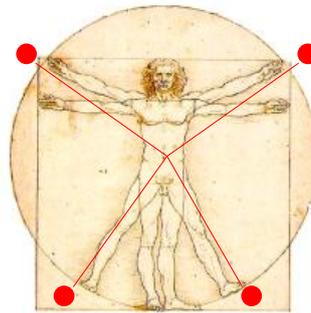


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN XIV. AÑO 2016

SEPARATA



ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL ÍNDICE DE RELACIÓN DE COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA.

Javier Vilariño, Higinio F. Menéndez



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Javier Vilariño, Higinio F. Menéndez
Junio, 2016.

<http://www.uax.es/publicacion/analisis-estadistico-del-indice-de-relacion-de-comportamiento-de-un-sistema.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnol@ 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

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 ESTADÍSTICO DEL ÍNDICE DE RELACIÓN DE COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA.

Javier Vilariño(a), Higinio F. Menéndez(b)

- a) Máster universitario en Ingeniería Ambiental. Ingeniero de Caminos. Director de Construcción Antalsis. E.mail: jvilarino@antalsis.com
- b) Doctor Ingeniero Industrial UAX. E.mail: hmenemil@uax.es. Tlf: 918109771

RESUMEN

Se aplica la metodología de análisis de varianza(ANOVA) y de la prueba 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. Las mediciones fueron realizadas en intervalos de tiempo de 10 minutos, desde la salida hasta 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 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, productividad final, productividad de referencia, módulo fotovoltaico.

ABSTRACT

The methodology of analysis of variance and Tukey's proof applies to a data set of solar radiation in the plane of the photovoltaic modules and the corresponding values of power delivered to the grid. The measurements were done at intervals of 10 minutes 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 in Cordoba, consisting of 16 transformation centers and 98 inverters. 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 transformation centers that are below average due to a fault to be detected and corrected are.

KEYWORDS: performance ratio, final yield, reference yield, photovoltaic module.

SUMARIO: 1. Introducción. 2. Monitorización analítica de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red. 2.1. Supervisión del sistema fotovoltaico. 3. Metodología para conocer la operación del sistema fotovoltaico a partir de los datos de monitorización. 3.1. Descripción analítica. 4. Organización de los datos y tratamiento estadístico. 4.1. Regresión lineal del \overline{PR} de cada centro de transformación en la 3ª semana 5. Metodología de aplicación de ANOVA y la prueba de Tukey. 5.1 Procesamiento y Análisis de resultados. 6. Conclusiones. 7. Bibliografía.

SUMMARY: 1. Introduction. 2. Analytical monitoring of grid-connected photovoltaic systems. 2.1 Photovoltaic system monitoring. 3. Methodology for understanding photovoltaic system operation through monitoring. 3.1 Analytical description. 4. Data organization and statistical treatment. 4.1. Linear regression of each transformation center in the 3rd week. 5. Application methodology ANOVA and Tukey test . 5.1 Processing and Analysis of results. 6. Conclusions. 7. Bibliography.

1. 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. 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 sistemas fotovoltaicos conectados a la red (SFCR) han estado disponibles a través de la norma UNE-EN 61724 (1998) 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. 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.

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% [1].

Uno de los problemas que se presenta 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; 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. Tradicionalmente, 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 instrumento que en el mejor de los casos es un piranómetro con una clase de precisión nominal del 5% y de mediciones de potencia de salida mediante contadores, para los que la norma UNE-EN 61724 exige una clase de precisión del 2%, así como el requerimiento de otras mediciones como la velocidad del viento, a través de medios de medición con error relativo de hasta un 10%. Por otro lado, la temperatura del módulo influye con un gran peso en el rendimiento y debe medirse con un sensor de resistencia de platino que se adhiere a la parte trasera del módulo solar. La precisión de estos sensores, incluyendo el acondicionador de señal es de 1K, que representa en el rango de temperaturas medidas, un error relativo de precisión en torno al 2%, que se suma a la dificultad práctica de que con el transcurso del tiempo y las condiciones de intemperie, en muchas ocasiones la medición no es representativa de la temperatura del módulo porque se pierde el contacto físico con la superficie trasera del módulo. Todas estas variables están presentes en la ecuación que rige la producción teórica esperada por un SFCR y por tanto, la incertidumbre de los resultados evaluados mediante la propagación de errores es superior al 10%. La práctica social confirma que en muchas ocasiones la alarma dada por estos sistemas de monitorización es falsa y genera mucha desconfianza y falta de credibilidad.

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, que se debe medir con un error relativo de precisión del 2%. La irradiación solar medida es una variable intermedia de referencia que interviene en la fórmula con el mismo valor para todos los centros de transformación comparados y por tanto afecta por igual al cálculo del PR.

2. 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, etc., de los sistemas fotovoltaicos para ser compartidos en la comunidad fotovoltaica. 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. 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 el

dimensionamiento adecuado que facilite el papel de la energía solar fotovoltaica como piedra angular en la transición hacia sistemas energéticos sostenibles.

2.1. 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. 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 la supervisión de un conjunto mínimo de parámetros. Un sistema de monitorización adecuado puede realizar la detección oportuna de problemas de funcionamiento, garantizando así un mayor rendimiento de energía final que sería imposible sin vigilancia.

Las evaluaciones del módulo, una mejor eficiencia del inversor y la disponibilidad del sistema más altas generan una clara tendencia a la mejora del índice de rendimiento de los SFCR, como se ha visto en nuevas instalaciones fotovoltaicas a partir de los años posteriores a la publicación de la norma IEC 91724 (1998).

Parámetros	Símbolo	Unidad
Irradiancia en el plano	G_I	W/m^2
Temperatura ambiente	T_{amb}	$^{\circ}C$
Temperatura del módulo	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

Tabla 1. Parámetros a medir en tiempo real [2].

En la Tabla 1 se presentan las variables fundamentales que deben medirse con un sistema de monitorización, de acuerdo con la norma UNE-EN 61724 para la evaluación del rendimiento del sistema. Las directrices de monitorización deben proporcionar instrucciones claras sobre cómo llevar a cabo y analizar las mediciones y cómo determinar si el sistema está realizando lo que se espera de él.

3. Metodología para conocer la operación del sistema fotovoltaico a partir de los datos de monitorización

En esta sección se introduce y 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) que se presenta sirve para evaluar el rendimiento a nivel del sistema.

Los gráficos sirven para la identificación y la interpretación de 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:

- 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, de forma brusca, predice puntos de operación de carácter excepcional;
- la desviación de las muestras de las líneas de regresión, de forma regular, 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.

3.1. Descripción analítica

La productividad final del sistema y la productividad de referencia es el conjunto más general de parámetros del rendimiento de un sistema fotovoltaico conectado 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.

La productividad final del sistema es proporcional a la productividad de referencia, como queda definido en la norma une-en 61724, introduciendo el concepto de relación de comportamiento del sistema PR. 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 fotovoltaico de primer orden, el sistema se puede describir analíticamente como:

$$P_{F} = \overline{PR} \cdot P_{R} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

\overline{PR} : Valor medio del índice de relación de comportamiento.

P_{F} : Productividad final instantánea del sistema.

P_{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 de la relación de rendimiento por semana. En consecuencia, los cambios bruscos de semana a semana, así como las tendencias significativas se indican mediante el cambio de la pendiente.

4. Organización de los datos y tratamiento estadístico

Los datos primarios de partida han sido proporcionados por la empresa La Castilleja Energía, junto con el diagrama de bloques de la instalación que especifica los tipos y cantidad de módulos e inversores empleados, así como las características técnicas de todos los componentes. También se cuenta con la potencia pico instalada en cada centro de transformación y el desglose del número y tipo de módulos e inversores utilizados en cada centro de transformación.

Los datos de las variables medidas por el sistema de monitorización se organizan por semanas del año 2013, luego de un proceso de filtrado en el que se desestiman los valores próximos a la salida y a la puesta del sol, por no ser fiables desde el punto de vista de la precisión de la medición al inicio de la escala de los instrumentos. Los datos a los que se hace referencia son la producción fotovoltaica a la salida de los inversores en forma de potencia de corriente alterna y la irradiancia solar correspondiente. Con la potencia pico de cada centro de transformación asociada a su producción se determina la productividad final y con la irradiancia solar normalizada con la 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 en el ajuste de los datos. Por ello, ajustamos los datos a las rectas que pasan por el origen, obteniendo las ecuaciones de la forma $y_F = \overline{y_F} \cdot y_R$. 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 2013.

SEMANA	$\overline{y_F}$	R^2	B_1	B_0	R^2
1	0,8832	0,97981	0,9278	-0,03116	0,98256
2	0,8253	0,94547	0,8552	-0,0208	0,94701
3	0,7712	0,92649	0,7832	-0,0078	0,92685
4	0,8023	0,95397	0,8363	-0,0179	0,95677
5	0,8801	0,97633	0,8896	-0,0074	0,97648
6	0,8787	0,98421	0,8878	-0,007	0,98433
7	0,8577	0,98612	0,8556	0,0029	0,98615
8	0,8684	0,98733	0,8772	-0,0063	0,9875
9	0,8738	0,98514	0,8819	-0,0056	0,98528
10	0,8210	0,9654	0,834	-0,0078	0,96582
11	0,8546	0,98566	0,8505	0,0032	0,98569
12	0,8433	0,98176	0,8469	-0,0026	0,98179
13	0,8128	0,96355	0,8154	-0,0016	0,96356
14	0,8338	0,97046	0,8253	0,0064	0,9706
15	0,8136	0,96999	0,7931	0,0158	0,97083
16	0,8039	0,96228	0,7573	0,0384	0,96648
17	0,8311	0,97636	0,8269	0,003	0,9764
18	0,8197	0,98041	0,8163	0,0027	0,98043
19	0,8042	0,97322	0,7928	0,0083	0,97349
20	0,8087	0,95474	0,8068	0,0012	0,95475
21	0,8210	0,98218	0,8172	0,003	0,98221
22	0,8290	0,98734	0,8167	0,0094	0,98764
23	0,8137	0,98072	0,8055	0,0053	0,98087
24	0,7780	0,98962	0,7622	0,0117	0,99018

25	0,7899	0,98109	0,779	0,0081	0,98134
26	0,7861	0,99093	0,7713	0,0112	0,99241
27	0,7745	0,98841	0,7582	0,0123	0,989
28	0,7603	0,98199	0,7526	0,0059	0,98213
29	0,7572	0,98081	0,7471	0,0108	0,98127
30	0,7684	0,97081	0,7585	0,0075	0,97103
31	0,7639	0,98832	0,7513	0,0096	0,98869
32	0,7651	0,97794	0,7488	0,0128	0,97852
33	0,7586	0,98844	0,7406	0,0139	0,9819
34	0,7830	0,98262	0,7654	0,013	0,98643
35	0,7934	0,98568	0,7745	0,0148	0,98643
36	0,7861	0,974	0,7749	0,0085	0,97427
37	0,7878	0,98811	0,7709	0,0126	0,98873
38	0,7963	0,98848	0,7825	0,0104	0,98899
39	0,7985	0,98708	0,7891	0,0059	0,9873
40	0,8039	0,97712	0,7943	0,007	0,97731
41	0,8131	0,98117	0,7932	0,0149	0,98195
42	0,8122	0,97221	0,8048	0,0051	0,97232
43	0,8290	0,98532	0,8377	-0,0053	0,9855
44	0,8608	0,98977	0,864	-0,0024	0,98979
45	0,8424	0,9772	0,8566	-0,0093	0,97755
46	0,8684	0,98173	0,8892	-0,015	0,98314
47	0,8811	0,98221	0,9028	-0,015	0,98298
48	0,8913	0,9803	0,9379	-0,0336	0,98314
49	0,8832	0,97645	0,9434	-0,0431	0,98083
50	0,8779	0,98956	0,9061	-0,0186	0,99216
51	0,8870	0,99062	0,9166	-0,0198	0,99216
52	0,8603	0,97577	0,885	-0,0156	0,97703

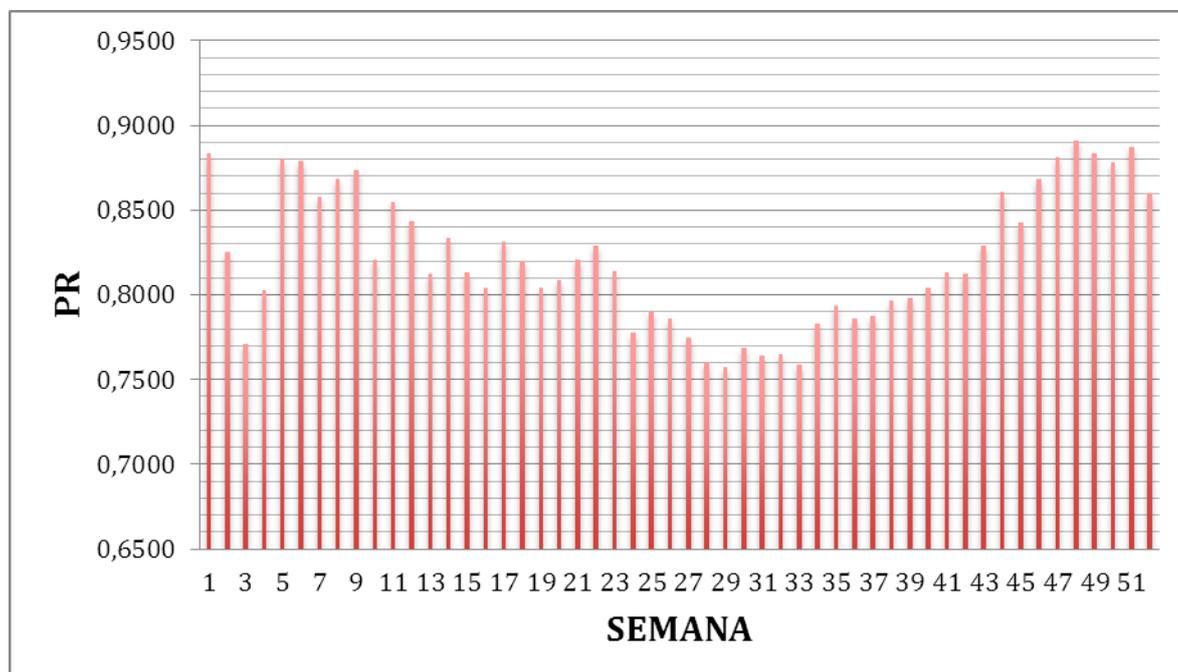


Fig. 1. Índice de relación de comportamiento PR (\overline{pr}) semanal del 2013.

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 \overline{pr} semanal para identificar posibles anomalías del sistema.

Como se puede apreciar en la Figura 2, la semana 3 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. Situación similar presenta la semana 10, que también fue tratada con esta metodología, dando un resultado equivalente, que no se ofrece en el artículo por ser un análisis repetitivo.

El paso siguiente de la metodología consiste en 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.

4.1. Regresión lineal del \overline{pr} de cada centro de transformación en la 3ª semana

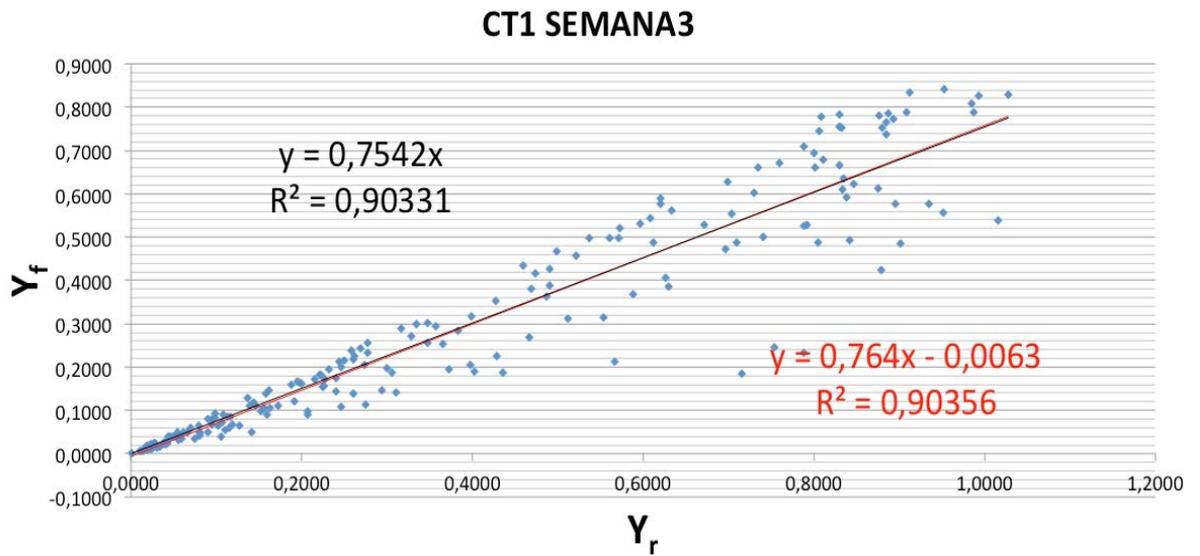


Fig. 2 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT1 en la 3ª semana

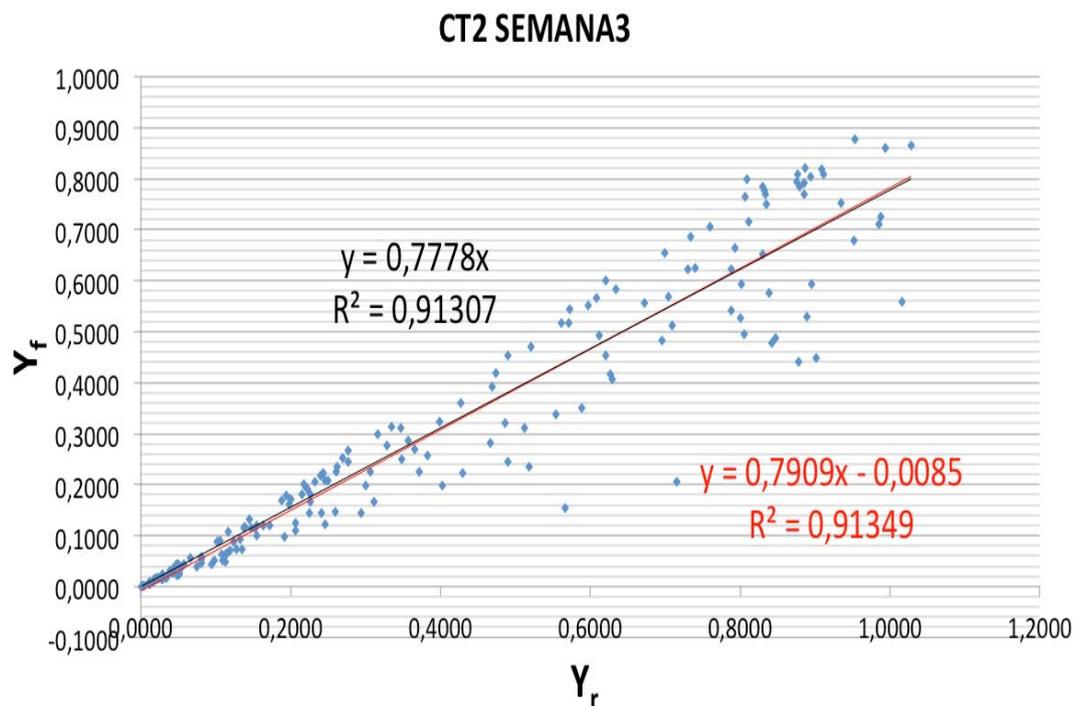


Fig. 3 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT2 en la 3ª semana

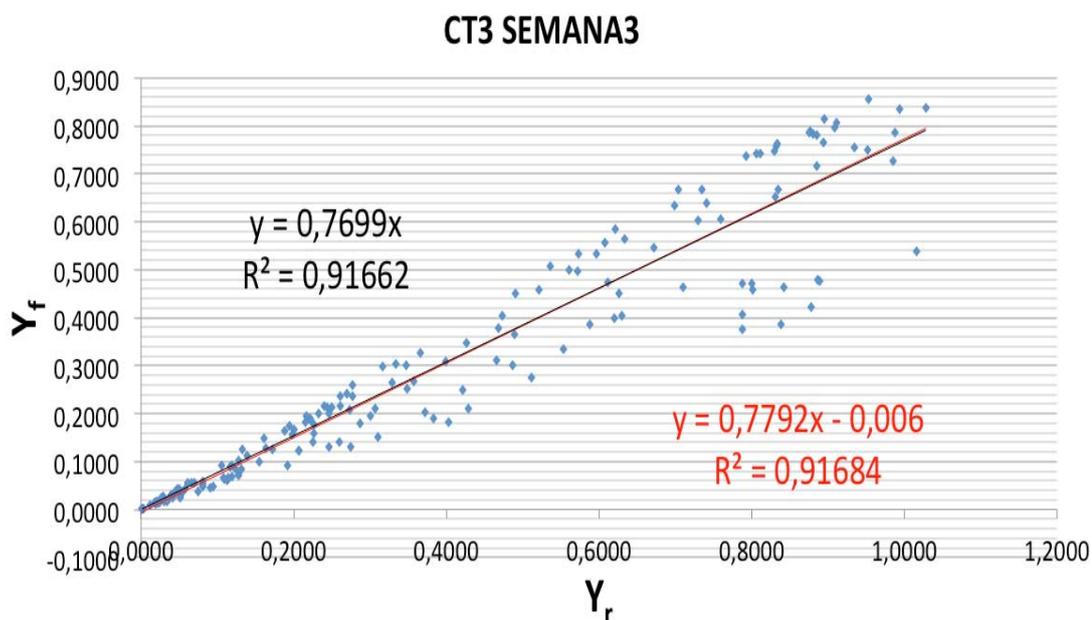


Fig. 4 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT3 en la 3ª semana

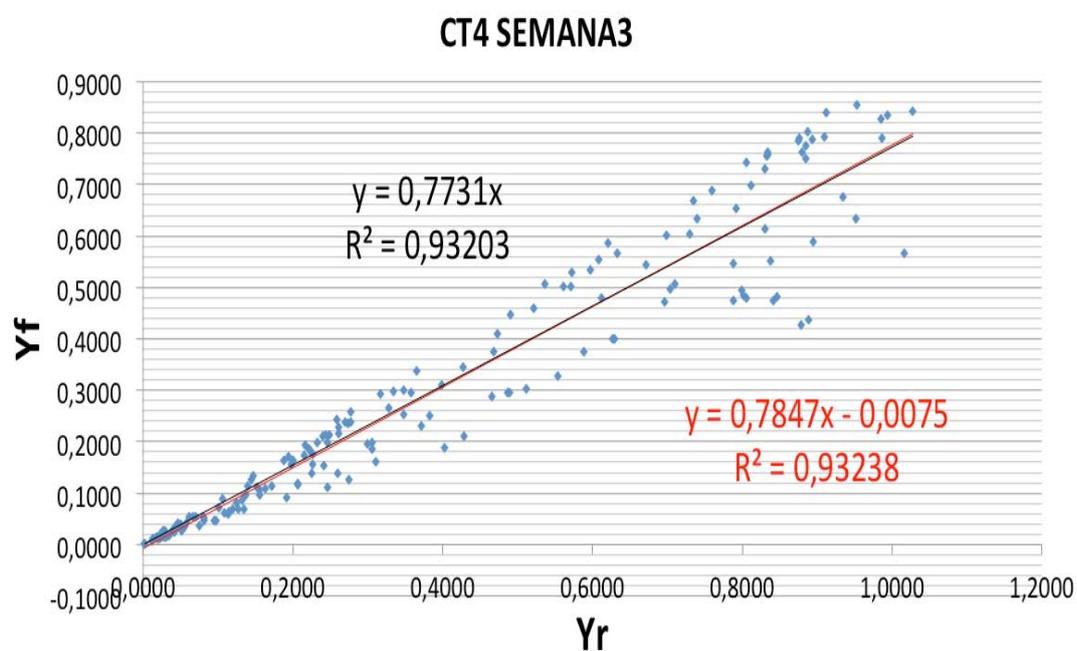


Fig. 5 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT4 en la 3ª semana

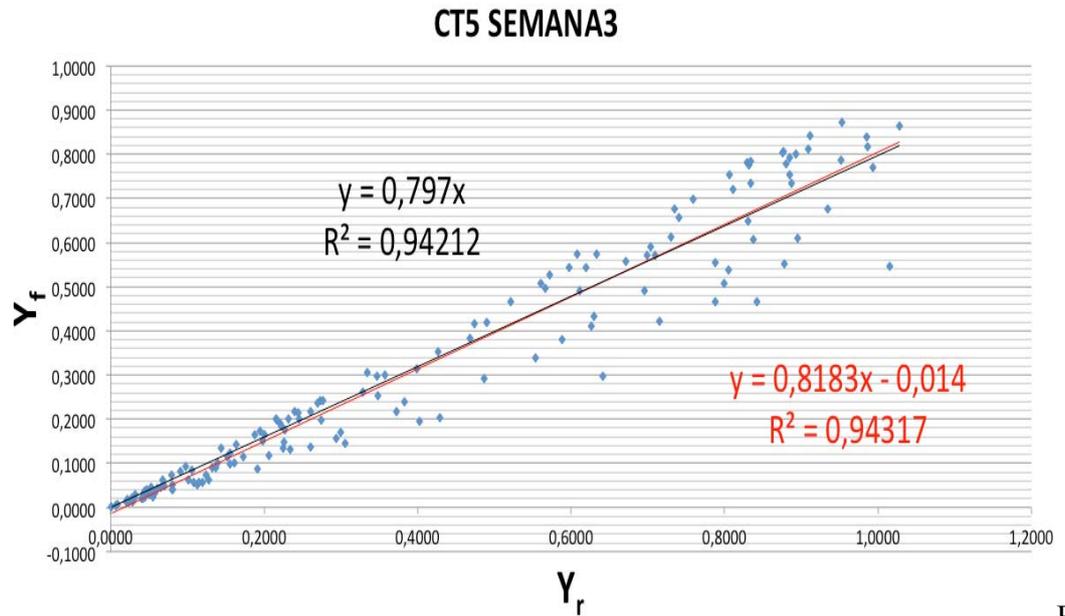


Fig. 6 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT5 en la 3ª semana

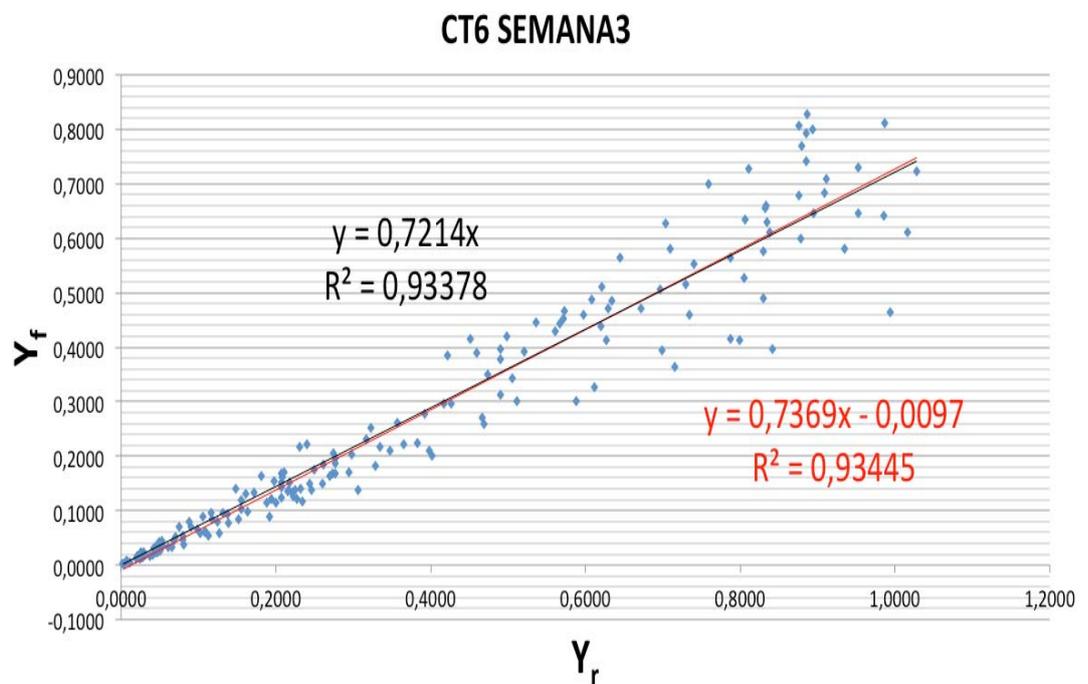
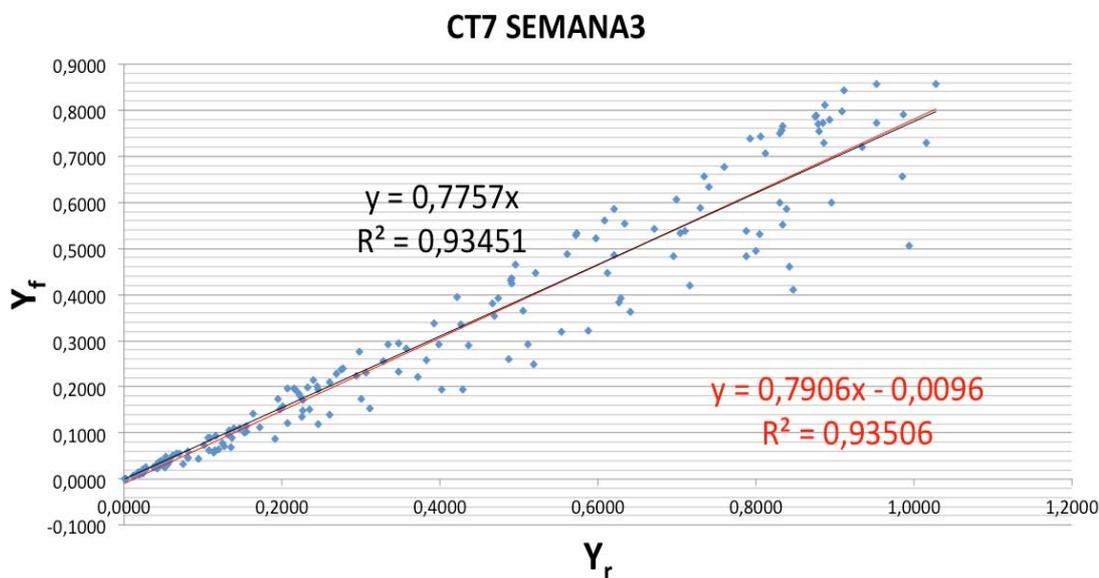
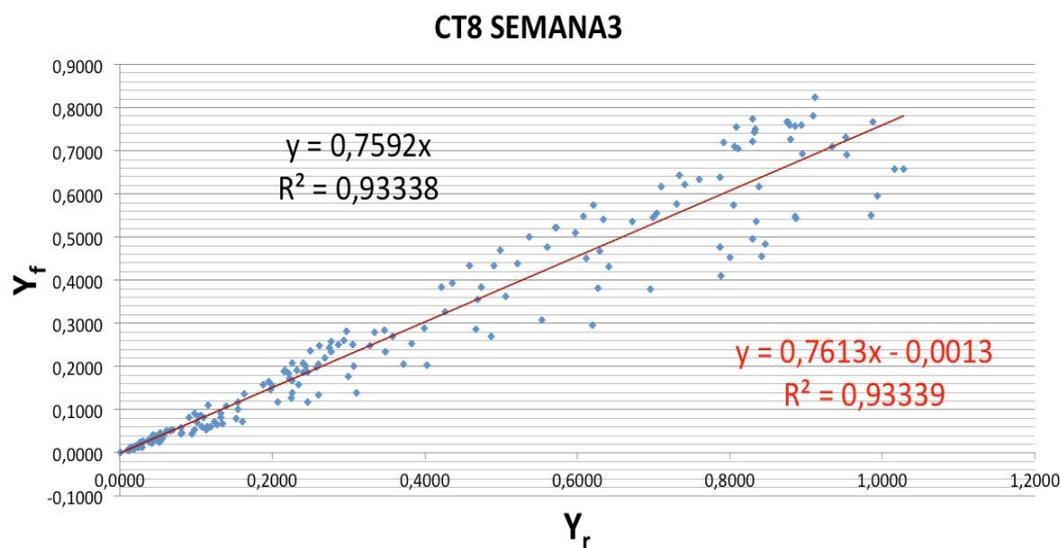


Fig. 7 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT6 en la 3ª semana

Fig. 8 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT7 en la 3ª semanaFig. 9 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT8 en la 3ª semana

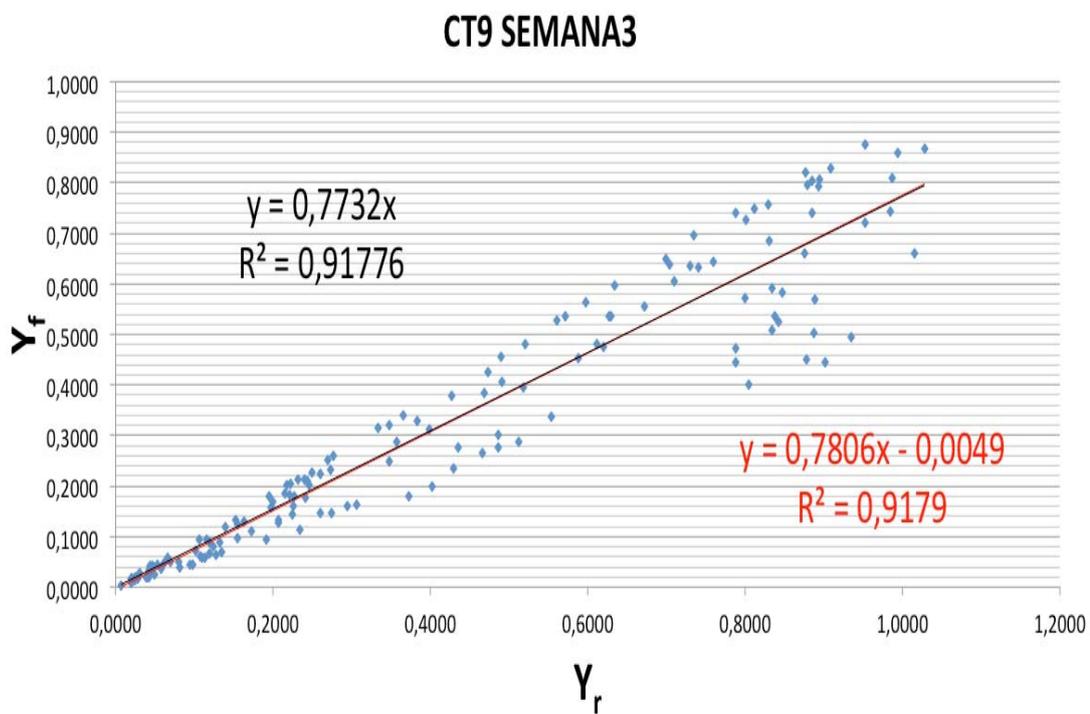
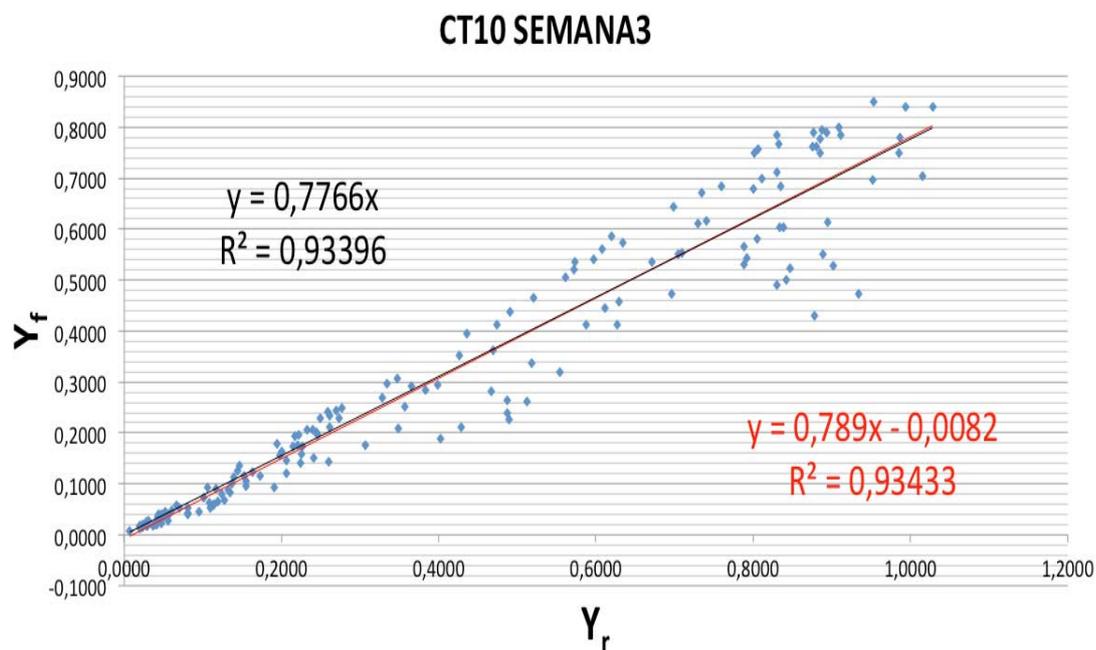
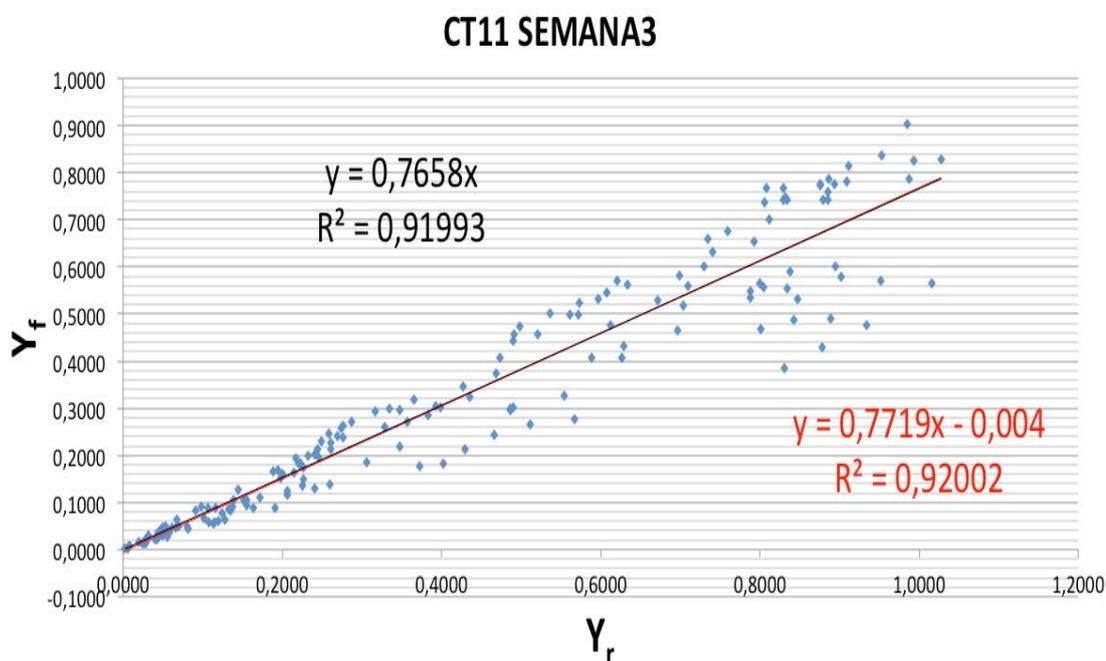


Fig. 10 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT9 en la 3ª semana

Fig. 11 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT10 en la 3ª semanaFig. 12 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT11 en la 3ª semana

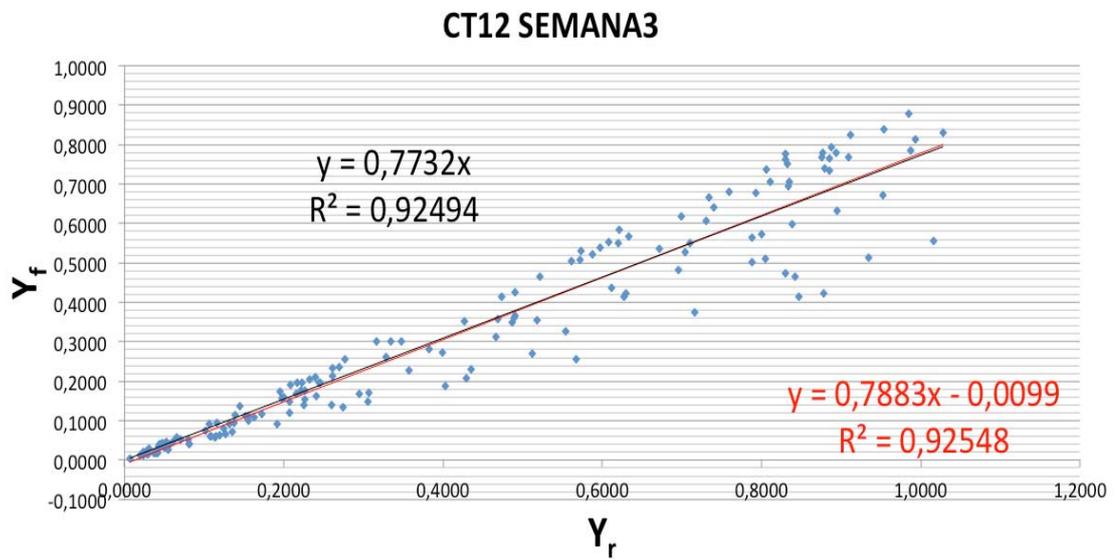


Fig. 13 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT12 en la 3ª semana

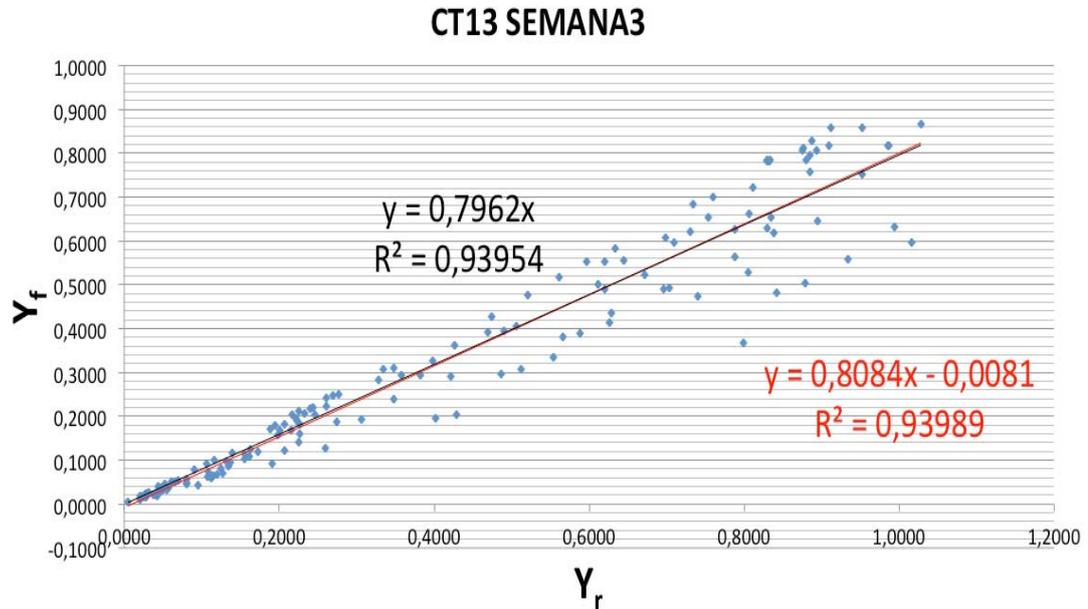
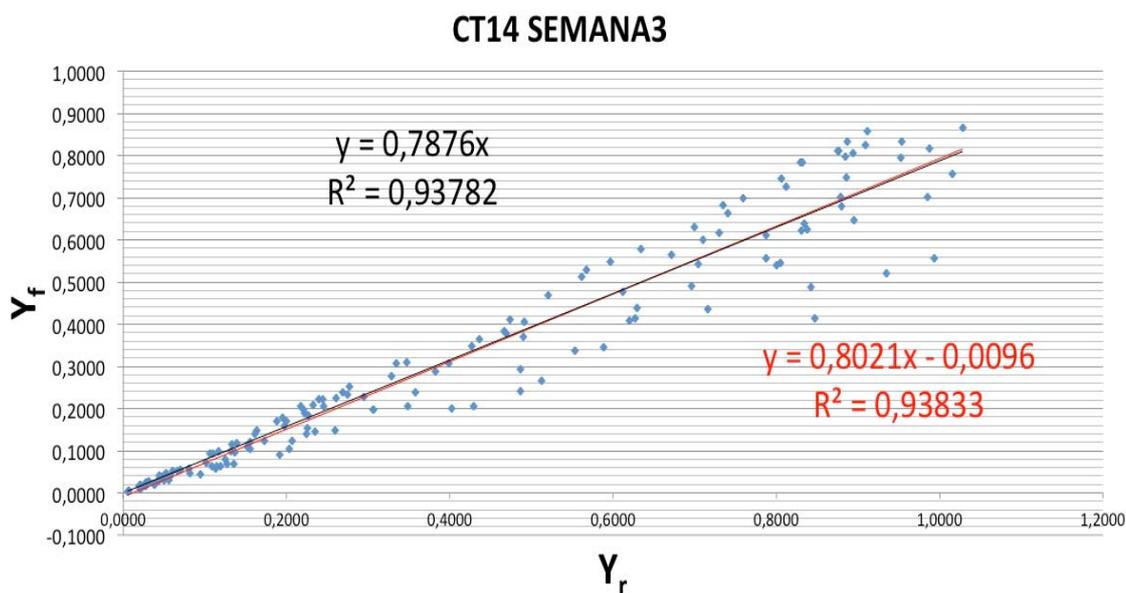
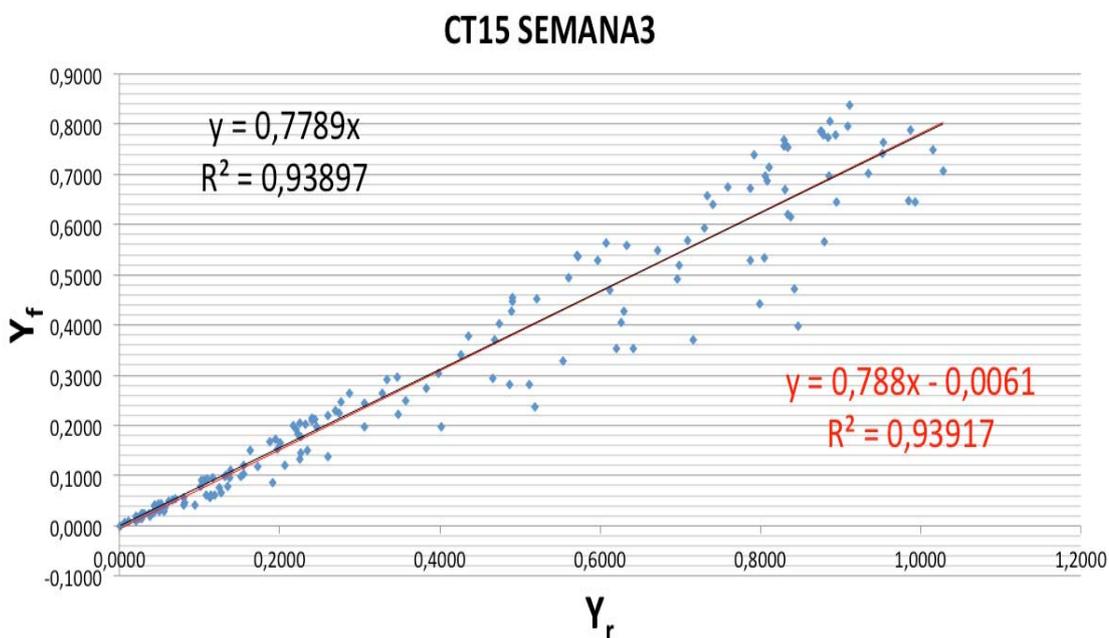


Fig. 14 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT13 en la 3ª semana

Fig. 15 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT14 en la 3ª semanaFig. 16 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT15 en la 3ª semana

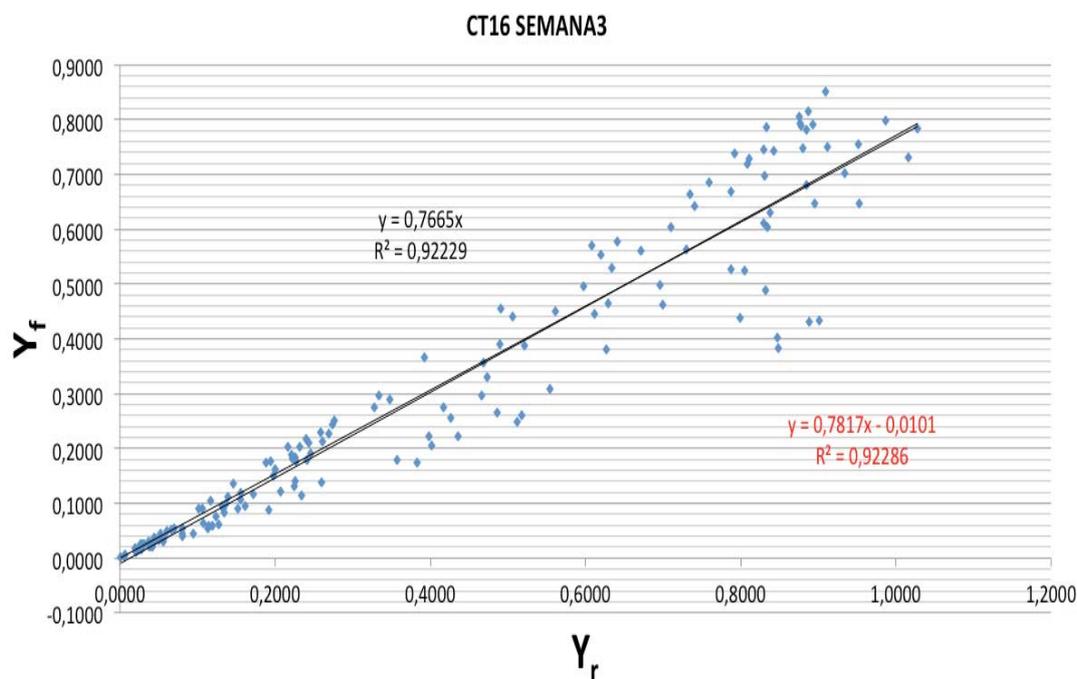


Fig. 17 Línea de regresión lineal de los datos (Y_r, Y_f) del CT16 en la 3ª semana

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. Para algunas instalaciones también pueden ser implementadas de manera sistemática en el software. Puede ser aplicado en línea para la monitorización operacional o fuera de línea 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 la interpretación de conjuntos de pares de datos de variables medidas en el diagrama de flujo.

5. Metodología de la aplicación de ANOVA y la prueba de Tukey

La metodología propuesta se basa en las siguientes condiciones de partida:

- Un SFCR de potencia nominal del orden de cientos de kW o de MW está formado por un conjunto de centros de transformación que pueden considerarse como SFCR independientes sometidos a las mismas condiciones de incidencia de radiación solar y de parámetros ambientales similares, tales como la velocidad y dirección del viento, humedad relativa, temperatura ambiente y presencia de polvo y suciedad.

- El concepto introducido en la norma UNE-EN 61724, referente a la relación de comportamiento del SFCR, conocido con las siglas PR, es un parámetro normalizado que permite la comparación entre sistemas de diferente tamaño y ubicados en sitios de diferentes condiciones climatológicas.
- El PR no debe experimentar un cambio brusco de tendencia entre días consecutivos e incluso entre semanas consecutivas, porque los factores de pérdidas que dan lugar al decrecimiento del PR no cambian sustancialmente en este intervalo de tiempo.

La técnica ANOVA surge como una generalización del contraste de hipótesis para dos medias de la distribución *t* de Student, cuando el número de muestras a comparar es mayor que dos. El modelo factorial con un factor o ANOVA con un factor en el que la variable analizada depende de un solo factor de tal manera que las causas de su variabilidad son debidas a una componente aleatoria conocida como error experimental. El nombre de análisis de varianza se utiliza porque el elemento básico del análisis estadístico es precisamente el estudio de la variabilidad. Teóricamente, es posible separar la variabilidad de la variable analizada en dos fuentes: la originada por el factor en cuestión y la producida por los restantes factores que entran en juego, conocido con el nombre de error experimental. Si mediante los controles estadísticos adecuados, la variación producida por cierto factor es significativamente mayor que la producida por el error experimental, se debe rechazar la hipótesis nula y por tanto, aceptar la hipótesis alternativa de que el factor ha afectado de distinta forma a las muestras analizadas. El estadístico usado para la prueba de contraste de hipótesis es la *F* de Fischer.

El cumplimiento de las condiciones de partida, mencionadas anteriormente, conduce a la condición de operación adecuada del sistema, expresada mediante la hipótesis nula H_0 de que no debe haber diferencias significativas entre los valores medios del PR semanal de los 16 centros de transformación de la planta solar. La aceptación de esta hipótesis al nivel de significación elegido (5%) atribuye las diferencias entre los valores medios del factor analizado (PR) a causas aleatorias derivadas del error experimental de medición. Si por el contrario, se rechaza la hipótesis nula H_0 , se aceptaría la hipótesis alternativa H_1 que significa que la causa de la diferencia entre los valores medios del PR semanal se deben considerar debidos a factores relacionados con alguna avería en algún o algunos centro(s) de transformación del SFCR. Una vez contrastado el hecho de que existen diferencias significativas mediante el análisis de varianza (ANOVA), interesa conocer qué niveles del factor (en este caso, él o los centros de transformación) han influido en ello. Para ello se emplea la prueba de comparación múltiple de acuerdo con el criterio de Tukey. Ésta consiste en obtener las medias de los tratamientos (PR de los 16 centros de transformación). A continuación se construye la matriz de diferencias en valor absoluto entre todos los posibles pares de medias. Finalmente, se calcula la diferencia honestamente significativa a un cierto nivel de significación α , dada por la siguiente expresión:

$$HSD = Q_{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{MSE}{n}} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Q_{α} representa el multiplicador, encontrado en las tablas de Tukey y que depende del número de grupos o tratamientos (centros de transformación), del número de grados de libertad del error experimental (variación dentro de los centros de transformación) y del nivel de significación elegido α .

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

n es el tamaño de muestra de los PR medios de cada uno de los grupos (Centros de transformación).

5.1 Procesamiento y Análisis de 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 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 cuadrado	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
Multiplificador=	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

En este 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 $\alpha = 0,05$).

$$MSE = 0,021$$

$$n = 149$$

Por tanto, $HSD = 0,058$. 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 modular 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:

	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																

Tabla 4. Aplicación del método Tukey

Comparando los valores de la tabla de Tukey con el valor HSD obtenido, se observa que en el centro de transformación N° 6 existen datos que superan este valor, por lo que se puede 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.

6. Conclusiones

- 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.
- 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.
- 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.

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 SFGR 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, velocidad del viento y la temperatura del módulo, entre otras, que son realizadas con medios de medición asociados a varias fuentes de errores que generan incertidumbres de mayor cuantía en el cálculo de la producción teórica esperada.

7. Bibliografía

- [1] VILARIÑO, J. & MENÉNDEZ, H.F. (2016). Índices de comportamiento del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica y teoría de errores. Aprobado para su publicación en la Revista Tecnología Química, Vol. XXXVI. N°3, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.
- [2] IEC Standard 61724: 1998. Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis. Geneva, Switzerland.
- [3] DREWS, A. et al. (2007). Monitoring and remote failure detection of grid-connected PV systems based on satellite observations. *Solar Energy*, Vol. 81, N° 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] ELIES, S. et al. (2010). Influence of raw-shading on the performance of PV systems – simulation and measurement. 25th EUPVSEC, Valencia, Spain, pp. 4640-4646.
- [6] MÜLLER, B. et al. (2012). Maximizing the yield of large PV Power Plants: What can we learn from Monitoring and Simulation? 27th EUPVSEC, Frankfurt, Germany, pp. 3775-3781.
- [7] RANSOME, S.J. et al. (2005). Advanced analysis of PV system performance using normalized measurement data. *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1698-1701.
- [8] UEDA, I. et al. (2009). Performance analysis of various system configurations on grid-connected residential PV systems. *Solar Energy*, Vol.93, N° 6, pp. 945-949.
- [9] WOYTE, A. et al. (2013). Monitoring of Photovoltaic Systems: Good practices and systematic analysis. *Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Paris, France, pp. 3686-3694.
- [10] ZHOU, W., YANG, H., & FANG, Z. (2007). A novel model for photovoltaic array performance prediction. *Applied Energy*. Vol. 84, pp. 1187-1198.
- [11] SPIEGEL, M.R & STEPHENS, L.J. (2009). *Estadística*. 4ª Edición. Editorial Mc Graw Hill. México.
- [12] RÍUZ, F. & WÄRNBERG, J. (2014). *Bioestadística*. 2ª Edición. Editorial Paraninfo. España.