

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Tecnura

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/issue/view/650>DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.SE1.a03>

INVESTIGACIÓN

Estudio experimental de potencias, factor de potencia y energía eléctrica en cargas industriales tomando como referencia la norma IEEE Std 1459-2010

Experimental study of powers, power factor and energy in industrial loads by reference to IEEE STD 1459-2010

Alexander Daza Urrego¹, Clara Inés Buriticá Arboleda², Yaqueline Garzón Rodríguez³

Fecha de recepción: 15 de febrero de 2015

Fecha de aceptación: 18 de agosto de 2015

Cómo citar: Daza Urrego, A., Buriticá Arboleda, C. I., & Garzón Rodríguez, Y. (2015). Estudio experimental de potencias, factor de potencia y energía eléctrica en cargas industriales tomando como referencia la norma IEEE Std 1459-2010. *Revista Tecnura*, 19, 41-54. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.SE1.a03

Resumen

Las potencias eléctricas y factor de potencia (FP) son variables eléctricas que inciden a nivel industrial en el cálculo del costo de la energía eléctrica consumida; para su obtención generalmente se utilizan medidores digitales o analizadores de calidad (PQA) que emplean diferentes algoritmos o metodologías para el cálculo de la energía eléctrica, encontrándose diferencias importantes al comparar los registros obtenidos para cada una de las variables medidas. El presente artículo realiza un estudio experimental para obtener las variables eléctricas a partir de lo estipulado en la metodología señalada por norma IEEE Std 1459-2010, que se toma como referente para comparar valores para potencia reactiva que varían hasta un 40% y potencia aparente y factor de potencia hasta un 20%. Error que se atribuye a que algunos equipos de medida digitales no analizan el sistema trifásico como único y real sino como la suma de tres sistemas independientes e ideales.

Palabras Clave: Potencia eléctrica, error, cargas industriales, factor de potencia, PQA.

Abstract

Electric power and power factor (PF) are electric variables affecting industrial level for the calculation of the cost of electricity consumed; generally for its securing digital meters or quality analyzers (PQA) are generally used, applying different algorithms or methodologies for calculating electric power, finding significant differences when comparing the obtained records to each of the measured variables. This article takes an experimental study for electrical variables from the provisions of the methodology outlined by IEEE Std 1459-2010, which is taken as a reference to compare values for reactive power ranging up to 40% and apparent power factor to 20%. Error attributed to the fact that some digital equipment do not analyze the measurement phase as the only and real system, but as the sum of three independent and ideal systems.

Keywords: Electric Power, miscalculation, industrial loads, Power Factor, PQA.

¹ Tecnólogo en Electricidad, especialista en redes eléctricas. Egresado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: adazau@correo.udistrital.edu.co

² Ingeniera electricista, doctora Universidad Politécnica de Valencia Gestión Eficiente de la Energía Eléctrica. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: ciburiticaa@udistrital.edu.co

³ Ingeniera en Distribución y Redes Eléctricas; maestría en ciencias de información y comunicaciones, docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: ygarzonr@udistrital.edu.co

INTRODUCCIÓN

La medición de la energía eléctrica es una tarea del proceso de distribución de energía, actividad que involucra parámetros eléctricos tan importantes como potencia activa (P), potencia reactiva (Q), potencia aparente (S) y el factor de potencia (FP); variables que inciden en el cálculo del costo de la energía eléctrica consumida para fines comerciales.

De acuerdo con esto se han venido desarrollando equipos con diferentes funciones que permiten obtener el cálculo de estos parámetros y brindar mayor información en cuanto a estos tanto para el cliente como para las empresas prestadoras del servicio, pero existe un interrogante al respecto: ¿cómo o bajo qué normatividad se hace la determinación de estos parámetros?

Adicionalmente los sistemas eléctricos reales cuentan con cargas no lineales que a pesar de ser alimentadas con un voltaje sinusoidal absorben una corriente no sinusoidal originando distorsiones armónicas que tienen efectos en la vida útil de los equipos industriales, y que también pueden afectar las mediciones arrojadas por los equipos de medida.

Otro aspecto que tiene relevancia en la medición de potencia y en dichos equipos es la metodología empleada para la obtención de potencias totales ya que se analiza el sistema trifásico como tres sistemas monofásicos, olvidándose que es un sistema único, tanto en su operación como en su funcionamiento.

De acuerdo con lo anterior se propone un estudio experimental tomando como referencia la metodología descrita en la norma IEEE Std 1459-2010

y en esta forma tener un referente teórico para el cálculo de los parámetros eléctricos objeto de esta investigación, ya que en cuanto a los analizadores de calidad (PQA) no es muy clara la forma que utilizan para el cálculo de los mismos.

Para lo anterior se contactan las empresas DISICO S.A. y el Centro Nacional de Aeronavegación (CNA), en las cuales se permite el acceso con una limitante y es que solo en la segunda empresa se contaba con un PQA propio. Como resultado de este estudio se obtienen diferencias porcentuales importantes en parámetros eléctricos como Q, S y FP; además en estas empresas se evidencia la presencia de cargas con niveles de distorsión armónica de tensión y corriente elevados, es decir, superior al recomendado que los usuarios puedan inyectar al sistema, (IEEE Std 519, 2014).

METODOLOGÍA

Preliminares

Sistema de medida

Los equipos de medida utilizados en cada una de las empresas mencionadas están relacionados en la tabla 1.

Los equipos en referencia fueron seleccionados a partir del siguiente criterio:

- PQA: de manejan aspectos importantes de los cuales se destacan dos: el primero, que en sus especificaciones técnicas sea catalogado como equipo de clase A para mediciones de variables eléctricas, y segundo, la posibilidad de poder acceder a los mismos debido a que por ser de alta gama no se permite su manipulación a cualquier personal.

Tabla 1. Relación de los equipos de medida en la empresa DISICO S.A. y en la CNA.

	DISICO S.A.	CNA
Analizador	PQA Fluke 434 (equipo alquilado)	PQA HIOKI 3196 (equipo de la empresa)
Osciloscopio	RIGOL DS11002E	RIGOL DS11002E

Fuente: Autores.

- Osciloscopio: de modo similar se evidenciaron dos aspectos: primero, se necesita un equipo que maneje un amplio ancho de banda para poder analizar los armónicos a distintos niveles de frecuencia, y la segunda, el acceso a la captura en un formato compatible con Excel; software mediante el cual se efectúa el cálculo y análisis de los mismos.

Durante el proceso de diseño de este sistema de medida se deben cumplir durante las mediciones ciertas condiciones que garanticen un consolidado de datos óptimo para su posterior análisis; estas se mencionan a continuación:

- Identificación del comportamiento de la carga en períodos en los cuales no presenta mayores cambios de magnitud en cuanto a la energía consumida, para garantizar, en el momento de manipular el equipo de medida en cada una de las fases, un error aleatorio (NTC 2194) menos significativo.

Garantizar un punto de referencia flotante al osciloscopio para evitar interferencias mediante la implementación de una UPS para la alimentación del equipo en modo batería (otra fuente), y así no ver reflejado el consumo del osciloscopio al conectarlo a la red de la cual se alimenta la carga.

- Captura de datos con una periodicidad de 15 minutos por registro, ya que es el tiempo estimado para efectuar las respectivas mediciones en cada una de las fases siguiendo los respectivos procedimientos de seguridad establecidos por el departamento de salud ocupacional (SO) en cada una de las empresas sometidas a medición.

Con las condiciones mencionadas previamente, se presenta el diseño del sistema de medida implementado en la figura 1, en el cual se contempla el registro de las señales de tensión $v(t)$ y corriente $i(t)$ capturadas por el osciloscopio y de manera simultánea, el registro de datos del PQA.

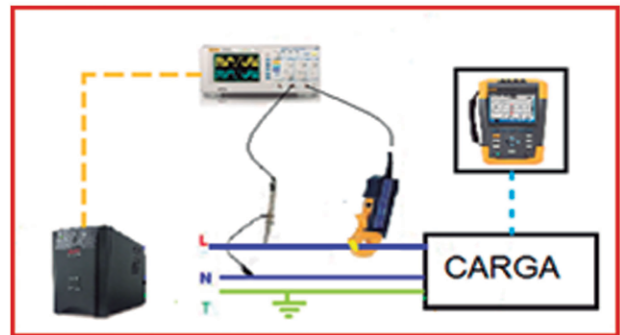


Figura 1. Sistema de medida implementado durante las mediciones de las cargas industriales.

Fuente: elaboración propia.

En vista de que en los PQA disponibles para realizar los registros en las dos empresas en mención se desconoce dentro de su metodología de cálculo de variables eléctricas que se realice según lo establecido en la Norma IEEE Std 1459-2010, objeto de estudio fundamental de este trabajo, se hace necesario tomar como valor de referencia (concepto apropiado de la NTC 2194) aquellos basados en los datos reconstruidos mediante la serie de Fourier a partir de los datos instantáneos obtenidos por el osciloscopio, para obtener los cálculos de P , Q , S y FP basados en la norma IEEE en mención. Además para asegurar una correcta medición de distorsión armónica estas mediciones se deben hacer en el punto en donde el usuario se conecta a la red pública; dicho punto recibe el nombre de punto de acople común (IEEE Std 519, 2014).

Análisis del error aleatorio en cada uno de los tiempos de barrido disponibles en el osciloscopio RIGOL DS1102E.

Dentro de la investigación efectuada por Galvis Otálora y Sandoval Macías (2010), se resalta una metodología para calcular el error existente en cada uno de los tiempos de barrido disponibles en el osciloscopio, por lo cual se implementa ya que para realizar la reconstrucción de las señales de

tensión y corriente mediante la serie trigonométrica de Fourier esto es fundamental.

Implementando el sistema de medida señalado en la figura 1, se capturan los datos para los diferentes tiempos de barrido disponibles en el equipo, los cuales se pueden apreciar en la tabla 2.

Una vez obtenidos los datos se procede a calcular, basados en la norma, la potencia activa (P) a partir de las señales capturadas. Esta potencia se confronta con la registrada con el analizador durante su conexión simultánea. *“Es muy importante aclarar en este punto que previo a realizar las mediciones en esta carga, se determina que maneja un comportamiento constante (Entiéndase como comportamiento constante a la poca variabilidad de Potencia Activa en el transcurso del tiempo de registro)”*.

Para hacer dicha comparación, se tiene presente la necesidad de efectuar el cálculo del error relativo, el cual se expresa en la ecuación (1), en la que se relaciona como V_M el valor medido y V_V como un valor convencionalmente verdadero en magnitud.

En este punto se hace la siguiente aclaración; según (NTC 2194) los valores verdaderos son por naturaleza indeterminados y por eso se les asigna

la denominación de *valor convencionalmente verdadero*, ya que son poseedores de una incertidumbre adecuada para un propósito dado y se suele utilizar este término cuando se presenta un gran número de resultados de mediciones para establecer dicho valor.

$$E_R = \frac{V_M - V_V}{V_V} \quad (1)$$

En ese orden de ideas, el valor medido se considera como el registro tomado del PQA y como un valor convencionalmente verdadero en magnitud, el obtenido matemáticamente a partir de la construcción de la serie trigonométrica de Fourier. Una vez calculado dicho error o diferencia porcentual se obtiene para cada tiempo de barrido el valor correspondiente para este parámetro, y se contrastan en la tabla 3.

A fin de definir el tiempo de barrido más apropiado para trabajar un error menos significativo, se implementa la interpolación de LaGrange (Galvis Otálora & Sandoval Macias, 2010) para comparar las diferencias porcentuales que se presentan en cada una de los cuatro tiempos disponibles.

Tabla 2. Tiempos de barrido disponibles en el osciloscopio RIGOL DS1102E.

Osciloscopio RIGOL DS1102E		
Frecuencia de muestreo	Tiempos de barrido	Tiempo de muestreo
3.9×10^{-05}	2 [ms]	419 datos
9.9×10^{-05}	5 [ms]	165 datos
2.0×10^{-04}	10 [ms]	83 datos
3.8×10^{-04}	20 [ms]	43 datos

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Error relativo obtenido para cada tiempo de barrido.

Tiempos de barrido [s]	Potencia eléctrica trifásica [W]	Potencia eléctrica PQA [W]	Error relativo [%]
3.9×10^{-05}	26573,89	25800	2,91%
9.9×10^{-05}	25652,56	25800	0,57%
2.0×10^{-04}	26547,76	25800	2,82%
3.8×10^{-04}	30765,97	25800	16,14%

Fuente: elaboración propia.

En la figura 2 se puede apreciar el comportamiento del error relativo una vez efectuada dicha interpolación matemática. Se observa que el error por redondeo y por truncamiento alcanza sus máximas expresiones al implementar un tiempo de barrido de 2, 10 y 20 [ms], lo que permite afianzar que el más apropiado para el registro de datos y posterior estudio matemático mediante series de Fourier es el de 5 [ms].

Mediciones

A partir del montaje presentado como sistema de medida en la Figura 1, se realiza la captura de datos de cada uno de los analizadores y los registros instantáneos del osciloscopio para cada una de las cargas industriales. En la empresa DISICO S.A. se instaló durante 3 días el analizador de calidad de potencia PQA FLUKE 434/PWR, configurado previamente para hacer un registro de datos seleccionando un tiempo de barrido de 5 minutos, el menor disponible. En la empresa CNA se instala durante 1 día el analizador de calidad de potencia

PQA HIOKI 3196, configurado previamente para capturar datos a un tiempo de barrido de 1 segundo (por disposición del equipo).

El tiempo de medición establecido para cada una de las empresas es suficiente para los objetivos de la investigación, ya que el proyecto se remite a efectuar una comparación de un referente teórico obtenido de los cálculos de P, Q, S y FP referenciados en la norma IEEE 1459-2010 y los datos obtenidos para los mismos mediante cada uno de los PQA.

RESULTADOS

Una vez obtenidos los datos tanto del analizador como del osciloscopio se consolida la siguiente información:

Resultados obtenidos, empresa DISICO S.A.

Para la empresa referenciada en la tabla 4 se relacionan los intervalos de tiempo de los días seleccionados.

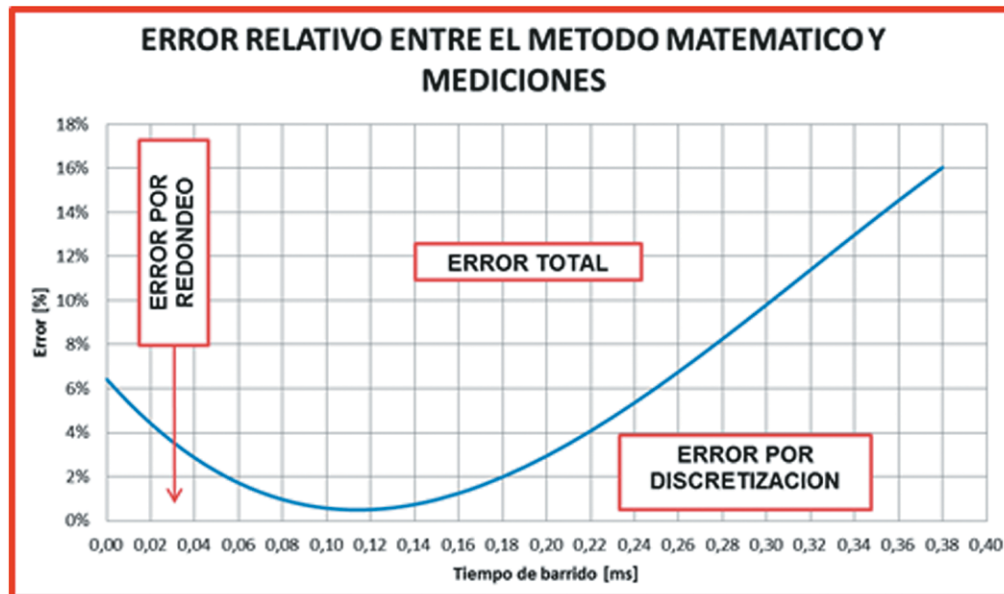


Figura 2. Comportamiento de error relativo vs. tiempo de barrido.

Fuente: elaboración propia.

Las magnitudes de las variables obtenidas a partir de los registros instantáneos del osciloscopio fueron sometidas a tres diferentes métodos de integración numérica: RIEMMAN, SIMPSON y TRAPECIO, sumándose a esto la participación de las fórmulas matemáticas citadas en la norma (IEEE Std 1459, 2010) para señales no sinusoidales con distorsión armónica para el cálculo de las potencias eléctricas y FP. Esta información se relaciona en las tablas 5 y 6 respectivamente.

Como se evidencia en la tabla 6, el valor obtenido para el FP aplicando los distintos métodos de integración numérica no difieren en la mayoría de los casos. Se aprecia que el comportamiento del FP evidenciado tiene una magnitud que no

dista mucho una de la otra, excepto para el día jueves, día que fue atípico en la empresa, por lo cual no se considera dentro de las mediciones estimativas.

Así mismo, los valores registrados para las distintas variables eléctricas por el PQA FLUKE 434 para los días martes, miércoles y viernes se relacionan en la tabla 7.

Una vez efectuadas dichas mediciones, se procede a hacer una comparación de las magnitudes obtenidas calculando su respectiva diferencia porcentual o error relativo a partir de la ecuación (1), para cada variable eléctrica obtenida aplicando los métodos de integración numérica y el registro obtenido por el analizador. En este comparativo se

Tabla 4. Intervalos de tiempo de medición, DISICO S.A.

PQA FLUKE 434 – DISICO S.A.			
Fecha de medición	Tiempo de inicio	Tiempo de finalización	Potencia promedio
12/11/13	18:21:56	18:51:56	255.54 W
13/11/13	12:21:56	13:11:56	520 W
15/11/13	8:56:56	9:06:56	906.67 W

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Potencia activa y reactiva calculada a partir de los valores instantáneos del osciloscopio RIGOL DS1102E.

Variable eléctrica/día	Potencia reactiva Q [VAR]			Potencia aparente S [VAR]		
	Martes	Miércoles	Viernes	Martes	Miércoles	Viernes
Riemman	260.27	488.24	799.46	362.5	726.85	1214.25
Simpson	257.26	478.59	796.51	357.49	713.88	1193.61
Trapecios	257.46	481.78	790.59	357.42	713.88	1193.15

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Factor de potencia calculado a partir de los valores instantáneos del osciloscopio RIGOL DS1102E.

Variable eléctrica/día	Factor de potencia FP		
	Martes	Miércoles	Viernes
Riemman	0.7	0.74	0.75
Simpson	0.69	0.74	0.74
Trapecios	0.7	0.74	0.75

Fuente: elaboración propia.

puede apreciar la potencia activa, reactiva, aparente y FP en las tablas 8 y 9, respectivamente.

Los errores calculados para cada una de las potencias y FP muestran un patrón de comportamiento similar en el momento de entrar a comparar los valores entre cada uno de los métodos de integración numérica, entre los cuales se resalta el método de Simpson por sus bajos índices de error, lo cual lo hace una metodología confiable en el momento de hacer este tipo de estudios comparativos.

Un rango práctico en distorsiones de tensión en los sistemas de potencias es inferior a 10%; sin embargo, para niveles de distorsión de corriente reales, es decir, que contemplen cargas no lineales, sus valores son más altos y existe una diferencia

significativa, en algunos casos superior a 140% (según Ramírez y Cano, 2003).

Los niveles de THD_v inferiores a 8% se consideran un rango práctico para las distorsiones de tensión en sistemas de potencia (IEEE Std 519, 2014). Los sistemas de potencia con tensiones inferiores a 1 Kv pueden tener hasta 8% de THD_v normalizado (IEEE Std 519, 2014).

Para el día martes en la empresa DISICO los niveles de THD_v y de THD_i obtenidos mediante la ecuación (2), según (Rodríguez Barrera, 2011) en donde: F_h es la componente armónica de tensión o de corriente, h es el número de armónico y F_f es la componente fundamental de tensión o de corriente.

Tabla 7. Resultados para los días martes, miércoles y viernes del PQA FLUKE 434.

PQA FLUKE 434		Martes	Miércoles	Viernes
Potencia activa	P [W]	255.54	520	312.38
Potencia reactiva	Q [VAR]	179.05	-346.67	621.33
Potencia aparente	S [VA]	312.38	621.33	1196.17
FP	Adim.	0.67	0.77	0.73

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Error relativo de potencia activa y reactiva obtenido (analizador vs. osciloscopio).

Variable eléctrica/día	Potencia activa P [%]			Potencia reactiva Q [%]		
	Martes	Miércoles	Viernes	Martes	Miércoles	Viernes
Riemman	1%	3%	3%	31%	29%	4%
Simpson	3%	2%	1%	30%	28%	3%
Trapecios	3%	2%	1%	30%	28%	2%

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Error relativo de potencia aparente y FP obtenido (analizador vs. osciloscopio).

Variable eléctrica/día	Potencia Aparente S [%]			Factor de Potencia FP		
	Martes	Miércoles	Viernes	Martes	Miércoles	Viernes
Riemman	14%	15%	1%	4%	4%	3%
Simpson	13%	13%	0%	3%	4%	1%
Trapecios	13%	13%	0%	4%	4%	3%

Fuente: elaboración propia.

$$THD_F = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} F_n^2}}{F_f} * 100\% \quad (2)$$

En la tabla 10 se presentan respectivamente los valores de THD_V y THD_I calculados a partir de los valores efectivos de corriente y de voltaje obtenidos mediante el método de integración numérica Simpson, por ser uno de los óptimos para el ajuste de señales no sinusoidales.

Tabla 10. Distorsión armónica de tensión (THD).

Variable eléctrica	THDv [%]	THDi [%]
THD	5%	15%

Fuente: elaboración propia.

Es importante aclarar que por efectos netamente de equipo resultó imposible poder registrar de manera simultánea los valores de THD de las señales en el PQA FLUKE 434; al no contar este con la opción de registrador se vio limitado el trabajo, pues no era posible hacer registros simultáneos de todas las variables eléctricas por someter a estudio, y por tanto no es posible realizar una comparación de los datos obtenidos por el PQA y los

calculados a partir de los registros obtenidos por el osciloscopio.

Un diagnóstico general del comportamiento de la carga durante un día normal de operación puede apreciarse en la figura 3. Allí se observa que la carga en ciertos ciclos del día no presenta mayores variaciones y permite hacer comparativos en pequeños intervalos de tiempo para efectos de este estudio experimental.

Observando los errores obtenidos en cada medición se puede establecer lo siguiente: los registros tomados bajo distintas condiciones de carga los días martes, miércoles y viernes, con la premisa de analizar ciclos constantes, muestran que el error muchas veces no logra ser superior a 10%, lo cual es un buen indicador para este primer estudio experimental de variables eléctricas. Pero se resalta, por otro lado, que la potencia reactiva generó valores de error por encima de 20% para los registros tomados el día miércoles.

- Respecto a los niveles de las diferencias porcentuales presentadas para la potencia reactiva, son normales cuando los equipos emplean diferentes metodologías de cálculo, como se puede ver en el estudio determinado por otros investigadores

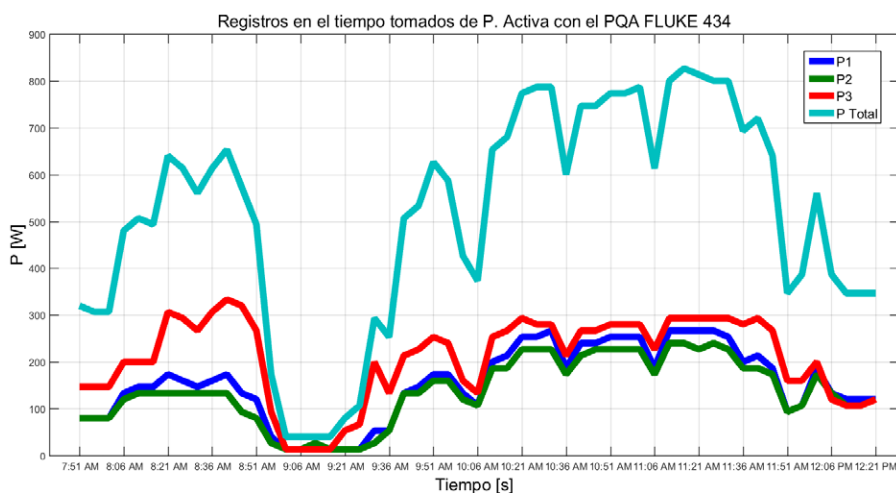


Figura 3. Registros en el tiempo tomados de P. activa con el PQA FLUKE 434.

Fuente: elaboración propia.

(Gabriel Ordóñez y Duarte Gualdrón, 2005) a diferencia de los resultados obtenidos para la potencia activa y aparente.

Resultados obtenidos, empresa CNA

Los tiempos establecidos para la empresa en referencia, de acuerdo con la medición de la carga con los equipos de medida se relacionan en la tabla 11.

Las magnitudes de las variables obtenidas a partir de los registros instantáneos del osciloscopio

igualmente fueron sometidas a los tres métodos de integración numérica ya mencionados y empleando las fórmulas matemáticas citadas en la Norma (IEEE Std 1459, 2010) para señales no sinusoidales con distorsión armónica, se calculan las potencias eléctricas, potencia activa y reactiva en las Tablas 12 y 13 potencia aparente y FP en la tabla 12.

Los valores registrados para las distintas variables eléctricas por el PQA HIOKI para el día viernes se relacionan en la tabla 14.

Tabla 11. Intervalos de tiempo de medición, CNA.

PQA HIOKI 3196 – CNA			
Fecha de medición	Tiempo de inicio	Tiempo de finalización	Potencia promedio
22/11/13	11:09:21	11:11:30	71402 W

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Potencia activa y reactiva calculadas a partir de los valores instantáneos del osciloscopio RIGOL DS1102E.

Variable eléctrica/día	Potencia activa P [W]			Potencia reactiva Q [VAR]		
	Riemman	Simpson	Trapecios	Riemman	Simpson	Trapecios
Viernes	70269.55	68026.83	68421.28	88191.04	86590.87	86412.33

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Potencia aparente y FP calculados a partir de los valores instantáneos del osciloscopio RIGOL DS1102E.

Variable eléctrica/día	Potencia aparente S [VA]			Factor de potencia		
	Riemman	Simpson	Trapecios	Riemman	Simpson	Trapecios
Viernes	53290.24	53575.45	52778.96	0.8	0.79	0.79

Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Resultados obtenidos el día viernes mediante PQA HIOKI 3196.

PQA HIOKI 3196			Viernes
Potencia activa	P	[W]	71401
Potencia reactiva	Q	[VAR]	87866
Potencia aparente	S	[VA]	51087
FP	Adim.	[Adim]	0.81

Fuente: elaboración propia.

Las mediciones para esta empresa al ser una carga especial que requiere alimentación constante y fija para las instalaciones del edificio, registró elevados valores de corriente, y así mismo los valores de potencia activa se elevaron de W a kW. De igual manera se emplea el método de integración numérica de Simpson, dado que hace la mejor aproximación.

Una vez efectuadas dichas mediciones, se procede a hacer una comparación de las magnitudes obtenidas calculando su respectiva diferencia porcentual o error relativo, empleando la ecuación (1) para cada variable eléctrica obtenida aplicando los métodos de integración numérica, frente al registro obtenido por el analizador. Este comparativo se puede apreciar en las figuras 4 y 5.

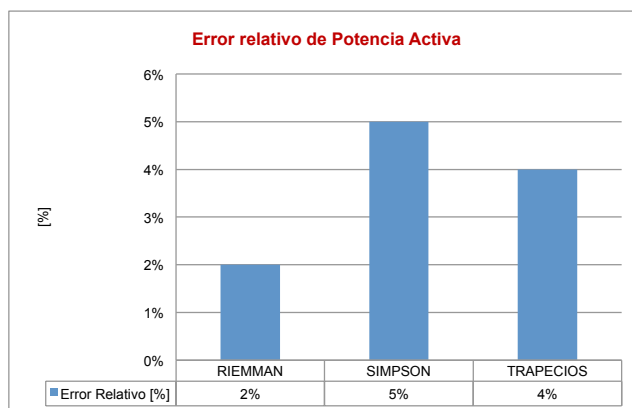


Figura 4. Error relativo de potencia activa y reactiva.

Fuente: elaboración propia.

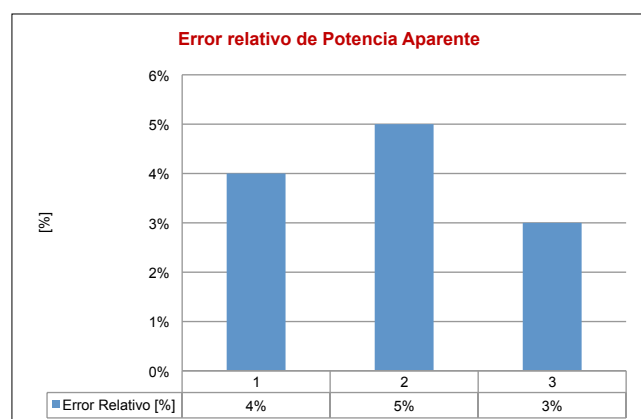
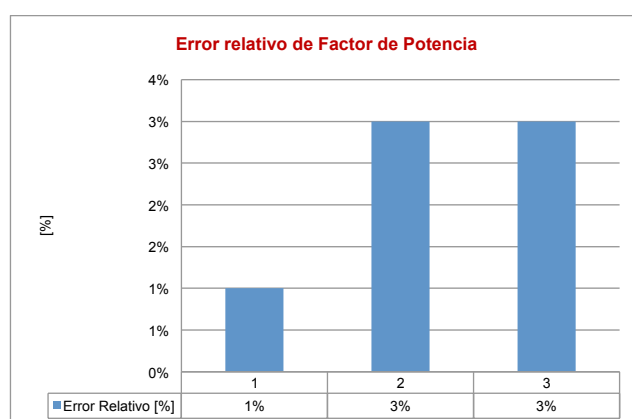


Figura 5. Error relativo de potencia aparente y FP.

Fuente: elaboración propia.



Respecto al THD registrado, se pudo capturar los registros tanto en el PQA como en el osciloscopio realizando el respectivo cálculo a partir de los datos en el marco de lo señalado en (IEEE Std 1459, 2010). En la tabla 15 se puede apreciar el comportamiento de la distorsión armónica para esta medición.

Tabla 15. Distorsión armónica de tensión (THDv) y de corriente (THDi).

Variable eléctrica	THD v	THD i
THD	2%	6%

Fuente: elaboración propia.

Con este analizador de calidad, al ser una condición especial en donde la carga presenta un consumo constante en la mayoría de sus registros, se toma solo un día de medición y con ella se observa que a nivel general las potencias tanto activa, reactiva, aparente y FP no alcanzan a registrar un error superior a 5%.

En la figura 6 se representan los valores de THD registrados por el PQA.

Así mismo en la figura 7 se evidencia el comportamiento de la carga durante la medición, notándose la poca variación que representa en el sistema al tratarse de una carga especial de alimentación constante.

Incertidumbre de medición

Según (NTC 2194) se define como: “Parámetro asociado con el resultado de una medición, que caracteriza a la dispersión de los valores que en forma razonable se le podría atribuir a la magnitud por medir”. Dicha caracterización se puede apreciar en la tabla 16.

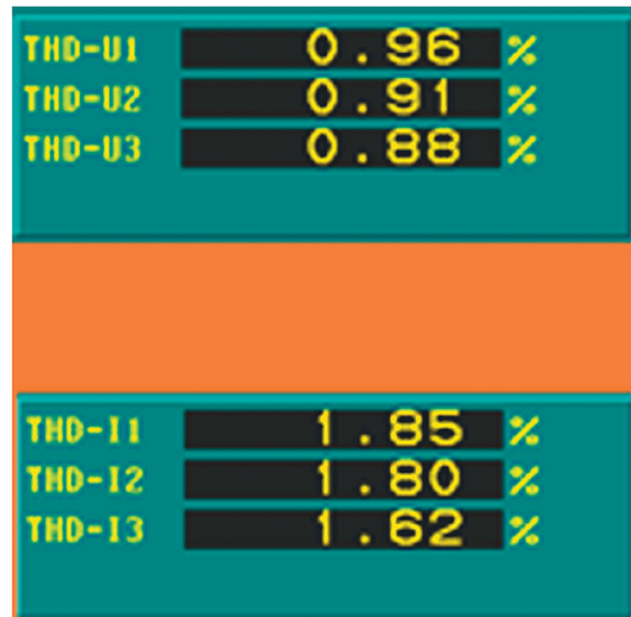


Figura 6. Distorsión armónica THD registrada con el PQA HIOKI 3196.

Fuente: elaboración propia.

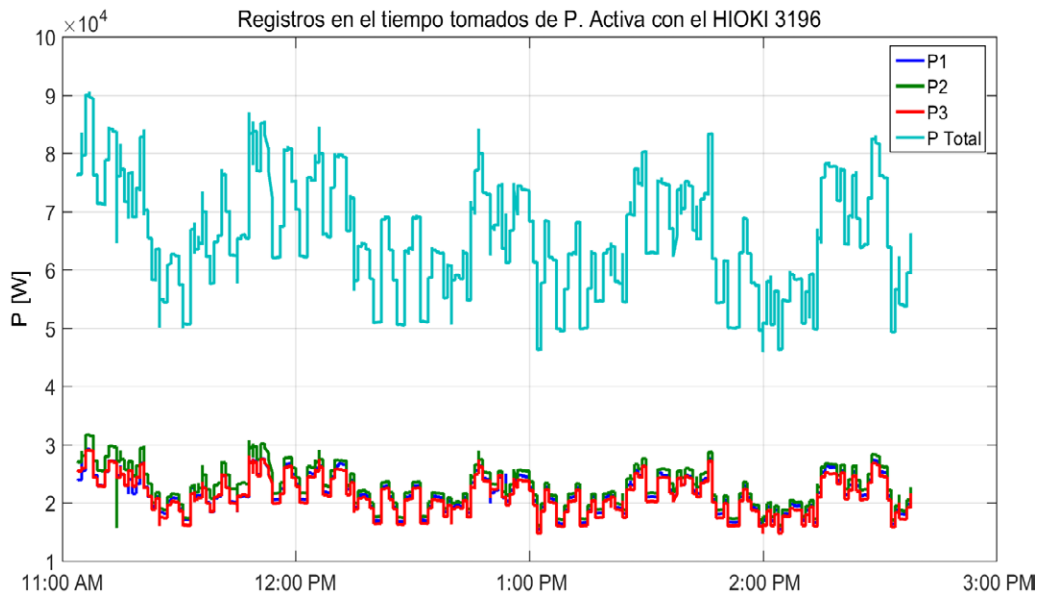


Figura 7. Registros en el tiempo tomados de P. activa con el PQA HIOKI 3196.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 16. Incertidumbre de medida.

PQA FLUKE 434		HIOKI 3196	
Tensión	Corriente	Tensión	Corriente
± 0.1% del Vn	± 0.5% ± 5 recuentos	± 0.3% de la Vn	± 0.5%
I430 Flexi – TF-II		Pinza 9660	
Corriente		Corriente	
± 1% de lectura		± 1% de lectura	

Fuente: elaboración propia.

Siguiendo con este criterio, se calcula a partir del método de diferencias finitas la incertidumbre general para cada una de las mediciones. En la ecuación (3) se señala la implementada para esta diferenciación.

$$\Delta_z = \frac{\partial f(X_0, Y_0)}{\partial X} \Delta_x + \frac{\partial f(X_0, Y_0)}{\partial Y} \Delta_y \quad (3)$$

ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE ANALIZADORES DE CALIDAD DE POTENCIA

A continuación se presenta la revisión técnico-económica de cuatro PQA utilizados a nivel comercial, en donde se puede apreciar el costo-beneficio al adquirir cada una de las marcas citadas brindando así un contexto más amplio y concreto a la persona interesada en adquirir uno de estos equipos.

En la Tabla 17 se relaciona el costo de cuatro PQA's reconocidos a nivel comercial, costo calculado a partir de indicadores económicos publicados en el diario el tiempo para el día 24 de noviembre de 2014.

Tabla 2. Costos comerciales de cuatro marcas de PQA de clase A.

Precios comerciales por referencia	
Equipo	Precio COP
FLUKE 435	COP 21.935.310
METREL MI2898	COP 13.804.000
HIOKI 3198	COP 22.270.434
DRANETZ DPB X108-400	COP 41.464.972

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

- Para obtener los datos del caso de estudio, es importante diseñar un sistema de medida, revisar previamente las especificaciones técnicas de los equipos por utilizar y la normatividad vigente a fin de no incurrir en errores significativos.
- El tiempo de barrido es fundamental para estudios como éste, en el que se hacen tratamientos de señales discretizadas ya que su influencia es definitiva para análisis requeridos.
- Se realiza la reconstrucción de las señales implementado Series de Fourier para obtener el parámetro eléctrico P y, por otra parte, aplicando interpolación de LaGrange para identificar el comportamiento del error a los tiempos de barridos disponibles en el osciloscopio; queda demostrado para este estudio en particular que el tiempo de barrido de 5 ms es el más apropiado para el tratamiento de señales discretas fundamentales.
- Durante el estudio comparativo de variables eléctricas se identifica el impacto de las mediciones confrontadas con el osciloscopio respecto a cada uno de los analizadores. En lo que respecta a la potencia reactiva se evidencia claramente con los registros capturados en DISICO S.A. una diferenciación de error alrededor de 30% los días martes y miércoles, respectivamente.
- El analizador HIOKI 3196 frente al PQA FLUKE 434 ofrece una interfaz gráfica y obtención de datos mucho más cómoda al poder adaptarse fácilmente a cualquier sistema operativo y sin perder la facilidad en el momento de poder

mostrar de manera práctica los resultados obtenidos en cada una de las mediciones. Esto va de la mano con la falta de actualizaciones en el PQA FLUKE 434 que posteriormente brinda el proveedor del equipo, lo cual limita en cierto modo la investigación.

- Se comprobó experimentalmente que el método de integración de Simpson es más efectivo en el momento de hacer una reconstrucción de una señal mediante el uso de series de Fourier, ya que en el momento de ser implementado, se garantiza un área con mayor cobertura al implementar el método de integración, lo cual va a garantizar un valor más acertado.
- En esta investigación se consolidan dos metodologías de trabajo para calcular el número de armónicos por aplicar a cada señal de corriente y tensión, y otra para calcular el Δt más adecuado para trabajar con el osciloscopio RIGOL DS1102E mitigando así al máximo los errores por redondeo y discretización.
- A nivel general, se encuentran analizadores de calidad de diferentes características y funcionalidades; por tanto, como parte de esta investigación se hace un estudio comparativo a nivel técnico y económico de 4 marcas principales utilizadas por la mayor parte de clientes.
- Para efectos de este estudio comparativo se resalta el impacto de la potencia reactiva a nivel industrial, ya que a falta de la compensación de reactivos en la industria se presentan efectos negativos como la pérdida de potencia dentro de las instalaciones, caídas de tensión bajo operaciones pico y una de las más importantes, elevados costos a nivel de facturación. Por tanto, una vez finalizado este estudio se recomienda a cada una de las empresas realizar una compensación de reactivos con el fin de poder mitigar dichos efectos, lo cual da paso a una nueva investigación para futuros proyectos de grado, en los cuales se da solución a esta problemática latente en estas dos cargas industriales.

REFERENCIAS

- Chapra, S., y Canale, R. (2007). *Métodos numéricos para Ingenieros*. México: McGraw Hill/Interamericana de México.
- Galvis Otálora, I., y Sandoval Macías, K. (2010). *Influencia del contenido armónico en un medidor electrónico de uso residencial monofásico de energía activa*. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 8.
- IEEE Std 1459 (2010). *Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions*. IEEE Std 1459 2010, 1-50.
- IEEE Std 519 (2014). *519-2014-IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. IEEE Std 519-1992, 1-112.
- Izar Landeta, J. M. (1998). *Elementos de métodos numéricos para ingeniería*. México:: Universidad Autónoma de San Luis de Potosí.
- NTC 2194, I. C. (s.f.) NTC 2194-Vocabulario de términos básicos y generales en metrología. 6-7.
- Ordóñez Plata, G. (2005). *Mitos y realidades en la medición de potencia y energía eléctrica*. III Simposio Internacional sobre Calidad de Energía Eléctrica SI-CEL 2005, 1-6.
- Quintana, P. (2005). *Métodos numéricos con aplicaciones en Excel*. México: Reverte Ediciones.
- Rodríguez Barrera, M. A. (2011). *Introducción a las medidas eléctricas*. Bogotá, D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Sadiku, M. (2010). *Elementos de electromagnetismo*. Madrid: Universidad Iberoamericana.
- Parra López, E. (2004.). *Análisis de armónicos en sistemas de distribución*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- León F., Cohen, J. (2000.). *Inconsistencias de las definiciones de potencia y factor de potencia en circuitos no lineales y/o desbalanceados. ¿Es la nueva norma IEEE 1459-2000 la solución?* Reunión de verano del capítulo de potencia del IEEE sección México, julio 2002.

Petit, J.F., Ustáriz, A. (2001). *Propuesta de factores de discriminación en regímenes no senoidales*. Séptimas Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica. *Handbook for Electricity Metering*, 10th Edition, Edison Electric Institute, 2002.

Emanuel. E. Summary of IEEE Standard 1459: Definitions for the Measurement of Electric Power

Quantities Under Sinusoidal, Non sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. *IEEE Transactions On Industry Application*, vol. 40, No. 3, pp. 869–876, May/June 2009.

