



## ÍNDICES DE COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA.

Javier Vilariño<sup>(a)</sup> e Higinio F. Menéndez<sup>(b)</sup>

(a) Máster universitario en Ingeniería Ambiental. Ingeniero de Caminos. Director de Construcción Antalsis. E.mail: [jvilarino@antalsis.com](mailto:jvilarino@antalsis.com)

(b) Doctor Ingeniero Industrial UAX. E.mail: [hmenemil@uax.es](mailto:hmenemil@uax.es). Tlf: 918109771

### Resumen

Se presenta un análisis detallado de los diferentes índices de comportamiento dinámico de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica y su interrelación basada en el desarrollo de un diagrama de bloques que explica el transcurso de las transformaciones energéticas desde que la radiación solar incide en el plano de los módulos solares hasta que se convierte en energía útil disponible en la red eléctrica.

**Palabras clave:** rendimiento global; productividad final; productividad de referencia; módulo fotovoltaico.

### Abstract

A detailed analysis of the different levels of dynamic performance of grid connected photovoltaic systems and its interface based on the development of a block diagram explaining the course of energy transformation from solar radiation incident on the solar modules until it becomes useful energy available in the mains.

**Keywords:** performance ratio; final yield; reference yield; photovoltaic module.

**SUMARIO:** 1. Introducción. 2. Diferentes conceptos de eficiencia asociados al sistema fotovoltaico. 3. Factores de pérdidas de un sistema fotovoltaico conectado a la red. 4. Índices de comportamiento del sistema fotovoltaico. 5. Conclusiones. 6. Bibliografía.

**SUMMARY:** 1. Introduction. 2. Different concepts about efficiency of photovoltaic systems. 3. Loss factors of a grid connected photovoltaic system. 4. Photovoltaic system performance ratios. 5. Conclusions. 6. Bibliography.

### 1. Introducción

El mercado fotovoltaico español experimentó un crecimiento muy grande a lo largo de los años 2004-2010, incentivado por un conjunto de subvenciones que permitieron la introducción a gran escala de esta fuente de energía renovable en forma de SFCR y sistemas autónomos. En el año 2011 se eliminó el sistema de primas y se produjo un freno en el desarrollo y aplicación de esta tecnología en España. Por este motivo, se impone la necesidad de trabajar estos sistemas con el máximo rendimiento, lo cual se consigue con un adecuado proceso de ingeniería de diseño, selección rigurosa de los componentes que forman los diferentes subsistemas de la instalación y el correspondiente mantenimiento preventivo planificado, acorde con un estricto



seguimiento del comportamiento dinámico de las variables que intervienen en el proceso de captación y transformación de la energía.

Los índices de comportamiento del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica que deben evaluarse son: El índice de producción o productividad del campo fotovoltaico  $Y_A$ , el índice de producción o productividad final del sistema  $Y_f$ , el índice de producción o productividad de referencia  $Y_r$ , las pérdidas de captura del campo fotovoltaico o pérdidas de productividad en el proceso de captación del generador fotovoltaico  $P_{Y_A}$ , las pérdidas de productividad del resto del sistema  $P_{Y_s}$  en el proceso de transformación de la energía de corriente continua a alterna y el coeficiente global de rendimiento del sistema fotovoltaico  $PR$ , también llamado índice de relación de comportamiento.

El objetivo del presente trabajo consiste en realizar un análisis metodológico de los diferentes elementos que influyen en el comportamiento dinámico de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica a través de un diagrama de bloques de todos los subsistemas que lo forman y los índices de comportamiento asociados a cada bloque con sus definiciones derivadas de la norma UNE-EN 61724.

Se añaden dos conceptos no incluidos en la norma: el índice de relación de comportamiento del campo fotovoltaico  $PR_A$  y el índice de relación del comportamiento del resto del sistema  $PR_s$ , que permiten realizar la evaluación de cada una de las partes fundamentales de un sistema fotovoltaico: la transformación de la energía de la radiación solar en energía de corriente continua realizada por el generador fotovoltaico y la transformación a energía de corriente alterna efectuada por el resto del sistema. El efecto útil de esta metodología es que permite identificar la falla en cada subsistema de forma independiente, como resultado de la afectación del índice particular.

## 2. Diferentes conceptos de eficiencia asociados al sistema fotovoltaico

Antes de poner en marcha una instalación fotovoltaica, resulta de máximo interés predecir la cantidad de energía eléctrica que generará el sistema. Esto es un tema complejo y las estimaciones siempre llevan asociadas una gran incertidumbre. Por ello, las especificaciones técnicas dadas por el fabricante del módulo fotovoltaico juegan un papel fundamental y resultan claves en la selección del tipo de módulo para un SFCR.

### 2.1. Eficiencia pico.

Uno de los parámetros más importantes en el diseño y cálculo de la instalación fotovoltaica es la potencia pico,  $P_{m\ CEM}$ , que se define como la potencia máxima del módulo en condiciones estándar de medida (CEM), definidas como temperatura del módulo  $25\ ^\circ\text{C}$ , irradiancia solar  $G_{CEM}=1000\ \text{W}/\text{m}^2$  y distribución espectral correspondiente a una masa de aire AM 1.5G. Al conocer esta potencia y el área del módulo  $A$ , se puede hallar la eficiencia pico,  $\eta_{pico}$ , o eficiencia del módulo en CEM.

$$\text{Eficiencia pico} = \frac{\text{Potencia máxima en CEM}}{G_{CEM} \cdot \text{Área del módulo}} = \frac{P_{m\ CEM}}{1000\ \text{W}/\text{m}^2 \cdot A} \quad (\text{Ec.2.1})$$

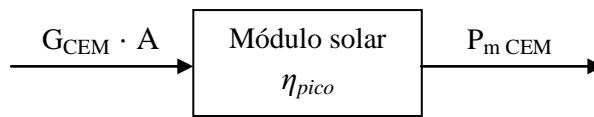


Fig. 2.1 Diagrama de bloque del módulo solar caracterizado por su eficiencia pico.

**2.2. Eficiencia energética.**

También hay que conocer el rendimiento energético del módulo en función del lugar de instalación y de las condiciones climáticas a las que va a estar expuesto. Para esto se emplea la eficiencia energética,  $\eta_{energética}$ , que es la energía total producida por el módulo fotovoltaico en relación con la energía solar que incide en él, durante un periodo de tiempo dado.

$$Eficiencia\ energética = \frac{Energía\ eléctrica\ producida\ en\ un\ año}{Irradiación\ solar\ incidente\ en\ un\ año} = \frac{\int P_m dt}{A \cdot \int G dt} \tag{Ec.2.2}$$

Donde  $P_m$  representa la potencia máxima en condiciones reales de operación. La ecuación (2.2) viene representada por:

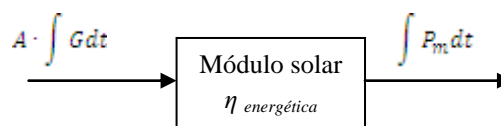


Fig. 2.2 Diagrama de bloque del módulo solar caracterizado por su eficiencia energética.

**2.3. Índice de relación de comportamiento o coeficiente global de rendimiento.**

A partir de las definiciones de los dos tipos de eficiencia definidos anteriormente, se puede obtener una figura de mérito adimensional conocida como coeficiente global de rendimiento, PR, que puede hallarse con la ecuación siguiente:

$$PR = \frac{Eficiencia\ energética}{Eficiencia\ pico} = \frac{\eta_{energética}}{\eta_{pico}} \tag{Ec.2.3}$$

Dependiendo del tipo de módulo, el PR puede variar entre 0,6 y 1. En él se engloban todas las pérdidas de eficiencia que el módulo puede tener por no encontrarse en las condiciones de referencia de laboratorio, es decir, por estar a una temperatura diferente a 25°C, expuesto a niveles de irradiancia distintos a 1.000 W/m<sup>2</sup>, con un cierto grado de suciedad acumulada sobre el vidrio, con un gran porcentaje de radiación difusa, diferente a la del espectro de AM 1,5G y otras causas de pérdidas.

Haciendo uso de la ecuación (2.3), se puede representar un diagrama de bloques equivalente al de la figura 2.2 de la siguiente manera:

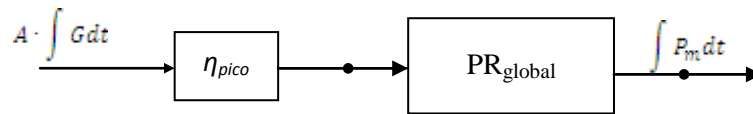


Fig.2.3 Diagrama de bloques del módulo solar en condiciones reales de operación.

Sustituyendo las ecuaciones (2.1) y (2.2) en la ecuación (2.3), se obtiene:

$$PR = \frac{\frac{\int P_m dt}{P_{m\ CEM}}}{\frac{\int G dt}{1000\ W/m^2}} \tag{Ec.2.4}$$

O sea,

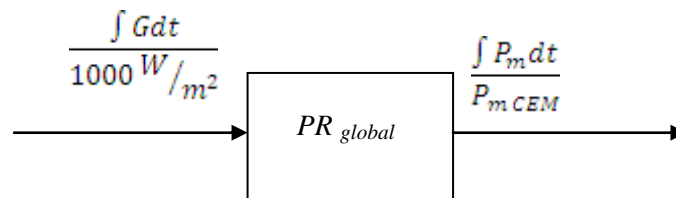


Fig.2.4 Diagrama de bloque del módulo solar caracterizado por su rendimiento global.

El numerador de la ecuación (2.4) se conoce como productividad energética del sistema o productividad final  $Y_F$ , definida como la energía eléctrica producida dividida entre la potencia pico. Esta magnitud se mide en kWh/kW<sub>p</sub>, mientras que el denominador representa la productividad de referencia  $Y_R$ , definida como la irradiación total sobre el plano de los módulos respecto a la irradiancia solar en condiciones estándar de medida (1.000 W/m<sup>2</sup>).

Por tanto, otra manera de expresar el coeficiente global de rendimiento PR viene dada por:

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \tag{Ec.2.5}$$

Equivalente al siguiente diagrama de bloques:

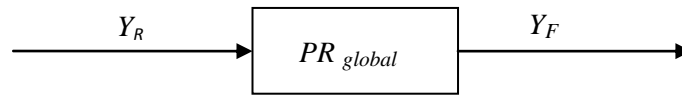


Fig. 2.5 Diagrama de bloque del módulo solar caracterizado por parámetros normalizados.

A menudo se habla también del PR, la productividad, o la eficiencia energética del sistema fotovoltaico completo, en lugar del módulo. En este caso, además de las pérdidas de eficiencia en el módulo, se incluyen otras pérdidas asociadas al sistema fotovoltaico, como por ejemplo pérdidas en el cableado de CA, en el inversor, en el transformador, etc.

El SFCR puede descomponerse en los diferentes subsistemas: generador fotovoltaico, inversor y transformador de baja a media potencia.

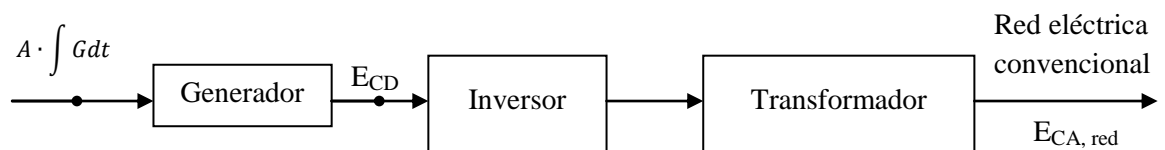


Fig. 2.6 Subsistemas del SFCR.

Las variables que describen el rendimiento energético de un módulo son función de la ubicación del SFCR y del tipo de instalación. Además de ello, deben tenerse en cuenta las especificaciones técnicas de los subsistemas dadas por el fabricante, que permiten realizar estimaciones de la energía producida por el conjunto y comparar el comportamiento de diferentes tipos de módulos, o tecnologías, ante unas condiciones climáticas dadas. Estos datos son los coeficientes o curvas de dependencia de la eficiencia de los módulos con la temperatura y con la irradiancia.

### 3. Factores de pérdidas de un sistema fotovoltaico conectado a la red

La energía producida por una instalación fotovoltaica, en ausencia de pérdidas, debería coincidir con la irradiación incidente en el plano del generador fotovoltaico; sin embargo, en la realidad existen pérdidas energéticas debidas a diversos factores presentes, en mayor o menor grado, en cualquier instalación fotovoltaica que hacen que la energía inyectada a la red sea sensiblemente inferior a la energía solar incidente.

Los principales factores de pérdidas energéticas de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica son:

$FP_M$ : Factor de pérdidas de mismatch o de conexionado.

$FP_{PS}$ : Factor de pérdidas por la deposición de polvo y suciedad.

$FP_{AE}$ : Factor de pérdidas angulares y espectrales.

$FP_{Somb}$ : Factor de pérdidas por sombra.

$FP_{Ohm DC}$ : Factor de pérdidas de potencia en los cables del circuito de corriente continua.



$FP_{Temp}$ : Factor de pérdidas por variación de la temperatura de la célula.  
 $FP_{DEG}$ : Factor de pérdidas por degradación.  
 $FP_{PN}$ : Factor de pérdidas por no cumplimiento de la potencia nominal.  
 $FP_{SPMP}$ : Factor de pérdidas por seguimiento del punto de máxima potencia.  
 $FP_{INV}$ : Factor de pérdidas del inversor.  
 $FP_{Ohm AC}$ : Factor de pérdidas de potencia en los cables del circuito de corriente alterna.  
 $FP_{Transf}$ : Factor de pérdidas del transformador.  
 $FP_{Otros}$ : Factor de pérdidas debidas a otros motivos, tales como la disminución del rendimiento por baja irradiancia, pérdidas por paradas del inversor por mantenimiento, averías o mal funcionamiento, etc.

La figura 2.6 asociada a los factores de pérdidas de los diferentes componentes del sistema fotovoltaico puede representarse en el siguiente diagrama de bloques:

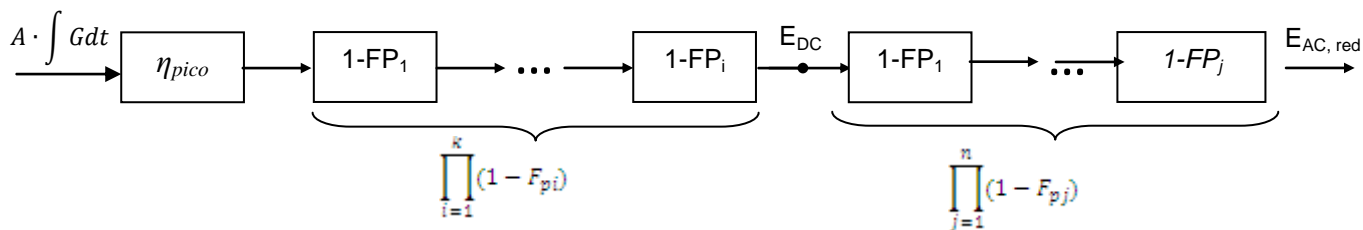


Fig. 3.1 Diagrama de bloques de un SFVR con los factores de pérdidas.

- $FP_i$  son los factores de pérdidas del generador fotovoltaico.
- $FP_j$  son los factores de pérdidas del resto del sistema.

#### 4. Índices de comportamiento del sistema fotovoltaico.

Los sistemas fotovoltaicos de distintas configuraciones y en distintas localizaciones pueden compararse fácilmente mediante la evaluación de sus índices de comportamiento del sistema normalizados, tales como los índices de producción, pérdidas y rendimiento. Los índices de producción son cantidades de energía normalizadas a la potencia nominal del campo fotovoltaico. Los rendimientos del sistema se normalizan al área del campo fotovoltaico y las pérdidas son las diferencias entre los índices de producción correspondientes.

En condiciones normalizadas, respecto a las CEM, aparecen los conceptos de  $Y_R$ ,  $Y_F$  e  $Y_A$ , que corresponden al diagrama de bloques siguiente:

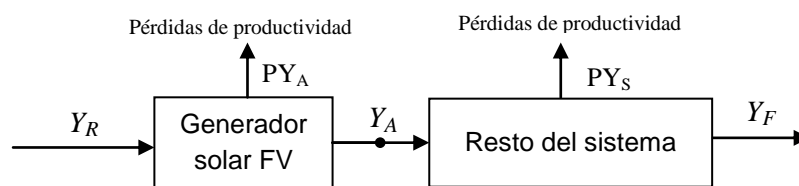


Fig. 4.1 Productividades del generador FV y del resto del sistema.



- *Pérdidas de productividad de captura del generador fotovoltaico ( $PY_A$ ):* se deben exclusivamente al generador del sistema y son consecuencia de tener una temperatura en las celdas distinta a 25 °C, caídas de tensión en el cableado, suciedad, sombreado...
- *Pérdidas de productividad del resto del sistema ( $PY_S$ ):* causadas por ineficiencias de los subsistemas (inversor y transformador), pérdidas en el cableado de corriente alterna y debidas a la falta de disponibilidad del sistema y conexión de la red por diferentes motivos: parada de equipos por mantenimiento, roturas o problemas en la red, entre otros.

Equivalente a:

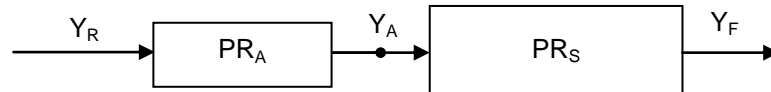


Fig. 4.2 Coeficientes de rendimiento del generador fotovoltaico y del resto del sistema.

$$Y_R - Y_A = PY_A \quad (\text{Ec.4.1})$$

$$Y_A - Y_F = PY_S \quad (\text{Ec. 4.2})$$

$$PR_A = \frac{Y_A}{Y_R} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

$$PR_S = \frac{Y_F}{Y_A} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

$$PR_A \cdot PR_S = \frac{Y_A}{Y_R} \cdot \frac{Y_F}{Y_A} = \frac{Y_F}{Y_R} = PR \quad (\text{Ec.4.5})$$

$$Y_F + PY_S + PY_A = Y_F + Y_A - Y_F + Y_R - Y_A = Y_R \quad (\text{Ec.4.6})$$

Donde:

- $Y_F$  es la productividad final,
- $Y_R$  es la productividad de referencia,
- $Y_A$  es la productividad del generador fotovoltaico,
- $PY_A$  son las pérdidas de productividad en el proceso de captación,
- $PY_S$  son las pérdidas de productividad del resto del sistema,
- $PR_A$  es el coeficiente de rendimiento parcial del generador fotovoltaico,
- $PR_S$  es el coeficiente de rendimiento parcial del resto del sistema y
- $PR$  es el coeficiente de rendimiento global.





## 5. Conclusiones

- El análisis de los sistemas fotovoltaicos a partir de su desarrollo en diagrama de bloques permite una mejor comprensión del transcurso de los diferentes procesos de transformación de la energía desde su captación, transformación y conversión en energía útil. Con ello se facilita la interpretación de los diferentes conceptos expresados en la norma UNE-EN 61724 en relación con los índices de comportamiento del sistema.
- Se ha obtenido con rigor científico el origen del concepto: coeficiente de rendimiento de los sistemas fotovoltaicos como una relación entre la eficiencia energética y la eficiencia pico.
- El álgebra de bloques justifica la introducción del coeficiente de rendimiento del arreglo fotovoltaico y del resto del sistema por separado, lo que ayuda a la detección de fallas en cada una de las 2 partes fundamentales del sistema fotovoltaico. Estos conceptos no están explícitamente descritos en la literatura especializada en el tema.

## 6. Bibliografía

- [1] BETTS, T. et al. (2005). Consideration of error sources for outdoor performance testing of photovoltaic modules. 20th EUPVSEC, Barcelona, España, pp. 2127-2130.
- [2] DECKER B., JAHN, U. (1997). Performance of 170 grid connected PV plants in Northern Germany-analysis of yields and optimization potentials. Solar Energy, vol.59, Nº 4, pp. 127-133.
- [3] DREWS, A. et al. (2007). Monitoring and remote failure detection of grid-connected PV systems based on satellite observations. Solar Energy, Vol. 81, Nº 4, pp. 548-564.
- [4] DUNLOP, E., HALTON, D. (2006). The performance of crystalline silicon photovoltaic solar modules after 22 years of continuous outdoor exposure. Progress in photovoltaics: Research and Applications, Vol. 14, pp. 53-64.
- [5] IEC Standard 61724: 1998. Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis. Geneva, Switzerland.
- [6] IEC Standard 60904-2: 2015. Photovoltaic devices-Part 2: Requirements for photovoltaic reference devices.
- [7] IEC Standard 60904-6: A1:1998. Photovoltaic devices-Part 6: Requirements for reference solar modules.
- [8] JAHN, U & NASSE, W. (2004). Operational performance of grid-connected PV systems on buildings in Germany. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 12, Nº 6, pp. 441-448.
- [9] KYMAKIS, E., KALYKAKIS, S. & PAPAZOGLU, T.M. (2009). Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete. Energy Conversion and Management. Vol. 50, pp. 433-438.





- 
- [10] MARION, B. et al. (2005). Performance parameters for grid-connected PV systems. Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1601-1606.
  - [11] SIDRACH DE CARDONA, M. et al. (1999). Performance analysis of a grid connected photovoltaic system. Energy, 24(2), 93-102.
  - [12] ZHOU, W., YANG, H., & FANG, Z. (2007). A novel model for photovoltaic array performance prediction. Applied Energy. Vol. 84, pp 1187-1198.