

# Análisis estadístico del índice de relación de comportamiento del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica

*Statistical Analysis of the Grid Connected Photovoltaic System Performance Ratio*

*MSc. Javier Vilariño-García [jvilarino@antalsis.com](mailto:jvilarino@antalsis.com), Dr. Higinio F. Menéndez-Milanés*

*Universidad Alfonso X El Sabio, Madrid, España*

## Resumen

Se presenta una metodología basada en la aplicación del análisis de varianza y del método de Tukey a un conjunto de datos de irradiación solar sobre el plano de los módulos fotovoltaicos y los correspondientes valores de potencia entregada a la red eléctrica en intervalos de tiempo de 10 minutos desde la salida a la puesta del sol durante las 52 semanas del año 2013. Estos datos se obtienen a través de un sistema de monitorización ubicado en una central fotovoltaica de 10 MW de potencia nominal ubicada en Córdoba, que consta de 16 centros de transformación y 98 inversores. La aplicación del método comparativo entre las medias del índice de comportamiento de los centros de transformación permite detectar con un análisis de varianza si existe diferencia significativa en al menos un valor medio respecto al resto a un nivel de significación del 5% y posteriormente mediante la prueba Tukey, determinar cuál o cuáles son los centros de transformación que están por debajo del valor medio esperado debido a una falla que debe ser detectada y corregida.

**Palabras clave:** *índice de relación de comportamiento del sistema, análisis de varianza, sistema fotovoltaico.*

---

## Abstract

A methodology based on the application of variance analysis and Tukey's method to a data set of solar radiation in the plane of the photovoltaic modules and the corresponding values of power delivered to the grid at intervals of 10 minutes presents from sunrise to sunset during the 52 weeks of the year 2013. These data were obtained through a monitoring system located in a photovoltaic plant of 10 MW of rated power located in Cordoba, consisting of 16 transformers and 98 investors. The application of the comparative method among the middle of the performance index of the processing centers to detect with an analysis of variance if there is significant difference in average at least the rest at a level of significance of 5% and then by testing Tukey which one or more processing centers that are below average due to a fault to be detected and corrected are.

**Keywords:** *performance ratio, variance analysis, photovoltaic system.*

## **Introducción**

En las dos últimas décadas, el valor medio estadístico del índice de relación de comportamiento de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica ha mejorado desde 0,60 al entorno de 0,85 [1]. Entre otras causas, este incremento se debe a la mejor precisión de las especificaciones técnicas de los módulos solares fotovoltaicos, suministradas por el fabricante, al desarrollo de componentes más fiables que requieren de un menor tiempo para su mantenimiento y reparación, así como a la monitorización operacional de los sistemas fotovoltaicos y el análisis de los datos; todas ellas, claves para la obtención de una mejora continua.

Las directrices generales para la monitorización de los SFCR (sistemas fotovoltaicos conectados a la red) han estado disponibles a través de la norma UNE-EN 61724 (1998) [4] y han probado su utilidad durante muchos años. Estas se han complementado con métodos más específicos para el análisis de los datos, la detección, clasificación e identificación automática de las fallas [6]. Se han establecido una serie de índices de comportamiento del sistema a diferentes niveles, tales como 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  $PY_A$ , las pérdidas de productividad del resto del sistema  $PY_s$  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 del sistema. Todos estos indicadores se obtienen a partir de la medición de parámetros y el procesamiento de los datos a través de un sistema de monitorización. Los índices de comportamiento del sistema, normalizados, han permitido la comparación de sistemas fotovoltaicos de diferentes configuraciones y localizaciones con distinto nivel de irradiación solar [2].

Existen muchas centrales fotovoltaicas, sobre todo las de gran potencia nominal, del orden de MW, que llevan asociadas un sistema de monitorización, capaz de registrar valores de irradiancia solar en el plano de incidencia de los

módulos solares, temperatura ambiente en la sombra, temperatura del módulo, velocidad del viento, la tensión, corriente y potencia eléctrica a la salida del campo fotovoltaico, así como a la salida del inversor (corriente alterna). Los instrumentos de medida deben cumplir las exigencias de precisión establecidas por la norma UNE-EN 61724. En estas condiciones, el mínimo error relativo cometido en el cálculo de los índices de relación de comportamiento del campo y del sistema fotovoltaico es de un 5% [8].

Uno de los problemas que se presentan en la práctica es el elevado coste de los sistemas de monitorización y sobre todo, lo difícil que resulta justificar técnico-económicamente esta inversión porque en muchos casos, los datos obtenidos son una mera información que se almacena sin efecto útil [10]; no se emplea para la identificación de las fallas de los diferentes subsistemas y por tanto no sirven para la actuación sobre el componente afectado y el correspondiente restablecimiento del rendimiento energético del sistema. En la mayoría de los casos, el sistema de monitorización cuenta con un software que alerta de posibles fallas, basado en lo que debía producir hipotéticamente el SFCR bajo las condiciones de irradiancia solar medidas por un piranómetro con una clase de precisión nominal del 5 %.

En este trabajo se propone la detección del bajo rendimiento del SFCR mediante un método de comparación que depende básicamente de la medición de una variable imprescindible en la evaluación del efecto útil del sistema fotovoltaico: la producción fotovoltaica dada por la potencia eléctrica de alterna entregada a la red. La irradiación solar medida es una variable intermedia de referencia que resulta constante para cada medición del índice de relación de comportamiento del sistema y por tanto afecta por igual al cálculo del PR de los diferentes centros de transformación.

#### *Monitorización analítica de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red*

El mercado de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red se está expandiendo rápidamente con una penetración significativa en un número creciente de países. Esta fuerte expansión del mercado requiere de la disponibilidad y el acceso a información confiable sobre el rendimiento, la sostenibilidad técnica, directrices de diseño, métodos de planificación,

financiación, etcétera, de los sistemas fotovoltaicos para ser compartidos con los diferentes actores. En particular, la alta penetración de la energía fotovoltaica en las principales redes exige el desarrollo de nuevas estrategias para la red y la gestión de los inversores fotovoltaicos, centrándose más en previsión y almacenamiento solar, así como en las investigaciones de los derechos económicos e impacto tecnológico en todo el sistema energético [3].

Se debe mejorar la fiabilidad de los sistemas fotovoltaicos y subsistemas mediante la recopilación, análisis y difusión de la información sobre su rendimiento técnico y fracasos, que proporcionen una base para su evaluación, y desarrollar recomendaciones prácticas para determinar los tamaños adecuados que faciliten el papel de la energía solar fotovoltaica como piedra angular en la transición hacia sistemas energéticos sostenibles. La mayoría de los métodos y herramientas que se presentan se puede aplicar independientemente de la tecnología de los módulos [7].

#### *Supervisión del sistema fotovoltaico. Estado del Arte*

Los principales objetivos de un sistema de monitorización son: medir el rendimiento energético, evaluar el rendimiento del sistema fotovoltaico e identificar rápidamente los defectos de diseño o mal funcionamiento [5]. Muchas grandes instalaciones fotovoltaicas utilizan estos sistemas para evitar pérdidas económicas debido a problemas operativos.

El requisito para la monitorización analítica incluye un sistema automático de adquisición de datos para monitorizar un conjunto mínimo de parámetros. Un sistema de supervisión adecuado puede permitir la detección oportuna de problemas de funcionamiento, garantizando así un mayor rendimiento final de energía, que sería imposible sin vigilancia [6].

Las evaluaciones del módulo, una mejor eficiencia del inversor y la disponibilidad del sistema más altas generan una clara tendencia a la mejora del rendimiento como se ha visto en nuevas instalaciones fotovoltaicas a partir de los años posteriores a la publicación de la norma IEC 91724 (1998). La falta de experiencia a largo plazo en el rendimiento y la fiabilidad de los sistemas fotovoltaicos se han identificado y vinculado a una falta de información detallada y campañas de vigilancia y supervisión fiables.

**Tabla 1**  
**Parámetros a medir en tiempo real (adaptado de [4])**

Parámetros	Símbolo	Unidad
Irradiancia en el plano	$G_I$	$W/m^2$
Temperatura ambiente	$T_{amb}$	$^{\circ}C$
Temperatura del modulo	$T_{mod}$	$^{\circ}C$
Velocidad del viento	$S_W$	m/s
Voltaje de salida del arreglo FV	$V_{DC}$	V
Corriente de salida del arreglo FV	$I_{DC}$	A
Potencia de salida del arreglo FV	$P_{DC}$	kW
Voltaje de la red	$V_{AC}$	V
Corriente de la red	$I_{AC}$	A
Potencia de la red	$P_{AC}$	kW
Duración de interrupción del sistema	$t_{int}$	s

Las directrices de monitorización deben proporcionar instrucciones claras sobre cómo llevar a cabo las mediciones, analizarlas y determinar si el sistema está realizando lo que se espera de él.

*Metodología para conocer la operación del sistema fotovoltaico a partir de los datos de Monitorización*

En esta sección se discute el método de regresión lineal periódica. Los gráficos obtenidos se basan en relaciones físicas simplificadas que permiten obtener los parámetros a partir del modelo de regresión lineal. La comparación periódica de tales modelos basados en un análisis de regresión lineal permite evaluar el comportamiento dinámico operacional del sistema y de sus componentes, a través de una metodología matemática. La selección de las variables: producción fotovoltaica del sistema asociada a la potencia pico de la instalación (productividad final del sistema) y la irradiancia que incide en el plano de los módulos referida a la irradiancia estándar de  $1000 W/m^2$  (productividad de referencia) sirve para evaluar el rendimiento a nivel del sistema.

Los gráficos se usan para la identificación y la interpretación de los defectos de diseño, problemas operativos o simplemente para justificar el correcto funcionamiento de la instalación. Una relación física de este tipo puede ser aproximada como una línea recta por medio de la regresión lineal. La

aplicación práctica de la metodología consiste en identificar periódicamente la ecuación de regresión lineal que mejor ajusta la relación entre los valores de la productividad final y de referencia, medidos durante el tiempo elegido para la comparación (hora, día, semana, mes) y verificar la existencia de un cambio repentino o brusco de forma significativa. Esta aplicación produce varios indicadores de la operación del sistema [9]:

líneas de regresión que no cambian significativamente con el tiempo indican que las propiedades del sistema se mantuvieron constantes;

líneas de regresión cambiantes en el tiempo indican un cambio de la tendencia racional de los parámetros del sistema;

la desviación significativa de los datos de las muestras de las líneas de regresión, repentinamente, predice puntos de operación de carácter excepcional; la desviación de las muestras de las líneas de regresión, regularmente, apunta hacia un diseño defectuoso.

Cabe destacar que estos indicadores pueden predecir los defectos de diseño o fallas marcando condiciones de funcionamiento inconsistente. Sin embargo, en sentido estricto, no hay conclusiones firmes de la causa del funcionamiento irregular basadas solamente en este análisis. La aplicación práctica de estos indicadores se debe revisar en su estadística mediante la realización de un análisis residual. Si son significativos, entonces se requieren más comprobaciones detalladas, incluyendo una visita al lugar.

Sólo cuando la potencia fotovoltaica entregada a la red eléctrica y la irradiancia solar en el plano están disponibles, se puede obtener el rendimiento a nivel del sistema. Si además está disponible la temperatura del módulo, este dato sirve de complemento muy útil.

#### *Descripción analítica*

La productividad final del sistema versus la productividad de referencia es el conjunto más general de parámetros del rendimiento para un sistema fotovoltaico conectada a la red. Esta relación representa la eficiencia global de la conversión de energía. La potencia entregada a la red de suministro eléctrico

y la irradiancia en el plano de los módulos solares son siempre las primeras variables monitorizadas.

Como primera aproximación, la instalación fotovoltaica se puede considerar lineal. Con este supuesto, la productividad final del sistema es proporcional a la productividad de referencia. Cuando las mediciones de la productividad final del sistema se grafican contra la productividad de referencia, su relación se puede aproximar por una línea recta que pasa por el origen. Esta línea puede ser determinada por regresión lineal a lo largo de todas las muestras de datos. Su pendiente se aproxima al valor medio del índice de relación de comportamiento del sistema sobre todas las muestras. Como un modelo de sistema PV de primer orden, el sistema se puede describir analíticamente como;

$$y_F = \overline{p\bar{r}} \cdot y_R \quad (1)$$

donde:

$\overline{p\bar{r}}$ : Valor medio del índice de relación de comportamiento.

$y_F$ : Productividad final instantánea del sistema.

$y_R$ : Productividad instantánea de referencia.

El gráfico de dispersión con una nueva línea de regresión para cada semana permite la identificación de la pendiente y, por lo tanto, el valor medio del índice de relación de comportamiento semanal del sistema. En consecuencia, los cambios bruscos de semana a semana, así como las tendencias significativas se indican mediante el cambio de la pendiente.

### **Organización de los datos y tratamiento estadístico**

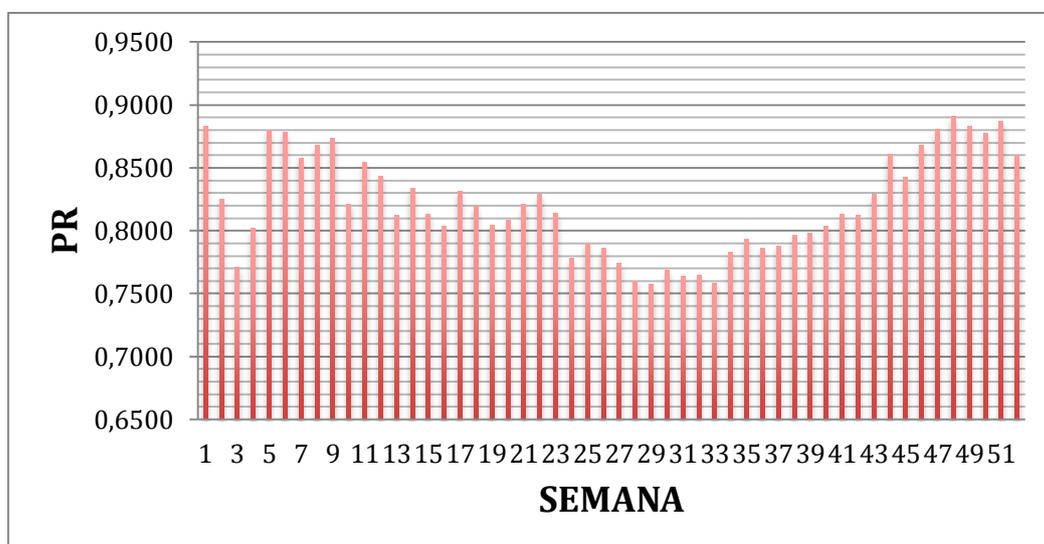
Se agrupan los datos por semanas del año 2013 de las variables medidas por el sistema de monitorización: producción fotovoltaica a la salida de los inversores e irradiación solar correspondiente. Con la potencia pico de cada centro de transformación asociada a su producción se determina la productividad final y con la irradiación solar normalizada con la irradiancia solar estándar de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , se determina la productividad de referencia correspondiente. Los pares de valores obtenidos para cada una de las 52 semanas del año 2013 se tratan con el programa en Excel de la regresión lineal. De esta forma se obtienen las ecuaciones de regresión lineal que mejor ajustan los datos. Las ecuaciones son de la forma:  $y = B_1x + B_0$ , en las que y

representa la variable productividad final  $y_F$  y  $x$ , la productividad de referencia  $y_R$ .  $B_1$  es la pendiente de la recta, que en este caso es el valor medio del índice de relación de comportamiento.  $B_0$  es el intercepto con el eje vertical, que teóricamente debe ser cero. En los resultados obtenidos, se aprecia una pequeña diferencia que puede despreciarse. Por ello, ajustamos los datos a las rectas que pasan por el origen, obteniendo las ecuaciones de la forma  $y_F = \overline{p\overline{r}} \cdot y_R$ . Los valores de  $R^2$  son suministrados por el programa y representan el coeficiente de determinación asociado a cada ecuación. Como puede observarse en la tabla 2, para todas las semanas, es muy cercano a 1, lo que significa que prácticamente toda la variación de los datos obtenidos en las mediciones queda explicada por la recta de regresión lineal de los mínimos cuadrados.

**Tabla 2**  
**Parámetros de la ecuación de regresión lineal en las**  
**52 semanas del año 2013**

SEMANA	$\overline{p\overline{r}}$	$R^2$	$B_1$	$B_0$	$R^2$
1	0,883 2	0,979 81	0,927 8	-0,031 16	0,982 56
2	0,825 3	0,945 47	0,855 2	-0,020 8	0,947 01
3	0,771 2	0,926 49	0,783 2	-0,007 8	0,926 85
4	0,802 3	0,953 97	0,836 3	-0,017 9	0,956 77
5	0,880 1	0,976 33	0,889 6	-0,007 4	0,976 48
6	0,878 7	0,984 21	0,887 8	-0,007	0,984 33
7	0,857 7	0,986 12	0,855 6	0,002 9	0,986 15
8	0,868 4	0,987 33	0,877 2	-0,006 3	0,987 5
9	0,873 8	0,985 14	0,881 9	-0,005 6	0,985 28
10	0,821 0	0,965 4	0,834	-0,007 8	0,965 82
11	0,854 6	0,985 66	0,850 5	0,003 2	0,985 69
12	0,843 3	0,981 76	0,846 9	-0,002 6	0,981 79
13	0,812 8	0,963 55	0,815 4	-0,001 6	0,963 56
14	0,833 8	0,970 46	0,825 3	0,006 4	0,970 6
15	0,813 6	0,969 99	0,793 1	0,015 8	0,970 83
16	0,803 9	0,962 28	0,757 3	0,038 4	0,966 48
17	0,831 1	0,976 36	0,826 9	0,003	0,976 4
18	0,819 7	0,980 41	0,816 3	0,002 7	0,980 43
19	0,804 2	0,973 22	0,792 8	0,008 3	0,973 49
20	0,808 7	0,954 74	0,806 8	0,001 2	0,954 75

21	0,821 0	0,982 18	0,817 2	0,003	0,982 21
22	0,829 0	0,987 34	0,816 7	0,009 4	0,987 64
23	0,813 7	0,980 72	0,805 5	0,005 3	0,980 87
24	0,778 0	0,989 62	0,762 2	0,011 7	0,990 18
25	0,789 9	0,981 09	0,779	0,0081	0,981 34
26	0,786 1	0,990 93	0,771 3	0,0112	0,992 41
27	0,774 5	0,988 41	0,758 2	0,0123	0,989
28	0,760 3	0,981 99	0,752 6	0,005 9	0,982 13
29	0,757 2	0,980 81	0,747 1	0,010 8	0,981 27
30	0,768 4	0,970 81	0,758 5	0,007 5	0,971 03
31	0,763 9	0,988 32	0,751 3	0,009 6	0,988 69
32	0,765 1	0,977 94	0,748 8	0,0128	0,978 52
33	0,758 6	0,988 44	0,740 6	0,013 9	0,981 9
34	0,783 0	0,982 62	0,765 4	0,013	0,986 43
35	0,793 4	0,98568	0,774 5	0,014 8	0,986 43
36	0,786 1	0,974	0,774 9	0,008 5	0,974 27
37	0,787 8	0,988 11	0,770 9	0,012 6	0,988 73
38	0,796 3	0,988 48	0,782 5	0,010 4	0,988 99
39	0,798 5	0,987 08	0,789 1	0,005 9	0,987 3
40	0,803 9	0,977 12	0,794 3	0,007	0,977 31
41	0,813 1	0,981 17	0,793 2	0,014 9	0,981 95
42	0,812 2	0,972 21	0,804 8	0,005 1	0,972 32
43	0,829 0	0,985 32	0,837 7	-0,005 3	0,985 5
44	0,860 8	0,989 77	0,864	-0,002 4	0,989 79
45	0,842 4	0,977 2	0,856 6	-0,009 3	0,977 55
46	0,868 4	0,981 73	0,889 2	-0,015	0,983 14
47	0,881 1	0,982 21	0,902 8	-0,015	0,982 98
48	0,891 3	0,980 3	0,937 9	-0,033 6	0,983 14
49	0,883 2	0,976 45	0,943 4	-0,043 1	0,980 83
50	0,877 9	0,989 56	0,906 1	-0,018 6	0,992 16
51	0,887 0	0,990 62	0,916 6	-0,019 8	0,992 16
52	0,860 3	0,975 77	0,885	-0,015 6	0,977 03

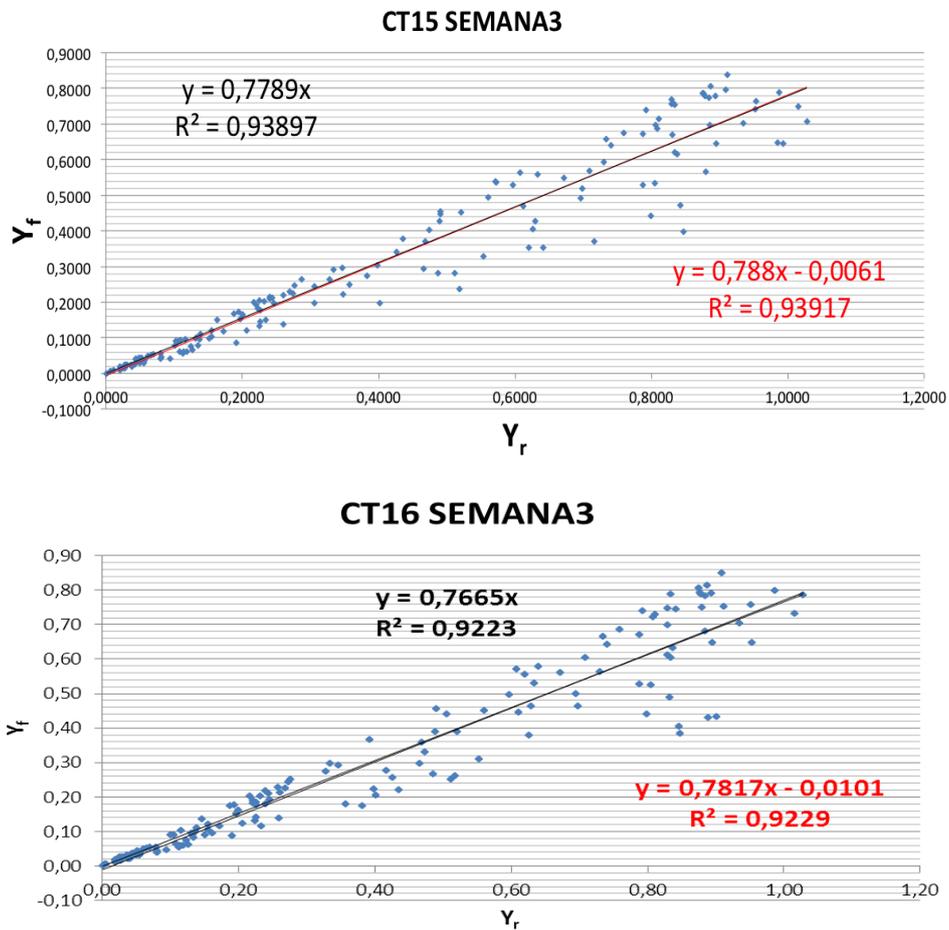


**Fig. 1 Índice de relación de comportamiento del sistema (PR) de las 52 semanas(2013).**

Las columnas 2 y 3 de la tabla 2 se refieren a los índices  $\overline{pr}$  y  $R^2$ , respectivamente, obtenidos de la ecuación de regresión lineal que pasa por el origen; mientras que las columnas 4, 5 y 6 representan los coeficientes  $B_1$  (pendiente de la recta),  $B_0$  (intercepto con el eje vertical) y el coeficiente de determinación  $R^2$  asociado, respectivamente, de la ecuación de regresión lineal de los mínimos cuadrados. A partir del análisis de regresión lineal de las 52 semanas del año 2013, se construye la gráfica del  $PR = \overline{pr}$  semanal para identificar posibles anomalías del sistema.

Como se puede apreciar en la figura 2, la semana tres no sigue un comportamiento adecuado, ya que existe un decrecimiento muy brusco del  $\overline{pr}$  respecto a las dos semanas anteriores, seguido de un incremento sustancial en las semanas 4 y 5.

El paso siguiente será realizar un análisis de regresión lineal en esa semana del  $\overline{pr}$  de los 16 centros de transformación que forman la central solar fotovoltaica, haciendo uso del programa en Excel. A modo de ejemplo, se presentan los resultados de dos centros de transformación (15 y 16).



**Fig. 2 Regresión lineal de los PR de los CT 15 y 16 de la semana 3**

La relación entre la productividad final del sistema  $Y_f$  y la productividad de referencia  $Y_r$  representa la eficiencia general de conversión de la instalación. Se basa en dos mediciones solamente y puede reflejar todo tipo de fenómenos durante la operación de una instalación fotovoltaica. En algunas instalaciones fotovoltaicas se puede implementar el tratamiento de la información de manera sistemática en el software del sistema de monitorización para el análisis de datos o para derivar parámetros del modelo de componentes fotovoltaicos de datos medidos. Aplicando este método periódicamente, el modelo de regresión lineal es una poderosa y sencilla herramienta para interpretar conjuntos de pares de datos.

*Análisis de los resultados*

Se confecciona una tabla con los valores de PR instantáneos correspondientes a todos los días de la semana 3 en cada uno de los 16 centros de transformación. Estos valores se obtienen dividiendo la productividad final entre la productividad de referencia, obtenidas a partir de las mediciones de producción de cada centro de transformación y de irradiancia solar a lo largo de los siete días de la semana analizada. Con los valores agrupados en columnas para los 16 centros de transformación, se aplica el método estadístico de análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existen diferencias significativas a un determinado nivel de significación (5%) entre los valores medios de los PR de los centros de transformación. Se establece la hipótesis nula  $H_0$  (las medias son iguales:  $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_{16}$ ) y la hipótesis alternativa  $H_1$  (al menos una media es desigual al resto). Se introducen los datos de las 16 columnas y se obtiene en Excel la tabla de ANOVA de un factor, como se muestra a continuación:

**Tabla 3**  
**Aplicación de la técnica ANOVA**

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	149	107,6327244	0,722367278	0,02775736
Columna 2	149	111,9051039	0,751040966	0,02109145
Columna 3	149	109,2567029	0,733266462	0,02144779
Columna 4	149	109,8166087	0,73702422	0,01948539
Columna 5	149	110,6690464	0,742745278	0,02242179
Columna 6	149	103,188443	0,692539886	0,01602906
Columna 7	149	109,829877	0,737113269	0,02057085
Columna 8	149	110,2151174	0,739698774	0,02054695
Columna 9	149	111,0423596	0,745250736	0,0237153
Columna 10	149	110,6995865	0,742950245	0,02042095
Columna 11	149	110,9450779	0,744597838	0,02131582
Columna 12	149	110,0857463	0,738830512	0,02133412
Columna 13	149	113,6230907	0,762571079	0,01876781
Columna 14	149	112,3858214	0,754267258	0,01947321
Columna 15	149	111,4202569	0,747786959	0,01920099
Columna 16	149	109,5292751	0,735095806	0,02176483

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,536636457	15	0,035775764	1,71	0,043	1,67
Dentro de los grupos	49,63086465	2368	0,02095898			
Total	50,16750111	2383				

HSD=	0,05752196
Multiplicador=	4,85
MSE=	0,02095898
n=	149

En este caso, se obtiene un estadístico de contraste  $F = 1,71$ , que es mayor que el valor crítico de  $F (1,67)$ . Por tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. Con ello, podemos concluir que al menos un centro de transformación presenta un valor medio de PR con diferencia significativa respecto al resto, a un nivel de significación del 5 % (95 % de confiabilidad). Para identificar a él o los centros de transformación que presentan valores medios reducidos del PR, se aplica el método de Tukey, que consiste en determinar el valor de la diferencia honestamente significativa HSD, mediante la fórmula:

$$HSD = Q_{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{MSE}{n}} \quad (2)$$

donde:

$Q_{\alpha}$  representa el multiplicador.

MSE, el cuadrado del error medio (suma de los cuadrados dentro de los grupos dividido por el número de grados de libertad).

$n$ , el tamaño de muestra de cada uno de los grupos.

En nuestro caso:  $Q_{\alpha} = 4,85$  (tomado de la tabla de los valores críticos de la prueba de Tukey

para 16 grupos y 2368 grados de libertad dentro de los grupos con un nivel de significación  $\alpha = 0,05$ ).

$MSE = 0,020\ 958\ 98$

$n = 149$

Por tanto,  $HSD = 0,057\ 5$

Este valor de HSD es el valor crítico de referencia.

A continuación se calculan los valores medios de los PR de cada centro de transformación. Luego se construye una tabla de 16 filas y 16 columnas. En las filas y columnas, se enmarcan las 16 casillas de CT1 hasta CT16, y se realiza la diferencia entre las medias asociadas a la posición de cada casilla. Los valores de la diagonal de la tabla serán ceros porque coinciden los centros de transformación en fila y columna. Con los resultados de la diferencia en valor

modular de las medias correspondientes a la fila y columna, se seleccionan los valores que superen al HSD crítico, o sea, en este caso los valores de las diferencias de las medias a partir de 0,06. Todo ello queda representado en la siguiente tabla para la aplicación del método de Tukey:

**Tabla 4**  
**Aplicación del método Tukey**

	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5	CT6	CT7	CT8	CT9	CT10	CT11	CT12	CT13	CT14	CT15	CT16
CT1		-0,03	-0,01	-0,01	-0,02	0,03	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,04	-0,03	-0,03	-0,01
CT2			0,02	0,01	0,01	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,02
CT3				0,00	-0,01	0,04	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,03	-0,02	-0,01	0,00
CT4					-0,01	0,04	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	-0,03	-0,02	-0,01	0,00
CT5						0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,02	-0,01	-0,01	0,01
CT6							-0,04	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,07	-0,06	-0,06	-0,04
CT7								0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01
CT8									-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,02	-0,01	-0,01	0,00
CT9										0,00	0,00	0,01	-0,02	-0,01	0,00	0,01
CT10											0,00	0,00	-0,02	-0,01	0,00	0,01
CT11												0,01	-0,02	-0,01	0,00	0,01
CT12													-0,02	-0,02	-0,01	0,00
CT13														0,01	0,01	0,03
CT14															0,01	0,02
CT15																0,01
CT16																

**HSD=0,057 5**

Comparando los valores de la tabla de Tukey con el valor HSD obtenido en el método estadístico de ANOVA, se observa que en el centro de transformación N° 6 existen datos que superan este valor, por lo que se podría afirmar que el problema detectado en la baja producción de la semana 3 tiene su origen en un mal funcionamiento del centro de transformación N° 6.

### Conclusiones

1. *A partir de los datos medidos por un sistema de monitorización de un SFCR, se ha desarrollado una metodología basada en herramientas de análisis estadístico: técnica ANOVA y prueba de Tukey, que permiten evaluar con rigor científico el comportamiento dinámico del sistema.*
2. *La técnica ANOVA se utiliza en primera instancia para investigar mediante un método de comparación, la existencia de una*

*diferencia significativa a un determinado nivel de significación entre los valores medios del PR instantáneo de los centros de transformación que forman el SFCR. Si ello ocurre en un día cualquiera, se procede a aplicar la prueba Tukey para determinar él o los centros de transformación con una producción fotovoltaica por debajo del resto de forma significativa, ocasionada por una falla técnica.*

- 3. El método de comparación entre los PR de los centros de transformación sólo depende de la precisión en la medición de la producción real fotovoltaica a la salida de cada inversor (productividad final). Esto se debe a que la productividad de referencia medida a partir de la irradiancia solar mediante los piranómetros es igual para todos los centros de transformación y por tanto, afecta en la misma magnitud al cálculo del PR de cada centro de transformación.*
- 4. La metodología de comparación establecida supera en fiabilidad y rigor científico a los métodos tradicionales (vigentes actualmente) de detección de desviación de los resultados esperados en condición de operación nominal de los SFCR porque sólo depende del valor de una variable que es la razón de ser del sistema: la producción fotovoltaica real de cada subsistema y no de la medición de un conjunto de variables, tales como la irradiancia solar y la temperatura del módulo, entre otras, que son realizadas con medios de medición asociados a varias fuentes de errores que generan incertidumbres en el cálculo de la producción teórica esperada.*

## Bibliografía

1. DREWS, A. *et al.* "Monitoring and remote failure detection of grid-connected PV systems based on satellite observations". *Solar Energy*, Vol. 81, N° 4, EE.UU, 2007, pp. 548-564.
2. DUNLOP, E., HALTON, D. "The performance of crystalline silicon photovoltaic solar modules after 22 years of continuous outdoor exposure". *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 14, EE.UU, 2006, pp. 53-64.
3. ELIES, S. *et al.* "Influence of raw-shading on the performance of PV systems – simulation and measurement". 25<sup>th</sup> EUPVSEC, Valencia, Spain, 2010, pp. 4640-4646.
4. IEC Standard 61724. "Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis". Geneva, Switzerland, 1998.
5. MÜLLER, B. *et al.* "Maximizing the yield of large PV Power Plants: What can we learn from Monitoring and Simulation?" 27<sup>th</sup> EUPVSEC, Frankfurt, Germany, 2012, pp. 3775-3781.
6. RANSOME, S.J. *et al.* "Advanced analysis of PV system performance using normalized measurements data". *Conference Record of The Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, EE.UU, 2005, pp.1698-1701.
7. UEDA, I. *et al.* "Performance analysis of various system configurations on grid-connected residential PV systems". *Solar Energy*, Vol.93, N° 6, 2009, pp. 945-949.
8. VILARIÑO, J. & MENÉNDEZ, H.F. "Índices de comportamiento del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica y teoría de errores". *Revista Tecnología Química*, Vol. XXXVI, N° 3, 2016, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, pp. 392-406.
9. WOYTE, A. *et al.* "Monitoring of Photovoltaic Systems: Good practices and systematic analysis". *Proc. 28<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Paris, France, 2013, pp. 3686-3694.
10. ZHOU, W., YANG, H., & FANG, Z. "A novel model for photovoltaic array performance prediction". *Applied Energy*. Vol. 84, EE.UU, 2007, pp. 1187-1198.