}=18$ °C el consumo total fue mayor (2,81 kWh) que con $T_{int,SP}=24$ °C (1,62 kWh). En la Fig. 2(a) se observa que el consumo fue elevado en las primeras horas del día y luego se redujo. Como la potencia de la BC-FV es algo menor que la de AUX1, la temperatura de la sala permaneció unos 3°C por encima de la consigna. En la Fig. 2(b) el consumo fue más homogéneo a lo largo del día, ya que el equilibrio en torno a 24 °C entre BC-FV y AUX1 se alcanzó rápidamente. La potencia fotovoltaica disponible fue menor que en el primer caso porque el ensayo fue implementado en diciembre, pero en condiciones más favorables se podrían conseguir penetraciones cercanas al 100% para días soleados y temperaturas de consigna intermedias. Además, es fácil observar que la red eléctrica sólo es necesaria durante las primeras horas de la mañana y las últimas de la tarde, permitiendo reducir la potencia contratada durante los tramos con tarifas más altas.

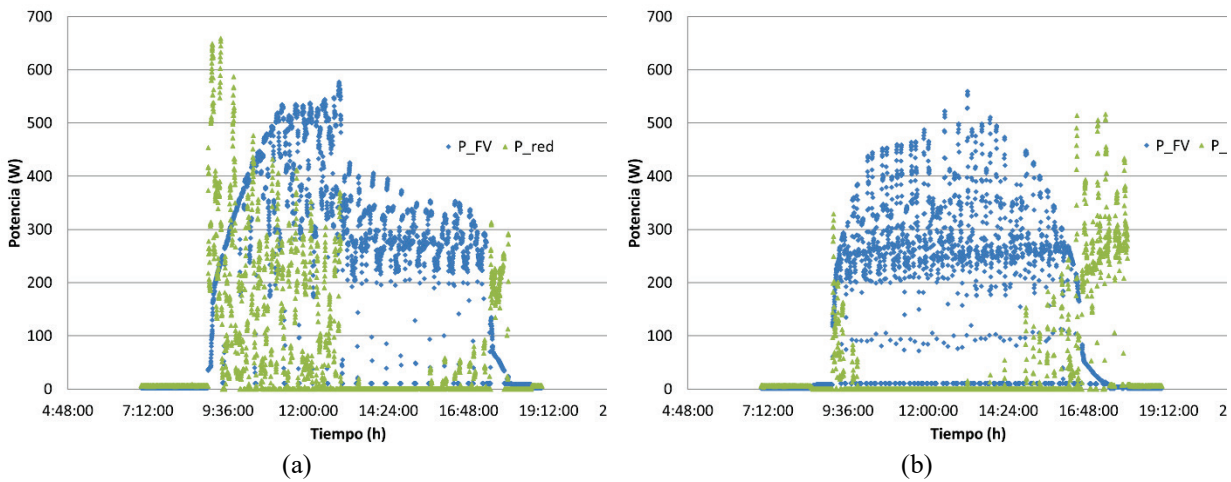


Fig. 2. Potencia entregada al compresor por el generador FV (P_{FV}) y por la red eléctrica (P_{red}) a lo largo de dos días soleados -5/10/2019 (a) y 7/12/2019 (b)- con dos temperaturas de consigna distintas, 18 °C y 24 °C respectivamente.

Las Fig. 3(a) y 3(b) muestran la función de distribución de probabilidad de ΔT_{int} para los mismos días que las Fig. 2(a) y 2(b). En ambos casos se utilizó la BC AUX1 para calentar la sala a 24 °C, pero al tener distintas temperaturas de consigna se obtuvieron distintas distribuciones de ΔT_{int} . En la Fig. 3(a) se observa que se trabaja en torno de la consigna ($\Delta T_{int} = \pm 2$ °C) durante el 43% del tiempo; en la Fig. 3(b) este porcentaje aumenta hasta el 59%, pero hay que destacar que el 29% del tiempo se está incluso algo por debajo de los 24 °C ($\Delta T_{int} < 0$ °C). Es decir, el algoritmo “invertir” ha conseguido mantener la temperatura prácticamente igual a la de consigna durante una parte importante del día.

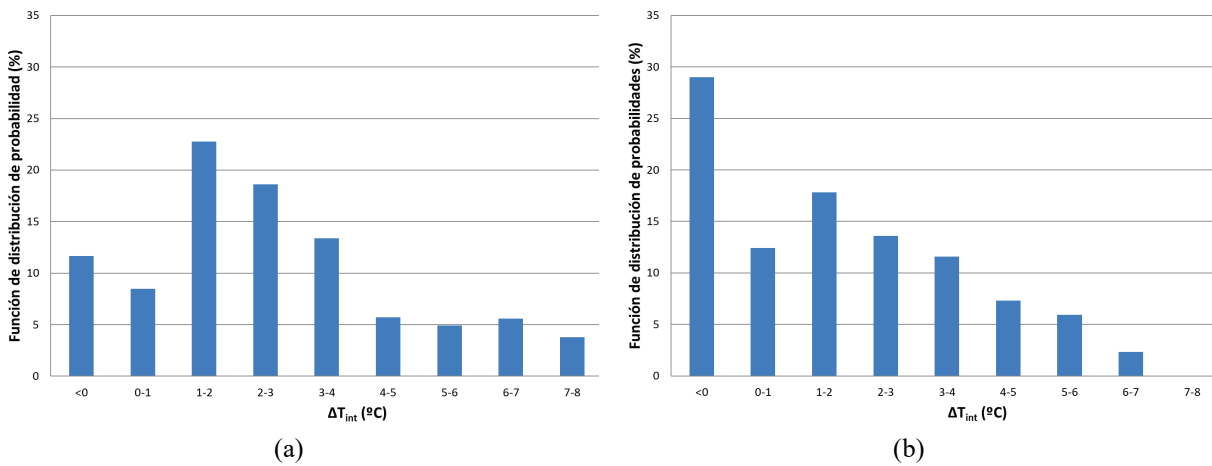


Fig. 3. Función de distribución de probabilidad de la diferencia entre la temperatura de la sala y la de consigna (ΔT_{int}) para dos días soleados -5/10/2019 (a) y 7/12/2019 (b)- con dos temperaturas de consigna distintas, 18 °C y 24 °C respectivamente.

Cálculo de los indicadores de rendimiento

La Tabla 3 muestra los valores semanales y totales de los indicadores de rendimiento definidos en la sección de metodología, obtenidos para los ensayos con las dos temperaturas de consigna distintas. Los factores de utilización UR_{Cp} y UR_{BC-FV} no se han incluido en la tabla porque ambos toman valor 1: el periodo de ensayo y de enfriamiento coinciden ($UR_{Cp}=1$) y toda la irradiancia recibida es útil para el compresor ($UR_{BC-FV}=1$) -si no se llega a la potencia mínima de arranque con el generador FV, la red aporta la parte restante, y al no estar en verano nunca se dispone de más potencia FV que la máxima permitida por el compresor-.

Tabla 3. Valores mensuales y totales de los indicadores de rendimiento definidos para el generador FV, para la bomba de calor (BC) y para el conjunto del sistema (BC-FV).

		<i>PR</i>	<i>UR_{EF}</i>	<i>PR_{FV,CEM}</i>	<i>SF_{FV}</i>	<i>EER</i>	<i>SPF</i>	<i>SPF_{BC-FV,CEM}</i>
$T_{int,SP}=18^{\circ}$ C	W1	0,51	0,63	0,90	0,49	2,14	2,09	2,67
	W2	0,55	0,67	0,90	0,52	2,10	2,20	2,89
	W3	0,61	0,71	0,90	0,51	2,06	2,29	3,05
	Total	0,56	0,67	0,90	0,51	2,10	2,20	2,86
$T_{int,SP}=24^{\circ}$ C	W1	0,28	0,33	0,90	0,65	3,26	3,69	4,40
	W2	0,35	0,39	0,92	0,44	3,23	3,71	4,30
	W3	0,33	0,39	0,90	0,50	3,16	3,56	4,20
	Total	0,32	0,37	0,91	0,52	3,22	3,65	4,28

Los valores del *PR* obtenidos para estos ensayos (entre 0,28 y 0,61) son mucho menores que los que se podrían esperar de un sistema con conexión a red, que típicamente presentan valores entre 0,75 y 0,9 (Jahn y Nasse, 2000), (Reich et al, 2012), (Purohit y Purohit, 2018). Sin embargo, los valores del *PR_{FV,CEM}* (entre 0,90 y 0,92) indican que el generador FV está libre de defectos: si se considera sólo la irradiación utilizada por el compresor y una vez excluidas las pérdidas térmicas y por baja irradiancia, sólo se aprecian pérdidas de menos del 10% que corresponden fundamentalmente a las de conversión DC/AC (la eficiencia del VF es menor que la de los inversores con conexión a red, alrededor del 90%). El factor de utilización *UR_{EF}* explica los valores bajos del *PR*, ya que cuando se trabaja cerca de la temperatura de consigna el compresor no siempre aprovecha toda la irradiancia incidente. De hecho, el *UR_{EF}* es mayor cuando $T_{int,SP}=18^{\circ}\text{C}$, ya que el sistema está menos tiempo trabajando a bajas potencias que cuando $T_{int,SP}=24^{\circ}\text{C}$ y el generador FV se aprovecha mejor.

La penetración fotovoltaica es similar para los dos ensayos (0,51 y 0,52), a pesar de que con $T_{int,SP}=18^{\circ}\text{C}$ el consumo eléctrico fue muy superior que con $T_{int,SP}=24^{\circ}\text{C}$ (68,08 kWh y 25,92 kWh respectivamente). Esto se explica porque durante el segundo ensayo la irradiación recibida fue menor (56,19 kWh/m² frente a 77,14 kWh/m² del primer ensayo). En condiciones de irradiación similar, se esperaría obtener una penetración fotovoltaica mayor cuanto menor sea el consumo eléctrico, es decir, cuanto mayor sea la temperatura de consigna.

Los valores de *EER* son significativamente menores para el ensayo con la menor temperatura de consigna (2,10 comparado con 3,22 para la mayor $T_{int,SP}$). De hecho, en el segundo caso el valor es similar al indicado por el fabricante (ver Tabla 1). La reducción del *EER* se explica en parte por las distintas potencias de operación del compresor durante los ensayos. Las Fig. 4(a) y (b) muestran los valores de *EER* en función del consumo del compresor (P_{com}) para dos días soleados -5/10/2019 (a) y 7/12/2019 (b)- con dos temperaturas de consigna distintas, 18 °C y 24 °C respectivamente. Se observa que el *EER* es mayor cuanto menor es P_{com} ; en la Fig. 4(a) el compresor trabajó en un rango de potencias más amplio que en la Fig. 4(b), incluyendo valores superiores a los 600 W que contribuyen a reducir el *EER* promedio. Por otra parte, a igualdad de P_{com} , *EER* es mayor cuanto menor es la diferencia entre T_{int} y T_{ext} ; como T_{ext} es constante en estos ensayos, *EER* es mayor cuanto mayor es $T_{int,SP}$ (a igualdad de P_{com}). En ambas figuras es llamativo el número de puntos con *EER* nulo; corresponden a momentos en los que el compresor está encendido ($P_{com}>0$) pero el ventilador de la unidad interior está apagado y, por tanto, no hay intercambio de energía térmica al ambiente ($P_{evap}=0$). Estos puntos son la causa de que el *EER* obtenido sea algo menor que el *SPF*, que está expresado en términos de energía y se ve menos afectado por valores puntuales nulos de potencia térmica. Esta diferencia es de sólo el 6% cuando $T_{int,SP}=18^{\circ}\text{C}$ y algo superior, del 14%, cuando $T_{int,SP}=24^{\circ}\text{C}$.

Finalmente, el indicador de rendimiento del conjunto del sistema, *SPF_{BC-FV,CEM}*, es un 50% superior al *SPF* cuando $T_{int,SP}=18^{\circ}\text{C}$ y un 21% superior cuando $T_{int,SP}=24^{\circ}\text{C}$. La diferencia se explica por el *UR_{EF}*, ya que en el primer caso el generador FV se aprovechó mejor que en el segundo. En valores absolutos, el *SPF_{BC-FV,CEM}* es menor en el primer caso (2,86) que en el segundo (4,28) debido fundamentalmente al menor *SPF*. Sin embargo, conviene comentar que el *SPF_{BC-FV,CEM}* es independiente de las condiciones de operación sólo en la parte concerniente al generador FV (porque se calcula a partir del *PR_{FV,CEM}*), pero no en la concerniente a la BC. Por tanto, a la hora de realizar comparaciones entre distintos ensayos es importante tener este factor en cuenta.

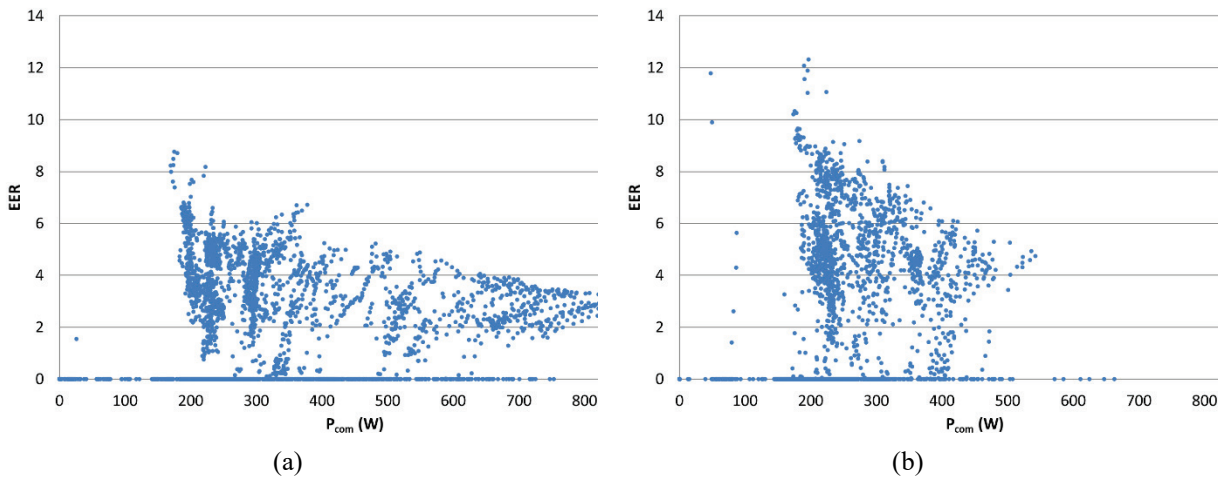


Fig. 4. Valores del Energy Efficiency Ratio (EER) en función del consumo del compresor (P_{com}) para dos días soleados -5/10/2019 (a) y 7/12/2019 (b)- con dos temperaturas de consigna distintas, 18 °C y 24 °C respectivamente.

CONCLUSIONES

A la vista de los resultados presentados, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El algoritmo de control “inverter” ha sido correctamente implementado, consiguiendo regular la frecuencia del compresor en función de las condiciones de temperatura en la sala interior y priorizando el uso del generador FV respecto a la red eléctrica. A pesar de que los ensayos fueron implementados a partir de octubre, cuando la irradiación diaria no es tan alta como en verano, se ha logrado una penetración FV promedio del 56%.
- Los indicadores de rendimiento del sistema muestran un buen comportamiento de sus componentes. El $PR_{FV,CEM} > 0,9$ indica que el generador FV trabajó libre de defectos; el PR bajo se explica por el factor de utilización UR_{EF} , que fundamentalmente depende de la temperatura de consigna (mayores $T_{int,SP}$ implican un menor aprovechamiento de la irradiación incidente). El EER y el SPF muestran valores acordes con lo indicado por el fabricante, menores cuanto mayor sea la potencia de trabajo del compresor (es decir, cuanto menor sea $T_{int,SP}$).
- El $SPF_{BC-FV,CEM}$ presenta un valor absoluto menor para temperaturas de consigna bajas, debido al menor SPF , pero en cambio la mejora respecto a dicho SPF es mayor debido al mejor aprovechamiento del generador FV (mayor UR_{EF}). Este indicador permite evaluar el funcionamiento del sistema en su conjunto, pero hay que tomar la precaución de considerar las distintas condiciones de operación de la BC. El análisis de los distintos parámetros que lo conforman permite identificar cómo mejorar el acoplamiento de la BC y del generador FV.

A la vista de las especificidades de la solución técnica aquí implementada, conviene realizar ensayos bajo condiciones de operación más variadas, tanto para el generador FV como para la BC, de forma que se puedan generalizar las conclusiones aquí mostradas. Una base de datos amplia sobre BC-FV permitiría establecer una referencia de calidad utilizando el $SPF_{BC-FV,CEM}$ y los parámetros que lo conforman.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el programa de investigación e innovación del Horizonte2020 de la Unión Europea a través del proyecto Fostering a Next GeneRation of European Photovoltaic SoCiety (GRECO), bajo el acuerdo de concesión nº 787289. Este trabajo es parte de proyecto MADRID-PV2 (P2018/EMT-4308), financiado por la Comunidad de Madrid con el apoyo de FEDER. El diseño y la instalación del prototipo para la realización de los ensayos experimentales aquí descritos ha sido posible gracias a la colaboración con la compañía Energeo S.L.

REFERENCIAS

- Dierauf A. G. T., Kurtz S., Becerra J.L., Riley E., Hansen C. (2013). Weather-Corrected Performance Ratio. *National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-5200-57991*. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57991.pdf>
- European Heat Pump Association. (2019). The European Heat Pump Market and Statistics Report 2019 - Executive Summary.
- European Heat Pump Association. EHPA Online Stats Tool. http://www.stats.chpa.org/hp_sales/story_sales (consultado 07/01/2020).
- European Commission. 2030 climate & energy framework. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en (consultado 07/01/2020).
- Jahn U. G., Nasse W. (2000). Analysis of Photovoltaic Systems. Paris (France), 2000.
- Reich N., Müller B., Armbruster A., van Sark W., Kiefer K., and Reise C. (2012). Performance ratio revisited: is PR > 90% realistic? *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, vol. 20, pp. 717-726, doi: 10.1002/pip.1219.
- Lorenzo C. and Narvarte L. (2019). Performance indicators of photovoltaic heat-pumps. *Heliyon*, vol. 5, no. 10, p. e02691, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02691.
- Purohit I. and Purohit P. (2018). Performance assessment of grid-interactive solar photovoltaic projects under India's national solar mission. *Applied Energy*, vol. 222, pp. 25-41, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.135.