

## DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE FALLOS DE OPERACIÓN EN INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS DOMÉSTICAS

**Leloux J., Narvarte L. \*, Trebosc D.\*\***

\* Instituto de Energía Solar. Universidad Politécnica de Madrid. ETSI Telecomunicaciones.  
Avenida Complutense s/n, 28040, Madrid, España, +34 91 544 10 60,  
jonathan.leloux@ies-def.upm.es

\*\* BDPV, Rue du Capitaine Fracasse, 1, 31320, Castanet Tolosan, France

### RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es implementar una herramienta de análisis automático de datos de operación para detectar fallos en instalaciones fotovoltaicas domésticas que disponen de sistemas de monitorización. Para ello se han analizado los datos de productividad de 10.650 sistemas fotovoltaicos (9657 situados en Francia y 993 en Bélgica). El Performance Ratio (PR) promedio ha sido de 76% en Francia y 78% en Bélgica, y el Performance Index (PI) promedio es de 85% en ambos países. La potencia real media de los módulos fotovoltaicos es un 4,9% inferior a su valor nominal anunciado en la ficha técnica del fabricante. Los módulos de heterounión (HIT) muestran productividades superiores a la media, mientras que los módulos de Cobre-Indio-Selenio (CIS) muestran una potencia real un 16% inferior a su valor nominal.

Palabras clave: PV residencial, Performance Ratio, Performance Index, PR, PI, HIT, CIS.

### ABSTRACT

The main objective of this work is to implement an automatic analysis tool to detect operating data faults in domestic photovoltaic systems equipped with monitoring systems. This has been done through the analysis of the productivity data of 10,650 photovoltaic systems (9657 situated in France and 993 in Belgium). The Performance Ratio (PR) has averaged 76% in France and 78% in Belgium, and the Performance Index (PI) has averaged 85% in both countries. The real power of the PV modules is in average 4.9% below their nominal value announced that was announced in the datasheets of the manufacturer. Heterojunction modules (HIT) show above-average productivity, while modules Copper-Indium-Selenium (CIS) are a real power 16% below its nominal value.

Keywords: Residential PV, Performance Ratio, Performance Index, PR, PI, HIT, CIS.

## INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de este trabajo es implementar una herramienta de análisis automático de datos de operación para detectar fallos en instalaciones fotovoltaicas domésticas que disponen de sistemas de monitorización. Para ello se han analizado los datos de productividad de 10.650 sistemas fotovoltaicos residenciales (9657 situados en Francia y 993 en Bélgica), totalizando una potencia de aproximadamente 33 MW (29 MW en Francia y 4 MW en Bélgica), e instalados entre 2007 y 2010. La importante cantidad de instalaciones fotovoltaicas analizadas permite extender los resultados no sólo para los mercados francés y belga, sino también para cualquier otro sistema fotovoltaico residencial de pequeño tamaño, y por tanto, los resultados son de interés general. De hecho, las conclusiones de este trabajo son congruentes con los análisis previos de los resultados operacionales de los sistemas fotovoltaicos residenciales instalados durante las últimas dos décadas en otros países de Europa y del mundo<sup>[1,2]</sup>. Este trabajo se articula en torno a tres cuestiones principales:

- 1) ¿Cuánta energía producen los sistemas fotovoltaicos? (En términos de kWh por kW<sub>p</sub>). Se ha realizado un análisis de los datos mensuales de producción de energía proporcionados por los propietarios de las instalaciones fotovoltaicas a través de BDPV.fr y SolarWeb.be.
- 2) ¿Cuál es su rendimiento para la producción de electricidad? La calidad de los sistemas fotovoltaicos se analiza mediante diversos indicadores de rendimiento, tales como el Performance Ratio (PR), y el Performance Index (PI).
- 3) ¿Cómo detectar los fallos que provocan una disminución de la calidad de los sistemas fotovoltaicos? Un análisis de varianza (ANOVA) aplicado sobre el PI permite determinar estos aspectos clave.

## CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA FOTOVOLTAICA DOMÉSTICA

Aproximadamente el 90% de los sistemas residenciales fotovoltaicos instalados en Francia y Bélgica tiene una potencia pico de 5 kW<sub>p</sub> o menos. Esta situación surgió como consecuencia directa de un marco legal que desfavorece las instalaciones de más de 3 kW<sub>p</sub> en Francia, y de más de 5 kW<sub>p</sub> en Bélgica, así como de la superficie disponible en los tejados. El mercado por lo tanto, se desarrolló hacia los sistemas fotovoltaicos residenciales de pequeña potencia. Los módulos fotovoltaicos basados en la tecnología de silicio cristalino clásica (xSi) representan más del 90% del mercado en Bélgica, y casi el 80% en Francia. En Francia, casi todo el resto del mercado (17%) está siendo ocupado por módulos de heterounión con capa delgada intrínseca (HIT). El resto de las tecnologías sólo alcanza unos porcentajes bajos, en Francia como en Bélgica. Las otras tecnologías presentes son principalmente el silicio amorfo (aSi), el Cobre-Indio-Selenio (CIS), y el telurio de cadmio (CdTe). La base de datos contiene 121 fabricantes de módulos fotovoltaicos, 23 fabricantes de inversores y 652 instaladores de sistemas fotovoltaicos.

## METODOLOGÍA

### Bases de datos

Los datos relativos a los sistemas fotovoltaicos han sido facilitados por sus propietarios. Cada instalación fotovoltaica se localiza por su latitud y longitud, completadas con la

altitud correspondiente. El generador fotovoltaico se caracteriza por su orientación y ángulo de inclinación, su superficie total, y su potencia pico, los fabricantes de los módulos fotovoltaicos e inversores que equipan el sistema, así como su instalador, y la producción neta de energía, registrada sobre una base mensual en el contador o en el inversor.

#### Cálculo de la productividad energética de los sistemas fotovoltaicos

Se han realizado simulaciones que requieren como entrada los datos de radiación solar horizontal y de temperatura ambiente, ambos sobre una base mensual, los cuales han sido obtenidos de SoDa y PVGIS, respectivamente. La radiación solar recibida en la superficie de cada uno de los generadores fotovoltaicos se calcula utilizando modelos de radiación solar ampliamente aceptados<sup>[3]</sup>. La productividad de los sistemas fotovoltaicos se determina por comparación con un sistema fotovoltaico de referencia. La estimación de la producción de energía del sistema de referencia se simula con una herramienta desarrollada en el Instituto de Energía Solar - Universidad Politécnica de Madrid (IES-UPM) y sobre la base de modelos ampliamente aceptados, cuyos detalles se han descrito en otras publicaciones<sup>[4]</sup>. Los indicadores de productividad energética que se utilizan para evaluar la calidad técnica de un sistema fotovoltaico se obtienen mediante la comparación de su producción real a lo largo de un cierto periodo de tiempo con la producción de un sistema de referencia hipotético (de la misma potencia nominal, instalado en el mismo lugar y orientado de la misma manera) libre de ciertos tipos de pérdidas. Dos posibilidades se presentan en el texto aquí abajo. La variación entre ellos proviene del sistema de referencia que se escoge en cada caso. El PR es, de lejos, el indicador de productividad más utilizado hoy en día. Se define matemáticamente como (Ec. 1)

$$PR = \frac{E_{\text{producida}}}{P_{\text{CEM}} \int \frac{G}{G_{\text{CEM}}} dt} \quad (1)$$

donde  $E_{\text{producida}}$  es la energía eléctrica neta producida por la instalación fotovoltaica durante un periodo de tiempo  $T$ ;  $P_{\text{CEM}}$  es la potencia nominal del generador fotovoltaico en Condiciones Estándar de Medida (CEM),  $G_{\text{CEM}}$  es la irradiancia solar global en CEM (es decir,  $1000 \text{ W/m}^2$ ), y  $G$  es la irradiancia solar global recibida por el generador fotovoltaico. Debido a que las pérdidas térmicas son dependientes del sitio, el PR de un sistema fotovoltaico fluctúa de un lugar a otro, y a lo largo del transcurso de un año o un día, lo que representa un inconveniente obvio para calificar su calidad técnica intrínseca. Otras pérdidas son inevitables, como por ejemplo las pérdidas asociadas a la conversión DC/AC. Por lo tanto, un paso más allá para construir un indicador de calidad que permita comparar la calidad de las instalaciones se puede tomar restando las pérdidas térmicas y las pérdidas de conversión DC/AC correspondientes a un inversor de primera clase, en el caso presente, uno cuya Europea eficiencia es del 96%. Esto conduce al llamado PI, que se define matemáticamente como (Ec. 2):

$$PI = \frac{E_{\text{producida}}}{P_{\text{CEM}} \int \frac{G(1 - \Delta P_{\text{CEM}})(1 - \Delta P_{\text{DC/AC}})}{G_{\text{CEM}}} dt} \quad (2)$$

donde  $\Delta P_{\text{DC/AC}}$  representa las pérdidas de conversión características de un inversor de primera clase y  $\Delta P_{\text{CEM}}$  representa las pérdidas térmicas inevitables. La diferencia entre 1 y PI puede entenderse como una medida de las pérdidas de energía evitables. El PI permite comparar directamente la calidad de los sistemas fotovoltaicos bajo diferentes condiciones

climáticas y de instalación. Por esta razón, este estudio presta especial atención al análisis de los valores de PI.

### Análisis estadístico de los parámetros que afectan la productividad de los sistemas PV

Para investigar con más detalle las principales causas de las diferencias de calidad observadas entre los sistemas fotovoltaicos, se han agrupado por propiedades comunes. El método estadístico ANOVA se ha utilizado para estudiar las causas de dispersión del PI. Los procedimientos de ANOVA se basan en una distribución llamada distribución F. La estadística clave es  $F = MSTR / MSE$ , donde MSTR (Mean Square Treatment) representa la variación entre las medias de los diferentes grupos, y MSE (Mean Square Error) representa la variación dentro de los grupos. Los valores grandes de F indican que la variación entre los grupos es grande en relación a la variación dentro de los grupos, y por lo tanto que los grupos son significativamente diferentes. Un ANOVA multidimensional se realizó de acuerdo a cuatro criterios: fabricante de módulos, fabricante de inversores, instalador y potencia pico del sistema.

## RESULTADOS

### Producción de energía

En promedio, los sistemas fotovoltaicos han producido en 2010 una energía neta anual de 1.163 kWh/kW<sub>p</sub> en Francia y 852 kWh/kW<sub>p</sub> en Bélgica. Las diferencias de producción entre instalaciones se debe principalmente a tres factores: la geografía (y por lo tanto, la radiación solar y la temperatura), la orientación, y la productividad de los sistemas.

### Pérdidas de energía relacionadas con la inclinación y la orientación

La mayoría de los generadores fotovoltaicos tienen un ángulo de inclinación entre 20° y 50°, lo que corresponde generalmente a la configuración de los tejados donde están montados. Cuando la orientación es diferente de la óptima (alrededor de 40° en Francia y Bélgica), lo que es habitual en sistemas fotovoltaicos residenciales, la energía producida disminuye de una cantidad que se muestra en la Fig. 1. Esa misma figura también muestra la distribución relativa de sistemas instalados en función de la orientación e inclinación.

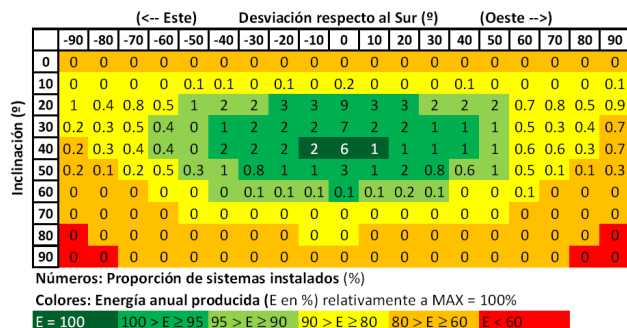


Fig. 1: Pérdidas por orientación de los sistemas PV residenciales en Francia y Bélgica.

En conjunto, la desorientación de los sistemas residenciales causa pérdidas de producción anuales en torno al 7%, lo que puede interpretarse como el precio a pagar, en términos de pérdidas de energía, por la instalación de sistemas fotovoltaicos en los tejados en lugar de instalar plantas fotovoltaicas.

### Productividad de los sistemas fotovoltaicos

El valor medio del PI de los sistemas en Francia y Bélgica es muy cercano al 85%, lo que indica que, en promedio, los sistemas fotovoltaicos están produciendo una energía anual un 15% inferior a la de un sistema de referencia. El valor medio del PR es del 76%. Como comparación, valores de PR entre 48% y 93% se han publicado en otros trabajos<sup>[1,2]</sup>. La Fig. 2 muestra un histograma de los PR y PI de los sistemas analizados.

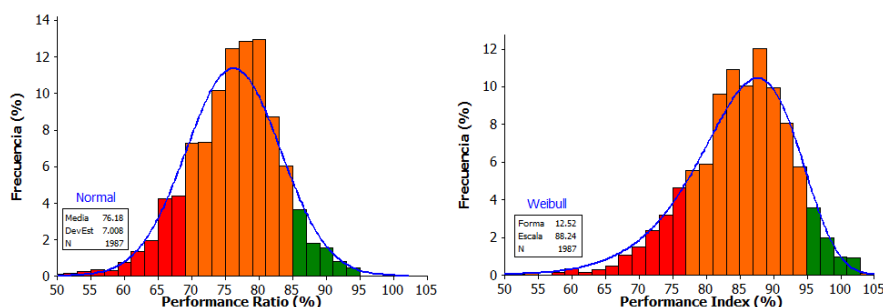


Fig. 2: PR y PI de los sistemas fotovoltaicos residenciales en Francia y Bélgica.

Con el fin de buscar las causas que explican las diferencias entre los diferentes PI, se aplicó un análisis ANOVA a la base de datos completa. El análisis ANOVA ha permitido establecer que los módulos fotovoltaicos explican una parte importante de la dispersión del PI. Para estimar la potencia real de los módulos fotovoltaicos, se ha utilizado un escenario de pérdidas que conduce a estimar que las pérdidas en el sistema son un 10% mayores que en el sistema de referencia (3% por suciedad de los módulos, 2% de pérdidas por sombras, 2% de pérdidas adicionales en el inversor, 2% por dispersión de parámetros, 1% por indisponibilidad). Esta suposición se apoya en trabajos anteriores que describen las pérdidas normalmente presentes en una instalación fotovoltaica<sup>[4]</sup>. Dado que el valor medio del PI es del 85%, se ha analizado la causa del 5% de pérdidas restante. Para ello se han agrupado los módulos fotovoltaicos según el fabricante y se han estimado la desviación de su potencia real respecto a su potencia real anunciada por el fabricante. La Fig. 3 muestra el resultado de este ejercicio para 51 fabricantes de módulos fotovoltaicos. Entre los resultados, es posible extraer que, por una parte, los módulos HIT muestran productividades superiores a la media, y que, por otra parte, los módulos CIS muestran una potencia real un 16% por debajo de su potencia nominal. El análisis ANOVA ha permitido verificar que dichas pérdidas no han sido debidas a otros parámetros de las instalaciones, tales como los inversores o los instaladores. Otros autores han coincidido en publicar que la potencia real nominal de los módulos fotovoltaicos tiende a ser en promedio un 5% inferior a la potencia nominal declarada por el fabricante<sup>[5]</sup>.

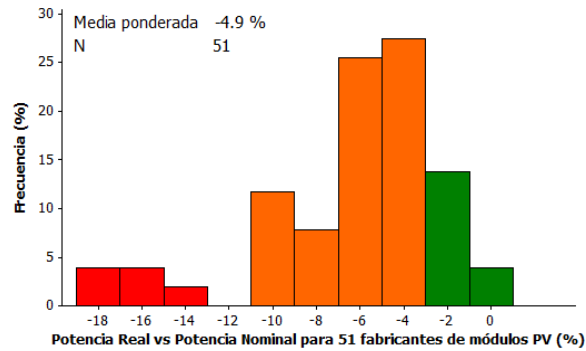


Fig. 3: Histograma de la desviación de la potencia real de los módulos fotovoltaicos respecto a su potencia nominal.

### CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

El objetivo de este trabajo es implementar una herramienta de análisis automático de datos de operación para detectar fallos en instalaciones fotovoltaicas domésticas que disponen de sistemas de monitorización. Para ello se ha realizado el análisis de los datos operativos de 10.650 sistemas fotovoltaicos en Francia y en Bélgica. Globalmente, la orientación de los sistemas fotovoltaicos residenciales causa unas pérdidas energéticas de aproximadamente el 7% respecto a los sistemas fotovoltaicos óptimamente orientados, como suele ser el caso de las centrales solares. Después de un tiempo de exposición promedio de 2 años, el PR promedio es del 76% en Francia y el 78% en Bélgica, y el PI promedio es de 85% en ambos países. Aplicando un escenario de pérdidas se ha detectado que, en promedio, la potencia real de los módulos fotovoltaicos cae un 4,9% por debajo de su potencia nominal correspondiente anunciada en la ficha técnica del fabricante, y que algunas tecnologías muestran hasta un 16% de defecto de producción.

En la actualidad, se está trabajando en métodos de análisis para detectar, ya no sólo fallos debidos a tecnologías presentes en un cierto mercado, sino para identificar también las causas de fallos en instalaciones concretas a lo largo de su vida de operación.

### REFERENCIAS

- [1] Jahn, U. et al. (2004), Operational performance of grid-connected PV systems on buildings in Germany, Progress in Photovoltaics.
- [2] Oozeki, T. et al., (2010), Performance trends in grid-connected photovoltaic systems for public and industrial use in Japan, Progress in Photovoltaics.
- [3] Hay J.E. (2003), Calculating solar radiation for inclined surfaces: Practical approaches, Solar Energy.
- [4] Leloux J. et al. (2012), Review of the performance of residential PV systems in France, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [5] Fraunhofer-Institut Für Solare Energysysteme ISE (2007), Annual Report.