



TEÓRICO EXPERIMENTAL

Caracterización de la calidad de la energía en circuitos eléctricos de distribución

Power quality characterization on distribution electric networks

Lester Julio - Marrero Rodríguez

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.

Resumen/Abstract

Recientemente se ha incrementado la presencia de elementos no lineales en los sectores residencial, comercial e industrial, lo que ha afectado la forma de onda sinusoidal del voltaje. Estos sectores disponen de la energía eléctrica a través de las redes de distribución, por ello es imprescindible el chequeo sistemático de las mismas con el fin de garantizar una calidad de la energía dentro de las normas establecidas. En el trabajo se efectúa la caracterización y se analiza el comportamiento de problemas de calidad de la energía en circuitos eléctricos de distribución a partir del uso de índices representativos y el empleo de diferentes técnicas estadísticas implementadas en MATLAB. Para ello se utilizan como ejemplo las lecturas del ION 7650 ubicado en el municipio Sagua la Grande de la provincia de Villa Clara. Los resultados obtenidos tras la aplicación de cada una de las técnicas estadísticas en la caracterización de estos problemas son discutidos.

Palabras clave: calidad de la energía, técnicas estadísticas, circuitos de distribución, normas IEC, MATLAB.

Recently it has been producing an accelerated presence of non-linear elements in the residential, commercial and industrial sectors, which has affected the sinusoidal voltage waveform, altering its amplitude and frequency. These sectors obtain the electric energy from distribution networks, so it is essential to check them systematically in order to ensure the power quality according to the established standards. In this paper, a characterization and analysis of the behavior of power quality parameters on distribution electric networks by means of a set of statistical techniques implemented in MATLAB and the employ of representative indices is carried out. For that purpose, the readings of the ION 7650 placed in Sagua municipality are used as an example. The results after the application of these statistical techniques for the characterization of these power quality problems are discussed.

Key Words: *power quality, statistical techniques, distribution networks, IEC standards, MATLAB.*

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la calidad de la energía eléctrica (PQ, siglas en inglés de *Power Quality*) y el suministro de la misma se han convertido en una seria preocupación entre suministradores, consumidores, fabricantes de equipos e investigadores [1, 2]; dado su impacto directo, desde el punto de vista económico, en los sectores industrial y doméstico, lo que afecta el desarrollo de cualquier nación [3]. La PQ comprende un amplio rango de fenómenos electromagnéticos cuyas principales causas radican en la presencia cada vez mayor dentro del sistema eléctrico de elementos no lineales, lo que ha afectado el mantenimiento de la forma de onda sinusoidal del voltaje, alterándose su amplitud y frecuencia [1].

Se han publicado normas internacionales para establecer límites permisibles y minimizar estos problemas, como las de la serie IEC (siglas en inglés de *International Electrotechnical Commission*) 61000, dirigida a los comités electrotécnicos de todas las naciones [4 - 6]. Por tanto, resulta necesario conocer la deformación de la forma de onda del voltaje para comprobar si sobrepasa dichos límites permisibles [7], y si esto ocurre, identificar y analizar la fuente del disturbio, para adoptar finalmente la acción de mitigación requerida [8, 9]. Desde el punto de vista del dominio del tiempo, los disturbios de PQ pueden ser continuos o discretos. Los disturbios continuos: distorsión de la forma de onda (armónicos e interarmónicos), desbalance, fluctuación (*flicker*) y desviación de la tensión están presentes en cada ciclo de la forma de onda, mientras que los discretos aparecen como eventos independientes y aislados [6, 10]. Estos últimos requieren para su evaluación una extensión significativa de tiempo (generalmente un año como mínimo) debido a su baja probabilidad, por lo que no forman parte del presente estudio.

Los armónicos son componentes de frecuencia múltiplos enteros de la fundamental, y afectan principalmente las comunicaciones telefónicas y sistemas de control y protección, además de incrementar las pérdidas en la red, dañar equipos sensibles y causar calentamientos excesivos en máquinas eléctricas [11]. Los interarmónicos son componentes de frecuencia no múltiplos enteros de la fundamental y, en contraste con los armónicos, no se manifiestan en frecuencias conocidas y/o establecidas, pues estas varían con las condiciones de operación de la carga contaminante. En adición a la distorsión de la forma de onda, estos también pueden causar *flicker*, proveniente este último de cargas que son intermitentes o muestran grandes fluctuaciones en demanda de potencia [12, 13]. La desviación de tensión se refiere a la desviación de la tensión eficaz o RMS (siglas en inglés de *Root Mean Square*) en estado estable a la frecuencia del sistema [6]. El desbalance de tensión es un problema que aparece fundamentalmente con la presencia de cargas monofásicas en redes trifásicas [14]. Tomando en cuenta los cambios constantes en la configuración del sistema y las condiciones de carga, las formas de onda del voltaje y la corriente varían continuamente en el tiempo, por lo que los datos registrados presentan un cierto grado de incertidumbre, y una vez tomados aleatoriamente, necesitan ser descritos en forma estadística [10]. El objetivo del trabajo radica en la caracterización de estos problemas de PQ en redes de distribución, lo que a su vez contribuye a la evaluación y diagnóstico de los mismos, posibilita el chequeo de niveles de compatibilidad y la verificación del cumplimiento de las normas IEC.

Para ello se usan e implementan en MATLAB diferentes técnicas estadísticas, tales como las funciones de distribución acumulada (CDF, siglas en inglés de *cumulative distribution function*) y de densidad probabilística (PDF, siglas en inglés de *probability density function*), la estimación puntual y por intervalo, así como análisis de correlación y regresión lineal. Las técnicas son aplicadas a las mediciones obtenidas del ION 7650 ubicado en la Subestación de Sagua 110/34.5 kV, donde funge como totalizador. Las mediciones fueron efectuadas exactamente por una semana: desde las 12:00 AM del martes 7 de junio hasta las 12:00 AM del martes 14 de 2016, en intervalos de 10 minutos, según dictamina la IEC 61000-4-30 [6]. El trabajo queda estructurado de la siguiente manera. En la segunda sección se analiza el comportamiento de dichos problemas durante la semana de prueba y el cumplimiento de los límites establecidos por las normas. En la tercera sección se representa el histograma de frecuencias absolutas, la PDF y la CDF de la distorsión armónica de voltaje. La cuarta sección detalla la estimación puntual y por intervalo de la media y la desviación estándar de este propio índice. En la sección cinco se realizan análisis de correlación y regresión lineal entre distintas variables. Finalmente, se muestra la discusión de los resultados y conclusiones del estudio desarrollado.

COMPORTAMIENTO DE PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA

Según las normas IEC, para las mediciones obtenidas es posible caracterizar el comportamiento del voltaje durante la semana de prueba, y comprobar si cumple con los niveles de compatibilidad establecidos. En realidad, la PQ comprende tanto la calidad del voltaje como de la corriente, sin embargo, el término se asocia mayormente al voltaje debido a que el sistema de suministro solo puede controlar la calidad del mismo [15].

A. Distorsión armónica

En la figura 1, se ilustra la distorsión armónica total (THD, siglas en inglés de *total harmonic distortion*) de voltaje durante la semana de prueba, donde se observan las mayores distorsiones durante las primeras horas de la noche, con picos de alto valor. Esto es un indicio del predominio de la carga residencial en el circuito, toda vez que en este horario destaca la operación de cargas no lineales tales como TV, lámparas, PC, etc. Sin embargo, estos picos de alto valor no superan el límite de compatibilidad máximo de 8 % impuesto por la IEC 61000-2-12 [4].

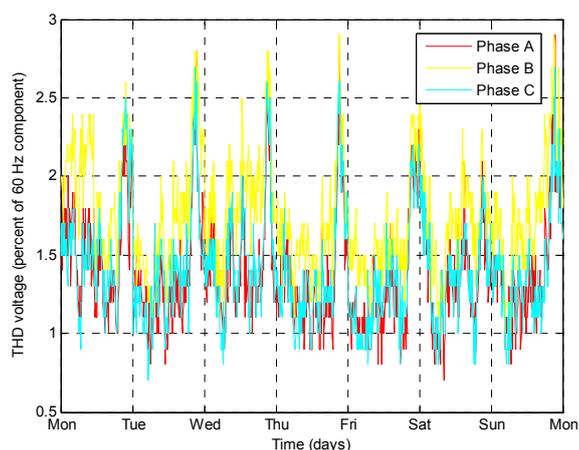


Fig. 1. THD de voltaje por fase.

En cuanto a la composición de esta magnitud, las figuras 2, 3 y 4, destacan el espectro de probabilidad 95 % de los armónicos de voltaje impares múltiplos de tres, impares no múltiplos de tres y pares, respectivamente. La línea de color azul señala el nivel de compatibilidad establecido por la IEC 61000-2-12 [4], para los armónicos individuales hasta el 40 se hallan por debajo de sus respectivos límites.

Para el caso de la corriente, estas normas no señalan límites de emisión, sino que proponen niveles de planificación para una carga o cliente en particular.

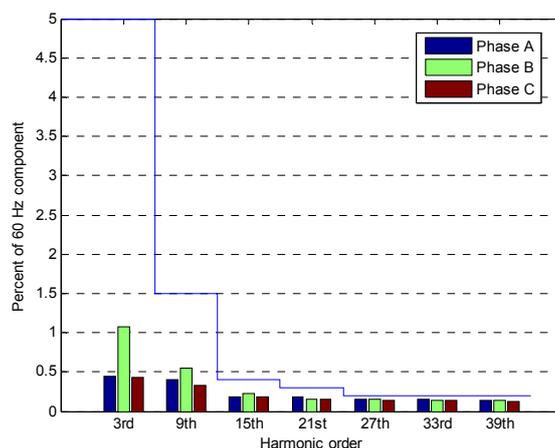


Fig. 2. Armónicos de voltaje impares múltiplos de tres por fase.

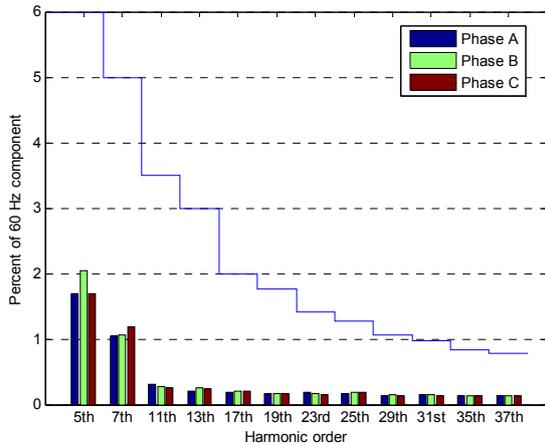


Fig. 3. Armónicos de voltaje impares no múltiplos de tres por fase.

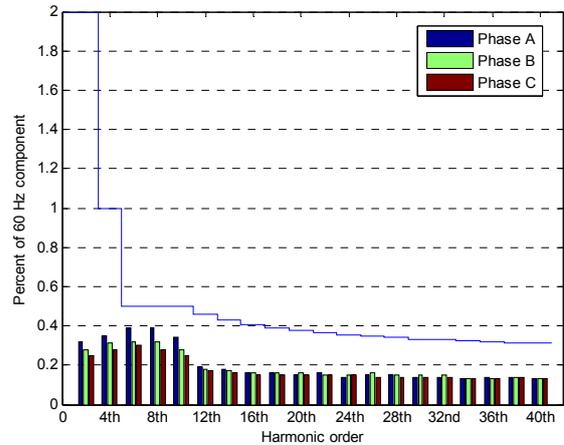


Fig. 4. Armónicos de voltaje pares por fase.

B. Desviación de tensión

La figura 5, muestra el comportamiento de los voltajes de fase RMS, los que pueden ser evaluados mediante la ANSI (siglas en inglés de *American National Standards Institute*) C84.1 [16]. Esta norma divide el nivel voltaje en dos rangos: Rango A como óptimo y Rango B como aceptable, pero no óptimo. Conjuntamente, la figura señala los límites en por ciento de dichos rangos para 34.5 kV y 60 Hz, delimitando el Rango A por líneas azules oscuras y el B por líneas azules claras. En este caso, solo el nivel de voltaje de la fase C resulta ser óptimo (Rango A).

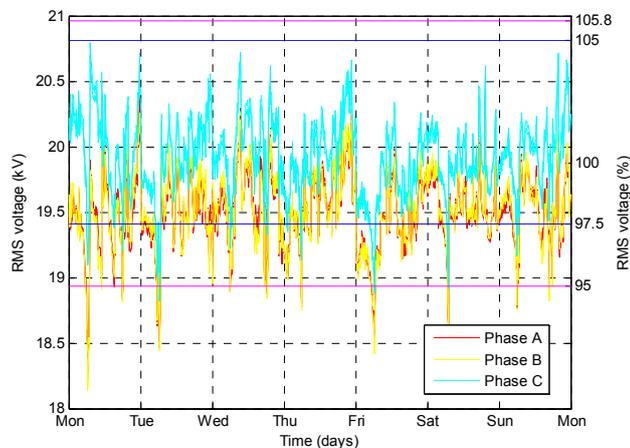


Fig. 5. Voltajes de fase RMS en kV y por ciento.

C. Desbalance de tensión

La figura 6, indica la variación del desbalance en el período señalado. Como puede observarse, este parámetro se mantiene inferior al límite establecido por la IEC 61000-2-12 [4], de 2 % durante todo el período de evaluación, por lo que su incidencia no debe afectar seriamente a las cargas sensibles.

D. Flicker de tensión

En este caso se analiza la sensación de *flicker* de corto plazo (P_{st}), que se presenta en la figura 7. Los posibles impactos se producen durante la jornada laboral, y en los días laborables, resultando el domingo el día de menor presencia. Estos resultados inducen a pensar en la incidencia de la planta electroquímica Cloro Sosa en los mismos. No obstante, salvo contados momentos, el límite de 1.0 recomendado por la IEC 61000-2-12 [4], para P_{st} no se supera la totalidad del tiempo.

E. Distorsión interarmónica

Aquí se caracteriza solo el primer subgrupo interarmónico, es decir, el interarmónico de orden 1.5, debido a que el mismo tiende a ser el de mayor amplitud y protagonismo en la aparición de *flicker*. La figura 8, muestra el espectro de probabilidad 95 % del voltaje y la corriente de este interarmónico durante la semana de mediciones. Se indica mediante la línea azul el límite de compatibilidad de 0.2 % impuesto por la IEC 61000-3-6 [5], para el voltaje. Al igual que en el caso de la distorsión armónica, la corriente no presenta límites de emisión, sino que se deben proponer niveles de planificación individuales.

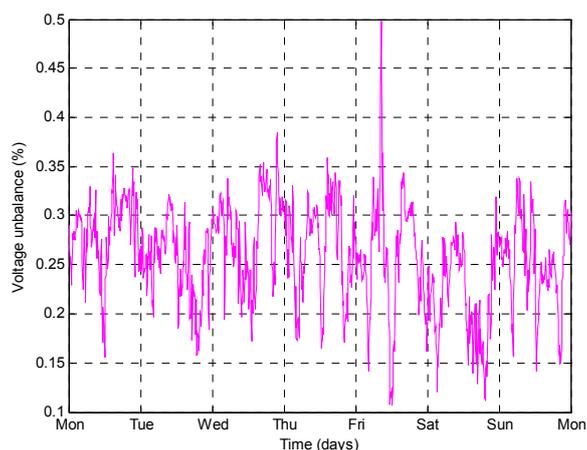


Fig. 6. Desbalance de tensión.

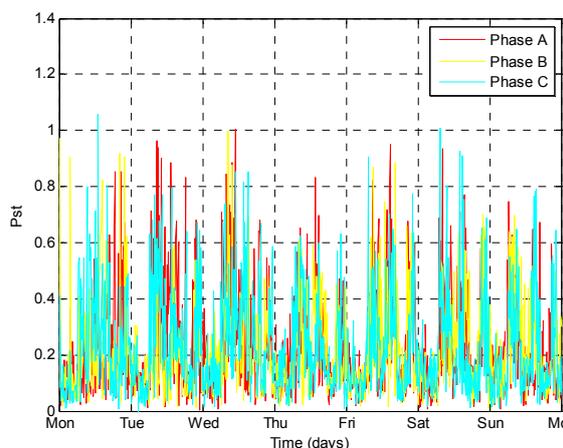


Fig. 7. P_{st} por fase.

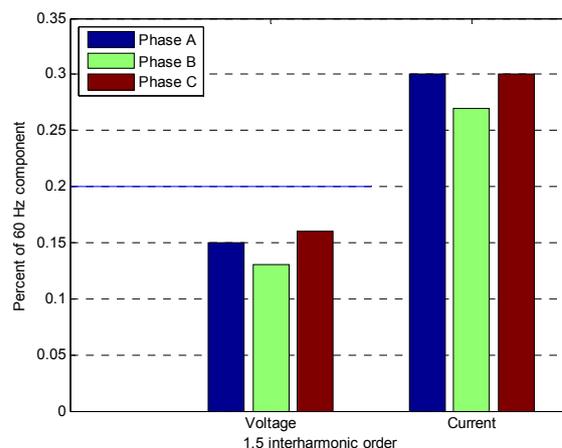


Fig. 8. Voltaje y corriente del interarmónico de orden 1.5.

HISTOGRAMAS DE PROBABILIDAD, PDF Y CDF

Los histogramas de probabilidad son gráficos de barras para representar las variables aleatorias continuas. Estos precisan la construcción de tablas de frecuencia, para lo cual se divide el conjunto de observaciones de la variable en clases, delimitadas en intervalos que dependen del problema en cuestión. Una vez confeccionadas las clases, los datos pueden ser distribuidos en frecuencias absolutas, que se definen como el número de datos del conjunto original que pertenecen a una determinada clase. Un histograma es también un estimado de la PDF de una variable obtenida a partir de un conjunto de observaciones, mientras que la CDF define la probabilidad de que un resultado sea menor que un valor dado [17]. La figura 9, refleja la CDF de la THD de voltaje en la escala de la derecha.

Se destaca el punto de probabilidad 95 %, que indica el verdadero valor a comparar con el límite de la IEC 61000-2-12 [4]. Estos son los valores que no se superan en el 95 % del tiempo de medición, o sea, 8.4 horas en la semana. Los mismos son para las tres fases 2.1, 2.4 y 2.1 respectivamente, muy por debajo de 8 %. La figura muestra también el histograma de frecuencias absolutas de la THD, regido por la escala de la izquierda. A partir de este histograma se construye el gráfico de la PDF, que refleja una distribución de probabilidad normal para las tres fases.

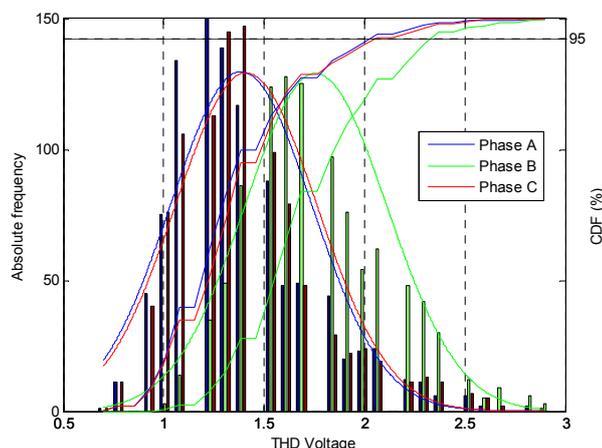


Fig. 9. Histograma de frecuencias absolutas, PDF y CDF de la THD de voltaje por fase.

ESTIMACIÓN PUNTUAL Y POR INTERVALO

Dado un parámetro de interés, como la media poblacional μ o la desviación estándar poblacional σ , el objetivo de la estimación puntual es usar una muestra para obtener un valor que sea el que mejor represente el verdadero valor del parámetro, es decir, que tenga el menor error de estimación. Una primera propiedad deseable en los estimadores es que sea insesgado, lo que significa que su distribución de probabilidad muestral siempre estará centrada en el valor verdadero del parámetro que estima; y la segunda propiedad importante es que, una vez insesgado, el estimador posea la menor varianza. El estimador resultante es conocido como estimador insesgado de varianza mínima (MVUE, siglas en inglés de *minimum variance unbiased estimator*). En una muestra aleatoria con distribución normal, la media muestral es el MVUE de μ , y se calcula según la ecuación (1):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Donde:

n : tamaño de la muestra extraída de la población

x_i : valores individuales de la muestra

Aunque la desviación estándar muestral no es un estimador insesgado de σ , puede usarse para la estimación si n es suficientemente grande, determinándose por la ecuación (2):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

Debido a la variabilidad del muestreo, la estimación puntual puede sustituirse por un intervalo de valores factibles para el parámetro, lo que se denomina estimación por intervalo o intervalo de confianza.

Para determinar el intervalo de confianza para los parámetros desconocidos μ y σ de una población con distribución normal se tiene, para el primer caso, que (ecuación (3):

$$\bar{x} - \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \leq \mu \leq \bar{x} + \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \quad (3)$$

Donde:

$t_{\alpha/2, n-1}$: valor crítico de la distribución t con orden $\alpha/2$ y $n - 1$ grados de libertad
Para el segundo caso (ecuación (4)):

$$\sqrt{\frac{s^2(n-1)}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}, n-1}}} \leq \sigma \leq \sqrt{\frac{s^2(n-1)}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}, n-1}}} \quad (4)$$

Donde:

$\chi^2_{\alpha/2, n-1}$: valor crítico de la distribución ji cuadrada con orden $\alpha/2$ y $n - 1$ grados de libertad [18].
Teniendo en cuenta la distribución de probabilidad normal de la THD de voltaje, a partir de la muestra de datos obtenida es posible realizar una estimación puntual de los parámetros de la población a la cual pertenece dicha muestra. En este caso interesa estimar μ y σ , lo que se exhibe en la tabla 1.

Tabla 1. Estimación puntual de μ y σ de la THD de voltaje.

Fases	Media estimada (μ)	Desviación estándar estimada (σ)
A	1.3863	0.3525
B	1.7579	0.3546
C	1.4115	0.3540

Estos parámetros estimados se refieren a la población formada por todos los valores de THD de voltaje pasados, presentes y futuros en el período de tiempo que se considere oportuno. La tabla 2, señala el intervalo de confianza de 95 % para estos parámetros. Existe por tanto un 95 % de seguridad de que los parámetros estimados se hallen dentro de los intervalos calculados.

Tabla 2. Estimación por intervalo de μ y σ de la THD de voltaje con nivel de confianza de 95 %.

Fases	Media estimada (μ)	Desviación estándar estimada (σ)
A	$1.3645 \leq \mu \leq 1.4081$	$0.3378 \leq \sigma \leq 0.3686$
B	$1.7360 \leq \mu \leq 1.7799$	$0.3398 \leq \sigma \leq 0.3708$
C	$1.3896 \leq \mu \leq 1.4334$	$0.3392 \leq \sigma \leq 0.3701$

ASOCIACIONES ENTRE VARIABLES

La relación matemática determinística más simple entre dos variables aleatorias es el modelo de regresión lineal simple (ecuación (5)):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (5)$$

Donde:

Y: variable dependiente, cuyo valor observado se designa como y

x: variable independiente

β_0 : intersección en y

β_1 : pendiente de la línea de regresión

ε : término de error aleatorio, con distribución normal de media cero y desviación estándar σ

Las cantidades β_0 y β_1 pueden ser estimadas a través del método de los mínimos cuadrados.

El parámetro σ determina la cantidad de variabilidad inherente en el modelo de regresión y muestra la efectividad del mismo en la predicción de una observación individual de y asociada con un valor determinado de x. La estimación de σ se calcula mediante la ecuación (6):

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2}} \quad (6)$$

Donde:

\hat{y}_i : valores estimados obtenidos por la sustitución de los valores x_i en la ecuación de regresión

Una medida cuantitativa del grado de relación lineal entre dichas variables se consigue a través del coeficiente de correlación (ecuación (7)), [18]:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

Uno de los rasgos que diferencia la distorsión interarmónica de la armónica radica en el hecho de que generalmente una determinada frecuencia interarmónica se asocia solo a la acción de una carga contaminante en específico. Por ello, importa saber el grado de relación lineal entre la corriente y el voltaje interarmónicos, resultando en este caso los coeficientes de correlación de 82.6, 70.5 y 81.6 % para las tres fases respectivamente, lo que se comprueba con la figura 10. Esto supone la operación de una carga contaminante generadora de una frecuencia dentro del rango de 70 a 110 Hz, inyectada posiblemente por la Cloro Sosa.

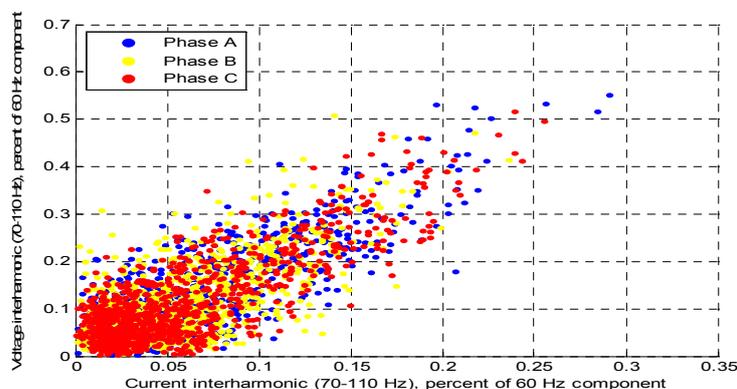


Fig. 10. Gráfico de dispersión entre el voltaje y la corriente del interarmónico de orden 1.5.

Por otro lado, siempre que se realice un estudio de PQ que incluya el trabajo con interarmónicos y flicker, resulta conveniente conocer la relación entre ambos, ya que cualquiera de los dos puede ser causa del otro. Las figuras 11 y 12, exponen gráficos de barras pertenecientes a la corriente interarmónica y a P_{st} en función del tiempo de medición, donde cada barra significa el valor promedio de las observaciones efectuadas cada 12 horas. Dichas observaciones corresponden a los valores medios entre las fases.

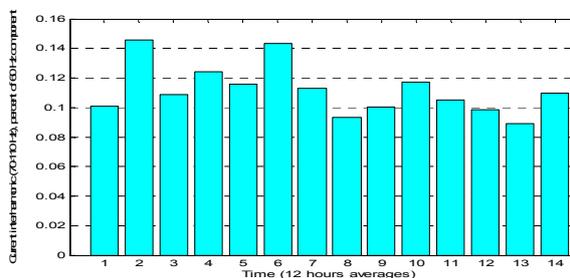


Fig. 11. Corriente del interarmónico de orden 1.5.

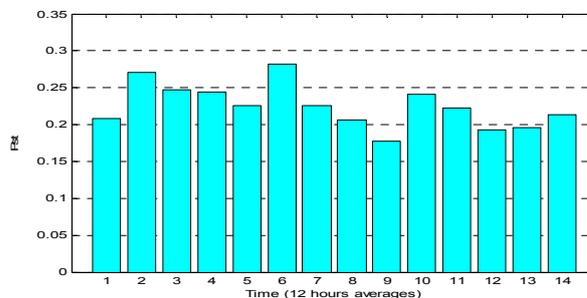


Fig. 12. P_{st} .

Estos gráficos muestran que existe una buena correlación entre ambas variables, por tanto, las variaciones en el contenido de la corriente interarmónica pueden ser empleadas como un buen indicador para estimar el *flicker*. Puesto que en este caso se tiene solamente el contenido interarmónico en el rango de frecuencias de 70 a 110 Hz, y resulta interesante conocer el comportamiento de esta relación para otros valores, se determina la ecuación de regresión estimada, la cual informa acerca de un valor individual de P_{st} asociado a un valor determinado de corriente interarmónica. Esta ecuación resulta (ecuación (8)):

$$\hat{y} = 0.058 + 1.487x \quad (8)$$

Una medida de la proximidad de la relación entre ambas variables lo brinda el estimador de σ , el cual es de 0.086, lo que evidencia que los valores de P_{st} se hallan muy cercanos a la línea de regresión, posibilitando el empleo de la ecuación como elemento predictivo.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Con las herramientas estadísticas descritas, se puede extraer información correspondiente al comportamiento de la distorsión armónica e interarmónica, la desviación, el desbalance y el *flicker* del voltaje, según establecen las normas IEC para el período de medición. En el proyecto se realizó la caracterización de estos parámetros de PQ en uno de los circuitos de distribución que tiene por cabecera la Subestación de Sagua 110/34.5 kV. Se encontró que tanto la distorsión total como la individual del voltaje armónico, el desbalance y el *flicker*, no superan los límites establecidos, mientras que el voltaje RMS solo es óptimo en la fase C. En el caso de la THD de voltaje, se expusieron estimaciones puntuales y por intervalo con un nivel de confianza de 95 % de μ y σ , por lo que pueden ser inferidos valores de esta magnitud en el período de tiempo que se considere oportuno. El hecho de que la misma presentó una distribución normal en las tres fases, permite conocer entre otras cosas, que los intervalos ($\mu \pm \sigma$), ($\mu \pm 2\sigma$) y ($\mu \pm 3\sigma$) indican la existencia de valores de la magnitud con una probabilidad de 68.27, 95.45 y 99.73 % respectivamente. El voltaje del interarmónico de orden 1.5 manifestó alta correlación lineal con la corriente del propio orden, lo que certifica la operación de una carga contaminante de frecuencia entre 70 y 110 Hz, no obstante, el mismo se mantuvo inferior al límite normado durante la semana de prueba. Esta corriente también expresó una relación notoria con el *flicker*, mostrada a través de la ecuación (8). El carácter continuo en el tiempo de estos disturbios obliga a que su estudio se realice de forma estadística. Son varias las formas de describir estadísticamente los datos registrados, pero queda demostrado que el empleo de histogramas, estimaciones y análisis de correlación y regresión constituyen métodos efectivos para la caracterización de estos parámetros. Las técnicas estadísticas presentan como gran limitación el hecho de que, a pesar de ser posible conocer el tiempo total en que se excede un límite por parte de alguno de estos problemas, no se pueda determinar si esto ocurrió de forma continua o en forma de eventos. Por ello se recomienda en futuros estudios, detectar patrones característicos en el comportamiento de los disturbios a partir de mediciones realizadas durante períodos de tiempo significativo.

REFERENCIAS

- [1] Biswal B., Biswal M., Mishra S., and Jalaja R. "Automatic Classification of Power Quality Events Using Balanced Neural Tree". *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2014, Vol. 61, N° 1, p. 521-530. ISSN: 0278-0046. DOI: 10.1109/TIE.2013.2248335.
- [2] Valtierra M., Romero R. J., Osornio R. A., and Garcia A. "Detection and Classification of Single and Combined Power Quality Disturbances Using Neural Networks". *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2014, Vol. 61, N° 5, p. 2473-2482. ISSN: 0278-0046. DOI: 10.1109/TIE.2013.2272276.
- [3] Singh B., and Arya S. R. "Back-Propagation Control Algorithm for Power Quality Improvement Using DSTATCOM". *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2014, Vol. 61, N° 3, p. 1204-1212. ISSN: 0278-0046. DOI: 10.1109/TIE.2013.2258303.
- [4] IEC. *Electromagnetic Compatibility - Part 2: Environment - Section 12: Compatibility Levels for Low Frequency Conducted Disturbances and Signaling in Public Medium Voltage Power Supply Systems*, IEC 61000-2-12, 2004.

- [5] IEC. *Electromagnetic Compatibility - Part 3: Limits - Section 6: Assessment of Emission Limits for the Connection of Distorting Installation to Medium Voltage, High Voltage and Extra-High Voltage Power Systems*, IEC 61000-3-6, 2008.
- [6] IEC. *Electromagnetic Compatibility - Part 4: Testing and Measurements Techniques - Section 30: Power Quality Measurement Methods*, IEC 61000-4-30, 2003.
- [7] Marrero L. J. "Caracterización de armónicos en circuitos eléctricos de distribución". *Mundo Eléctrico*. 2015, Vol. 29, N° 102, p. 154-159. ISSN: 1692-7052.
- [8] Thirumala K., Umarikar A. C., and Jain T. "Estimation of Single-Phase and Three-Phase Power-Quality Indices Using Empirical Wavelet Transform". *IEEE Trans. Power Del.* 2015, Vol. 30, N° 1, p. 445-454. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2355296.
- [9] Borges F. A. S., Fernandes R. A. S., Silva I. N., and Silva C. B. S. "Feature Extraction and Power Quality Disturbances Classification Using Smart Meters Signals". *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2016, Vol. 12, N° 2, p. 824-833. ISSN: 1551-3203. DOI: 10.1109/TII.2015.2486379.
- [10] Salmerón P., Herrera R. S., Pérez A., and Prieto J. "New Distortion and Unbalance Indices Based on Power Quality Analyzer Measurements". *IEEE Trans. Power Del.* 2009, Vol. 24, N° 2, p. 501-507. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2013378.
- [11] Orallo C. M., Carugati I., Maestri S., Donato P. G., Carrica D., and Benedetti M. "Harmonics Measurement with a Modulated Sliding Discrete Fourier Transform Algorithm". *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2014, Vol. 63, N° 4, p. 781-793. ISSN: 0018-9456. DOI: 10.1109/TIM.2013.2287801.
- [12] Eidson B., and Halpin M. "An Evaluation of the Extent of Correlation Between Interharmonic and Voltage Fluctuation Measurements". *IEEE Trans. Power Del.* 2016, Vol. 31, N° 2, p. 753-760. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2480715.
- [13] Jiao P., Ma C. Y., Song J. C., Zheng L. J., and Li Q. Q. "Study on the response of iec flickermeter to interharmonic voltage". In: *2014 China Int. Conf. on Electricity Distribution (CICED)*, Shenzhen, China, 2014. ISSN: 2161-749X. DOI: 10.1109/CICED.2014.6991883.
- [14] Shahnian F., Wolfs P. J., and Ghosh A. "Voltage Unbalance Reduction in Low Voltage Feeders by Dynamic Switching of Residential Customers Among Three Phases". *IEEE Trans. Smart Grid.* 2014, Vol. 5, N° 3, p. 1318-1327. ISSN: 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2014.2305752.
- [15] Khokhar S., Mohd A. A., Mokhtar A. S., and Ismail N. "MATLAB/Simulink based modeling and simulation of power quality disturbances". In: *2014 IEEE Conf. on Energy Conversion (CENCON)*, Johor Bahru, Malaysia, 2014. ISBN: 978-1-4799-4848-2. DOI: 10.1109/CENCON.2014.6967545.
- [16] ANSI. *Electric Power Systems and Equipment - Voltage Ranges*, ANSI C84.1, 2006.
- [17] Vaseghi, S. V. *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction*. 4th ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008. 514 p. p 1-107. ISBN: 978-0-470-75406-1.
- [18] Devore, J. L. *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, 8th ed. Boston: Brooks/Cole, Cengage Learning, 2012. 769 p. p 239-299, 468-522. ISBN: 978-0-538-73352-6.

AUTOR

Lester J. Marrero Rodríguez

Ingeniero Electricista, Máster en Ciencias, Profesor Asistente. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.

e-mail: lesterr@uclv.cu