

MEDICIÓN DE LAS MAGNITUDES DE POTENCIA Y ENERGÍA ELÉCTRICA BAJO LAS NUEVAS CONDICIONES DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

GABRIEL EDUARDO GONZÁLEZ SUA

*Ingeniero Electrónico, Magíster en Ingeniería Electrónica (C).
Universidad Industrial de Santander.
g2sua@yahoo.com*

GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA

*Ingeniero Electricista, Especialista Universitario en Técnicas de Investigación Tecnológica, Doctor Ingeniero Industrial.
Profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
Universidad Industrial de Santander.
gaby@uis.edu.co*

JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ

*Ingeniero Electricista, Magíster en Potencia Eléctrica.
Profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
Universidad Industrial de Santander.
jbarrero@uis.edu.co*

CÉSAR ANTONIO DUARTE GUALDRÓN

*Ingeniero Electricista, Magíster en Potencia Eléctrica.
Profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
Universidad Industrial de Santander.
cedagua@uis.edu.co*

ADÁN DE JESÚS BAUTISTA MORANTES

*Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica.
Profesor de la Escuela de Ingeniería Electromecánica.
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Seccional Duitama.
elecadan@gmail.com*

*Fecha de Recibido: 09/12/2008
Fecha de Aprobación: 15/06/2009*

RESUMEN

Este artículo muestra la necesidad de realizar una adecuada medición de las magnitudes de potencia y energía eléctrica. Asimismo, los avances logrados en esta área en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T). El propósito de este trabajo es establecer las necesidades para llevar a cabo, de manera adecuada, estas mediciones y desarrollar herramientas que permitan hacerlo.

PALABRAS CLAVES: Sistemas trifásicos, Medición de variables eléctricas, Potencia y energía eléctrica, IEEE-1459.

ABSTRACT

This article shows the necessity to make a suitable measurement of the magnitudes of power and electrical energy. Likewise, the developments achieved in this area in the “Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T)” are presented as well. The purpose of this work is to establish the necessities to accomplish in an appropriate way these measurements and to develop tools to carry them out.

KEY WORDS: Three-phase systems, Measurement of electrical variables, Power and electrical energy, IEEE-1459.

1. INTRODUCCIÓN

La correcta medición del suministro y consumo de la energía eléctrica y por lo tanto garantizar la correcta facturación, es una necesidad fundamental tanto para las empresas comercializadoras como para sus clientes. Sin embargo, las nuevas definiciones de potencia que han surgido en los últimos años a raíz de los cambios importantes en los sistemas eléctricos, debido a la aparición de componentes armónicas y al desbalance de las cargas en sistemas trifásicos, están redefiniendo la metrología eléctrica, ya que varios de los métodos empleados en la medición tradicional de la potencia reactiva y el factor de potencia, son inadecuados para determinados escenarios de funcionamiento de los sistemas eléctricos.

Términos como potencia instantánea, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y factor de potencia han sido ampliamente debatidos, y gran parte del desarrollo de equipos de medición de energía eléctrica se basa en la estimación de estos parámetros. Sin embargo, la mayoría de los equipos de medición de potencia y energía (analógicos o digitales) han sido diseñados para que funcionen adecuadamente cuando las condiciones son de señales sinusoidales, en sistemas trifásicos simétricos balanceados.

El resultado final de la medición también puede estar afectado por la inadecuada adquisición de los datos de tensión y corriente, por ejemplo, cuando se utiliza la conexión de dos elementos (conocida como conexión Aron para la estimación de potencia activa en sistemas trifásicos) para medir la potencia trifásica, pues aunque dicha conexión que es adecuada para estimar la potencia activa, puede incurrir en incertidumbres mayores a las especificadas en la clase del equipo cuando se miden la potencia no activa y la potencia aparente.

A su vez, el avance en el procesamiento de señales ha llevado a nuevos, más efectivos y más robustos algoritmos; cuya implementación es posible gracias a los desarrollos en la arquitectura de computadores, que han suministrado herramientas para la adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos en tiempo real. Frente a lo cual se cuenta con las herramientas, condiciones y necesidades para el desarrollo de los dispositivos electrónicos de medición que requiere el sector de los servicios públicos, los cuales consideran diferentes escenarios de operación y permiten adicionalmente, la lectura, programación y pruebas automáticas de medidores. Por esta razón en la E3T se han venido desarrollando diferentes

proyectos encaminados a evaluar el problema de una inadecuada medición de las cantidades de potencia y energía eléctrica

En este artículo se expone inicialmente el desarrollo histórico y panorama actual involucrado en la estimación de cantidades de potencia y energía eléctrica. Posteriormente se exponen las formulaciones utilizadas por algoritmos de algunos de los medidores digitales más representativos, utilizados por empresas del sector eléctrico nacional y como el estándar IEEE-1459 surge como propuesta frente a algunas inconsistencias de las anteriores formulaciones. Finalmente se presentan algunos desarrollos llevados a cabo en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander.

2. MARCO HISTÓRICO

La consolidación de la corriente alterna como medio predominante para la transmisión de la energía eléctrica, debido a la posibilidad de realizar cambios en el nivel de la tensión de las líneas de transmisión para disminuir las pérdidas, requirió el análisis de estos circuitos que ya no se comportaban de la misma forma a cómo funcionaban con corriente directa. Trabajos como el de W. Stanley [1] y otros de su época, donde se exponía el desfase existente entre la forma de onda de la corriente y la tensión, y la oscilación de la potencia ocasionada por el intercambio de energía entre la inductancia y la fuente; plantearon un reto para los ingenieros, quienes frente a esto aceptaron los conceptos de potencia aparente y reactiva, ya que se requería de un parámetro que permitiera cuantificar la utilización de las líneas de transmisión. De ahí surgió el concepto de factor de potencia.

Posteriormente, la proliferación de sistemas polifásicos planteaba otro reto; ya que aunque los sistemas simétricos y balanceados eran plenamente entendidos, debido a que su comportamiento era similar al de los sistemas monofásicos, los sistemas no balanceados presentaban interrogantes en la definición de la potencia aparente y su consecuencia en el cálculo del factor de potencia.

Al mismo tiempo, la aparición de los rectificadores de mercurio empleados en transporte y procesos electroquímicos generó el interés en el estudio del efecto de las condiciones no sinusoidales en los sistemas eléctricos, y Budeanu [2] planteó el primer modelo para la potencia en sistemas monofásicos con ondas distorsionadas. La diseminación de esta teoría permitió

que existiera un mayor interés en establecer una teoría unificada que considerará todos los posibles escenarios de operación de las redes eléctricas de corriente alterna. Ante estos cambios surgió la necesidad de establecer un modelo de potencia que permitiera cuantificar todos los efectos que se pudieran presentar en un sistema eléctrico para de esta forma cuantificar la energía suministrada y consumida. El modelo aceptado universalmente para realizar esta cuantificación fue el propuesto por Budeanu

2.1 Modelo de potencia propuesto por Budeanu.

Uno de los primeros intentos de establecer una definición adecuada que se ajustara a las condiciones no sinusoidales de las formas de onda, fue la establecida a finales de la década del veinte del siglo pasado por Budeanu, quien propuso abordar la potencia aparente S en tres dimensiones: una componente de potencia activa P , una de potencia reactiva Q_B y una de potencia de distorsión D_B , componentes ortogonales entre si, con lo cual la suma de sus cuadrados es igual al cuadrado de la potencia aparente, como se muestra en (1).

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2 \quad (1)$$

Estas definiciones surgen de descomponer las formas de onda en componentes armónicos, a partir de la frecuencia fundamental, obteniendo las representaciones de las formas de corriente y tensión, como se muestran en (2) y (3) respectivamente.

$$v = \sqrt{2} \sum_h V_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (2)$$

$$i = \sqrt{2} \sum_h I_h \sin(h\omega t + \beta_h) \quad (3)$$

Donde:

I_h y V_h representan los valores eficaces (RMS) del respectivo armónico h .

α_h y β_h son los ángulos de fase de las componentes de tensión y corriente, respectivamente, de cada armónico.

$\omega = 2\pi f = 2\pi/T$: es la frecuencia angular de la componente fundamental.

A partir de esta descomposición de las señales de corriente y tensión, se obtienen la potencia activa y la potencia reactiva propuesta por Budeanu, como se muestra en (4) y (5).

$$P = \sum_h V_h I_h \cos\theta_h \quad (4)$$

$$Q_B = \sum_h V_h I_h \sin\theta_h \quad (5)$$

Donde $\theta_h = \beta_h - \alpha_h$, representa el desfase de la corriente respecto a la señal de tensión.

A partir de los dos componentes anteriores Budeanu obtuvo el valor de la potencia de distorsión, el cual se define como la componente en cuadratura que le hace falta a P y Q_B para completar el valor de la potencia aparente o potencia de dimensionamiento S . Esta potencia de distorsión se obtiene a partir de (1) como se expresa en (6).

$$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2} \quad (6)$$

En (6) se observa que es necesario obtener el valor de la potencia aparente, la cual se define como el producto de los valores eficaces de la corriente y la tensión, que se encuentra a partir de la suma cuadrática de sus componentes armónicos.

$$S^2 = \sum_h V_h^2 * \sum_h I_h^2 \quad (7)$$

Las definiciones anteriores se pueden extender para un sistema trifásico, teniendo en cuenta la diferencia de 120° existente entre cada una de las fases, como se expresa en (8) a (13).

$$v_a = \sqrt{2} \sum_h V_{ah} \sin(h\omega t + \alpha_{ah}) \quad (8)$$

$$v_b = \sqrt{2} \sum_h V_{bh} \sin(h\omega t + \alpha_{bh} - 120^\circ h) \quad (9)$$

$$v_c = \sqrt{2} \sum_h V_{ch} \sin(h\omega t + \alpha_{ch} + 120^\circ h) \quad (10)$$

$$i_a = \sqrt{2} \sum_h I_{ah} \sin(h\omega t + \beta_{ah}) \quad (11)$$

$$i_b = \sqrt{2} \sum_h I_{bh} \sin(h\omega t + \beta_{bh} - 120^\circ h) \quad (12)$$

$$i_c = \sqrt{2} \sum_h I_{ch} \sin(h\omega t + \beta_{ch} + 120^\circ h) \quad (13)$$

Con base en las anteriores definiciones es posible evaluar las componentes de potencia de cada una de las tres fases del sistema trifásico. A partir de esta consideración se estableció que la potencia del sistema trifásico se podía obtener sumando las potencias de cada una de las fases, aseveración que es siempre válida para la potencia activa no así para las demás potencias.

De hecho al establecer la expresión para la potencia aparente del sistema trifásico fue necesario proponer dos posibles opciones: Una potencia aparente aritmética (S_A) y otra potencia aparente vectorial (S_V).

Potencia aparente aritmética (S_A): Se define como la suma aritmética de las potencias aparentes de cada una de las fases, como se muestra en (14).

$$S_A = S_a + S_b + S_c \quad (14)$$

Donde:

$$S_a = \sqrt{P_a^2 + Q_{Ba}^2 + D_{Ba}^2} \quad (15)$$

$$S_b = \sqrt{P_b^2 + Q_{Bb}^2 + D_{Bb}^2} \quad (16)$$

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_{Bc}^2 + D_{Bc}^2} \quad (17)$$

Potencia aparente vectorial (S_V): Corresponde a la suma vectorial de las potencias aparentes de cada una de las fases.

$$S_V = \sqrt{P^2 + Q_B^2 + D_B^2} \quad (18)$$

Donde, sus tres componentes corresponden a la suma aritmética de cada una de los componentes de las fases.

$$P = P_a + P_b + P_c \quad (19)$$

$$Q_B = Q_{Ba} + Q_{Bb} + Q_{Bc} \quad (20)$$

$$D_B = D_{Ba} + D_{Bb} + D_{Bc} \quad (21)$$

3. PANORAMA ACTUAL EN LA MEDICIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El incremento en las últimas décadas de la utilización de dispositivos de conmutación de estado sólido para una amplia gama de aplicaciones, tanto industriales como domésticas, han influido en que las formas de onda de tensión y corriente se encuentren distorsionadas por la aparición de componentes armónicas en la mayoría de las instalaciones eléctricas tanto de baja como alta tensión, lo que ha convertido la visión de *Budeanu* en una realidad actual.

Por otra parte, los dispositivos y técnicas que tradicionalmente se han utilizado para la medición de potencia y energía eléctrica se diseñan, calibran y prueban en la mayoría de los casos para que sus especificaciones se cumplan en entornos donde se consideran sistemas simétricos, sin componentes armónicas y balanceados; lo cual puede generar incertidumbres superiores a los

márgenes establecidos en el equipo cuando estos se instalan en sistemas donde las señales de tensión y corriente no son sinusoidales [3].

El progreso en el análisis de circuitos y la teoría de campos electromagnéticos, ha conducido a un mejor entendimiento del flujo de energía y a una gran variedad de modelos para la estimación de la potencia. El avance en el procesamiento de señales ha llevado a nuevos, más efectivos y más robustos algoritmos. Los desarrollos en la arquitectura de computadoras han suministrado herramientas para la adquisición de datos en tiempo real y para procesar y almacenar cantidades importantes de información.

4. MEDICIÓN DIGITAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA

A partir de los años ochenta se introdujeron en la industria, nuevos medidores de energía eléctrica basados en microprocesadores, capaces de registrar magnitudes eléctricas a partir del muestreo de las señales de tensión y corriente del sistema. La mayoría de los medidores de esta primera generación fueron diseñados, simulando los procedimientos de medición de la generación previa de medidores electromecánicos o probados para implementar procedimientos de medición obsoletos [4].

Producto de ello, la distorsión armónica de las señales de tensión y corriente origina resultados significativamente diferentes durante la medición de la potencia reactiva y el factor de potencia, dependiendo del tipo de medidor utilizado [5]. En consecuencia el cambio de medidor puede en algunos casos incrementar el valor de la facturación de energía, lo cual no debería ocurrir, por cuanto cualquier medidor en cualquier ambiente electromagnético, debería estimar valores de potencia similares [6].

En un medidor digital, las señales analógicas de tensión y corriente son adquiridas y digitalizadas tomando muestras y convirtiendo estas muestras en un registro. Una vez se tienen las señales digitales, los valores de éstas son utilizados para estimar los parámetros requeridos para evaluar las potencias y energías del sistema. Estas métricas son almacenadas en memoria y están disponibles para su utilización. Las estimaciones realizadas pueden ser visualizadas en una pantalla de cristal líquido (LCD) o leídas de la memoria del equipo por medio de un puerto de comunicación, lo que permite que estos resultados sean posteriormente visualizados en un computador o un sistema central

Todos los medidores digitales registran la energía activa de forma similar y de la misma forma que los medidores electromecánicos; es decir, acumulando el producto de las señales de tensión y corriente. Sin embargo, aún no existe uniformidad en los criterios de estimación de las energías aparente y reactiva como se describe en [7], [8], [9] y [10].

Lo anterior fue corroborado con los resultados de un trabajo de investigación [11] realizado en dos empresas distribuidoras nacionales, en el cual se obtuvieron las ecuaciones utilizadas para estimar potencia y energía activa, reactiva y aparente, así como el factor de potencia de los medidores digitales de mayor uso en las empresas del sector eléctrico colombiano. La obtención de los medidores digitales se obtuvo de un muestreo de los medidores instalados en las fronteras de grandes clientes de una empresa comercializadora de energía eléctrica, utilizando para la selección de la muestra la técnica de muestreo sistemático estratificado por conglomerados.

A continuación se enuncian los algoritmos utilizados por estos medidores para la estimación de las diferentes potencias en un sistema eléctrico.

4.1 Potencia activa

La estimación de la potencia activa monofásica de todos los medidores se realiza promediando la potencia instantánea, es decir:

$$P_a = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_n i_n \quad (22)$$

La energía activa se estima de forma similar, la única diferencia es que no se realiza la división entre N (número de muestras de tensión y corriente). Cuando se implementa la conexión de dos elementos en sistemas trifásicos de tres hilos, la corriente neta de uno de los medidores monofásicos utilizados (generalmente el de la fase S) se hace nula y la potencia del sistema se estima conectando los otros dos medidores monofásicos a las tensiones de línea que correspondan, dependiendo de las corrientes que se estén sensando.

4.2 Potencia aparente

La estimación de la potencia aparente por fase se efectúa multiplicando los valores eficaces de tensión y corriente, que para una fase será:

$$S_a = V_{RMSa} I_{RMSa} \quad (23)$$

La potencia aparente total trifásica en los medidores analizados se obtiene como la suma de las potencias aparentes de cada fase; es decir, se estima la potencia aparente aritmética. Sin embargo, la estimación de la energía aparente en varios de ellos se obtiene a partir de la estimación de las energías activa y reactiva.

4.3 Potencia reactiva

La estimación de la potencia reactiva por fase se realiza de tres formas diferentes. En unos medidores se realiza retrasando la señal de tensión $\pi/2$ radianes con respecto a la frecuencia del sistema, para posteriormente evaluar el promedio del producto de esta tensión con la señal de corriente.

En otros medidores, este desplazamiento en el tiempo de la señal de tensión se realiza integrando esta señal. Y finalmente, en otros medidores la potencia reactiva se obtiene a partir de las potencias aparente y activa.

La ecuación utilizada por el algoritmo de uno de los medidores digitales para estimar la potencia reactiva es:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (24)$$

En los medidores restantes, se modifica la onda de tensión de dos formas:

$$v_Q(t) = \omega_0 \int v(t) dt \quad (25)$$

$$v_Q(t) = v \left(t - \frac{\pi}{2\omega_0} \right) \quad (26)$$

Siendo ω_0 la frecuencia fundamental del sistema en rad/s.

Una vez se modifica la señal de tensión, estos medidores digitales evalúan la potencia reactiva como:

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_{Qn} i_n \quad (27)$$

De las tres formas utilizadas para evaluar la potencia reactiva, la más adecuada es la propuesta en (24), pues para la estimación de la potencia reactiva, se tienen en cuenta no sólo los efectos relacionados con la magnetización (elementos inductivos) o la carga eléctrica (elementos capacitivos) de los materiales, sino también los efectos de los armónicos en el sistema.

En todos los casos, la potencia reactiva total trifásica se obtiene sumando las potencias de cada una de las fases.

La estimación de la energía reactiva calculando la potencia con (27) sólo requiere que no se divida entre N . En cambio, si se utiliza (24) para evaluar la potencia reactiva, es necesario multiplicar las estimaciones de esta potencia por el tiempo durante el cual se realiza la medición, para obtener la energía reactiva.

4.4 Factor de potencia

Existen dos formas posibles de determinar el factor de potencia. Algunos medidores, lo hacen a partir de los valores de potencia activa y potencia aparente, de la

$$FP = \frac{P}{S} \quad (28)$$

siguiente forma:

$$FP = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \right) \quad (29)$$

Mientras que en otros es evaluado como:

Es de resaltar el hecho de que en todos los medidores examinados, las potencias trifásicas se obtienen sumando las potencias estimadas por cada fase; es decir, que en esencia se considera que las potencias del sistema trifásico corresponden a la suma de las potencias de tres sistemas monofásicos; cuando en realidad la generación, la transmisión, la distribución, y en general el diseño y operación de los sistemas trifásicos se hace considerándolo como un sistema único. Este es uno de los paradigmas que aún se mantiene en la medición de potencias y energías en sistemas trifásicos y se incubó al considerar que todas las potencias del sistema se podían estimar de igual forma que la potencia activa, lo cual es cierto sólo cuando las condiciones del sistema trifásico son las ideales: tensión de suministro simétrica, carga balanceada y sistema sin armónicos, tal como se expone en [9] y [10].

Sin embargo, para las demás potencias (aparente y reactiva), la suma de las potencias por fase no siempre corresponderá a la potencia total del sistema, debido a efectos como la presencia de armónicos en las señales de tensión y corriente, y a la conexión de cargas trifásicas desbalanceadas.

5. DEFINICIONES PROPUESTAS EN EL ESTÁNDAR IEEE-1459

Frente a esta diferencia en la formulación en el año 2000 el IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) propuso una versión preliminar para un estándar, denominado: "IEEE Std 1459-2000: IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions" [12], con las definiciones para las medidas de las cantidades de potencia eléctrica bajo distintas posibles condiciones presentes en los sistemas de corriente alterna; el cual ha sido ampliamente discutido por diferentes investigadores del mundo [13] y [14], en sus ventajas, desventajas e impacto económico en la facturación [5], como se puede comprobar en la participación de alrededor de 30 miembros del Working Group on Nonsinusoidal Situations y de las más de 40 publicaciones que al respecto se han realizado en el IEEE.

Su potencial radica en establecer lineamientos para la medición y cálculo de energía eléctrica en los sistemas modernos que suelen presentar condiciones de desequilibrio en las señales de tensión, cargas trifásicas desbalanceadas y señales de tensión y corriente no sinusoidales. Se fundamenta en un compendio de los trabajos y análisis, en especial una investigación realizada por ingenieros sudafricanos en el año de 1997, en un sistema eléctrico práctico [15], donde demostraron las falencias de las definiciones anteriores como la de Budeanu.

Este estándar comienza enunciando las definiciones de potencias eléctricas en sistemas sencillos, como un sistema monofásico con onda sinusoidal pura, para luego ir abarcando sistemas más complejos, y finalmente abordar el sistema trifásico no balanceado con ondas no sinusoidales.

Las definiciones de potencia activa e instantánea, y valores eficaces o RMS de tensiones y corrientes son los mismos con los que tradicionalmente se ha trabajado; sin embargo, en el estándar se abarcan nuevas definiciones de las potencias aparentes, donde se tiene en cuenta lo siguiente [16]:

- 1) La potencia aparente es la potencia máxima transmitida a la carga (o entregada por la fuente) mientras mantiene las mismas pérdidas de línea y la misma tensión y corriente de la carga (o fuente).
- 2) El factor de potencia es la razón entre la potencia activa (consumida o generada) y la potencia máxima

que puede ser transmitida mientras se conservan las pérdidas de potencia en la línea y la tensión en la carga, constantes. (Aquí, la palabra potencia también puede ser reemplazada por la energía transmitida durante un intervalo de tiempo en particular).

Bajo estas definiciones el modelo propuesto obtiene un sistema trifásico equivalente que cumple con las siguientes características: es equilibrado en tensiones y balanceado en corrientes y presenta las mismas pérdidas del circuito trifásico verdadero. A partir de estas consideraciones se establecen los términos de tensión y corriente equivalentes.

Para un sistema trifásico de cuatro hilos y considerando que las pérdidas de potencia debidas a la tensión son iguales para las tres fases y que los conductores del sistema son del mismo calibre, los valores de la tensión y la corriente equivalentes se obtienen mediante (30) y (31).

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2]} \quad (30)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}} \quad (31)$$

Análogamente para un sistema trifásico de tres hilos (con las mismas consideraciones que el sistema de cuatro hilos) los valores de la tensión y la corriente equivalente se obtienen como:

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}} \quad (32)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}} \quad (33)$$

Donde, I_a , I_b e I_c representan los valores eficaces de las corrientes de línea y V_a , V_b y V_c , los valores eficaces de las tensiones de cada una de las fases; y V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} las tensiones de línea entre las fases. Es de resaltar, que en el caso de cuatro hilos, en la definición de corriente, se tienen en cuenta los efectos del conductor conectado al neutro del sistema y la corriente I_n que circula por él.

A partir de los anteriores términos se define la potencia aparente efectiva como:

$$S_e = 3V_e I_e \quad (34)$$

La potencia aparente efectiva se puede dividir en una serie de potencias que se enuncian a continuación y se presentan en Figura 1 y en la Tabla 1.

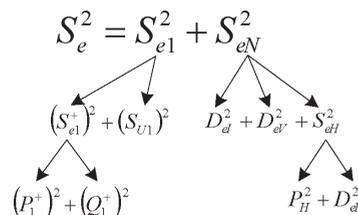


Figura 1. Descomposición de S_e de acuerdo con el estándar IEEE-1459 [16]

Tabla 1. Cantidades de potencia para un sistema trifásico con formas de onda no sinusoidales

Cantidad o indicador	Combinado	Fundamental	No fundamental
Aparente	S_e (VA)	S_{e1} S_{e1}^+ S_{e1U}	S_{eN} S_{eH} (VA)
Activa	P (W)	P_1^+ (W)	P_H (W)
No Activa	N (var)	Q_1^+ (var)	D_{e1} D_{eN} D_{eH} (var)
Utilización de la línea	$P_F = P/S_e$	$P_{F1} = P_1^+/S_{e1}^+$	-
Polución armónica	-	-	S_{eN}/S_{e1}
No balance de la carga	-	S_{e1U}/S_{e1}^+	-

(S_{e1}) Potencia aparente efectiva de la componente fundamental: Es la componente de la potencia aparente efectiva debida a la frecuencia fundamental.

(S_{e1}^+) Potencia aparente efectiva fundamental de secuencia positiva: Es la componente de la potencia aparente efectiva debida a la frecuencia fundamental de secuencia positiva.

(P_1^+) Potencia activa fundamental de secuencia positiva.

(Q_1^+) Potencia reactiva fundamental de secuencia positiva

(S_{e1U}) Potencia aparente efectiva fundamental debida al desbalance: Parte de la potencia fundamental debida al desbalance presente en la carga trifásica

(S_{eN}) *Potencia aparente efectiva no fundamental:* Parte de la potencia producida por las componentes armónicas de las señales de tensión y corriente.

(D_{eI}) *Potencia aparente efectiva de distorsión de corriente:* Identifica la potencia aparente efectiva no fundamental, debida a la distorsión de la señal de corriente.

(D_{eV}) *Potencia aparente efectiva de distorsión de tensión:* Es la potencia aparente efectiva no fundamental, debida a la distorsión de la señal de tensión.

(S_{eH}) *Potencia aparente efectiva armónica:* Es la potencia aparente efectiva no fundamental, debida al producto de las distorsiones de las señales de tensión y corriente.

(P_H) *Potencia activa armónica:* Es la potencia activa debida a las componentes armónicas

(D_{eH}) *Potencia de distorsión armónica*

Entre los aspectos a resaltar de las definiciones de potencias propuestas en el IEEE-1459 se tienen los siguientes:

- La estimación propuesta permite discriminar las potencias causadas tanto por la componente fundamental como por las componentes armónicas.
- Establece un índice basado en las potencias aparentes del sistema que permite valorar el efecto de los armónicos en el sistema.
- El factor de potencia es una medida del grado de utilización del sistema (eficiencia del mismo).
- La potencia aparente efectiva es única, con lo cual desaparece la ambigüedad del modelo basado en la propuesta de Budeanu de dos potencias aparentes. Debido a esto se define un único factor de potencia en sistemas trifásicos.
- Establece un índice basado en las potencias aparentes de la componente fundamental para valorar el no balance de la carga trifásica.
- La evaluación de la potencia no activa se obtiene a partir de la potencia aparente efectiva y la potencia activa total.

Es importante tener en cuenta que esta propuesta elimina los mitos que hasta ahora existen en la medición de potencia y energía eléctrica, ya que la obtención de las potencias reactiva y aparente rompe con todas las definiciones que hasta ahora se han utilizado, las cuales presentan dificultades para estimar adecuadamente la potencia en diferentes situaciones que se pueden presentar en el funcionamiento de los sistemas eléctricos.

Sin embargo, este estándar presenta el inconveniente de no discriminar si los usuarios son generadores o sumideros de componentes armónicos [6], lo cual puede ser un problema al momento de facturar, si se interpone algún tipo de penalidad producto de estas distorsiones.

5. DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE MEDICIÓN DIGITAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADO EN EL ESTÁNDAR IEEE 1459

En la actualidad, gran parte de los medidores digitales de energía eléctrica utilizan algoritmos de estimación de potencia reactiva que se basan en los procesos de medición de reactiva utilizados por los medidores de inducción, desaprovechando que una vez se tienen las muestras de tensión y corriente digitalizadas se pueden utilizar algoritmos que tengan en cuenta todos los efectos del sistema de suministro y del tipo de carga [10].

Por ello se han desarrollado prototipos que aprovechan el potencial de los sistemas digitales, para lo cual se utilizan procesadores de señales digitales (DSPs), los cuales tienen: una gran capacidad de cómputo, múltiples funciones y un costo relativamente bajo; además de contar con una programación sencilla que permite disminuir los tiempos de desarrollo.

Dentro de estos equipos, la implementación de algoritmos que evalúen las potencias de energía eléctrica de acuerdo con las definiciones propuestas por el estándar IEEE-1459, cobran gran relevancia debido a que no requieren un elevado número de operaciones como otras definiciones; reducen la incertidumbre en la estimación de estos parámetros; y los algoritmos utilizados no son complejos, lo que permite su comprensión; factor importante para que una medición sea aceptada y utilizada adecuadamente.

Otro aspecto importante es el avance vertiginoso de las tecnologías de las comunicaciones, que ha permitido la interconectividad de los sistemas, fenómeno al cual el

sector eléctrico no ha sido ajeno, en particular, en lo referente a la medición de potencia y energía eléctrica. Teniendo en cuenta lo anterior, los grupos GISEL y CEMOS de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander decidieron desarrollar un prototipo de un medidor digital de energía eléctrica basado en el estándar IEEE 1459, que se encuentra en su etapa final de ajustes y pruebas para posteriormente someterlo a un proceso de calibración en un laboratorio acreditado.

Este prototipo permite disponer de un equipo para realizar pruebas en diferentes escenarios de sistemas trifásicos con el propósito de evaluar los beneficios y problemas involucrados con la implementación del estándar IEEE-1459, para fines de facturación, y con ello aportar datos experimentales en la discusión que se está dando en cuanto a reglamentación y normalización de la medición de energía en las condiciones actuales de los sistemas eléctricos, la cual debe considerar la nueva naturaleza de las cargas conectadas al sistema y a partir de esto determinar los factores que afectan los procesos de medición, en especial los relacionados con las energías reactiva y aparente.

Adicionalmente se dispondrá de una plataforma desde la cual se pueden hacer desarrollos futuros en el área de facturación remota y utilización de la información recopilada por una buena cantidad de medidores conectados en red. Para lograr esto, el prototipo tiene un sistema de comunicación que permite el envío de los datos generados por él a un sistema de medición automática AMR, con todas las posibles aplicaciones que este tipo de sistemas genera.

En países como Colombia, hasta ahora se empieza a ver un avance hacia la recolección remota de informaciones de consumo en servicios públicos de usuarios finales, impulsado principalmente por el intento de controlar el no pago de la energía eléctrica consumida, que tanto afecta las finanzas de las empresas del sector eléctrico, especialmente las encargadas de la distribución de la energía eléctrica. La medición digital y el conjunto de utilidades que se pueden realizar con ella, surgen como una solución a esta problemática, pero también puede llegar a ofrecer una muy amplia gama de servicios, los cuales la hacen no sólo una opción atractiva para las empresas del sector eléctrico, sino prácticamente una necesidad para anteponerse a los retos que presenta el futuro.

6. CONCLUSIONES

En un mundo que exige cada vez mayor control en la calidad de los productos, es importante que el sector eléctrico brinde medidas de energía eléctrica que sean confiables, ya que los actuales medidores de disco (contadores) no están diseñados para operar bajo condiciones diferentes a las sinusoidales puras y balanceadas; lo que plantea un desafío importante para los medidores digitales, que deberán ofrecer lecturas que se ajusten a las condiciones actuales de las redes. La medición de potencia y energía en sistemas eléctricos es fundamental, ya que a partir de ella se establecen la mayoría de las transacciones comerciales entre los diferentes agentes del sector eléctrico. Por esta razón, este proceso debe realizarse de una manera adecuada para que genere confianza entre todos los encargados de la generación, transmisión distribución y comercialización de la energía eléctrica.

La reglamentación relacionada con la medición de energía debe considerar la nueva naturaleza de las cargas conectadas al sistema y a partir de esto determinar los factores que afectan los procesos de medición, en especial los relacionados con las energías reactiva y aparente.

Una antigua tradición que se debe eliminar de los procesos de medición es la de considerar que las potencias en sistemas trifásicos se pueden estimar como la suma de las potencias de tres sistemas monofásicos independientes. Lo anterior es válido para la estimación de la potencia activa, pero para las demás potencias sólo se cumple si el sistema trifásico presenta tensión de suministro simétrica y cargas balanceadas.

Otros factores a reconsiderar, son los algoritmos de estimación de potencia y energía reactiva utilizados por algunos medidores digitales, los cuales se basan en los procesos de medición de reactiva utilizados por los medidores de inducción, desaprovechando que una vez se tienen las muestras de tensión y corriente se pueden utilizar algoritmos que tengan en cuenta todos los efectos del sistema de suministro y del tipo de carga, que originan incrementos en la potencia aparente del sistema.

En el futuro, las nuevas estrategias de medición deben permitir establecer la responsabilidad de cada usuario en la generación de armónicos mediante el registro de la potencia activa no fundamental, la cual puede ser tenida en cuenta como un componente adicional dentro de la tarifa, con el fin de promover el mejoramiento de la calidad de la energía eléctrica entre los usuarios del sistema.

Para evitar que se generen nuevos errores en la estimación de la potencia reactiva y de dimensionamiento se debería establecer que sin importar el número de hilos del sistema trifásico, siempre se debe evaluar la energía conectando los tres elementos de tensión y los tres elementos de corriente del equipo de medición digital.

Se ha desarrollado un medidor digital de energía eléctrica basado en el estándar IEEE 1459, que permite desarrollar investigaciones para determinar las ventajas y desventajas de este estándar en condiciones reales de operación.

Finalmente, es necesario trabajar en el desarrollo de aplicaciones para aprovechar los sistemas de recolección de datos de forma automática AMR, con el fin de aprovechar las utilidades aportan esta herramienta a las empresas prestadoras de servicio y que le permitan alcanzar los niveles de calidad y competencia que exigen los usuarios y el mercado.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Vicerrectoría de Investigaciones y a la División de Investigación y Extensión de la Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas de la Universidad Industrial de Santander por el apoyo económico suministrado para la realización del proyecto de investigación: Diseño e implementación de un prototipo de contador trifásico de energía eléctrica utilizando procesadores digitales de señales (DSPs).

8. REFERENCIAS

- [1] Stanley, W. Jr, «Phenomenon of retardation in the induction coil,» *AIEE Trans*, vol. V, no. 4, Enero de 1888.
- [2] Budeanu, C. I., *Reactive and Fictive Powers (in French)*, s.l. : I.R.E. (National Romanian Institute), 1927.
- [3] Castillo, Alexis, Carvajal, William y Plata, Gabriel, «Comportamiento de los contadores de energía activa monofásica tipo inducción en presencia de ondas de tensión y corriente con componentes armónicas,» *5º Simposio regional de mejoramiento empresarial CIDET*, 1999.
- [4] Filipski, P. S., Baghzous, Y. y Cox, M. D., «Discussion of power definitions contained in the IEEE Dictionary,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 3, págs. 1237-1244, Julio de 1994.
- [5] Arseneau, R., «Application of IEEE standard 1459-2000 for revenue meters,» *Power Engineering Society General Meeting*, vol. 1, págs. 87 - 91, 13-17 de julio de 2003.

- [6] Hughes, M. B., «Electric power measurements a utility's perspective,» *Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, págs. 1680-1681, 21-25 de Julio de 2002.
- [7] Quintero, Oscar y Gámez, Edward, *Contadores de estado sólido y digitales: Análisis de los algoritmos de medición de energía e índices de calidad de onda que se pueden evaluar*, UIS, s.l. : Director: Gabriel Ordóñez Plata., 2000. proyecto de grado.
- [8] EDISON ELECTRIC INSTITUTE, *Handbook for Electricity Metering*, Décima Edición, s.l. : Edison Electric Institute, 2002.
- [9] Ordóñez, Gabriel y Duarte, Cesar, «Mitos y realidades en la medición de potencia y energía eléctrica,» *Tercer Simposio Internacional de la Calidad de la Energía Eléctrica, SICEL*, 2005.
- [10] Ordóñez, Gabriel, Duarte, Cesar y Bautista, Adan, «Análisis de la medición de potencia y energía eléctrica teniendo en cuenta las características de la carga y la conexión de los medidores digitales,» *Congreso del Área Andina – IEEE 2006*, 2006.
- [11] Bautista, Adan, Ordóñez Plata, Gabriel y Duarte Gualdrón, César Antonio, «Impacto de los sistemas de medición en la valoración de la potencia y energía eléctrica,» *Simposio Internacional Sobre Calidad de la Energía Eléctrica SICEL-2007*, 19-22 de Noviembre de 2007.
- [12] IEEE, «IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions,» 2000.
- [13] De León, Francisco y Cohen, José, 2002. Reunión de verano del capítulo de potencia del IEEE sección México,
- [14] Emanuel, A. E., «IEEE standard 1459: questions and future direction - quo vadis?» *Power Engineering Society General Meeting*, vol. 1, pág. 86, 13-17 de julio de 2003.
- [15] Pretorius, J. H. C., van Wyk, J .D. y Swart, P., «An Evaluation of some Alternative Methods of Power Resolutions in a Large Industrial Plant,» *Proceedings of the Eighths International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP- VIII)*. vol. I, pág. 331, Oct de 1998.
- [16] Emanuel, A. E., «Summary of IEEE Standard 1459: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions,» *IEEE Transactions On Industry Application*, vol. 40, no. 3, págs. 869–876, Mayo/Junio de 2004.
- [17] Stanley, W. Jr, «Phenomenon of retardation in the induction coil,» *AIEE Trans*, vol. V, no. 4, Jan. de 1888.
- [18] Czarnecki, Leszek S., «Orthogonal decomposition

of the current in a 3-phase nonlinear asymmetrical circuit with a nonsinusoidal voltage source,» *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 37, no. 1, págs. 30-34, marzo de 1988.

- [19] Pérez, W. A., Quiroga, J. M. y Romero, O. F., *Diseño e implementación de un prototipo de contador de energía trifásico utilizando un procesador de señales digitales (DSP)*, UIS, s.l. : Director: G. Ordóñez Plata., 2006. Tesis de grado.