

# Validation of a Prototype of Three-Phase Energy Meter as Support for an Energy Audit

## Validación de un Prototipo de Medidor de Energía Trifásico como Apoyo para una Auditoría Energética

J. Chimarro<sup>1</sup> W. Quitiaquez<sup>1</sup> J. Valarezo<sup>2</sup> C. Melendrez<sup>2</sup> P. Quitiaquez<sup>1</sup>  
F. Toapanta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador

E-mail: jchimarroa@est.ups.edu.ec; wquitiaquez@ups.edu.ec; rquitiaquez@ups.edu.ec; ltoapanta@ups.edu.ec

<sup>2</sup>Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

E-mail:, john.valarezo@epn.edu.ec, cesar.melendrez@epn.edu.ec

### Abstract

The increase in companies and the incessant productive growth of the different economic sectors have increased programs that contribute to the sustainable consumption of electrical energy, all to foster a culture of savings.

The use of standardized and calibrated tools is essential, with a constant monitoring of the various electrical parameters of the industry can be done.

The prototype has a STM32F7 as a microcontroller system for digital signal processing in real time, as well as the choice of voltage and current sensors for its correct functionality.

The prototype can rival with commercials meters since its range error in tests is minimal, being thus an average error that does not exceed 10 %.

With the results obtained, we conclude that the prototype is applicable, this being a viable and economical option for an energy audit, limited only by the number of prototypes that can be created for a possible solution for its application.

### Resumen

El aumento de empresas y el incesante crecimiento productivo de los diversos sectores económicos han acrecentado programas que contribuyen al consumo sostenible de la energía eléctrica, todo esto con el fin de promover una cultura de ahorro.

El uso de herramientas normadas y calibradas es esencial, con ellas se puede realizar un monitoreo constante de los diversos parámetros eléctricos de la industria.

El prototipo cuenta con una STM32F7 como sistema microcontrolado para el procesamiento digital de señales en tiempo real, asimismo, la elección de sensores de voltaje y corriente para la correcta funcionalidad del mismo.

El prototipo puede rivalizar con medidores comerciales, puesto que su rango de error en pruebas es mínimo, siendo así que se tienen un error promedio que no supera el 10 %.

Con los resultados obtenidos se concluye que el prototipo es aplicable, siendo este una opción viable y económica para una auditoría energética, limitado solamente por la cantidad de prototipos que se pueden crear para una posible solución de aplicación del mismo.

**Index terms—** STM32F7, audit, energy, FLUKE, meter, processing

**Palabras clave—** STM32F7, auditoría, energía, FLUKE, medidor, procesamiento

Recibido: 08-11-2020, Aprobado tras revisión: 11-01-2021

Forma sugerida de citación: Chimarro, J.; Quitiaquez, W., Valarezo, J.; Quitiaquez P.; Melendrez C; Toapanta. L.; (2021). "Validación de un prototipo de medidor de energía trifásico como apoyo para una auditoría energética". Revista Técnica "energía". No. 17, Issue II, Pp. 133-142

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2021 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



## 1. INTRODUCCIÓN

El incremento de los procesos productivos en las industrias en los últimos años ha requerido de manera imperativa de diversas fuentes de energía, siendo la energía eléctrica la que destaca entre todas ellas, con el creciente uso de esta energía viene también el uso racional de la misma, puesto que los recursos naturales para su obtención son cada vez menores. Por lo cual el consumidor final debe transformarse en un ente activo capaz de tomar decisiones que le permita racionar el consumo de energía de manera consciente como lo mencionan López y Arias [1].

Según Poveda [2] solamente el 37 % de la energía primaria generada se convierte en energía útil, con lo cual es preciso tener en cuenta que la eficiencia energética principalmente pretende reducir y mantener el consumo de energía, reduciendo las pérdidas que se generan en toda la transformación del proceso, generando así, mejores hábitos de consumo y optimizando la tecnología para obtener mejores beneficios.

Ante este escenario O'Driscoll et al. [3] formula que es necesario adoptar medidas para concientizar sobre el uso racional de la energía eléctrica, además de las políticas de sensibilización, así como de sistemas que realicen informes de consumo que permitan el monitoreo continuo del consumo de energía y mediante un procesamiento de información, presentarla de manera simple y detallada.

En el 2014 ya se vislumbraba un futuro en el cual se use medidores inteligentes que implementen sensores de optimización de voltajes para mejorar el desempeño de la red eléctrica, todo esto con el fin de analizar y procesar datos para generar firmas de consumo [4], solo en Estados Unidos del mercado anual en redes inteligentes creció de USD. 42 millones en el 2014 a USD. 1 mil millones en el 2018, significando esto un ahorro en facturas de electricidad entre el 20 y 30 % según el tamaño del sistema [5], se espera que el mercado aumente a USD. 110.4 mil millones entre 2020 y 2026 [6].

La innovación de diseños de medidores inteligentes está determinado específicamente por el mercado, en Estados Unidos, el enfoque de los medidores se basa en la detección de fallas y el aumento de la confiabilidad de la red, mientras que en Europa se encuentra enfocado mayormente en el cumplimiento de regulaciones y la administración del consumo del usuario, siendo que para el 2020 un muestreo respecto a la implementación de medidores inteligentes espera que se instalen al menos un 80 % de los clientes del mercado europeo [7].

Fabricantes de medidores industriales, ofrecen equipos con perfiles de carga que pueden ser programables, además de medición de tiempo de uso y en ciertos modelos, protocolos de comunicación ZigBee [8] que se encuentra interconectada a la red doméstica del usuario, todo esto con el fin de obtener información que puede ser usada para programar límites de consumo de energía [9][10].

Bajo este concepto han surgido varios equipos y prototipos de medición electrónicos, basados en microcontroladores que hacen uso de la tecnología conocida como Lectura Automática del Medidor (AMR, por sus siglas en inglés) [11], este método permite integrar sensores destinados a la medición de los parámetros energéticos, ya sea de manera local o inalámbrica, para el procesamiento digital de señales como lo detallan Corral et al. [12], todo esto con el objetivo de brindar información para la toma de decisiones.

El prototipo planteado se basa en el propuesto por Xian-Chun et al. [13] el cual, es un diseño de medidor inteligente de energía estándar trifásico, completamente modular para la medición de calidad de la energía eléctrica, con despliegue de información en una pantalla, el mismo que cuenta con fuente de alimentación independiente y un microcontrolador que procesa la información y la muestra en una pantalla.

Para cotejar y tener un paralelismo en la medición de datos, el prototipo es comparado con un medidor industrial FLUKE 1735 [14], con el que se pretende calibrarlo para tener resultados con un error mínimo posible y poder utilizar el mismo como apoyo para una auditoría energética.

Una vez estructurado el prototipo y con el fin de encontrar posibles procesos donde exista un potencial ahorro energético, se realiza una auditoría energética, para así lograr una corrección de los procesos o la maquinaria que está realizando un gasto innecesario, lo que se traduce en un ahorro del costo en planillas de electricidad y mejoramiento en el funcionamiento técnico del sistema como lo explican Muñoz et al. [15]. Las acciones correctivas aplicadas conllevan en reducción de gastos por reparación de averías y correctivos no planificados.

A fin de optimizar un proceso y tener una mejora en el consumo de energía se debe realizar previamente una auditoría, la cual debe estar enfocada en identificar los fallos que requieran ser corregidos y ejecutar con ellos programas de eficiencia energética para mejorar el consumo y reducir gastos.

El contexto de auditoría energética es muy amplio y ambiguo, puesto que puede ir desde una inspección rápida para detectar pequeños problemas, hasta una investigación más detallada, con el fin de lograr los niveles de eficiencia solicitados. La auditoría energética es un proceso secuencial (ver Fig. 1) y debe cumplir varios procedimientos antes de elaborar un informe de actividades correctivas detalladas [15].

Como solución posterior a una auditoría energética, están los balances de fase y reconfiguración de alimentadores, según Ruiz et al. [16], este realiza un enfoque para minimizar los costos operativos y de inversión, basándose en la curva de carga del sistema en estudio, todo esto mediante el planteamiento a corto y

mediano plazo de la operación de los equipos, obteniendo del mismo disminuciones en pérdidas de hasta un 10 %.

El objetivo del presente artículo es diseñar e implementar un medidor de energía eléctrica trifásico como herramienta para una auditoría energética, el cual permitirá realizar correcciones en focos de potencial ahorro energético, mediante el análisis de datos históricos tomados por el equipo, dichas propuestas deben estar acompañadas del consumo actual, el consumo estimado al aplicarla, la inversión necesaria y rentabilidad de la mejora.



Figura 1: Procedimiento de una auditoría energética [15]

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Respecto al procesamiento de datos, se realizó mediante la tarjeta de control STM32F7 Discovery, la cual se muestra en la Fig. 2, esta tarjeta permite el desarrollo de aplicaciones debido a sus periféricos, su versatilidad y principalmente porque los procesadores de la serie STM32F7 proveen instrucciones para el procesamiento digital de señales en tiempo real.

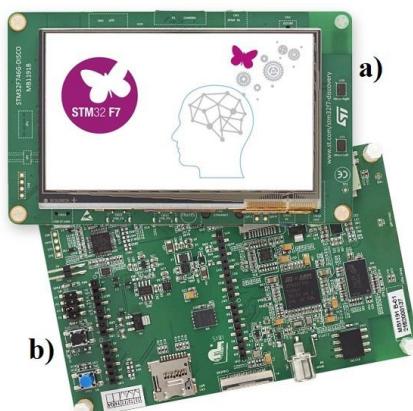


Figura 2: Tarjeta STM32F7 Discovery. (a) vista superior. (b) vista inferior [17]

Entre las principales aplicaciones se tiene: soporte de audio, soporte de video, conexión múltiple de sensores, seguridad y conectividad de alta velocidad; así como de la disposición de conectores Arduino para ampliar su Hardware [18].

Para el diseño del acondicionamiento del voltaje, este incluye un divisor de tensión como se observa en la Fig. 3, sabiendo que el voltaje máximo utilizado para el acondicionamiento es de 3.3 voltios pico – pico, la caída de voltaje en la resistencia  $R_{DRS}$  no deberá sobrepasar este valor.

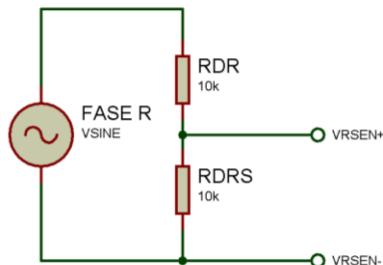


Figura 3: Divisor de tensión para acondicionamiento

Para el cálculo de la caída de tensión, se utilizará la Ecuación 1 correspondiente a un divisor de tensión

$$V_{RDRS} = \frac{V_{MAX} \cdot R_{DRS}}{R_{DR} \cdot R_{DRS}} \quad (1)$$

Donde  $V_{RDRS}$  es la caída de tensión en la resistencia  $R_{DRS}$  (se asume 3.3 V, el valor máximo que puede medir el conversor AD del sistema microprocesador),  $V_{MAX}$  es el voltaje máximo que se podrá medir (se asume 373.35 V, el voltaje pico-pico de la red eléctrica con un margen del 10 % en caso de sobre voltaje),  $R_{DR}$  es la primera resistencia del divisor (se asume 120  $k\Omega$ , valor comercial de resistencia),  $R_{DRS}$  es la segunda resistencia del divisor de tensión y en donde se realizará la medición. Para calcular  $R_{DRS}$  se utiliza la Ecuación 2:

$$R_{DRS} = \frac{V_{RDRS} \cdot R_{DR}}{V_{MAX} - V_{RDRS}} \quad (2)$$

Realizando los cálculos se obtiene el valor de  $R_{DRS}$  de 1.07  $k\Omega$  se decide utilizar una resistencia estandarizada  $R_{DRS}$  de 1  $k\Omega$  para el circuito.

El cálculo de la potencia se calcula mediante la Ecuación 3.

$$P_R = R \cdot I^2 \quad (3)$$

Con lo cual se obtiene que la disipación de la resistencia dada por  $R_{DR}$  con un valor de 0.12 W y por  $R_{DRS}$  es de 0.001 W. Se ha elegido resistencias de 1/4 de vatío al 1 % de tolerancia.

Para minimizar el ruido, se utilizará un amplificador operacional en modo diferencial con fuente externa de 1.65 V [19], el cual adecúa la salida de voltaje a los valores límites, que pueden ser leídos por el conversor AD, el circuito implementado se encuentra detallado en la Fig. 4.

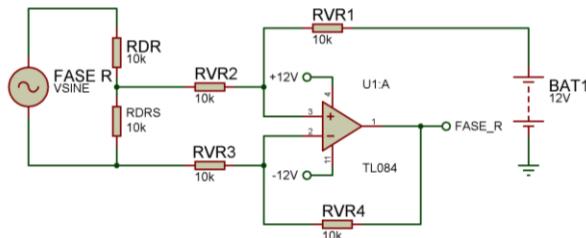


Figura 4: Circuito completo para el acondicionamiento del voltaje de la red eléctrica

Para el diseño del acondicionador de corriente, se debe calcular la resistencia de carga, la misma que es directamente proporcional a la corriente de línea, el principio de medición se puede observar en la Fig. 5.

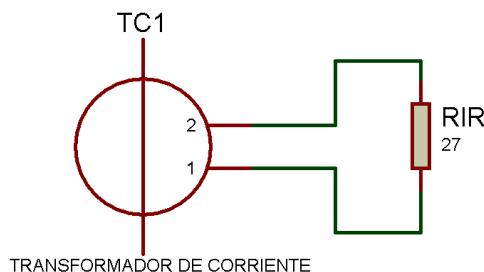


Figura 5: Resistencia de carga para transformador de corriente

En la Ecuación 4, se muestra la forma de calcular el valor de la resistencia  $R_{IR}$ .

$$R_{IR} = \frac{V_{MAX}}{I_{MAX}} \quad (4)$$

Donde  $R_{IR}$  es el valor de la resistencia de carga para el transformador de corriente,  $V_{MAX}$  es el voltaje máximo que soporta el conversor AD (el valor es 3.3 V),  $I_{MAX}$  es la corriente pico – pico máximo que se entrega el transformador de corriente (100 mA para el transformador SCT-013-00) [20].

Realizando el cálculo se obtiene un valor de  $R_{IR}$  de 33  $\Omega$ , para el diseño se utilizará una resistencia estandarizada, menor al valor calculado para obtener un margen de seguridad, el valor de resistencia seleccionado es de 27  $\Omega$ .

Al igual que con el acondicionamiento de voltaje, el cálculo de la potencia se determina mediante la aplicación de la Ecuación 3, obteniendo un valor de potencia para  $R_{IR}$  de 0.08 W, por esta razón se ha elegido resistencias de 1/4 de vatio al 1 % de tolerancia.

Como el sensor entrega valores positivos y negativos, se decide, al igual que con el acondicionamiento de voltaje, el uso de un amplificador operacional en modo diferencial, para adecuar los valores que entrega el sensor a los niveles de voltaje que trabaja el conversor AD del sistema micro procesado [19], el circuito implementado se observa en la Fig. 6.

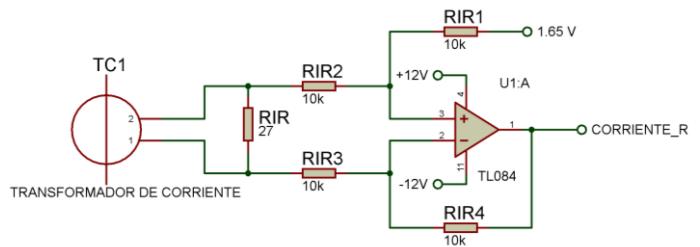


Figura 6: Circuito completo para el acondicionamiento de la corriente

Seleccionados los sensores y calculados algunos parámetros de resistencias y fuentes de alimentación se puede acoplar todo en un solo módulo, en la Fig. 7, se observa el diagrama de bloques del prototipo, en donde se aprecia de manera general las conexiones y distribución que tienen los módulos que conforman este equipo.

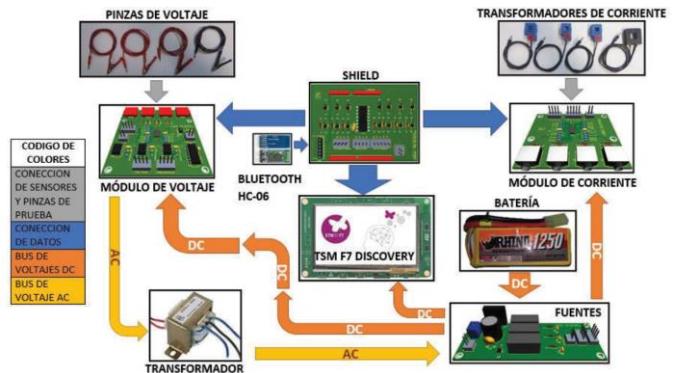


Figura 7: Diagrama de Bloques del Hardware

Con los acondicionamientos implementados, se establece un intervalo de tiempo de 200 ms, en el cual se tomaron 3072 datos instantáneos de voltaje y corriente, estos datos se almacenan en la tarjeta de control para ser procesados mediante la implementación de las siguientes ecuaciones:

Voltaje RMS:

$$v_{RMS\_200ms} = \sqrt{\frac{1}{3072} \sum_{k=1}^{3072} v_k^2} \quad (5)$$

Donde:  $v_{RMS\_200ms}$  es el voltaje RMS en 200 ms,  $v_k$  es el voltaje instantáneo [21].

Corriente RMS:

$$i_{RMS\_200ms} = \sqrt{\frac{1}{3072} \sum_{k=1}^{3072} i_k^2} \quad (6)$$

Donde:  $i_{RMS\_200ms}$  es la corriente RMS en 200 ms,  $i_k$  es la corriente instantánea [21].

Potencia activa:

$$P_{200ms} = \frac{1}{3072} \sum_{k=1}^{3072} v_k \cdot i_k \quad (7)$$

Donde,  $P_{200ms}$  es la potencia activa en 200 ms,  $v_k$  el voltaje instantáneo,  $i_k$  la corriente instantánea [21].

Potencia reactiva:

$$Q_{200ms} = \frac{1}{3072} \sum_{k=1}^{3072} v_{k-\frac{N}{4}} \cdot i_k \quad (8)$$

Donde,  $Q_{200ms}$  es la potencia reactiva en 200 ms,  $v_{k-\frac{N}{4}}$  el voltaje instantáneo atrasado un cuarto de periodo,  $i_k$  la corriente instantánea [21].

Potencia aparente:

$$S = v_{RMS} \cdot i_{RMS} \quad (9)$$

Donde,  $S$  es la potencia aparente,  $v_{RMS}$  el voltaje RMS,  $i_{RMS}$  la corriente RMS [21].

El cálculo de armónicos se realiza mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), para aplicar la misma, es necesario tener un número de muestras igual a una potencia de dos ( $2^n$ ). Por esta razón, para realizar la FFT se toma valores instantáneos de voltaje y corriente cada 3 muestras, que permite obtener 1024 valores de cada señal en 200 ms, con estos valores y con la ayuda de la FFT se realiza el cálculo de los armónicos de orden 0 al 9 de voltaje y corriente [21].

THD voltaje:

$$THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{50} v_k^2}{v_1}} \quad (10)$$

Donde,  $THD_v$  es la distorsión armónica total de voltaje,  $v_k$  es la magnitud del armónico k,  $v_1$  es la magnitud del primer armónico de voltaje [21].

THD corriente:

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{50} i_k^2}{i_1}} \quad (11)$$

Donde,  $THD_i$  es la distorsión armónica total de corriente,  $i_k$  es la magnitud del armónico k,  $i_1$  es la magnitud del primer armónico de corriente [21].

### 3. RESULTADOS

Para comprobar la funcionalidad del prototipo, se realizaron pruebas comparando el equipo con un analizador industrial marca FLUKE, para lo cual se utilizaron cargas resitivas e inductivas conectadas a la red trifásica para adquirir diferentes niveles de corriente, además de otros parámetros necesarios.

Con el fin de minimizar errores en el prototipo con los datos obtenidos en las pruebas realizadas se obtuvieron constantes de calibración las cuales fueron

agregadas a la programación del prototipo con el fin de minimizar los errores en la toma de datos. Una vez calibrado el prototipo, se compararon los datos con los obtenidos por el analizador industrial FLUKE, los cuales se pueden observar en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1: Mediciones de voltaje en las fases A, B y C, después de ser calibrado el prototipo

Voltaje A [V]		
Prototipo	FLUKE	Error (%)
126.731	126.5	0.18
126.52	126.4	0.09
126.633	126.5	0.11
126.549	126.4	0.12
126.731	126.5	0.18
Voltaje B [V]		
Prototipo	FLUKE	Error (%)
123.393	123.3	0.08
123.411	123.4	0.01
123.544	123.5	0.04
123.479	123.5	0.02
123.393	123.3	0.08
Voltaje C [V]		
Prototipo	FLUKE	Error (%)
124.921	124.8	0.10
124.545	124.3	0.20
124.181	123.9	0.23
123.716	123.5	0.17
124.921	124.8	0.10

Se puede corroborar que después de la calibración realizada en el prototipo, el error porcentual de cada fase no supera el 0.25 % [21].

Tabla 2: Mediciones de corriente en las fases A, B y C y en el neutro, después de ser calibrado el prototipo

Corriente A [A]		
Prototipo	FLUKE	Error (%)
22.945	22.79	0.68
25.37	25.17	0.79
29.843	29.49	1.20
35.7	35.31	1.10
38.72	38.36	0.94
Corriente B [A]		
Prototipo	FLUKE	Error (%)
22.209	22.07	0.63
24.1	23.96	0.58
27.765	27.57	0.71
33.27	33.07	0.60
35.607	35.46	0.41
Corriente C [A]		
Prototipo	FLUKE	Error (%)
22.756	22.53	1.00
24.78	24.55	0.94
28.241	27.96	1.01
33.179	32.85	1.00
35.614	35.26	1.00
Corriente N [A]		
Prototipo	FLUKE	Error (%)
11.339	11.4	0.54
14.823	14.86	0.25
20.687	20.68	0.03
27.897	27.97	0.08
31.748	31.82	0.23

Al igual que con el voltaje, una vez realizadas las calibraciones en corriente, se puede observar que el error porcentual del prototipo no supera el 1.2 % [21].

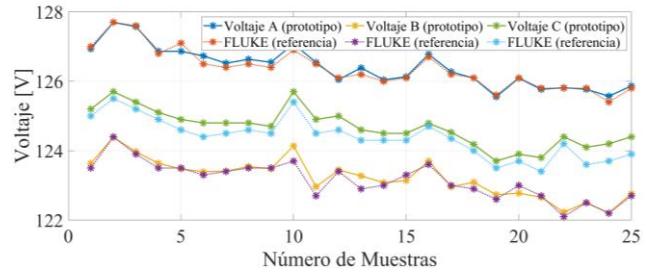
Los valores de error obtenidos en la Tabla 1 y 2 son comparados con la norma EN 50160 [22] de calidad de energía, en la cual se establece un máximo de  $\pm 5\%$  para mediciones de voltaje.

**Tabla 3:** Constantes y offset para calibración de potencia activa y reactiva

Fase	Calibración Potencia Reactiva			
	Rango de Potencia Activa [W]		Constante	Offset
	Min	Max		
Fase A	254	1158	0.9985	2.129
	1158	2588	1.001	132.94
	2588	4004	1.014	260.07
	4004	5348	1.0058	383.98
	5348	263	1.0096	491.03
Fase B	263	1056	1.0679	30.422
	1056	2312	1.0763	306.26
	2312	3541	1.0634	582.96
	3541	4745	1.0574	825.5
	4745	277	1.0449	1018.4
Fase C	277	1107	1.0203	-1.5407
	1107	2464	1.0109	137.55
	2464	3861	1.0168	274.51
	3861	5163	1.017	411.7
	5163	6146	1.0241	544.22
Calibración Potencia Activa				
Fase	Rango de Potencia Reactiva [VAR]		Constante	Offset
	Min	Max		
	-511	-152	0.9925	0.8753
Fase A	456	1179	0.9876	-87.834
	1179	2141	0.9942	-188.89
	2141.5	2855	0.9869	-258
	2855	3388	0.9908	-301.87
	-1008	-128	1.0521	29.529
Fase B	61	783	1.0144	-80.382
	783	1653	1.0039	-215.3
	1653	2243	1.0128	-387.18
	2249	2965	1.0549	-621.84
	-642	-147	1.0052	-12.777
Fase C	238	971	1.0033	-68.998
	971.5	1816	1.0012	-167.29
	1816	2432	0.9991	-245.49
	2432	2936	0.9989	-272.79

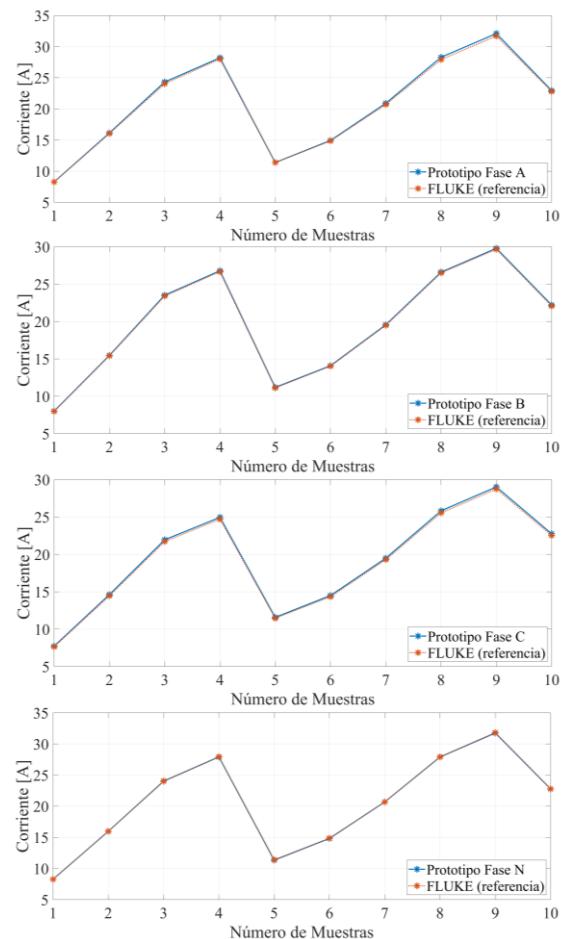
Los valores mostrados en la Tabla 3 fueron obtenidos mediante una iteración de datos, corrigiendo de esta manera el error que presenta el prototipo al momento de la medición de potencia activa y reactiva. Con los datos obtenidos por el prototipo y el analizador FLUKE, se obtiene una regresión lineal de las lecturas, de donde se adquiere constantes para la calibración, así como valores de offset que serán sumados al valor adquirido por el prototipo.

Realizadas las correcciones en la programación, se ha conectado el prototipo y el analizador FLUKE a la red trifásica para adquirir los valores de voltaje RMS de las fases A, B y C. Los valores fueron tomados simultáneamente en intervalos de tiempo de 10 minutos entre lecturas, los cuales se muestran en la Fig. 8.



**Figura 8:** Lecturas de voltaje RMS de las fases A, B y C

Se puede apreciar en la Fig. 8, que los valores de las lecturas del prototipo y el analizador FLUKE usado como referencia son similares, teniendo valores que no superan el 0.18, 0.35 y 0.31 % de error para las fases A, B y C, respectivamente [21]. Respecto a las corrientes, al igual que con las mediciones de voltaje, los valores de corriente fueron tomados en intervalos de tiempo de 10 minutos, para estas mediciones, progresivamente se fueron colocando cargas, con el fin de aumentar el consumo y medir diferentes valores de corriente RMS.



**Figura 9:** Lecturas de corriente RMS de las fases A, B, C y N

Se puede apreciar en la Fig. 9, que los valores de las lecturas de corriente del prototipo y el analizador FLUKE usado como referencia son similares, teniendo valores que no superan el 1.38, 0.71, 1.13 y 0.53 % de error en fases A, B, C y N, respectivamente [21].

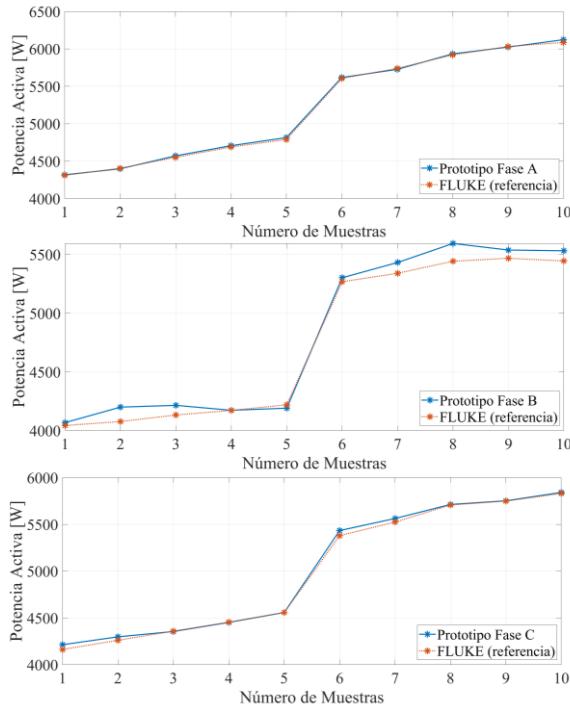


Figura 10: Lecturas de potencia activa de las fases A, B y C

En la Fig. 10, se aprecia las lecturas de valores de potencia activa tanto en el prototipo como en el analizador FLUKE (referencial), se puede observar que el error entre ambos no supera el 4.73, 8.82 y 3.08 % de error en las fases A, B y C, respectivamente [21].

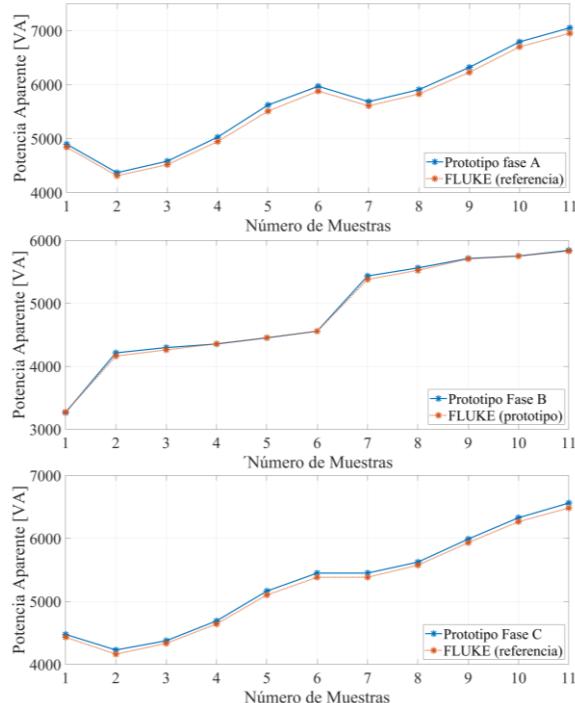


Figura 11: Lecturas de Potencia Aparente de las fases A, B y C

Se puede visualizar en la Fig. 11, que los valores de las lecturas de potencia aparente del prototipo y el analizador FLUKE usado como referencia son similares,

teniendo valores que no superan el 2.05, 0.97 y 1.79 % de error en fases A, B y C, respectivamente [21].

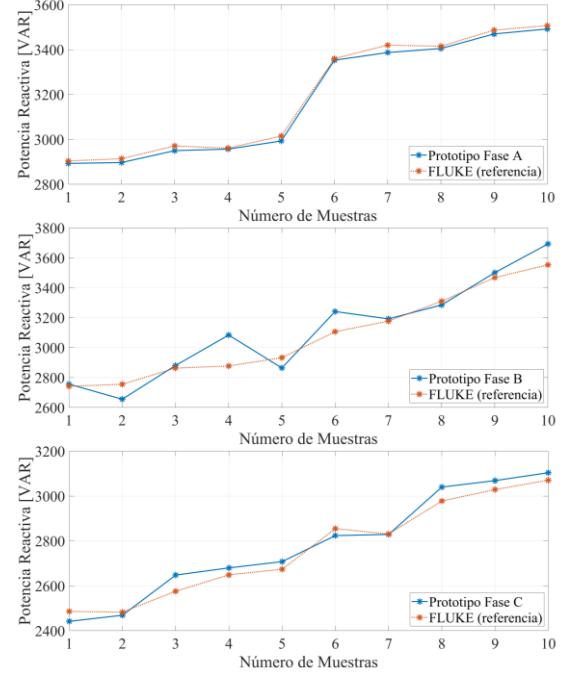


Figura 12: Lecturas de Potencia Reactiva de las fases A, B y C

Se puede apreciar en la Fig. 12, que los valores de las lecturas de potencia reactiva del prototipo y el analizador FLUKE usado como referencia son similares, teniendo valores que no superan el 7.69, 5.85 y 14.29 % de error en fases A, B y C, respectivamente [21].

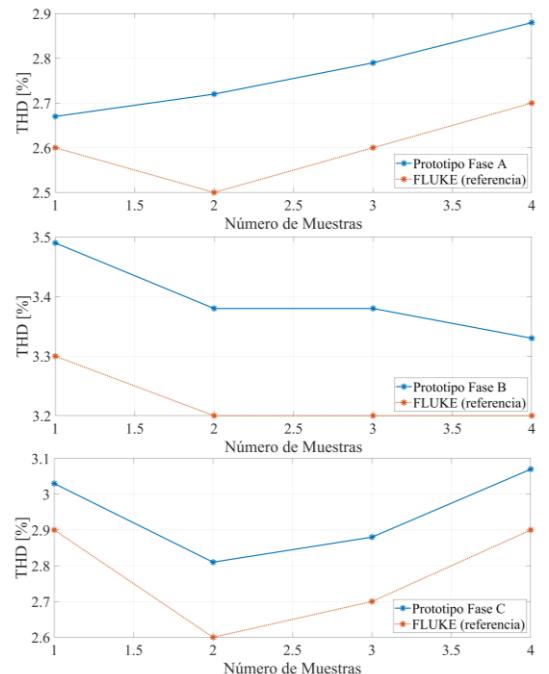


Figura 13: Lecturas del THD de voltaje de las fases A, B y C

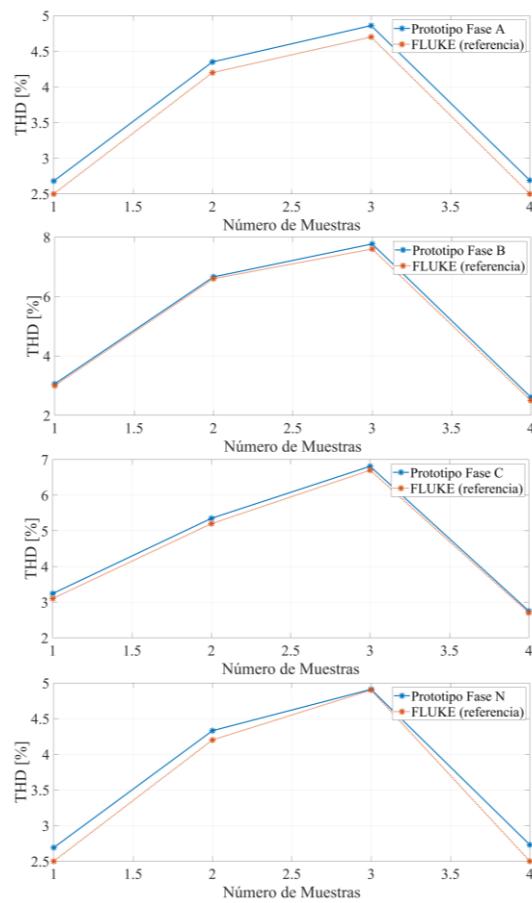


Figura 14: Lecturas del THD de corriente de las fases A, B, C y N

En la Fig. 13, se observa las lecturas de THD de voltaje adquiridas por el prototipo y el analizador industrial FLUKE usado como referencia, en el cual se muestra que el THD de voltaje calculado no supera el 8.8, 5.75 y 8.08 % de error en las fases A, B y C, respectivamente. Así mismo, en la Fig. 14, se visualizan las lecturas de THD de corriente, en la cual se observa que el error no supera el 7.6, 4.4, 4.5 y 9.2 % de error en las fases A, B, C y N, respectivamente [21].

#### 4. CONCLUSIONES

El diseño y la implementación del prototipo de medición trifásico de energía es satisfactorio, permitiendo adquirir datos que se asemejan a los adquiridos por un medidor trifásico industrial, el error en las mediciones no supera el 10 % comparándolo con el medidor FLUKE comercial utilizado en auditorías y mediciones energéticas, se puede concluir que el prototipo es muy acertado en cuanto a la adquisición de datos, con lo cual se puede ratificar que las mediciones tomadas por el prototipo desarrollado, se encuentran dentro de los parámetros y se puede utilizar el mismo para una auditoría energética.

Considerando que el prototipo se ha desarrollado con elementos de bajo costo, para poder acceder a una acreditación normada para su uso comercial, el mismo

debe ser calibrado y restructuredo tanto en software y hardware para poder realizar una correcta adquisición de datos, todo esto para poder cumplir con los parámetros de la Norma IEC 61000-4-30 [23] y norma EN 50160 [22].

El uso de la transformada rápida de Fourier para el análisis de los datos obtenidos fue de utilidad en la implementación del software de procesamiento de datos, es importante tener en cuenta que, para emplear esta estrategia, se debe considerar el periodo de muestreo, el número de muestras y el periodo de agregación de los datos para el procesamiento.

Respecto a una posible mejora en el sistema, se propone el uso de una FPGA como sistema microprocesado, todo esto con el objetivo de tener la posibilidad de ejecutar rutinas en paralelo y poder realizar un aumento en la frecuencia de toma de datos, con esto se puede evitar el conflicto al momento de ejecutar las rutinas.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. López Hurtado, J. C. Arias Murillo, and E. A. Quintero Salazar, "Interactive electronic energy meter for residential use," *Prospectiva*, vol. 14, no. 1, pp. 61–72, 2016.
- [2] M. Poveda, "Eficiencia energética: recurso no aprovechado," OLADE. Quito, 2007.
- [3] E. O'Driscoll and G. E. O'Donnell, "Industrial power and energy metering – a state-of-the-art review," *J. Clean. Prod.*, vol. 41, pp. 53–64, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.046>.
- [4] J. John, "Top 5 Smart Grid Trends of 2014," Greentech Media, 2014, [Online]. Available: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/top-smart-grid-trends-of-2014>.
- [5] M. Munsell, "US Solar-Plus-Storage Market to Surpass \$1 Billion by 2018," Greentech Media, 2014.
- [6] B. Kellison and F. Wang, "What the Coming Wave of Distributed Energy Resources Means for the US Grid," Greentech Media, 2020.
- [7] Accenture, "Realizing the full potential of smart metering," 2013.
- [8] Z. Alliance, "Zigbee alliance," WPAN Ind. group, <http://www.zigbee.org/>. Ind. Gr. responsible ZigBee Stand. Certif., pp. 1–2, 2010.
- [9] Itron, "Itron." <https://www.itron.com/na>.
- [10] K. Parsons Jr, "Intelligent metering demand response." Google Patents, Jun. 11, 2013.
- [11] K. A. Nap, L. A. Ehrke, and D. R. Dresselhuys, "Automatic meter reading data communication system." Google Patents, Jun. 12, 2001.

- [12] P. Corral, B. Coronado, A. C. de C. Lima, and O. Ludwig, "Design of Automatic Meter Reading based on Zigbee," IEEE Lat. Am. Trans., vol. 10, no. 1, pp. 1150–1155, 2012, doi: 10.1109/TLA.2012.6142452.
- [13] L. Xian-chun, X. Yu-ling, and Z. Liang-qin, "Design of three-phase multi-purpose standard electric energy meter," in 2011 International Conference on System science, Engineering design and Manufacturing informatization, 2011, vol. 1, pp. 263–266, doi: 10.1109/ICSSEM.2011.6081201.
- [14] F. P. Analyzer, "1735 data sheet," Fluke Corporation, 2006. [https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/1735\\_umspa0200.pdf](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/1735_umspa0200.pdf).
- [15] E. P. Muñoz Saona and A. E. Vergara Reyes, "Desarrollo y aplicación de una guía para realizar auditorías energéticas en el sector industrial." QUITO/EPN/2011, 2011.
- [16] A. G. Ruiz, J. C. Galvis, and R. A. G. Rendón, "Solución al problema de balance de fases y reconfiguración de alimentadores primarios bajo un modelamiento trifásico usando simulated annealing," Sci. Tech., vol. 1, no. 30, pp. 37–42, 2006.
- [17] STMicroelectronics, "32F746GDISCOVERY," ST life.augmented. <https://www.st.com/en/evaluation-tools/32f746gdiscovery.html> (accessed Oct. 20, 2020).
- [18] M. Á. Reyes Resta, "Programación de microcontroladores Cortex-M7 usando herramientas de generación de código para el sistema STM32F7 Discovery," 2017.
- [19] R. F. Coughlin and F. F. Driscoll, Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. Pearson educación, 1998.
- [20] L. Beijing Yaohuadechang Electronic Co., "SCT-013," ALLDATASHEET. <https://html.alldatasheet.es/html-pdf/1155087/YHDC/SCT-013/111/1/SCT-013.html> (accessed Oct. 20, 2020).
- [21] C. O. Meléndrez Arévalo and J. W. Valarezo Pérez, "Diseño e implementación de un medidor de energía eléctrica trifásico como herramienta para una auditoría energética." Quito, 2017., 2017.
- [22] P. Q. A. Guide, "Voltage Disturbances," Stand. EN, vol. 50160, 2004.
- [23] V. Fuster, L. Fort, and J. Sansano, "Consideraciones sobre la medida de la calidad de la energía eléctrica según la IEC 61000-4-30," Zaragoza, vol. 11, no. 13, 2005.



**Jorge Chimarro.**— Nació en Quito, Ecuador en 1991. Recibió su título de Ingeniero en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional en 2018; actualmente cursa la Maestría en Producción y Operaciones Industriales en la Universidad Politécnica Salesiana.

Sus campos de investigación están relacionados con la automatización y sistemas de control.



**William Quitiaquez.**— Nació en Quito en 1988. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Politécnica Salesiana en 2011; de Magíster en Gestión de Energías de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en 2015; de Magíster en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, en 2019. Actualmente, obtuvo la distinción de Candidato a Doctor en la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, su campo de investigación se encuentra relacionado a Fuentes Renovables de Energía, Termodinámica, Transferencia de Calor y Simulación Numérica.



**John Valarezo.**— Nació en Quito, Ecuador en 1991. Recibió su título de Ingeniero en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional en Quito; actualmente ejerce el cargo de Supervisor Técnico en la empresa House Publi Cia. Ltda. Sus campos de investigación están relacionados con la automatización y la robótica.



**Cesar Melendrez.**— Nació en Quito, Ecuador en 1991. Recibió su título de Ingeniero en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional en 2017; actualmente se encuentra trabajando en el área de la Ingeniería Biomédica. Sus campos de investigación están relacionados con ingeniería biomédica y la automatización.



**Patricio Quitiaquez.-** Nació en Quito en 1969. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Politécnica Nacional de Ecuador en 2002; de Magíster en Gestión de la Producción de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en 2007. Su campo de investigación se encuentra relacionado con Gestión de Operaciones, Diseño Estructural, Procesos de Manufactura y Simulación Numérica.



**Fernando Toapanta.-** Nació en Quito en 1986. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Politécnica Salesiana en 2012; de Magíster en Gestión de Energías de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en 2016. Actualmente, se encuentra cursando sus estudios de Doctorado en la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, y su campo de investigación se encuentra relacionado la Mecánica de Fluidos, Termodinámica y Simulación Numérica.