

# Diseño de un Prototipo para el Monitoreo de Armónicos y Parámetros de Estado Estable en Redes de Tensión menor a 1 kV

## Design of a Prototype for Monitoring of Harmonics and Steady State Parameters in Networks of Voltage less than 1 kV

D. Ramirez<sup>1</sup>, J. Vanegas<sup>2</sup>, F. Santamaria<sup>3</sup>, C. Trujillo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>GCEM, Fac. de Ing., Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Email: [daramirez@correo.udistrital.edu.co](mailto:daramirez@correo.udistrital.edu.co)

<sup>2</sup>GCEM, Fac. de Ing., Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Email: [jdvanegas@correo.udistrital.edu.co](mailto:jdvanegas@correo.udistrital.edu.co)

<sup>3</sup>GCEM, Fac. de Ing., Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Email: [fsantamaria@udistrital.edu.co](mailto:fsantamaria@udistrital.edu.co)

<sup>4</sup>LIFAE, Fac. de Ing., Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Email: [cltrujillo@udistrital.edu.co](mailto:cltrujillo@udistrital.edu.co)

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 02, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 01, 2017

### RESUMEN

Este artículo aborda el diseño de una tarjeta de adquisición y procesamiento de señales, que permite conocer la tendencia de los parámetros de estado estable y distorsión armónica de una red monofásica o trifásica de baja tensión, en tiempo real y usando hardware de bajo costo. Se diseñan todas las etapas que componen el hardware. Se presentan los criterios de diseño del software para la adquisición y procesamiento de las señales analógicas, y la manera en que los datos son presentados, promediados y enviados por comunicación serial SCI/UART para ser almacenados en una base de datos. Se validan los resultados con un equipo patrón, los cuales determinan que la tarjeta posee una precisión adecuada para calcular los parámetros de interés. Finalmente se presentan las conclusiones.

**PALABRAS CLAVE:** Armónicos, DSC, Muestreo, Monitoreo de calidad de potencia.

### ABSTRACT

This paper presents the design of a signal acquisition and processing PCB, which allows knowing the trend of steady state parameters and harmonic distortion of a single-phase or three-phase low voltage network, in real time and using low-cost hardware. All stages of the hardware are designed. Both, the software design criteria for the acquisition and processing of analog signals, and the way in which data is presented, averaged and sent by SCI/UART serial communication to be stored in a database are described. The results are validated with a standard equipment, which determines that the card has adequate accuracy to calculate the parameters of interest.

**KEYWORDS:** DSC, Harmonics, Power Quality Monitoring, Sampling.

### 1. INTRODUCCIÓN

El rápido desarrollo de tecnologías de estado sólido enfocadas en la eficiencia de los dispositivos eléctricos, ha traído consigo efectos indeseados para los sistemas de distribución, reflejados en perturbaciones electromagnéticas que afectan los parámetros de calidad de potencia del servicio de energía eléctrica. Del mismo modo, estas cargas de naturaleza no lineal son altamente

susceptibles a pequeñas fluctuaciones en los parámetros de tensión, corriente y frecuencia, causando un mal funcionamiento en ellas y daños en los demás dispositivos conectados al sistema [1-2].

En la actualidad se cuenta con dispositivos de alta tecnología como analizadores de calidad de potencia que permiten la evaluación de la calidad de potencia suministrada por las empresas de servicios, o el efecto de la carga sobre las variables eléctricas. Sin embargo, este

tipo de tecnologías poseen un alto costo tanto de mercado como de funcionamiento, limitando su uso [3]; además, sus plataformas cerradas impiden la modificación y adaptación de las técnicas de medida al medio nacional y a las necesidades propias de cada usuario.

Ante la necesidad de implementar dispositivos de medición que cumplan simultáneamente los requerimientos de bajo costo y exactitud, y permitan llevar un control mucho más riguroso de cargas contaminantes, el avanzado desarrollo de la microelectrónica y en especial en el campo de procesamiento digital de señales, ha permitido abordar el diseño e implementación de instrumentos de medición que brindan rapidez, exactitud, flexibilidad y adaptabilidad, a bajo costo [4].

A partir de lo anterior, el presente artículo describe el diseño de una tarjeta adquisición y procesamiento de señales, que permita conocer la tendencia de los parámetros de estado estable y distorsión armónica de una red monofásica o trifásica de baja tensión, en tiempo real y usando hardware de bajo costo. Esta tarjeta hace parte constitutiva, junto con otras tarjetas de monitoreo, de un prototipo de medición avanzado para el registro de parámetros eléctricos de estado estable y calidad de energía, que permita determinar el funcionamiento de una red y los fenómenos que la perturban, de una manera clara y oportuna, respondiendo a las exigencias dinámicas de gestión que podría demandar la inclusión en Colombia de nuevas tecnologías de consumo energético.

La sección 2 abarca los lineamientos normativos destinados a la monitorización de parámetros de calidad de potencia. La sección 3 presenta el diseño e implementación de los bloques constitutivos de hardware del prototipo. La sección 4 expone los parámetros de diseño del software desarrollado para la adquisición y procesamiento de las señales. Por último, se presentan los resultados experimentales del proceso de validación y se exponen las conclusiones.

## 2. ASPECTOS NORMATIVOS SOBRE CPE

La función de la normalización destinada al monitoreo de la calidad de potencia eléctrica (CPE), es proporcionar las recomendaciones, límites y directrices que garanticen que los estudios sean analizados desde la misma perspectiva, con resultados confiables y comparables independientemente del equipo de medida empleado.

### 2.1. IEEE 1159-2009 [5]

Es una guía para la medición de los parámetros que definen la Calidad de Potencia Eléctrica de una red eléctrica en el punto de conexión común.

### 2.2. IEEE 519-1992 [6]

Es una guía dirigida a empresas distribuidoras y a sus clientes para disminuir los inconvenientes causados por los armónicos. Establece los límites de contribución que el consumidor puede suministrar a la red.

### 2.3. NTC-EIC 61000-4-30:2012 [7]

Provee métodos de medida, describe fórmulas para la estimación de parámetros de estado estable y calidad de energía. Establece niveles de precisión para equipos de medida, define periodos de agregación de los resultados y el modo de interpretarlos.

El método de medida clase A es aplicado cuando se requieren resultados precisos, el método clase S es usado para estudios estadísticos que no requieren gran precisión de medida y la clase B se define con el objeto de evitar que queden obsoletos muchos diseños de instrumentos ya existentes.

Respecto a los tiempos de observación para el análisis de armónicos, el intervalo de tiempo básico debe ser de 12 ciclos para una red de 60 Hz. El registro de información se debe efectuar dependiendo del estudio que se desee realizar, en:

- Agregación de 150/180 ciclos
- Agregación de 10 min
- Agregación de 2 horas

### 2.4. NTC-IEC 61000-4-7:2013 [8]

Se aplica a los equipos destinados a la medición de componentes de frecuencia de hasta 9 kHz que se superponen a la componente fundamental de la señal de tensión o de corriente. Dicho análisis será realizado hasta el 50<sup>vo</sup> armónico para equipos de clase A y hasta el 40<sup>vo</sup> para equipos de clase S. Con respecto a la exactitud de aparato de medida, la norma establece una clasificación en dos clases (I y II), de acuerdo al máximo error permitido en la medición. Menciona aspectos básicos que debe cumplir el instrumento:

- Circuitos de entrada con filtro anti-aliasing
- Conversores A/D con muestreo y retención de señales
- Sincronización principal (Circuitos PLL) y una ventana de ponderación, si fuera necesario
- Procesador para el cálculo de la DFT.

Se establece un ancho de ventana de 200 ms, en la cual debe ser realizado el muestreo, para una resolución de frecuencia de 5 Hz.

Las recomendaciones dadas por la IEC 61000-4-30 e IEC 61000-4-7 son exigentes en cuanto a los recursos de procesamiento y memoria que deben poseer los equipos de medida, por lo tanto, para instrumentos de coste reducido, se puede considerar una ventana temporal más corta, que dure eventualmente solo un periodo. Sin

embargo, la incertidumbre de los instrumentos que se basan en otro principio de análisis debe respetar los requisitos establecidos para el método de medida y clase de precisión a la que pertenezca.

## 2.5. IEEE 1159-2009 [9]

Adopta las definiciones de Budeanu para la medición y cuantificación de potencia y energía en sistemas eléctricos en régimen sinusoidal, no sinusoidal, balanceado y no balanceado.

## 3. DISEÑO DE HARDWARE

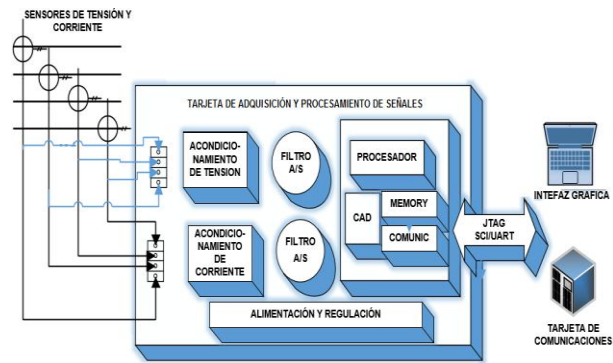
La tarjeta implementada posee las características expuestas en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Características de la tarjeta implementada.

Especificaciones				
Rango de entrada	Tensión [V]	Mín.	Nom.	Máx.*
		5	120	170
		5	270	382
	Corriente [A]	5	480	678
		0,5	20	28
		0,5	40	56
		0,5	200	282
	0,5	400	565	
Ancho banda	2,7 kHz			
Resolución	12 bits			
Frec. muestreo	7680 SPS			
Frec. nominal	60 Hz			
No. de canales	Tensión			3
	Corriente			4
Alimentación	Analógica			5 VDC
	Digital			3,3 VDC
Consumo	0,6 W			
Comunicación	SCI/ UART, JTAG			
Promediado	Cada 3 segundos			
Parámetros de medición	Tensión	Vrms, V pico		
	Corriente	Arms, A pico		
	Armónicos	1°-40° (60 Hz) THDi-THDv		
	Potencia	P. Activa, P. Activa Fund. P. Reactiva, P. Aparente P Aparente Fund. F. de potencia Coseno Phi		

**Fuente.** Elaboración propia.

En esta sección se presenta el proceso de diseño de los componentes de hardware que se presentan en la Figura 1.



**Figura 1.** Elementos de hardware que componen la tarjeta de adquisición y procesamiento. **Fuente.** Elaboración propia.

### 3.1. Acondicionamiento de tensión y corriente

Un único sensor es el encargado de captar las señales de tensión para los módulos de monitoreo de parámetros de estado estable y distorsión armónica, huecos de tensión y sobretensiones de corta duración. Por esta razón, se seleccionan divisores capacitivos, ya que estos conservan una relación de transformación constante en el rango de frecuencias de interés estimado entre 60 Hz y 500 Hz. Los sensores seleccionados permiten monitorear tensiones transitorias de corta duración de hasta 3,5 kV, produciendo una tensión de 3,3 V, máximo valor cuantificable por las entradas analógicas del módulo de sobretensiones. Por su parte, el monitoreo de parámetros de estado estable y distorsión armónica, comprende sistemas trifásicos de cuatro y tres hilos, para una tensión nominal de 480 V.

Debido a la alta relación de transformación que posee el divisor capacitivo, es necesario amplificar la señal de salida y agregarle un nivel DC para eliminar los valores negativos de la tensión de entrada y de esta forma, aprovechar todo el rango dinámico del convertor A/D (0 - 3 V). Como la resolución del convertor es 12 bits, se divide el rango de adecuación de tensión para tres distintas tensiones de entrada, siendo estas 120 V, 277 V y 480 V.

Al no poseer separación galvánica entre el equipo de medida y sistema bajo estudio, es necesario proveer un circuito de protección compuesto por diodos TVS, en caso de producirse una sobretensión, y diodos Schottky para suprimir el paso de tensiones negativas por las entradas del convertor A/D. Para una configuración en delta del sistema de alimentación, se implementa una etapa restadora que mide diferencialmente las dos tensiones de fase asociadas a la tensión de línea.

Por último se añade a cada uno de los canales un filtro anti-aliasing Butterworth de cuarto orden a la entrada del convertor A/D para limitar la banda de frecuencias de la señal muestreada, de ruido y componentes superiores a la frecuencia de interés de 2,4 kHz, permitiendo determinar componentes armónicas hasta el 40<sup>vo</sup> orden.

Las señales de corriente son captadas por pinzas amperimétricas que brindan aislamiento con el circuito de potencia. El circuito de amplificación y nivel DC se diseñó para que a entradas de corriente de 20 A, 40 A, 200 A y 400 A, la tensión de salida del sensor ocupe la totalidad del rango dinámico de entrada del conversor.

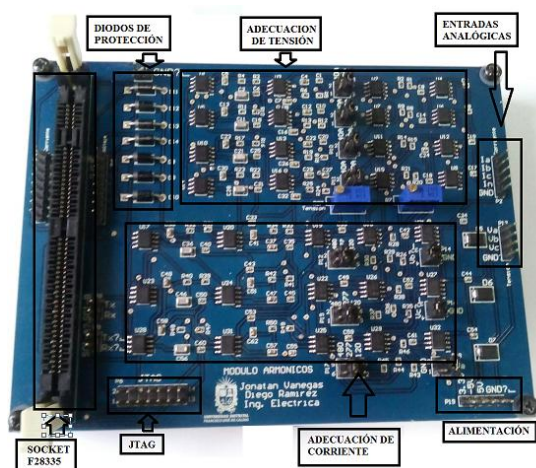
### 3.2. Controladores Digitales de Señales – DSC

Los requerimientos de procesamiento son demasiado exigentes, ya que se deben calcular simultáneamente en un periodo reducido de tiempo la transformada rápida de Fourier, parámetros de estado estable e índices de distorsión armónica para 7 canales. Los Controladores Digitales de Señales (DSC) son dispositivos que poseen una arquitectura especializada compuesta por un núcleo (DSP) que permite ejecutar eficientemente algoritmos con alta carga computacional, siendo idóneos para satisfacer los requerimientos de la aplicación.

Los amplificadores de instrumentación y amplificadores operacionales demandan una alimentación dual de  $\pm 5$  V, el (DSC) requiere una tensión de alimentación a la tarjeta de control de 5 V y una tensión de alimentación de 3,3 V es necesaria para el puerto JTAG.

### 3.3. Implementación y PCB final

El resultado final se muestra en la Figura 2. En ella se observan las conexiones de los sensores, los circuitos de acondicionamiento para cada una de las fases, circuitos de alimentación, las conexiones con la tarjeta de control, las salidas para la tarjeta de comunicaciones y para la interfaz gráfica mediante el JTAG.



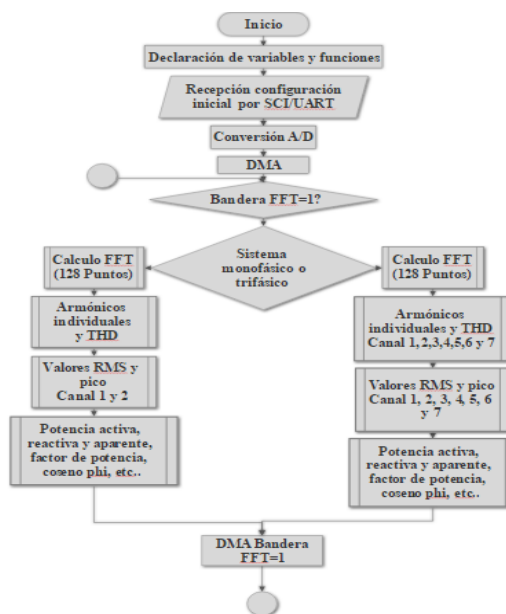
**Figura 2.** Tarjeta implementada. **Fuente.** Elaboración propia.

Las dimensiones de la tarjeta son de aproximadamente 140x110 mm. Adicionalmente, en su diseño se tuvieron en cuenta todos los criterios de compatibilidad electromagnética, con el fin de reducir al máximo

posibles perturbaciones que puedan afectar las señales registradas, procesadas o transmitidas. Por lo tanto, se estableció una distancia mínima de aproximadamente 10 mm entre el DSC y la fuente de alimentación de la tarjeta, para evitar conflictos que puedan alterar la naturaleza de las señales que se van a procesar.

## 4. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES ANALÓGICAS

La Figura 3 muestra el diagrama de flujo para la adquisición y procesamiento de las señales analógicas. Al tener la tarjeta la posibilidad de establecer tanto los niveles de tensión y corriente, como la topología del sistema bajo estudio, el módulo de adquisición y procesamiento de las señales analógicas varía en función del sistema monitoreado. Es por ello que la adquisición de muestras solo inicia hasta que el dispositivo maestro envíe por SCI/UART las configuraciones iniciales de la estructura seleccionada.



**Figura 3.** Diagrama de flujo para la adquisición y procesamiento de las señales. **Fuente.** Elaboración propia.

Para estimar las componentes armónicas hasta el armónico 40, la frecuencia de muestreo debe ser mayor a 4800 SPS. Por otra parte, la entrada al cálculo de la FFT exige que el número de muestras sea una potencia de 2, y al establecer la ventana de adquisición de muestras para que abarque un periodo completo de la señal, el valor más cercano que cumple estos requerimientos es 7680 SPS, con la cual es posible adquirir 128 muestras cada periodo y realizar un análisis espectral hasta 3840 Hz con una resolución espectral de 60 Hz, haciendo posible determinar el valor de los armónicos de la señal.



El muestreo de las señales debe ser llevado a cabo simultáneamente por fases, de manera que el ángulo de desfase de las ondas de tensión y corriente de una fase determinada no varíe, y sea posible obtener la potencia instantánea en tiempo real. Dependiendo del número de canales seleccionado, el conversor A/D solo digitalizará las muestras de los canales habilitados.

Como el procesamiento del bloque de muestras de los 7 canales de un sistema trifásico de cuatro hilos, debe ser efectuado antes que el siguiente bloque de muestras esté disponible, se habilita el módulo del controlador de acceso directo a memoria DMA del DSC, para que mientras el conversor A/D digitaliza y envía las muestras a un área de la memoria, el núcleo del (DCS) procese el bloque de muestras correspondientes a la ventana de muestreo anterior.

Los algoritmos para el cálculo de los parámetros de estado estable y distorsión armónica, están basados en las recomendaciones establecidas en el estándar IEEE1459-2000 para redes en presencia de señales armónicas [9]. A partir de las muestras obtenidas se realizan las siguientes estimaciones para cada canal de medición:

- Transformada Rápida de Fourier (FFT)
- Magnitud y fase de cada armónico
- THD de tensión y corriente
- Tensión RMS y Corriente RMS
- Tensión Pico y Corriente Pico

También se implementan los cálculos de potencia realizados para cada fase de medición:

- Potencia Activa (P)
- Potencia Activa Fundamental (P1)
- Potencia Reactiva (Q)
- Potencia Aparente (S)
- Potencia Aparente Fundamental (S1)
- Factor de Potencia (FP)
- Coseno Phi

De acuerdo al Estándar IEEE1459-2000, las salidas espectrales obtenidas se utilizan para los cálculos posteriores de magnitud y fase de los armónicos individuales de tensión y corriente, así como también para la estimación de los parámetros de estado estable. Cuando este proceso finaliza, se espera nuevamente a que una nueva transmisión DMA sea realizada para ejecutar el procesamiento del siguiente bloque de muestras.

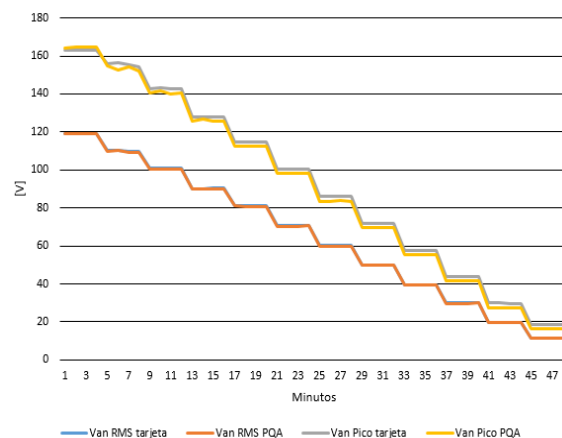
La agregación de resultados se realiza con el objetivo de fusionar las medidas obtenidas en cada ventana temporal en tiempos más grandes, esto debido a que nuevos resultados son generados cada ciclo de la señal. El método estándar de acuerdo con IEC 61000-4-30, es iniciar promediando las ventanas de medición de 200 ms; sin embargo, debido a que en esta aplicación se emplea una ventana temporal de 16,6 ms, este intervalo de tiempo es inicialmente agregado en tiempos de 200 ms y posteriormente en 3 segundos durante 2 minutos. Al finalizar este periodo de tiempo, la tarjeta de comunicaciones del prototipo registrador solicita los

datos agregados, los cuales son posteriormente promediados, de ser necesario, cada 10 minutos y 2 h.

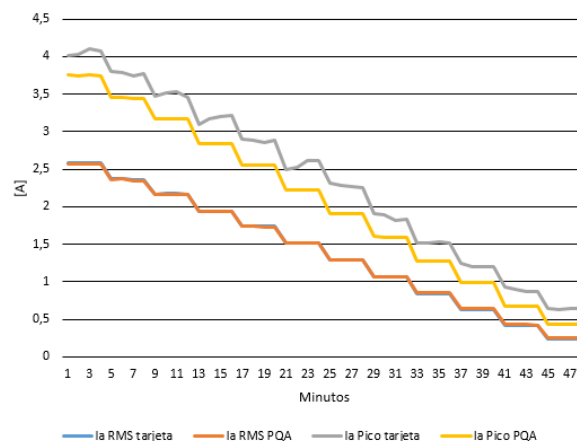
La visualización de los datos se realiza a través de una interfaz gráfica, donde los resultados son enviados por medio de comunicación serial del JTAG. Por su parte, el protocolo SCI/UART es empleado para enviar los datos promediados de 180 ciclos a la tarjeta de comunicaciones cada 2 minutos.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

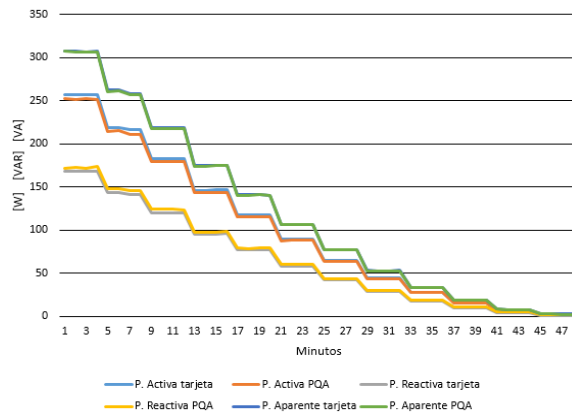
Para validar el funcionamiento del prototipo, se realiza el monitoreo de una carga trifásica resistiva-inductiva conectada en estrella y se observa el comportamiento de la tarjeta ante variaciones en la tensión de alimentación. Las Figuras 4, 5, 6 y 7 muestran los resultados obtenidos de los principales parámetros calculados para la fase A. Los resultados son comparados con los obtenidos por el analizador de energía Fluke 435 Series II. Los resultados en las fases restantes presentan un comportamiento similar.



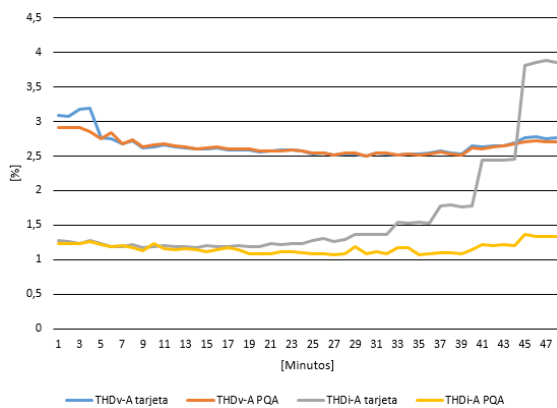
**Figura 5.** Tensión pico y RMS estimados por la tarjeta frente a los obtenidos por el PQA. **Fuente.** Elaboración propia.



**Figura 6.** Corriente pico y RMS estimados por la tarjeta frente a los obtenidos por el PQA. **Fuente.** Elaboración propia.



**Figura 6.** Potencia activa, reactiva y aparente calculadas por la tarjeta frente a los por el PQA. **Fuente.** Elaboración propia.



**Figura 7.** THDv y THDi calculados por la tarjeta frente a los estimados por el PQA. **Fuente.** Elaboración propia.

Los cálculos del valor RMS de tensión y corriente no superaron un error promedio del 0,99%, mientras para la tensión pico fue del 4,23% y 18,8% para la corriente pico, esto debido a desviaciones del offset en la etapa de acondicionamiento que no son tenidas en cuenta por el software de procesamiento. Los cálculos de potencia activa, reactiva y aparente, presentaron errores del 3,15%, 6,88%, 2,7%, respectivamente. En cuanto a los valores THD, presentan un error inferior al 2% cuando los armónicos son superiores al 0,025% del rango nominal, por el contrario, los cálculos de THD pierden exactitud debido a la resolución de conversor A/D.

## 6. CONCLUSIONES

Se diseñó una tarjeta de adquisición y procesamiento de señales, que permite estimar los parámetros de estado estable y distorsión armónica de una red monofásica o trifásica de baja tensión, en tiempo real.

Los resultados experimentales reflejan que a condiciones nominales, los errores en la medición de parámetros eléctricos son inferiores al 5%, mientras que en la medición del THD el error puede llegar al 3%.

La principal limitación del prototipo se centra en la falta de exactitud al realizar mediciones de niveles de armónicos equivalentes a menos del 0,025% del valor RMS de la señal bajo condiciones nominales, esto debido a la baja resolución del conversor, el cual los hace muy sensibles a los errores de cuantificación.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es financiada por el Fondo Nacional para la financiación de la ciencia, la tecnología y la innovación “Fondo Francisco José de Caldas” del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación–COLCIENCIAS (Contrato: FP44842 – 321 2015).

## 8. REFERENCIAS

- [1] L. Baifen, G. Ying, “Research on power quality monitoring system based on DSP and GPRS”, 2nd Intern. Conf. on Cons. Electro., Comm. and Networks (CECNet), Yichang, China, 2012, pp. 3463-3465.
- [2] A. Abdullah, A. Sha'ameri, “Real-Time Power Quality Monitoring System Based On TMS320CV5416 DSP Processor”, Intern. Conf. on Power Electro. and Drives Syst., Lumpur, Malaysia, 2005, pp. 1668-1672.
- [3] X. Gao, Q. Zhou “A low consumption DSP based power analyzer”, The 2nd Intern. Conf. on Syst. and Inf. (ICSAI 2014), Shanghai, China, 2014, pp. 164-168.
- [4] M. Szmajda, K. Gorecki, J. Mroczka, “DFT algorithm analysis in low-cost power quality measurement systems based on a DSP processor”, 2007 9th Intern. Conf. on Electr. Power Quality and Utilisation, Barcelona, España, 2007.
- [5] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Std 1159, 2009.
- [6] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std 519, 1992.
- [7] Técnicas de ensayo y de medida. métodos de medida de la calidad de potencia, NTC-IEC 61000-4-30, 2012.
- [8] Técnica de ensayo y de medida. guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos, NTC-IEC 61000-4-7, 2013.
- [9] Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions, IEEE Std 1459, 2000.