

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO QUE PERMITA LA GENERACIÓN DE ARMÓNICOS Y SU CORRECCIÓN PARA EL ANÁLISIS Y MONITOREO CON UN ANALIZADOR VIRTUAL DE RED

Carlos Rodrigo Fuertes Benalcázar

Noé Eduardo Ortiz Cevallos

Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas

rodrigofuertes.rf@gmail.com

eduort90v12@gmail.com

Resumen— En este trabajo se diseñó e implementó un módulo que facilita generar armónicos mediante el uso de una bomba de agua y un regulador de velocidad que modifica el control de fase (cruce por cero) y permite obtener un Third Harmonic Distortion (THD) de hasta el 20 % de distorsión armónica.

Para la corrección de estas distorsiones, se analizaron algunas soluciones que van desde la elaboración de filtros activos o dispositivos generadores de energía reactiva hasta filtros pasivos que están conformados por elementos resistivos inductivos y capacitivos (RLC) en sus diferentes configuraciones, entre ellas se eligió filtros sintonizados inductivo capacitivo (LC) por ser de respuesta selectiva y por tratarse de una aplicación didáctica con la que se logró eliminar una frecuencia o un armónico específico usando el fenómeno de resonancia de los mismos.

El análisis y monitoreo de los armónicos se realizó mediante el software Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW), dos sensores ZMPT101B (acondicionador de señal) y una data acquisition (DAQ) 6008 que son elementos que permiten adquirir datos en tiempo real y visualizar de forma local los armónicos eléctricos a través de una pantalla táctil que mostrará una interfaz gráfica de control; con botones de encendido de la bomba, conmutación de filtros, botón de paro y cuatro visores dos para formas de onda y dos para determinar la amplitud de distinción armónica. Los resultados que se obtuvieron se encuentran dentro de los límites establecidos por normas internacionales como la IEEE 519 y la Agencia de Regulación y Control De Electricidad (ARCONEL).

ABSTRACT

In this work we designed and implemented a module that facilitates the generation of harmonics through the use of a water pump and a speed regulator that modifies the phase control (zero crossing) and allows obtaining a Third

Harmonic Distortion (THD) of up to 20% harmonic distortion.

For the correction of these distortions, some solutions were analyzed, ranging from the elaboration of active filters or reactive energy generating devices to passive filters that are made up of inductive and capacitive resistive elements (RLC) in their different configurations, among which filters were chosen tuned capacitive inductive (LC) for being of selective response and because it is a didactic application with which it was possible to eliminate a specific frequency or harmonic using the phenomenon of their resonance.

The analysis and monitoring of the harmonics was performed using the Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW), two sensors ZMPT101B (signal conditioner) and a data acquisition (DAQ) 6008 that are elements that allow to acquire data in real time and visualize local form the electric harmonics through a touch screen that will show a graphical control interface; with pump power buttons, filter switching, stop button and four viewers two for waveforms and two to determine the amplitude of harmonic distinction.

The results obtained are within the limits established by international standards such as IEEE 519 and the Agency for Regulation and Control of Electricity (ARCONEL).

INTRODUCCIÓN

La calidad del servicio eléctrico en la actualidad se ha visto vulnerada por el considerable aumento de aparatos electrónicos conectados en los hogares y equipos de control en las industrias, que por ser cargas no lineales producen gran cantidad de perturbaciones en la red. La Agencia de Regulación y Control De Electricidad (ARCONEL) para el control de la calidad del servicio separa a esta en calidad del producto, del servicio técnico y del servicio comercial, dentro de la calidad del producto se encuentran aspectos como nivel de voltaje, perturbaciones de voltaje y factor de potencia.

A. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad se han acentuado con mayor severidad los efectos que producen los armónicos sobre los sistemas eléctricos y los equipos conectados a este, afectando principalmente a la frecuencia y la tensión eléctrica de operación, que se ven modificados ante la presencia de componentes armónicas.

El estudio y monitoreo del comportamiento de los armónicos en los sistemas eléctricos permite realizar un análisis y acciones correctivas para atenuar los efectos producidos por la presencia de estas distorsiones, evitando el daño de equipos conectados a un sistema eléctrico contaminado. Idealmente tanto la tensión en un sistema de suministro de energía eléctrica como la corriente resultante deben presentar formas de ondas perfectamente sinusoidales para evitar futuros cargos en su contra cuando se emitan sanciones correspondientes por parte del ARCONEL, por tanto, será factible y recomendable considerar en el diseño de filtros de armónicos en el caso de que estos superarán los límites permitidos.

Las distorsiones de la forma de onda se definen como una desviación del estado estable de una sinusoidal con respecto a la frecuencia del sistema, caracterizado por el contenido espectral de la desviación. Los armónicos pueden ser de voltaje o corriente, estos se representan como frecuencias múltiplos a la fundamental, originadas por cargas no lineales en un sistema de potencia. Las distorsiones de armónicos tienen un espectro con magnitudes y ángulos de fase de cada componente individual o de cada armónico. Existen fuentes de los armónicos producidos por cargas no lineales que a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal absorben una intensidad no sinusoidal, para simplificar este concepto, se considera que las cargas no lineales se comportan como fuente de intensidad que inyectan armónicos en la red. Las cargas armónicas no lineales, se encuentran en los receptores alimentados por electrónica de potencia los mismos que incluyen, variadores de velocidad de motores, rectificadores, convertidores, UPS, fuentes de voltaje para las computadoras personales, balastos electrónicos para lámparas fluorescentes entre otros menos comunes como, reactancias saturables, equipos de soldadura de arco, de punto y hornos de arco. Se puede implementar soluciones a través de elementos o equipos eléctricos que atenúen los armónicos, estos pueden ser: filtros activos, filtros pasivos de tipo sintonizados o pasa bajos; cancelación de armónicos a través de transformadores en desfase (que se conforman de uno conectado en “estrella” y otro en “delta” los

cuales producen un desfase de 30° en los voltajes de alimentación).

B. OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un módulo que permita generar y corregir armónicos para su análisis mediante el monitoreo con un analizador virtual de red.

C. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Investigar cuales son las fuentes de armónicos y tipos de orden de armónicos que se presentan en un sistema eléctrico.

Diseñar e implementar un módulo que permita el análisis de los armónicos presentes en una carga eléctrica para el dimensionamiento de filtros para su atenuación.

Adquirir datos de los armónicos presentes en una carga eléctrica mediante minería de datos en el programa LabVIEW y contrastación con los registros obtenidos en un analizador de red.

I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

- A. ARMÓNICOS
- B. FUENTES DE ARMÓNICOS
- C. EFECTOS DE LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS
- D. DISTORSIÓN ARMÓNICA
- E. LÍMITES DE ARMÓNICOS ACEPTABLES
- F. RESONANCIA
- G. FILTROS DE ARMÓNICOS
- H. SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE FILTROS SERIE
- I. DIMENSIONAMIENTO DE INDUCTORES
- J. TIPOS DE INDUCTOR A UTILIZAR EN EL BOBINADO
- K. INSTRUMENTOS PARA LA MEDICIÓN DE ARMÓNICOS
- L. INTRODUCCIÓN A LABVIEW

II. DESARROLLO

- A. INTRODUCCIÓN
- B. MÉTODOS DEL DISEÑO DEL MÓDULO
- C. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE FILTROS PARA ARMÓNICOS
- D. CONFIGURACIÓN DE FILTROS
- E. DISEÑO DE LA INTERFAZ

III. RESULTADOS

- A. MEDICIONES DE LAS INDUCTANCIAS EN LAS BOBINAS
- B. ARMADO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS
- C. COMPROBACION DE RESULTADOS

D. DESARROLLO

En esta aplicación se construye un generador de armónicos utilizando una bomba de agua controlada por un regulador de velocidad SCR a 110V que permitió simular el trabajo forzado de esta y obtener un THD_v de hasta 20%.

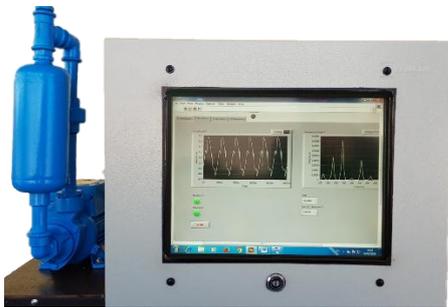


Figura 1. Modulo generador y corrector de armónicos

METODO DEL DISEÑO DEL MÓDULO

Se construyen los inductores, en base a reutilizar transformadores reductores de baja potencia, en los que se mantiene el núcleo y se enrolla el conductor de acuerdo con los cálculos de diseño.

Para realizar el control del sistema de generación y corrección, se utiliza la plataforma LabVIEW la misma que controlará la activación del sistema de bomba y los circuitos filtro a través de una interfaz programada, que servirá para el monitoreo del sistema.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE FILTROS PARA ARMÓNICOS

Se diseñan cuatro filtros sintonizados, que se constituyen de dos elementos reactivos conectados en serie, los mismos que serán conectados en paralelo e individualmente con la carga, para minimizar el contenido armónico generado por las cargas no lineales.

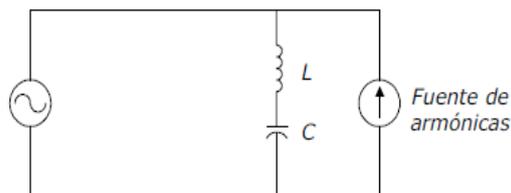


Figura 2. Filtro Sintonizado paralelo a la carga.

Fuente (Jacobó Garzón, Juárez Sosa, & Rodríguez Nuñez, 2008)

SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL FILTRO

El filtro que se utilice dependerá de los armónicos presentes en un sistema eléctrico y del orden de distorsión que se desee eliminar. Para lo cual se hace uso de la siguiente ecuación:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 60 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (1.1)$$

Fuente: (Torres, 2016)

DIMENCIONAMIENTO DE LA SECCION DEL NUCLEO

Para un núcleo de hierro tipo E la sección de la ventana estará dada por el producto de a*h*1

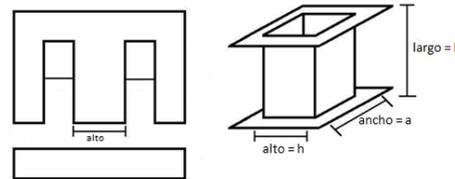


Figura 3 Chapas ferromagnéticas (Molano & Tique, 2013)

Lo que nos permite determinar la sección de la ventana del núcleo mediante la siguiente ecuación:

$$S = k * \sqrt{P} \quad (1.2)$$

Fuente: (Gallego, 2009)

Donde:

- K: coeficiente de la calidad de las chapas, varían entre (0.7 -1), para el caso sera k=0,8 (adimensional)
- S: sección del núcleo [cm²]
- P: Potencia [w]

Por Ejemplo:

Diseño del filtro para el tercer armónico

Para el diseño del filtro del 3^{er} armónico, se consideran los siguientes parámetros eléctricos, como se detalla a continuación:

- 1.6A, es la corriente máxima
- 120V, que es el voltaje de alimentación o de red.

h, corresponde al 3^{er} orden de armónico

$$\omega = 2\pi * 60\text{Hz}[\text{rad/seg}]$$

X_c , es la Reactancia del filtro

Q_c , es la potencia reactiva del capacitor

X_L , es la capacitancia del inductor

L , es el inductor

Se selecciona el valor del capacitor para el cual se va a diseñar el inductor, en este caso: $20\mu\text{F}$

Para el valor del capacitor de $20\mu\text{F}$, se tiene una reactancia capacitiva calculada por la ecuación 1.3 correspondiente

$$X_c = \frac{1}{2\pi * 60 * 20\mu\text{F}} \quad (1.3)$$

$$X_c = 132,63 \Omega$$

Se calcula el valor de la potencia capacitiva dada por la ecuación 1.4 correspondiente; para una alimentación de red de 120V .

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c} \quad (1.4)$$

$$Q_c = \frac{120^2}{132,63}$$

$$Q_c = 108,57 \text{ VAR.}$$

Para la frecuencia de resonancia la reactancia inductiva, se calcula como:

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} \quad (1.5)$$

$$X_L = \frac{132,63 \Omega}{3^2}$$

$$X_L = 14,74\Omega$$

La inductancia para la frecuencia fundamental de medirá por:

$$L = \frac{X_L}{w} \quad (1.6)$$

$$L = \frac{14,74\Omega}{2\pi * 60\text{Hz}}$$

$$L = 39,08 \text{ mH}$$

CONSTRUCCION DE LOS INDUCTORES

Inductor para el armónico de orden 3

Las dimensiones tomadas, para el núcleo en el primer inductor son, alto 3cm y ancho $2,2\text{cm}$, que corresponden a la ventana del núcleo de hierro, aplicado para este filtro; cuya sección calculada de acuerdo con la ecuación de 1.7 corresponde a:

$$S = 3\text{cm} * 2,2\text{cm} \quad (1.7)$$

$$S = 6,6 \text{ cm}^2$$

Remplazando los valores en la ecuación dada en 1.20 y despejando P , se tiene

$$P = 68,06 \text{ W}$$

La Potencia máxima del núcleo es $68,06\text{W}$

Para determinar el número de espiras de acuerdo con la ecuación 1.8, se tiene que:

$$N = \frac{V}{f * S * B * 4,4 * 10^{-8}} \quad (1.8)$$

$$N = \frac{120\text{V}}{180\text{Hz} * 6,6\text{cm}^2 * 8000\text{Gauss} * 4,4 * 10^{-8}}$$

$$N = 286,96 \text{ espiras}$$

Para determinar la sección del conductor de acuerdo con la ecuación 1.9, se toma una densidad de corriente de $3,5\text{A}$, según (Gallego, 2009) que corresponde a transformadores pequeños, por lo que la sección del conductor será:

$$s = \frac{I}{D} \quad (1.9)$$

$$s = \frac{A}{3,5\text{A}/\text{mm}^2}$$

$$s = \frac{A}{3,5\text{A}/\text{mm}^2}$$

$$s = 0,857 \text{ mm}^2$$

Para una sección de $0,857 \text{ mm}^2$, se debe consultar la TABLA 1.1, que nos proporciona el calibre corresponde a 18 AWG



Figura 4. Inductor

TABLA 1.1. Característica para determinar el calibre del conductor.

TABLA CARACTERISTICA PARA EL CALCULO DE TRANSFORMADORES						
(1) AW	(2) Diám.	(3) Secció	(4) N° Espira	(5) K_F	(6) Resistenci	(7) Cap

G	n	s	por km	a	.
12	2,053	3,31	29,4	5,13	6
13	1,826	2,63	23,3	6,49	5
14	1,628	2,08	18,5	8,17	4
15	1,45	1,65	14,7	10,3	3
16	1,291	1,31	11,6	12,9	2,5
17	1,15	1,04	9,2	16,34	2
18	1,024	0,82	7,3	20,73	1,6
19	0,911	0,65	5,7	26,15	1,2
20	0,811	0,52	4,6	32,69	1
21	0,723	0,41	3,6	41,46	0,8
22	0,643	0,33	2,8	51,5	0,6
23	0,573	0,26	2,2	56,4	0,5

- (1) Número AWG (AMERICAN WIRE GAUGE)
- (2) Diámetro en milímetros
- (3) Sección en milímetros cuadrados
- (4) Número de espiras por centímetro
- (5) Kilogramo por kilómetro
- (6) Resistencia en ohm por kilómetro
- (7) Capacidad de corriente en Amperios

Fuente: (Gallego, 2009)

PROGRAMACIÓN DE FLUJO DE DATOS

Para la visualización y adquisición de datos se utilizó el software LabVIEW, también conocido como lenguaje de programación G, o de tipo gráfica. La interfaz de usuario controla la activación de los relés que gobiernan a un grupo de contactores para la conmutación de los circuitos de generación y corrección, con ayuda de dos acondicionadores de señal ZMPT101B y una DAQ 6008 que son los encargados de mostrar el resultado en la pantalla frontal del módulo. (Fernández, 2013)

En la figura 4 se muestra la programación del proceso de generacion y correccion de armónicos.

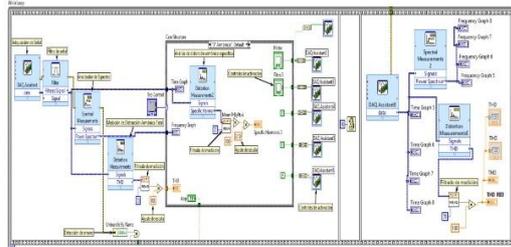


Figura 4. Programacion para la generacion y corrección

Los datos de la señal analógica son enviados a un Case Structure, como en la figura 5 donde inicialmente se muestran las gráficas para del tiempo y la frecuencia

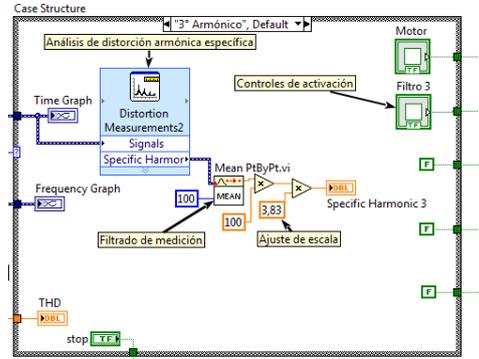


Figura 5 Selección de casos para el análisis de armónicos

Para realizar el análisis espectral de la señal, se utiliza la herramienta Spectral Measurement, de la paleta Signal Analysis del diagrama de bloques, en el que se configura como una medida de Potencia del Espectro, para una medición de magnitud lineal como se muestra en la figura 6

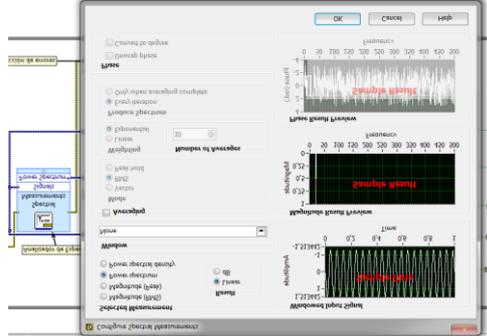


Figura 6 Configuración de la herramienta Spectral Measurements

La herramienta Distortion Measurements, permite medir la Distorsión Armónica Total THD y la específica de acuerdo con su configuración como se muestra en la figura 7

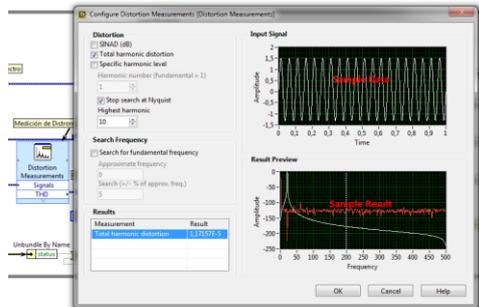


Figura 7 Configuración de herramienta para medir la Distorsión Armónica Total

Configuración de la herramienta de medición de la distorsión del tercer armónico.

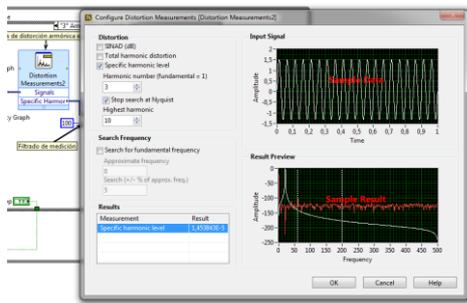


Figura 8 Configuración de la medición de distorsión del tercer armónico

La interfaz final diseñada que permitirá controlar la generación y corrección además de realizar el análisis de la distorsión se muestra en la Figura 9, en la misma el usuario puede navegar entre las pestañas de forma de seleccionar el filtro adecuado para corregir los armónicos de acuerdo con el diseño.

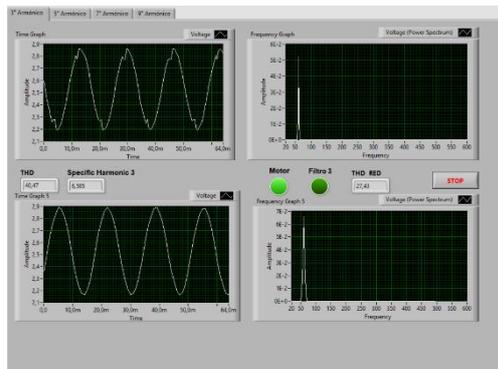


Figura 9 Panel frontal de la interfaz de usuario final

COMPROBACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la corrección de cada uno de los armónicos se muestran en las siguientes figuras.

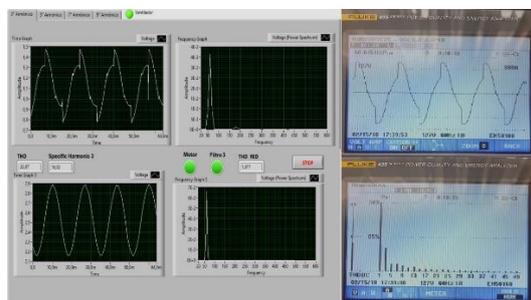


Figura 10 Medición del THD total ajustado para 20.87%

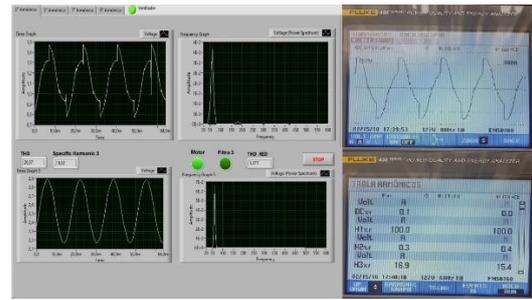


Figura 11 Medición para el tercer armónico, sin filtro, distorsión de 16.02 %

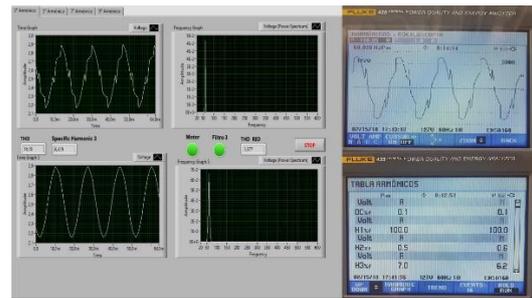


Figura 12 Medición del tercer armónico con filtro, distorsión del 6.42%.

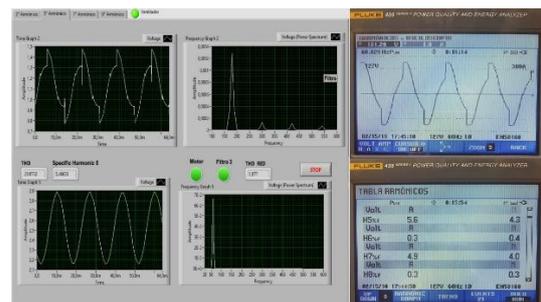


Figura 13 Medición del quinto armónico sin filtro, distorsión del 5.46%

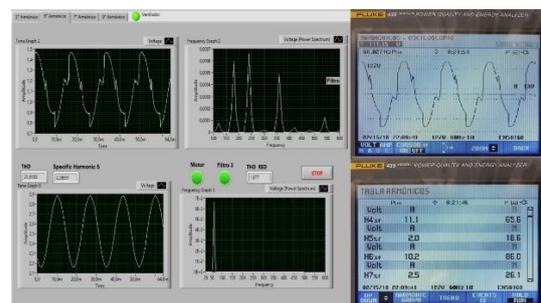


Figura 14 Medición del quinto armónico con filtro, distorsión del 2.26%

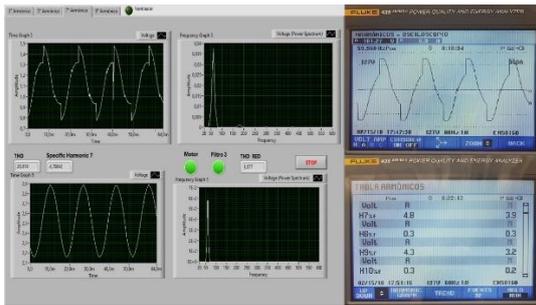


Figura 15 Medición del séptimo armónico sin filtro, distorsión del 4.70%

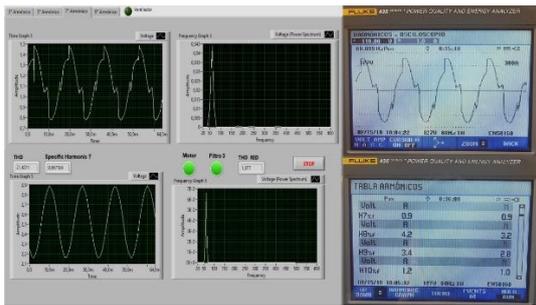


Figura 16 Medición del séptimo armónico con filtro, distorsión del 0.96%

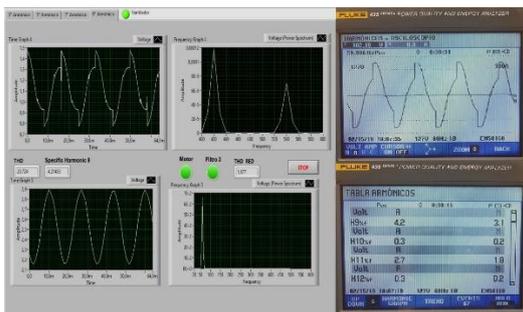


Figura 17 Medición del noveno armónico sin filtro, distorsión del 4.21%

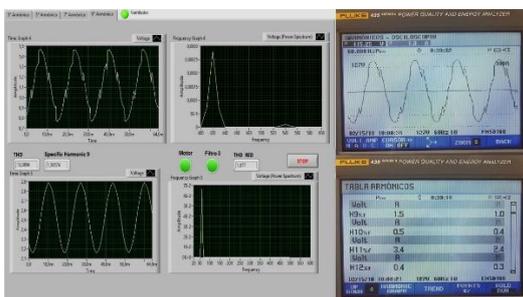


Figura 18 Medición del noveno armónico con filtro, distorsión del 1.56%

TABLA 1.2.
Corrección de armónicos

Parámetro para un THD del 20%	Distorsión sin filtro (%)	Distorsión con filtro (%)
3°	16.02	6.42
5°	5.46	2.26

7°	4.7	0.96
9°	4.21	1.56

Fuente. Autores Rodrigo Fuertes & Eduardo Ortiz

En la TABLA 1.2 se muestran los resultados finales de corrección de armónicos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

La investigación es determinante para conocer y comprender los efectos de la presencia de armónicos y sus principales fuentes generadoras, para posteriormente plantear una solución a este inconveniente causado por estos voltajes o corrientes parasitas.

La eficiencia del filtro construido depende en buena parte del tipo de núcleo en el cual se construyen los inductores y de equipos de medición de parámetros magnéticos, a pesar de no disponer de estos últimos se obtuvieron resultados aceptables al contrastarlos con el analizador de red.

Para que la generación de armónicos sea considerable y sus efectos fácilmente observables y medibles, se ha utilizado un variador de velocidad por control de fase que teóricamente posibilita cambiar los ángulos de disparo para el SCR y en consecuencia la onda de voltaje entre 0° y 180°, el dispositivo electrónico antes mencionado, incorpora un circuito de detección de cruce por cero lo que hace más fácil su aplicación sin la necesidad de implementar circuitos de sincronización.

El software LabVIEW, a través de sus herramientas de Análisis de Señal, ha posibilitado realizar las mediciones del espectro, para poder determinar la cantidad de armónicos presentes en la señal, así mismo posee herramientas de Medición de la Distorsión Armónica Total y específica entre otras que hace que la programación sea más intuitiva.

RECOMENDACIONES

Antes de utilizar el equipo es recomendable verificar el estado del cableado y sus componentes además de realizar una limpieza periódica del módulo para evitar averías que puedan destruir por cortocircuitos los componentes electrónicos del módulo

Durante la ejecución de las pruebas, es necesario activar el ventilador incorporado, debido a que los inductores generan calor y el exceso de este puede dañar los componentes, adicionalmente las características de magnetización del núcleo podrían cambiar.

Al realizar prácticas con el módulo didáctico se recomienda no sobrepasar periodos mayores a 60 minutos de trabajo continuo debido a que se dispone de una limitada refrigeración de la bomba al tener agua en recirculación de alrededor de 1.5 litros, cantidad que no es suficiente para mantener los valores de temperatura de trabajo normal.

Se debe realizar chequeos de los rodamientos de la bomba con una periodicidad de 3 meses, para prevenir daños permanentes en el motor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fernández, J. (2013). *LabVIEW*. México: Alfaomega.
- Gallego, H. (05 de 2009). *Scientia et Technica Año, No 41 Universidad Tecnologica de Pereira. ISSN 0122-1701*. Obtenido de *Scientia et Technica Año, No 41 Universidad Tecnologica de Pereira. ISSN 0122-1701*: <http://www.redalyc.org/pdf/849/84916680001.pdf>
- Garzón, J., Juárez, C., & Rodríguez, R. (2008). *Dimensionamiento y especificación de un filtro de un filtro de armónicas aplicado a la subestación tecnológico, Satt Valle*". Obtenido de *Dimensionamiento y especificación de un filtro de un filtro de armónicas aplicado a la subestación tecnológico, Satt Valle*": http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmli/bitstream/handle/132.248.52.100/9521/Tesis_Completa.pdf?sequence=1
- IEEE. (1992). *Recommended practices and requirements for harmonics control in electrical power systems*. ANSI/IEEE Standard 519.
- Jacobo Garzón, F., Juárez Sosa, C., & Rodríguez Nuñez, R. (2008). *Dimensionamiento y Especificaciones de un Filtro de Armónicos Aplicado a la Subestación Tecnológico SATT VALLE*. Mexico D.F.: Universidad Nacional Autónoma de Mexico.
- Torres, O. (2016). *Armónicos en los sistemas eléctricos de potencia*. Ecuador: EMELNORTE. Obtenido de *Armónicos en los sistemas eléctricos de potencia*: <http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/allamas/cursos/ueee/armonicas/07efectarm.pdf>.

SOBRE LOS AUTORES

Carlos R. Fuertes B. nació el 05 de Enero de 1984 en la Provincia del Carchi Cantón Bolívar Parroquia García Moreno. La instrucción primaria la realizó en la escuela Juan León Mera de la parroquia García Moreno, sus estudios secundarios los realizó en el Colegio Técnico Alfredo Albornoz Sánchez de la ciudad de Bolívar. Finalmente ingresó a la Universidad Técnica del Norte en la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico.

Noé Eduardo Ortiz Cevallos nació el 02 de Marzo de 1990 en la Provincia del Imbabura Cantón Ibarra Parroquia El Sagrario. La instrucción primaria la realizó en la escuela Martín Zumeta de la parroquia Priorato, sus estudios secundarios los realizó en el Instituto Tecnológico 17 de Julio de la ciudad de Ibarra. Finalmente ingresó a la Universidad Técnica del Norte en la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico.

