

## **Plataforma para la Estimación de Índices de Calidad de la Potencia**

### ***Power Quality Indices Estimation Platform***

Eliana I. Arango-Zuluaga<sup>1</sup>  
Juan C. González-Escudero<sup>2</sup>  
Miguel F. García-Gómez<sup>3</sup>  
Carlos A. Jaramillo-Méndez<sup>4</sup>  
Andrés J. Saavedra-Montes<sup>5</sup>

- 
- 1 Facultad de minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín-Colombia  
eiarangoz@unal.edu.co
  - 2 Facultad de minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín-Colombia  
jgonzales@unal.edu.co
  - 3 Facultad de minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín-Colombia  
mfgarcia@unal.edu.co
  - 4 Facultad de minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín-Colombia  
cajaramime@unal.edu.co
  - 5 Facultad de minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín-Colombia  
ajsaved@unal.edu.co

**Resumen**

En este artículo se presenta una plataforma interactiva para la estimación de índices de calidad de la potencia de sistemas eléctricos monofásicos, en conformidad con el estándar IEEE 1459-2010. La plataforma PQanalizador se desarrolló con el objetivo de apoyar actividades de docencia e investigación en calidad de la energía eléctrica. La plataforma estima los índices a partir de señales de voltaje y corriente usando tres diferentes algoritmos basados en la transformada rápida de Fourier (FFT), la transformada Wavelet Packet (WPT) y la metodología de mínimos cuadrados. Los resultados muestran que los algoritmos implementados son eficientes para la estimación de los índices de calidad de la potencia y que la plataforma puede ser usada según los objetivos propuestos.

**Palabras clave**

Calidad de la potencia; método de mínimos cuadrados; procesamiento de señales; transformada rápida de Fourier; transformada Wavelet Packet.

**Abstract**

An interactive platform for estimating the quality indices in single phase electric power systems is presented. It meets the IEEE 1459-2010 standard recommendations. The platform was developed in order to support teaching and research activities in electric power quality. The platform estimates the power quality indices from voltage and current signals using three different algorithms based on fast Fourier transform (FFT), wavelet packet transform (WPT) and least squares method. The results show that the algorithms implemented are efficient for estimating the quality indices of the power and the platform can be used according to the objectives established.

**Keywords**

Power quality; least squares method; signal processing; fast Fourier transform; wavelet packet transform.

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de los años 90 (Domijan et al., 1993) se ha presentado un incremento en las investigaciones relacionadas con la calidad de la potencia, lo que ha contribuido al surgimiento de tecnologías y equipos para el monitoreo de parámetros que ayudan a caracterizar las perturbaciones y variaciones en los sistemas eléctricos. Este interés por la calidad de la potencia, como se afirma en (Zhenghua Zou et al., 2009), se debe al aumento en la comercialización y uso de dispositivos de electrónica de potencia y la necesidad de mantener los sistemas eléctricos dentro de los parámetros establecidos en las normativas nacionales e internacionales.

Según (Ananth & Morcos, 1999; IEEE, 2010) los estudios de calidad de potencia son útiles para determinar los fenómenos electromagnéticos en un punto particular del sistema eléctrico, diagnosticar problemas que afecten una instalación eléctrica, analizar efectos de las cargas sobre el sistema, determinar medidas de mejoramiento de la calidad y protección de equipos. Las alteraciones en la calidad de la potencia pueden ocasionar mal funcionamiento de equipos, interrupciones en procesos industriales, daños en cargas y daños en el sistema eléctrico que podrían conllevar a pérdidas económicas como se enfatiza en el trabajo realizado por Küçük et al., (2010).

Los dispositivos para el monitoreo y análisis de la potencia eléctrica han pasado por cuatro generaciones; los primeros sistemas dedicados al monitoreo de la calidad de la potencia se implementaron en los mediados de los años 70, estos instrumentos estaban basados en texto, entregando el tipo de evento registrado y la magnitud de acuerdo a lo investigado por Bingham (2008). La generación presente de dispositivos integra tecnologías en adquisición y procesamiento de datos, en visualización, en almacenamiento y comunicación; además del uso de nuevos métodos y algoritmos para el cálculo de los diferentes parámetros y detección de las perturbaciones que se presentan en un determinado punto de un sistema eléctrico. Entre los algoritmos más utilizados se encuentra la transformada discreta de Fourier (FFT), la transformada *Wavelet Packet* (WPT) y los algoritmos basados en mínimos cuadrados.

La mayoría de equipos e instrumentos modernos para la detección y análisis de perturbaciones en los sistemas eléctricos han sido desarrollados para ejecutar sus tareas de adquisición y análisis en tiempo real, este tipo de equipos presentan limitantes para algunos investigadores que deseen realizar otro tipo de análisis o usar diferentes métodos a los que ofrece el equipo.

En este trabajo se presenta una plataforma interactiva que permite al usuario analizar condiciones de un sistema eléctrico a partir de datos reales adquiridos o de ecuaciones matemáticas que emulen cualquier fenómeno eléctrico usando diferentes algoritmos basados en FFT, WPT y mínimos cuadrados. La plataforma PQanalizador, se ofrece como una alternativa para la enseñanza e investigación en la calidad de la potencia. En la segunda parte de este artículo se describe la metodología de desarrollo de la plataforma y se describen los algoritmos usados en el análisis de los datos; en la tercera parte se presentan algunos casos de estudio con el análisis de los resultados; y las conclusiones en la cuarta parte del artículo.

## 2. METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE LA PLATAFORMA PQANALIZADOR

La etapa de definición de características de la plataforma, permite concluir que, la plataforma PQanalizador debe permitir la estimación de índices de la calidad de la potencia de sistemas eléctricos monofásicos a partir de datos recolectados de voltaje y corriente de un sistema real, de un sistema eléctrico simulado o de ecuaciones matemáticas; en conformidad con el estándar IEEE 1459-2010. Además, es necesaria una interfaz gráfica de usuario que facilite su utilización, por lo que se desarrolla la interfaz usando Matlab® GUIDE® (Matlab Graphical User Interface Development Environment), ver Fig. 1, en la cual se ingresan los datos o las ecuaciones de las señales a ser analizadas y se presentan los resultados.

Los índices de calidad de la potencia que debe calcular la plataforma PQanalizador son: Voltaje RMS  $V_{RMS}$  [V], corriente RMS  $I_{RMS}$  [A], voltaje fundamental  $V_1$  [V], corriente fundamental  $I_1$  [A],

voltaje armónico  $V_H$  [V], corriente armónica  $I_H$  [A], potencia aparente  $S$  [VA], potencia promedio  $P$  [W], factor de potencia  $FP$  [-], potencia fundamental  $P_1$  [W], potencia activa armónica  $P_H$  [W], potencia fundamental reactiva  $Q_1$  [Var], potencia aparente fundamental  $S_1$  [VA], potencia de distorsión de corriente  $D_I$  [-], potencia de distorsión de voltaje  $D_V$  [-], potencia aparente armónica  $S_H$  [VA], potencia aparente no fundamental  $S_N$  [VA], distorsión de potencia armónica  $D_H$  [-], distorsión armónica total para el voltaje  $THD_V$  [%], distorsión armónica total para el corriente  $THD_I$  [%], índice de distorsión de onda para el voltaje  $DIN_V$  [-], índice de distorsión de onda para la corriente  $DIN_I$  [-].

Para la estimación de los índices de calidad de la potencia enumerados, la plataforma utiliza tres diferentes algoritmos basados en la transformada rápida de Fourier, la transformada *Wavelet packet* y el método de mínimos cuadrados, que se describen a continuación.

## 2.1 Transformada Discreta de Fourier

Para la implementación de la transformada discreta de Fourier, se utilizó la transformada rápida de Fourier (FFT). La metodología para la estimación de los índices de calidad de la potencia usando la transformada rápida de Fourier consiste en aplicar la FFT a las señales de voltaje y corriente con el fin de obtener los componentes en frecuencia de cada una de ellas. Con la información obtenida, se calculan los índices que dependen directamente de los componentes en frecuencia de la señal y posteriormente se calculan los índices que no dependen directamente de esta información.

Las ecuaciones (1)-(20) son utilizadas para el cálculo de los parámetros usando las componentes armónicas de las señales de voltaje y corriente, estas ecuaciones se basan en los trabajos realizados por Orfanos y Topolis (2005), Milanés et al., (2009) y en el estándar IEEE 1459-2010. Las ecuaciones (1) y (2) hacen referencia al cálculo del valor RMS para la señal de voltaje y corriente respectivamente, el subíndice  $k$  hace referencia cada uno de los componentes en frecuencia de las señales. El valor RMS para el voltaje y la corriente de los armónicos se calcula usando (3) y (4)

respectivamente, donde el subíndice  $H$  hacen referencia a los componentes armónicos de las señales.  $N$  hace referencia al número total de componentes en frecuencia.

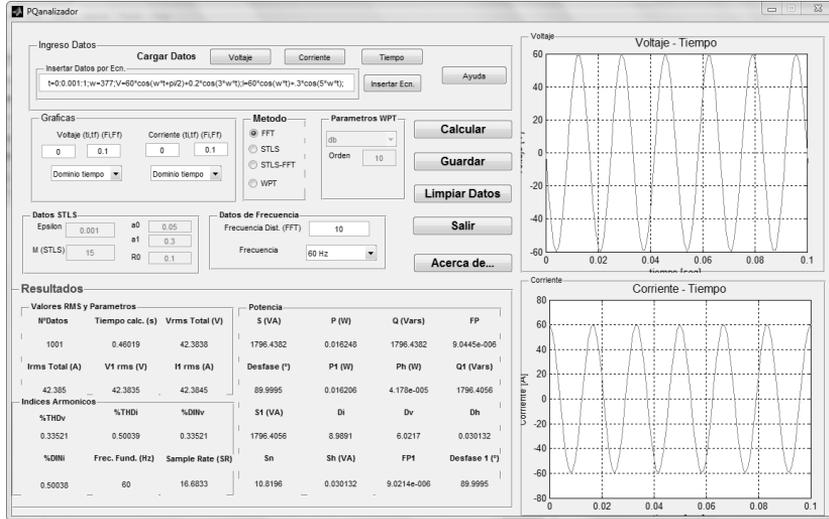


Fig. 1. Interfaz de usuario de la plataforma PQAnalizador para la el análisis y la estimación de los índices de calidad de la potencia. Fuente: Autores

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{1}{2} V_k^2} \tag{1}$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{1}{2} I_k^2} \tag{2}$$

$$V_H = \sqrt{\sum_{H>1} V_H^2} = \sqrt{V_{RMS}^2 - V_1^2} \tag{3}$$

$$I_H = \sqrt{\sum_{H>1} I_H^2} = \sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2} \tag{4}$$

Los índices de potencia se expresan en (5)-(16). En la ecuación (6),  $V_m$  e  $I_m$  hacen referencia a las señales muestreadas y  $N$  al número de muestras.

$$S = V_{RMS} \times I_{RMS} \quad (5)$$

$$P = \frac{\sum_{m=1}^N V_m I_m}{N} \quad (6)$$

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\varphi) \quad (7)$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos(\varphi_1) \quad (8)$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin(\varphi_1) \quad (9)$$

$$S_1 = V_1 I_1 \quad (10)$$

$$P_H = P - P_1 \quad (11)$$

$$S_H = V_H I_H = S_1 (THD_V) (THD_I) \quad (12)$$

$$D_I = V_1 I_H = S_1 (THD_I) \quad (13)$$

$$D_V = V_H I_1 = S_1 (THD_V) \quad (14)$$

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (15)$$

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (16)$$

Los índices de los armónicos se calculan usando (17), (18), (19) y (20).

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{H=2}^N V_H^2}}{V_1} \quad (17)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{H=2}^N I_H^2}}{I_1} \quad (18)$$

$$DIN_V = \frac{\sqrt{V_{RMS}^2 - V_1}}{V_{RMS}} \quad (19)$$

$$DIN_I = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_1}}{I_{RMS}} \quad (20)$$

## 2.2 Análisis por Mínimos Cuadrados

El análisis por mínimos cuadrados se presenta como alternativa en la estimación de índices de calidad de la potencia frente a los dos métodos comúnmente usados, FFT y WPT. El objetivo del análisis por mínimos cuadrados es estimar el espectro de frecuencia de las señales de voltaje y corriente y a partir de esa información estimar los índices de interés.

La metodología utilizada para la programación del algoritmo se basó en el trabajo realizado por Terzija y Stanojević (2008). El análisis por mínimos cuadrados para la calidad de la potencia, asume que cualquier señal de voltaje y corriente de un sistema eléctrico monofásico puede representarse mediante (21) y (22) respectivamente, donde  $k$  es el orden de los armónicos presentes en la señal. El algoritmo busca estimar los parámetros que permiten determinar el espectro de frecuencia de la señal, minimizando la suma de los errores al cuadrado entre la señal muestreada y la señal estimada.

$$v(t) = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) + \sqrt{2} \sum_{k \neq 1} V_k \sin(k\omega t - \alpha_k) \quad (21)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \beta_1) + \sqrt{2} \sum_{k \neq 1} I_k \sin(k\omega t - \beta_k) \quad (22)$$

El algoritmo posee un criterio de parada basado en un valor seleccionado por el usuario para la suma de errores al cuadrado. Luego de estimar los componentes armónicos de las señales de corriente y voltaje el cálculo de los índices de calidad de potencia se realiza utilizando (1)-(20), es decir de forma similar al análisis con FFT

### 2.3 Transformada Wavelet Packet

La transformada *Wavelet* descompone una señal en un conjunto de funciones básicas, llamadas *wavelets*, cada una de ellas se obtiene de una señal llamada *mother wavelet* al aplicar filtros pasa-bajas y filtros pasa-altas. Cuando se emplea la transformada *Wavelet* para descomponer una señal, se obtiene un conjunto de coeficientes (aproximación y detalle), cada uno de ellos en determinado nivel, estos coeficientes representan parte de la señal original para cierto intervalo de tiempo y un ancho de frecuencia específico. La transformada *Wavelet Packet* (WPT) puede ser usada para sobreponerse a las limitaciones de la transformada *Wavelet* discreta (Morsi & El-Havary, 2010; Barros et al., 2009) y obtener una descomposición uniforme y no logarítmica de la frecuencia de la señal de entrada.

Usando WPT, las salidas del filtro pasa-bajas y del filtro pasa-altas son descompuestas para producir nuevos coeficientes y de esta manera garantizar una descomposición uniforme de frecuencia de la señal. Las ecuaciones para el cálculo de los parámetros relacionados con la calidad de la potencia se obtuvieron del trabajo realizado por Morsi & El-Havary (2010). Las ecuaciones (23) y (24) definen el valor RMS para las señales de voltaje y de corriente, donde  $d_n^j$  y  $i_n^j$  representan los coeficientes WPT para el voltaje y la corriente respectivamente en el nivel  $j$  y nodo  $n$ .

La potencia promedio se define en (25) y la potencia fundamental se calcula utilizando (26), suponiendo que en el nodo 0 se encuentran los valores asociados a la frecuencia fundamental. La potencia aparente fundamental se define en (27), suponiendo que en el nodo 0 se encuentran los valores asociados a la frecuencia fundamental. Por medio de (28), se calcula la potencia activa en otros nodos.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} (d_j^0(k))^2 + \frac{1}{2^N} \sum_{n=1}^{2^{j-1}} \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} (d_j^n(k))^2} = \sqrt{(V_j^0)^2 + \sum_{n=1}^{2^{j-1}} (V_j^n)^2} \quad (23)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^N-j-1} (d_j^{j^0}(k))^2 + \frac{1}{2^N} \sum_{n=1}^{2j-1} \sum_{k=0}^{2^N-j-1} (d_j^n(k))^2} = \sqrt{(I_j^0)^2 + \sum_{n=1}^{2j-1} (I_j^n)^2} \tag{24}$$

$$P = P_j^0 + \sum_{n=1}^{2j-1} P_j^n \tag{25}$$

$$P_1 = P_j^0 = \frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2j-1} d_j^0(k) d_j^0(k) \tag{26}$$

$$S_j^0 = V_j^0 I_j^0 \tag{27}$$

$$P_j^n = \frac{1}{2^N} \sum_{k=0}^{2^N-j-1} d_j^n(k) d_j^n(k) \quad n \neq 0 \tag{28}$$

Los índices de distorsión armónica total para el voltaje y la corriente se calculan usando (29) y (30); los índices de distorsión de onda se calculan por medio de (31) y (32).

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{2j-1} (V_j^n)^2}}{(V_j^0)^2} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{2j-1} \sum_{k=0}^{2^N-j-1} (d_j^n(k))^2}}{\sum_{k=0}^{2^N-j-1} (d_j^0(k))^2} \tag{29}$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{2j-1} (I_j^n)^2}}{(I_j^0)^2} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{2j-1} \sum_{k=0}^{2^N-j-1} (d_j^n(k))^2}}{\sum_{k=0}^{2^N-j-1} (d_j^0(k))^2} \tag{30}$$

$$DIN_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{2j-1} (V_j^n)^2}}{(V_{RMS})^2} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{2j-1} \sum_{k=0}^{2^N-j-1} (d_j^n(k))^2}}{\sum_{n=0}^{2j-1} \sum_{k=0}^{2^N-j-1} (d_j^n(k))^2} \tag{31}$$

$$DIN_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{2j-1} (I_j^n)^2}}{(I_{RMS})^2} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{2j-1} \sum_{k=0}^{2^N-j-1} (d_j^n(k))^2}}{\sum_{n=0}^{2j-1} \sum_{k=0}^{2^N-j-1} (d_j^n(k))^2} \tag{32}$$

Los demás parámetros de salida del PQanalizador se calculan usando las ecuaciones planteadas para el análisis con FFT pero

usando los valores RMS y demás obtenidos mediante el análisis de la transformada *Wavelet Packet*.

### 3. RESULTADOS

La validación de los algoritmos implementados en la plataforma para la estimación de índices de calidad de potencia se realizó por medio de comparación con resultados teóricos. Las señales utilizadas para la validación de los resultados del PQanalizador se describen en (33) para la señal de voltaje y (34) para la señal de corriente, ver Fig. 2. Estas funciones se tomaron de Terzija y Stanojević (2008).

$$v(t) = \cos(\omega t + 30) + 0,3 \cos(3\omega t + 90) + 0,2 \cos(5\omega t + 150) \quad (33)$$

$$i(t) = \cos(\omega t) + 0.3 \cos(3\omega t) + 0.2 \cos(5\omega t) \quad (34)$$

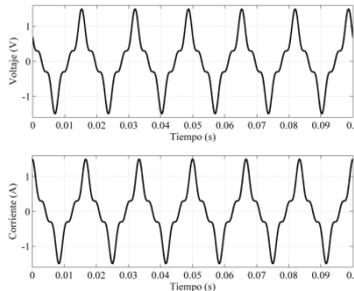


Fig. 2. Señales de voltaje y corriente para la validación del PQanalizador.  
Fuente: Autores

En la Tabla 1, se presentan los resultados obtenidos para la estimación de los índices de calidad de la potencia para cada uno de los algoritmos implementados en la plataforma; cada índice estimado tiene asociado un error relativo de estimación en comparación con el valor teórico. El error relativo fue calculado usando (35), donde  $v_r$  hace referencia al valor real o valor teórico y  $v_e$  hace referencia al valor estimado.

$$Error = \left| \frac{v_e - v_r}{v_r} \right| \times 100 \quad (35)$$

De acuerdo con la Tabla 1, el método basado en la transformada rápida de Fourier es el que presenta más aproximación a los valores teóricos. Los resultados con la FFT son satisfactorios debido a que las señales bajo prueba presentan frecuencia constante a lo largo del periodo de muestreo; la WPT presenta algunos errores de mayor magnitud debido a que la información en el dominio de la frecuencia proporcionada por este algoritmo es menos exacta que la información obtenida utilizando FFT; con el método de mínimos cuadrados se obtiene errores mayores al 5% en algunos índices, esto se debe a que este método es principalmente usado para estimación y minimización del error, lo cual difiere de las técnicas de procesamiento de señales usadas en los métodos basados en FFT y WPT.

Tabla 1. Resultados de validación de los algoritmos implementados.

Fuente: Autores

Índice	Valor teórico	FFT	Error [%]	Mínimos cuadrados	Error [%]	PWT	Error [%]
V <sub>RMS</sub>	0,75160	0,75159	0,001	0,75168	0,011	0,74877	0,377
I <sub>RMS</sub>	0,75280	0,75162	0,157	0,75168	0,149	0,75471	0,254
V <sub>H</sub>	0,25428	0,25492	0,252	0,25500	0,283	0,25510	0,322
I <sub>H</sub>	0,25734	0,25495	0,929	0,25500	0,909	0,25390	1,337
S	0,56581	0,56491	0,159	0,56502	0,140	0,56511	0,124
P	0,41631	0,41562	0,166	0,41570	0,147	0,41530	0,243
Q	0,38317	0,38259	0,151	0,34123	10,946	0,38324	0,018
FP	0,73579	0,73574	0,007	0,79704	8,324	0,73491	0,120
V <sub>1</sub>	0,70728	0,70704	0,034	0,70711	0,024	0,70398	0,467
I <sub>1</sub>	0,70745	0,70706	0,055	0,70711	0,048	0,71072	0,462
S <sub>1</sub>	0,50037	0,49992	0,090	0,50001	0,072	0,50033	0,008
P <sub>1</sub>	0,43344	0,43294	0,115	0,43302	0,097	0,43195	0,344
Q <sub>1</sub>	0,25000	0,24996	0,016	0,25000	0,000	0,25249	0,996
FP <sub>1</sub>	0,86624	0,86603	0,024	0,86603	0,024	0,86333	0,336
S <sub>H</sub>	0,06544	0,06497	0,718	0,06501	0,657	0,064769	1,025
P <sub>H</sub>	-0,01712	-0,01732	1,168	-0,01732	1,168	-0,01665	2,745
D <sub>H</sub>	0,06315	0,06264	0,808	0,06266	0,776	0,062559	0,936
D <sub>V</sub>	0,17989	0,18024	0,195	0,18030	0,228	0,18129	0,778
D <sub>I</sub>	0,18201	0,18025	0,967	0,18030	0,940	0,17876	1,786
S <sub>N</sub>	0,26413	0,26306	0,405	0,26313	0,379	0,26270	0,541

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la plataforma PQanalizador estima correctamente los índices de calidad de potencia usando tres algoritmos, lo cual facilita su aplicación en docencia e investigación en el área de la calidad de potencia. Las fórmulas utilizadas en la construcción de los algoritmos de los tres métodos implementados: FFT, WPT y mínimos cuadrados fueron presentadas en detalle.

De acuerdo con los resultados de comparación obtenidos, se puede concluir que en el caso de señales con perturbaciones a frecuencia constante, que suelen ser las más utilizadas en ejemplos teóricos en la docencia de la calidad de potencia, el método basado en la FFT es el más aproximado, la WPT presenta errores de mayor magnitud debido a que la información en el dominio de la frecuencia proporcionada por este algoritmo es menos exacta, y el método de mínimos cuadrados genera errores mayores, debido al enfoque de estimación y minimización del error, sin tener en cuenta componentes espectrales. Los métodos de WPT y mínimos cuadrados son muy útiles en el caso de perturbaciones no periódicas en las señales de corriente y voltaje, que suelen ser más comunes en los sistemas eléctricos monofásicos.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el Departamento de Energía Eléctrica y Automática de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, dentro de GAUNAL: Grupo de Automática de la Universidad Nacional, bajo los proyectos: Visibilidad, contacto e interacción con la comunidad nacional e internacional, MPPT Vectorial y Smart-Alen.

#### 6. REFERENCIAS

Ananth, I., & Morcos, M. M. (1999). A power quality monitoring system: a case study in DSP-based solutions for electric power industry. *Power Engineering Review, IEEE*, 19(7), 47-50.

- Bingham, R. P. (2008, April). Measurement instruments for power quality monitoring. In *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES* (pp. 1-3).
- Domijan, A., Heydt, J. T., Meliopoulos, A. P. S., Venkata, M. S. S., & West, S. (1993). Directions of research on electric power quality. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8(1).
- IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. *IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000)*, 2010: p. 1-40.
- Küçük, D., İnan, T., Salor, Ö., Demirci, T., Akkaya, Y., Buhan, S., ... & Ermiş, M. (2010). An extensible database architecture for nationwide power quality monitoring. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32(6), 559-570.
- Milanes, M. I., Minambres, V., Romero, E., & Barrero, F. (2009, May). Quality meter of electric power systems based on IEEE Standard 1459-2000. In *Compatibility and Power Electronics, 2009. CPE'09.* (pp. 86-92). IEEE.
- Orfanos, C. N., & Topalis, F. V. (2005, June). Single-phase virtual power and energy analyzer in compliance with IEEE Std 1459-2000 for harmonic measurements on discharge lamps. In *Power Tech, 2005 IEEE Russia* (pp. 1-6). IEEE.
- Terzija, V. V., & Stanojevic, V. (2008). STLS algorithm for power-quality indices estimation. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 23(2), 544-552.
- Zou, Z., Liu, Y., Zhao, F., & Peng, M. (2009, August). Design and data processing of a real-time power quality monitoring instrument. In *Electronic Measurement & Instruments, 2009. ICEMI'09. 9th International Conference on* (pp. 4-353). IEEE.