

# ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DEL PROGRAMA SOLARIZATE (IDAE-GREENPEACE)

SERRANO CASARES, Francisco; MAHROUG, Imane; RODRIGUEZ GARCÍA, Eduardo A.

fserranoc@uma.es

Universidad de Málaga, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Grupo de Energética

## RESUMEN

El programa Solarizate promovido por Greenpeace con el apoyo del IDAE, ha permitido realizar 50 instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red de características similares en otras tantas localidades de España. El conocimiento del funcionamiento de estas instalaciones constituye una oportunidad para comparar el comportamiento de un mismo tipo de instalaciones en distintas condiciones de funcionamiento real.

Se presentan en este trabajo los resultados obtenidos en la instalación llevada a cabo en uno de los edificios de la Universidad de Málaga en el Campus de El Ejido. La instalación tiene 2,6 kW<sub>p</sub> de potencia y utiliza módulos de Isofotón de 106 W<sub>p</sub>. El inversor es Sunnyboy2500 de 2,5 kW de potencia que dispone de sistema de adquisición de datos.

Los parámetros usados para caracterizar el sistema fotovoltaico han sido los descritos en el informe de la AIE [1] y en el trabajo de la referencia [2]. En él se definen los procedimientos para la monitorización de las características relacionados con la energía de los sistemas fotovoltaicos tales como la irradiancia en el plano del campo fotovoltaico, los valores de la potencia a la salida del campo, a la entrada y a la salida del sistema de acondicionamiento de potencia, definiendo, además, los procedimientos de intercambio y análisis de los datos monitorizados.

Entre los datos obtenidos cabe destacar que en el año 2009 la productividad final,  $Y_f$  [kWh/kWp/d], osciló entre 3,3 y 5,09 y que la eficiencia global, PR, varió entre 0,8 y 0,93. En el año 2010 la productividad final,  $Y_f$ , varía entre 3,45 y 5,22 y la eficiencia global, PR, entre 0.82 y 0.86.

**Palabras clave:** Fotovoltaica. Conexión red. Autoconsumo con balance neto.

## 1. Introducción

Dentro de las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica, los sistemas fotovoltaicos conectados a red han tenido un desarrollo considerable en los últimos años. Muchos organismos públicos han llevado a cabo programas de demostración de pequeñas instalaciones conectadas a red entre las que se encuentra el programa Solarizate [3], promovido por Greenpeace con el apoyo del IDAE, que ha permitido realizar 50 instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red de características similares en otras tantas localidades de España en una primera fase. Este proyecto ha continuado desarrollándose y en la actualidad agrupa a más de 300 centros educativos que forman la denominada Red de Escuelas Solares, que, además de prestar asesoramiento e información sobre la energía solar constituye un foro de intercambio de experiencias y de ayuda para el fomento de las energías renovables en la Escuela.

Aunque, debido a unas políticas energéticas mal diseñadas, las instalaciones fotovoltaicas conectadas a red han experimentado en los últimos tiempos unos problemas importantes que han culminado con la moratoria a las energías renovables promulgada por el Gobierno en enero de 2012, la situación puede mejorar si finalmente fructifican las negociaciones para regular el autoconsumo con balance neto.

En noviembre de 2011, el pasado gobierno reguló en España las instalaciones de Autoconsumo y, aunque redactó un borrador para regular las instalaciones de autoconsumo con balance neto, este aún está en proceso de aceptación. Mientras tanto, otros organismos españoles ofrecen ideas que modifican algunos puntos expuestos en el borrador sobre la gestión de la energía y sus costes, para que sean introducidas finalmente en el Real Decreto.

Por tanto, hay esperanza para que la energía solar fotovoltaica vuelva a renacer con fuerza en el futuro debido a la nueva legislación, a lo que habría que añadir, también, el incremento de los problemas medioambientales en relación con el consumo energético y el empleo de combustibles fósiles.

Estos sistemas de autoconsumo con balance neto se caracterizan porque toda la energía que produce puede ser consumida por el usuario para cubrir sus necesidades energéticas enviando el sobrante a la red. Si se consideran instalaciones domésticas, la potencia nominal puede estar en el entorno de 5 kW<sub>p</sub>. Para conocer las posibilidades reales de uso de estos sistemas FV, sería conveniente conocer con exactitud cuánta energía producirá un sistema teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas y la tecnología empleada.

Por ello, las instalaciones del programa Solarizate pueden prestar una gran ayuda si se publican los resultados de los años que llevan instaladas, ya que son instalaciones del mismo tipo, repartidas por todo el territorio nacional y con una potencia que entra dentro de lo que podríamos considerar instalaciones domésticas.

Hay que tener en cuenta que la energía producida por un sistema FV conectado a la red depende, fundamentalmente, de tres factores:

1. Factores meteorológicos, principalmente la irradiación solar y la temperatura del propio sistema que es, a su vez, función de la irradiación solar y de la temperatura ambiente.
2. Características técnicas de los inversores, principalmente de su rendimiento, que es función del punto de trabajo, así como de la irradiación umbral de funcionamiento, definida como la mínima irradiación necesaria para que el sistema vierta energía a la red.
3. Características de la conexión sistema-red, que no sólo dependen de las características de la energía, desconexiones del inversor, forma de la onda, distorsión armónica y frecuencia entre otras, sino que también depende de la propia red, de su estabilidad y su disponibilidad.

El objetivo de este trabajo ha sido realizar un análisis del funcionamiento de una instalación de 2,6 kW<sub>p</sub> situada en una de las dependencias de la Universidad de Málaga. La planta dispone de una monitorización continua, control y supervisión a través de los datos de medida en cortos intervalos de tiempo. La potencia normalizada y las pérdidas pueden ser utilizadas para la detección de errores. Con esta supervisión, la detección de fallos está asegurada. Otro de los objetivos es también aumentar la

experiencia y poder comparar los valores del rendimiento del sistema con los obtenidos por plantas semejantes en diferentes lugares del mundo.

## 2. Descripción de la instalación fotovoltaica

La planta fotovoltaica está ubicada en la cubierta plana transitable sobre la planta segunda del edificio de usos administrativos y biblioteca en el Campus de El Ejido de la Universidad de Málaga. La cubierta tiene un antepecho perimetral de 1,25 m de altura y unas dimensiones de  $18 \times 14 \text{ m}^2$ . El generador fotovoltaico está formado por 25 módulos I-106 de Isofotón, conectados en serie, orientación Sur y situados sobre una estructura inclinada  $45^\circ$ . Aunque esa no es la inclinación adecuada para una localidad como Málaga es la que se utilizó en todas las instalaciones efectuadas en el programa.

El inversor es un SUNYBOY 2500, de 2,5 kW, que se ubica en la planta segunda del edificio, en una habitación de dimensiones  $4 \times 7 \text{ m}^2$ , situada justo debajo de la terraza. Dispone de un microprocesador que permite una curva senoidal con una mínima distorsión. La lógica de control empleada puede garantizar además de un funcionamiento automático completo, el seguimiento del punto de máxima potencia (MPP) y evita las posibles pérdidas durante periodos de reposo.

Por otro lado, permite la desconexión-conexión automática de la instalación fotovoltaica en caso de pérdida de tensión o frecuencia de red, evitando el funcionamiento en isla, garantía de seguridad para los operarios de mantenimiento de la compañía eléctrica distribuidora.

El cableado desde el campo generador hasta el inversor es mediante un tramo superficial por la cubierta hasta la fachada norte, por donde desciende hasta la altura de la planta segunda donde se sitúa el inversor atravesando el cerramiento mediante canalizaciones. Desde el cerramiento de fachada hasta el recinto del inversor, el cableado es mediante un tramo superficial por tabiquería interior, siendo la distancia a los módulos de unos 4 m. Los armarios de acometida y contadores se encuentran en la planta baja, adosados a pared en una habitación cuyo acceso es restringido.

El cableado desde el recinto del inversor hasta el lugar de ubicación de los contadores y la acometida es en fachada hasta el recinto de la biblioteca, donde atraviesa el cerramiento mediante canalizaciones. Desde ahí discurre por falso techo hasta la sala de contadores. La distancia total del trazado de cableado es de unos 40 m.

## 3. Análisis de la planta fotovoltaica

La planta fotovoltaica está monitorizada para poder evaluar y controlar el buen funcionamiento de la misma, también para juzgar si los objetivos de diseño se han cumplido, además de proporcionar datos para evaluar las posibilidades de la tecnología fotovoltaica y por tanto mejorar el diseño de la misma. Los parámetros que se monitorizan son:

- Parámetros eléctricos
  - Suma total de la energía alimentada  $E_{\text{total}}$  (kWh)
  - Potencia suministrada a red  $P_{\text{ac}}$  (W)
  - Suma total de horas de trabajo en marcha de alimentación  $h_{\text{total}}$
  - Corriente del generador FV  $I_{\text{pv}}$  (mA)
  - Tensión del generador FV  $V_{\text{pv}}$  (V)
  - Corriente de la red  $I_{\text{ac}}$  (mA)
  - Tensión de la red  $V_{\text{ac}}$  (V)
  - Frecuencia de red  $F_{\text{ac}}$  (Hz)
  - Impedancia de red  $Z_{\text{ac}}$  (Ohm)

- Resistencia de aislamiento  $R_{ais}$  (kOhm)
- Parámetros meteorológicos
  - Irradiancia  $G$  ( $W/m^2$ )
  - Temperatura de la célula  $T_{cel}$  ( $^{\circ}C$ )

El sistema de monitorización y vigilancia está constituido por el inversor, un grupo de sensores meteorológicos, un controlador SUNNY BOY CONTROL PLUS y un computador que acumula y visualiza los datos de medida del sistema fotovoltaico.

Los parámetros usados para caracterizar el sistema fotovoltaico han sido establecidos por la Agencia Internacional de la Energía (IEA PVPS) y se describen en la norma IEC 61724 [1] que define los procedimientos para la monitorización de las características relacionadas con la energía de los sistemas fotovoltaicos, tales como la irradiancia en el plano del campo fotovoltaico, valores de la potencia a la salida del campo, a la entrada y a la salida del sistema de acondicionamiento de potencia, además de definir procedimientos de intercambio y análisis de los datos monitorizados. Los parámetros utilizados se describen a continuación:

- La productividad final del sistema,  $Y_p$ , es el cociente entre la energía eléctrica útil entregada a la carga por día, en kWh, y la potencia nominal del subsistema fotovoltaico, en  $kW_p$ . Representa el número de horas que el sistema fotovoltaico tendrá que funcionar con su potencia nominal para obtener la misma energía eléctrica entregada a la carga. Este parámetro normaliza la energía producida con respecto al tamaño del sistema. En consecuencia, es una manera conveniente de comparar la energía producida por sistemas de distinto tamaño.
- La productividad de referencia,  $Y_r$ , es el cociente entre la irradiación en la superficie de los módulos ( $kWhm^{-2}$ ) y la irradiación de referencia. Representa un número equivalente de horas a la irradiancia de referencia. Tiene dimensiones de tiempo y, si la irradiancia de referencia vale  $1 kWm^{-2}$ , es la definición de horas solar pico que representa el número de horas que debería estar recibiendo energía del sol al nivel de  $G_{stc}$  ( $1kW m^{-2}$ ) para producir el mismo número de kWh en ese día y en un  $m^2$ . Este parámetro define los recursos de radiación solar para el sistema fotovoltaico, es función de la ubicación, la orientación del generador fotovoltaico, representando la variabilidad del clima.
- La productividad del subsistema fotovoltaico,  $Y_a$ , es el cociente entre la energía eléctrica producida por el subsistema fotovoltaico en un día (kWh) y la potencia nominal del mismo en kW pico. Este parámetro tiene dimensiones de tiempo y es equivalente al número de horas de operación del sistema a la potencia nominal para producir los mismos kWh registrados ese día.
- El rendimiento energético global del sistema (también llamado Performance Ratio), PR, es la relación de la energía producida y la teóricamente disponible. Este valor es independiente de la localidad y tamaño del sistema e indica las pérdidas totales con relación a temperatura de los módulos, utilización incompleta de la irradiancia y falta de eficiencia de los componentes del sistema. Se calcula típicamente por mes o anualmente y los valores calculados para intervalos pequeños diarios o semanales sirven para identificar fallos de componentes. Debido a las pérdidas de temperatura los valores de PR son mayores en invierno que en verano, variando entre 0.6-0.8. La disminución de PR de un año a otro puede indicar una pérdida permanente de rendimiento.
- Las pérdidas del sistema,  $L_s$ , son las pérdidas del inversor en su conversión CC-CA. Se calcula como la relación entre la energía en alterna que sale del inversor y la energía en continua que llega desde el campo fotovoltaico.
- Las pérdidas de colección,  $L_c$ , pueden dividirse en:
  - Pérdidas por captura térmica,  $L_{CT}$ , son pérdidas causadas por elevadas temperaturas de las células, temperatura de célula mayor que  $25^{\circ}C$ . Se calcula como el cociente entre

los valores reales registrados de los parámetros del campo y los de condiciones estándar.

- Otras pérdidas,  $L_{cm}$ , son pérdidas causadas por otros factores como: el cableado, acumulación de polvo, nieve, baja irradiancia o irradiancia no homogénea, errores en seguimiento punto de máxima potencia, diodos, sombra parcial, etc. En una planta fotovoltaica conectada a red, un mal funcionamiento causa un notable incremento de  $L_{cm}$ , por lo que es un buen indicador de problemas en el sistema. Se han estimado considerando los cálculos de caída de tensión en el cableado de la instalación, no existiendo sombras en la instalación y sin considerar que existan fallos en el seguimiento del PMM del inversor.

Si el valor de almacenamiento de los datos es de menos de una hora, los valores medios de potencia e irradiancia también pueden ser normalizados dividiendo la potencia y la irradiancia por la potencia nominal y la irradiancia de referencia, respectivamente. Estas cantidades se llaman parámetros normalizados instantáneos y se representan con letras minúsculas ( $y_t$ ,  $y_a$ ,  $y_f$ ,  $l_c$ ,  $l_s$ ,  $pr$ ). Con estos parámetros se puede extraer un diagrama normalizado que ayuda en la detección de fallos en línea. Si integramos estos valores a lo largo del día, el mes o el año obtendremos los valores de  $Y_f$ ,  $L_{CT}$ ,  $L_{cm}$ .

#### 4. Análisis y evaluación del sistema fotovoltaico

Se ha analizado el comportamiento del sistema fotovoltaico durante dos años completos, el 2009 y el 2010. La energía total producida en 2009 fue de 4151 kWh y en 2010 de 4114 kWh. En la figura 1 se compara la producción mensual de los años 2009 y 2010. Se puede observar un comportamiento semejante en los dos años considerados, destacando que en el mes de marzo se consigue, en el año 2009, la máxima producción anual.

La existencia del sistema de monitorización de la planta fotovoltaica por medio del sistema SUNNY BOY CONTROL PLUS, permite disponer de una información que puede detectar el mal funcionamiento de la planta.

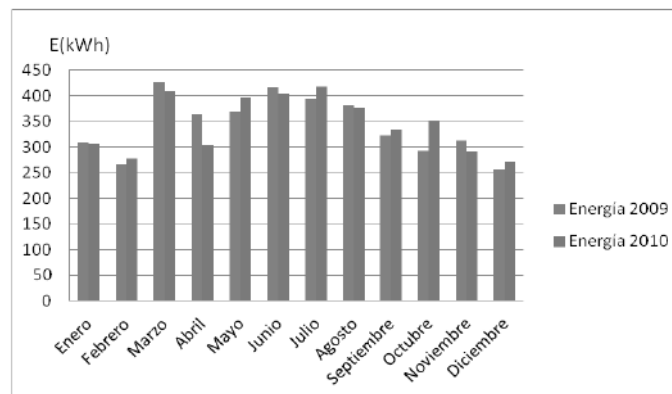


Figura 1: Comparación de la producción energética mensual de los años 2009 y 2010 en kWh.

En la figura 2 se presentan los resultados de la irradiancia y de la corriente del sistema fotovoltaico obtenidos de la monitorización de la planta para un día del mes de enero. Como se observa, la evolución de los valores es la esperada.

Los índices de funcionamiento del sistema pueden poner de manifiesto la existencia de problemas en la planta fotovoltaica. En concreto, un aumento de  $L_c$  indicaría la existencia de pérdidas anormales. Una planta bien proyectada y bien instalada debe presentar unos valores bajos de  $L_c$  y unos valores elevados de  $PR$ . En las figuras 3 y 4 se presentan los valores mensuales de  $Y_f$ ,  $L_s$ ,  $L_c$  y  $PR$  para los años 2009 y 2010, respectivamente, donde se puede ver que los valores más bajos del rendimiento global del sistema,  $PR$ , se producen en el mes de agosto, en el que, además, los valores de  $L_c$  son mayores. Esto es debido a que las temperaturas de ese mes son las más altas del año y,

consecuentemente, aumentan las pérdidas por temperatura, que se engloban dentro del parámetro  $L_C$ , y disminuye la producción fotovoltaica, disminuyendo PR.

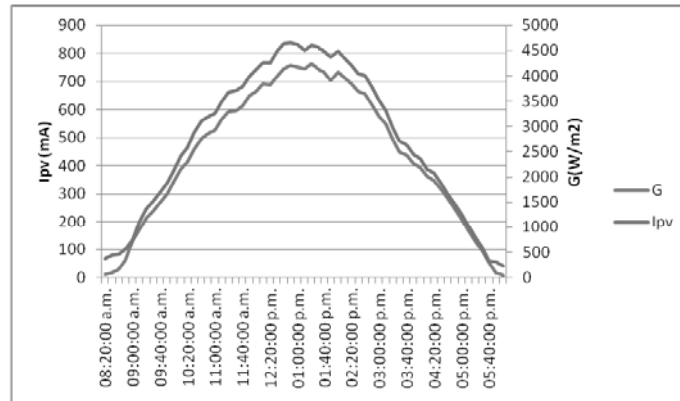


Figura 2: Valores de la irradiancia y la corriente para un día del mes de enero de 2009.

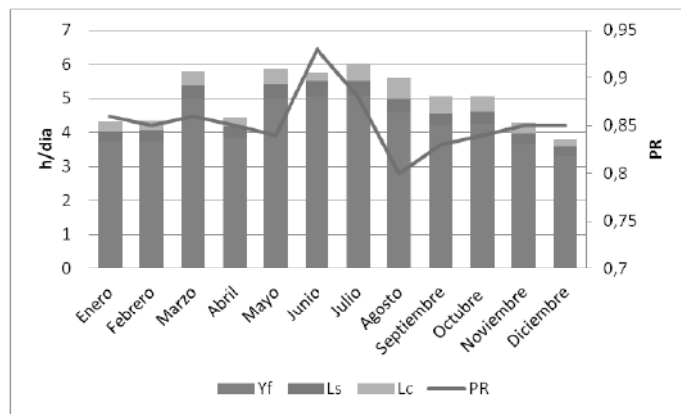


Figura 3: Valores mensuales de los parámetros  $Y_f$ ,  $L_S$ ,  $L_C$  y PR para el año 2009.

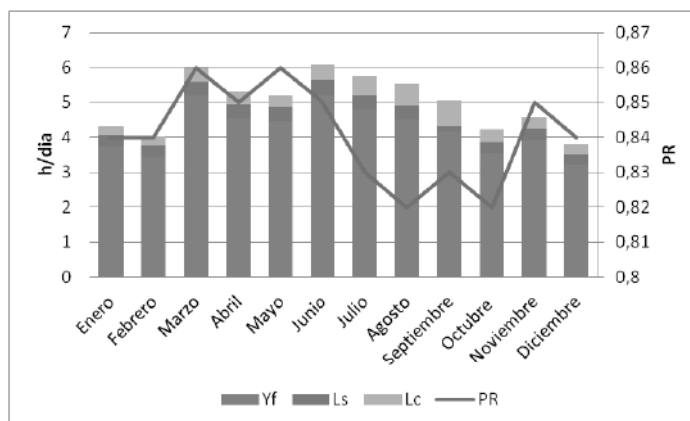


Figura 4: Valores mensuales de los parámetros  $Y_f$ ,  $L_S$ ,  $L_C$  y PR para el año 2010

Si analizamos los parámetros  $Y_f$ ,  $L_C$  y  $L_S$  para el mes de agosto de 2009 que se presentan en la figura 5, se observa que la producción de varios días está por debajo de los valores del resto de días. Para comprobar si se trata de un problema de la instalación o es debido a bajos niveles de radiación, se puede acudir a los valores monitorizados de la radiación. En la figura 6 se muestran los valores de irradiancia del día 5, pudiéndose deducir que la baja producción es debida a que ese día resultó estar parcialmente nublado.

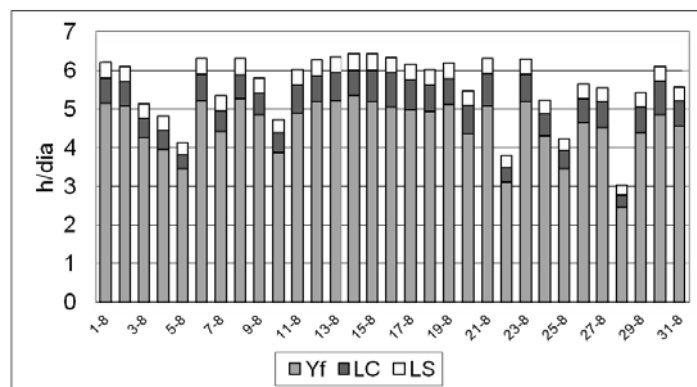


Figura 5: Parámetros  $Y_f$ ,  $L_C$  y  $L_S$  para el mes de agosto de 2009.

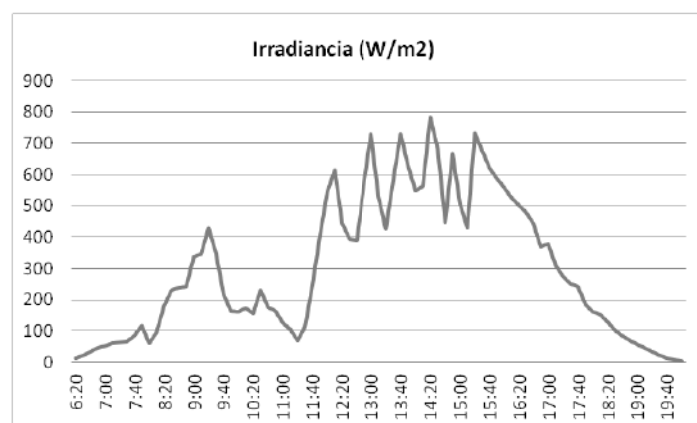


Figura 6: Irradiancia del día 5 de agosto de 2009 (hora solar).

En la tabla 1 se presentan los valores de radiación y producción energética previstos en el proyecto de la instalación y los reales en los años 2009 y 2010. Se observa que los valores de la radiación son semejantes pero los de producción energética estaban subestimados. Esto es debido a que en las estimaciones de producción energética se toman unos valores de PR conservadores (en el entorno de 0,70), en comparación con los reales, como se puede observar en la tabla 2 donde se presentan los valores promedios de los parámetros de funcionamiento de la instalación analizada.

Tabla 1: Radiación y energía estimada en el proyecto y producida por la instalación en los años 2009 y 2010.

	$G$ (kWh.m <sup>2</sup> /día)	$E_c$ (kWh/día)	$E_c$ (kWh/año)
Proyecto	4.95	10.2	3721.59
Real 2009	4.99	11.35	4151.79
Real 2010	4.97	11.47	4114.57

Tabla 2: Parámetros de funcionamiento de la planta fotovoltaica.

Año	$Y_f$	$L_S$	$L_C$	PR
	(kWh .día <sup>-1</sup> /kW <sub>p</sub> )	(kWh .día <sup>-1</sup> /kW <sub>p</sub> )	(kWh .día <sup>-1</sup> /kW <sub>p</sub> )	
2009	4,29	0,36	0,38	0,85
2010	4,33	0,34	0,43	0,84

Tabla 3: Comparación del comportamiento de la planta de Málaga con otras de Suiza, Japón e Italia.

	$Y_f$ (kWh .dia <sup>1</sup> /kWp)	$L_s$ (kWh .dia <sup>1</sup> /kWp)	$L_c$ (kWh .dia <sup>1</sup> /kWp)	PR
Málaga	4,31	0,35	0,40	0,85
Suiza	3,04	0,17	0,71	0,77
Japón	2,75	0,21	0,53	0,79
Italia	4,81			0,80

Finalmente, en la tabla 3 se comparan los resultados de la instalación de Málaga con otras instalaciones obtenidas de la bibliografía de Suiza [4], Japón [2] e Italia [5]. Los valores obtenidos para Málaga son comparables a los de Italia, siendo ambos superiores a los de Suiza y Japón, lo que indica que las zonas del Sur del Mediterráneo presentan características que las hacen más aptas para las instalaciones fotovoltaicas que otras de latitudes superiores.

## 5. Conclusiones

Se ha analizado el comportamiento de una instalación fotovoltaica de 2,6 kW<sub>p</sub> conectada a red del programa Solarizate promovido por Greenpeace-IDAE.

Se ha utilizado la metodología propuesta por la Agencia Internacional de la Energía (IEA PVPS) y que se describen en la norma IEC 61724. Este procedimiento permite también detectar fallos en la instalación.

Los resultados necesarios para el análisis de la instalación se han obtenido del sistema de monitorización que posee la instalación y que permite conocer tanto los valores de las magnitudes eléctricas de la instalación como los valores meteorológicos.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que en los dos años analizados, 2009 y 2010, no se han producido anomalías en el funcionamiento de la instalación.

Finalmente, se ha comparado la instalación con otras de diferentes países, Suiza, Japón e Italia. Los resultados muestran que el comportamiento es semejante a la planta italiana, pero son mejores que los de las otras dos instalaciones que se encuentran en países de latitud más alta, lo que pone de manifiesto la adecuación de las zonas mediterráneas para este tipo de instalaciones.

El análisis realizado permitirá que en el futuro, instalaciones del mismo programa puedan comparar su funcionamiento con ésta, con la ventaja de ser instalaciones que podríamos llamar gemelas situadas en prácticamente todas las zonas del país.

## 6. Referencias

- [1] Analysis of Photovoltaic systems. Report IEA-PVPS T2-01: 2000.
- [2] Mau, S., Jahn, U. *Performance analysis of grid-connected PV systems*. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2006, Dresden, Germany; pp. 2676-2680.
- [3] <http://www.solarizate.org/>
- [4] Heberlin, H., Beuttler Ch. *Normalized representation of energy and power for analysis of performance and on-line error detection in PV-systems*. 13<sup>th</sup> EU Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, 1995, Nice (France).
- [5] Congedo, P.M., Malvoni, M., Mele, M., De Giorgi, M.G.. *Performance measurements of monocrystalline silicon PV modules in South-eastern Italy*. Energy Conversion and Management, 2013, 68, pp. 1-10.