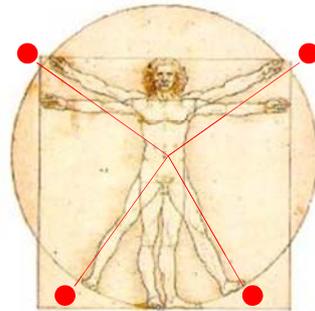


# TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

*Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*

VOLUMEN XV. AÑO 2017

SEPARATA



## ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A RED DE 10 MW, EXCLUYENDO EL EFECTO DE LA TEMPERATURA

**David Varo Higinio F. Menéndez**



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO

Escuela Politécnica Superior  
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: David Varo Higinio F. Menéndez  
Mayo, 2017.

<http://www.uax.es/publicacion/analisis-del-rendimiento-de-un-sistema-fotovoltaico-conectado-a-red-de.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnologi@ y desarrollo*  
Escuela Politécnica Superior.  
Universidad Alfonso X el Sabio.  
28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).  
ISSN: 1696-8085  
Editor: Javier Morales Pérez – [tecnologia@uax.es](mailto:tecnologia@uax.es)

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

# **ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A RED DE 10 MW, EXCLUYENDO EL EFECTO DE LA TEMPERATURA.**

**David Varo(a) e Higinio F. Menéndez(b)**

(a)Ingeniero de Caminos. Profesor coordinador Universidad Alfonso X, el Sabio. E.mail: dvaronav@uax.es. Tel.: 918109243

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

## **RESUMEN**

El artículo consiste en estudiar el rendimiento de un Sistema Fotovoltaico Conectado a Red al quitar el efecto de la temperatura. Los datos se toman de los 16 centros de transformación (CT) de una central fotovoltaica de 10 MW ubicados en Córdoba, durante el año 2013. Se ha calculado el índice de relación de comportamiento (PR) influenciado por la temperatura y el PR compensado, excluyendo esta influencia de la temperatura, para la franja horaria diaria de cada mes y de cada uno de los 16 CT comprendida entre 2 horas antes del mediodía solar y 2 horas después, cada diez minutos.

**PALABRAS CLAVE:** ÍNDICE DE RELACIÓN DE COMPORTAMIENTO, TEMPERATURA, SISTEMA FOTOVOLTAICO.

## **ABSTRACT**

The article consists of studying the performance of a grid-connected photovoltaic system by removing the effect of temperature. The data are taken from the 16 transformation centers of a 10 MW photovoltaic plant located in Cordoba during the year 2013. The temperature-influenced PR and the compensated PR, excluding this influence of the temperature, for the fringe Daily time of each month and each of the 16 TCs between 2 hours before solar noon and 2 hours later, every ten minutes.

**KEYWORDS:** PERFORMANCE RATIO, TEMPERATURE, PHOTOVOLTAIC SYSTEM

**SUMARIO:** 1. Introducción. 2. Parámetros para el cálculo de PR. 3. Metodología de cálculo de PR. 4. Metodología de cálculo de PR compensado. 5. Variación mensual de PR. 6. Variación mensual de PR compensado. 7. Diagrama de caja y bigotes. 7.1. Conceptos básicos. 7.2. Diagrama de caja y bigotes de los valores de PR mensuales. 7.3. Diagrama de caja y bigotes de los valores de PR compensado mensuales. 8. Conclusiones. 9. Bibliografía.

**SUMMARY:** 1. Introduction. 2. Parameters for calculating PR. 3. Methodology of calculation of PR. 4. Calculation methodology of PR compensated. 5. Monthly variation of PR. 6. Monthly variation of compensated PR. 7. Box and whiskers diagram. 7.1. Basic concepts. 7.2. Box and whiskers diagram of the monthly PR values. 7.3. Box and whiskers diagram of monthly compensated PR values. 8. Conclusions. 9. Bibliography.

## 1. Introducción.

Existen numerosos métodos para evaluar el rendimiento de los Sistemas Fotovoltaicos.

Interesa determinar y evaluar el rendimiento y las características de un sistema de energía solar en tiempo real para el funcionamiento y la planificación del mantenimiento, puesta en servicio, las garantías de rendimiento y para la toma de decisiones de inversión.

Las compañías de monitorización están desarrollando métodos de análisis de datos para procesar datos en tiempo real para sus sistemas específicos y medidas de rendimiento. Sin embargo, una comprobación de las lecturas de las medidas utilizadas comúnmente por las empresas constató que varios métodos analíticos se utilizan para calcular la misma medida o están utilizando un método analítico con resultados variados debido al entorno del sistema. Estos dos casos son problemáticos porque se obtienen conclusiones incorrectas.

Se puede medir el rendimiento de un sistema FV de las siguientes formas:

- PR. El índice de relación de comportamiento, indica el efecto global de las pérdidas sobre la potencia del campo FV debido a la temperatura del campo FV, a una incompleta utilización de la irradiación y a los fallos o ineficiencias de los componentes del sistema.
- PRcompensado. Relación de PR corregido en función de la temperatura utilizando la temperatura media del módulo.
- Índice de Rendimiento de Potencia (PPI). Es la potencia instantánea real (CA) [kW] dividida por la potencia instantánea esperada (CA) [kW].
- Índice de Rendimiento Energético (EPI-SAM) de la energía AC real de kWh dividida por la energía AC en kWh esperada, determinada a partir de un modelo FV aceptado, tal como SAM, usando datos climáticos reales y factores supuestos.
- Índice de Rendimiento Energético (EPI-REGRESIÓN) de la energía AC real de kWh dividida por la energía AC de kWh esperada según se determina a partir de una ecuación de regresión polinómica con coeficientes estimados a partir de los datos operativos y climáticos reales recogidos durante el período de formación del modelo.

El índice de relación de comportamiento (PR), definida en la norma IEC61724, es una medida comúnmente utilizada para el cálculo del rendimiento en un Sistema Fotovoltaico Conectado a Red.

Por eso vamos a centrarnos en el estudio de la variación del PR debido a la temperatura.

Esta influencia provoca un grado de incertidumbre en torno al 15% a 20%<sup>1</sup>

Por ejemplo, en casos con baja temperatura e irradiación moderada (como en un invierno tardío) los valores de PR son más altos que en los casos con alta temperatura e irradiación moderada (tal como a finales del verano).

Normalmente, el PR decrece en la primavera, lo que podría ser malinterpretado como un sistema degradante. Los datos horarios también varían de la mañana a la tarde, lo cual es difícil de interpretar.

Además, el PR es más apropiado para orientar un sistema específico o para comparar sistemas en ubicaciones geográficas similares. Si esto no ocurre, se llegarían a conclusiones incorrectas.

## 2. Parámetros para el cálculo del PR

El índice de relación de comportamiento PR se define como un factor de rendimiento que considera las pérdidas energéticas asociadas a los rendimientos de conversión DC/AC y de seguimiento del punto de máxima potencia del inversor y al hecho de que el rendimiento de las células solares es inferior al que indica el valor de su potencia nominal, debido a que la temperatura de operación suele ser notablemente superior a 25 °C; y es el cociente entre el índice de producción final del sistema FV o “Final Yield”, y el índice de producción de referencia o “Referente Yield”.

Es la relación entre la energía generada y la energía disponible.

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} [1]$$

Donde:

El índice de producción final del sistema FV es la potencia neta de salida dividida por la potencia nominal (dc) que viene reflejada en la placa de características del módulo fotovoltaico solar. Representa el número de horas que debería de funcionar a esa potencia para proporcionar dicha potencia de salida.

Es la energía útil anual producida por el sistema en un cierto período de tiempo por unidad de potencia instalada, expresada en kWh/kWp.

---

<sup>1</sup> Morki, James y Cunningham, Joe, PV System Performance Assessment, SunSpec Alliance, 2014, pp. 9.

$$Y_F = \frac{E_{AC,red}}{P_{pico}} [2]$$

Y el índice de producción de referencia es la irradiación solar anual incidente en el plano del generador fotovoltaico,  $H_a(\alpha, \beta)$ , expresada en kWh/m<sup>2</sup>, respecto de la irradiancia en condiciones estándar ( $G^*$  de 1 kW/m<sup>2</sup>,  $T^a$  de 25°C). Expresada en horas.

$$Y_R = \frac{H_a(\alpha, \beta)}{G^*} [3]$$

### 3. Metodología de cálculo de PR.

Se han tomado una serie de datos en una central fotovoltaica de la provincia de Córdoba. Esta central está formada por 16 centros de transformación. La duración de la toma de datos es el año 2013.

De los datos obtenidos durante los días del periodo de toma, durante las horas de sol, cada diez minutos, se obtiene:

- La potencia de cada uno de los inversores de cada centro de transformación.
- Medidas de la Temperatura ( $T^a$ ) (3).
- Medidas de Irradiancia solar (3).

Y se calculan los siguientes parámetros para cada uno de los centros de transformación:

- La suma de las potencias de los inversores.
- El cociente,  $Y_F$ , entre el inversor suma y la potencia nominal del grupo
- La temperatura media de las 3 temperaturas medidas.
- La Irradiancia media.
- $Y_R$  expresada como (Irradiancia media / 1000)
- El índice de relación de comportamiento, PR expresado como ( $Y_F / Y_R$ ).

Con objeto de trabajar con los datos de mayor irradiación solar se ha calculado la hora del mediodía Solar en el sitio de la instalación. Una vez obtenidos estos valores, se centra el estudio en la franja horaria diaria de cada mes y de cada uno de los 16 CT comprendida entre 2 horas antes del mediodía solar y 2 horas después.

Se ha calculado el PR medio de cada día en los 16 CT.

### 4. Metodología de cálculo del PR compensado.

A partir de los valores de  $Y_F$  calculados en el apartado anterior se calcula  $Y_F$  compensado mediante la siguiente fórmula:

$$Y_{Fcomp} = \frac{Y_F}{1 + \gamma \Delta T_{med}} [4]$$

Siendo

$Y_F$  el índice de producción final del sistema FV,

$\Delta T_{med}$  es la diferencia de la temperatura del módulo menos 25°C.

y  $\gamma$  el coeficiente de variación de la potencia con la temperatura, dado por el fabricante de los módulos.

Se toma para el cálculo, el valor de la media ponderada de los 3 tipos de módulos solares (-0,44%/K).

- Solarwatt: -0,46%/K.
- Canadian Solar: -0,43%/K.
- Isofoton: -0,44%/K.

Y se calcula el PR compensado a partir de la siguiente fórmula:

$$Rp_{comp} = \frac{Y_{Fcomp}}{Y_R} [5]$$

Donde  $Y_R$  es el índice de producción de referencia.

### 5. Variación mensual de PR.

A partir de los valores de PR medio diario calculados en el apartado 3 se obtienen los PR medios mensuales.

Estos datos se muestran en las figura 5.1.

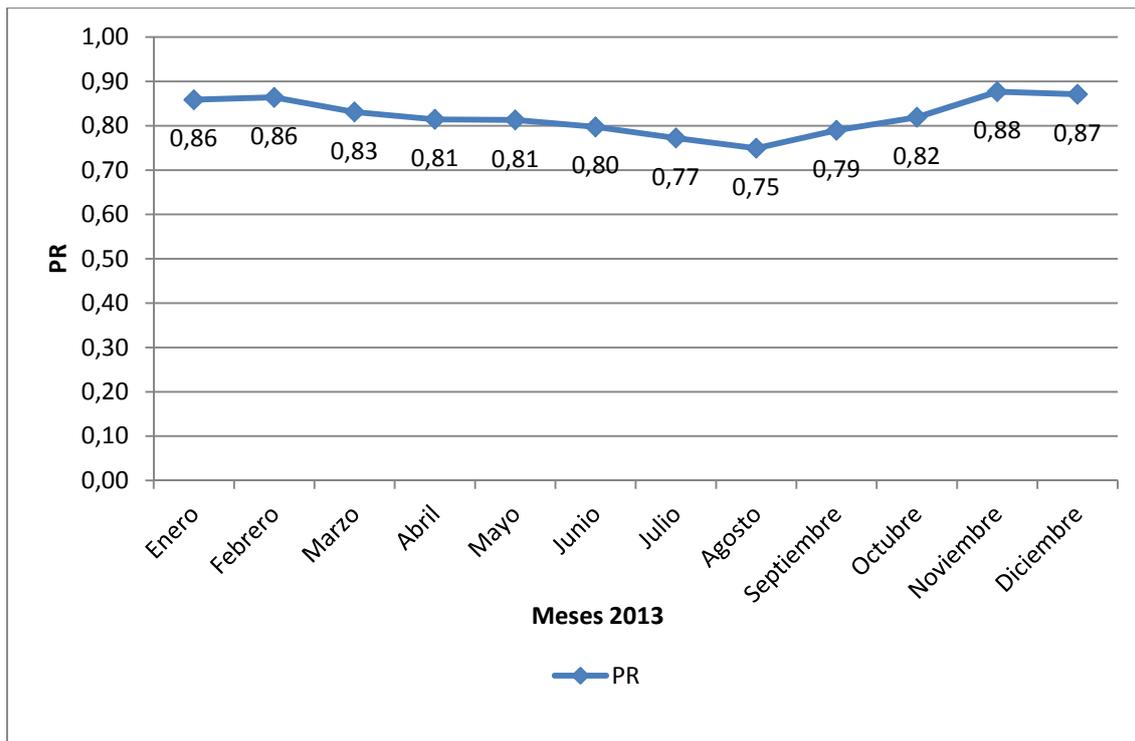


Fig. 5.1 Variación mensual a lo largo de 2013 del PR

A partir de los valores de PR medio diario calculados en el apartado 3 se crea la figura 5.2:

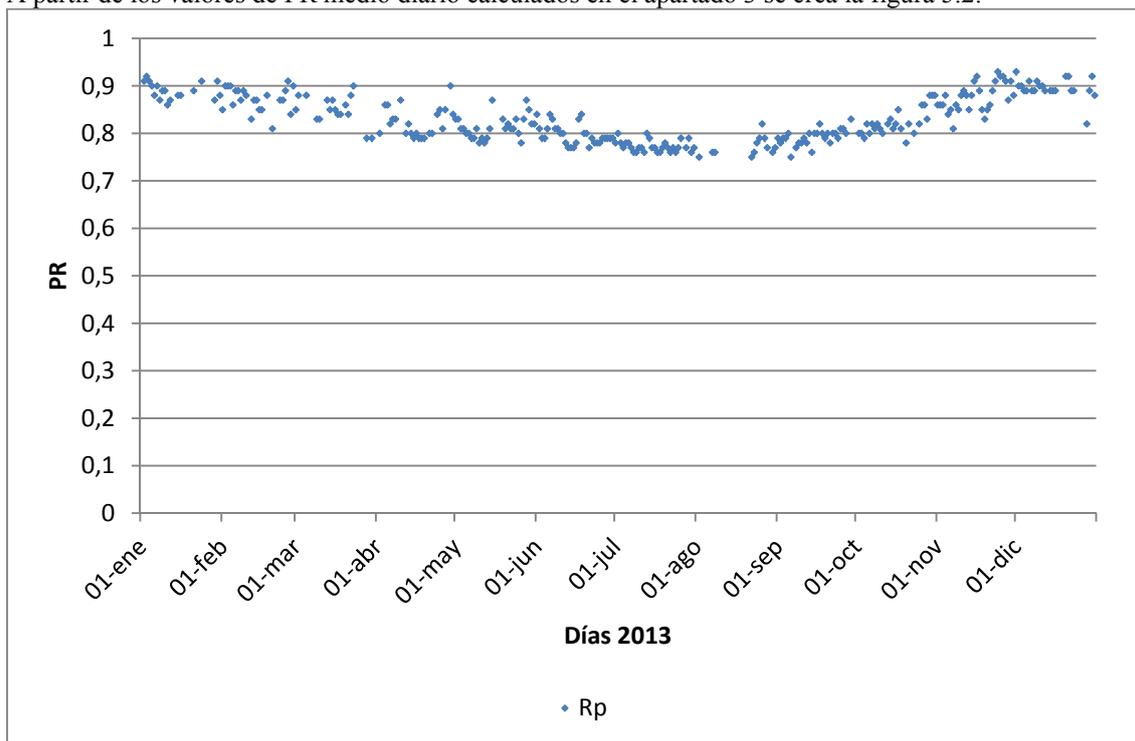


Fig. 5.2 Variación diaria a lo largo de 2013 del PR

Se puede observar que el PR va disminuyendo desde los meses más fríos del comienzo del año hasta alcanzar los valores menores en los meses más calurosos, volviéndose a incrementar al final del año con la llegada del otoño-invierno.

Estudiando la fig. 5.1 se ve claramente que la temperatura es mucho más influyente en los meses de más calor (mayo, junio julio, agosto y septiembre) que en los meses más fríos. En estos meses fríos la temperatura afecta muy poco<sup>2</sup>.

Por lo tanto, se ve que el valor de PR está influenciado por la temperatura, por lo que hay errores o incertidumbres a la hora de evaluar el rendimiento del sistema.

## 6. Variación mensual de PR compensado.

A partir de los valores de PR compensado medio diario calculados en el apartado 3 se obtienen los PR compensados medios mensuales.

Estos datos se muestran en la figura 6.1.

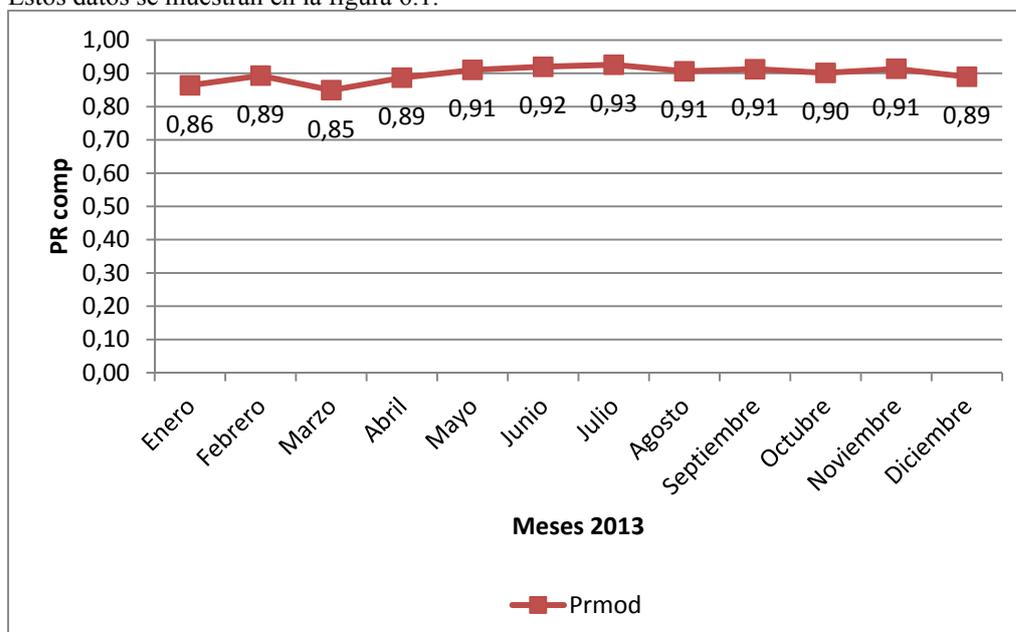


Fig. 6.1 Variación mensual a lo largo de 2013 del PR compensado por temperatura.

A partir de los valores de PR medio diario calculados en el apartado 3 se crea la figura 6.2:

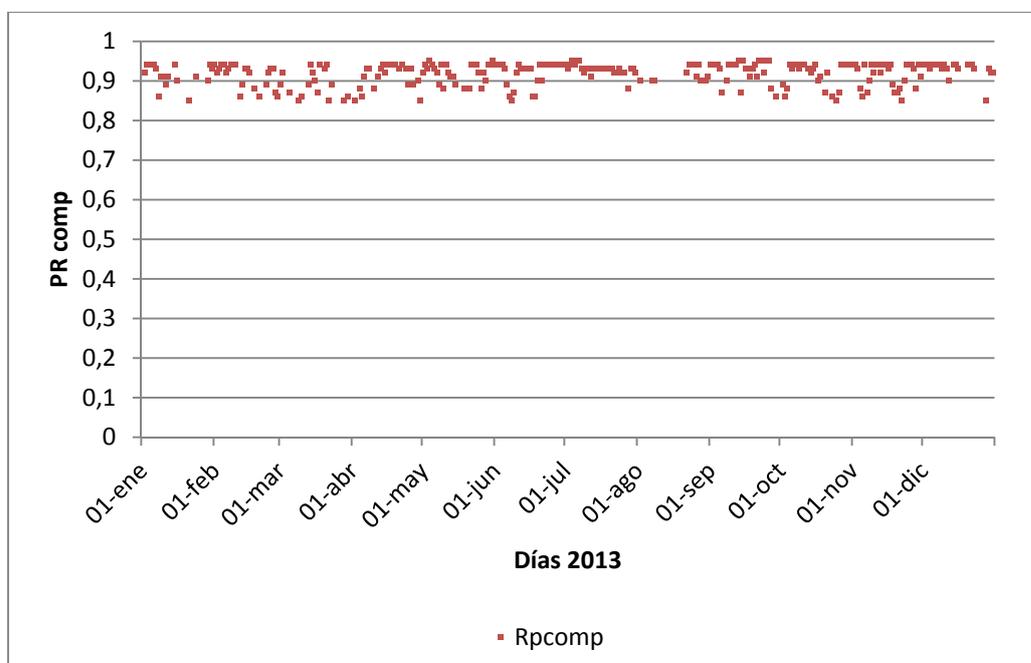


Fig. 6.2 Variación diaria a lo largo de 2013 del PR compensado por temperatura

<sup>2</sup> Varo, D. y Menéndez, H., Influencia de la temperatura en un sistema fotovoltaico conectado a red de 10 MW, Fundación Conama, 2016, pp. 20.

En la figura 6.2 se observa que el valor de PR compensado es mucho más constante que el valor de PR sin compensar, es decir, que el valor de PR influenciado por la temperatura.

La compensación de la temperatura de la celda se puede aplicar al PR básico para ajustar la potencia de corriente continua de las condiciones de prueba estándar (STC), sin embargo, ya que la temperatura varía continuamente con la irradiancia y el clima, se debe calcular un promedio diario de temperatura.

$$Rp_{comp} = \frac{\frac{\text{Energía producida}}{\text{Potencia}_{DC} \cdot K_T}}{Y_R} \quad [6]$$

Donde  $K_T$  es  $1 + \gamma \Delta T_{med}$ ,

Siendo:

$\Delta T_{med}$  es la diferencia de la temperatura del módulo menos 25°C.

y  $\gamma$  el coeficiente de variación de la potencia con la temperatura, que como se indica en el apartado 4 tiene un valor de -0,44%/K.

## 7. Diagrama de caja y bigotes.

### 7.1 Conceptos básicos.

Los diagramas de Caja y Bigotes consisten en una presentación visual que describe al mismo tiempo la dispersión y la simetría de una distribución.

Se representan los tres cuartiles,  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  y los valores mínimo y máximo de los datos sobre un rectángulo alineado horizontal o verticalmente. En nuestro caso los hemos alineado verticalmente.

$Q_1$  es el valor que supera el 25% de los valores de la distribución.

$Q_2$  es la mediana de los valores de la distribución.

$Q_3$  es el valor que sobrepasa al 75% de los valores de la distribución.

Su representación es una caja rectangular. En ella los lados más largos son el recorrido intercuartílico. Este rectángulo está dividido por un segmento horizontal que indica donde se posiciona la mediana y por lo tanto su relación con  $Q_1$  y  $Q_3$ . Esta caja se ubica a escala sobre un segmento que tiene como extremos los valores mínimo y máximo de la variable. Las líneas que sobresalen de la caja se llaman bigotes.

El bigote inferior representa al colectivo entre el mínimo y el cuartil primero. La parte inferior de la caja representa el colectivo entre el cuartil primero y la mediana. La parte superior de la caja representa el colectivo entre la mediana y el cuartil tercero. El bigote superior representa el colectivo entre el cuartil tercero y el máximo.

### 7.2 Diagrama de caja y bigotes de los valores de PR mensuales.

Con los valores de PR de cada mes de 2013 se ha hecho el diagrama de caja y bigotes. Los resultados se muestran en la figura 7.1:

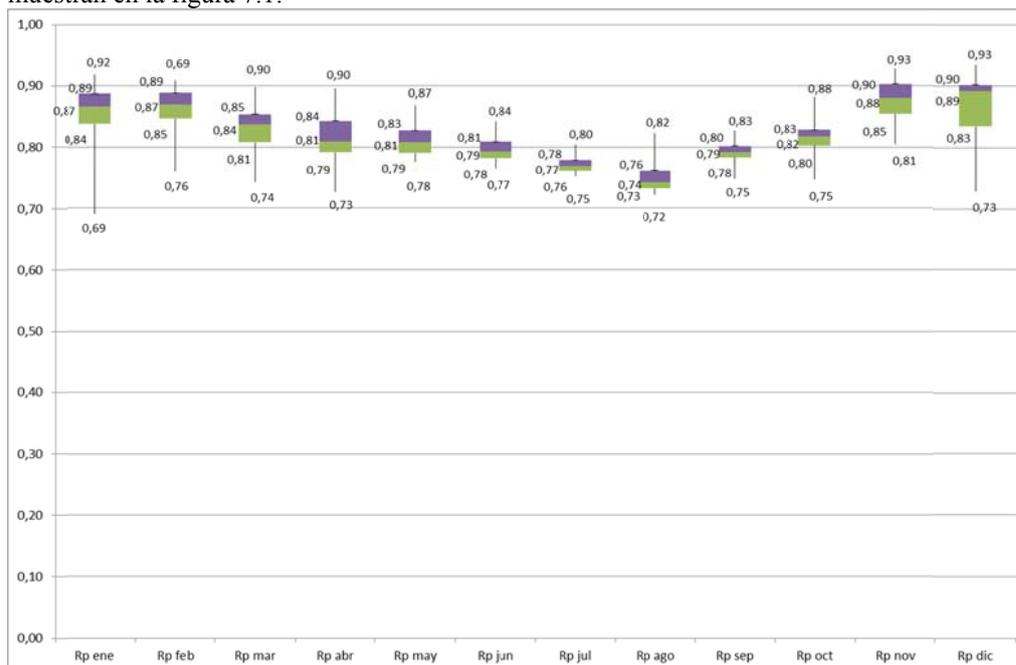


Fig. 7.1 Diagrama caja y bigotes para valores mensuales de PR.

Puede observarse que la mediana (línea entre el color morado y el verde) de los datos de PR tomados va disminuyendo su valor en los meses de más calor. La figura es muy similar a las Fig. 5.1 y 5.2. Indica que los valores de PR van decreciendo afectados por el aumento de la temperatura.

Además el rango intercuartílico (cuartil tercero menos el primero) se va haciendo más pequeño a medida que la temperatura es mayor (meses de verano), lo que indica que el 50% de las medidas de PR están entre dos valores más cercanos. Esto no ocurre en meses más fríos.

El 50% de los valores de PR en los meses calurosos está comprendido entre dos valores muy cercanos. En meses fríos estos valores están más separados.

En la mayoría de los meses fríos la parte inferior de la caja (color verde) es mayor que la superior (color morado). Esto indica que los valores de PR comprendidos entre el 25 y el 50% de las medidas están más dispersas que entre el 50 y el 75%. En los meses cálidos ocurre al contrario.

Los bigotes inferiores en los meses fríos son mayores que los bigotes superiores. Esto indica que el 25% de los valores mayores de PR están más concentrados que el 25% de los menores.

En los meses calurosos ocurre al contrario, el 25% de los valores menores están más concentrados que los mayores.

### 7.3 Diagrama de caja y bigotes de los valores de PR compensado mensuales.

Con los valores de PR compensado de cada mes de 2013 se ha hecho el diagrama de caja y bigotes. Los resultados se muestran en la figura 7.2:

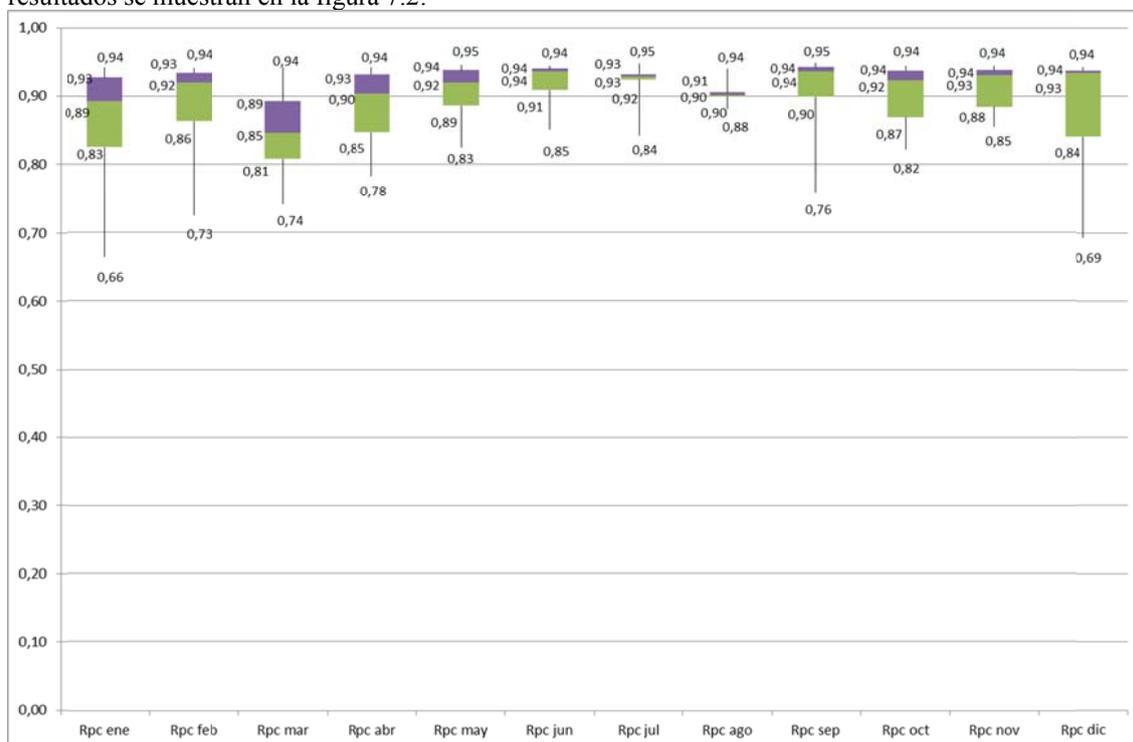


Fig. 7.2 Diagrama caja y bigotes para valores mensuales de PR compensado.

Puede observarse que la mediana de los datos de PR compensado tomados mantiene prácticamente constante su valor. La figura es muy similar a las Fig. 6.1 y 6.2. Indica que los valores de PR compensado se mantienen constantes.

El rango intercuartílico se va haciendo más pequeño a medida que la temperatura es mayor (meses de verano), lo que indica que el 50% de las medidas de PR compensado están entre dos valores más cercanos. Esto no ocurre en meses más fríos.

El 50% de los valores de PR compensado en los meses calurosos está comprendido entre dos valores muy cercanos. En meses fríos estos valores están más separados.

En la mayoría de los meses la parte inferior de la caja es mayor que la superior. Esto indica que los valores de PR compensado comprendidos entre el 25 y el 50% de las medidas están más dispersas que entre el 50 y el 75%.

Los bigotes inferiores son mayores que los bigotes superiores prácticamente siempre. Esto indica que el 25% de los valores mayores de PR están más concentrados que el 25% de los menores.

## 8. Conclusiones.

El PR está directamente influenciado por la producción de energía (kWh), que está directamente influenciada por la irradiación ( $\text{kWh/m}^2$ ) e inversamente influenciada por la temperatura del módulo. Debido a que la ecuación básica de PR considera la irradiación, los cambios en la irradiación tendrán poco efecto directo sobre la PR. Sin embargo, dado que los cambios en la temperatura no se contabilizan, el PR disminuirá a medida que aumente la temperatura.

Con el fin de utilizar una medida que sea más indicativa de la condición del sistema en lugar del diseño o condiciones ambientales que están fuera del control del propietario, se agregan factores de compensación a la ecuación del PR, dando lugar a PR compensado por temperatura.

Otros factores además de la temperatura también afectan al PR y también están fuera del control del propietario, tales como diseño, sombreado, degradación, equilibrio del sistema, y podrían ser incluidos como factores de compensación. Sin embargo no es práctico estimar estos factores para compensar PR. Por lo tanto, si se desea una compensación distinta de la temperatura, es más práctico calcular el Índice de Rendimiento Energético a Largo Plazo (EPI) utilizando la irradiación y la temperatura reales en uno de los modelos aceptados, como SAM o modelo de regresión.

Si es necesario incluir factores adicionales de compensación, tales como el equilibrio de pérdidas del sistema, el ángulo de incidencia, la suciedad, el sombreado, la degradación a largo plazo, etc., es más práctico incluirlos en el Índice de Rendimiento Energético (EPI) utilizando modelos aceptados, como SAM, para incorporar los factores de compensación en lugar de complicar el PR.

Si el propósito es sólo evaluar un sistema específico, el análisis de tendencias utilizando un PR compensado por temperatura es razonable porque no está influenciado por la precisión o la incertidumbre de un modelo FV.

## 9. Bibliografía.

- IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2011): Instalaciones de Energía Solar Fotovoltaica. Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red.
- IEA International Energy Agency (1998): IEC Standard 61724. Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis, Geneva, Switzerland.
- MARION, Bill, (2005): Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems, 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition, Lake Buena Vista, Florida.
- MORKI, James. Cunningham, Joe (2014): PV System Performance Assessment, SunSpec Alliance, San José, EE.UU.
- NOFUENTES, Gustavo. (2011). Seminarios PV in Bloom. Estimacion de la energia generada por un sistema fotovoltaico conectado a la red. Recuperado de [http://www.ujaen.es/investiga/solar/documentacion\\_pv\\_in\\_bloom/Seminarios%20PV%20in%20Bloom.%20Estimacion%20de%20la%20energia%20generada..pdf](http://www.ujaen.es/investiga/solar/documentacion_pv_in_bloom/Seminarios%20PV%20in%20Bloom.%20Estimacion%20de%20la%20energia%20generada..pdf)
- VARO, David. y MENÉNDEZ, Higinio. (2016): Influencia de la temperatura en un sistema fotovoltaico conectado a red de 10 MW, Fundación Conama, Madrid.