

**Congreso Internacional de Distribución Eléctrica
CIDEL 2014**

**PROPUESTA DE ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO CON MEDICIONES
SINCRONIZADAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

Diego M. Ferreyra ⁽¹⁾, Claudio A. Reineri ⁽²⁾, A. Carina Sarmiento ⁽³⁾

⁽¹⁾, ⁽³⁾ Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Facultad Regional San Francisco, Grupo GISEner
Avenida de la Universidad 501, San Francisco (Córdoba), ARGENTINA

Tel. ++54-3564-421147/435402 - Fax ++54-3564-421147 Int. 111

⁽¹⁾ dferreyra@frsfcu.utn.edu.ar, ⁽³⁾ csarmiento@frsfcu.utn.edu.ar

⁽²⁾ Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), Facultad de Ingeniería, Instituto IPSEP
Ruta Nacional nro. 36 km 601, Río Cuarto (Córdoba), ARGENTINA

Tel. ++54-358-4676251/6482 - Fax ++ 54-358-4676171

⁽²⁾ creineri@ing.unrc.edu.ar

Palabras clave

calidad de energía, distorsión armónica, estimación de estado armónico, mediciones sincronizadas

1. RESUMEN

En este trabajo, se analiza la posibilidad de implementar una técnica de estimación de estado armónico en sistemas eléctricos de distribución, preferentemente de media tensión. El interés por este estudio radica en la necesidad de obtener información suficiente sobre la distorsión armónica en los sistemas eléctricos a fin de establecer responsabilidades con respecto a dicha distorsión. Esta determinación de responsabilidades consiste en establecer si una carga es generadora de distorsión armónica, si contribuye a su reducción, o bien si responde pasivamente a la distorsión del sistema. En algunos nodos, también puede determinarse que es la distribuidora de energía la responsable de la distorsión armónica, con lo cual le correspondería tomar las acciones de mitigación necesarias. Actualmente, se mantienen en discusión diversos criterios para imputar tales responsabilidades: aunque en la práctica se aplican algunos criterios consensuados, existen distintos planteos técnicos sobre el alcance y la validez de cada uno. De todos modos, independientemente del criterio adoptado, con la presente propuesta se apunta a obtener los datos eléctricos necesarios para realizar el análisis de imputación de responsabilidades. La estimación de estado armónico permite supervisar permanentemente los nodos de un sistema a partir de un conjunto de mediciones redundantes, sin realizar necesariamente una medición específica sobre cada nodo de interés. Existen antecedentes sobre la estimación de estado armónico en sistemas eléctricos, aunque su implementación hasta ahora se ha dado en sistemas de potencia de cierta

envergadura. El estado actual de desarrollo de las mediciones y comunicaciones en redes de distribución, en tendencia hacia el modelo de redes inteligentes, proporciona un marco de fortalezas que pueden aprovecharse para la implementación de la técnica aquí propuesta. Sobre la base de estudios anteriores, en este trabajo se propone particularmente la realización de mediciones fasoriales, que requieren una sincronización temporal de cierta precisión.

2. INTRODUCCIÓN

La contaminación armónica es uno de los aspectos de la calidad de energía (o calidad de potencia) que implican mayores esfuerzos para los ingenieros eléctricos. Básicamente, puede describirse como la distorsión de las formas de onda de las tensiones y corrientes de un sistema eléctrico de corriente alterna; en condiciones ideales, tales formas de onda deberían ser sinusoidales. Por lo general, se lo enfoca como un problema de régimen permanente, aunque la distorsión armónica en cada punto de un sistema eléctrico dado evoluciona con el tiempo.

Si bien no se trata de un problema nuevo, sino que surgió contemporáneamente con la expansión de la corriente alterna, se ha agudizado en las últimas décadas especialmente por dos motivos [1]:

- 1) La proliferación de cargas no lineales, es decir, aquellas que no se basan exclusivamente en los principios electromagnéticos tradicionales, sino que son típicamente de carácter electrónico.
- 2) El incremento en el índice de penetración de la generación distribuida, consistente en la inyección de magnitudes de potencia relativamente pequeñas en una red, proporcionadas en una creciente proporción de casos por fuentes de energía alternativa.

En cada nodo de una red, puede describirse de diversas maneras la situación relativa a la

contaminación armónica. En la normativa, se define un puñado de parámetros de amplio uso, como la tasa de distorsión armónica (THD, *Total Harmonic Distortion*), que permiten cuantificar el grado de distorsión de cualquier magnitud eléctrica de interés. En la misma normativa, se establecen ciertos límites por encima de los cuales la situación relativa a la distorsión armónica se considera inadmisibles y se requieren acciones correctivas. A grandes rasgos, se considera que la empresa distribuidora de energía es responsable de mantener la distorsión armónica de las tensiones dentro de tales límites, mientras que los usuarios son responsables de hacer lo mismo con las corrientes que consumen [2] [3].

En términos generales, se suele aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*) para descomponer una forma de onda distorsionada en sus componentes. Adicionalmente, en la mayoría de los análisis, se suele admitir la validez del principio de superposición, con lo cual para cada frecuencia armónica se pueden analizar independientemente sendos modelos del circuito sujeto a estudio [4].

En la Fig. 1, se muestra un ejemplo elemental donde una forma de onda distorsionada (a) de valor eficaz V_{ef} se puede representar (b) por una componente de frecuencia fundamental de valor eficaz V_{ef1} , sumada a otra componente de frecuencia triple y de valor eficaz V_{ef3} .

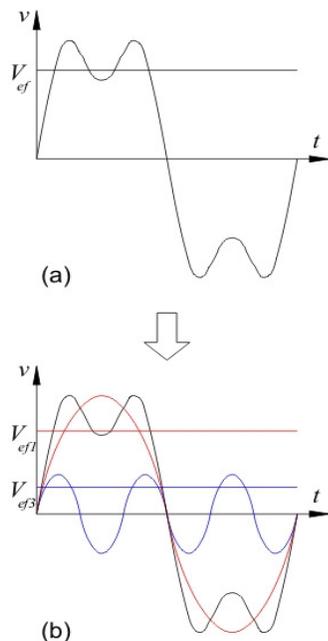


Figura 1 - Descomposición de una onda distorsionada en sus componentes armónicas

Sin embargo, más allá de la descripción y cuantificación de la situación de contaminación armónica, lo que de fondo interesa es determinar la magnitud y la ubicación de la(s) fuente(s) causante(s) de la distorsión armónica en un punto en particular o en un sistema en general. En términos muy amplios, y apelando a una aplicación genérica del principio de superposición, puede afirmarse que para cada frecuencia armónica que aparece en las tensiones de un sistema eléctrico, existe al menos una fuente responsable de tal contaminación [5].

Cabe mencionar que, en contraposición, existen también las denominadas “cargas sensibles”, que “sufren” las consecuencias de las no linealidades de la tensión de la red que las alimenta. Esto, por lo general, implica que las corrientes consumidas por tales cargas se distorsionen excesivamente con pequeñas distorsiones de tensión. De todos modos, la mayoría de las veces, la distorsión armónica de la tensión de alimentación provoca en las cargas sensibles efectos más contundentes, como una mayor disipación térmica, fallas tempranas o inesperadas, reducción de la vida útil, etc. [6].

Para la localización y cuantificación de las fuentes de contaminación armónica, existen en la literatura numerosos antecedentes de criterios desarrollados. De hecho, un puñado de ellos ya se aplica desde el punto de vista técnico-comercial en diversos ámbitos, incluido nuestro país, para la imputación de responsabilidades relativas a la contaminación armónica [3]. Aunque el desarrollo de tales criterios excede el alcance del presente trabajo, es importante destacar que no existe un consenso definitivo a nivel de normativa internacional sobre los criterios por adoptar. Por caso, para la metodología adoptada en la normativa argentina, existen numerosas referencias en la literatura donde se demuestran claramente algunas falencias que implican el surgimiento de “falsos positivos” en la mencionada imputación de responsabilidades [7]. En la mayoría de los criterios, dicha asignación de responsabilidades se realiza en un punto dado del sistema analizado, y sobre la base de mediciones aisladas en tal lugar, lo cual implica que se verifique la situación exclusivamente en el punto de interés, como se detalla por ejemplo en [8].

En la Fig. 2, se muestra una representación simplificada de un sistema de ejemplo de 5 barras en el cual se han determinado valores de potencia activa y reactiva inyectadas en cada nodo para una determinada frecuencia armónica. En función de uno de los criterios antes mencionados, podría determinarse que la única fuente de contaminación armónica de este sistema para la frecuencia analizada se encuentra en el nodo 5 (potencia activa ingresante por el nodo), mientras que en los otros 4 nodos no hay fuente de contaminación armónica (potencia activa saliente del nodo).

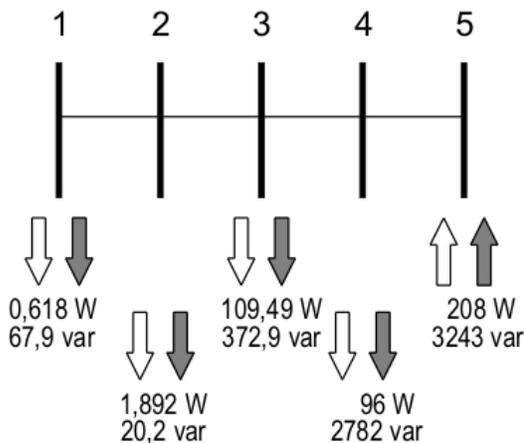


Figura 2 - Ejemplo simplificado de potencias armónicas inyectadas en un sistema de 5 nodos

Una de las herramientas que permite alimentar de datos a algunos de los procedimientos antes mencionados es la estimación de estado armónico [9] [10]. Es decir que, independientemente del criterio adoptado para determinar si en un nodo de un sistema hay una fuente de contaminación armónica, la estimación de estado armónico es pasible de aplicarse como paso preliminar.

Para definir brevemente dicha técnica, puede desglosarse su descripción en tres grandes bloques.

- 1) La definición genérica de estimación de estado, proveniente de la disciplina de control automático, es que se trata de una técnica basada en herramientas estadísticas, desarrollada sobre la base de una cantidad redundante de mediciones, y destinada a obtener la mejor estimación de las variables de estado de un sistema. A su vez, debe recordarse que las denominadas variables de estado de un sistema son aquellas que permiten calcular todos los demás parámetros de funcionamiento de dicho sistema en cualquier situación dada.
- 2) La aplicación de la expresión “estimación de estado” en el ámbito de los sistemas eléctricos, particularmente en los de potencia, remite específicamente a la obtención de la mejor estimación de las magnitudes y ángulos de fase de las tensiones nodales de un sistema dado, aunque solo a frecuencia fundamental. En la Fig. 3, se muestra a modo de ejemplo el aspecto clásico que tendrían los fasores de tensión de un sistema eléctrico, ya sea de potencia o no, cuando la fuente de potencia activa se encuentra en el nodo 1 y las cargas en los demás nodos, particularmente el nodo 5. Teniendo en cuenta un sentido convencional positivo para los ángulos medidos en sentido contrario al de las agujas del reloj, se nota un atraso evidente y creciente entre dichos nodos 1 y 5.

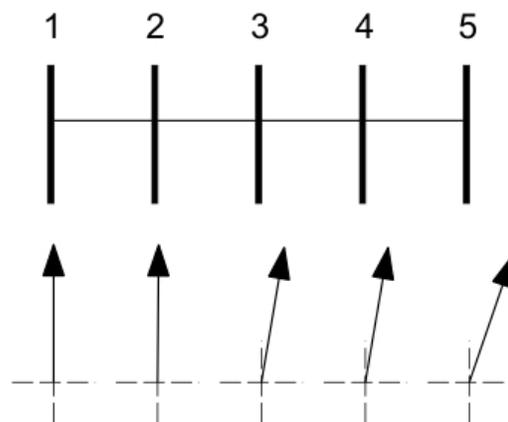


Figura 3 - Aspecto clásico de los fasores de tensión de frecuencia fundamental en un sistema eléctrico

- 3) Finalmente, el concepto de estimación de estado armónico implica que se replique el mismo procedimiento de frecuencia fundamental a todas las frecuencias armónicas de interés, con lo cual se obtendría para cada nodo y para cada frecuencia armónica un determinado fasor de tensión armónica.

Dicho de otro modo, sobre la base de las definiciones ya planteadas, se puede decir que la estimación de estado armónico permite obtener las magnitudes y los ángulos de fase de todas las tensiones armónicas presentes en cada nodo del sistema considerado. Esta información, las variables de estado armónico del sistema, sirve como punto de partida para aplicar alguno de los procedimientos numéricos ya previstos en la literatura para la localización y cuantificación de fuentes de contaminación armónica, o al menos para la imputación de responsabilidades según determinados criterios consensuados.

3. VARIANTES PARA LA ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO

Una vez definida genéricamente la estimación de estado armónico, se pueden detallar los siguientes dos grandes enfoques:

- 1) Podría pensarse la estimación de estado armónico como una aplicación sucesiva, para cada frecuencia armónica, del procedimiento tradicional de estimación de estado realizado a frecuencia fundamental. Sin embargo, este enfoque implicaría la medición de potencias armónicas activas y reactivas, ya sea inyectadas en los nodos o circulantes por las ramas. Esto, a su vez, requeriría la resolución de un problema no lineal que, en comparación con el problema de estimación de estado a frecuencia fundamental, se magnifica tantas veces como tantas sean las frecuencias armónicas que se consideran. Además de este

inconveniente numérico, es clave destacar que dichas potencias armónicas pueden estar al menos 4 o 5 órdenes de magnitud por debajo de las potencias que se miden a frecuencia fundamental, lo cual ocasiona un serio problema técnico en cuanto a la calidad de los medios de medición. En algunas publicaciones de los autores, como [11] y [12], se aborda este enfoque en detalle, pero su aplicación práctica estaría restringida solo a sistemas donde se guarden ciertas proporciones particulares, por ejemplo, caídas de tensión al límite de lo admitido por normativa, un muy elevado nivel de distorsión armónica en general, reducidas potencias a frecuencia fundamental, etc. En la Fig. 4, se muestra un ejemplo elemental de un sistema eléctrico de 3 nodos donde se ponen de manifiesto las magnitudes clave para la estimación de estado clásica: las tres tensiones de magnitudes V_1 , V_2 y V_3 y ángulos de fase δ_1 , δ_2 y δ_3 ; y las potencias activas y reactivas de inyección nodal P_n y Q_n , y de rama P_{i-j} y Q_{i-j} .

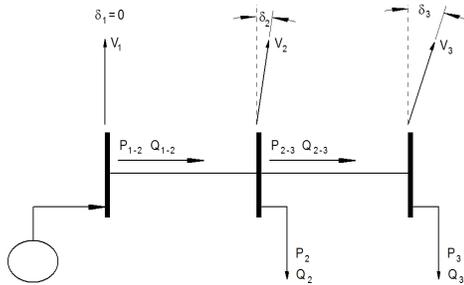


Figura 4 - Magnitudes principales consideradas para la estimación de estado clásica

- 2) El segundo enfoque, predominante en la literatura aunque restringido en su implementación a apenas un puñado de sistemas de potencia y en desarrollo incipiente para sistemas de distribución, consiste en la toma de mediciones fasoriales de tensiones y corrientes armónicas. Dicho método tiene un paralelo a frecuencia fundamental en las mediciones fasoriales realizadas para obtener los denominados “sincrofasores”, de extendida aplicación en la actualidad en redes importantes, especialmente con la finalidad de supervisar las oscilaciones de baja frecuencia entre áreas del sistema [13]. La gran ventaja de este enfoque es que, con la expresión de todas las magnitudes fasoriales en forma rectangular, se reduce todo el problema de estimación de estado a un problema lineal, que con un único cálculo matricial arroja un resultado definitivo, sin necesidad de iteraciones como se requerirían con el otro enfoque.

4. ESTIMACIÓN DE ESTADO ARMÓNICO CON MEDICIONES SINCRONIZADAS

A modo de fundamentación, la siguiente es la formulación que da origen al concepto de estimación de estado a partir de mediciones sincronizadas:

$$\tilde{z}_c = [\tilde{Y}] \cdot \tilde{x} + error \quad (1)$$

$$\tilde{z}_v = [T] \cdot \tilde{x} + error \quad (2)$$

donde:

\tilde{x} : vector de las variables de estado del sistema (las tensiones nodales expresadas como fasores, o sea, como valores complejos)

\tilde{z}_c : vector de las corrientes de rama medidas (expresadas como fasores, o sea, como valores complejos)

\tilde{z}_v : vector de las tensiones nodales medidas (expresadas como fasores, o sea, como valores complejos)

$[\tilde{Y}]$: matriz de admitancia del sistema, está expresada por definición con valores complejos

$[T]$: matriz ad hoc compuesta solo por unos y ceros, pero sin valores complejos

De las expresiones (1) y (2), se deduce que las componentes de los vectores de mediciones \tilde{z}_c y \tilde{z}_v ingresados al algoritmo de estimación de estado son valores complejos. Estos corresponden a los fasores de las tensiones y las corrientes medidas, que pueden descomponerse en componentes rectangulares. Dicha descomposición es la que conlleva una resolución lineal del problema de estimación de estado.

En este punto, debe resaltarse un detalle importante: más allá de la redundancia cuantitativa de mediciones, lo que realmente importa para que la estimación de estado armónica resulte factible es que el sistema sea observable. Esta última condición se cumple para el estado armónico si, para todas las frecuencias armónicas de interés, las mediciones están planteadas de la misma manera que para la frecuencia fundamental.

Según este enfoque, uno de los puntos clave para el planteo de mediciones sincronizadas en diferentes nodos de un sistema implica la utilización de algún método de asignación de “etiquetas de tiempo” (“time stamps”) a las mediciones de tensión y corriente. Para esto, se pueden adoptar criterios bastante similares a los utilizados en la implementación de la medición de sincrofasores en sistemas de potencia.

En la mayoría de las aplicaciones en sistemas de potencia, la finalidad es supervisar la estabilidad u otras características de constantes de tiempo relativamente elevadas, y se circunscribe el análisis a los fasores de frecuencia fundamental. Sin embargo, en la literatura ya se ha evaluado ampliamente la posibilidad de extender su

aplicación a la estimación de estado, sobre la base de algunos casos de implementación exitosa [14]. Aunque no está orientada específicamente al ámbito de la calidad de energía, una referencia importante en cuanto a mediciones fasoriales se refiere es la denominada Iniciativa norteamericana para la medición de sincrofasores (NASPI, *North American Synchrophasor Initiative*, <https://www.naspi.org/>). Esta institución propicia la instalación y el aprovechamiento de unidades de medición fasorial (PMU, *Phasor Measurement Units*) en sistemas eléctricos para el control de diversos parámetros de su funcionamiento, con lo cual se prevé una difusión cada vez mayor de este tipo de tecnologías. Cabe tener en cuenta que las particularidades de la estimación de estado armónico con mediciones sincronizadas no requerirían específicamente de todas las prestaciones ya desarrolladas para el aprovechamiento de las PMU, pero bien pueden adoptarse solo ciertos criterios generales de dicha tecnología.

5. DISCUSIÓN

Según lo que se observa en las referencias enumeradas, los siguientes serían los desafíos que habría que superar para lograr la implementación de esta herramienta en sistemas de distribución:

- 1) Naturalmente, el importante costo del equipamiento de medición, comunicación y procesamiento necesario se absorbe más fácilmente en sistemas que manejen una mayor cantidad de energía en igual período de tiempo. Esto implica una desventaja para los sistemas de distribución, particularmente los que involucran consumidores de pequeño tamaño, por ejemplo, rurales.
- 2) El requerimiento de sincronización, que puede cumplirse razonablemente por medio de dispositivos basados en el sistema de posicionamiento global (GPS, *Global Positioning System*) [9] o bien de aplicaciones basadas en Internet [15], se hace bastante ajustado si se desea llegar a órdenes armónicos muy elevados. Como referencia, para una armónica de orden 25, un error de sincronización de $1 \mu s$ implicaría un error de medición angular menor a 1° . Esto implica ser realistas con el alcance en lo que respecta al orden armónico máximo que se puede evaluar en un sistema dado con esta herramienta.
- 3) Más allá del sistema de sincronización adoptado, un desafío de mayor magnitud consiste en la calibración del sistema completo en cuanto a su cumplimiento de tal sincronización. Esto requeriría equipos con una sensibilidad bastante mayor que la utilizada en campo, lo cual seguramente implicaría costos adicionales importantes.

- 4) La concentración de todas las mediciones con sus debidas etiquetas de tiempo puede hacerse en un punto central de procesamiento de datos, pero la velocidad de transmisión de tales datos hacia ese punto no tiene requerimientos tan importantes. La clave solo es contar con suficientes datos correspondientes a una misma etiqueta temporal para realizar una estimación de estado. Esta afirmación se mantiene en la medida en que se plantee la estimación de estado armónico solo a los fines de supervisión y determinación (fuera de línea) de las responsabilidades de la contaminación armónica en el sistema. Es de esperar que, con las herramientas de comunicación disponibles y en desarrollo para el fortalecimiento de las denominadas redes inteligentes, se debería cumplir sin mayores inconvenientes este requisito.
- 5) Dado que, por definición, la estimación de estado armónico implica la presencia de una cantidad redundante de mediciones, debe tenerse muy en cuenta la necesaria multiplicación de medios de medición en un sistema donde se quiera aplicar esta herramienta. De todos modos, dado que deben medirse tensiones nodales y corrientes de rama, en un mismo nodo pueden concentrarse varias mediciones que se centralicen en un único equipo donde se les asigne su etiqueta de tiempo, lo cual implicaría que tal proliferación se restringiría solamente a los elementos físicos de medición de corriente y tensión.

Existe una variante adicional a lo explicado hasta aquí. En [16], por ejemplo, se describe un proceso de estimación de estado dispuesto en dos etapas: en la primera, se hace una estimación de estado tradicional (no lineal) sobre la base de las mediciones de las magnitudes de las tensiones y las potencias. En la segunda etapa, se agregan como datos de ingreso para una nueva estimación de estado los fasores de tensión y corriente medidos de manera sincronizada. En dicho trabajo, se demuestra la mejora que esta combinación produce en los resultados finales de la estimación de estado. Restaría evaluar la posibilidad de concretar dicha combinación también para la estimación de estado armónico.

6. CONCLUSIONES

En función del análisis cualitativo realizado en este trabajo y de los antecedentes cuantitativos que constan en las referencias, se puede inferir que existe la posibilidad de aplicar técnicas de estimación de estado armónico en redes de media tensión, y eventualmente de baja tensión, a fin de determinar la ubicación y la magnitud de las fuentes de contaminación armónica. Se plantea que debería adoptarse un formato de adquisición de mediciones

con sincronización en el tiempo, de manera similar a la utilizada para las mediciones fasoriales en sistemas de potencia. Una de las condiciones clave para una implementación exitosa radica en el grado de detalle de la modelización de la red en cuestión, lo cual por lo general suele cumplirse más fácilmente en las redes de media tensión que en las de baja tensión. Otra cuestión muy importante es la precisión de los medios de sincronización temporal que se implementen para las mediciones, y por ende en el sistema de calibración que se utilice. El tercer aspecto de importancia sería asegurar que los costos de tales sistemas resulten relativamente accesibles en proporción con la demanda y la energía puestas en juego en las redes consideradas. Previendo la disponibilidad de tecnologías de medición fasorial que pueden aplicarse a sistemas de distribución, se enumeran algunos criterios que permitirían el desarrollo de un módulo de sincronización específico que, emulando equipos similares utilizados en sistemas de potencia, se comunique con una fuente horaria de precisión y asigne una etiqueta temporal a las mediciones.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó en los siguientes marcos:

- Proyecto de Investigación y Desarrollo "Estudio del nivel de distorsión armónica de la tensión de suministro en una red urbana de distribución de energía eléctrica", desarrollado en la Fac. Reg. San Francisco de UTN entre el 1/1/13 y el 31/12/13, avalado por el Rectorado de UTN con el código UTN1827
- Beca convocatoria 2008 para docentes de la UTN destinadas a la formación de doctores en áreas tecnológicas prioritarias. Ministerio de Ciencia, Tecnología, e Innovación Productiva. Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica. FONCyT IP-PRH 2007.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. C. Gómez Targarona, "Calidad de potencia para usuarios y empresas eléctricas", Edigar, Buenos Aires, 2005
- [2] IEEE SM 519 - IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE IAS/PES, April 1993
- [3] Base metodológica para el control de la calidad del producto técnico, Resolución ENRE nro. 184/2000
- [4] J. Arrillaga, D. A. Bradley, P. S. Bodger, "Power System Harmonics", John Wiley & Sons, 1988
- [5] Khandaker M. S. Islam and Abdul H. Samra, "Identification of Harmonic Sources in Power Distribution Systems", Proceedings of IEEE Southeastcon '97, 'Engineering New Century', Blacksburg (USA), pp. 301-303, April 1997
- [6] D. Chapman, "Harmonics: Causes & Effects" (Application Note, Publication No. Cu0119), European Copper Institute, November 2011
- [7] C. Reineri, M. Florit, D. Adorni, "A contribution for the determination of responsibilities in the contribution to harmonic distortion at the point of common coupling", CIDEL Proceedings, Buenos Aires, 2002
- [8] T. Pfajfar, B. Blazic, I. Papi, "Harmonic Contributions Evaluation with the Harmonic Current Vector Method", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 23, No. 1, January 2008
- [9] G. T. Heydt, "Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 569-576, January 1989
- [10] A. P. S. Meliopoulos, F. Zhang, S. Zelingher, "Power System Harmonic State Estimation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, pp. 1701-1709, July 1994
- [11] D. Ferreyra, A. C. Sarmiento, C. Reineri, "Harmonic State Estimation on a Radial Distribution System with Distributed Generation", *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 11, No. 1, Feb. 2013, pp. 499-504
- [12] D. Ferreyra, A. C. Sarmiento, C. Reineri, "Erroneous Data Detection in the Harmonic State Estimation of a Radial Distribution System with Distributed Generation", Proceedings of the 2012 Sixth IEEE/PES T&D-LA Conference and Exposition, Montevideo (Uruguay), Sept. 2012
- [13] IEEE C37.118-2011, "IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems", Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA, 2011
- [14] R. Zivanovic, C. Cairns, "Implementation of PMU technology in state estimation: an overview", Proceedings of IEEE 4th AFRICON, Stellenbosch (S. Africa), 1996
- [15] A. Radovanovic, "Using the internet in networking of synchronized phasor measurement units", *Electrical Power and Energy Systems* 23 (2001), pp. 245±250
- [16] R. F. Nuqui, A. G. Phadke, "Hybrid Linear State Estimation Utilizing Synchronized Phasor Measurements", *Proceedings of the 2007 IEEE Lausanne Power Tech*, Lausanne (Switzerland), 2007