

# Refrigeración solar fotovoltaica con suelo radiante: resultados experimentales y reducción de emisiones.

M. Izquierdo<sup>1</sup> y M.T. Cuervo-Vilches<sup>2</sup>

- 1 Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC). C/ Serrano Galvache, 4. 28033, Madrid, España. [mizquierdo@ietcc.csic.es](mailto:mizquierdo@ietcc.csic.es). Universidad Carlos III de Madrid, Avenida de la Universidad, 30, 28911, Leganés, Madrid, España.
- 2 Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC). C/ Serrano Galvache, 4. 28033; Madrid, España

## Resumen:

El programa Horizonte 2020 establece que al menos el 20% de la energía consumida por los edificios provenga de fuentes renovables. La industria solar fotovoltaica ofrece un gran potencial para su uso directo en la climatización de los edificios. El objetivo de este trabajo es divulgar los resultados experimentales obtenidos con un generador fotovoltaico conectado a una bomba de calor aire-agua de 5kW. Las características principales del edificio piloto son: área total de 35 m<sup>2</sup> y  $U_A = 150$  W/K. El generador fotovoltaico, constituido por 16 módulos con rendimiento nominal del 15%, genera electricidad (CC) que se transporta hasta el regulador desde el que se suministra a un sistema de almacenamiento de 250 Ah. para alimentar al inversor, donde una vez transformada en CA, se suministra a la bomba de calor. El conjunto configura un sistema fotovoltaico-térmico en micro red. Se presentan los resultados experimentales del verano de 2013, así como los correspondientes a dos días claros de 2012: 28 de Agosto y 6 de Septiembre. Algunos de los parámetros monitorizados fueron: temperatura exterior de bulbo seco entre 9°C y 39,5°C; energía solar interceptada, entre 91,2 kWh/día y 145,2 kWh/día; rendimiento diario del generador fotovoltaico, variable entre el 5% y el 10% y producción frigorífica variable entre 15 kWh/día y 28,4 kWh/día. El Coeficiente de Eficiencia Energética (CEE) de los días seleccionados fue 2,8 y 3,3, respectivamente, mientras que el CEE estacional fue 3,1. Finalmente se evalúa la emisión de dióxido de carbono equivalente (PEID) y la reducción del PEII.

**Palabras clave:** solar fotovoltaica, refrigeración solar, micro red, reducción de emisiones.

## 1. INTRODUCCIÓN

Entre las actuales políticas y planes estratégicos surgidos a raíz de la crisis energética en la Unión Europea, destaca especialmente el denominado Horizonte 2020, que supone un apoyo decisivo para la transición energética en sectores como la Edificación. Parte de estos objetivos establecen para 2030 alcanzar hasta un 40% en la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), así como un consumo de al menos el 35% de la energía, procedente de fuentes renovables (UE, 2018).

Ante los grandes cambios que se avecinan en el entorno energético mundial, el impulso de las energías renovables se presenta como una de las herramientas de la política energética a desarrollar por los gobiernos. En concreto, la energía solar fotovoltaica ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años.

La energía solar fotovoltaica constituye actualmente una industria de gran potencial, en constante expansión a nivel mundial (Gonçalves y Orestes, 2017), ya que presenta importantes ventajas, entre las que se encuentran la fiabilidad del sistema y el bajo coste de operación y mantenimiento, siendo un tipo de energía limpia, distribuida, y con generación en periodos de máxima demanda.

Según los datos publicados por el EPIA (*European Photovoltaic Industry Association*) en su informe “Global Market Outlook for Photovoltaics” para sendos periodos 2014-2018 y 2017-2021, a finales de 2010 la potencia fotovoltaica mundial instalada era de 40,3 GW. Un año después se alcanzaban los 70,5 GW, mientras que en 2012 se llegaron a sobrepasar 100 GW. A finales del 2013 la potencia instalada en todo el mundo alcanzó 138,9 GW, superando los 200 GW en 2015, y los 300 GW en 2016. En la figura 1 se puede ver la evolución del precio del módulo.

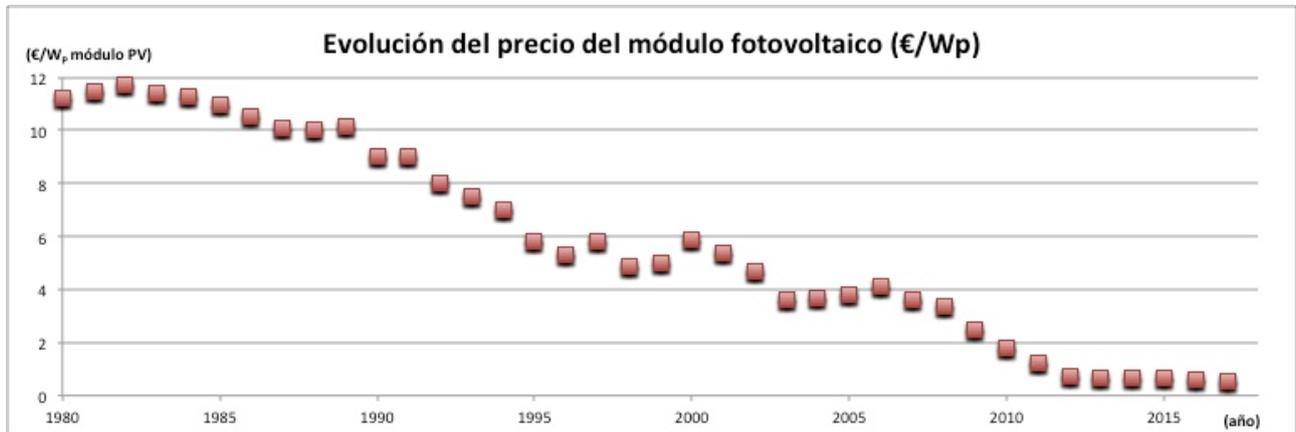


Figura 1. Evolución del precio del módulo fotovoltaico (€/WP).  
Fuente: Observatorio Crítico de la Energía.

El crecimiento de la tecnología fotovoltaica se debe al fomento de algunos países que han propiciado un gran aumento de la capacidad de fabricación, distribución e instalación de estos sistemas. Aunque uno de los principales problemas de esta tecnología sigue siendo el coste de producción de las células solares, el precio medio del módulo fotovoltaico ha descendido de manera muy significativa en los últimos años, lo que ha permitido aumentar su rentabilidad. En la figura 1 se puede apreciar esta caída del precio. En ella se observa un descenso del precio medio desde más de 2 €/WP en 2009 hasta alrededor de 0,3 €/WP en 2017.

Por otro lado, a medida que el coste de los módulos fotovoltaicos ha ido disminuyendo, el rendimiento de los mismos ha ido creciendo, (de Agustín-Camacho, 2015), fomentando actividades como el autoconsumo y el balance neto, que están regulados. En el caso de que el proceso implique la transferencia de electricidad a la red, las medidas actuales proponen que el consumidor pague el coste y la gestión asociados al uso del sistema eléctrico.

Los autores de este trabajo desarrollan su actividad en la Planta Experimental de Energía Solar del IETCC en La Poveda, Arganda del Rey, Madrid. Los resultados que se presentan fueron obtenidos entre los años 2012 y 2013 a través del Proyecto de Investigación: Diseño, construcción y evaluación experimental de un sistema de refrigeración solar y trigeneración de alta eficiencia para edificios e invernaderos (ENE2010-20650-CO2-01), que tuvo como objetivos:

- a) Sustituir los refrigerantes fluorados utilizados en los sistemas de climatización convencional de pequeña potencia (3kW-15kW) por máquinas de refrigeración por absorción de bromuro de litio aire-agua y aire-aire.
- b) Comparar desde el punto de vista energético los sistemas de absorción alimentados por calor solar (conversión térmica), con los sistemas de compresión mecánica de vapor activados por electricidad fotovoltaica, (Izquierdo y De Agustín-Camacho, 2015).

El trabajo que se presenta está relacionado con la actividad fotovoltaica. Se trata de un sistema diseñado para generar la demanda de frío, (Izquierdo et al., 2013), o de calor, (Izquierdo et al., 2014), con destino a la climatización de un edificio prototipo con un área total de 35 m<sup>2</sup> (40% de la vivienda media española). El diseño busca el funcionamiento autónomo mientras exista producción de electricidad fotovoltaica, sin exportar a la red, como una micro-red alimentando a un solo edificio. En el caso de que la instalación no fuera capaz de generar el total de la demanda de frío o de calor, se desconecta el sistema fotovoltaico y se conecta la máquina frigorífica a la red.

A continuación, se exponen los detalles de la instalación y se incluyen algunos resultados experimentales obtenidos durante el verano de 2012, así como los obtenidos durante el verano de 2013. Por último, se hará una breve descripción de la evaluación de impacto ambiental del sistema fotovoltaico-máquina frigorífica.

## 2. EL SISTEMA

El sistema está compuesto por el edificio piloto a climatizar, el campo fotovoltaico con sistema de almacenamiento mediante baterías, la estación meteorológica, la bomba de calor convencional y el suelo radiante.

### 2.1. El edificio.

El edificio es un laboratorio que se usa como prototipo para el estudio de sistemas de calefacción/refrigeración alimentados con electricidad fotovoltaica como principal fuente de energía.



Figura 2. Campo fotovoltaico y edificio piloto.

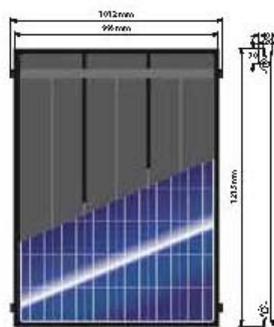
Tiene una superficie de 35 m<sup>2</sup>, y se divide en dos estancias: una de ellas aloja el sistema de almacenamiento, el inversor, el controlador de carga para seguimiento del punto de potencia máximo (MPPT), y el sistema de medida y control. La otra estancia, utilizada como despacho, estuvo ocupada durante el estudio por tres personas. Se construyó de acuerdo a los parámetros establecidos por la normativa nacional, el Código Técnico de la Edificación (CTE), en su versión de 2013, con una transmitancia térmica en régimen estacionario  $UA = 150 \text{ W/K}$ , y una demanda térmica máxima, también en régimen estacionario, de 3,5 kW, que puede llegar a alcanzar 5 kW al comienzo del proceso de refrigeración, cuando la inercia térmica del edificio es más importante.

### 2.2. El campo fotovoltaico.

El campo está compuesto por 16 módulos, con una superficie útil de 16 m<sup>2</sup> y área total de 21 m<sup>2</sup>.



Module Properties	
Maximum system voltage	1000 V
Output tolerance	-0/+3 %
Cell size	156 x 156 mm
Number of cells and type	48, polycrystalline, 8x6
NOCT (Nominal operating cell temperature)	48 °C ± 2 °C
Temperature coefficient Isc	+ 0.04 % / °C
Temperature coefficient Uoc	- 0.35 % / °C
Temperature coefficient Pmax	- 0.5 % / °C
External dimensions L x W x H	1315 x 1012 (996) x 20 mm
Weight	37 kg
Glass thickness	3.2 mm
Permissible module load	5400 Pa
Connection system	MC4
Product warranty	2 years
Performance warranty, electrical	90/80% - 10/25 years
Protection class	II
TÜV / Keymark / ANSI / UL	IEC 61215 / IEC 61730 / 1708



Thermal Properties	
Receptive surface	1.1 m²
Connections	DN18
Liquid capacity	5 l
Operating pressure	max 1.5 bar
Test pressure	max 3.0 bar
Flow rate	30 - 100 l/h and module
Delta T	approx. 5 K bei STB
Operating temperature	approx. 10 °C bis 60 °C
Idle temperature	approx. 35 °C above standard outdoor temperature
Thermal efficiency eta 0	approx. 55%
Collector energy output	approx. 550 W/m²

			PVT170P	PVT175P	PVT180P	PVT185P
Peak power	$P_{max}(STC)$	$W_p$	170	175	180	185
MPP voltage	$U_{MPP}$	V	23.3	23.6	23.8	24.0
MPP current	$I_{MPP}$	A	7.30	7.42	7.58	7.71
Short circuit current	$I_{sc}$	A	8.05	8.21	8.32	8.49
Open circuit voltage	$U_{oc}$	V	27.88	28.82	28.56	28.8
Cell efficiency		%	14.65	15.00	15.41	15.83
Module efficiency		%	12.87	13.35	13.73	14.11

Figura 3. Características del módulo fotovoltaico.

Cada módulo está compuesto por 48 células de silicio policristalino de 0,156 x 0,156 m, con una potencia pico nominal de 180 W bajo condiciones de *test* estándar, y potencia nominal total 2,88 kW. El ángulo de inclinación de los módulos medido desde la horizontal es de 40°. Estos paneles están conectados entre ellos de forma que el conjunto puede generar una corriente continua (CC) con una salida de 48 V de diferencia de potencial. Esta electricidad se dirige desde el regulador MPPT a dos baterías de 250 Ah. El regulador MPPT controla la operación del campo fotovoltaico suministrando la electricidad al sistema de almacenamiento. El inversor, con una salida máxima de 3,0 kW, convierte la CC en Corriente Alterna (CA), que es suministrada a la bomba de calor.

### 2.3. La estación meteorológica: variables ambientales.

La estación meteorológica mide las temperaturas exteriores de bulbo seco y de bulbo húmedo, la humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, etc., cada ocho segundos, y registra los valores medios cada 10 minutos. Estos valores se usan en cálculos experimentales y en modelos teóricos. En este caso las variables meteorológicas representativas del proceso estudiado fueron: la temperatura exterior de bulbo seco y la radiación solar sobre el campo fotovoltaico.

## 2.4. La bomba de calor.

Es una enfriadora de agua de compresión mecánica de vapor, reversible, condensada por aire, con capacidad de frío-calor, 5-6 kW. Utiliza el refrigerante R410A, que tiene un Potencial de Efecto Invernadero Directo (PEID), en un horizonte temporal de 20 años, de 4.200 kg equivalentes de CO<sub>2</sub>. Esta bomba de calor, utiliza como refrigerante secundario el agua, constituyendo un sistema indirecto.



Figura 4. Bomba de calor reversible aire-agua.

En ambas aplicaciones, el refrigerante secundario, circula en bucle cerrado bajo el suelo radiante. En verano, transporta el calor desde las estancias hasta evaporador de la máquina frigorífica, situada en el exterior, figura 4, donde se produce el intercambio con el aire exterior, a través del condensador. El condensador transfiere el calor generado en el edificio más la electricidad suministrada al compresor y a los equipos auxiliares hasta el aire exterior.

## 2.5. El suelo radiante para frío/calor.

El suelo radiante tiene un área útil de 28 m<sup>2</sup> ( $U=7,5$  W/m<sup>2</sup>K), y es alimentado por dos circuitos, para suministrar calor o frío a cada una de las estancias del edificio. En la figura 5 se muestra el detalle. Comprende una placa de poliestireno expandido de baja conductividad térmica que aísla el suelo radiante del suelo exterior. Sobre esta capa existe otra de plástico flexible en la cual se distribuye un número de espaciadores con el fin de facilitar la instalación de las tuberías. La instalación se cubre por una capa adicional de poliestireno de alto impacto.

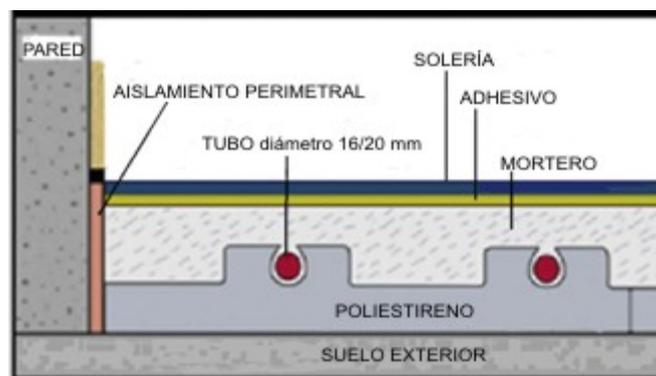


Figura 5. Esquema de suelo radiante.

La tubería de distribución del fluido térmico es de polietileno de alta densidad (HDPE) con un diámetro externo/interno de 0,020/0,016 m respectivamente. A fin de optimizar la eficiencia de la bomba de calor, y para obtener el coeficiente óptimo de transferencia de calor, los tubos fueron separados 0,15 m, de acuerdo a la normativa UNE-EN 1264. El sistema radiante completo se cubre por una capa de mortero de 0,05 m de espesor y una solería de 0,02 m instalada sobre una capa gruesa

de adhesivo que la une con el mortero. Finalmente, para aislar la base, una capa de aislamiento de 0,02 m de espesor se localiza en todo el perímetro. La unión entre la capa perimetral de aislamiento y la base, se hace con una junta elástica. El suelo radiante también actúa como un subsistema de almacenamiento diario de frío o de calor.

### 2.6. Diagrama simplificado del sistema de refrigeración

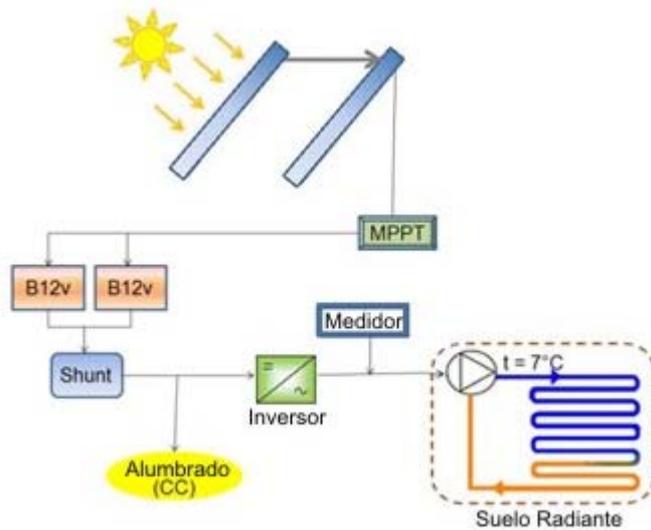


Figura 6. El sistema.

En este trabajo no se contempla la producción de electricidad fotovoltaica para alumbrado o electrodomésticos.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE DOS DÍAS CARACTERÍSTICOS

En la figura 7 se muestra la radiación solar interceptada por el campo de módulos durante dos días del verano de 2012.

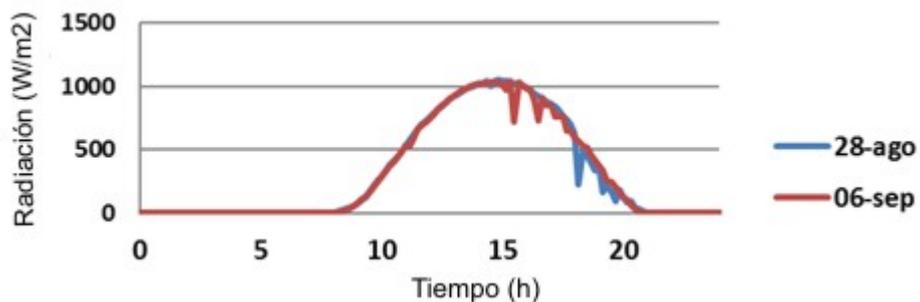


Figura 7. Radiación solar interceptada por el campo de módulos

Y en la figura 8 se representa la distribución de temperaturas.

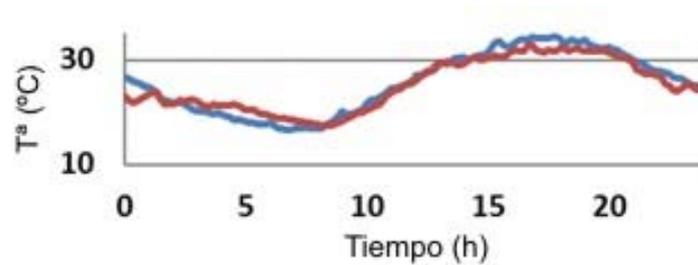


Figura 8. Temperatura exterior de bulbo seco.

### Resultados experimentales del 28 de Agosto

En la figura 9 se representa la producción de electricidad que inicia el campo fotovoltaico, y su almacenamiento en torno a las 07:30 horas. El régimen de generación es bajo y la diferencia de potencial alcanza su valor mínimo de 23,5 V en torno a las 9:30 horas. La potencia generada aumenta rápidamente hasta alcanzar el valor máximo de 1.700 W entre las 11:30 y 12:30 horas, aproximadamente. La diferencia de potencial en las baterías, que era de 23,5 V en torno a las 9:30 horas, aumenta rápidamente y permanece constante en 28 V desde las 12:30 hasta las 18:00 horas. Durante este tiempo, en que las baterías permanecen cargadas, éstas no admiten la máxima potencia de generación (1.700 W) y la absorción de electricidad en las baterías se va reduciendo, acoplándose a la electricidad suministrada al inversor, que se reduce hasta 1.100 W a las 14:00 horas, permaneciendo constante en este valor hasta las 18:00 horas. A partir de este instante, la radiación solar disminuye, y la producción de electricidad cae paulatinamente hasta llegar a 0 W en torno a las 20:30 horas. El voltaje disminuye hasta 24 V, y cuando el sistema deja de suministrar electricidad al inversor, se mantiene por debajo de 25 V, (Izquierdo et al., 2013).

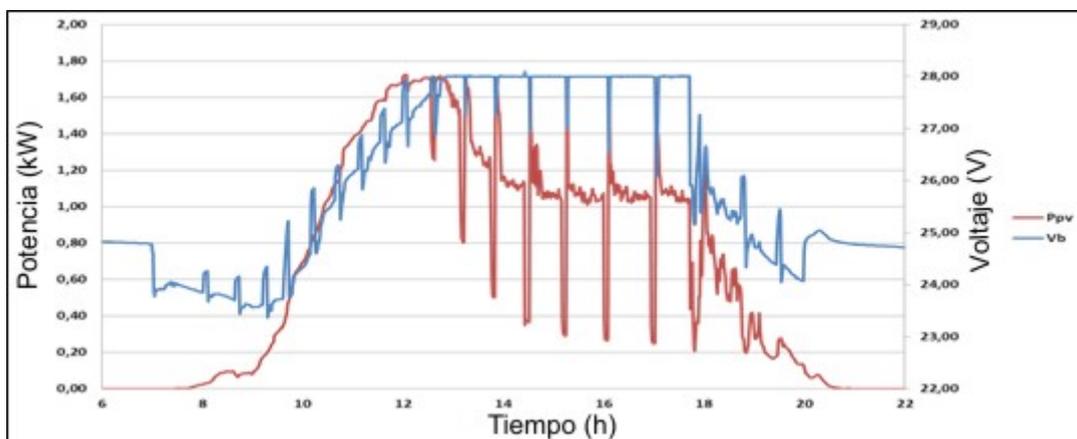


Figura 9. Energía eléctrica generada y voltaje (28/08/2012).

En la figura 10 se muestra la electricidad (CA) suministrada a la máquina frigorífica y la potencia frigorífica producida. A las 7:30 horas la potencia suministrada a la bomba de calor es 800 W, aproximadamente, mientras que a las 9:30 la potencia disminuye hasta unos 400 W, agotando la electricidad almacenada. Esto es debido a que hasta esta hora la electricidad generada por el campo fotovoltaico es nula y la suministrada a la bomba de calor procede de la almacenada en las baterías durante el día anterior.

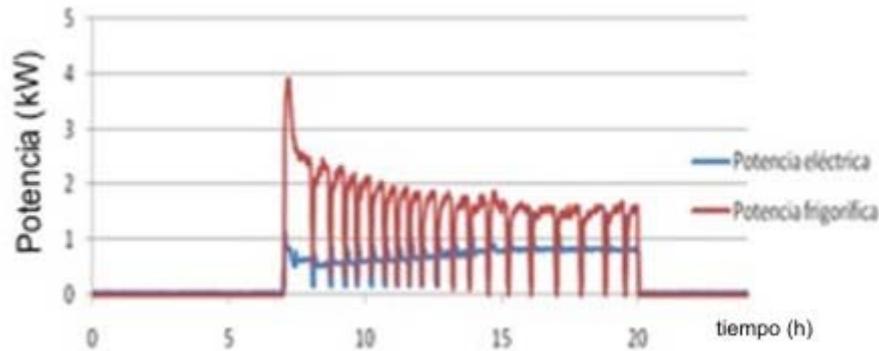


Figura 10. Potencia absorbida por la bomba de calor y potencia frigorífica.

A partir de las 10:00 horas, figura 9, el proceso cambia: la electricidad generada es mayor que la suministrada a la bomba de calor y empieza el proceso de carga de las baterías, que se mantiene hasta las 13:30 horas cuando alcanzan su valor máximo, mientras que simultáneamente suministran la electricidad que demanda la bomba de calor, figura 10. La diferencia de potencial alcanza su valor máximo, 28 V.

En el instante del arranque, la bomba de calor absorbe 1.200 W produciendo unos 3.900 W de potencia frigorífica, figura 10. Durante el intervalo 07:00-08:00 horas la potencia absorbida disminuye hasta 500 W y la potencia frigorífica hasta 2.400 W. El comportamiento del sistema durante este periodo está controlado por la inercia térmica del suelo radiante y del edificio, que entre las 20:00 y 07:00 horas del día anterior estuvo expuesto a la correspondiente radiación solar y a una temperatura nocturna superior.

Entre las 08:00 y las 15:00 horas la potencia absorbida aumenta paulatinamente hasta alcanzar el valor máximo de 800 W, valor que se mantiene hasta las 20 horas. La potencia frigorífica disminuye desde 2.400 W hasta 1.500 W.

El comportamiento de la eficiencia energética (CEE) se presenta en la figura 11. En el momento del arranque, cuando el suelo radiante se encuentra caliente, la transferencia de calor y la eficiencia son máximas, obteniendo un  $CEE=5$  a las 07:30 horas aproximadamente. A partir de este instante, el CEE disminuye hasta alcanzar un valor  $CEE = 2$  entre las 14:00 y las 20:00 horas.

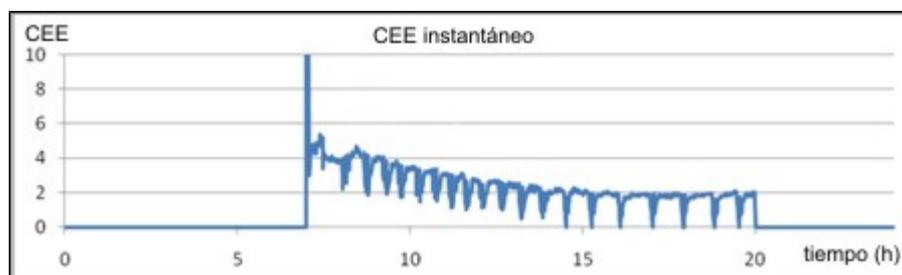


Figura 11. Coeficiente de Eficiencia Energética (CEE).

El resultado de estos procesos se puede apreciar en la figura 12, donde se representa la variación de la temperatura interior. A las 07:00 horas su valor es 26°C, que disminuye hasta 25,5°C a las 08:30

horas, cuando se inicia el horario laboral. Entre las 08:30 y las 10:00 horas la temperatura disminuye hasta 23°C, (Izquierdo et al., 2013).

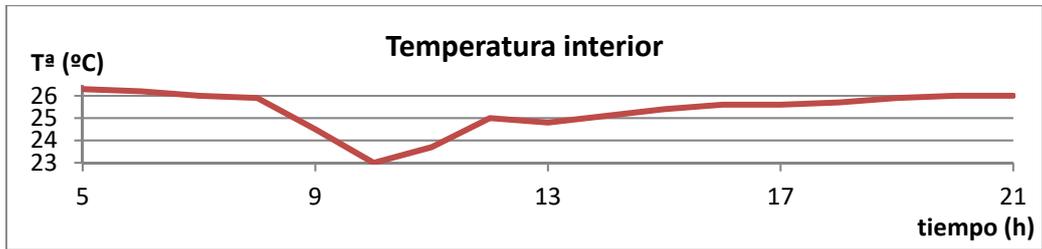


Figura 12. Temperatura interior.

Esto es debido a las siguientes causas: por un lado, las baterías están suministrando electricidad a la bomba de calor para producir agua fría a 7°C, que circula por el suelo radiante, enfriándolo y como consecuencia, al edificio; por otra parte, la primera operación del personal cuando llega a su lugar de trabajo es abrir las ventanas para ventilar, de forma que los vapores emitidos por las baterías y los acumulados durante la noche sean expulsados al exterior. Como consecuencia de esta operación higiénica entra aire del exterior, que según la figura 8, a esa hora se encuentra a 17,5°C, colaborando a enfriar el edificio (*free cooling*) hasta 25,5°C-26°C. Finalizada la operación de ventilación, una vez cerradas las ventanas, la temperatura desciende hasta 23°C en torno a las 10 horas, aproximadamente, cuando la temperatura exterior es 20°C. Desde esta hora la temperatura interior aumenta hasta 25,3 °C a las 12 horas (temperatura exterior 26°C). A las 17:00 horas la temperatura exterior es 34°C y la temperatura interior unos 25,5°C, alcanzando 26°C a las 20:00 horas, cuando la temperatura exterior era 32°C, aproximadamente. Desde las 7:00 hasta las 20 horas la temperatura se mantiene en torno o por debajo de 25°C cumpliendo la normativa legal, (Izquierdo, 2016).

### Resultados experimentales del día 6 de Septiembre.

En las figuras 13 a 16, se representa el comportamiento del sistema. Se trata de un experimento de comprobación.

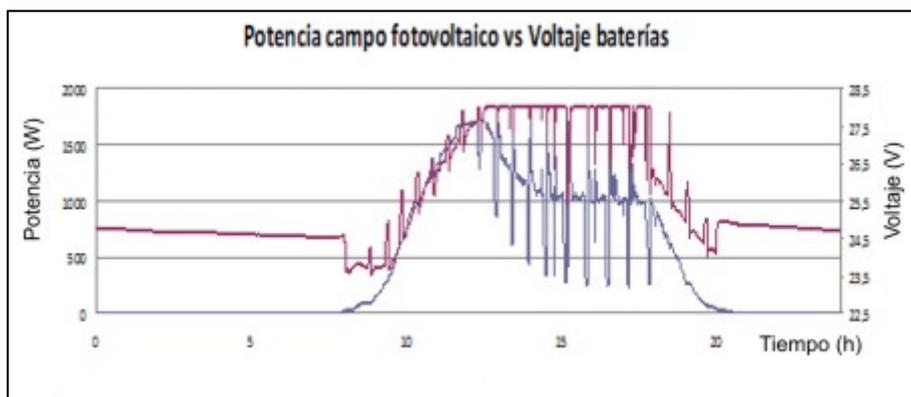


Figura 13. Energía eléctrica generada y voltaje (6/09/2012).

La potencia generada y la diferencia de potencial en las baterías siguen el mismo comportamiento que durante el día anterior. En la figura 14 se observa que la potencia frigorífica alcanza un valor máximo de 4.000 W en el arranque, disminuyendo hasta 1.750 W al finalizar la operación a las 20 horas. La potencia eléctrica absorbida (CA) por la máquina frigorífica arranca en 1.000 W para

disminuir rápidamente hasta 500 W como consecuencia del agotamiento de las baterías. A continuación, va aumentando hasta unos 800 W, al final del experimento.

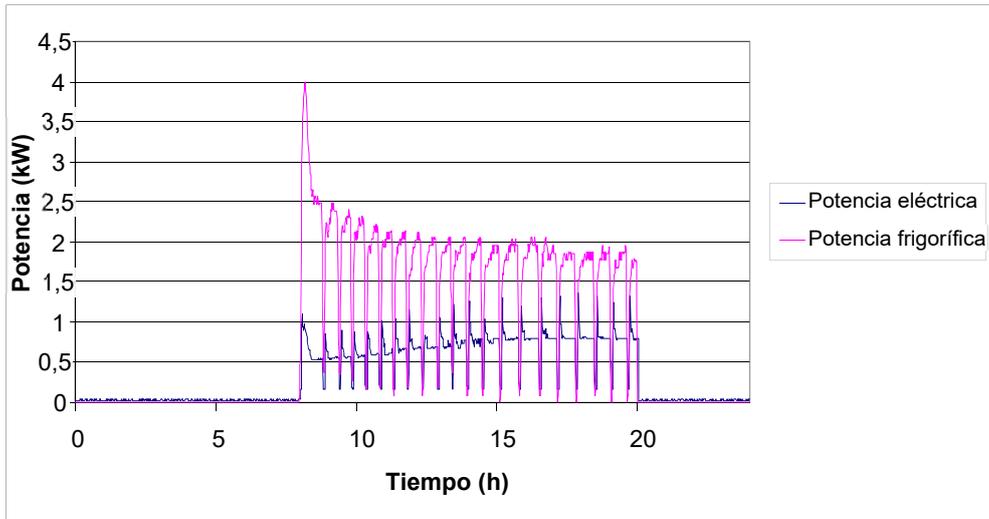


Figura 14. Potencia suministrada y potencia frigorífica (6/9/2012).

La eficiencia energética con la que trabaja la bomba de calor se puede ver en la figura 15: en el arranque es CEE = 4 y en la parada, CEE = 2,2 aproximadamente.

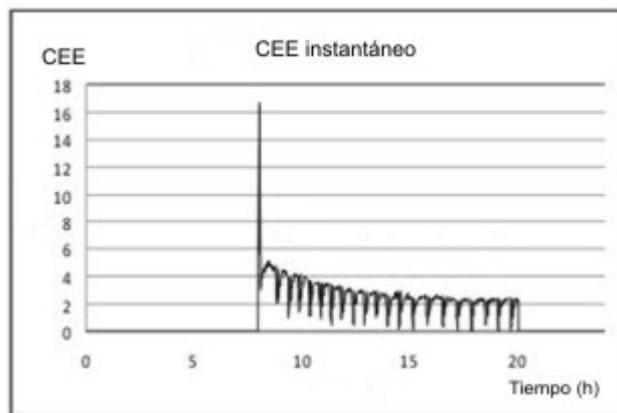


Figura 15. Coeficiente de Eficiencia Energética (CEE, COP).

En la figura 16 quedan representadas la temperatura exterior y la temperatura interior.

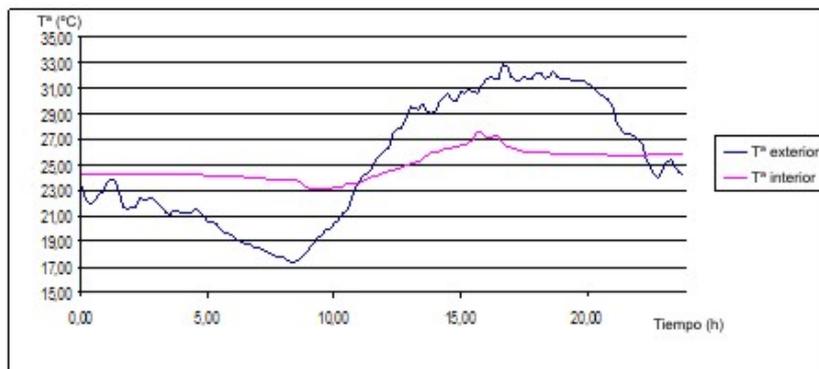


Figura 16. Temperatura exterior e interior.

A las 10:00 la temperatura exterior es 21°C y la interior 23°C. La exterior aumenta hasta 30°C a las 15 horas manteniéndose la interior en unos 26,5°C. A las 16:00 horas la exterior alcanza 33°C y la interior unos 27°C. A continuación, la temperatura interior descende como consecuencia de terminar el horario laboral y el declinar de la temperatura exterior.

## 5. RESULTADOS DEL VERANO DE 2013

En la figura 17 se muestra la distribución de la temperatura exterior de bulbo seco máxima y mínima, durante el verano de 2013. La máxima, 39,5°C se alcanzó el 2 de Agosto.

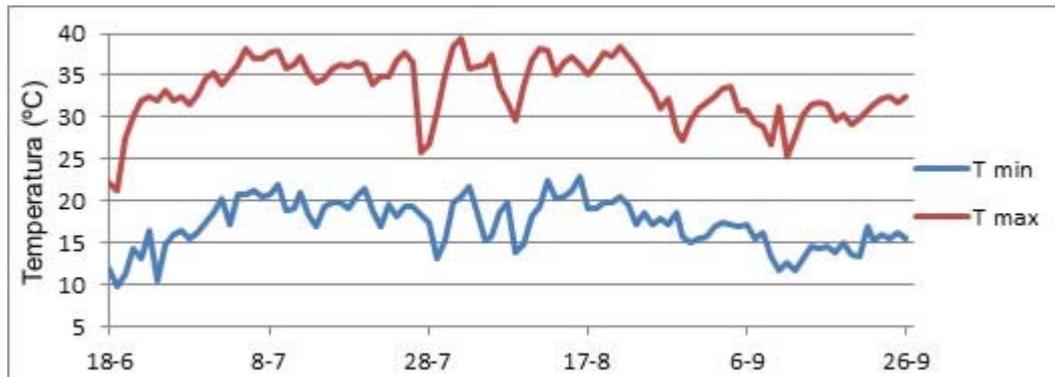


Figura 17. Variación de las temperaturas máxima y mínima (verano 2013).

A continuación, se representan, en la figura 18, la energía solar interceptada por el campo fotovoltaico y la electricidad producida, y en la figura 19 el rendimiento del campo fotovoltaico, de acuerdo con Izquierdo (Izquierdo, 2016).

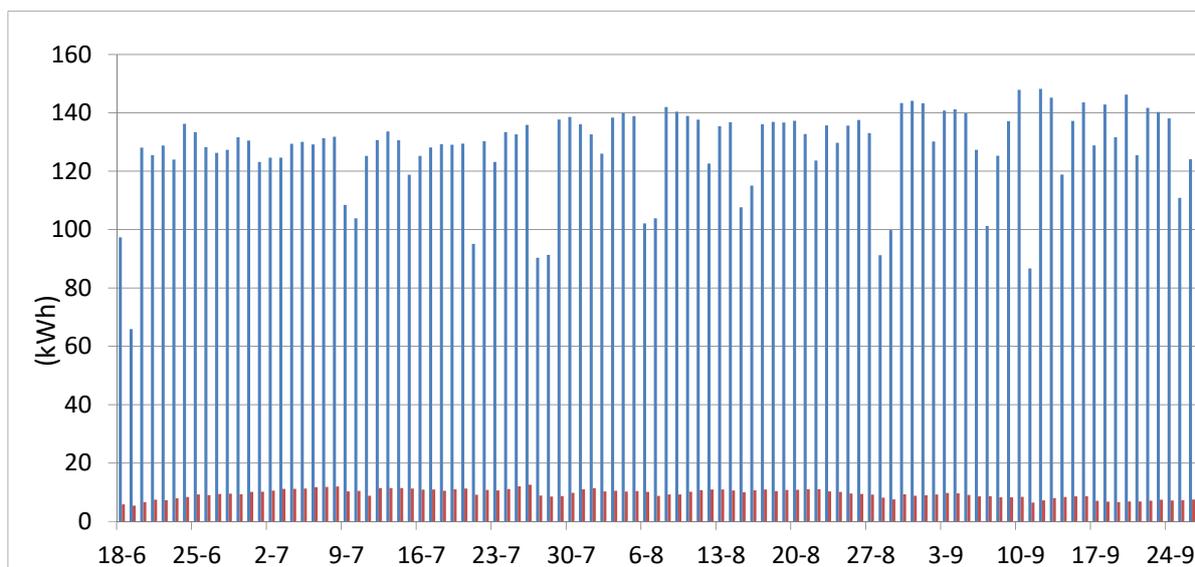


Figura 18. Energía solar diaria interceptada y electricidad (CC) generada.

La energía solar interceptada, presentada como ejemplos, fue: 128,2 kWh el 26 de Junio; 103,8 kWh el 10 de Julio; 133,6 el 13 de Julio; 122,6 el 12 de Agosto; 123,6 el 22 de Agosto; 91,2 el 28 de Agosto; 130,1 el 2 de Septiembre; 145,2 el 13 de septiembre y 124 kWh el 26 de Septiembre.

La energía eléctrica generada en forma de corriente continua durante estos días, fue variable: arranca en 5,3 kWh el día 18/6, aumenta hasta 7,9 kWh el día 26 de Junio; 10,4 kWh el 10 de Julio; 11,4 kWh el 13 de Julio; 12,5 kWh el 26 de Julio; 10,9 el 12 de Agosto; 11 kWh el 22 de Agosto; 8,1 el 28 de Agosto; 9 el 2 de Septiembre; 7,9 el 13 de Septiembre; 7,4 kWh el 26 de Septiembre cuando finalizó el experimento.

Por lo tanto, el rendimiento diario de la conversión a CC, será:  $7,9/128,2 = 6,16\%$  el día 26/6;  $10,4/103,8 = 10,0\%$  el 10 de Julio;  $11,4/133,6 = 8,5\%$  el 13 de Julio;  $12,5/135,8 = 9,2\%$  el 26 de Julio;  $10,9/122,6 = 8,9\%$  el 12 de Agosto;  $11/123,6 = 8,9\%$  el 22 de Agosto;  $8,1/91,2 = 8,9\%$  el 28 de Agosto;  $9/130,1 = 6,9\%$  el 2 de Septiembre;  $7,9/145,2 = 5,4\%$  el 13 de Septiembre y  $7,4/124 = 6\%$  el 26 de Septiembre. Estos resultados, para todo el verano, quedan reflejados en la figura 19.

Como se puede observar, el rendimiento aumenta desde mediados de Junio, y su valor medio se mantiene prácticamente constante desde primeros de Julio hasta mediados de Agosto, alcanzando el valor máximo en torno al 10% los días 10 de Julio y 8 de Agosto. A partir de mediados de Agosto, el rendimiento tiende a disminuir lentamente, alcanzando un valor mínimo en torno al 5% desde mediados de Septiembre hasta finales del mes, 26/09, (Izquierdo, 2016).

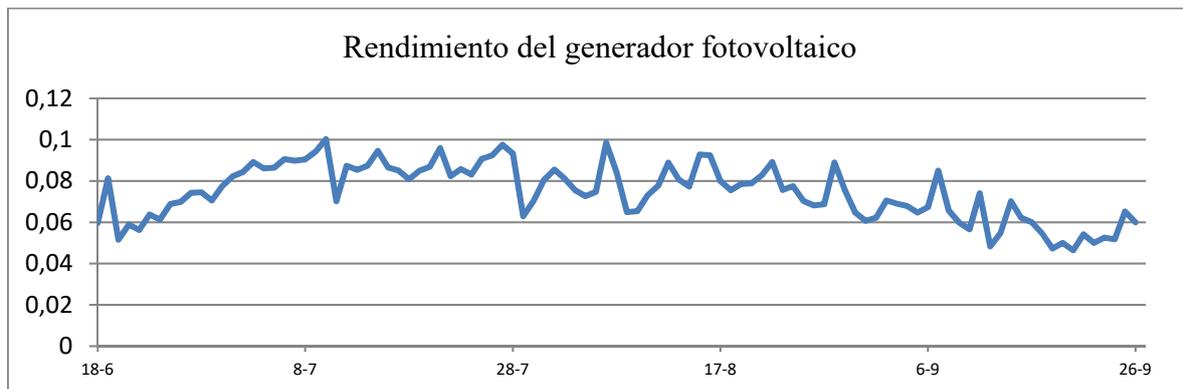


Figura 19. Rendimiento diario del campo fotovoltaico.

Este comportamiento puede tener la siguiente explicación: según muestra la figura 17, tanto la temperatura máxima como la mínima aumentan desde mediados de Junio hasta principio de Julio, y se mantienen en valores altos hasta mediados de Agosto, para descender lentamente hasta últimos de Septiembre. Esta variación de la temperatura exterior de bulbo seco tiene las siguientes consecuencias:

a) Reducción del rendimiento de la célula como consecuencia del incremento de la temperatura exterior, que permite a la célula alcanzar hasta  $70^{\circ}\text{C}$ , (de Agustín-Camacho, 2015). En otras palabras, durante cierto tiempo, antes y después del mediodía, la célula trabaja  $45^{\circ}\text{C}$  por encima de la temperatura estándar ( $25^{\circ}\text{C}$ ) de Normalización. Como el módulo está compuesto por 48 células, si se admite que la temperatura media diaria de la célula, de acuerdo con P. de Agustín-Camacho (de Agustín-Camacho, 2015), es  $50^{\circ}\text{C}$ , y que la reducción del rendimiento por célula es 0,4% (ver características del módulo, figura 3), la pérdida de rendimiento será  $(0,4 \times 25 \times 48)$  del 4,8% del rendimiento nominal, o sea  $4,8 \times 13,73/100 = 0,72\%$  diario. Así, el rendimiento real para este concepto será (ver el rendimiento del módulo),  $13,73 - 0,66 = 13,07\%$ . Además, habrá que descontar las pérdidas por transporte de la electricidad, las pérdidas en el controlador, en el sistema de almacenamiento (baterías) y en el inversor (Izquierdo, 2016).

b) La variación de la demanda de refrigeración del edificio, que de acuerdo con la figura 17 aumenta desde mediados de Junio hasta primeros de Julio como consecuencia del aumento de la temperatura exterior; se mantiene prácticamente constante hasta mediados de Agosto, y disminuye de forma continua hasta finales de septiembre.

c) Mientras esto ocurre con la demanda, la producción eléctrica también experimenta una variación, como se puede ver en la figura 18, como consecuencia de la variación del ángulo de incidencia y de la duración del día: desde primeros de Junio hasta primeros de Julio aumenta, se mantiene prácticamente constante hasta mediados de Agosto, y después disminuye lentamente hasta finales de Septiembre. Sin embargo, la demanda disminuye más rápidamente, ya que está sometida al efecto de la duración del día y por consiguiente el soleamiento del edificio es menor, y por otra parte la disminución de la temperatura máxima (con un valor medio de 30°C) sugiere que la carga térmica es menor y por tanto la demanda disminuye.

Si el efecto de la disminución de la demanda es superior al efecto de la disminución de la generación eléctrica del campo de módulos, es posible que parte de la electricidad producida no sea necesaria para generar frío y se mantiene más tiempo cargado el sistema de almacenamiento. En este caso el campo de módulos no genera electricidad porque no la admite el almacenamiento y parte de la radiación solar se convierte en calor en el módulo (Izquierdo, 2016).

La suma de los efectos a) y b) tiene como consecuencia el aumento del rendimiento desde Junio hasta mediados de Julio, cuando alcanza un máximo que también se mantiene hasta mediados de Agosto, disminuyendo a continuación hasta el 26 de Septiembre, figura 19.

### Producción de frío y eficiencia energética

En la figura 20 se representan la electricidad absorbida por el motor que acciona el compresor de la máquina frigorífica y también la absorbida por el motor de la bomba de recirculación del refrigerante secundario; el ventilador y el sistema de control.

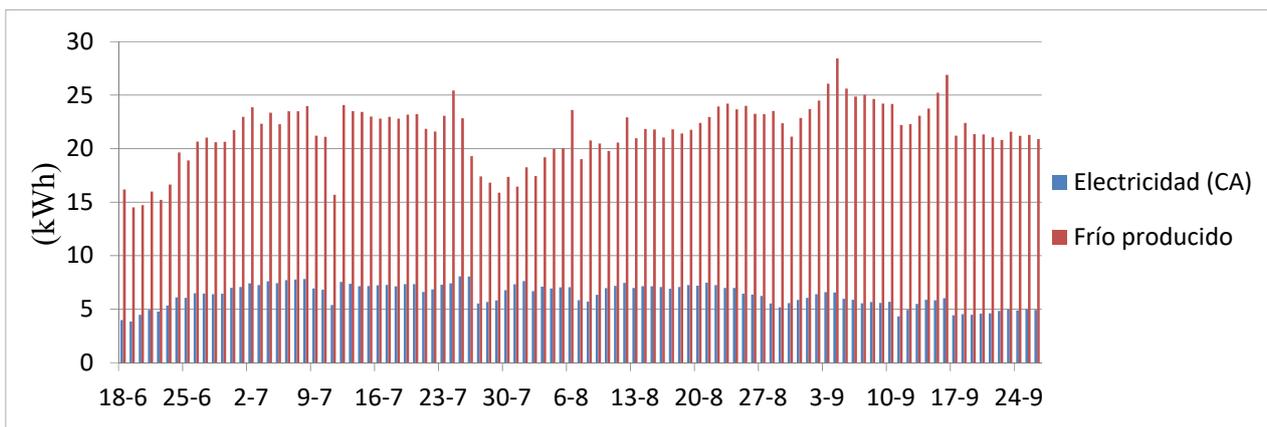


Figura 20. Electricidad diaria suministrada a la máquina frigorífica y frío producido.

El día 18 de Junio la electricidad absorbida fue 4,0 kWh y el frío producido 16,2 kWh, siendo el CEE 4,0; la electricidad absorbida aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor de 7,1 kWh produciendo 23,0 kWh el 1 de Julio, siendo el CEE = 3,28. Como se puede observar, la electricidad generada este día fue 10,1 kWh en forma de corriente continua.

La diferencia entre la electricidad generada en corriente continua (5,8 kWh) y la absorbida por la máquina frigorífica en forma de corriente alterna (4,0 kWh) es 1,8 kWh (31%) durante el día 18/6; en el caso del 1 de Julio, la diferencia fue de 3 kWh (30%); el 26/9 la electricidad absorbida fue 4,9 kWh, mientras que el frío producido fue 20,9 kWh, trabajando la máquina con una eficiencia CEE = 4,25 y la electricidad generada en corriente continua 7,4 kWh, con una diferencia entre la electricidad generada en CC y en CA de 2,5 kWh; en el caso del día 4/9 con una producción de 28,4 kWh y CEE=4,3 la electricidad absorbida fue 6,6 kWh, siendo la CC almacenada 9,6 kWh y la electricidad perdida 3 kWh, más del 30% de la electricidad almacenada, (Izquierdo, 2016). Se constata que la pérdida no es igual todos los días.

En la figura 21, se ha representado la variación de la eficiencia energética como resultado de la información contenida en la figura 20.

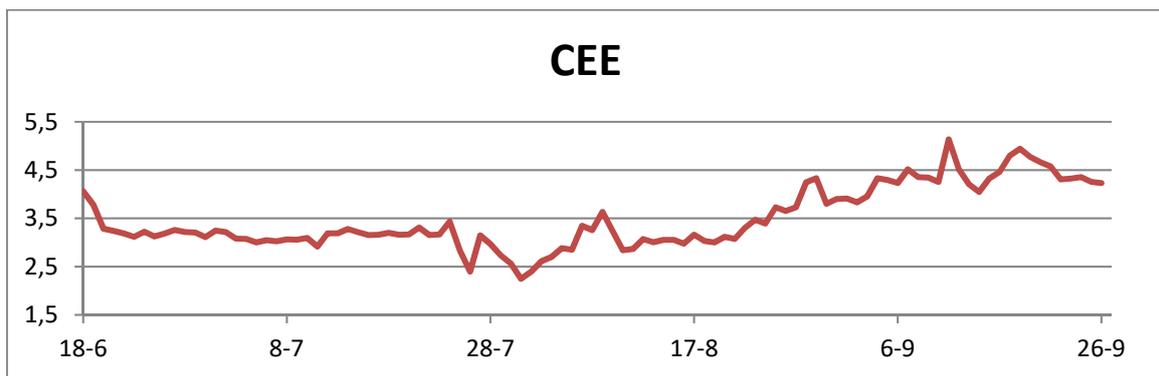


Figura 21. Coeficiente de eficiencia energética.

## 6. REDUCCIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

### Potencial de Efecto Invernadero Directo

La máquina frigorífica fue cargada con 1,7 kg del refrigerante R410 en Marzo de 2012. La masa de R410 emitida a la atmósfera hasta Abril de 2013, cuando se pesó el R410A, figura 22, fue 0,031 kg, aproximadamente el 2% de la carga inicial.



Figura 22. Método para determinar el refrigerante fugado.

Como el Potencial de Efecto Invernadero Directo del R410 es 4.200 kg equivalentes de CO<sub>2</sub>, si no se tiene en cuenta el dióxido de carbono emitido al fabricar el refrigerante R410A, el CO<sub>2</sub> equivalente emitido, durante los trece meses, fue:  $0,031 \times 4.200 = 130$  kg, figura 22.

El dato anterior fue obtenido pesando el refrigerante contenido en la máquina. Pero el trabajo aquí expuesto finalizó el 26 de Septiembre de 2013, cinco meses después. Si se admite, que durante estos cinco meses adicionales, el ritmo de fuga se mantuvo, entonces, el R410A emitido a la atmósfera pudo ser  $130 + 0,02 \times 5 / 13 \times 4.200 = 162,3$  kg equivalentes de CO<sub>2</sub>.

### **Potencial de efecto de Invernadero Indirecto**

Si no se tiene en cuenta la emisión generada en la fabricación del módulo fotovoltaico, podemos considerar que la electricidad fotovoltaica suministrada a la máquina frigorífica es de origen renovable y no emite CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, la electricidad absorbida no genera emisiones contaminantes.

Más concretamente, se produce un ahorro de emisión respecto a la emisión generada cuando la electricidad procede de la red eléctrica, que podemos calcular de la siguiente forma:

- a) El CO<sub>2</sub> emitido en España para producir 1 kWh eléctrico durante el año 2013 fue 0,34 kg CO<sub>2</sub>/kWh.
- b) De la figura 20 obtenemos la energía eléctrica absorbida durante los 100 días del verano, 700 kWh.
- c) Operando obtenemos un ahorro de 240 kg CO<sub>2</sub>.

Por lo tanto, el PEII es 240 kg de CO<sub>2</sub> que no fueron emitidos.

En cualquier caso, se puede ver que el uso de la electricidad fotovoltaica para alimentar la máquina frigorífica generó una reducción de emisión de CO<sub>2</sub> comprendida entre 78 y 110 kg de CO<sub>2</sub>.

## **7. CONCLUSIONES**

Durante el año 2012 fue diseñado, construido y evaluado experimentalmente un sistema de refrigeración solar constituido fundamentalmente por un generador fotovoltaico de 16 m<sup>2</sup> de área útil y una máquina frigorífica de compresión mecánica de vapor aire-agua de 5 kW de potencia frigorífica. El objetivo fue refrigerar un edificio piloto de 35 m<sup>2</sup> de área total a través de un suelo radiante que durante el verano podía trabajar en la modalidad de refrigeración.

Se presentan los resultados experimentales de dos días con temperaturas típicas del verano, obteniendo los siguientes resultados:

- a) 28/8/2012: Corriente continua generada, 12 kWh/día; electricidad suministrada (CA) a la máquina frigorífica, 9,2 kWh; frío producido, 26 kWh, aproximadamente; Coeficiente de Eficiencia Energética diario, 2,8; reducción máxima de temperatura, desde 26°C hasta 23°C.
- b) Los resultados del día 6/9/2012 son parecidos, con la salvedad del CEE diario que alcanza el valor 3,2.

El experimento se extendió al verano de 2013, siendo los resultados más significativos los siguientes:

El rendimiento máximo diario del generador fue del 10% y el rendimiento medio estacional del 7,5%; la electricidad (CA) absorbida por la máquina frigorífica durante el verano fue 700 kWh, aproximadamente, y el frío producido 2.200 kWh, siendo el CEE estacional, 3.1.

La reducción de emisión de CO<sub>2</sub>, obtenida por diferencia entre PEID y el PEII estuvo comprendida entre 70 y 110 kg de CO<sub>2</sub>.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren mostrar su agradecimiento al Ministerio de Economía y Competitividad de España por su apoyo económico al Proyecto de Investigación: Diseño, construcción y evaluación experimental de un sistema de refrigeración solar y trigeneración de alta eficiencia para edificios e invernaderos (ENE2010-20650-CO2-01).

## REFERENCIAS

EPIA (*European Photovoltaic Industry Association*), (2014): “Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018”.

EPIA (*European Photovoltaic Industry Association*), (2018): “Global Market Outlook for Photovoltaics 2017-2021”.

GONÇALVES, P. y ORESTES, M. (2017): “Photovoltaic solar energy: Conceptual framework”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 74, July 2017. Pages 590-601. Elsevier.

UNIÓN EUROPEA (2018): [https://europa.eu/european-union/topics/energy\\_es](https://europa.eu/european-union/topics/energy_es), consultada a 29 de mayo de 2018.

M. IZQUIERDO, P. de AGUSTÍN, E. MARTÍN (2013): “Heat pump for radiant cooled and heated floor driven by a microphotovoltaic system”. Paper 317. *Microgen III, Proceeding of the 3<sup>rd</sup> edition of the International Conference on Microgeneration and Related Technologies*. Naples, Italy, April 15-17. ISBN: 9788890848902.

M. IZQUIERDO, P. de AGUSTÍN, E. MARTÍN (2013): “A micro photovoltaic-heat pump system for house heating by radiant floor: some experimental results. SHC 2013”, *International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry* September 23-25, 2013, Freiburg, Germany, paper 34195.

M. IZQUIERDO, P. de AGUSTÍN, E. MARTÍN (2014): “A micro photovoltaic-heat pump system for house heating by radiant floor: some experimental results”. *Energy Procedia*, Vol 48, pp 865-875 DOI:10.1016/j.egypro.2014.02.100: Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).

P. de AGUSTÍN (2015): “Photovoltaic self-consumption heating system: analytical model, experimental results and autonomy prospects”. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid

M. IZQUIERDO AND P. de AGUSTÍN (2015): “Solar heating by radiant floor: Experimental results and emission reduction obtained with a micro photovoltaic–heat pump system”, Applied Energy 147, 297-307.

MARCELO IZQUIERDO MILLÁN (2016): “Climatización de Edificios con Energía Solar”. Número de asiento registral del derecho de propiedad intelectual 16/2017/3847 de fecha 22/06/2017. Pendiente de imprimir.