

Medidor monofásico de la calidad de la energía eléctrica, basado en instrumentación virtual

Leonel Estrada Rojo

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato: ITSUR
l.estrada@itsur.edu.mx

Julio Ortega Alejos

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato: ITSUR
j.ortega@itsur.edu.mx

Carlos Alberto Fuentes Hernández

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato: ITSUR
ca.fuentes@itsur.edu.mx

Jesús Alexis Samano García

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato: ITSUR
j.alexis.samano.g@gmail.com

Resumen

La calidad de la energía se ha convertido en un tema de gran interés con el incremento de cargas no lineales interconectadas a la red eléctrica, tales como rectificadores controlados y no controlados utilizados en los drivers de motores, hornos eléctricos, iluminación, etc., los cuales inyectan armónicos a la red que provocan el mal funcionamiento o daño permanente de cargas críticas. En este documento se presenta el desarrollo de un sistema de medición de la calidad de la energía eléctrica para sistemas monofásicos; el cual está conformado por una tarjeta de adquisición de datos DAQ-6211 de National Instruments conectada por un puerto USB de una computadora, en donde a través de un instrumento virtual basado en el software LabVIEW, se monitorean parámetros tales como: energía, potencia, eventos de voltaje (bajo voltaje, sobrevoltajes

e interrupciones), Armónicos, THD voltaje, THD de corriente, V_{RMS} , I_{RMS} , frecuencia y fluctuaciones.

Palabra(s) Clave(s): Adquisición y procesamiento de datos, Calidad de la energía, Eficiencia Energética, Instrumentación Virtual.

1. Introducción

La calidad de la energía adquirió importancia rápidamente debido al impacto económico, reflejado en la facturación y en el daño permanente en los equipos industriales. Comisión Federal de Electricidad (CFE) puede aplicar una penalización máxima de hasta 120% de la facturación por un bajo factor de potencia [1]. Por otro lado, una mala calidad en la energía provoca daño permanente en equipo de cómputo, servidores, controladores industriales (PLCs, PACs, DRIVERS, etc), un desgaste prematuro de los conductores, sobrecarga de transformadores y líneas de distribución.

Estándares internacionales relativos a la calidad de la energía como el IEEE-519, IEC 61000 y EN 50160, establecen el límite de contenido armónico que puede inyectarse a la red. El estándar IEEE-1159 clasifica varios fenómenos electromagnéticos relativos a la calidad de la energía como son: bajos voltajes, sobre voltajes, interrupciones o variaciones de frecuencia [2], [3].

Para diagnosticar el estado de la calidad de la energía, se utilizan instrumentos de propósito específico para este fin. Con los medidores de la calidad de la energía, se detectan problemas en los sistemas eléctricos de potencia y a partir de las mediciones se pueden tomar acciones preventivas y correctivas, que pueden conllevar ahorros económicos significativos. Entre los principales fabricantes de medidores de calidad de la energía se encuentran: FLUKE, AEMC, HIOKI Y DRANETZ por mencionar algunos. Sin embargo, son instrumentos que requieren una inversión mínima de \$ 2500 dólares [4]. En aplicaciones donde se requiere monitorear de manera permanente la calidad de la energía en diferentes puntos, la inversión resulta muy significativa.

En años recientes se han propuesto otras soluciones para monitorear la calidad de la energía utilizando instrumentación virtual [5], [6]. Los sistemas de instrumentación virtual son ampliamente utilizados por su bajo costo, gran flexibilidad y reconfigurabilidad, así como por su alto rendimiento y ahorro considerable en tiempo de desarrollo; razón por la cual constituyen una evolución natural respecto a los sistemas tradicionales de instrumentación.

Debido a estas razones en el presente artículo se muestra el desarrollo de un instrumento virtual capaz de medir parámetros de la calidad de la energía en sistemas monofásicos basado en el software LabVIEW de National Instruments y utilizando el conjunto de herramientas de Electrical Power Suite de la misma compañía.

2. Métodos

La arquitectura del sistema propuesto para la medición de la calidad de la energía se muestra en la figura 1. El sistema está conformado por un sensor de corriente y uno de voltaje, acondicionamiento de señales, tarjeta de adquisición de datos y una computadora personal.

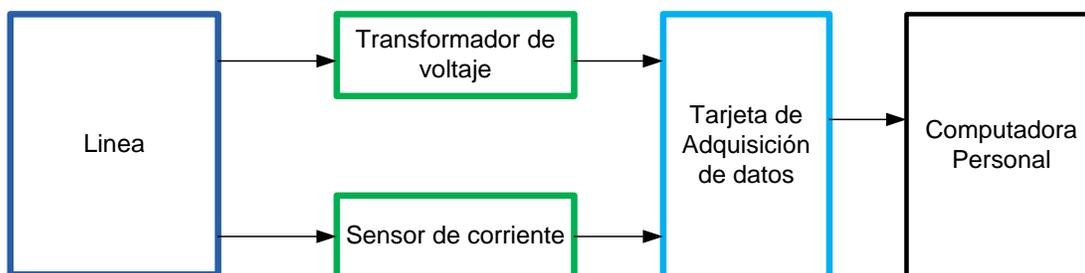


Figura 1.- Diagrama a bloques del medidor de calidad de la energía.

2.1 Adquisición y acondicionamiento de señales

La señal de voltaje de $127V_{RMS}$ es convertida por un transformador y un divisor de voltaje, a una señal de $5.18V_{RMS}$, esto debido a las limitaciones de voltaje de entrada a la tarjeta de adquisición de datos.

La corriente de línea es convertida a una señal de voltaje por un sensor de efecto hall CAS25 configurado de tal forma que entregue $75mV$ por cada ampere que circula a través del sensor, éste sensor es capaz de medir corrientes de hasta $50A$.

Los voltajes proporcionados por los acondicionadores de voltaje y corriente son adquiridos por la tarjeta de adquisición de datos DAQ6211 para la conversión analógica a digital, la cual tiene las siguientes características: entradas analógicas con 16 bits de resolución, un voltaje máximo de entrada de $\pm 10V$ y una tasa de muestreo de $250kS/s$ [7].

2.2 Creación del instrumento virtual

La señal digital es analizada, procesada y los resultados visualizados por la computadora personal. El componente central del sistema de medición es el software desarrollado en el lenguaje de desarrollo gráfico LabVIEW de National Instruments y utilizando el conjunto de herramientas de Electrical Power Suite de la misma compañía.

Se utilizó esta herramienta debido a que posee VIs que pueden usarse para crear aplicaciones que miden, analizan, monitorean e incluso pueden guardar datos y fenómenos relacionados a la calidad de la energía. Además de cumplir con estándares internacionales para medir parámetros de la calidad de la energía como son: IEC 61000-4-7:2009, IEC 61000-4-15:2010, IEC 61000-4-30:2008 entre otras [8].

En la figura 2 se muestra la interfaz gráfica de usuario del medidor de la calidad de la energía, este consta de dos controles que permiten seleccionar el canal de voltaje y de corriente en el que se deben de conectar la salida de los sensores y de cinco botones

que permiten la selección de las opciones para realizar las diferentes mediciones de la calidad de la energía.

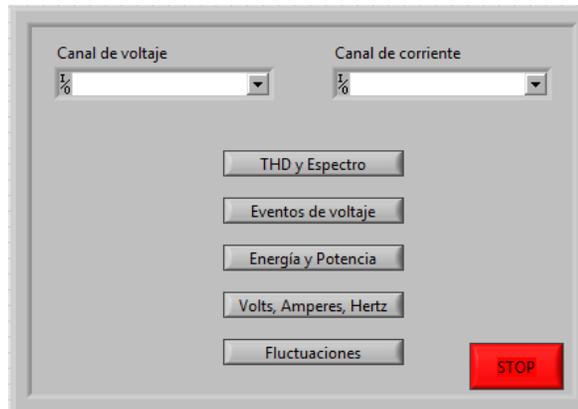


Figura 2.- Interfaz gráfica de usuario del medidor de la calidad de la energía.

En la figura 3 se muestra la interfaz gráfica de usuario de la primer opción, la cual permite la medición del THD de voltaje y corriente, ésta consta de dos indicadores que muestran el porcentaje de THD de corriente y de voltaje y de dos gráficas que muestran el espectro de frecuencias de las dos señales.

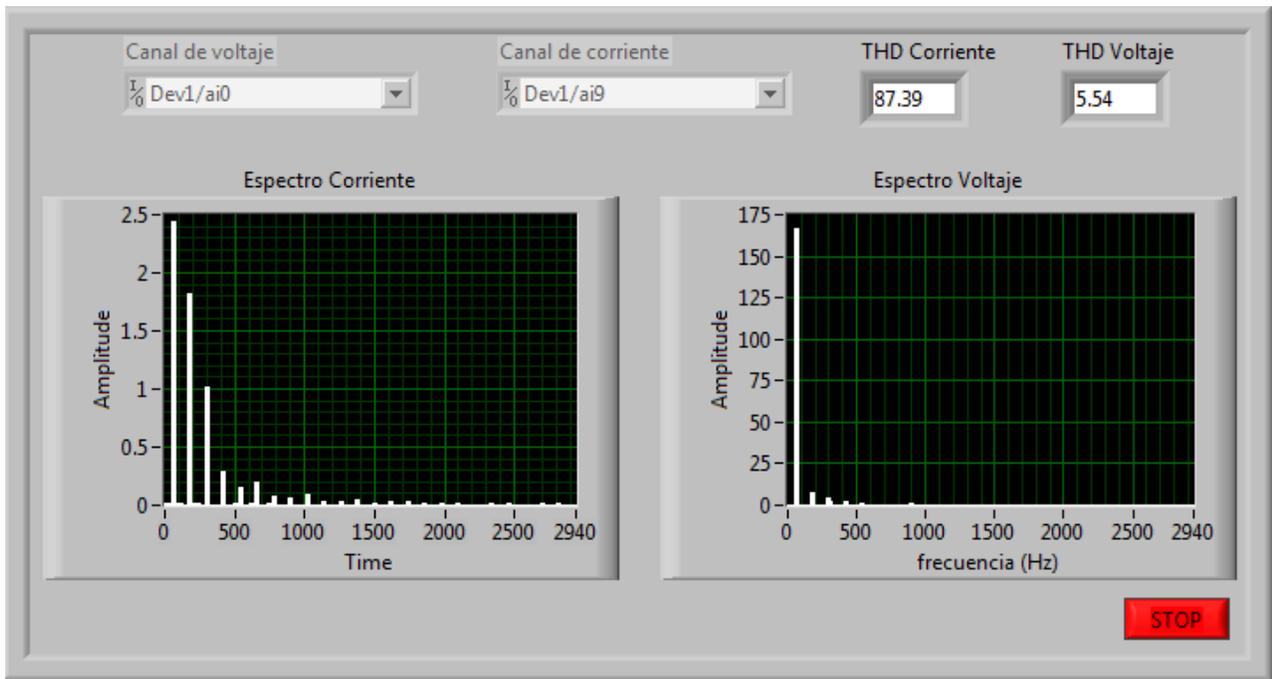


Figura 3.- Interfaz gráfica de usuario de la aplicación de THD de voltaje y corriente.

La interfaz gráfica de usuario de la segunda opción se muestra en la figura 4, ésta permite medir eventos de voltaje tales como: bajos voltajes, sobrevoltajes e interrupciones de voltaje, consta de dos cuadros que permiten la configuración de los límites de voltaje que la aplicación puede detectar, de la misma forma tiene dos arreglos que permiten saber cuándo y cual evento de voltaje ocurrió, también posee una gráfica que muestra el valor del voltaje RMS en el tiempo, lo que permite visualizar cuando ocurrió el fenómeno.

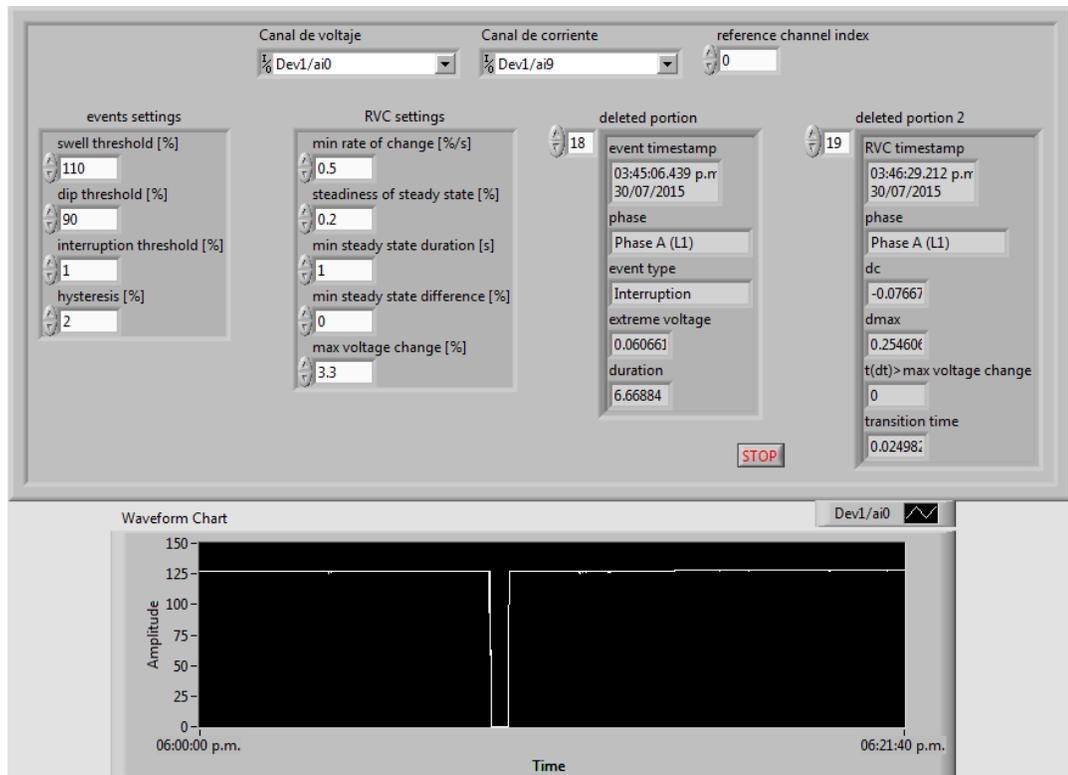


Figura 4.- Interfaz gráfica de usuario de la aplicación de registro de eventos de voltaje.

La tercera opción se muestra en la figura 5 y permite la medición de potencia, energía y factor de potencia; consta de dos gráficas y de dos indicadores en donde se obtienen la energía y potencia activa, reactiva, aparente y el factor de potencia.

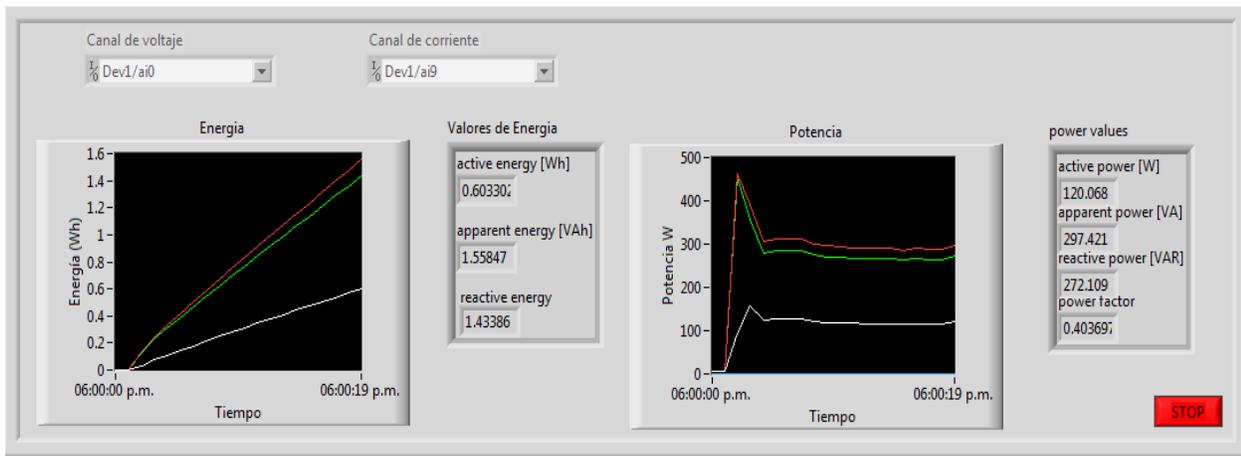


Figura 5.- Interfaz gráfica de usuario de la aplicación de Energía y Potencia.

La opción 4 se muestra en la figura 6 y permite la medición de V_{RMS} , I_{RMS} y frecuencia así como la visualización de las señales instantáneas de voltaje y corriente.

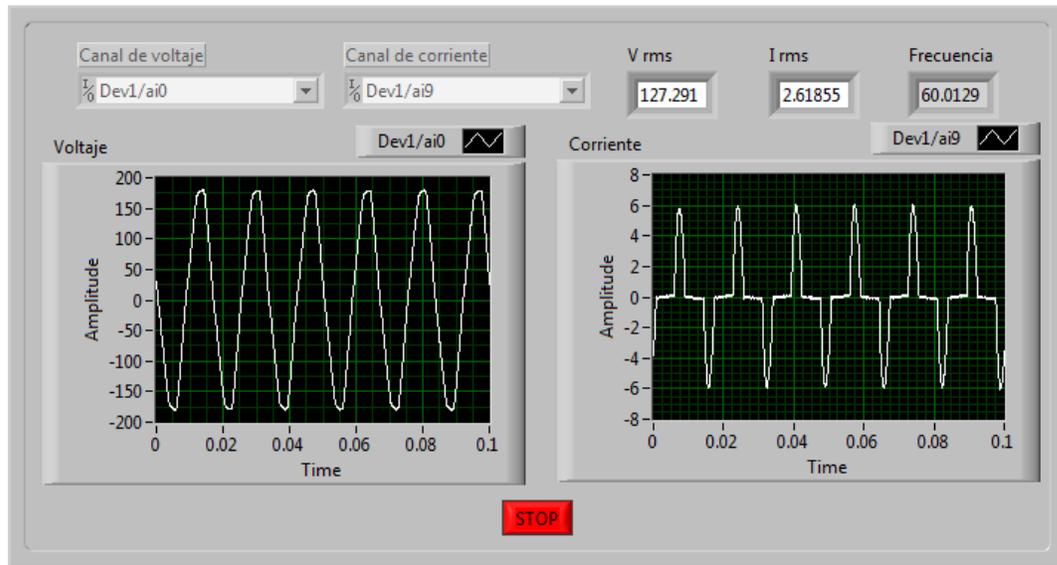


Figura 6.- Interfaz gráfica de usuario de la aplicación para medir V_{RMS} , I_{RMS} y Frecuencia.

La quinta opción se observa en la figura 7 y sirve para medir fluctuaciones de voltaje y corriente RMS visualizándolas en dos gráficas actualizadas cada segundo, con lo que se obtiene información histórica del comportamiento de las señales.

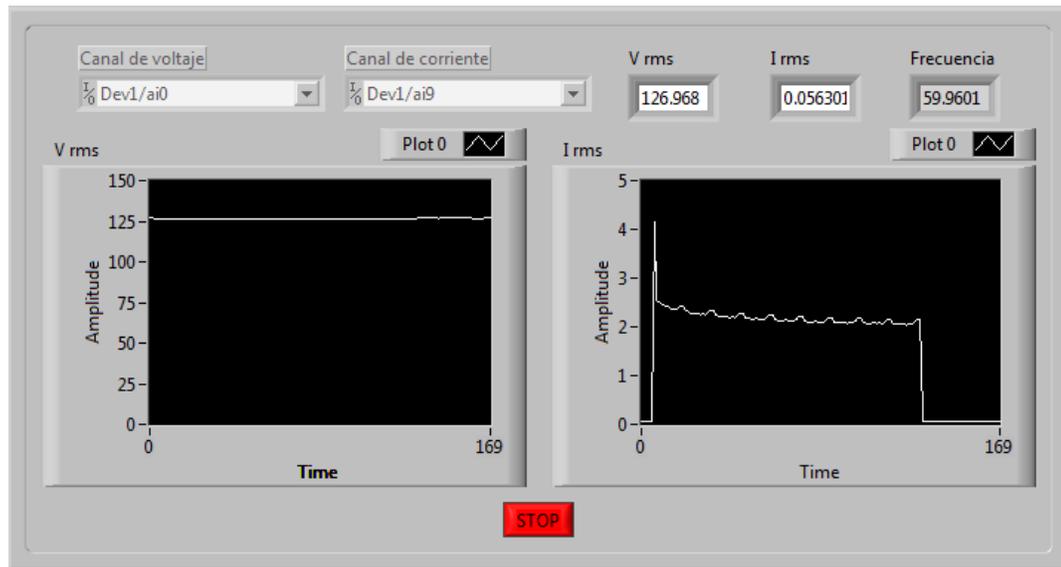


Figura 7.- Interfaz gráfica de usuario de la aplicación de fluctuaciones.

2.3 Programación del instrumento virtual

Las opciones mostradas en la sección anterior, poseen el esquema de programación general mostrado en el diagrama a bloques de la figura 8.

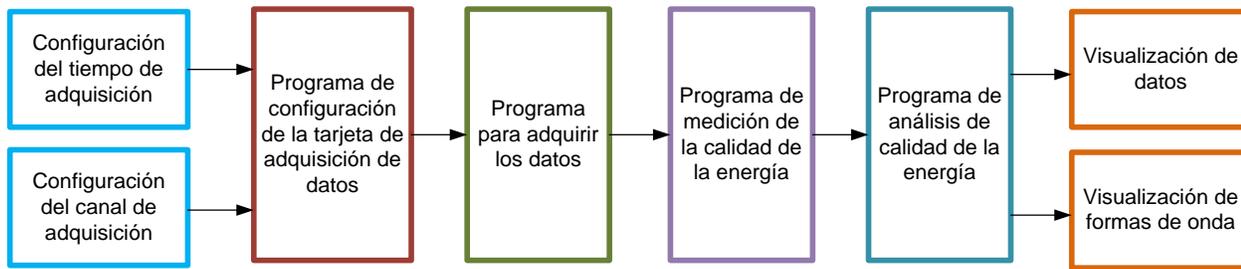


Figura 8.- Diagrama a bloques de general de las aplicaciones que forman el medidor de calidad de la energía.

De la figura 8 el programa de configuración de la tarjeta y el programa para adquirir los datos, se encargan de realizar una adquisición continua de las señales de voltaje y corriente. Los programas de medición y análisis de la calidad de la energía eléctrica llevan a cabo los cómputos estadísticos, análisis y visualización de los resultados de las señales medidas. En la figura 9 se muestra el programa para la configuración de los canales de adquisición de datos, de la etapa de configuración para la aplicación de eventos de voltaje. En el programa se configuran los canales para el sensado de voltaje y corriente de acuerdo a lo establecido en la tabla 1:

Parámetro		Canal para el sensado de voltaje:	Canal para el sensado de corriente:
Voltaje máximo de entrada.	V_{MAX}	10V	5 V
Voltaje mínimo de entrada.	V_{MIN}	-10V	-0V
Referencia de voltaje	Ref	Tierra del ADC	Tierra del ADC
Frecuencia de muestreo	fs	50 kHz	50 kHz

Tabla 1. Parámetros de configuración de los canales de adquisición de datos.

La frecuencia de muestreo se determinó para permitir detectar eventos de voltaje rápidos.

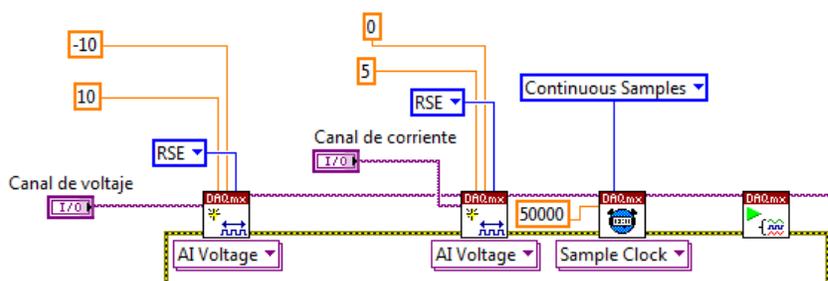


Figura 9.- Programa para la configuración de los canales de adquisición de datos.

La figura 10 muestra la etapa de adquisición y pre-procesamiento de datos. El número de muestras que se toman del canal de voltaje es de 10kS, después de que se adquiere el voltaje éste se multiplica por un factor de escalamiento de 24.5, de esta señal se obtiene el valor RMS y se gráfica. También se realiza un acondicionamiento de señal en el cual se identifican los ciclos de línea que han pasado utilizando el VI Resampling for Power Quality el cual se encarga de acomodar las muestras de voltaje y corriente tomadas por la tarjeta y se almacenan en un registro FIFO con el VI Build Data Blocks para después ser analizadas.

En la figura 11 se observa el lazo de procesamiento de los datos, aquí se sacan los datos almacenados en el registro FIFO y se detectan los cruces por cero de la señal adquirida con el VI Zero Crossing, esto sirve para detectar los cambios en el VRMS de entrada tanto de un ciclo para la detección de bajos voltajes, sobrevoltaje e interrupciones utilizando el VI Voltage Dips, Swells, and Interruptions, también se obtiene el valor RMS de medio ciclo con el VI RMS (Half Cycle) para la detección de cambios rápidos de voltaje haciendo uso del VI Rapid Voltage Changes.

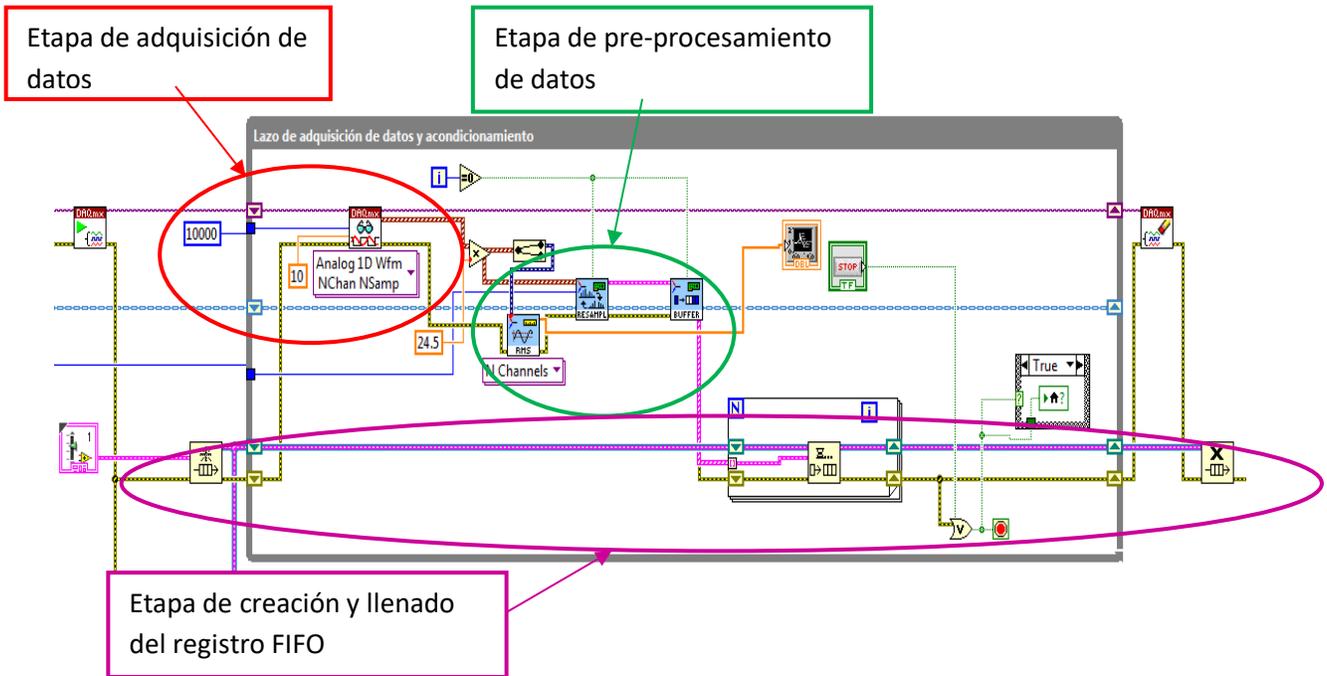


Figura 10.- Lazo de adquisición de datos y acondicionamiento de señal.

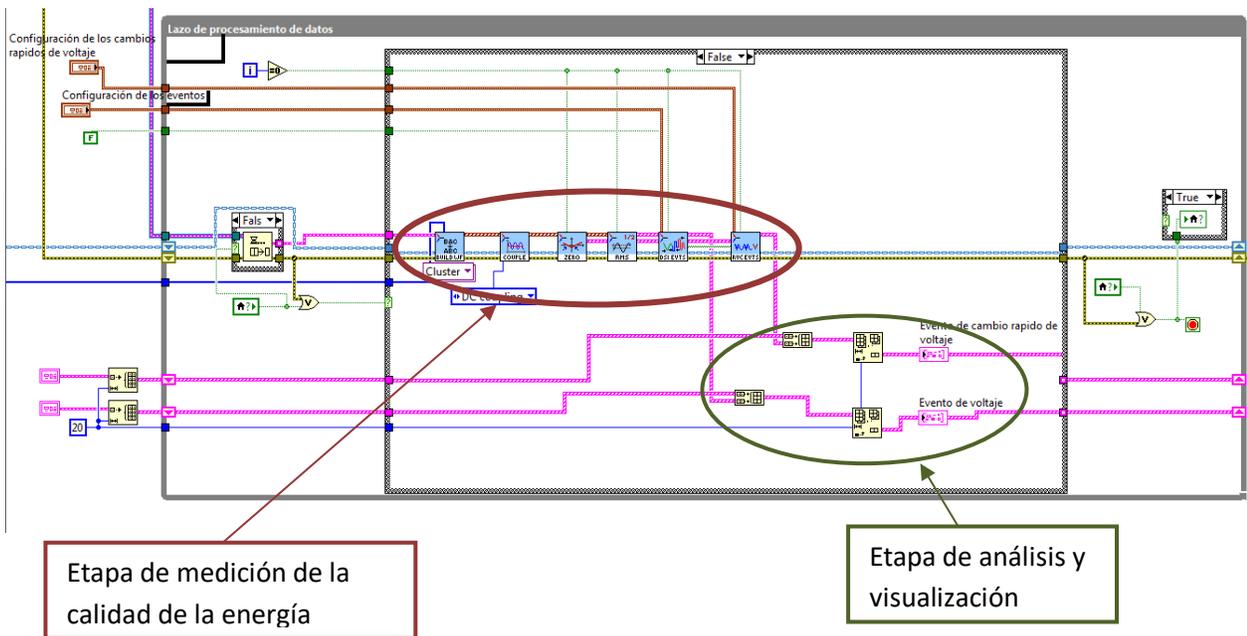


Figura 11.- Lazo de procesamiento de los datos.

Una de las razones para utilizar la electrical power suite de National Instruments es que cumplen con los métodos de medición requeridos por las normas internacionales, además de la facilidad de uso que representan y por lo tanto la rapidez de desarrollo de la aplicación se disminuyó de forma considerable.

3. Resultados

Para validar el funcionamiento del prototipo se probó con un motor de CD de imán permanente marca Baldor con las siguientes características: Voltaje de armadura: 90V, Corriente: 4.8A, Potencia: ½HP, que utiliza un controlador de velocidad modelo KBMD-240D de la marca KB Electronics basado en SCR. Los resultados obtenidos por el prototipo diseñado se compararon con resultados obtenidos por un equipo de la marca FLUKE 43B. En la figura 12 se muestran los resultados obtenidos con el FLUKE 43B del THD de voltaje y en la figura 13 el de corriente. Se puede observar que el resultado es un THD de 2.3% en el caso de voltaje y de 65.7% en el caso de corriente. Los resultados obtenidos el prototipo desarrollado son los mostrados en la figura 3.



Figura 12.- THD y espectro de Voltaje.



Figura 13.- THD y espectro de Corriente.

El equipo de medición FLUKE 43B no cuenta con la opción de realizar la medición de eventos de voltaje pero de la figura 4 se puede observar como ocurrió una interrupción y como el prototipo lo registra con una duración de 6.67s, a las 3:45:06 pm del día 30 de julio del 2015.

En la figura 14 se observan los resultados del FLUKE 43B, se puede ver que la potencia activa es de 137W, la potencia aparente es de 292VA, la potencia reactiva de 265VAR y un factor de potencia de 46%. Los resultados del prototipo son mostrados en la figura 5 obteniendo los siguientes resultados: potencia activa 120W, potencia aparente de 297.42VA, potencia reactiva de 272.1VAR y un factor de potencia de 40.3%. El equipo FLUKE 43B no permite la medición de Energía, los resultados del prototipo en un tiempo de 19s son los siguientes: energía activa 0.6Whr, energía aparente de 1.55VAhr, energía reactiva de 1.43VARhr.

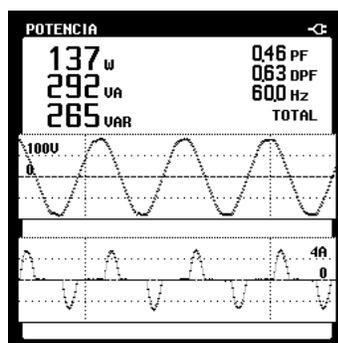


Figura 14.- Resultados de la medición de potencia en el equipo FLUKE 43B.

En la figura 15 se muestran los resultados de la medición de V_{RMS} , I_{RMS} , frecuencia y forma de onda instantánea obtenidos con el FLUKE 43B, los resultados son los siguientes: $V_{RMS}= 126.6V$, $I_{RMS}= 2.743A$ y frecuencia= 60.0Hz. Los resultados obtenidos por el prototipo se observan en la figura 6, y se obtuvieron los siguientes resultados: $V_{RMS}= 127.29V$, $I_{RMS}= 2.618A$ y frecuencia= 60.01Hz.

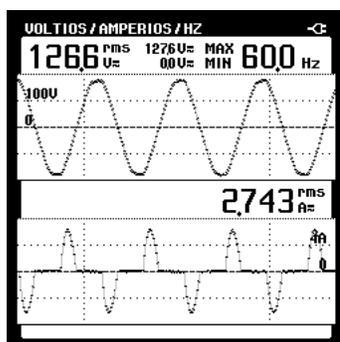


Figura 15.- Resultados de la medición de V_{RMS} , I_{RMS} y frecuencia en el equipo FLUKE 43B.

En la figura 16 se muestra una impresión de pantalla del equipo FLUKE 43B en la que se observa el comportamiento del voltaje y la corriente RMS en el tiempo, cabe resaltar que el equipo FLUKE fue configurado para realizar solo una adquisición de 4 min que es la más pequeña que tiene, por lo que es el tiempo de muestreo menor. En la figura 7 se muestran los resultados obtenidos por el aparato muestreando cada segundo, la principal diferencia es en la corriente ya que por el muestreo del equipo FLUKE 43B no alcanza a detectar la corriente de arranque que demanda el motor y el prototipo sí, mostrando en la gráfica una corriente máxima de aproximadamente 4.3A. En la tabla 2 se muestra una comparación entre las mediciones hechas por el FLUKE 43B y el prototipo diseñado.

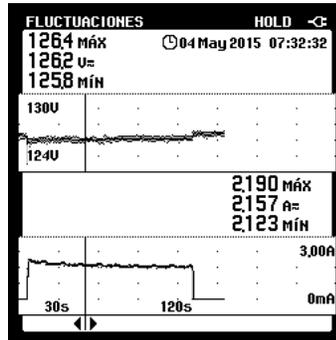


Figura 16.- Impresión de pantalla de la medición de fluctuaciones en el FLUKE 43B.

Medición	FLUKE 43B	Prototipo
THD Voltaje	2.3%	5.54%
THD Corriente	65.7%	87.39%
Potencia Activa	137W	120W
Potencia Aparente	292VA	297.42VA
Potencia Reactiva	265VAR	272.1VAR
Factor de Potencia	46%	40.3%
VRMS	126.6V	127.29V
IRMS	2.743 ^a	2.618 ^a
Frecuencia	60.0Hz	60.01Hz

Tabla 2.- Comparación de THD entre FLUKE 43B y prototipo.

De los resultados obtenidos se puede resaltar que hay una serie de discrepancias entre el equipo de medición de la calidad de la energía de la marca FLUKE 43B y el prototipo realizado especialmente en el THD de voltaje y corriente y en las mediciones de potencia, lo que provocó que se buscaran posibles causas: se revisaron las señales obtenidas del sensor de voltaje y se encontraron los resultados mostrados en la figura 17. Se observa una variación significativa entre el voltaje obtenido del sensor y el voltaje de línea, lo cual puede provocar alteraciones en la medida del THD.

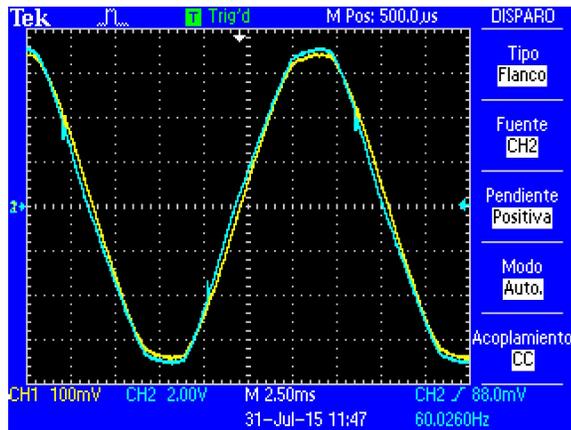


Figura 17.- Resultado del sensor de voltaje (canal 2) y voltaje de línea (canal 1).

En la figura 18 se muestran los resultados del sensor de corriente y la corriente de línea. Se observa un atraso de $500\mu\text{s}$ entre ambas señales, lo que puede afectar las mediciones realizadas por el equipo.

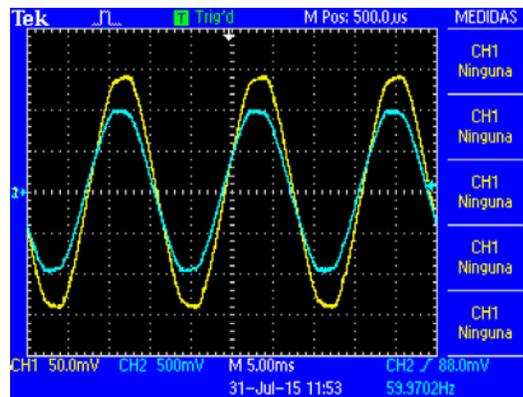


Figura 18.- Resultado del sensor de corriente (canal 2) y corriente de línea (canal 1).

4. Discusión

Este artículo presenta el desarrollo de un instrumento virtual que mide la calidad de la energía eléctrica en sistemas monofásicos. Realiza cinco mediciones diferentes que son: THD de voltaje y corriente, V_{RMS} , I_{RMS} , Frecuencia, potencia activa, potencia aparente, potencia reactiva, factor de potencia, energía activa, energía reactiva, energía aparente y eventos de voltaje tales como: bajo voltaje, sobrevoltaje e interrupciones. Además permite la visualización de las señales de voltaje y corriente de forma instantánea o RMS, el espectro de voltaje y corriente en magnitudes pico.

El sistema de medición de la calidad de la energía desarrollado en este artículo tiene ventajas como: interfaces gráficas amigables con el usuario, reconfiguración para incrementar las mediciones que se pueden realizar y simpleza en el diseño del hardware.

Se mostró el uso de las diferentes aplicaciones que forman al instrumento virtual, también se presentó el desarrollo del programa para la aplicación de eventos de voltaje, se mostraron resultados de la aplicación desarrollada y se compararon con un equipo comercial de la marca FLUKE 43B.

Algunas mejoras que se le pueden hacer al prototipo tienen que ver con los sensores para la adquisición de las señales de voltaje y corriente, ya que como se observa en la sección de resultados, las diferencias entre la salida de los sensores y las señales medidas, pueden afectar las mediciones realizadas por el equipo, también se propone una comparación contra otro equipo comercial, con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos.

Los resultados mostrados son muy promisorios para el desarrollo de este tipo de equipos utilizando instrumentación virtual, ahora es claro que el desarrollo de instrumentos se está moviendo en esta dirección.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la DGEST por el apoyo económico otorgado en la convocatoria 2014 de "Apoyo a la Investigación Científica, Aplicada y Desarrollo Tecnológico en los Programas Educativos de los Institutos Tecnológicos Descentralizados" para la realización de este proyecto y al ITSUR por las facilidades otorgadas.

Bibliografía

- [1] CFE. (2015, Julio) Factor de potencia. [Online].
<http://www.cfe.gob.mx/Industria/AhorroEnergia/Lists/Ahorro%20de%20energia/Attachments/3/Factordepotencia1.pdf>
- [2] IEEE, *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. Estados Unidos: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995.
- [3] Martin Jonathan Molano Clemente, "Desarrollo e implementación de un analizador de calidad de la energía con base en FPGA para motores trifásicos," Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Tesis de Maestría Diciembre 2013.
- [4] Final Test. (2015, Mayo) Potencia y calidad de la energía. [Online].
<http://www.finaltest.com.mx/category-s/110.htm>
- [5] Qiu Tang, Zhaosheng Teng, Siyu Guo, and Yaonan Wang, "Design of Power Quality Monitoring System Based on LabVIEW," in *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Changsha, China, 2009, pp. 292-295.
- [6] Wang Shenghui, Chao Yong, and Jin Xing, "Design of Power Quality Monitoring System based on LabVIEW," in *The 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling*, Paris, Francia, 2012, pp. 1026-1029.

- [7] National Instruments. (2015, Junio) NI USB-6211 Device Specifications. Documento.
- [8] National Instruments. (2015, Julio) NI LabVIEW Electrical Power Suite. [Online]. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/210502>
- [9] H. Wayne Beaty and Roger C. Dugan, *Electrical Power Systems Quality*. Chicago: McGraw Hill, 2004.