

# ANÁLISIS DE LOS DATOS DE MEDICIÓN DE ARMÓNICOS VARIABLES EN EL TIEMPO

*Data analysis harmonic measurement variable in time*

Fecha de recibo del artículo: Julio de 2011 - Fecha de aceptación: Septiembre de 2011

Percy R. Viego Felipe

Universidad de Cienfuegos, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, Cuba - e-mail: pviego@ucf.edu.cu

Julio R. Gómez Sarduy

Universidad de Cienfuegos, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, Cuba - e-mail: jgomez@ucf.edu.cu

Vladimir Sousa Santos

Universidad de Cienfuegos, Departamento de Mecánica, Cienfuegos, Cuba - e-mail: vsousa@ucf.edu.cu

Marcos A. de Armas Teyra

Universidad de Cienfuegos, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, Cuba - e-mail: marmas@ucf.edu.cu

## RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo revisar los problemas asociados a la medición de los niveles de armónicos presentes, en una onda distorsionada de tensión y corriente no estacionaria, y efectuar la caracterización de los datos registrados. Para ello, se utiliza como ejemplo un grupo de mediciones recientes, realizadas en condiciones de campo a un motor asíncrono trifásico de 320 kW, 440 V, 820 A, 750 rpm, cuya velocidad se regula con un convertidor de frecuencia, y se determina la distorsión de tensión y corriente. Estos datos son descritos en diferentes formas estadísticas. Las ventajas y desventajas de cada una de ellas son discutidas, así como la interpretación de los resultados. Se analiza, además, los factores que influyen en el factor de distorsión de tensión (FDT). Las observaciones realizadas en el trabajo son aplicables a cualquier armónico individual o al THD.

## Palabras clave

Análisis estadísticos, distribución normal, medición de armónicos, señal variable en el tiempo.

## ABSTRACT

This article aims to review the problems associated with measuring the levels of harmonics present in a distorted wave of non-stationary voltage and current, and make the characterization of the recorded data. This is used as an example a group of recent measurements, performed under field conditions to a three-phase asynchronous motor 320 kW, 440 V, 820 A, 750 rpm, the speed is controlled by a frequency converter, and determines the voltage and current distortion. These data are described in different ways statistics. The advantages and disadvantages of each are discussed, and the interpretation of results. It also analyzes the factors that influence the voltage distortion factor (TDF). Observations in the work are applicable to any individual harmonic or THD.

## Keywords

Statistical analysis, normal distribution, harmonics measurement, time-varying signal.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos se ha experimentado un incremento en el nivel de armónicos en los sistemas de suministro eléctrico. Esto se debe, de manera primordial, al amplio uso actual de dispositivos electrónicos de potencia en las cargas residenciales, comerciales e industriales. La presencia de armónicos provoca un aumento de las pérdidas y sobrecalentamiento en transformadores, conductores y motores eléctricos. En estos últimos se experimenta, además, un incremento en las vibraciones, esfuerzos sobre el aislamiento y otras situaciones, que afectan su vida útil [3]. El efecto de los armónicos en los motores resulta de gran interés, debido a su extensa aplicación en los sistemas de potencia. Por estos motivos, las empresas de servicio eléctrico deben evaluar con frecuencia la calidad de la energía suministrada a los principales consumidores, a través de programas de medición para determinar si los niveles de armónicos se encuentran dentro de los límites recomendados por las normas [1].

La mayoría de las normas existentes, que tratan los armónicos, establecen valores límites fijos. Las mediciones de campo, sin embargo, indican claramente que los armónicos de tensión y corriente son variables en el tiempo, debido a los cambios continuos en la configuración del sistema y las condiciones de carga [5], [6]. Estas variaciones, en la mayoría de las veces, ocurren rápidamente de manera no determinística y aleatoria. Este comportamiento conduce al uso de técnicas estadísticas para cuantificar los niveles de armónicos.

Otro desafío que presentan las mediciones del contenido armónico de una forma de onda variable con el tiempo, es la exactitud de los datos de medición, lo cual es esencial en varias aplicaciones, como el diseño de filtros de armónicos, evaluación de los efectos en los equipos de potencia, y la solución a varios problemas de calidad de la energía. La mayoría de los algoritmos de medición se basan en la Transformada de Fourier Rápida (TRF). Este método pierde exactitud bajo diversas condiciones, si no se toman acciones preventivas.

El objetivo de este trabajo es analizar los aspectos relacionados con el comportamiento armónico mediante la caracterización de un grupo de datos recopilados recientemente, donde se observa la distorsión de tensión y corriente. Para esto, se usan diferentes métodos estadísticos como las mediciones descriptivas que incluyen el máximo, mínimo, media y desviación estándar, así como la determinación de la Función de Densidad de Probabilidad (fdp) y la función de distribución de probabilidad. Las ventajas y desventajas de cada método estadístico para estos análisis son discutidas.

## CASO DE ESTUDIO

Para mostrar una variación típica de la señal de armónicos, se presenta un grupo de datos registrados en la fábrica de cemento "Cienfuegos S. A.", ubicada en la Provincia de Cienfuegos, Cuba. Los motores de esta industria están provistos de convertidores de frecuencia, por lo que se espera un nivel considerable de armónicos. Las

mediciones se realizaron a un motor asincrónico trifásico de 320 kW, 440 V, 820 A, 750 rpm, su velocidad es regulada con un convertidor de frecuencia. Se usó un analizador de calidad de la energía trifásico Fluke 434/435 de alta precisión, que fue ubicado en el Centro de Control de Motores (CCM). Este motor es el accionamiento

principal de un horno rotatorio de clínker y posee un régimen de trabajo continuo con carga variable.

En la Figura 1 se presenta el comportamiento del Factor de Distorsión de Tensión (FDT) y el Factor de Distorsión de Corriente (FDC), correspondiente al 11° armónico. Se seleccionó este orden pues fue, de los armónicos individuales, el que presentó los mayores valores de FDT. El 11° armónico forma parte del conjunto (3n+2) de secuencia negativa, que se opone a la fuerza magneto-motriz y al momento fundamental del motor, afectando sensiblemente su eficiencia, funcionamiento y vida útil.

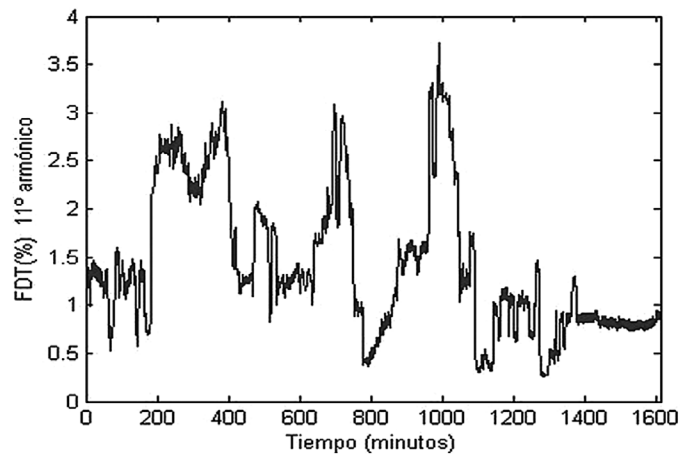
El FDT y el FDC se definen como [3]:

$$FDT = \frac{V_n}{V_1} * 100 \quad (\%) \quad (1)$$

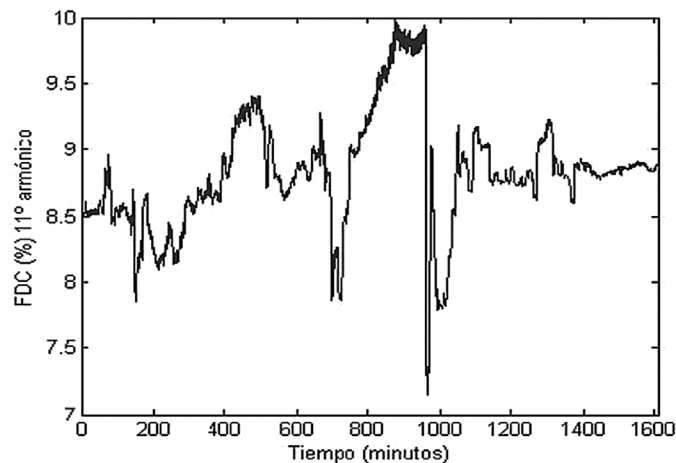
$$FDC = \frac{I_n}{I_1} * 100 \quad (\%) \quad (2)$$

Donde  $V_n$  (V) e  $I_n$  (A) son la tensión y la corriente del armónico (n), respectivamente, y  $V_1$  (V) e  $I_1$  (A) son la tensión y la corriente de la componente fundamental.

En la Figura 1(a) se observa que FDT en ocasiones supera el 3 %, establecido por la norma IEEE 519 como límite de distorsión de tensión individual para sistemas menores de 69 kV.



(a)



(b)

Figura 1. Variación de: (a) FDT del 11° armónico, (b) FDC del 11° armónico

Un aspecto interesante es analizar el efecto de la distorsión de corriente en la distorsión de la tensión que alimenta a esta carga. Una forma gráfica de chequear la correlación entre estas dos variables es plotear una en función de la otra, o mostrar una gráfica de dispersión. Los resultados permiten conocer qué factor influye más: si la interacción de la distorsión de corriente producida por la carga no lineal, y el sistema de impedancia de la línea hasta el punto de medición, o la fortaleza del sistema que alimenta a este punto [2].

En el caso que se analiza, el instrumento de medición se ubica en la red que alimenta al motor asincrónico objeto de estudio, y al convertidor de frecuencia que regula su velocidad. La Figura 2 muestra la gráfica de dispersión del 11º armónico.

En este caso particular, no existe una relación simple entre ambos factores de distorsión; de hecho, el coeficiente de correlación obtenido del ajuste de un polinomio de grado 9 es solo de 0.493.

## CARACTERIZACIÓN DE LOS DATOS DE MEDICIÓN

Cuando se trata de representar gráficamente los armónicos variables con el tiempo, se ob-

serva con frecuencia que se presentan un gran número de irregularidades que no permiten conformar patrones coherentes [1]. Los procesos físicos que producen estas irregularidades involucran gran número de factores cuyos efectos individuales en los armónicos de tiempo no pueden predecirse. Debido a estos elementos de incertidumbre, y a que las variaciones por lo general tienen un carácter aleatorio, la única forma de describir el comportamiento es en términos estadísticos, con lo cual se transforma un volumen grande de datos a una forma comprimida y comprensible [8].

## MEDICIONES ESTADÍSTICAS

La medición descriptiva numérica es la forma más simple de representar un grupo de registros. Estas incluyen el valor mínimo, máximo, promedio o valor medio, y desviación estándar, posibilitando construir una imagen apropiada de la distribución relativa del grupo de datos.

Matemáticamente, a partir de un grupo de mediciones  $X_i$ ,  $i=1, \dots, n$ , con el valor mínimo  $X_{min}$ , valor máximo  $X_{max}$ . El valor promedio  $X_{avg}$  y la desviación estándar  $\sigma_x$  son calculados por:

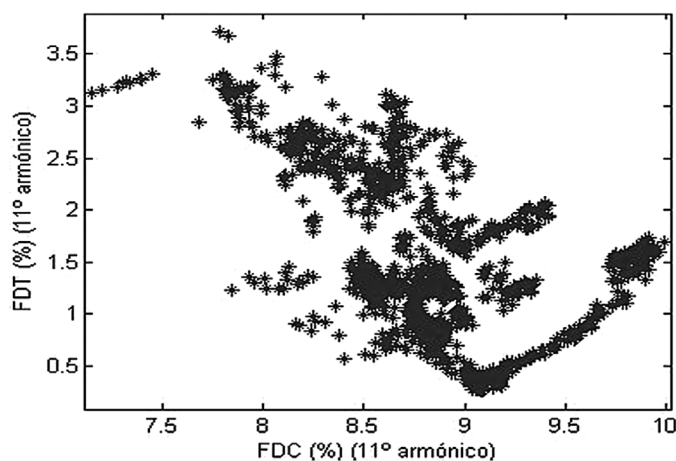


Figura 2. Gráfico de dispersión del FDT en función de FDC del 11º armónico

$$X_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (3)$$

y

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{avg})^2}{n-1}} \quad (4)$$

La Tabla 1 muestra las mediciones estadísticas para el FDT y el FDC del 11º armónico.

Son bien conocidos los beneficios que reporta un juego de datos que describa una distribución normal; sobre todo, porque ofrece información de la probabilidad de que un valor o fenómeno esté presente, permitiendo conocer y resolver diversos problemas. En ese caso resulta de vital importancia el valor de  $X_{avg}$  y  $\sigma_x$ .

La ecuación 5 representa dicha función.

$$p_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(X - X_{avg})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

Lo anterior depende del nivel de aleatoriedad de la señal y si esta contiene una componente determinística. Si la señal es completamente aleatoria, la distribución es normal. Sin embargo, si las mediciones estadísticas son derivadas de una señal con una significativa componente determinística, entonces la distribución de probabilidad real se espera que se desvíe de una distribución normal [1]. Un elemento que debe considerarse en las mediciones estadísticas es que el factor tiempo se pierde por completo, impidiendo conocer cuándo tuvo lugar la mayor distorsión armónica dentro de un intervalo registrado; y, sin embargo, este constituye un

factor importante en la resolución de problemas [1].

### HISTOGRAMAS O FUNCIONES DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD (fdp)

La Función de Densidad de Probabilidad (fdp) es un gráfico que muestra la porción del total de mediciones que cae en varios intervalos. Cuando se cubre un área igual a la unidad, el histograma constituye la fdp exacta de la señal.

La Figura 3 muestra la fdp correspondiente a la señal de la Figura 1.

En la Figura 3 (a) se observa, con el ajuste de la campana de Gauss, que la señal no presenta una distribución normal; ello se debe a la presencia en esta, de una componente determinística. En la Figura 3 (b) el resultado es diferente, observándose una distribución con un comportamiento aproximado gaussiano, por lo que la distribución se considera normal.

Para resolver el problema reflejado en la Figura 3 (a), se pueden aplicar dos métodos, con los que se obtendría una distribución normal. Estos son las descripciones estadísticas a intervalos de sub-tiempo y la combinación de la descripción estadística y determinística.

El método de las descripciones estadísticas a intervalos de sub-tiempo consiste en examinar la representación gráfica registrada, y separar por intervalos de tiempo las tendencias similares en el comportamiento de la variable. Esto permite calcular las variables estadísticas para cada uno de estos intervalos.

Con este procedimiento se descompone el histograma en dos diferentes, con un simple pico, más fácil de describir analíticamente. Debe que-

**Tabla 1. Medición estadística de la señal de la Figura 1**

X	Xmin	Xmax	Xavg	$\sigma_x$
FDT 11 no armónico (%)	0,26	3,72	1,423	0,7519
FDC 11 no armónico (%)	7,15	9,99	8,82	0,4366

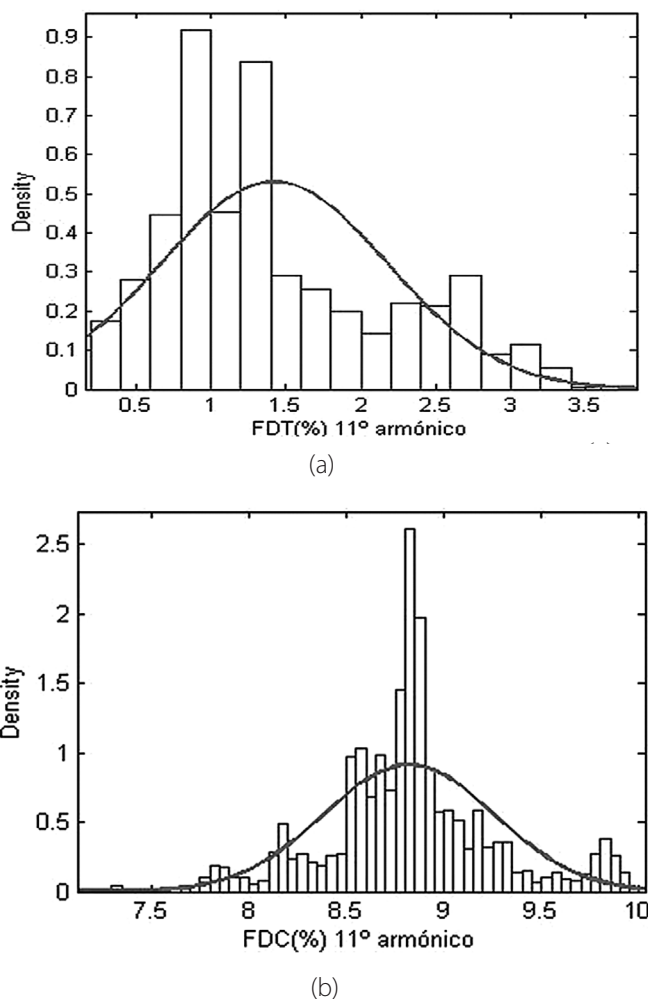


Figura 3. Función de Densidad de Probabilidad de: (a) FDT y (b) FDC del 11º armónico

dar claro que los dos histogramas resultantes son equivalentes al histograma original.

El método de la combinación de la descripción estadística y determinística consiste en el tratamiento de una señal no estacionaria, igual al de la Figura 1, como la suma de una componente determinística  $X_D$  y una componente aleatoria  $X_R$ .

El valor de  $X_D$  puede ser extraído mediante el ajuste de una función polinomial de cierto grado, a las mediciones realizadas usando el método de los mínimos cuadrados.  $X_R$  se define entonces como la diferencia entre la señal real y

la componente determinística. La componente aleatoria obtenida debe presentar una distribución normal, con lo que se harán los cálculos deseados. La solución final será la suma de los resultados de estos cálculos y la componente determinística.

### FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD

Una función de distribución de probabilidad  $P_x(x)$ , brinda la misma información que la fdp pero de forma diferente. La función  $P_x(x)$  comprende la sumatoria de todos los momentos en

los cuales la variable excede un cierto nivel. En matemática, una función de distribución representa la integral de la Función de Densidad y se usa, además, para expresar la probabilidad de que ocurra un evento en que una variable observada  $X$ , sea mayor que un cierto valor  $x$ .

La Figura 4 muestra esta función para la señal de la Figura 1(a).

## INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Con las herramientas descritas se pueden extraer las informaciones siguientes del comportamiento del FDC y FDT del 11° armónico durante el período de medición.

El hecho de que el FDC presentó una distribución normal, permite conocer, entre otras cosas, que existe un 68% de probabilidad de que esta magnitud presente valores dentro del intervalo  $X_{avg} \pm \sigma_x$ , un 95% para el intervalo  $X_{avg} \pm 2\sigma_x$ , y un 99% para el intervalo de  $X_{avg} \pm 3\sigma_x$ . Teniendo en cuenta lo anterior y los datos de la Tabla 1, se puede plantear que existe un 68% de probabilidad que el FDC del 11° armónico presente valores entre 8,38 y 9,26; un 95% para el intervalo entre 7,94 y 9,69; así como un 99% para el intervalo entre 7,51 y 10,13.

Para el Factor de Distorsión de Tensión no se pueden realizar las mismas interpretaciones, pues no sigue una distribución normal. Sin em-

bargo, la función de distribución de probabilidad ofrece la misma información de otro modo, y no se necesita la condición de normalidad. De dicha función se obtiene que el FDT se comportó por encima del 3% en solo un 3,92% de los registros realizados. La presencia de numerosas cargas no lineales en la fábrica, suponía una tendencia en que los valores del FDT se comportaran mayoritariamente por encima del límite establecido por la norma IEEE. Sin embargo, debido a la rigidez del sistema eléctrico, esto no ocurrió.

Estas herramientas estadísticas, presentan como limitación común el factor tiempo, pues si bien se puede conocer la duración total durante la cual se excedió un armónico o nivel de distorsión, no se puede determinar si ocurrió de forma continua o en pulso. Esta información es crucial cuando se estudian los efectos térmicos de los armónicos en los equipos [7]. Por esta razón, se recomienda determinar a partir de mediciones realizadas durante un tiempo significativo, períodos en que los armónicos de tiempo presenten patrones característicos, y realizar los análisis energéticos en estos intervalos.

## CONCLUSIONES

- El comportamiento de los armónicos de tiempo, obliga a que su análisis se realice de forma estadística.

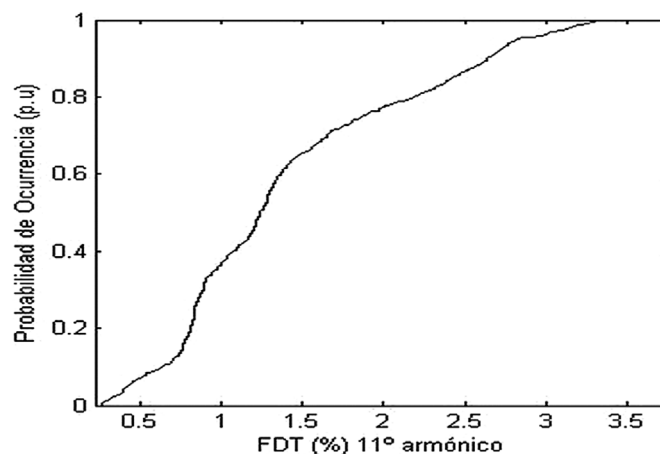


Figura 4. Función de distribución de probabilidad del FDT del 11° armónico

- Son varias las formas de describir los datos registrados de forma estadística. Los cálculos estadísticos e histogramas constituyen los métodos más usados.
  - Las figuras de la densidad de probabilidad frecuentes no pueden ser representadas por una función de probabilidad normal. Este problema se reduce, en gran parte, descomponiendo la señal original en una componente determinística y aleatoria o en intervalos de tiempo.
  - La existencia de alto contenido de armónicos en una carga no depende solo de la presencia de elementos no lineales, sino, además, de la capacidad y rigidez del sistema eléctrico.
  - Las descripciones estadísticas ocultan el período de ocurrencia de ciertos eventos, por lo que es necesario detectar patrones característicos en el comportamiento de los armónicos de tiempo, y trabajar sobre estos.
- [2] C. J. Melhorn and M. F. McGranaghan. *Interpretation and Analysis of Power Quality Measurements*. IEEE Trans. Industry Applications, Vol 31, Nov/Dic 1995. pp. 1363-1370.
- [3] Chin-Y. Lee and W. J. Lee. *Effects of nonsinusoidal voltages on the operation performance of a three-phase induction motor*. IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, June 1999. pp. 193-201.
- [4] G. T. Heydt and E. Gunter. *Post-Measurement Processing of Electric Power Quality Data*. 1996 IEEE/PES Winter Meeting, Baltimore, MD, Enero 21-25, 1996, paper No. 96 WM 063-8-PWRD.
- [5] IEEE Std. 519, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electric Power Systems, IEEE Press, 1991.
- [6] T. Shuter, H. Vollkommer and T. Kirkpatrick. *Survey of Harmonics Level on the American Electric Power Distribution System*. IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, No. 4, 1989. pp. 2204-2212.
- [7] Y. Baghzouz, Working Group. *Time - Varying Harmonics: Part I- Characterizing Measured Data*. IEEE Trans. Power Delivery, Vol 13, No. 3, julio 1998. pp. 938-944.
- [8] W. Xu, Y. Mansour, C. Siggers and M. B. Hughs, "Developing Utility Harmonics Regulations Based on IEEE STD 519- BC. Hydro's ", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 10, No. 3, 1995. pp. 137-143.

## REFERENCIAS

- [1] A. Emanuel, J. Orr, D. Cygansky and E. Gulachensky. *Survey of Harmonics Voltajes and Currents at Distribution Substations*. IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 6, No. 4, 1991. pp. 1990-1993.