

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO

TEMA:

“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”

Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingenieros en
Mantenimiento Eléctrico

AUTORES:

CARLOS RODRIGO FUERTES BENALCÁZAR
NOÉ EDUARDO ORTIZ CEVALLOS

DIRECTOR:

ING. HERNÁN PÉREZ

IBARRA-ECUADOR

2018



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA
DEL NORTE**

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad. Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA IDENTIDAD:	DE	0401136726	
APELLIDOS NOMBRES:	Y	Carlos Rodrigo Fuertes Benalcázar	
DIRECCIÓN:		Ibarra, Gonzalo Gómez Jurado 4-83 y Elías Almeida	
EMAIL:		rodrigofuertes.rf@gmail.com	
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL	0990493604

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA IDENTIDAD:	DE	1003689179	
APELLIDOS NOMBRES:	Y	Noé Eduardo Ortiz Cevallos	
DIRECCIÓN:		Ibarra, Priorato sector Aloburo	
EMAIL:		eduort90v12@gmail.com	
TELÉFONO FIJO:	3050424	TELÉFONO MÓVIL	0985679553

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“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”
AUTOR (ES):	Carlos Rodrigo Fuertes Benalcázar, Noé Eduardo Ortiz Cevallos
FECHA: AAAAMMDD	2018/02
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Título de Ingenieros en Mantenimiento Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Hernán Pérez

1. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Nosotros, Carlos Rodrigo Fuertes Benalcázar, Noé Eduardo Ortiz Cevallos, con cédula de identidad Nro. 0401136726, 1003689179, en calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

2. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, febrero 2018

LOS AUTORES:



.....
Carlos Rodrigo Fuertes Benalcázar
C.C. 0401136726



.....
Noé Eduardo Ortiz Cevallos
C.C. 1003689179



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Nosotros, Carlos Rodrigo Fuertes Benalcázar, Noé Eduardo Ortiz Cevallos, con cédula de identidad Nro. 0401136726, 1003689179, manifestamos nuestra voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor (es) de la obra o trabajo de grado titulado: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO QUE PERMITA LA GENERACIÓN DE ARMÓNICOS Y SU CORRECCIÓN PARA EL ANÁLISIS Y MONITOREO CON UN ANALIZADOR DE RED VIRTUAL" que ha sido desarrollada para optar por el Título de Ingenieros en Mantenimiento Eléctrico en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, febrero 2018

LOS AUTORES:

(Firma).....
Carlos Rodrigo Fuertes Benalcázar
C.C. 0401136726

(Firma).....
Noé Eduardo Ortiz Cevallos
C.C. 1003689179



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DECLARACIÓN

Nosotros, Carlos Rodrigo Fuertes Benalcázar, Noé Eduardo Ortiz Cevallos, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; y que éste no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Técnica del Norte, según lo establecido por las Leyes de Propiedad Intelectual, Reglamentos y Normatividad vigente de la Universidad Técnica del Norte.

(Firma).....
Carlos Rodrigo Fuertes Benalcázar
C.C. 0401136726

(Firma).....
Noé Eduardo Ortiz Cevallos
C.C. 1003689179



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN

Certificamos que la Tesis: "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" ha sido realizada en su totalidad por los estudiantes: Carlos Rodrigo Fuertes Benalcázar, Noé Eduardo Ortiz Cevallos, con cédula de identidad Nro. 0401136726, 1003689179.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'H. Pérez', is written over a horizontal dotted line.

Ing. Hernán Pérez
DIRECTOR

DEDICATORIA

La inspiración más grande de la vida es mi hijo Mathias, por tal motivo le dedico este trabajo de investigación a él por ser mi fuente y luz en el camino para seguir adelante y luchar ante cualquier adversidad, a mi madre, hermano y abuelos por su constante apoyo y por querer mi bien en todo momento.

Rodrigo

Quiero dar las gracias a Dios por permitirme tener aún a mis padres y que vean el logro que conseguí que es fruto de su esfuerzo ya que día a día me inculcaron valores de dedicación y esfuerzo gracias.

Eduardo

AGRADECIMIENTO

Un fraterno agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte por permitirnos capacitarnos en esta prestigiosa institución, haciendo de nosotros personas capaces para desempeñarnos en el campo laboral sin ninguna dificultad, al Ing. Hernán Pérez por su ayuda constante en la elaboración y culminación de la tesis.

Rodrigo y Eduardo

TABLA DE CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO	¡Error! Marcador no definido.
DECLARACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
CERTIFICACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA	viii
AGRADECIMIENTO	ix
TABLA DE CONTENIDO	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
INTRODUCCIÓN	xix
CAPÍTULO 1	1
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Armónicos	1
1.1.1 Características de la distorsión armónica	2
1.1.2 Clasificación de los armónicos	2
1.2 Fuentes de armónicos	3
1.2.1 Hornos de Arco Eléctrico	3
1.2.2 Compensadores estáticos de potencia	4
1.2.3 Regulador de velocidad electrónico	4
1.2.4 Saturación de transformadores	4
1.2.5 Lámparas fluorescentes	4
1.2.6 Controladores de tensión	4
1.3 Efectos de la presencia de armónicos	5
1.3.1 Efecto en los motores	5
1.4 Distorsión armónica	8
1.5 Límites de armónicos aceptables, recomendaciones y normas	10
1.6 Resonancia	11
1.6.1 Resonancia serie	12
1.6.2 Resonancia paralelo	12
1.7 Filtros de armónicos	13
1.7.1 Filtros activos	14

1.7.2 Filtros pasivos.....	15
1.7.2.1 Filtros Serie	16
1.7.2.2 Filtros paralelos o Shunt.....	16
1.7.2.3 Filtros sintonizados.....	17
1.7.2.4 Filtros pasa alta	19
1.8 Selección y dimensionamiento del filtro serie	20
1.9 Dimensionamiento de inductores	20
1.9.1 Diseño y parametrización de inductores con núcleo de hierro.....	20
1.9.2 Diseño eléctrico.....	20
1.9.3 Determinación de la sección del núcleo	21
1.9.3.1 Determinación del número de espiras.....	21
1.9.4 Densidad de corriente eléctrica	22
1.10 Tipo de conductor a utilizar en el bobinado.....	22
1.11 Instrumento para la medición de armónicos	23
1.12 Introducción a LabVIEW.....	24
1.12.1 Programación de flujo de datos.....	24
1.12.2 Programación gráfica	24
1.12.3 Beneficios.....	25
1.12.4 Introducción a los datos	26
1.12.5 Introducción a DAQ - Adquisición de datos.....	26
1.12.6 Señales físicas de entrada / salida.....	27
1.12.7 Dispositivo DAQ / hardware	27
1.12.8 El software se ejecuta en una computadora	28
1.12.9 Su aplicación de software (Aplicación software)	28
1.12.10 Transductor	28
1.12.11. Señales	28
1.12.12 Acondicionador de señal de entrada (ZMPT101B)	29
1.12.12.1 Salida activa	31
1.12.13 Módulo de relé 5V de 8 canales.....	31
1.12.13.1 Descripción.....	32
CAPÍTULO 2	33
DESARROLLO.....	33
2.1 Introducción.....	33
2.3 Métodos de diseño del módulo	35
2.3.1 Características técnicas (bomba).....	35
2.3.2 Regulador de velocidad electrónico SCR AC 110/220V 4000W	35

2.3.3 Porcentajes individuales.....	36
2.4 Diseño y construcción de filtros para armónicos.....	37
2.4.1 Diseño del filtro para el tercer armónico.....	38
2.4.2 Construcción de los inductores.....	40
2.4.2.1 Inductor 1 armónico de orden 3.....	40
2.5 Configuración de filtros.....	41
2.5.1 Control del sistema de generación y eliminación de armónicos.....	42
2.6 Diseño de la interfaz.....	45
CAPÍTULO 3.....	53
RESULTADOS.....	53
3.1 Mediciones de las inductancias en las bobinas.....	53
3.2 Armado del sistema de generación y eliminación de armónicos.....	56
3.3 Comprobación de resultados.....	57
CAPÍTULO 4.....	63
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
4.1. Conclusiones.....	63
4.2. Recomendaciones.....	65
Referencias bibliográficas.....	67
ANEXOS.....	71
Anexo A Fotografías.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Componentes armónicos	2
Figura 2 Densidades de corriente de un mismo conductor	5
Figura 3 Circuitos a) resonancia paralela, b) resonancia serie	6
Figura 4 Vida útil de un transformador en función de $thdi$	6
Figura 5 Pérdidas eléctricas de un motor en función de THD_v	8
Figura 6 (a) Circuito (b) Onda de distorsión para el tercer armónico	9
Figura 7 Resultado de condensadores con resonancia serie	12
Figura 8 Resonancia paralelo en el barraje “a”	13
Figura 9 Filtro activo topología paralelo.	14
Figura 10 Filtro activo topología serie.	15
Figura 11 Filtro activo combinado (serie, paralelo).	15
Figura 12. Filtros pasivos	16
Figura 13 Filtro serie	16
Figura 14 Filtro sintonizado	18
Figura 15 Características de frecuencia del filtro sintonizado	19
Figura 16 Filtros pasa alta.....	19
Figura 17 Chapas ferromagnéticas	21
Figura 18 PC-Base de datos adquisición	27
Figura 19 Acondicionador ZMPT101B – estructura	30
Figura 20 Transformador de voltaje 120V – 5V – estructura	30
Figura 21 Acondicionador de señal de entrada (ZMPT101B)	30
Figura 22 Módulo de relé 5v de 8 canales	31
Figura 23 Diagrama de filtro atenuador de armónicos de corriente e indirectamente de armónicos de voltaje	33
Figura 24 Diagrama esquemático o electrónico del variador de velocidad	36
Figura 25 Medición de distorsión armónica.....	37
Figura 26 Diagrama eléctrico de los filtros sintonizados	37
Figura 27 Inductor	41
Figura 28 Configuración de filtros	42
Figura 29 Diagrama de adquisición y control del sistema de generación y eliminación de armónicos.....	42
Figura 30 Diagrama de posición de adquisición de señal con el sensor ZMPT101B	43
Figura 31 Diagrama De Proceso E Instrumentación	44

Figura 32 Diseño de la interfaz	45
Figura 33 Configuraciones de las salidas digitales	47
Figura 34 Configuración del puerto analógico.....	48
Figura 35 Diagrama de bloques total de la interfaz diseñada	48
Figura 36 Selección de casos para el análisis de armónicos.....	49
Figura 37 Configuración de la herramienta de filtrado de señal.....	50
Figura 38 Configuración de la herramienta spectral measurements.....	50
Figura 39 Configuración de herramienta para medir la distorsión armónica total	51
Figura 40 Configuración de la medición de distorsión del tercer armónico.....	51
Figura 41 Panel frontal de la interfaz de usuario final	52
Figura 42 HMI Frontal del módulo didáctico.....	52
Figura 43 Medición de inductancia mediante equipo NI ELVIS II	53
Figura 44 Inductancia medida para armónico orden 3.....	54
Figura 45 Inductancia medida para armónico orden 5.....	54
Figura 46 Inductancia medida para armónico orden 7	55
Figura 47 Inductancia medida para armónico orden 9.....	55
Figura 48 Módulo vista frontal	57
Figura 49 Medición del THD total ajustado para 20.87%.....	58
Figura 50 Medición para el tercer armónico, sin filtro, distorsión de 16.02 %.....	58
Figura 51 Medición del tercer armónico con filtro, distorsión del 6.42%.....	59
Figura 52 Medición del quinto armónico sin filtro, distorsión del 5.46%.....	59
Figura 53 Medición del quinto armónico con filtro, distorsión del 2.26%	60
Figura 54 Medición del séptimo armónico sin filtro, distorsión del 4.70%.....	60
Figura 55 Medición del séptimo armónico con filtro, distorsión del 0.96%.....	61
Figura 56 Medición del noveno armónico sin filtro, distorsión del 4.21%.....	61
Figura 57 Medición del noveno armónico con filtro, distorsión del 1.56%	62
Figura 58 Medición de la sección del núcleo de la altura.....	71
Figura 59 Medición de la sección del núcleo del ancho	71
Figura 60 Construcción de la bobina del inductor	72
Figura 61 Uso del NI ELVIS	72
Figura 62 Conexión de los inductores al NI ELVIS	73
Figura 63 Verificación de una correcta conexión a los puertos.....	73
Figura 64 Toma de lectura en mh de los inductores	74
Figura 65 Paro del software y posterior desconexión de los inductores	74
Figura 66 Montaje de contactores.....	75
Figura 67 Montaje de inductores y capacitores (filtros).....	75
Figura 68 montaje de barra de relé	76

Figura 69 Sujeción de canaleta.....	76
Figura 70 Montaje de regulador de velocidad y breaker	77
Figura 71 Perforación de orificios para ventilación	77
Figura 72 Montaje del ventilador	78
Figura 73 Alimentación de filtros	78
Figura 74 Conexión de dispositivo de control de contactores	79
Figura 75 Montaje del hmi al módulo	79
Figura 76 Sujeción de cables	80
Figura 77 Instalación del Pc al módulo	80
Figura 78 Módulo terminado	81
Figura 79 Comparación de dos formas de onda fundamental entre labview y analizador fluke	81
Figura 80 Comparación de ondas del 3 ^{er} armónico	82
Figura 81 Comparación de ondas del 5 ^{to} armónico	82
Figura 82 Comparación de ondas del 7 ^{mo} armónico	83
Figura 83 Comparación de ondas del 9 ^{no} armónico.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Resumen de los tipos de cargas y los problemas más comunes	5
Tabla 1.2. Resumen de los efectos por presencia de armónicos	5
Tabla 1.3. IEEE 519 límites de distorsión de voltaje THDVN.....	10
Tabla 1.4. Límites de armónicos de tensión según conelec (REG. 004/01)	11
Tabla 1.5. Característica para el cálculo de transformador.....	23
Tabla 2.6. Rendimiento	35
Tabla 2.7. Características técnicas del capacitor	38
Tabla 2.8. Cálculos de los tipos de orden de armónicos.....	40
Tabla 2.9. Resume de características diseño, cálculos, de cada uno de los inductores.	41
Tabla 2.10. Distribución lógica de puertos	47
Tabla 3.11. Resumen de los valores teóricos y medidos de los inductores.....	56
Tabla 3.12. Error porcentual.....	56
Tabla 3.13. Corrección de armónicos	62

RESUMEN

En esta investigación se realiza un análisis de la generación y corrección de las principales fuentes de distorsión armónicas encontradas comúnmente en las redes eléctricas domiciliarias y algunas industriales como son las generadas por los motores eléctricos y dispositivos electrónicos, información que permite iniciar el proceso de construcción de un equipo que genere estas distorsiones, mediante un regulador de velocidad que usa silicon controlled rectifier (SCR) bidireccional para el control de fase.

Para la corrección de armónicos, se analizan algunas soluciones que van desde 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 escoge los sintonizados por ser una aplicación didáctica con la que se puede eliminar una frecuencia específica o un armónico específico usando el fenómeno de resonancia de los mismos que hace selectiva su respuesta. En la implementación del filtro, al usarse elementos inductivos y capacitivos (LC), se selecciona un capacitor de tipo comercial y se diseña el inductor que trabajará a la frecuencia específica, el que se construye usando núcleos comerciales y se comprueba su eficiencia para los cuatro primeros armónicos impares, analizando la red con un equipo comercial de la marca Fluke, donde se verifica que cumplen con el objetivo de reducir armónicos a valores normalizados dentro de la regulación de la Agencia de Regulación y Control De Electricidad (ARCONEL).

Para realizar el monitoreo, control y corrección de los armónicos de forma didáctica, se ha diseñado una interfaz de usuario o Human Machine Interface (HMI), usando el programa Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW) de National Instruments desde donde se hace la adquisición de la señal usando un acondicionador de voltaje y comunicación mediante la data acquisition (DAQ) 6008, se realiza a esta señal un filtrado y análisis espectral para determinar la distorsión armónica total e individual, por lo que se instala un sistema embebido para realizar este proceso mediante un computador incorporado desde donde se visualiza localmente o incluso remotamente al incluir una red de datos.

Para probar la eficiencia de los filtros de armónicos, se comprueba la reducción de las distorsiones totales e individuales con un equipo comercial en el que se concluye que dicha reducción cumple con los objetivos planteados donde lo principal es construir un módulo

didáctico que cumpla con estas características y se hacen recomendaciones para la construcción de inductores y filtros en general.

ABSTRACT

This research is an analysis of the generation and correction of the main sources of harmonic distortion commonly found in home electrical networks and some industrial such as those generated by electric motors and electronic devices, so that a team is built that generates these distortions, by means of a speed regulator that uses bidirectional silicon controlled rectifier (SCR) for phase control.

For the correction of harmonics, some solutions are analyzed, ranging from active filters or reactive energy generating devices to passive filters that are formed by resistive, inductive and capacitive elements (RLC) in their different configurations, among which the tuned ones are chosen for being a didactic application with which you can eliminate a specific frequency or a specific harmonic using the phenomenon of resonance of them that makes your response selective. In the implementation of the filter, when using inductive and capacitive elements (LC), a commercial type capacitor is selected and the inductor is designed to work at the specific frequency, which is built using commercial cores and its efficiency is checked for the four first odd harmonics, analyzing the network with a commercial team of the Fluke brand, where it is verified that they fulfill the objective of reducing harmonics to standardized values within the regulation of the Electricity Regulation and Control Agency (ARCONEL).

To perform the monitoring, control and correction of the harmonics in a didactic way, a user interface or Human Machine Interface (HMI) has been designed, using the Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW) of National Instruments from where the acquisition is made of the signal using a voltage conditioner and communication through the data acquisition (DAQ) 6008, this signal is made a filtering and spectral analysis to determine the total and individual harmonic distortion, so an embedded system is installed to perform this process using a built-in computer from where it is displayed locally or even remotely when including a data network.

To test the efficiency of the harmonic filters, the reduction of the total and individual distortions with a commercial team is verified in which it is concluded that said reduction meets the proposed objectives where the main thing is to build a didactic module that meets these

characteristics and recommendations are made for the construction of inductors and filters in general.

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. El 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.

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).

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.

Formulación del Problema

¿Cómo diseñar e implementar un módulo que permita la generación de armónicos y su corrección para el análisis y monitoreo con un analizador virtual de red?

Delimitación

Delimitación Temporal

La investigación teórico-práctica se desarrollará en el transcurso desde el mes de octubre 2017 hasta el mes de febrero 2018, para ello se ha tomado en cuenta el tiempo estimado de prueba para el correcto funcionamiento del módulo didáctico.

Delimitación Espacial

El presente diseño y construcción del módulo de generador de armónicos se desarrollará en la provincia de Imbabura, cantón Ibarra, parroquia del Sagrario, en la “Universidad Técnica Del Norte”, en la FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS (FICA), específicamente en el laboratorio de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico (CIMANELE).

Objetivos

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.

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.

Justificación

Para atenuar la presencia de armónicos se utiliza filtros conectados al sistema eléctrico que evitan que estos se propaguen hacia la red eléctrica de distribución para evitar que existan resonancias que puedan traer consecuencias no deseadas y que son perjudiciales para la operación de equipos eléctricos, la presencia de armónicos en un sistema eléctrico puede acarrear condiciones desfavorables, entre los cuales se encuentran pérdidas elevadas de energía eléctrica en las redes, baja calidad de servicio eléctrico, aumento de temperaturas en transformadores y equipos eléctricos lo que provoca la disminución de su vida útil.

CAPÍTULO 1

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Armónicos

Los armónicos son voltajes y/o corrientes parásitas presentes en un sistema eléctrico que tienen deformaciones con respecto a la forma de onda senoidal, las mismas que resultan del múltiplo entero de la fundamental. Así, por ejemplo, en sistemas con frecuencia de 60 Hz y cargas monofásicas, los armónicos característicos serán, el tercer [180 Hz], quinto [300 Hz], y séptimo [420 Hz]. (Tejada, 2007) Los armónicos de rango par (2,4, 6, 8...) no suelen estudiarse ya que se anulan gracias a la simetría de la señal alterna.

Las formas de onda distorsionadas pueden ser descompuestas en una suma de la señal de frecuencia fundamental y los armónicos (Benavides, 2011). Los armónicos se definen habitualmente con los datos más importantes que les caracterizan, que son:

Amplitud: hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico,

Orden: hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental 60Hz

La distorsión armónica se origina debido a las características no lineales de los equipos y cargas conectados a un sistema eléctrico, tales como arranques de motor, conmutación de capacitores, efectos de tormentas o fallas por cortocircuito, además de condiciones permanentes que están relacionadas con armónicos de estado estable (Téllez, 2012).

La presencia de esta corriente en el sistema eléctrico genera inconvenientes como son la pérdida de la potencia activa, fallas en la medición, deterioro en aislamientos, daño en dieléctricos, pérdida de vida útil, así como inconvenientes en la coordinación de protecciones entre otras.

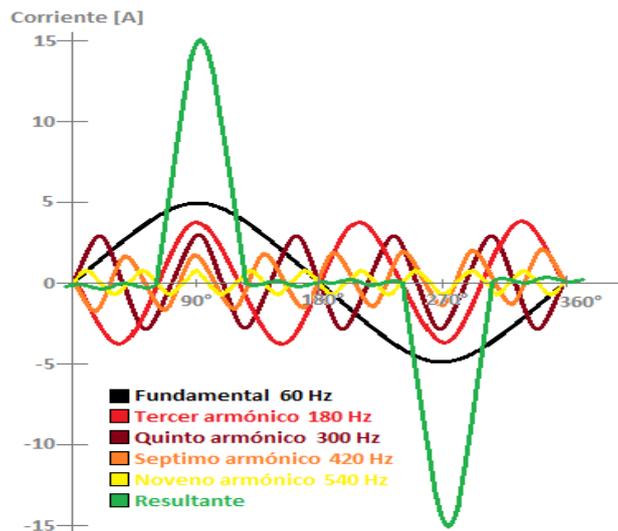


Figura 1 Componentes armónicos
Fuente: (Molano & Tique, 2013)

1.1.1 Características de la distorsión armónica

Cuando la onda de tensión o de corriente medida en cualquier punto de un sistema eléctrico se encuentra distorsionada, con relación a la onda sinusoidal fundamental, que idealmente deberíamos registrar, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicas.

Para que una señal se considere como distorsión armónica, las deformaciones deben de cumplir las siguientes condiciones:

- Que la señal tenga valores definidos dentro de un intervalo, lo que implica que la energía contenida es finita
- Que la señal sea periódica, teniendo la misma forma de onda en cada ciclo de la señal de corriente o voltaje.
- Que la señal sea permanente, cuando la distorsión armónica se presenta en cualquier instante de tiempo, es decir, que no es pasajera (Téllez, 2012)

1.1.2 Clasificación de los armónicos

Los armónicos poseen un orden, frecuencia y secuencia, partiendo de que la fundamental es de 60Hz, el número de orden determina el número de veces que la frecuencia de ese armónico es mayor que la fundamental: 1,2,3,4,5,6, 7...n.

También se define como la relación que hay entre la frecuencia del armónico [fn] y la frecuencia fundamental [$f60$] (Fourier, 2012)

$$n = \frac{fn}{f60} \quad (1.1)$$

La frecuencia se define como el resultado de multiplicar el número de orden del armónico por la fundamental [60Hz]. (Fourier, 2012)

$$fn = n * f60 \quad (1.2)$$

Dependiendo de su secuencia y rotación, las armónicas presentan diferentes efectos:

- SECUENCIA [+]: Rotación directa, puede producir calentamiento, rotura de circuito, entre otros.
- SECUENCIA [-]: Rotación inversa, produce un freno en el motor, además calentamiento de conductores y por ende problemas en el motor.
- SECUENCIA [0]: No tiene sentido de rotación, pero puede causar calentamiento. La secuencia de armónicas cero [múltiplos de la 3°] son llamados "Triples" (Acevedo, 2001)

1.2 Fuentes de armónicos

Al conectar cualquier forma de carga que no sea lineal al sistema eléctrico provocará distorsión armónica.

La norma IEEE 519-1992, concerniente a prácticas recomendadas y exigencias para la vigilancia de armónicos en sistemas eléctricos, congrega de forma general atendiendo al tipo de carga no lineal y de acuerdo con los tipos de dispositivos utilizados en:

- Electrónicos de potencia
- Dispositivos productores de arcos eléctricos
- Dispositivos ferromagnéticos. (Téllez, 2012)

1.2.1 Hornos de Arco Eléctrico

Al ser máquinas de magnitud variable debido a que el arco eléctrico cambia de un ciclo de trabajo a otro, la tensión y la corriente no es periódica y su análisis revela la presencia de armónicos y sub armónicos de orden 2° hasta el 7^{mo} (Reyes, 1996, pág. 13)

1.2.2 Compensadores estáticos de potencia

Debido a que utilizan tiristores para el control de la potencia reactiva, son elementos sensibles a la generación de armónicos, ya que su impedancia disminuye con la frecuencia y su inclusión en la red, producirá resonancia con otros elementos inductivos presentes en ella. (Carrillo, 2003, pág. 7)

1.2.3 Regulador de velocidad electrónico

Con el control de fase directa que permite recortar la señal alterna de la onda sinusoidal del voltaje, ya no aparece la misma cantidad de corriente que se presentaba sobre la carga con la tensión alterna completa, por lo tanto, tampoco se genera la misma potencia. Mediante la variación de voltaje y potencia se puede presentar el diferente orden armónico.

1.2.4 Saturación de transformadores

Debido a que la relación entre la densidad de flujo y la excitación magnética del material ferromagnético no es lineal, se obtiene una corriente de magnetización muy alta, por consiguiente, se incrementará la tensión nominal y se originan armónicos por saturación del núcleo, principalmente de orden 3

1.2.5 Lámparas fluorescentes

Por ser elementos de descarga gaseosa, necesitan de un balasto para entregar una alta tensión e iniciar la descarga de la corriente en sus electrodos, la tensión en el balasto disminuye y la corriente aumenta, al ser el balasto un dispositivo ferromagnético que requiere corriente de excitación, las lámparas fluorescentes se convierten en fuentes generadoras de armónicos de orden 3 (Turégano, 2012).

1.2.6 Controladores de tensión

Son unidades de control a tensión reducida, compuestos por un switch de tiristores que limitan la corriente de arranque en un motor, este proceso generará armónicos (Garzón, Juárez, & Rodríguez, 2008)

TABLA 1.1.
Resumen de los tipos de cargas y los problemas más comunes

Tipo de Carga	Armónicos Generados	Comentarios
Transformador	orden par e impar	componentes en CC ó CD
Motor asíncrono	orden impar	ínter y subarmónicos
Lámpara de descarga	3° + impares	puede llegar al 30% de la fundamental
Soldadura de arco	espectro variable	no lineal-asimétrico
Hornos de arco CA	espectro variable inestable	no lineal-asimétrico
Rectificadores con filtro inductivo	$h = K * P \pm 1$ $I_h = I_1/h$	SAI - variador V
Rectificadores con filtro capacitivo	$h = K * P \pm 1$ $I_h = I_1/h$	alimentación equipos electrónicos
Cicloconvertidor	variables	variador V
Reguladores PW	variables	SAI (sistema de alimentación ininterrumpida) - convertidor CC - CA

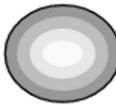
Fuente: (Turégano, 2012)

Es de importancia destacar que los armónicos llegan a convertirse en una situación de estado estable, pero no se deben de asociar a fenómenos temporales (MT., D., & JF., 2017)

1.3 Efectos de la presencia de armónicos

“Los armónicos están presentes en formas de onda de tensión o de corriente en mayor o menor intensidad, que se encuentran en las redes de distribución de energía eléctrica, los efectos que genere en los equipos los armónicos parten de la naturaleza de cada uno y de su particularidad que presentan” (Balcells, Barra, & Autonell, 2010, pág. 143),:

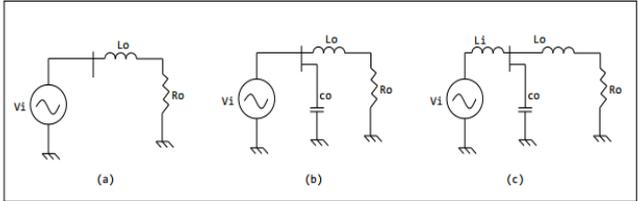
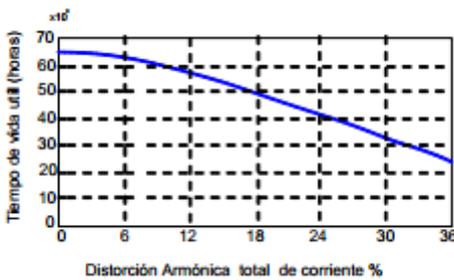
TABLA 1.2.
Resumen de los efectos por presencia de armónicos

Componentes / Elementos	Problemas	Efectos
Conductor de fase	-Aumento de la corriente -Aumento de la resistencia -Aumento de pérdidas técnicas (Efecto Joule)	El incremento de la frecuencia en la corriente provoca un acrecentamiento de la resistencia efectiva en los conductores, esto quiere decir que a medida que sube la frecuencia en (l) disminuirá el área de conducción, siendo el único camino la capa externa en el alambre, (Torres, 2016) como se muestra en la Figura 2 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>(a) Corriente directa</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>(b) corriente alterna de alta frecuencia</p>  </div> <div style="text-align: right;"> <p>□ Densidad mínima ■ Densidad máxima</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Figura 2 Densidades de corriente de un mismo conductor Fuente: (Tejada, 2007)</p>

continua

TABLA 1.2
Resumen de los efectos por presencia de armónicos

Sigue

Componentes / Elementos	Problemas	Efectos																
Conductor de Neutro	<ul style="list-style-type: none"> -Circulación de armónicos múltiplos de 3. -Retorno por el conductor de neutro. 	<ul style="list-style-type: none"> -Sobrecorriente de la corriente circulando por el neutro -Calentamiento en el neutro -Degradación prematura del conductor de neutro -Tensión neutro-tierra -Disparo de protecciones 																
Condensadores	<ul style="list-style-type: none"> Resonancias paralelas con el sistema. -Ampliación de los armónicos 	<ul style="list-style-type: none"> -Calentamiento -Envejecimiento prematuro de condensadores -Destrucción de condensadores <div style="text-align: center;">  <p>Figura 3 Circuitos a) resonancia paralela, b) resonancia serie Fuente: (Tejada, 2007)</p> </div>																
Transformadores	<ul style="list-style-type: none"> -Circulación de corrientes armónicas por los devanados. 	<ul style="list-style-type: none"> -Sobredimensionamiento de los devanados. -Pérdidas de aislamiento térmico por calentamiento. -Pérdidas en el cobre y en el hierro (Histéresis y Foucault) -Sobredimensionamiento del transformador. -Saturación del transformador (crea mayor distorsión). -Disminución del rendimiento y vida útil. <div style="text-align: center;">  <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <caption>Data for Figure 4: Transformer Life vs. THDI</caption> <thead> <tr> <th>Distorsión Armónica total de corriente (%)</th> <th>Tiempo de vida útil (horas) x 10⁴</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>65</td></tr> <tr><td>6</td><td>60</td></tr> <tr><td>12</td><td>55</td></tr> <tr><td>18</td><td>50</td></tr> <tr><td>24</td><td>45</td></tr> <tr><td>30</td><td>40</td></tr> <tr><td>36</td><td>35</td></tr> </tbody> </table> <p>Figura 4 Vida útil de un transformador en función de THDI</p> </div>	Distorsión Armónica total de corriente (%)	Tiempo de vida útil (horas) x 10 ⁴	0	65	6	60	12	55	18	50	24	45	30	40	36	35
Distorsión Armónica total de corriente (%)	Tiempo de vida útil (horas) x 10 ⁴																	
0	65																	
6	60																	
12	55																	
18	50																	
24	45																	
30	40																	
36	35																	

continua

TABLA 1.2
Resumen de los efectos por presencia de armónicos

Sigue

Componentes / Elementos	Problemas	Efectos
Motores	-Circulación de corrientes armónicas por los devanados.	-Vibraciones en el eje, desgaste mecánico en rodamientos y excentricidad. -Reducción del par. -Sobrecalentamiento de los devanados. -Pérdidas de aislamientos térmico por calentamiento. -Pérdidas en el cobre y en el hierro (Histéresis Foucault). -Disminución del rendimiento.
Grupos Electrógénos	-Sistema Blando con mayor impedancia que la red. -Tensión distorsionada.	-Dificultad de sincronización automática y posterior conmutación.
Equipos de Medida y Control	-Medidas no válidas. -Errores en procesos de control.	-Error en equipos que toman como referencia el paso por cero de la onda. -Saturación de transformadores de medida y/o protección. -Valores de magnitudes incorrectas.

Fuente: (Juárez DG., 2015)

1.3.1 Efecto en los motores

La disminución de la eficiencia, junto con el calentamiento, vibración y ruido audible son indicadores de distorsión armónica de tensión (Garzón, Juárez, & Rodríguez, 2008).

La presencia de armónicos en los motores de corriente alterna, producen efectos, como la mayor pérdida y disminución del torque que se genera, pérdidas por fricción en el rotor,

perdida en el estator, perdida en el núcleo y como consecuencia un excesivo calentamiento de la máquina.

Cómo se muestra en la Figura 5 el incremento de las pérdidas en función al Total Harmonic Distortion of Voltage (THD_v), las mermas por histéresis son proporcionales con la frecuencia en cuanto a la pérdida debido a las corrientes parásitas que son proporcionadas en magnitud al cuadrado de la frecuencia.

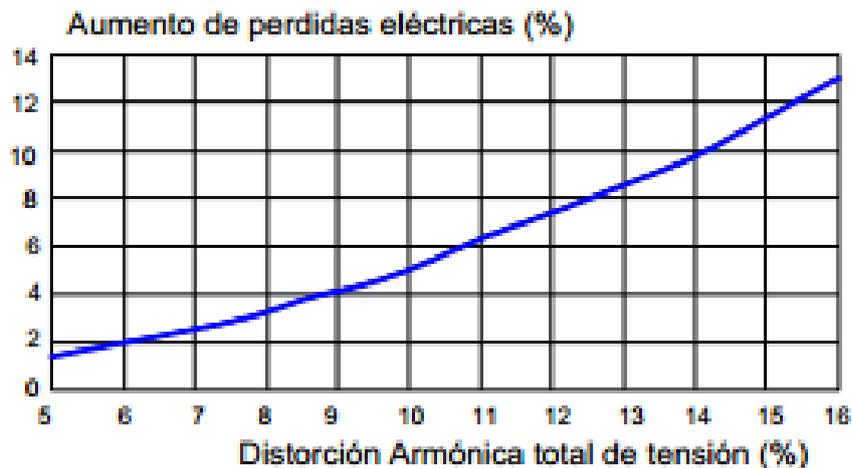


Figura 5 Pérdidas eléctricas de un motor en función de THD_v .
Fuente: (Tejada, 2007)

Al momento de ser alimentado el motor con tensión y corriente no sinusoidal, el campo magnético en el entrehierro y las corrientes de rotor presentan una estructura de frecuencia armónica. En el trabajo conjunto de los campos magnéticos de secuencia positiva y negativa provoca oscilaciones torsionales en el eje del motor produciendo vibraciones, el aumento en las pérdidas se muestra en la decadencia de la eficiencia provocando que la vida útil de los equipos sea menor.

1.4 Distorsión armónica

EL THD se puede definir como la distorsión de una relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz correspondiente a la componente fundamental.

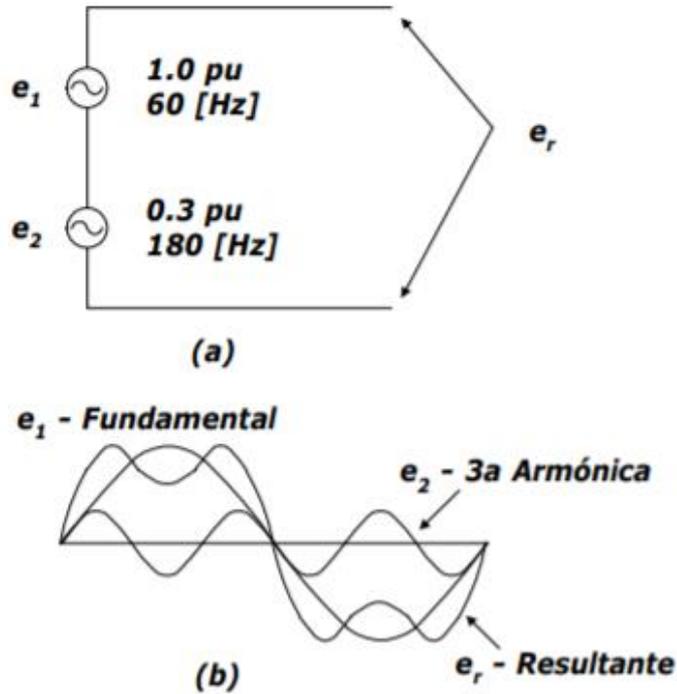


Figura 6 (a) Circuito (b) Onda de distorsión para el tercer armónico
Fuente: (Garzón, Juárez, & Rodríguez, 2008)

La medida de la distorsión armónica se la puede obtener de forma individual de acuerdo a la siguiente fórmula:

La distorsión Individual de Tensión.

$$IHD_V = \frac{E_h}{E_1} * 100\% \quad (1.3)$$

Para la distorsión total fundamental, esta se la calcula de la siguiente manera.

$$THD_{V(FUND)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n (E_h)^2}}{E_1} * 100\% \quad (1.4)$$

Para la distorsión total eficaz de la tensión, esta se la puede obtener con la siguiente fórmula.

$$THD_{V(RMS)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n (E_h)^2}}{E_{RMS}} * 100\% \quad (1.5)$$

Donde:

E_1 : valor eficaz de la onda fundamental de la tensión

E_h : magnitud RMS de armónico individual de tensión (Toledo, 2010)

IHD_v : distorsión armónica individual de voltaje

E_{RMS} : valor eficaz de la tensión

1.5 Límites de armónicos aceptables, recomendaciones y normas

“Es de gran importancia conocer las normas que limiten los contenidos armónicos en los sistemas eléctricos con el fin de controlar la distorsión de voltaje o corriente de un sistema eléctrico a niveles que las componentes asociadas puedan operar satisfactoriamente, sin causar daños, asegurar a los usuarios que puedan disponer de una fuente de alimentación de calidad aceptable, prevenir que el sistema eléctrico interfiera en la operación de otros sistemas como (protección, medición, conmutación o computación) y limitar el nivel de distorsión que un cliente pueda introducir a la red” (Toledo, 2010)

En la TABLA 1.3 se muestran los valores límites aceptables para los armónicos de voltaje, estos límites de distorsión de voltaje serán para sistemas de hasta media tensión especificados en la IEEE-519

TABLA 1.3.
IEEE519 Límites de distorsión de voltaje THD_v

Barra de voltajes en PCC (V_n)	Distorsión individual de los armónicos de voltaje (%)	Distorsión armónica total de voltaje THD_{vn} (%)
$V_i \leq 69$ KV	3.0	5.0
69 KV $< V_i \leq 161$ KV	1.5	2.5
$V_i \geq 161$ KV	1.0	1.5

Fuente: (IEEE, 1992)

Mientras que en la TABLA 1.4. se indican los valores límites recomendados para el componente armónico individual máximo y para el THD dispuestos por el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) ahora ARCONEL (Reg. 004/01).

Los valores eficaces (rms) de los voltajes armónicos individuales (V_i') y los THD , expresados como porcentaje del voltaje nominal del punto de medición respectivo, no deben superar los valores límites (V_i' y THD') señalados a continuación.

TABLA 1.4.
Límites de armónicos de tensión según CONELEC (Reg. 004/01)

ORDEN (n) DEL ARMÓNICO Y THD	TOLERANCIA $ V_i $ o $ THD $ (% respecto al voltaje nominal del punto de medición)	
	V > 40 KV (otros puntos)	V ≤ 40 KV (transformadores de distribución)
5	6.0	2.0
7	5.0	2.0
11	3.5	1.5
13	3.0	1.5
17	2.0	1.0
19	1.5	1.0
23	1.5	0.7
25	1.5	0.7
>25		
Impares Múltiplos de 3		
3	5.0	1.5
9	1.5	1.0
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
>21	0.2	0.2
Pares		
2	2.0	1.5
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.5	0.2
10	0.5	0.2
12	0.2	0.2
>12	0.2	0.2
THD	8%	3%

Fuente: (González M. , 2013)

1.6 Resonancia

La resonancia en los sistemas de distribución de energía eléctrica, se produce cuando las reactancias inductivas son iguales a las reactancias capacitivas a una frecuencia específica, lo cual origina que se presente una amplificación de la respuesta del sistema en la tensión o corriente, cuando la frecuencia de la fuente de excitación es igual a la frecuencia del sistema se puede producir los dos tipos de resonancias (Varela & Alvarado, 2015, pág. 23)

En sistemas de distribución que utilicen elementos tanto inductivos como capacitivos y que estén contaminados por armónicos provocan el fenómeno de resonancia obteniendo como resultados valores muy altos o muy bajos de impedancia, estos fenómenos modifican la tensión y la corriente en los sistemas de distribución.

1.6.1 Resonancia serie

La resonancia serie ocurre cuando una reactancia inductiva y una reactancia capacitiva que están en serie son iguales en magnitud a una determinada frecuencia, esta se le conoce como frecuencia de resonancia, en este caso el circuito LC atraerá una gran cantidad de la corriente armónica del sistema de distribución ya que este circuito ofrece una impedancia muy cercana a cero.

Bajo estas condiciones, la impedancia del circuito resonante serie puede ser utilizada para absorber corrientes armónicas deseadas (Garzón, Juárez, & Rodríguez, 2008)

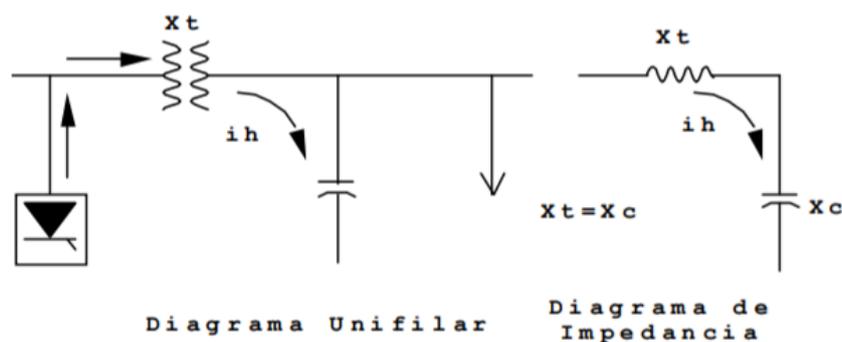


Figura 7 Resultado de condensadores con resonancia serie
 Fuente: (IEEE, 1992, pág. 23)

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (1.7)$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (1.8)$$

1.6.2 Resonancia paralelo

La resonancia en paralelo ocurre cuando la reactancia inductiva X_L es igual a la reactancia capacitiva X_C ; la frecuencia a la cual ocurre este fenómeno es llamada frecuencia de resonancia. Cuando la reactancia inductiva y capacitiva del sistema entra en resonancia con alguna armónica generada por una carga no lineal, esa corriente armónica excitará al circuito generando una corriente amplificada que oscila entre la energía almacenada en la inductancia y el capacitor. La característica de un circuito resonante paralelo es una alta

impedancia al flujo de la corriente armónica a la frecuencia de resonancia. En el análisis de los sistemas eléctricos, la frecuencia a la cual ocurre la resonancia en paralelo puede ser calculada con la siguiente ecuación (Garzón, Juárez, & Rodríguez, 2008, pág. 56).

$$f_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{MVA_{CC}}{MVAR_{Cap}}} \quad (1.9)$$

Donde:

f_r : Frecuencias de resonancia

X_C : Reactancia capacitiva a la frecuencia fundamental.

X_L : Reactancia inductiva a la frecuencia fundamental

MVA_{CC} : MVA de corto circuito del sistema

$MVAR_{Cap}$: MVAR de los capacitores (IEEE, 1992, pág. 23)

MVA = MEGA VOLTIO AMPERIOS

MVAR = MEGA VOLTIO AMPERIOS REACTIVOS

En la Figura 8, se puede observar, la impedancia semejante del barraje A, a tierra es igual.

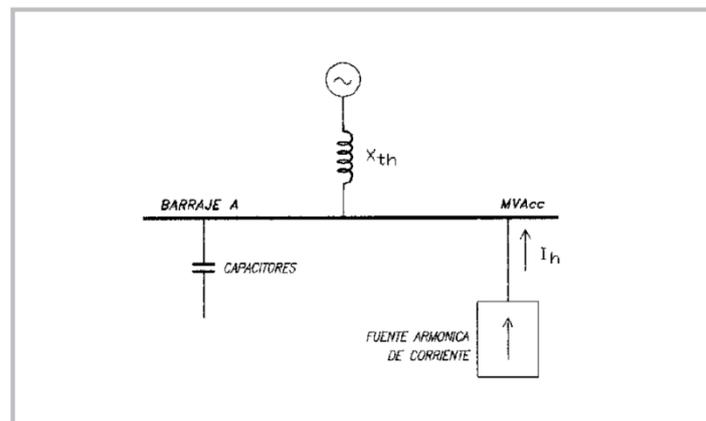


Figura 8 Resonancia paralelo en el barraje "A"
Fuente: (Gers, 2008, pág. 18)

1.7 Filtros de armónicos

El uso de filtros de armónicos en sistemas eléctricos tiene dos objetivos: el primero es prevenir la entrada de voltajes y corrientes armónicos desde agentes contaminantes al resto del sistema; y proveer al sistema toda o parte de la protección reactiva que este necesita (Toledo, 2010, pág. 3)

En general se pueden clasificar, dos tipos de filtros, que son activos y pasivos, el objetivo es crear un camino fácil para el paso de la corriente armónica, por medio del filtro y contrarrestando el efecto de que ellos viajen por sistema eléctrico.

1.7.1 Filtros activos

La idea principal de los filtros activos es generar corriente en los componentes armónicos que son de igual magnitud y forma que la corriente distorsionada que produce el consumidor, pero en 180° de desfase (Cabrera, 2015).

Los filtros activos utilizados para la reducción de perturbaciones en la red eléctrica se pueden clasificar de varias formas. Dependiendo de cómo se conecta el filtro respecto a la carga, podemos distinguir entre filtros serie, paralelo y serie-paralelo o mixtos.

Los filtros en paralelo actúan básicamente como una fuente de corriente, que tiene como misión contrarrestar los armónicos de corriente, generados por la carga, de forma que, la corriente en la red, suma de corrientes de la carga y el filtro sea senoidal. (Lamich, 2006)

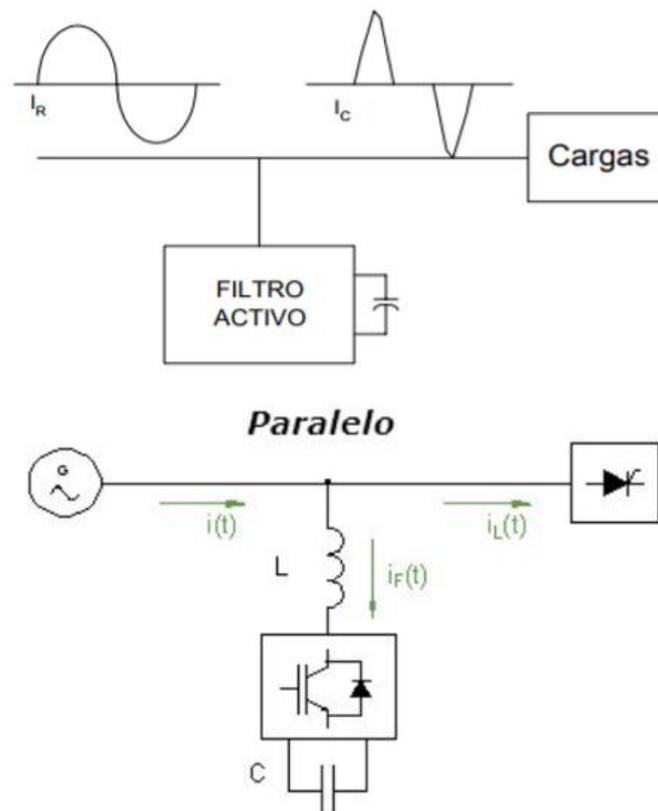


Figura 9 Filtro activo topología paralelo.
Fuente: (Lamich, 2006)

Por otro lado, los filtros serie se comportan como una fuente de tensión en serie con la propia red, y su principal función es que la tensión en bornes de la carga sea senoidal.

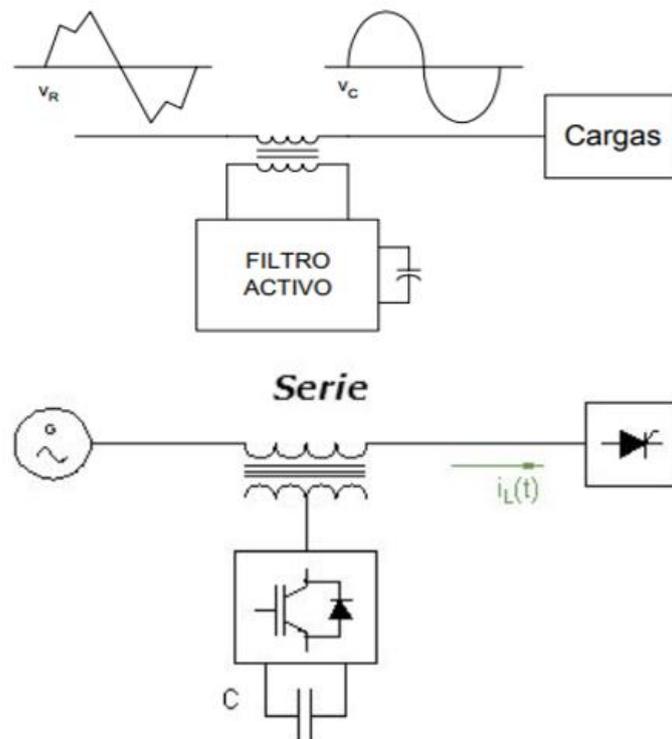


Figura 10 Filtro activo topología serie.
Fuente: (Lamich, 2006)

Finalmente, los filtros mixtos son la unión de un filtro serie y otro paralelo, con lo que su función es conseguir un consumo de corriente senoidal y una tensión en la carga también senoidal.

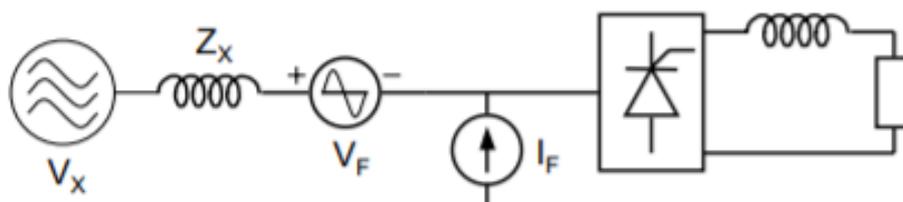


Figura 11 Filtro activo combinado (serie, paralelo).
Fuente: (Lamich, 2006)

1.7.2 Filtros pasivos

Los filtros pasivos se basan en la utilización de las distintas respuestas de frecuencia de los circuitos pasivos, para generar un circuito de menor impedancia para los armónicos de la misma red, logrando que las corrientes de armónicos no recorran el sistema. (Gers J. , 2008).

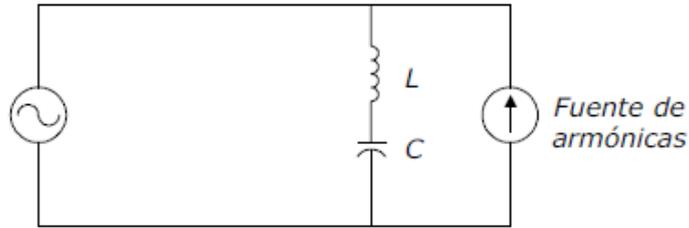


Figura 12. Filtros pasivos
Fuente (Jacobo Garzón, Juárez Sosa, & Rodríguez Nuñez, 2008)

Los filtros de armónicos pasivos de acuerdo con su configuración eléctrica y según el propósito particular que se persigue, pueden ser de los siguientes tipos:

- Filtros serie
- Filtros paralelo shunt.
- Filtros sintonizados
- Filtros pasa alta

1.7.2.1 Filtros Serie

Su principal objetivo es impedir el paso de una frecuencia contaminada, desde la fuente hacia el resto de la red. Este filtro, consta de un inductor y un capacitor en paralelo, cuyo conjunto se conecta en serie a la red que se desea proteger.

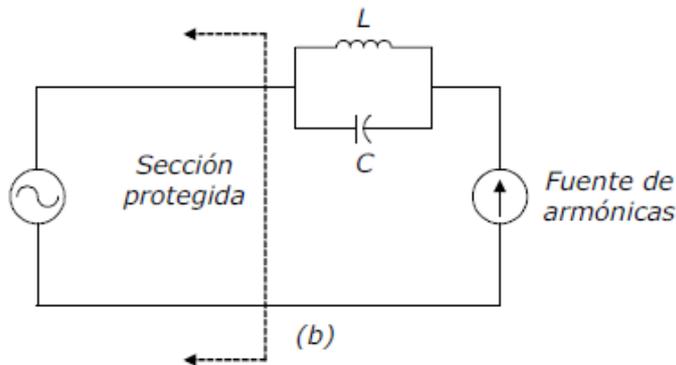


Figura 13 Filtro serie
Fuente (Jacobo Garzón, Juárez Sosa, & Rodríguez Nuñez, 2008)

1.7.2.2 Filtros paralelos o Shunt

Proporcionan el paso alternativo con baja impedancia para los armónicos, el cual consiste en una rama RLC resonante serie conectada en paralelo a la red (Toledo, 2010, pág. 2)

1.7.2.3 Filtros sintonizados

Los filtros pasivos sintonizados, se enlazan en paralelo al sistema eléctrico general para minimizar el contenido armónico generado por los dispositivos no lineales, además estos producen potencia reactiva importante para filtrar el armónico que se desea atenuar, estos filtros quitan un determinado orden de armónicos.

Así mismo, minimizan la tensión armónica específica, pero solamente una a la vez, es conformada por un inductor y un capacitor en serie, distinguiéndose con el factor Q que hace referencia a la calidad.

$$\omega_h = 2\pi fh \quad (1.10)$$

Siendo h el de orden armónico al cual se desea sintonizar, ω_h es la frecuencia angular armónica y f es la frecuencia fundamental. Se puede calcular la reactancia capacitiva de estos filtros mediante:

$$X_c = \frac{1}{\omega c} = \frac{V^2}{Qc} \quad (1.11)$$

Donde X_c , es la reactancia capacitiva y Qc , el valor de la potencia reactiva la cual el filtro va a proporcionar y V es la tensión nominal. Para encontrar el valor de la capacitancia del filtro se lo realizará por:

$$C_F = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (1.12)$$

Cuando el circuito se halla en resonancia, las reactancias son iguales, por lo que la inductancia del circuito filtro, también se la podrá calcular como:

$$L_F = \left[\frac{1}{2\pi 60h\sqrt{C_F}} \right] \quad (1.13)$$

Por lo que la reactancia inductiva, se podrá calcular aplicando:

$$X_{Lh} = \omega_h L_F \quad (1.14)$$

Donde la resistencia de resonancia del circuito filtro se podrá expresar mediante:

$$R_F = \frac{X_{Lh}}{Q} \quad (1.15)$$

Siendo Q el factor de calidad de filtro y R la resistencia interna del inductor.

El filtro se sintoniza con la frecuencia armónica h , del mismo orden que se pretende eliminar; Para esta frecuencia se vuelven iguales las reactancias inductiva y capacitiva, por tal motivo se anulan reflejando únicamente la impedancia mínima, la que determina el factor de calidad del filtro, provocando que sea más o menos estrecha o selectiva su respuesta en frecuencia, la relación matemática, que se presenta para el filtro sintonizado es:

$$Z = R_p + j \left(\omega L_F - \frac{1}{\omega C_F} \right) \quad (1.16)$$

Estos filtros están caracterizados por un factor de calidad Q .

$$Q = \frac{X_L * h}{R}$$
$$20 < Q < 30$$

La Figura 14 muestra un circuito RLC, el cual presenta una impedancia pequeña a la periodicidad de un armónico definido y la Figura 15 se muestra la respuesta de la impedancia en la frecuencia, para este tipo de filtro de acuerdo a:

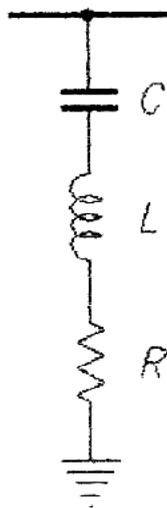


Figura 14 Filtro sintonizado
Fuente: (Gers, 2008, pág. 21)

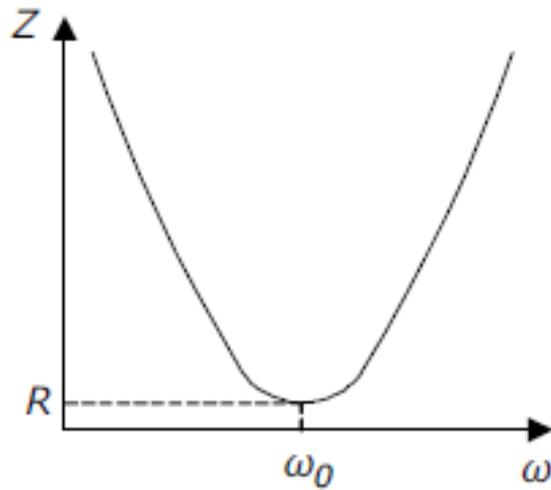


Figura 15 Características de frecuencia del filtro sintonizado
 Fuente: (Gers, 2008, pág. 21)

1.7.2.4 Filtros pasa alta

Estos tipos de filtros disminuyen completamente los armónicos que se generan para una frecuencia alta de sintonización y sus elementos lo integran un inductor, resistor conectado en paralelo y capacitor en serie, igualmente hace referencia al factor Q de calidad (Gers J. , 2008).

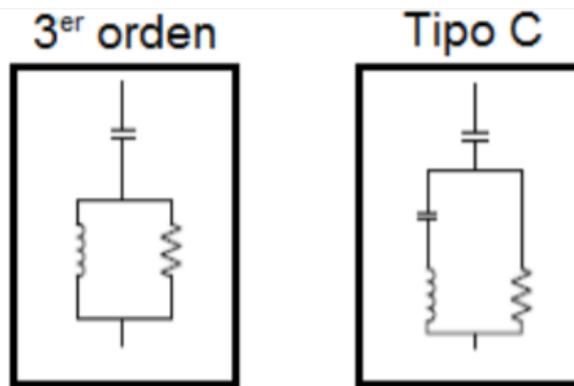


Figura 16 Filtros pasa alta
 Fuente (Molano & Tique, 2013)

$$Q = \frac{R}{X_{L,h}} \quad (1.17)$$

El factor de calidad en filtros pasa alto para fines prácticos, estarán en magnitud entre:

$$0.5 < Q < 2 \quad (1.18)$$

La fórmula hace referencia al filtro pasa alta, a su nominal de trabajo menor que 2 por consecuencia los factores de calidad mayores a 2 deja de hacer su trabajo y se asemeja al filtro sintonizado simple.

1.8 Selección y dimensionamiento del filtro serie

El objetivo de la instalación de un filtro de armónico es suministrar un recorrido a tierra de baja impedancia para esta frecuencia, con el fin de ayudar a la libre circulación a tierra y evitar que se propague las distorsiones al sistema, por tal motivo estos filtros deben ubicarse cerca de donde se generan los armónicos, el filtro que se utilice dependerá de los armónicos que se desee eliminar del sistema, en la siguiente fórmula general se muestra el dimensionamiento de los filtros.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 60 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

Fuente: (Torres, 2016)

1.9 Dimensionamiento de inductores

1.9.1 Diseño y parametrización de inductores con núcleo de hierro

Las bobinas son comunes de encontrar en cualquier circuito eléctrico como: inductores, sistemas de transformación y otras cargas, se analiza la aplicación de una metodología de pruebas que consiste en la construcción de una inductancia con núcleo de hierro para posteriormente realizar combinaciones en filtros, con el fin de reducir el armónico, el mismo que no debe superar por norma el 5% del *THD* (Desacuerdo a los límites de armónicos de tensión según IEEE 519 que se muestra en la tabla 3), al final de esto arrojará un muestreo comparativo del sistema de interfaz LabVIEW.

1.9.2 Diseño eléctrico

Para la construcción de los inductores, se deben tomar en consideración los siguientes parámetros:

- Altura y ancho de la sección de la ventana del núcleo de hierro
- Calibre de conductor

Variaciones que serán necesarias verificar hasta conseguir el valor de la inductancia deseada, para la construcción se presenta los siguientes puntos:

1.9.3 Determinación de la sección del núcleo

Para un núcleo de la forma E, la sección de la ventana, estará dada por el producto de $a \cdot h \cdot l$.

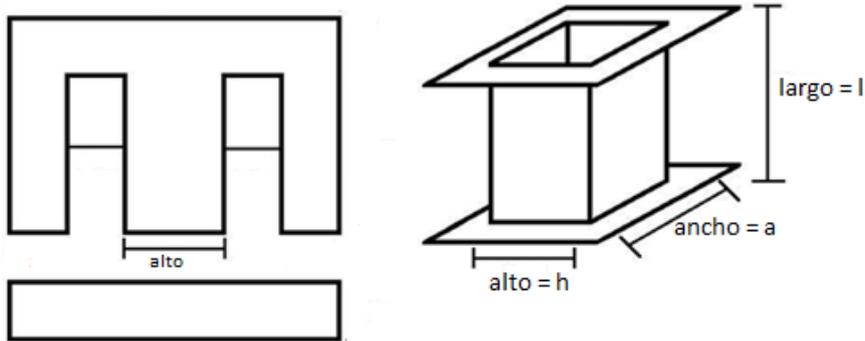


Figura 17 Chapas ferromagnéticas (Molano & Tique, 2013)

La sección del núcleo determina la potencia útil conectada y viene dada por:

$$S = k * \sqrt{P} \quad (1.20)$$

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 [cm^2]

P : Potencia [w]

1.9.3.1 Determinación del número de espiras

El flujo magnético B , en el núcleo dado en Gauss, varía sinusoidalmente y la relación del flujo y la tensión inducida se expresa mediante la ecuación de Faraday, como se plantea en la siguiente ecuación:

$$B = \frac{V \cdot 10^8}{f \cdot S \cdot N \cdot 4.4} [Gauss] \quad (1.21)$$

Dónde:

f : frecuencia [Hz]

V : voltaje eficaz [V]

S : sección del núcleo [cm^2]

B : densidad de flujo magnética [*Gauss*]

$4,4 \cdot 10^{-8}$, constante que ajusta la variable al sistema y depende del tipo de núcleo

N : número de espiras

Para conocer el número de espiras se considera una inducción magnética donde el valor de la densidad de flujo para pequeñas bobinas es de aproximadamente $B = \mu H = 8000$ Gauss cuya unidad es el *Weber*/ m^2

1 weber es = a 10^8 líneas de campo magnético.

Despejando N se obtiene:

$$N = \frac{V}{f \cdot S \cdot B \cdot 4,4 \cdot 10^{-8}} \quad (1.22)$$

Fuente: (Gallego, 2009)

1.9.4 Densidad de corriente eléctrica

El valor de la densidad de corriente se obtiene, haciendo el coeficiente entre la capacidad máxima de corriente del conductor y la sección del mismo

$$D = \frac{I}{s} \quad (1.23)$$

Donde:

D : densidad de corriente eléctrica ente 3 – 3,5 [A/mm^2]

I : intensidad de corriente eléctrica que circula por un conductor en amperios [A]

$$s = \frac{I}{D} \quad (1.24)$$

S : refiere a la altura por el ancho que se reemplaza en la ecuación (1.24) por I

$$S = h * a \text{ (cm}^2\text{)} \quad (1.25)$$

1.10 Tipo de conductor a utilizar en el bobinado

La selección del conductor depende directamente de la corriente (I máx.) que circulará por él a continuación una tabla característica:

TABLA 1.5.
Característica para determinar el calibre del conductor.

TABLA CARACTERISTICA PARA EL CALCULO DE TRANSFORMADORES						
(1) AWG	(2) Diám.	(3) Sección	(4) N° Espiras	(5) K_E por km	(6) Resistencia	(7) Cap.
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	5,6	18,5	8,17	4
15	1,45	1,65	6,4	14,7	10,3	3
16	1,291	1,31	7,2	11,6	12,9	2,5
17	1,15	1,04	8,4	9,26	16,34	2
18	1,024	0,82	9,2	7,3	20,73	1,6
19	0,9116	0,65	10,2	5,79	26,15	1,2
20	0,8118	0,52	11,6	4,61	32,69	1
21	0,723	0,41	12,8	3,64	41,46	0,81
22	0,6438	0,33	14,4	2,89	51,5	0,64
23	0,5733	0,26	16	2,29	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 kilometro						
(6) Resistencia en ohm por kilometro						
(7) Capacidad de corriente en Amperios						

Fuente: (Gallego, 2009)

1.11 Instrumento para la medición de armónicos

Conforme a pasado el tiempo los aparatos para medir armónicos han avanzado como la tecnología se ha innovado, los equipos analizadores como el Fluke 435 digital permiten realizar el registro armónicos con periodicidad de 50 veces la frecuencia fundamental (3000 Hz), registran 9 entradas cuatro de voltaje de línea, cuatro de corriente de línea y uno de voltaje para intención general (tierra).

Los registros son reportados por lo general como tabla de datos y en forma de onda, además de incluir la información que se detalla a continuación.

- Tabla resumen con parámetros de 6 canales (tres voltajes y tres corrientes) registrados, siendo los siguientes valor RMS, THD, TIF, It y desbalance NEMA.
- Tabla con distribución espectral en magnitudes por armónico, de los seis canales y la corriente del neutro.

- Tabla con distribución espectral en ángulo de fase por armónico, de los seis canales y la corriente del neutro.
- Formas de onda para cada uno de los seis canales.
- Espectro de frecuencia para cada uno de los seis canales. (Gers, 2008, pág. 20)

1.12 Introducción a LabVIEW

LabVIEW es una plataforma y entorno de desarrollo para un lenguaje de programación visual de National Instrument. El lenguaje gráfico se llama "G". (Fernández, 2013) LabVIEW, se usa comúnmente para adquisición de datos, control de instrumentos y automatización industrial en una variedad de plataformas que incluyen Microsoft Windows

1.12.1 Programación de flujo de datos

El lenguaje de programación utilizado en LabVIEW, también conocido como G, es un flujo de datos o de lenguaje de programación. La ejecución está determinada por la estructura de un bloque gráfico o Diagrama (el código fuente LV) en el cual el programador conecta diferentes nodos de funciones dibujando cables. Estos cables propagan variables y cualquier nodo puede ejecutarse tan pronto como todos sus datos de entrada están disponibles. Dado que este podría ser el caso para múltiples nodos simultáneamente, G es inherentemente capaz de ejecución paralela. Procesamiento múltiple y multihilo el hardware es explotado automáticamente por el programador incorporado, que multiplexa múltiples hilos del sistema operativo sobre los nodos listos para su ejecución.

1.12.2 Programación gráfica

LabVIEW vincula la creación de interfaces de usuario (llamadas paneles frontales) en el ciclo de desarrollo. Los programas / subrutinas de LabVIEW se llaman instrumentos virtuales (VI). Cada VI tiene tres componentes: un diagrama de bloques, un panel frontal y un panel de conectores. El último está acostumbrado a representarse en el VI en los diagramas de bloques de otros, llamando VIs. Controles e indicadores en el panel frontal permite a un operador ingresar datos o extraer datos de una ejecución virtual instrumento.

El panel frontal también puede servir como una interfaz programática. Por lo tanto, el instrumento virtual puede ejecutarse como un programa, y el panel sirve como usuario interfaz o cuando se coloca como un nodo en el diagrama de bloques, el panel frontal define las entradas y salidas para el nodo dado a través del panel conector. Esto implica que cada VI

puede ser probado fácilmente antes de ser incrustado como una subrutina en un programa más grande.

El enfoque gráfico también permite a los no programadores crear programas simplemente arrastrando y eliminando representaciones virtuales de equipos de laboratorio con los que ya están familiarizados. (Fernández, 2013)

El entorno de programación de LabVIEW, con los ejemplos incluidos y la documentación, hace que sea simple crear pequeñas aplicaciones. Esto es un beneficio en un lado, pero también existe cierto peligro de subestimar la experiencia necesaria para una buena calidad

Los sistemas de desarrollo de LabVIEW más avanzados ofrecen la posibilidad de crear aplicaciones independientes. Además, es posible crear aplicaciones distribuidas, que se comunican por un esquema cliente / servidor, y son por lo tanto más fácil de implementar debido a la naturaleza inherentemente paralela del código G.

1.12.3 Beneficios

Un beneficio de LABVIEW sobre otros entornos de desarrollo es el amplio soporte para acceder al hardware de instrumentación. Controladores y capas de abstracción para muchos tipos diferentes de instrumentos y autobuses están incluidos o están disponibles para su inclusión.

Las interfaces del controlador proporcionadas guardan al programa tiempo de desarrollo. El argumento de venta de National Instruments es, por lo tanto, que incluso las personas con una experiencia de codificación limitada pueden escribir programas e implementar soluciones de prueba de forma periodo de tiempo en comparación con sistemas más convencionales o competitivos.

Incorpora un nuevo hardware topología del controlador (DAQmxBase), que consiste principalmente en componentes con código G con solo unas pocas llamadas de registro a través de NI Measurement Hardware DDK (Driver Development Kit) funciones, proporcionan acceso de hardware independiente de la plataforma a numerosas adquisiciones de datos y dispositivos de instrumentación. El controlador DAQmxBase está disponible para LabVIEW en Windows, Plataformas Mac OS X y Linux. (Fernández, 2013)

1.12.4 Introducción a los datos

LabVIEW incluye un conjunto de VI que le permiten configurar, adquirir datos y enviar datos a dispositivos DAQ. A menudo, un dispositivo puede realizar una variedad de funciones, como la conversión de analógico a digital (A / D), conversión de digital a analógico (D / A), entradas salidas (E / S) análogas o digitales y operaciones de contador / temporizador. Cada dispositivo admite diferentes DAQ y velocidades de generación de señal. Además, cada dispositivo DAQ está diseñado para hardware específico, plataformas y sistemas operativos.

National Instruments, el inventor de LabVIEW, también hace dispositivos DAQ, entonces la integración con los dispositivos DAQ de NI y el software LabVIEW es transparente y hace que sea fácil de hacer Operaciones de E / S desde el entorno de LabVIEW. (Fernández, 2013)

1.12.5 Introducción a DAQ - Adquisición de datos

El objetivo de la adquisición de datos es medir un fenómeno eléctrico o físico tal como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. La adquisición de datos basada en PC usa una combinación de hardware modular, software de aplicación y una computadora para tomar mediciones. Mientras que cada sistema de adquisición de datos se define por su aplicación, cada sistema comparte un objetivo común de adquirir, analizar y presentar información. Los sistemas de adquisición de datos incorporan señales, sensores, actuadores, señal acondicionamiento, dispositivos de adquisición de datos y software de aplicación. Así que, resumiendo, la adquisición de datos es el proceso de:

- Adquirir señales de fenómenos del mundo real
- Digitalizando las señales
- Analizando, presentando y guardando los datos

El sistema DAQ tiene las siguientes partes involucradas, vea la Figura: 18. Las partes son:

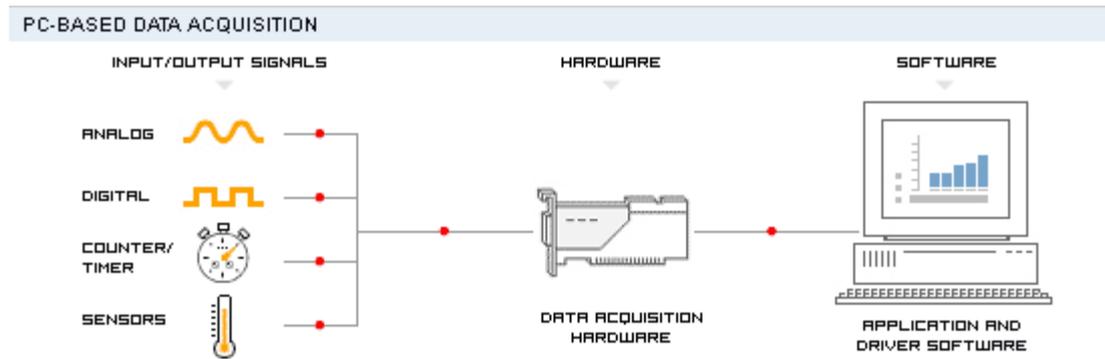


Figura 18 PC-Base de datos adquisición
Fuente: (Fernández, 2013)

- Señales físicas de entrada / salida
- Dispositivo DAQ / hardware
- Software de controlador
- Su aplicación de software (software de aplicación)

1.12.6 Señales físicas de entrada / salida

Una señal de entrada / salida física es típicamente una señal de voltaje o corriente. Una señal de voltaje típicamente puede ser una señal de 0-5 V, mientras que una señal de corriente puede ser típicamente una Señal de 20mA

1.12.7 Dispositivo DAQ / hardware

El hardware DAQ actúa como la interfaz entre la computadora y el mundo exterior. Eso funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza las señales analógicas entrantes para que la computadora puede interpretarlos

Un dispositivo DAQ (Hardware de Adquisición de Datos) generalmente tiene estas funciones:

- Entrada analógica
- Salida analógica
- E / S digital
- Contador / temporizadores

Se tienen diferentes dispositivos DAQ, como: "Dispositivos DAQ de escritorio" donde necesita conectar una placa PCI DAQ a su computadora.

1.12.8 El software se ejecuta en una computadora

- "Dispositivos portátiles DAQ" para la conexión al puerto USB, conexiones Wi-Fi, etc. el software se ejecuta en una computadora
- "Dispositivos DAQ distribuidos" donde el software se desarrolla en su computadora y luego se descargó al dispositivo DAQ distribuido.

1.12.9 Su aplicación de software (Aplicación software)

El software de aplicación agrega capacidades de análisis y presentación al software del controlador. La aplicación de software normalmente realiza tareas como:

- Monitoreo en tiempo real
- Análisis de los datos
- Registro de datos
- Algoritmos de control
- Interfaz hombre-máquina (HMI)

Para crear su aplicación DAQ necesita una herramienta de desarrollo de programación, como LABVIEW.

1.12.10 Transductor

Es un dispositivo que transforma una magnitud física en una señal eléctrica, es decir convierte una magnitud no interpretable por un sistema en otra variable interpretable por él sistema. La adquisición de datos comienza con el fenómeno físico que se va a medir, este fenómeno podría ser la temperatura de una habitación, la intensidad de una fuente de luz, la presión dentro de una cámara, la fuerza aplicada a un objeto u otras muchas cosas. (Fernández, 2013)

1.12.11. Señales

Diferentes señales presentes en la naturaleza necesitan ser medidas de diferentes maneras. Por esta razón, es importante comprender los diferentes tipos de señales y sus atributos correspondientes. Las señales pueden ser categorizadas en:

- Señal analógica

Una señal analógica es una señal que varía continuamente. En un equipo transductor la entrada analógica se usa comúnmente para medir voltaje o corriente. Una señal analógica puede tener cualquier valor con respecto al tiempo. Algunos ejemplos de señales analógicas incluyen voltaje, temperatura, presión, sonido y carga. Las tres características principales de una señal analógica son: nivel, forma, frecuencia. (Fernández, 2013)

- Señal Digital

La digital, es un tipo de señal en que cada valor que codifica el contenido de la misma, puede ser analizado en términos de algunas magnitudes que representan valores discretos, en lugar de valores dentro de un cierto rango. Por ejemplo, el interruptor de la luz sólo puede tomar dos valores o estados: abierto o cerrado. Esto no significa que la señal físicamente sea discreta ya que los campos electromagnéticos suelen ser continuos, sino que en general existe una forma de discretizarla unívocamente.

Son los sistemas digitales, como por ejemplo el computador, los que usan la lógica de dos estados, representados por dos niveles de tensión eléctrica, uno alto, H y otro bajo, L (High y Low, respectivamente, en inglés). Por abstracción, dichos estados se sustituyen por ceros y unos, lo que facilita la aplicación de la lógica y la aritmética binaria. Si el nivel alto se representa por 1 y el bajo por 0, se habla de lógica positiva y en caso contrario de lógica negativa.

1.12.12 Acondicionador de señal de entrada (ZMPT101B)

Es un dispositivo que permite adecuar una señal de tensión de fase de corriente alterna y utilizarla en un instrumento de medición o adquisición de datos sin que exista interferencias del medio. El ZMPTB es un módulo transformador de voltaje, tiene una salida monofásica activa. Además, contiene un circuito con amplificador operacional para compensar el offset de la salida analógica. Puede medir voltaje de baja tensión y la salida analógica es ajustable con el potenciómetro en la placa. Es un módulo ideal para aplicaciones de monitoreo de energía, muy común en aplicaciones de domótica. Debido a la naturaleza de los transformadores solo puede medir voltaje AC.

Aplicaciones:

- Adecuado para la medición de tensión AC de bajo voltaje.

- Monitoreo y protección de equipos AC.
- Retroalimentación para sistemas de control de voltaje AC.

Acondicionador ZMPT101B – estructura

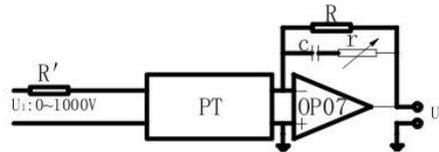


Figura 19 Acondicionador ZMPT101B – estructura

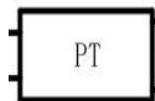


Figura 20 Transformador de voltaje 120V - 5V – estructura
Fuente: (Arduino, 2017)



Figura 21 Acondicionador de señal de entrada (ZMPT101B)
Fuente: (Arduino, 2017)

Especificaciones:

- Voltaje de suministro: 5 Vdc
- Señal de salida: analógica
- Dimensiones: 5cm x 2cm x 2.4cm
- Propiedades del transformador
 - Corriente nominal de entrada y salida: 2mA
 - Proporción en entrada salida 1000: 1000
 - Diferencia de fase 30° (a 50ohm)
 - Rango lineal 0-3mA (a 50ohm)
 - Linealidad 0.1%
 - Precisión 0.2

- Aislamiento eléctrico: hasta 3000V

Determinación de la tensión *RMS* máxima de salida

V_{max} : se define por la tensión de pico AD en el bucle de muestreo en principio.

Por ejemplo: En cuanto $\pm 5V$ AD, el máximo *RMS* de voltaje del transformador:

$$V_{max} = 5V/\sqrt{2} = 3.53V$$

Así para 0~3.3V AD, El máximo *RMS* voltaje del transformador:

$$V_{max} = 3.3V/2\sqrt{2} = 1.16V$$

El ZMPT101B puede trabajar a valores de corriente de 1 ~ 2mA con un voltaje de entrada < a 100V, mientras que si el valor de corriente cambia a 2mA el voltaje de entrada deberá ser \geq a 220V.

1.12.12.1 Salida activa

La salida activa del transductor ZMPT101B, tiene una alta precisión, pequeño error de fase, alto voltaje de salida, fuerte capacidad de carga. En cuanto a AD unipolar, la terminal de entrada positiva del amplificador operacional que hace referencia de voltaje que requiere para resolver. Mientras tanto, para simplificar la línea, generalmente no acceda a las c y r que son para la fase compensación. Si necesita compensar, generalmente usa el software. (Arduino, 2017)

1.12.13 Módulo de relé 5V de 8 canales

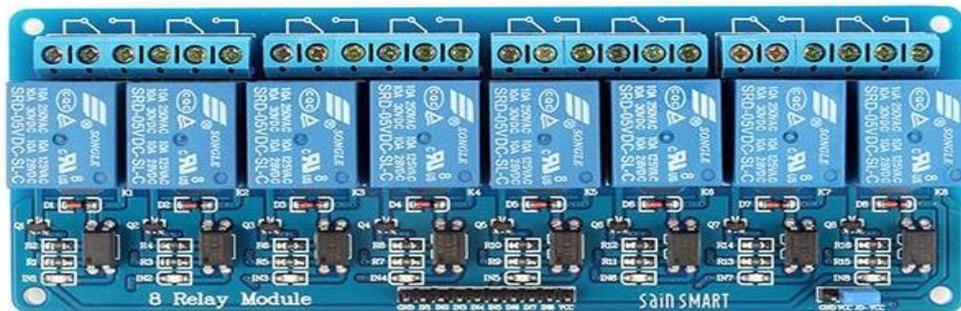


Figura 22 Módulo de relé 5V de 8 canales
Fuente: (Arduino, 2017)

Esta es una placa de interfaz de relé de 5V y 8 canales, puede controlar varios dispositivos y otros equipos con gran corriente. Se puede controlar directamente mediante un

microcontrolador (Raspberry Pi, Arduino, 8051, AVR, PIC, DSP, ARM, ARM, MSP430, lógica TTL).

Tarjeta de interfaz de relé de 5V y 8 canales, y cada uno necesita una corriente de controlador de 15-20 mA

- Equipado con relé de alta corriente, AC250V 10A; DC30V 10A
- Interfaz estándar que se puede controlar directamente con el microcontrolador (Arduino, 8051, AVR, PIC, DSP, ARM, ARM, MSP430, lógica TTL)
- LED de indicación para el estado de salida del relé (Arduino, 2017).

1.12.13.1 Descripción

Un relé es un interruptor accionado eléctricamente. Muchos relés usan un electroimán para operar mecánicamente el interruptor y proporcionar aislamiento eléctrico entre dos circuitos.

Este relé de 8 canales y 5 V tiene aislamiento óptico y magnético, proporcionando una gran protección a las entradas de fallas eléctricas en las salidas. Funciona bien con lógica de 3.3V y 5V (Raspberry Pi, Arduino, Teensy), requiriendo poca corriente.

Fácil de utilizar en placas de prueba, utilizando dupont hembra / macho lo hace extremadamente conveniente para la creación de prototipos. En LED indica su estado de trabajo. Rojo se refiere a los errores. 3 terminales por relé SPDT. (Fernández, 2013)

Todas estas características hacen que el relé SainSmart sea un excelente componente para proyectos de automatización.

CAPÍTULO 2

DESARROLLO

2.1 Introducción

En esta aplicación se construye un generador de armónicos, utilizando una bomba de agua monofásica de 1/2 hp de potencia controlada por un regulador de velocidad la misma que introduce armónicos cuando trabaja a media potencia, teniendo en la red una distorsión total de hasta el (20%) de THD registrada en el programa LabVIEW y comparada con el analizador Fluke modelo: 435.

En vista que se presentan armónicos de orden mayor a nueve en pequeños porcentajes el análisis se lo realiza para la corrección de los primeros cuatro armónicos de orden impar por ser los que presentan mayor porcentaje de distorsión. Para este fin se utilizan filtros sintonizados de armónicos de corriente conectados en paralelo a la carga, estos filtros indirectamente reducen los armónicos de voltaje ya que al generarse un paso de baja impedancia estas distorsiones de corriente se encierran entre el filtro y la carga ayudando de esta manera a reducir la caída de tensión y provocando así que los armónicos de voltaje se reduzcan considerablemente o se eliminen.

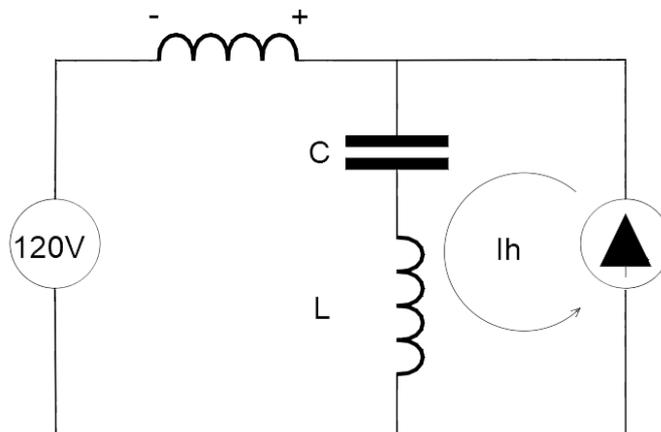


Figura 23 Diagrama de filtro atenuador de armónicos de corriente e indirectamente de armónicos de voltaje

Finalmente se desarrolla un sistema de monitoreo y accionamiento de cargas y filtros mediante LabVIEW con el objetivo de que se pueda registrar, analizar y visualizar las mediciones de las distorsiones armónicas y verificar su atenuación el circuito eléctrico implementado.

2.2 Materiales

Los materiales que se usaron para la construcción del proyecto generador y corrector de armónicos fueron los que se menciona a continuación:

- Motor (Bomba de Agua de ½ HP)
- Regulador de velocidad SCR AC 110V 4000W
- Sistema de recirculación de agua: (cañerías de ½ pulgada, uniones para cañerías, cilindro depósito de agua).
- Gabinete metálico de 70 x 50 x 30 cm
- Breaker térmico
- Borneras tipo riel din
- Contactores
- Módulo de Relés 5 voltios - 8 canales
- DAQ 6008
- Acondicionador de señal ZMPT101B
- Bobinas núcleo de hierro
- Capacitores
- Ventilador
- Computador Dell
- Pantalla Touch
- Canaletas
- Riel Din
- Terminales tipo pines
- Cables protoboar
- Enchufe
- Tomacorriente polarizado
- Cable N° 18
- Alambre esmaltado
- Cable UTP
- Amarras
- Tornillos
- Cinta termo contraíble

2.3 Métodos de diseño del módulo

Mediante el funcionamiento de la bomba y un regulador de velocidad se simula el trabajo forzado de este elemento lo cual produce perturbaciones armónicas que se introducen a la red.

Se construyen los inductores, en base a transformadores reductores de baja potencia de uso comercial, en los que se mantiene el núcleo y se enrollan los conductores de acuerdo con los cálculos de diseño.

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

Finalmente se contrastarán los resultados obtenidos por medio de la interfaz de LabVIEW y un equipo patrón analizador de armónicos de redes de bajo voltaje Fluke, que servirá como patrón de calibración del sistema.

2.3.1 Características técnicas (bomba)

TABLA 2.6.
Rendimiento

Características a 60Hz	QB 60
Entrada	Ø25
Salida	Ø25
Potencia (KW)	0.37
Q max. (l/min)	35
H max (m.c.a.)	35
Peso (Kg)	5.8
Temp. máx. del agua	40°C

Fuente: (Czerweny, s.f.)

2.3.2 Regulador de velocidad electrónico SCR AC 110/220V 4000W

Características técnicas

- Voltaje de entrada: AC 0V – 110/220V
- Potencia máxima: 4000W
- Regulador de voltaje: AC 0 ajustables entre voltajes de entrada

- Dimensiones: 91mm x 59mm x 34mm

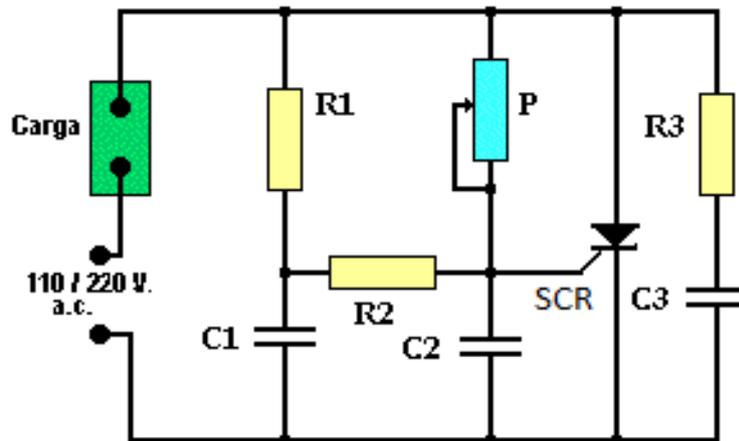


Figura 24 Diagrama esquemático o electrónico del variador de velocidad

Se usa principalmente para controlar la potencia que se entrega a una carga eléctrica (Bomba de Agua), en la que se obtuvo porcentajes de armónicos totales THD, mayores al 20% y que para fines prácticos se usará este valor como límite.

2.3.3 Porcentajes individuales

Para un THD del 20%, se obtuvieron los porcentajes individuales en el equipo Fluke como se muestra en la Figura 25 y se detalla a continuación:

- Especificando los de 3° orden en un porcentaje de 16.9%
- Especificando los de 5°orden en un porcentaje de 5.2%
- Especificando los de 7° orden en un porcentaje de 5.2%
- Especificando los de 9° orden en un porcentaje de 4.0%

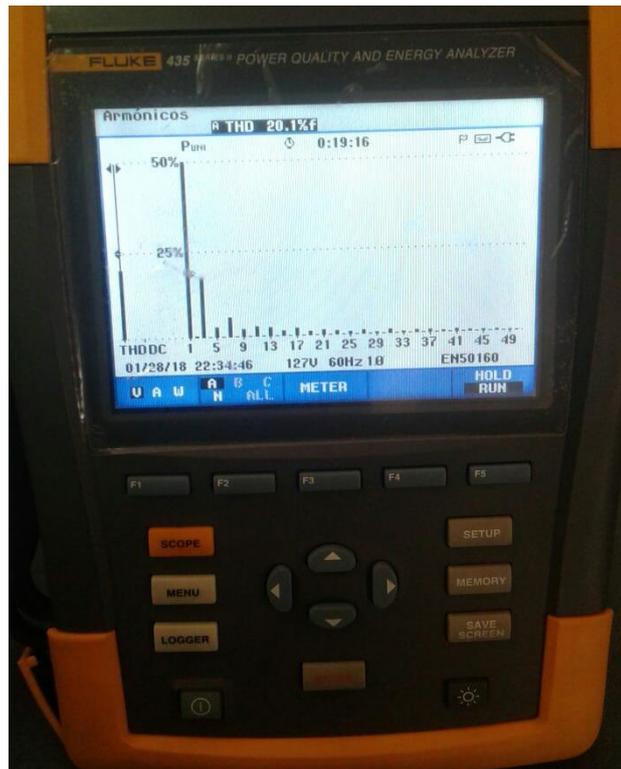


Figura 25 Medición de distorsión armónica.
Fuente. Autores Rodrigo Fuertes & Eduardo Ortiz

2.4 Diseño y construcción de filtros para armónicos

Se diseñan cuatro filtros sintonizados, que se constituyen de dos elementos reactivos conectados en serie, la frecuencia de resonancia o diseño está considerada como la del armónico al cuál intentará eliminar y de acuerdo con la calidad del filtro, los mismos que serán conectados en paralelo e individualmente con la carga, conjuntamente a la salida del variador de voltaje que gobierna la bomba de impulsión de agua, mediante los contactores de acuerdo con el diagrama mostrado en la Figura 26.

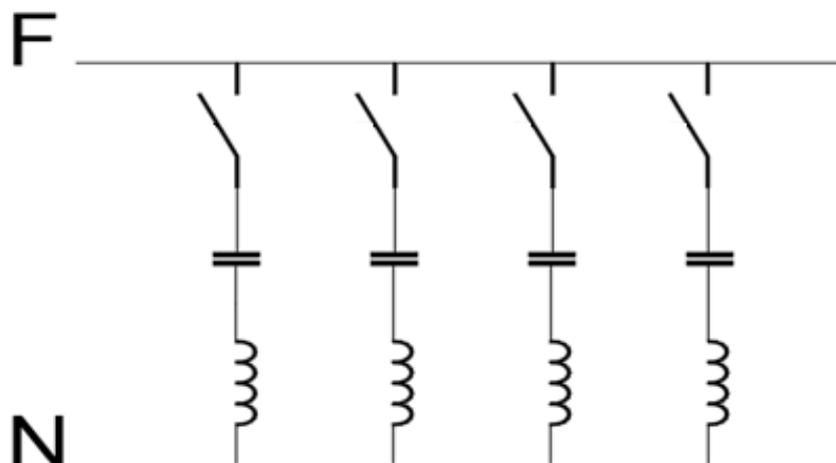


Figura 26 Diagrama eléctrico de los filtros sintonizados

2.4.1 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

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

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 escoge el valor de los capacitores de 20 μ F, disponibles comercialmente de la marca DISPROEL, sus principales parámetros eléctricos son:

TABLA 2.7.
Características técnicas del capacitor

Normas de Fabricación	NTC 2134-1 NTC2134-2 IEC61048 IEC61049
Capacitancia(μ F)	20
Tolerancia	$\pm 3\% \pm 5\%$
Tensión Nominal U N (VAC)	250 - 330 - 450
Frecuencia de Trabajo f N (HZ)	50/60
Resistencia de Descarga (M Ω)	Garantiza una tensión < 50V después de 60s de desconectado
Tangente de ángulo de pérdidas (factor de disipación)	< 0.001 ó 0.1% a 120Hz < 0.1 ó 1% a 1kHz
Temperatura de operación (°C)	- 40 a + 90
Tensión máxima de operación U MAX	1.1 *U N
Corriente máxima de operación I MAX	1.3*IN (IN, corriente nominal)

Fuente: (Disproel, 2017)

Para el valor del capacitor de 20 μF , se tiene una reactancia capacitiva calculada por la ecuación 2.1 correspondiente

$$X_c = \frac{1}{2\pi * 60 * 20\mu\text{F}} \quad (2.1)$$

$$X_c = 132,63 \Omega$$

Se calcula el valor de la potencia capacitiva dada por la ecuación (2.2) correspondiente; para una alimentación de red de 120V.

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c} \quad (2.2)$$

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

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

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

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} \quad (2.3)$$

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

$$X_L = 14,74\Omega$$

La inductancia para la frecuencia fundamental de medirá por:

$$L = \frac{X_L}{w} \quad (2.4)$$

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

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

En la TABLA 2.8 se resumen los cálculos, para los tipos de orden de armónicos diseñados.

TABLA 2.8.
Cálculos de los tipos de orden de armónicos.

Número de armónico (°)	Capacitancia serie (μF)	Reactancia inductiva calculada (Var)	Inductancia calculada (mH)
3	20 μF	108.57 Var	39.08mH
5	20 μF	108.57 Var	14.07mH
7	20 μF	108.57 Var	7.18 mH
9	20 μF	108.57 Var	4.34mH

Fuente. Autores Rodrigo Fuertes & Eduardo Ortiz

2.4.2 Construcción de los inductores

2.4.2.1 Inductor 1 armónico de orden 3

Las dimensiones tomadas, para el núcleo en el primer inductor son, alto 3cm y ancho 2.2cm, que corresponden a la ventana del núcleo de hierro, aplicado para este filtro; cuya sección calculada de acuerdo con la ecuación de 2.5 corresponde a:

$$S = 3cm * 2.2cm \quad (2.5)$$

$$S = 6.6 cm^2$$

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

$$P = 68.06 W$$

La Potencia máxima del núcleo es 68.06W

Para determinar el número de espiras de acuerdo con la ecuación 2.6, se tiene que:

$$N = \frac{120V}{180Hz * 6,6cm^2 * 8000Gauss * 4,4 * 10^{-8}} \quad (2.6)$$

$$N = 286.96 \text{ espiras}$$

Para determinar la sección del conductor de acuerdo con la ecuación 2.7, se toma una densidad de corriente de 3.5A, según (Gallego, 2009) que corresponde a transformadores pequeños, por lo que la sección del conductor será:

$$s = \frac{I}{D} \quad (2.7)$$

$$s = \frac{A}{3.5A/mm^2}$$

$$s = \frac{A}{3.5A/mm^2}$$

$$s = 0.857 \text{ mm}^2$$

Para una sección del conductor de 0.857 mm², según la TABLA 1.5, el calibre corresponde a 18 AWG. En la Figura 27, se muestra la construcción de uno de los inductores diseñados, en el que se enrolla 287 espiras de cable esmaltado de cobre # 18 AWG en un núcleo de hierro reciclado de hierro de un transformador comercial.



Figura 27 Inductor

TABLA 2.9.

Resume las características de diseño y cálculos, de cada uno de los inductores.

Número de Armónico	Dimensiones Núcleo (cm)	Potencia (W)	Espiras (vueltas)	Inductancia (mH)	Calibre del conductor (AWG)
3	3 * 2.2	68.06	287	39.08	18
5	4 * 3	225	95	14.07	18
7	4 * 3	225	68	7.17	18
9	3.5 * 2.5	110.25	75	4.34	18

Fuente. Autores Rodrigo Fuertes & Eduardo Ortiz

2.5 Configuración de filtros

Una vez culminado la elaboración de los inductores, se procede a la configuración de los filtros tipos sintonizados, los mismos que están dimensionados para cada orden armónico. El circuito del filtro se conecta, paralelo a la carga.

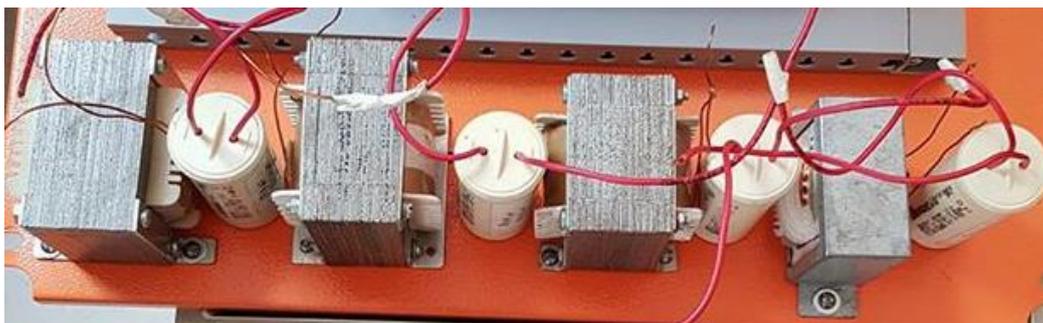


Figura 28 Configuración de filtros

2.5.1 Control del sistema de generación y eliminación de armónicos

Para controlar el encendido de la bomba impulsora de agua para generar los armónicos, así como también la compensación, mediante los cuatro filtros, monitoreo y análisis de la señal, se usa la DAQ 6008.

La adquisición de datos de la señal analógica de red, se la realiza mediante el dispositivo acondicionador ZMPT101B, conectado a la DAQ para ser monitoreado desde el computador, a través del puerto serial controlado por la interfaz diseñada en LabVIEW, como se muestra en la Figura 29.



Figura 29 Diagrama de adquisición y control del sistema de generación y eliminación de armónicos

El diagrama del sistema total se muestra en la Figura 31, y corresponde al proceso e instrumentación del sistema, aquí se detalla la activación, que se la realiza por el comando de relés a 5 VDC controlados desde la interfaz en LabVIEW, los mismos que activan a los contactores o circuitos de control de fuerza, que conectan a los diferentes circuitos paralelos a la red eléctrica monofásica. Por fines didácticos, se ha programado la activación de los mismos de manera selectiva y única con el fin de eliminar un armónico a la vez.

El sistema se halla dotado de protecciones independientes para fuerza y control, independizando los circuitos ante cualquier fallo y evitando que estos afecten al circuito donde se realizan las pruebas.

Como carga del sistema se tiene una bomba monofásica que recirculará el agua en forma continua. Para refrigerar a los dispositivos se ha incluido un ventilador controlado con el encendido de la bomba cuya función es extraer aire caliente del sistema.

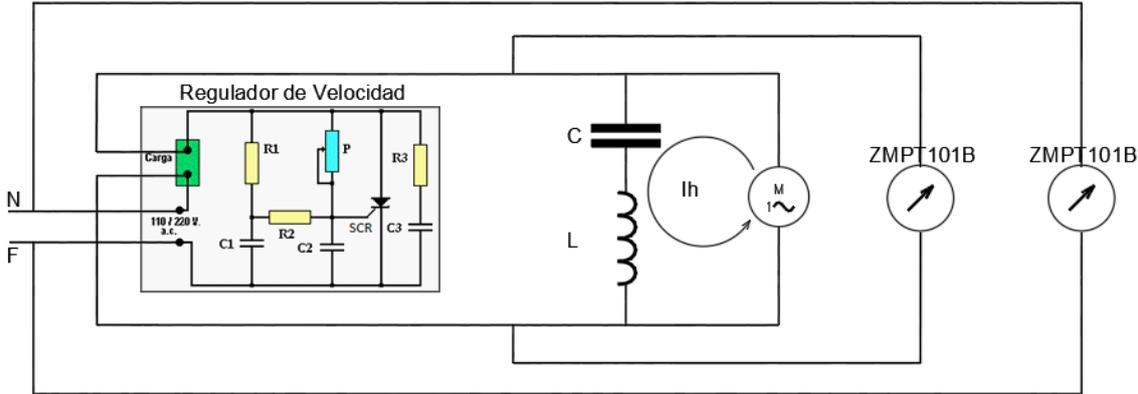


Figura 30 Diagrama de posición de adquisición de señal con el sensor ZMPT101B

Fuente. Autores Rodrigo Fuertes & Eduardo Ortiz

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

DIAGRAMA DE PROCESO E INSTRUMENTACIÓN

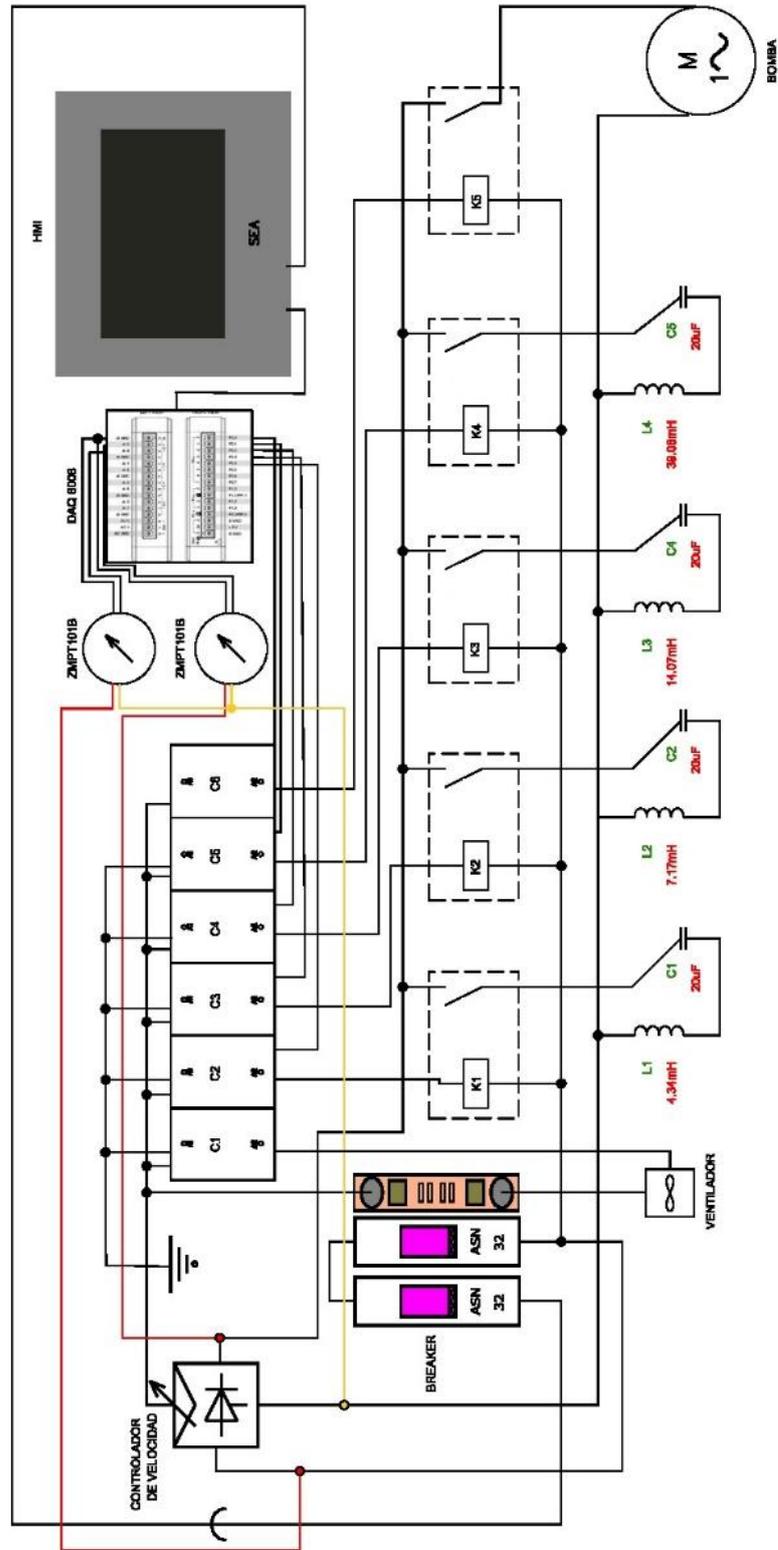


Figura 31 Diagrama de proceso e instrumentación
Fuente. Autores Rodrigo Fuertes & Eduardo Ortiz

2.6 Diseño de la interfaz



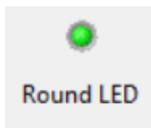
Figura 32 Diseño de la interfaz

LabVIEW es un sistema de programación conformado por múltiples herramientas destinadas al desarrollo de aplicaciones que en este caso se representará a un analizador de red, permitiendo recopilar datos de forma gráfica y porcentual. Mediante un nuevo VI (Diagrama de Bloques) se da inicio al proceso de representación de un analizador de red utilizando herramientas como:



While Loop

While Loop, es una herramienta que permite que un ciclo sea repetitivo, dentro del mismo encuentra un elemento de paro que finalizará todo el proceso.



Round LED

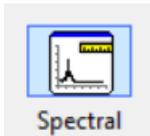
Boolean, es un Botón de Control que inicia y finaliza una orden pudiendo ser ON / OFF.



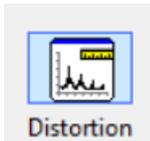
Build Array **Build Array**, es un acondicionador que permite la unión de dos señales diferentes.



DAQ Assist **DAQ Assistant**, permite adquirir o generar datos pudiendo ser análogos o digitales.



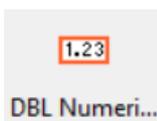
Spectral **Spectral Measurements**, permite generar el cálculo espectral (Transformada de Fourier).



Distortion **Distortion Measurements**, realiza mediciones de distorsión en una señal THD, Specific Harmor y SINAD.



Waveform G... **Waverform Graph**, representa gráficamente a los datos.



DBL Numeri... **DBL (Adapt to Source)**, permite la introducción y visualización de cantidades numéricas.

La interfaz de usuario debe controlar la activación de los relés que gobiernan a los contactores para la conmutación de los circuitos de generación y corrección, por lo que se han incluido 6 salidas digitales, en los puertos el D0.0 al D0.5, que son distribuidas de acuerdo con la tabla 2.10, las mismas interactúan con el programa a través del DAQ Asistant, configurado como salida digital para muestras bajo demanda como se muestra en la Figura 31.

TABLA 2.10.
Distribución lógica de puertos

Puerto	Tipo	Función
D0.0	Salida digital	Control bomba
D0.1	Salida digital	Filtro tercer armónico
D0.2	Salida digital	Filtro quinto armónico
D0.3	Salida digital	Filtro séptimo armónico
D0.4	Salida digital	Filtro noveno armónico
D0.5	Salida digital	Ventilador
AI0.0	Entrada analógica	Señal de red
AI4.0	Entrada analógica	Señal de red

Fuente. Autores Rodrigo Fuertes & Eduardo Ortiz

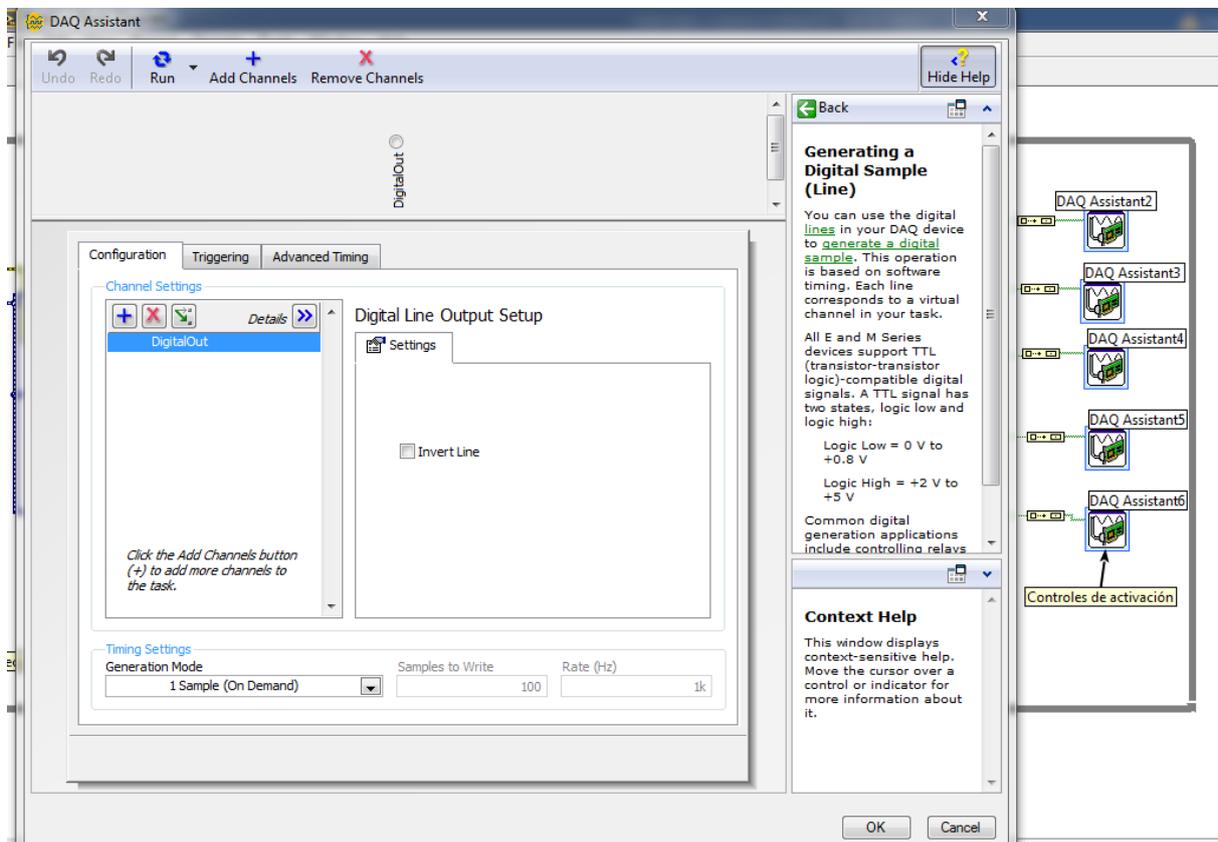


Figura 33 Configuraciones de las salidas digitales

La entrada analógica desde donde se adquiere la señal, desde dos acondicionadores ZMPT101B, corresponden al puerto AI0.0 y AI4.0 de la DAQ 6008; están configurados para obtener 1000 muestras de manera continua para una frecuencia de muestreo de 10kHz, en un rango de voltaje de entre -10 a +10 Voltios.

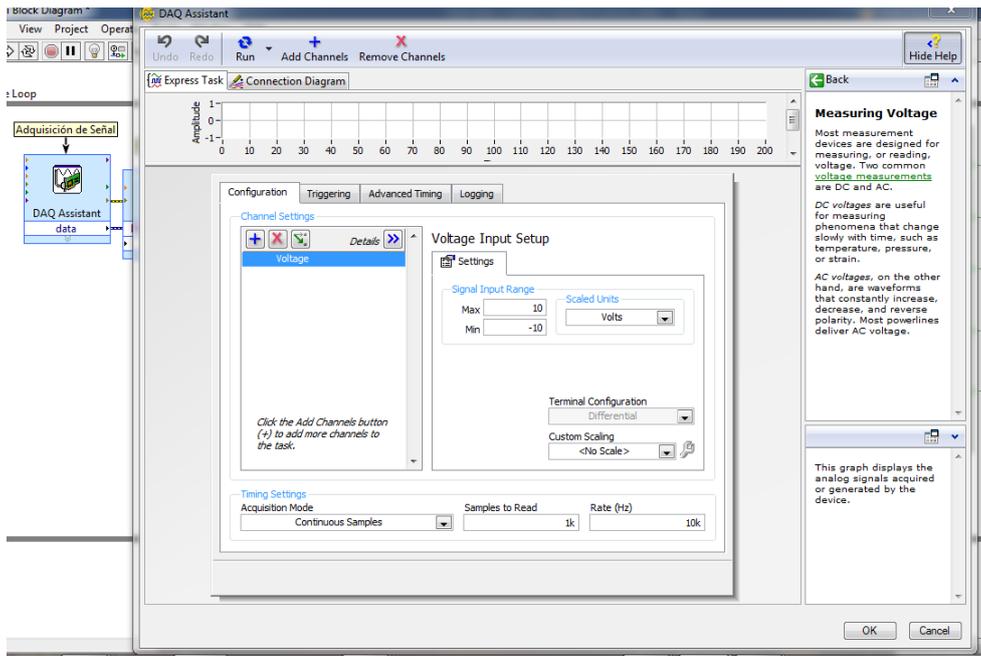


Figura 34 Configuración del puerto analógico

El diagrama de bloques, de la interfaz diseñada, se muestra en la Figura 35, en el mismo, el programa principal se encuentra dentro del lazo de ejecución While Loop que lo hace repetitivo, hasta que no se presione el botón de STOP o exista un error en la comunicación con la adquisición. En este, se ejecuta en primera instancia el muestreo de la señal para posteriormente, filtrarla, medir y analizar las componentes en tiempo y frecuencia de la señal de la red, así mismo se promedian el valor de la señal THD medida, para lograr un valor estable una vez que se tienen 100 muestras.

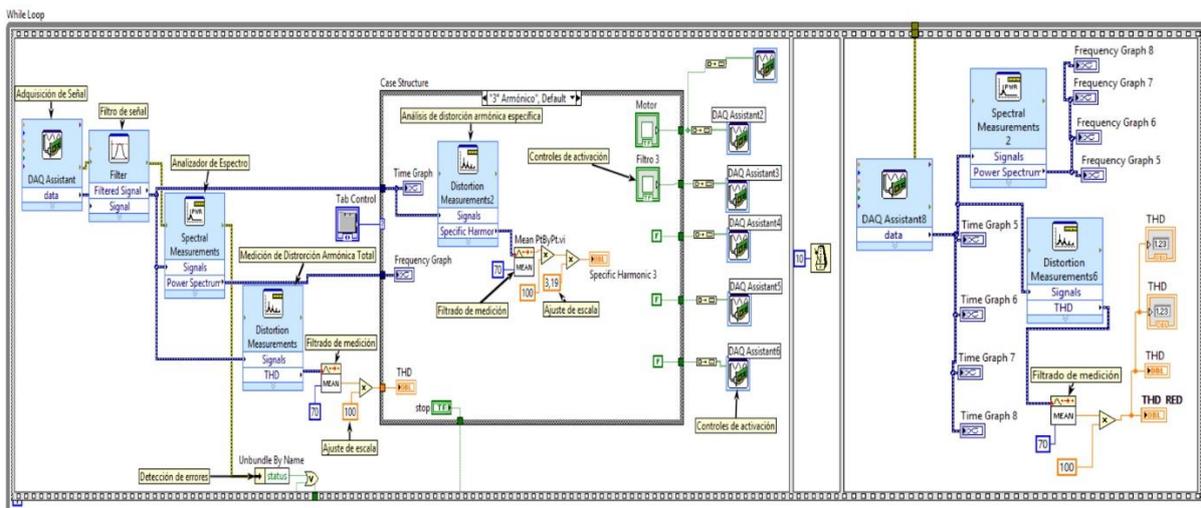


Figura 35 Diagrama de bloques total de la interfaz diseñada

Los datos de la señal analógica son enviados a un Case Structure, como en la figura 36 donde inicialmente se muestran las gráficas para del tiempo y la frecuencia, y que, de acuerdo al caso seleccionado por el usuario en el Panel Frontal, son analizados en la distorsión armónica individual para promediarlos y en función del quipo patrón ajustar la escala y mostrar en un indicador numérico. Así mismo los datos booleanos que son ingresados por el usuario únicos en cada caso conforme a la selección, son enviados fuera del Case Structure para que se ejecuten bajo demanda.

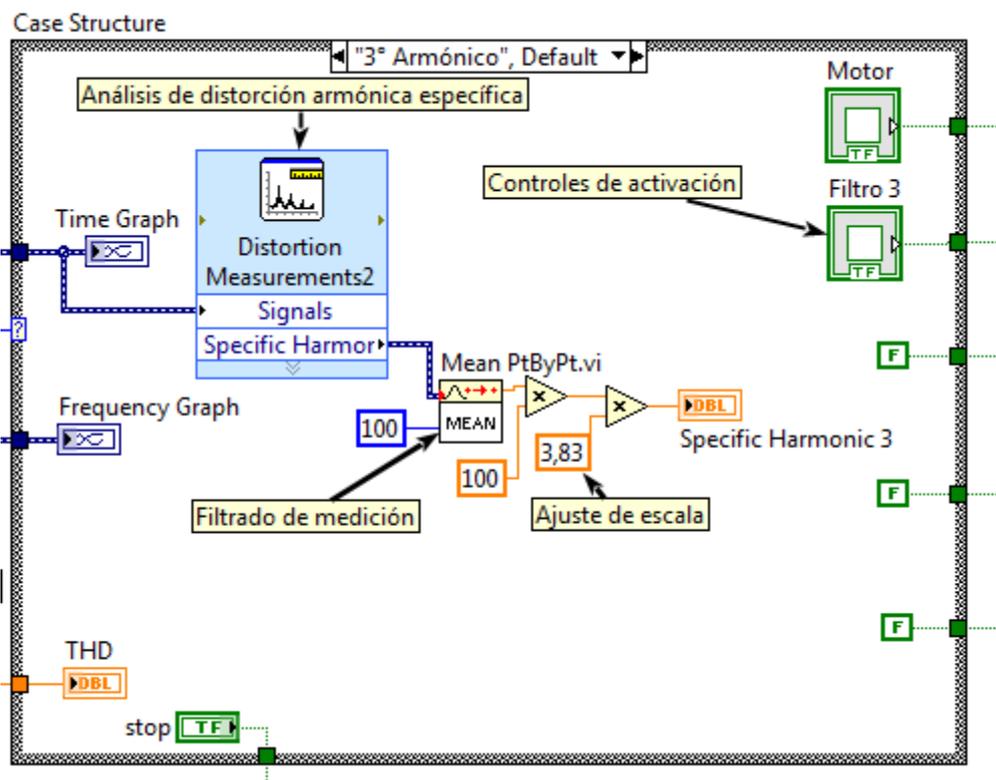


Figura 36 Selección de casos para el análisis de armónicos

Para eliminar el ruido y señales no deseadas que puedan interferir en las mediciones se utiliza la herramienta de filtrado de la paleta de Signal Analysis del diagrama de bloques, en el cuál se configuran los parámetros para un filtro Pasa bajos cuya frecuencia de corte está de 600Hz, misma que permitirá visualizar hasta el 9no armónico motivo de este estudio. Se selecciona además por defecto un filtro de respuesta infinita con la Topología de Butterworth de orden 5 y se configura el tipo de visualización en Señal. En la Figura 37, se muestra el resultado.

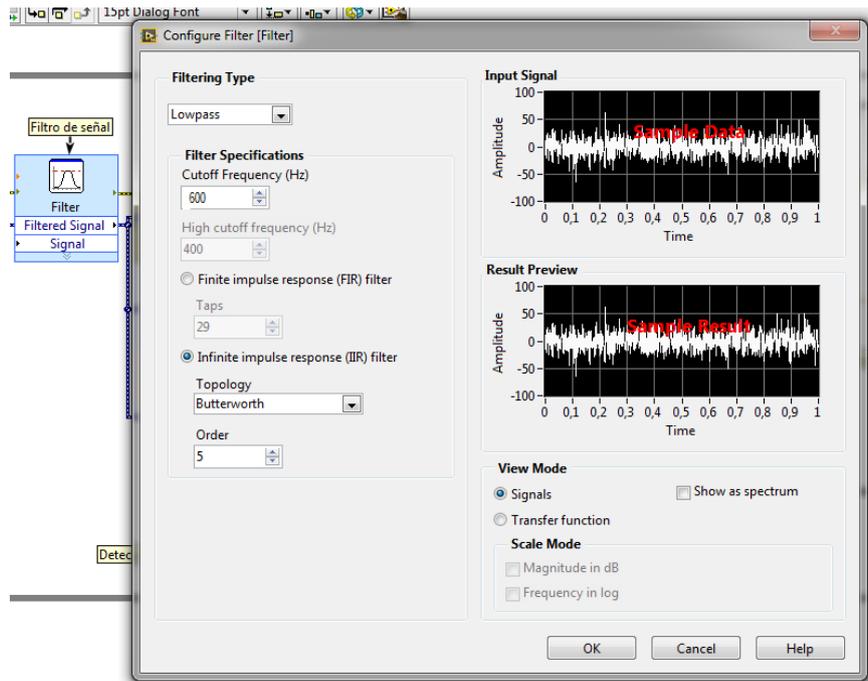


Figura 37 Configuración de la herramienta de filtrado de señal

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 38.

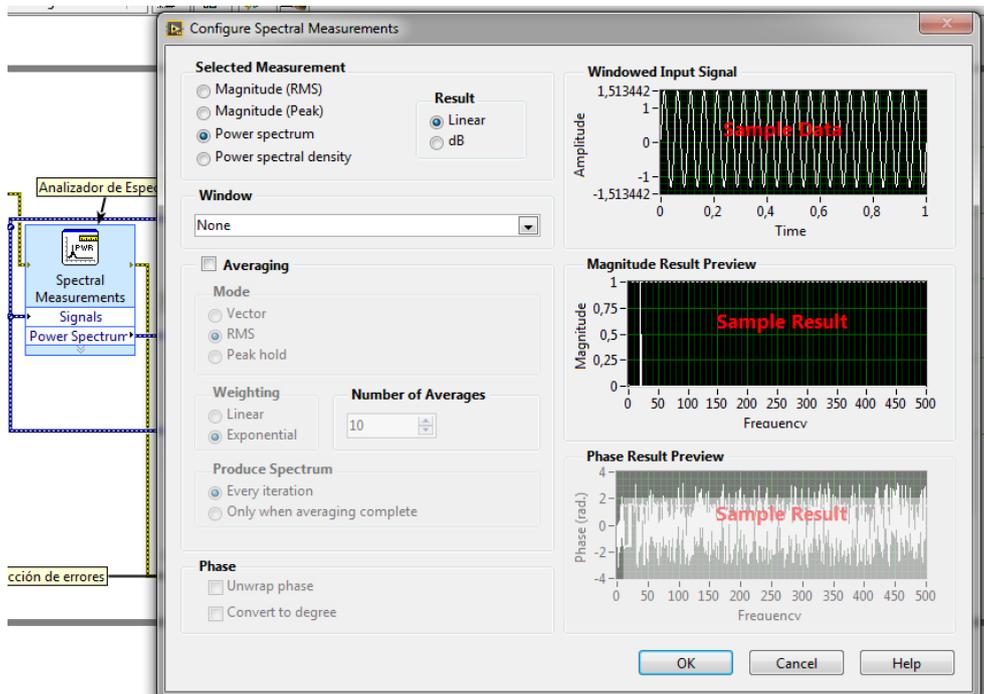


Figura 38 Configuración de la herramienta Spectral Measurements

La herramienta Distortion Measurements, permite medir la Distorsión Armónica Total THD y la específica de acuerdo con su configuración como se muestran en las Figuras 39

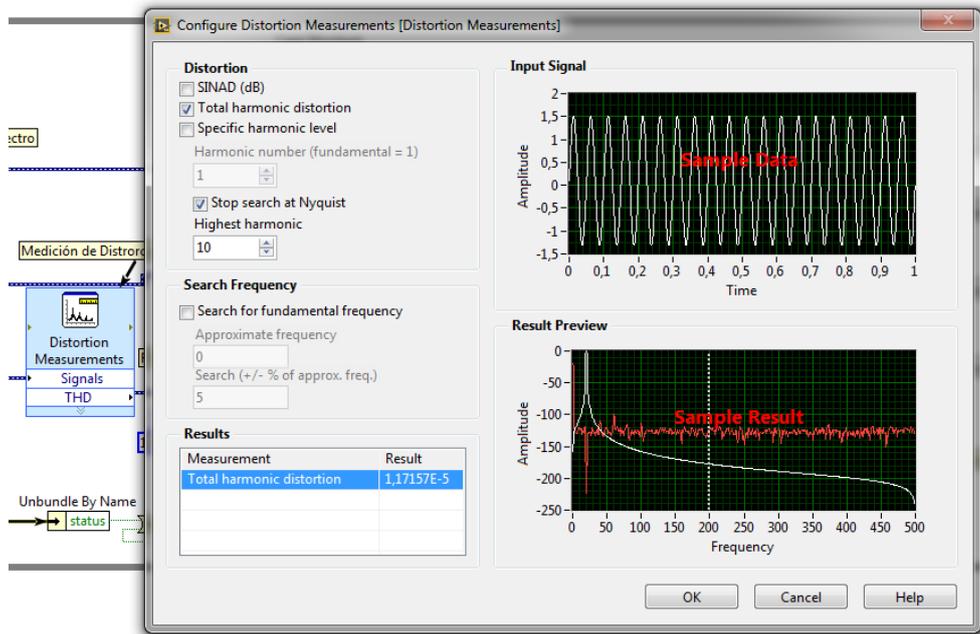


Figura 39 Configuración de herramienta para medir la Distorsión Armónica Total

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

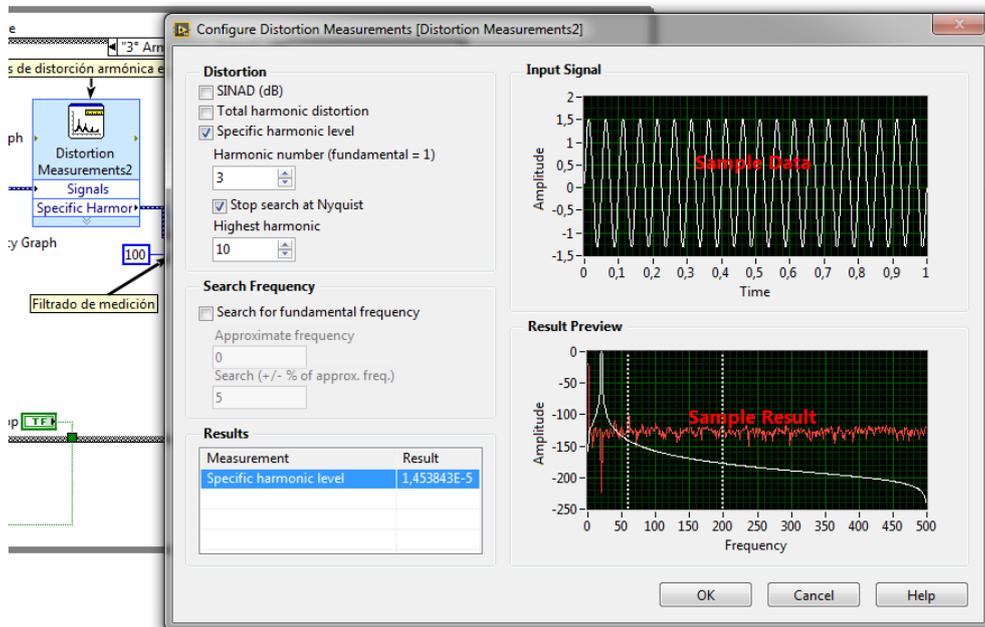


Figura 40 Configuración de la medición de distorsión del tercer armónico

La interfaz final diseñada que permitirá controlar la generación y corrección además de realizar el análisis de la distorsión se muestra en la Figura 41, 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.

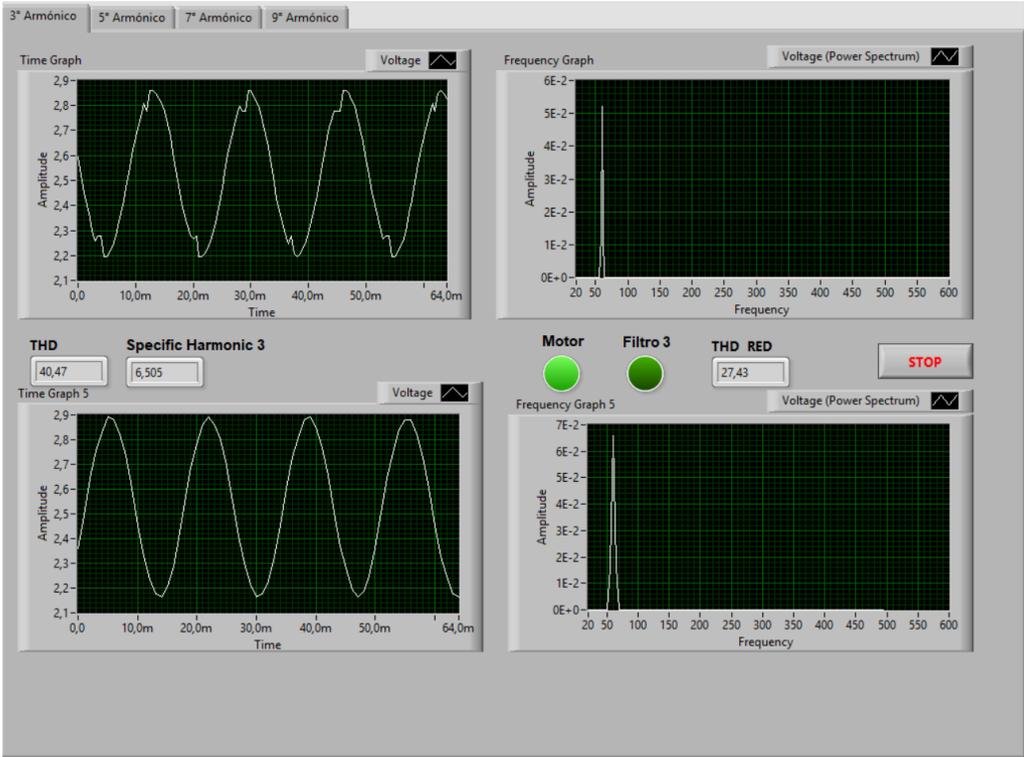


Figura 41 Panel frontal de la interfaz de usuario final

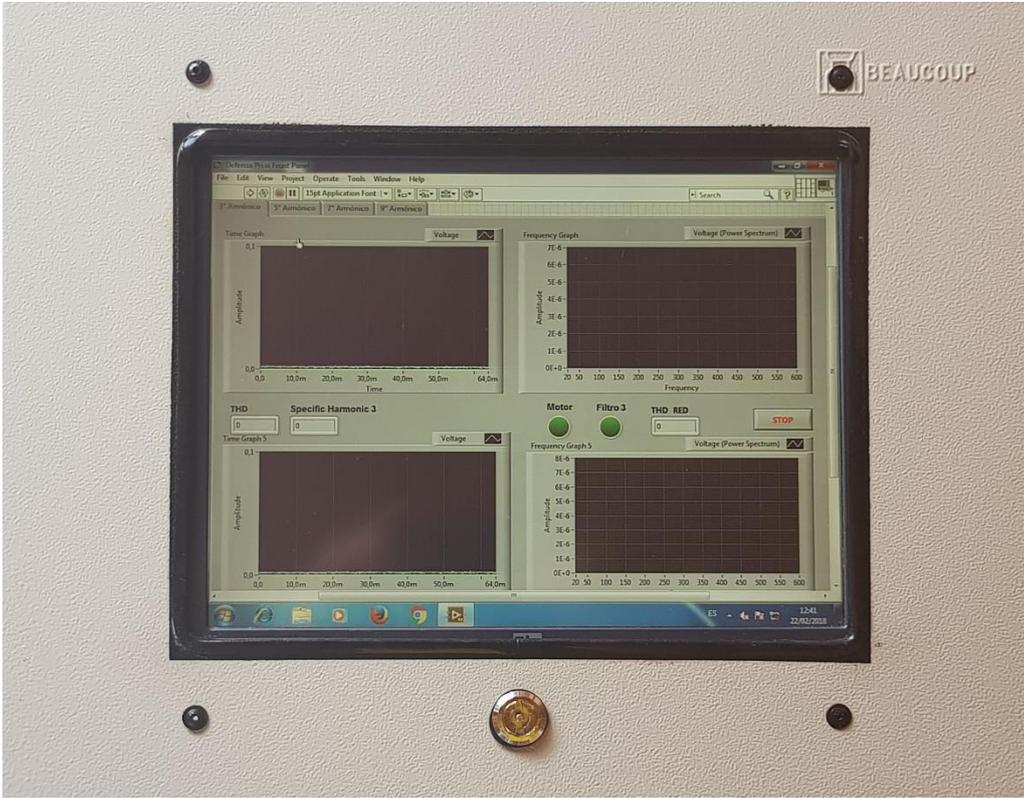


Figura 42 HMI frontal del módulo didáctico

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 Mediciones de las inductancias en las bobinas

En primer lugar, se miden los valores de la inductancia mediante el instrumento NI ELVIS II o Estación de Laboratorio de Ingeniería NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite que es una plataforma modular de laboratorio educativo de ingeniería desarrollada específicamente para la academia, se tienen los resultados mostrados:

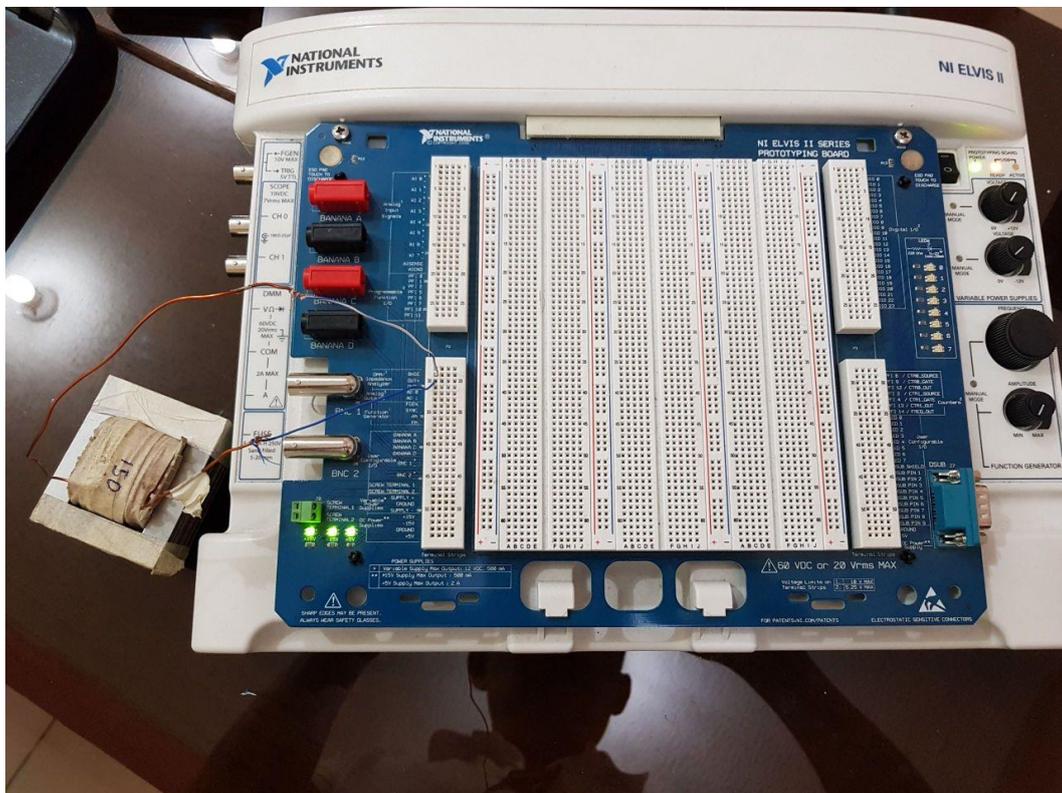


Figura 43 Medición de inductancia mediante equipo NI ELVIS II



Figura 44 Inductancia medida para armónico orden 3



Figura 45 Inductancia medida para armónico orden 5



Figura 46 Inductancia medida para armónico orden 7

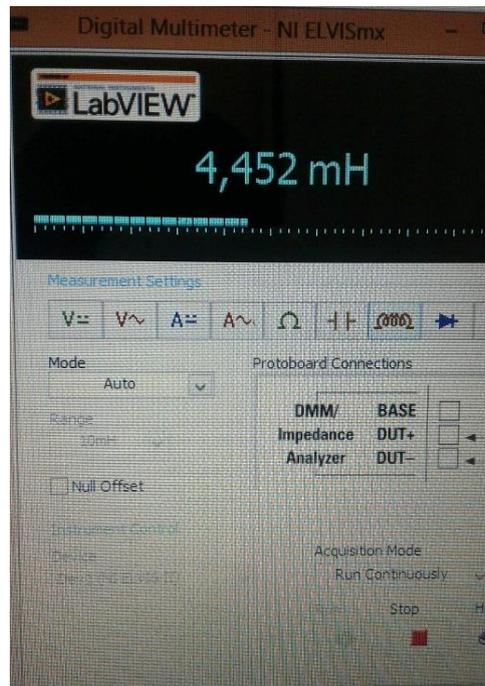


Figura 47 Inductancia medida para armónico orden 9.

La TABLA 3.11, muestra el resumen de los valores teóricos y medidos de los inductores construidos para los filtros de armónicos.

TABLA 3.11.
Resumen de los valores teóricos y medidos de los inductores

Orden armónico	Inductancia calculada	Inductancia medida
3	39.08mH	38.94mH
5	14.07mH	14.63mH
7	7.17mH	7.26mH
9	4.34mH	4.45mH

Fuente. Autores Rodrigo Fuertes & Eduardo Ortiz

De acuerdo con lo anterior se calcula el error entre el valor medido y valor teórico calculado:

$$e = \frac{vc - vm}{vc} \times 100\% \quad (3.1)$$

Siendo:

e, es el error porcentual

vm, es el valor medido

vc, es el valor teórico calculado

En la siguiente TABLA 3.12 se representará el análisis de prueba y error partido del cálculo del inductor medido por el equipo NI ELVIS II:

TABLA 3.12.
Error porcentual

Número de armónico (°)	Error %
3	0.35%
5	3.98%
7	1.25%
9	2.58%

Fuente. Autores Rodrigo Fuertes & Eduardo Ortiz

3.2 Armado del sistema de generación y eliminación de armónicos

De acuerdo con el diagrama de la Figura 31, se construyó el módulo empotrado en una caja metálica autosoportada, en la misma se incorpora el sistema de control y monitoreo dedicado en un computador incorporado con pantalla táctil en la parte frontal, el mismo que permitirá al usuario interactuar con el HMI desarrollado, cuyo resultado final se muestra en la figura 46

La parte frontal del módulo, con el HMI incorporado, se muestra en la Figura 42

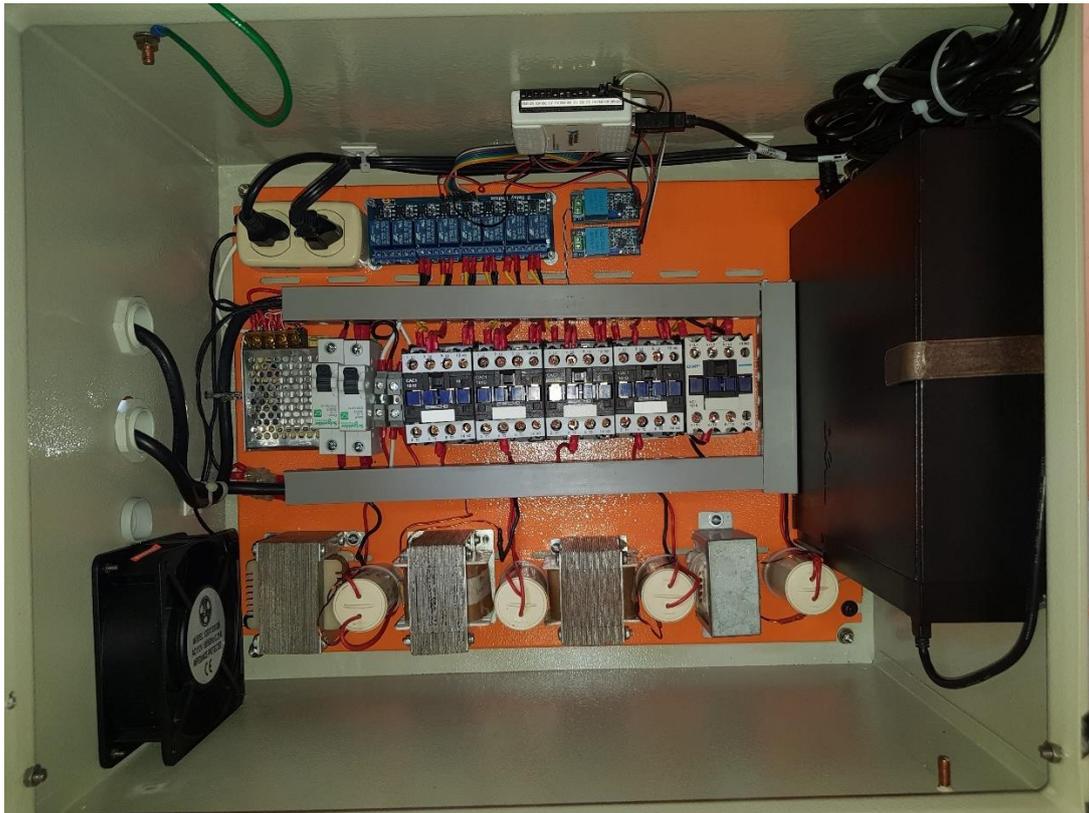


Figura 48 Módulo vista frontal

3.3 Comprobación de resultados

Los resultados obtenidos en la corrección de cada uno de los armónicos se muestran en las figuras siguientes y sirvieron adicionalmente para ajustar las escalas de las mediciones de los armónicos específicos del módulo construido, en ellas se usó como patrón el equipo Fluke 435.

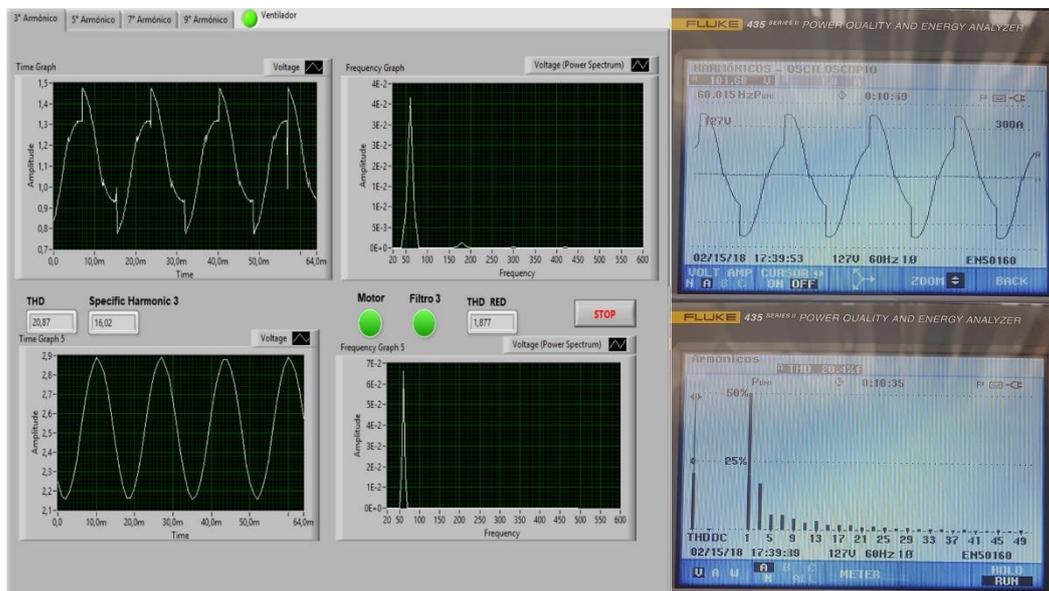


Figura 49 Medición del THD total ajustado para 20.87%

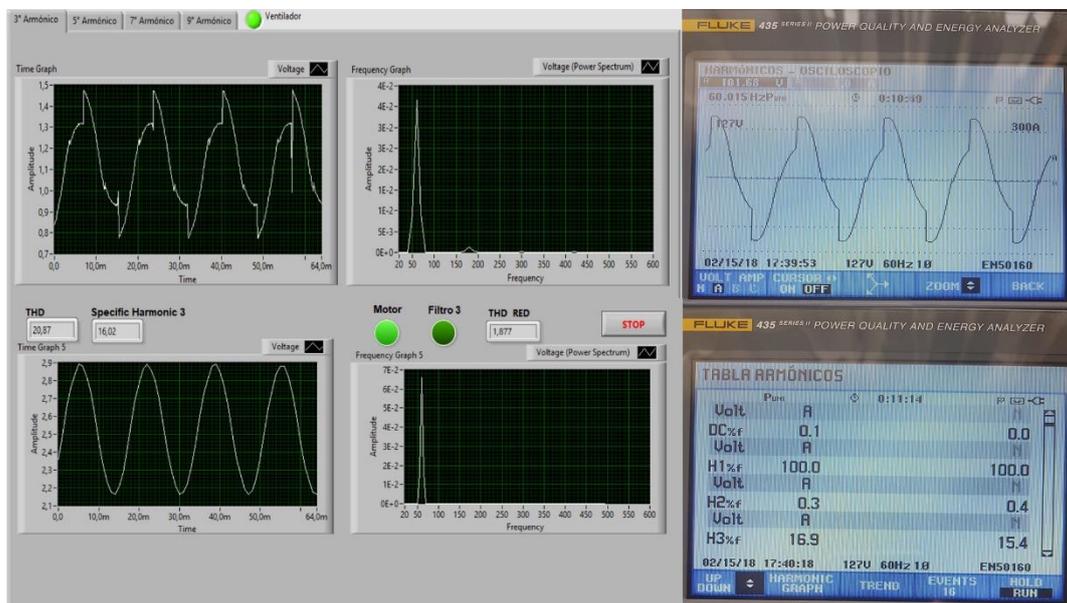


Figura 50 Medición para el tercer armónico, sin filtro, distorsión de 16.02 %

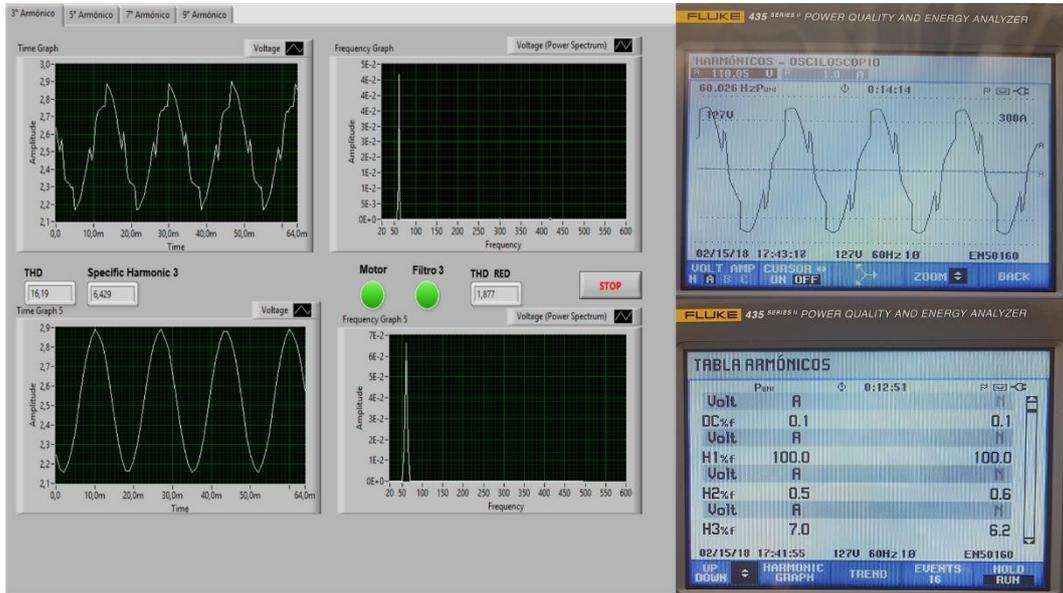


Figura 51 Medición del tercer armónico con filtro, distorsión del 6.42%.

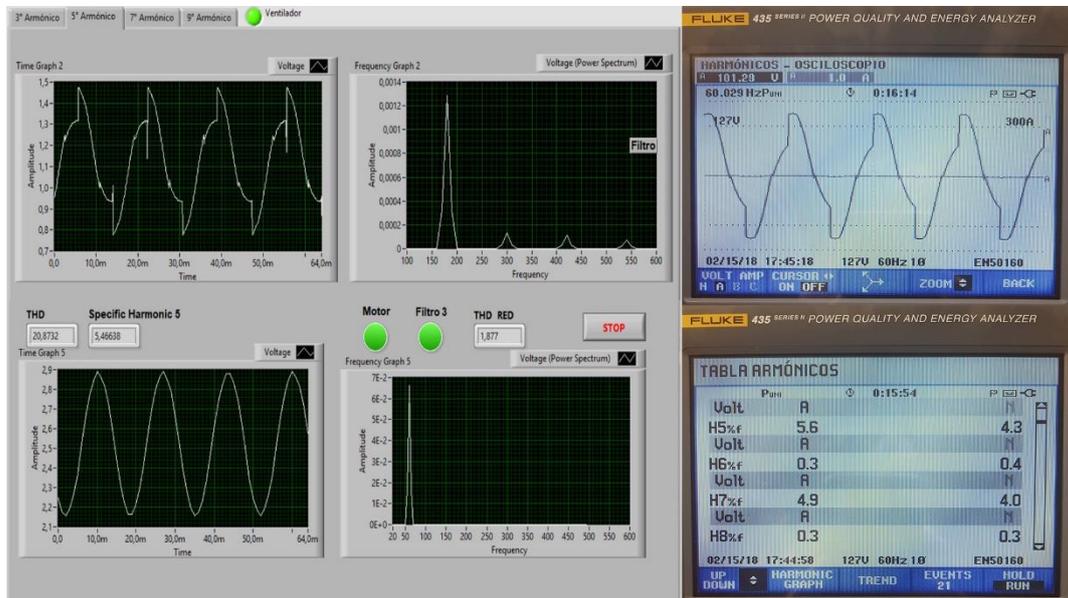


Figura 52 Medición del quinto armónico sin filtro, distorsión del 5.46%

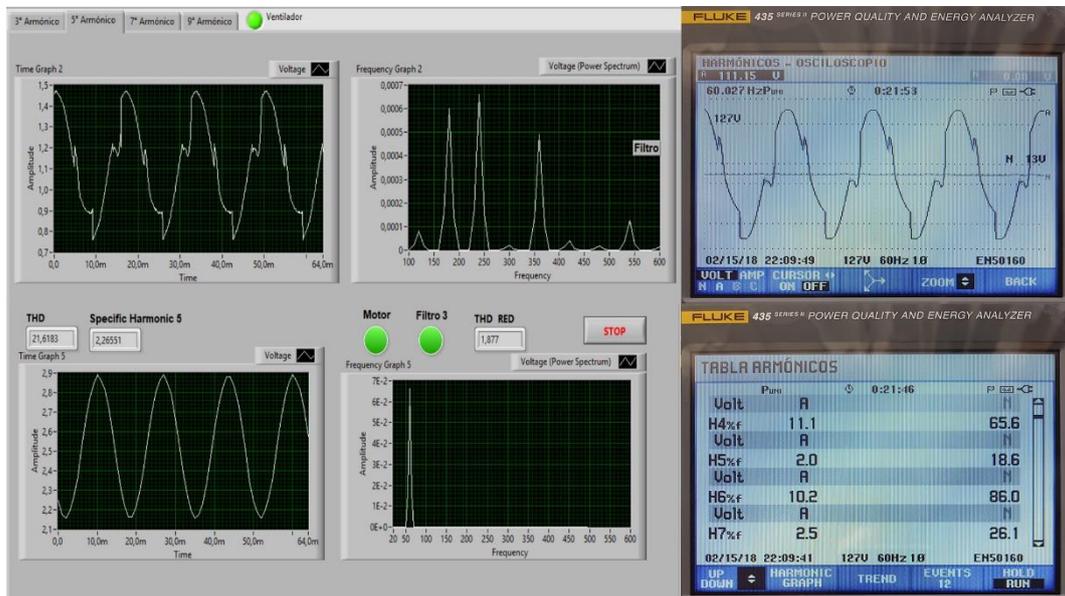


Figura 53 Medición del quinto armónico con filtro, distorsión del 2.26%

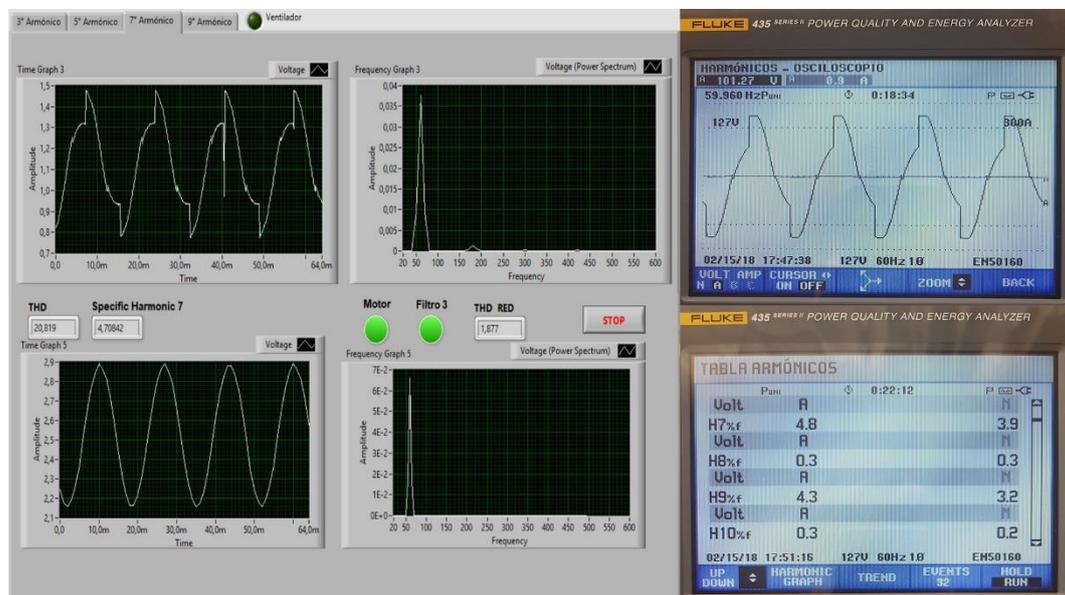


Figura 54 Medición del séptimo armónico sin filtro, distorsión del 4.70%

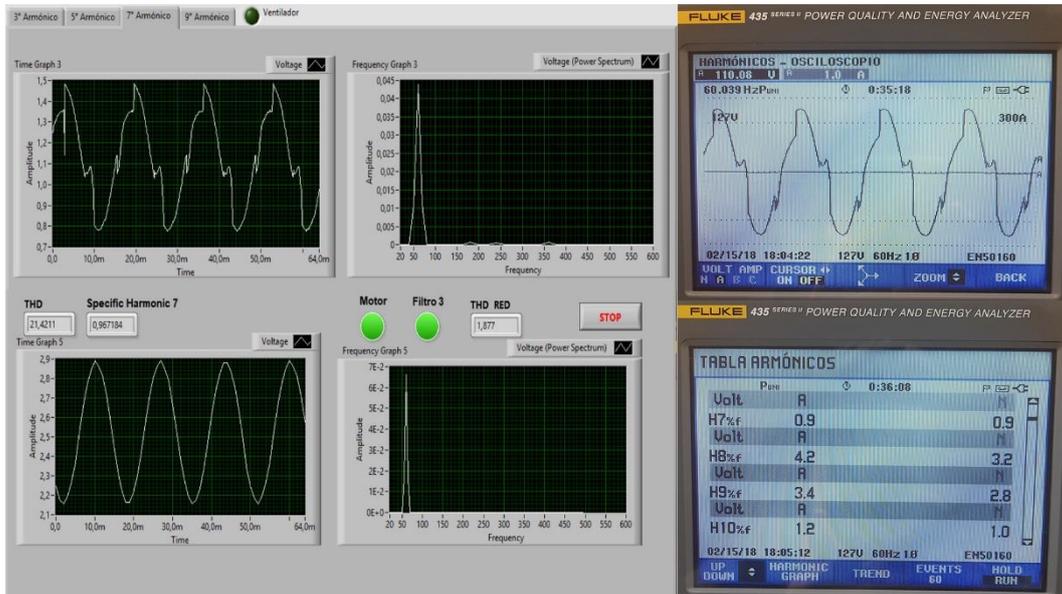


Figura 55 Medición del séptimo armónico con filtro, distorsión del 0.96%

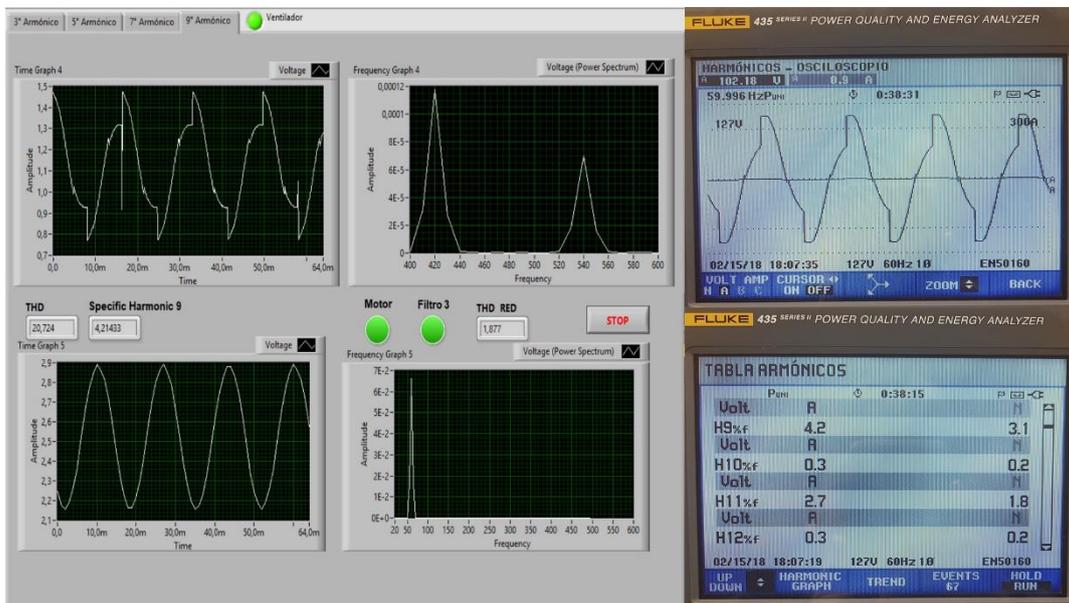


Figura 56 Medición del noveno armónico sin filtro, distorsión del 4.21%

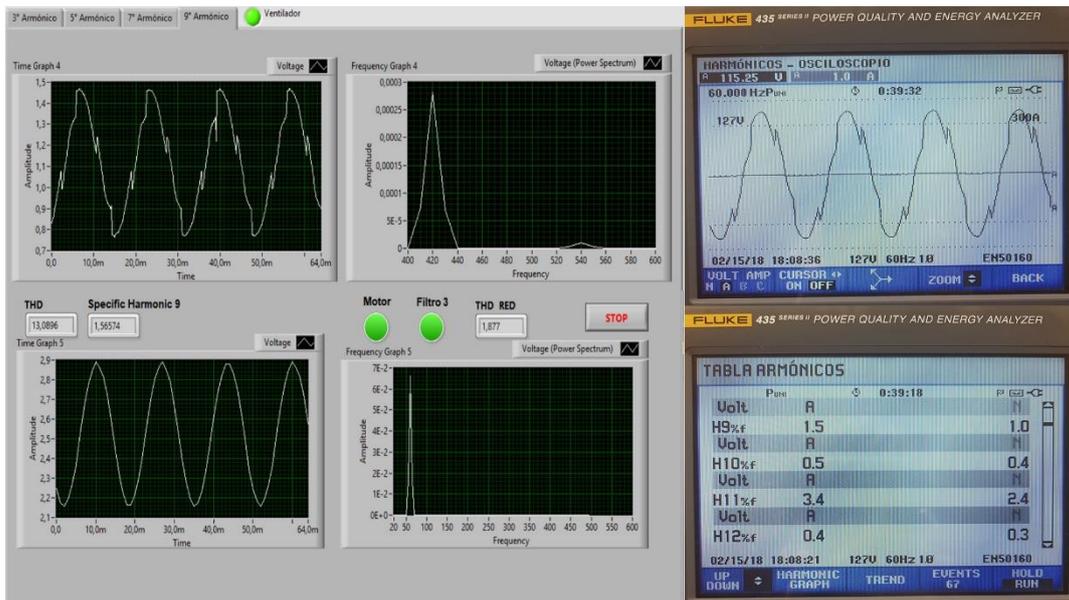


Figura 57 Medición del noveno armónico con filtro, distorsión del 1.56%

TABLA 3.13.
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 3.13 se muestran los resultados finales de corrección de armónicos, que están dentro de los rangos establecidos por la regulación CONELEC – 004/01 que regula la calidad del servicio eléctrico de distribución, por lo que se cumplen los objetivos establecidos en este trabajo, justificados desde el punto de vista teórico y práctico.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- La investigación es determinante para conocer y comprender los efectos de la presencia de armónicos y sus principales fuentes generadoras.
- En el diseño y construcción de los filtros de armónicos es necesario el dato de la densidad de flujo magnético para establecer el número de vueltas que deben tener los inductores, para esto se ha tomado en cuenta los valores encontrados en referencias bibliográficas para la construcción de las bobinas como parte de la implementación de los filtros.
- 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 medir la inductancia de las bobinas se ha utilizado el equipo de medición disponible en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico NI ELVIS II de National Instruments debido a que los equipos de medida disponibles no tienen la sensibilidad suficiente para detectar pequeñas inductancias.
- La adquisición y muestreo de la señal se puede hacer mediante el uso de una DAQ en conjunto con un acondicionador de señal; para el desarrollo de la interfaz de usuario, se ha utilizado el software Labview, que, gracias a su interfaz de programación gráfica ha facilitado la implementación del módulo como parte del monitoreo del analizador de red virtual construido.
- En la construcción de los filtros se encontró efectos de autoinducción, cuando se realizaban pruebas en combinaciones al mismo tiempo, por lo que para situaciones donde se implementen varios inductores para corregir distorsiones, será necesario

realizar un apantallamiento magnético para evitar que las inductancias mutuas alteren la respuesta de frecuencia y eficiencia del sistema.

- Los transductores incorporados en los equipos comerciales, destinados a investigación, normalmente están diseñado para adquisición en baja señal entre valores de +10 y -10 voltios, o en menor escala sin embargo para fines prácticos las señales eléctricas están siempre sobre niveles mínimos de 110 / 220 Voltios en baja tensión por lo que es recomendable trabajar con el sensor ZMPT101B utilizado en este trabajo, el cual se halla calibrado de fábrica para trabajar dentro de estos rangos en baja tensión sin ser necesario realizar ningún circuito adicional.
- 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.
- Los efectos de los armónicos producidos en esta investigación son reflejados en el sistema de generación y específicamente en el equipo de bombeo de agua en él se detecta el calentamiento en los devanados del estator, además de las vibraciones que se pueden escuchar por cambios en su régimen de trabajo normal, por lo que a nivel industrial se deben reducir la incidencia en la red eléctrica para evitar daños.
- El uso del equipo didáctico construido ha posibilitado el análisis de los armónicos y el comportamiento de los filtros aplicados, pudiendo a través de los resultados obtenidos construir la respuesta en frecuencia de los circuitos y realizar ensayos de conmutación de cargas LC, de manera aleatoria para estudiar los efectos y considerar mediante futuras investigaciones, aplicar un sistema automático de corrección de distorsiones a través de LabVIEW.
- Considerando los resultados obtenidos en el sistema de generación y corrección, es posible cambiar la carga para estudiar los efectos producidos o generados en otro tipo de dispositivos, a los que se pueda entregar potencia dosificada a través del variador mientras las condiciones de operación de trabajo permitan, para analizar su comportamiento.

- 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.

4.2. Recomendaciones

- En caso de futuros proyectos relacionados con el muestreo de datos en LabView es recomendable la utilización de equipos compatibles y de buena velocidad para adquisición y muestreo de datos.
- 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.
- Para realizar las prácticas es necesario inicializar el sistema de generación, una vez que se ha constatado la presencia de agua dentro del reservorio para evitar daños en el sistema de impulsión de la misma; así mismo se recomienda cambiar el agua con una periodicidad de al menos una vez al mes para evitar la corrosión de la bomba.
- Se debe realizar chequeos de los rodamientos de la bomba con una periodicidad de 3 meses, para prevenir daños permanentes en el motor.
- Se recomienda se continúe el desarrollando temas de tesis para que contribuyan a implementar dispositivos que permitan el monitoreo de las redes eléctricas que detecten armónicos en la red y se apliquen filtros automáticamente para evitar la contaminación de las redes de distribución.
- Se sugiere realizar una calibración con el analizador de espectros o equipo patrón, al menos una vez cada seis meses a fin de mantener una coherencia entre los valores reales y medidos a través del equipo diseñado, así mismo realizar el ajuste de escalas correspondientes.

- 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.
- Es de gran importancia revisar los enclavamientos de los contactores una vez terminada la práctica debido a que estos podrían quedar activados y con ellos los circuitos que gobiernan, pudiendo ocasionar sobrecalentamientos en los inductores.
- Es importante corregir las distorsiones armónicas y llevarlas a parámetros establecidos por el ARCONEL para de esta manera reducir efectos que puedan dañar a máquinas y equipos eléctricos.

Referencias bibliográficas

- Acevedo, F. (2001). *Componentes armónicas en redes de distribución eléctrica*. Obtenido de Componentes armónicas en redes de distribución eléctrica: <https://restamarina.cl/revistas/2001/5/Acevedo.pdf>
- Arduino. (2017). *Características de los modelos estándar de Arduino*. Obtenido de Características de los modelos estándar de Arduino: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>
- Balcells, J., Barra, V., & Autonell, J. (2010). *Eficiencia en el uso de la energía eléctrica*. Barcelona : Marcombo.
- Benavides, P. (2011). *Armónicos en las redes eléctricas: Universisad Politécnica Salesiana*. Quito: Universisad Politécnica Salesiana.
- Cabrera, J. (2015). *Filtros activos*. México.
- Carrillo, C. (2003). *Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (SVC)*. Obtenido de Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (SVC): <http://carrillo.webs.uvigo.es/publicaciones/SVC.pdf>
- Chapman, D. (03 de 2001). *Armónicos causas y efectos*. Obtenido de Armónicos causas y efectos: <https://impic.files.wordpress.com/2008/05/armonicos-causas-y-efectos-311.pdf>
- Collombet, C., & Schonek., J. (2007). *Cuaderno Técnico 152 (Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento)*. 2003:30. México.
- Czerweny. (s.f.). *Motor Czerweny*. Obtenido de Motor Czerweny: <http://www.motoresczerweny.com.ar/sitio/index.php>
- Disproel. (27 de 06 de 2017). *Ficha técnica condensadores para iluminación* . Obtenido de Ficha técnica condensadores para iluminación : <http://disproel.com/docs/Ficha%20t%C3%A9cnica%20condensadores%20iluminaci%C3%B3n-V2.pdf>
- Eguíluz , L. (2003). *Potencia en régimen no-sinusoidal*. España: Ilustrada.
- Enríquez, G. (2002). *Elementos de diseño de las instalaciones eléctricas industriales*. México: Limusa.
- Fernández, J. (2013). *LabVIEW*. México: Alfaomega.
- Fourier, J. (2012). *Los armónicos y la calidad de la energía eléctrica*. México: Energía R. Obtenido de Los armónicos y la calidad de la energía eléctrica.
- Fuentes, A. (25 de 10 de 2017). *Resonancia*. Obtenido de Resonancia: http://www.proyecto987.es/corriente_alterna_12.html
- Gallego, H. (05 de 2009). *Scientia et Technica Año, No 41 Universidad Tecnológica de Pereira*. ISSN 0122-1701. Obtenido de Scientia et Technica Año, No 41 Universidad

- 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/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/9521/Tesis_Completa.pdf?sequence=1
- Gers, J. (2008). *Teoría y diseño de filtros de armónicos en sistemas eléctricos*. Colombia: TECSUP.
- González, J. (2015). *Series y transformada de fourier pra selaes continuas y discretas en el tiempo*. Colombia : MNIA Science.
- González, M. (22 de 09 de 2013). *REGULACION No. CONELEC – 004/01 CALIDAD DEL SERVICIO ELECTRICO DE DISTRIBUCIONEL DIRECTORIO DEL CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD CONELEC*. Obtenido de REGULACION No. CONELEC – 004/01 CALIDAD DEL SERVICIO ELECTRICO DE DISTRIBUCIONEL DIRECTORIO DEL CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD CONELEC: <https://es.scribd.com/document/170053561/Regulacion-Conelec-004-01-Calidad-de-Servicio-Elctrico-de-Distribucion>
- 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.
- Jhonson, D., Jhons, J., & Hilburn, H. (2010). *Análisis básicos de circuitos eléctricos*. Obtenido de Análisis básicos de circuitos eléctricos: https://www.fiec.espol.edu.ec/resources/syllabus/basica/FIEC01735_ANALISIS_DE_REDES_ELECTRICAS_I.pdf
- Juárez DG. (2015). *Procedimiento para el estudio y análisis de perturbaciones armónicas Available from*. Obtenido de Procedimiento para el estudio y análisis de perturbaciones armónicas Available from: http://circuitor.com/docs/procedimientos_sp.pdf.)
- Lamich, M. (2006). *Filtros activos de potencia*. Obtenido de Filtros activos de potencia: http://www.crit.upc.edu/JCEE2006/pdf_ponencias/PDFs/JCEE06_09_11_T1.pdf
- Llamas, A., Baez, J., Acevedo, S., & De Los Reyes, J. (2014). *Armónicas en sistemas eléctricos industriales*. México: Innovación Editorial Lagares de México, S.A, de C.V.
- Maloney, T. (2006). *Electrónica industrial moderna*. México: Pearson.
- Miyara, F. (2004). *Filtros Activos*. Argentina: Universidad Nacional del Rosario.

- Molano, J., & Tique, R. (2013). *Diseño y construcción de un kit de filtros pasivos para la mitigación de corrientes armónicas*. Bogotá D.C.: Universidad de la Salle.
- MT., B., D., A., & JF., W. (2017). *Harmonic measurements, analysis, and power factor correction in a modern steel manufacturing facility*. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1996;32(3):617-24.). Obtenido de Harmonic measurements, analysis, and power factor correction in a modern steel manufacturing facility. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1996;32(3):617-24.): <http://ieeexplore.ieee.org/document/502174/>
- Reyes, G. (07 de 1996). *Armonicas en sisema de distribución de energía eléctrica*. Obtenido de Armonicas en sisema de distribución de energía eléctrica: <http://eprints.uanl.mx/7622/1/1020115478.PDF>
- Suarez, J. (05 de 12 de 2005). *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 3*. Obtenido de IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 3: <http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/ieee/issues/vol03/vol3issue5Dec.2005/08Suarez.htm>
- Tejada, A. (2007). *Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos*. Obtenido de Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos: <http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/allamas/cursos/ueee/armonicas/07efectarm.pdf>
- Téllez. (2012). *Distorsión Armónica.31*. México: AP & C.
- Toledo, N. (2010). *MANANDES S.C.C.I.* Obtenido de MANANDES S.C.C.I.: [https://www.google.com/search?client=firefox-b-ab&ei=ecdtWoG5GIm-zgL456CgAw&q=MANANDES+S.C.C.I.++Manta-%09calle+10+y+Av.+10+tel.+624078+fax+626652+email+manandes%40manta.ecua.net.ec+Ing.+Norman+Toledo\)&oq=MANANDES+S.C.C.I.++Manta-%09calle+10+y+Av.+10+tel.](https://www.google.com/search?client=firefox-b-ab&ei=ecdtWoG5GIm-zgL456CgAw&q=MANANDES+S.C.C.I.++Manta-%09calle+10+y+Av.+10+tel.+624078+fax+626652+email+manandes%40manta.ecua.net.ec+Ing.+Norman+Toledo)&oq=MANANDES+S.C.C.I.++Manta-%09calle+10+y+Av.+10+tel.)
- 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>
- Turégano, C. (21 de 06 de 2012). *DECLARATORIA de vigencia de las normas mexicanas NMX-J-595/2-1-ANCE-2012 y NMX-J-610/4-2-ANCE-2012*. Obtenido de DECLARATORIA de vigencia de las normas mexicanas NMX-J-595/2-1-ANCE-2012 y NMX-J-610/4-2-ANCE-2012.: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5255436&fecha=21/06/2012
- Universidad Tecnológica de Pereira. (05 de 2009). *Scientia et Technica Año, No 41 Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701*. Obtenido de Scientia et Technica Año, No

41Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701:
<http://www.redalyc.org/pdf/849/84916680001.pdf>

Varela, J., & Alvarado, F. (02 de 2015). *Banco de pruebas para filtrado de armónicos en las redes eléctricas*. Obtenido de Banco de pruebas para filtrado de armónicos en las redes eléctricas: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10278/1/UPS-GT001364.pdf>

Vasco, F. (2011). *Efecto del empleo de focos ahorradores*. Obtenido de Efecto del empleo de focos ahorradores : <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6117/1/Efectos%20del%20empleo%20de%20focos%20ahorradores.pdf>

Vilatuña, J. (2009). *Contactador*. Obtenido de Contactador: <http://www.areatecnologia.com/electricidad/contactador.html>

Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. México: Pearson Educación.

ANEXOS

Anexo A Fotografías

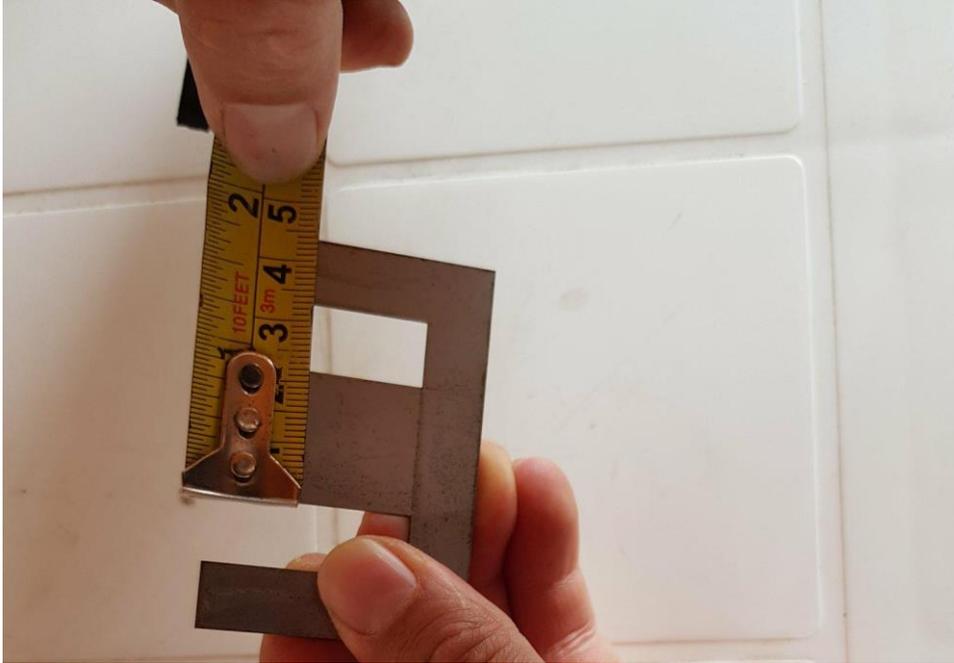


Figura 58 Medición de la sección del núcleo de la altura



Figura 59 Medición de la sección del núcleo del ancho

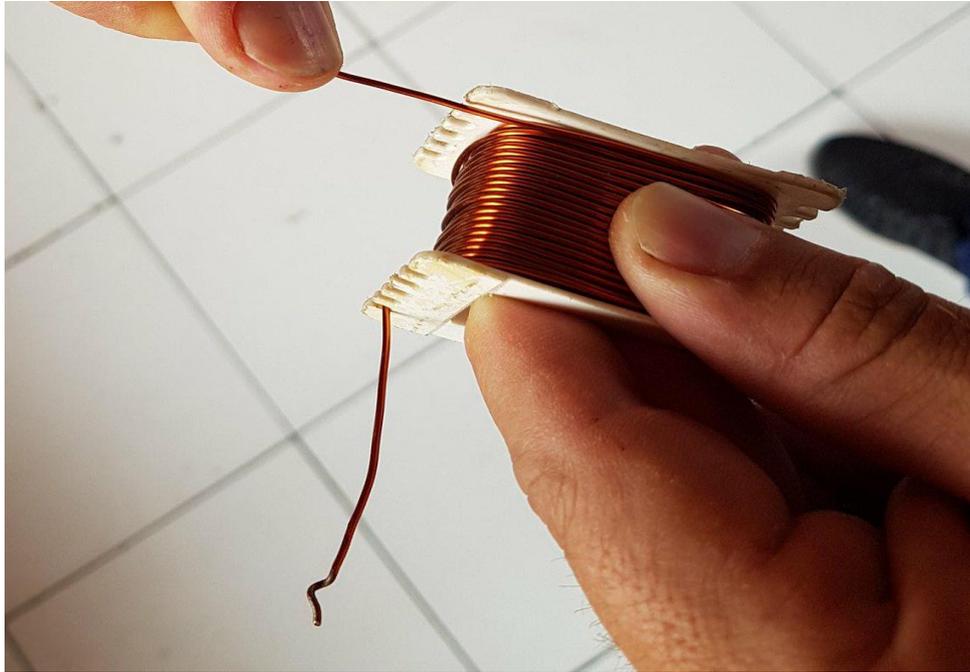


Figura 60 Construcción de la bobina del inductor

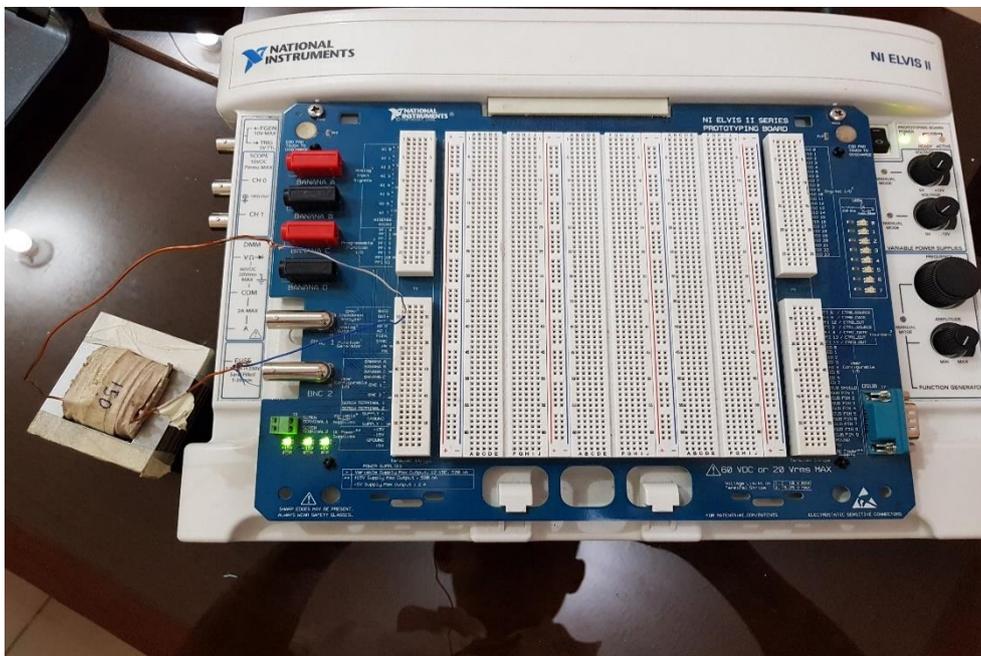


Figura 61 Uso del NI ELVIS

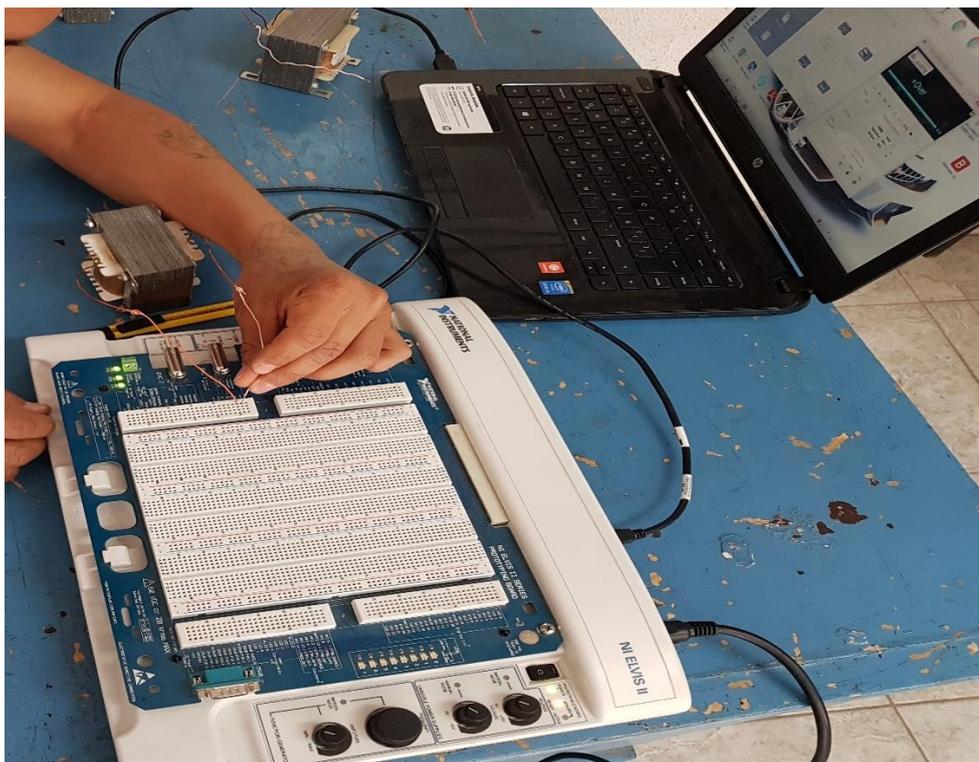


Figura 62 Conexión de los inductores al NI ELVIS



Figura 63 Verificación de una correcta conexión a los puertos

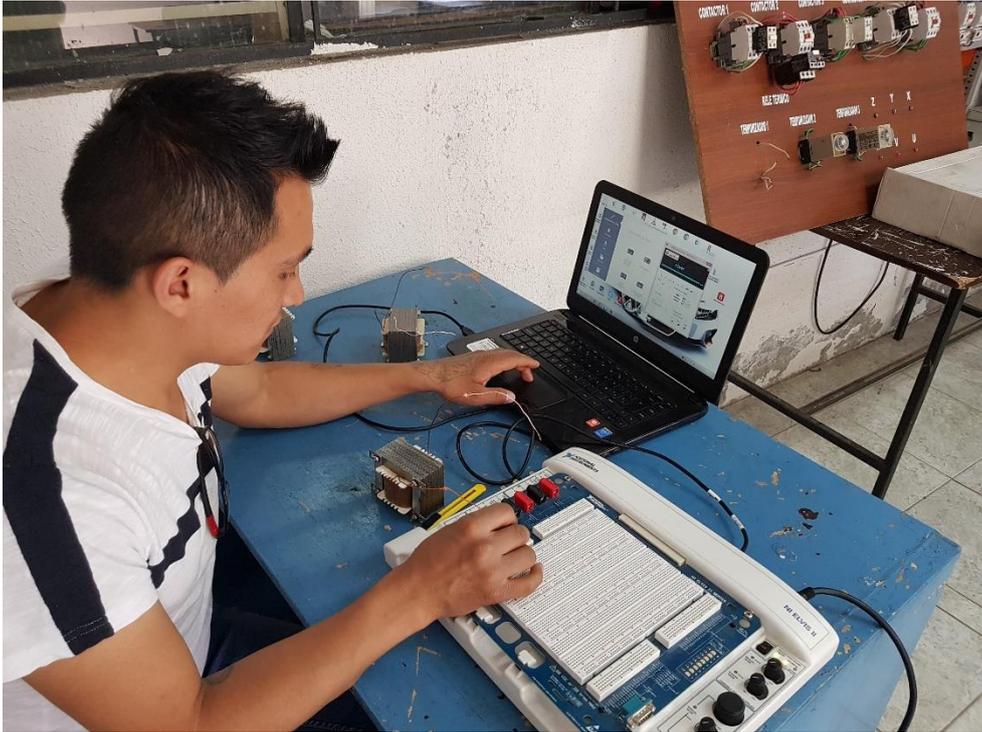


Figura 64 Toma de lectura en mH de los inductores



Figura 65 Paro del software y posterior desconexión de los inductores



Figura 68 Montaje de barra de relé

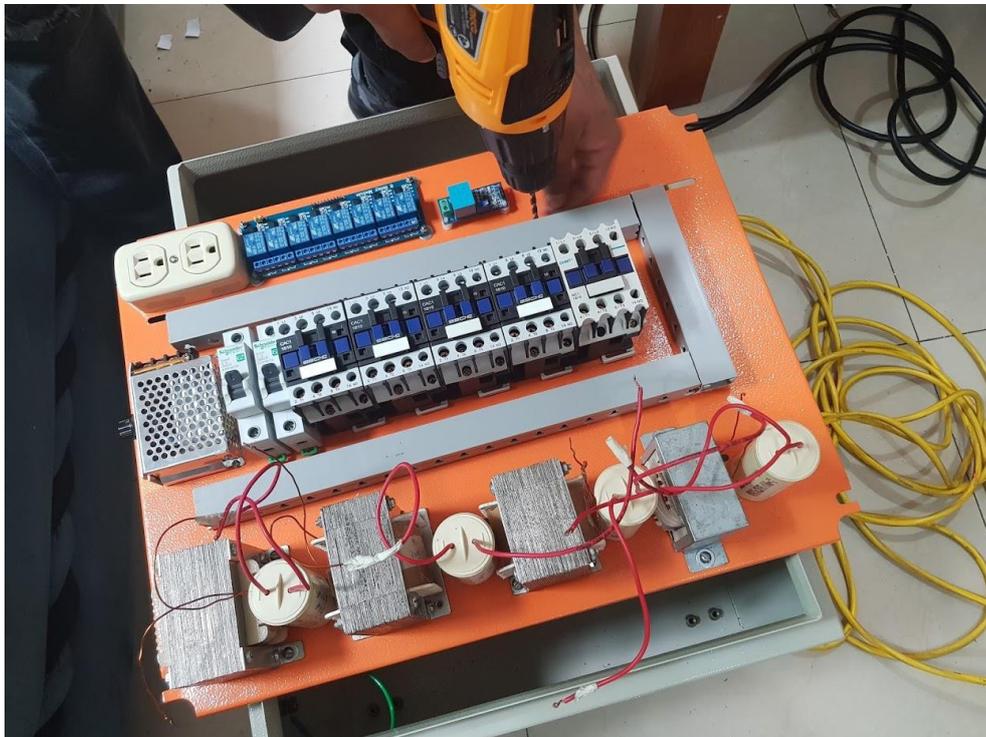


Figura 69 Sujeción de canaleta

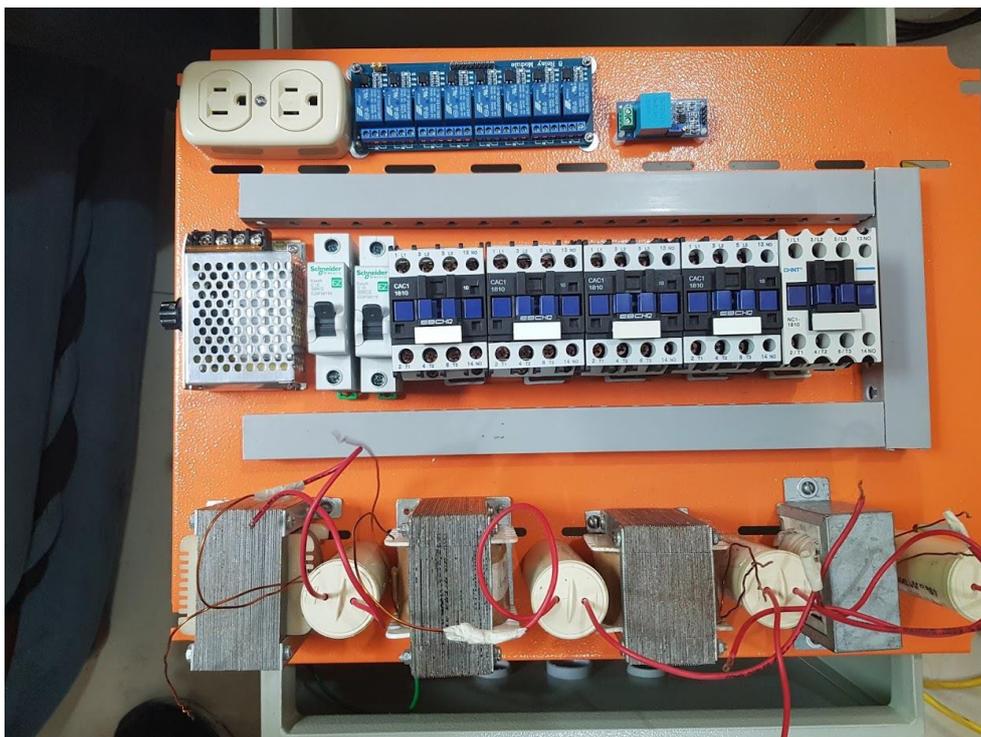


Figura 70 Montaje de regulador de velocidad y breaker



Figura 71 Perforación de orificios para ventilación



Figura 72 Montaje del ventilador

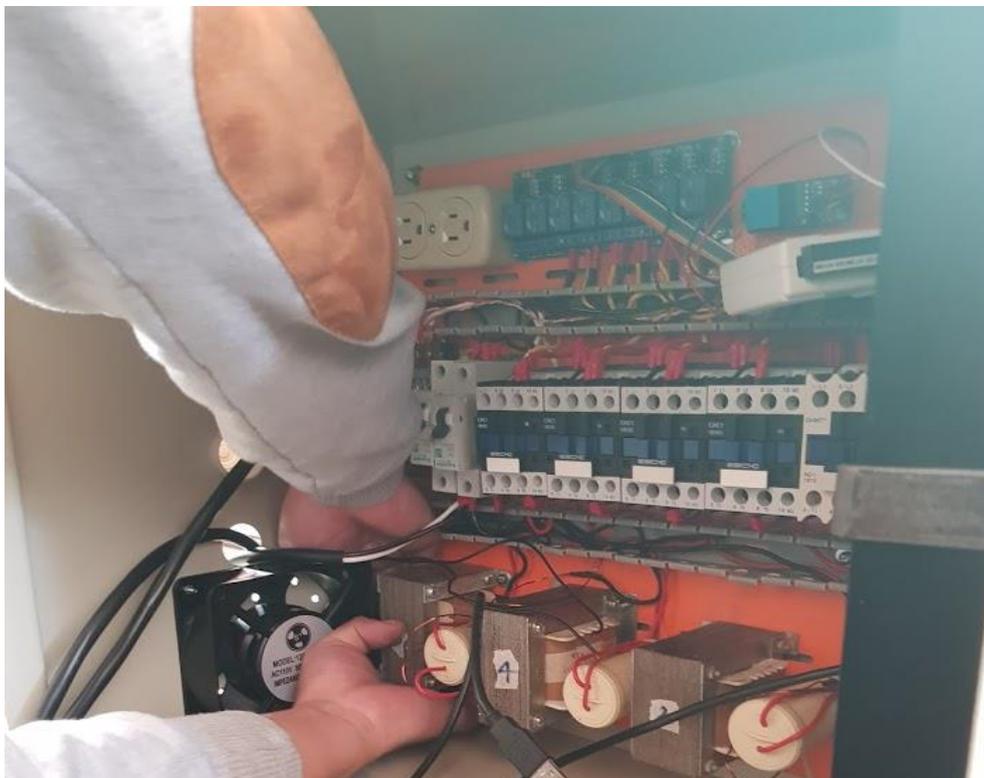


Figura 73 Alimentación de filtros

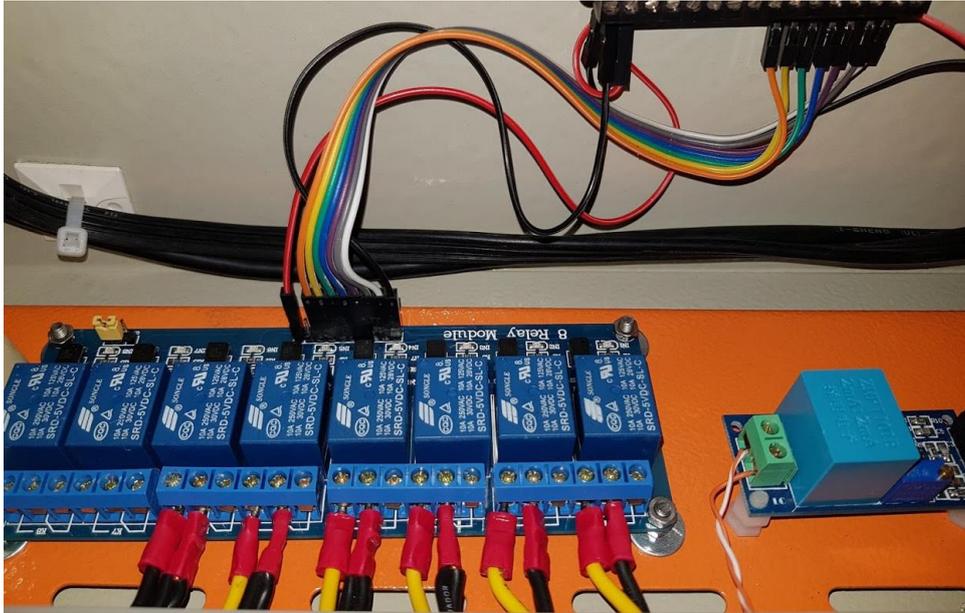


Figura 74 Conexión de dispositivo de control de contactores



Figura 75 Montaje del HMI al módulo



Figura 76 Sujeción de cables

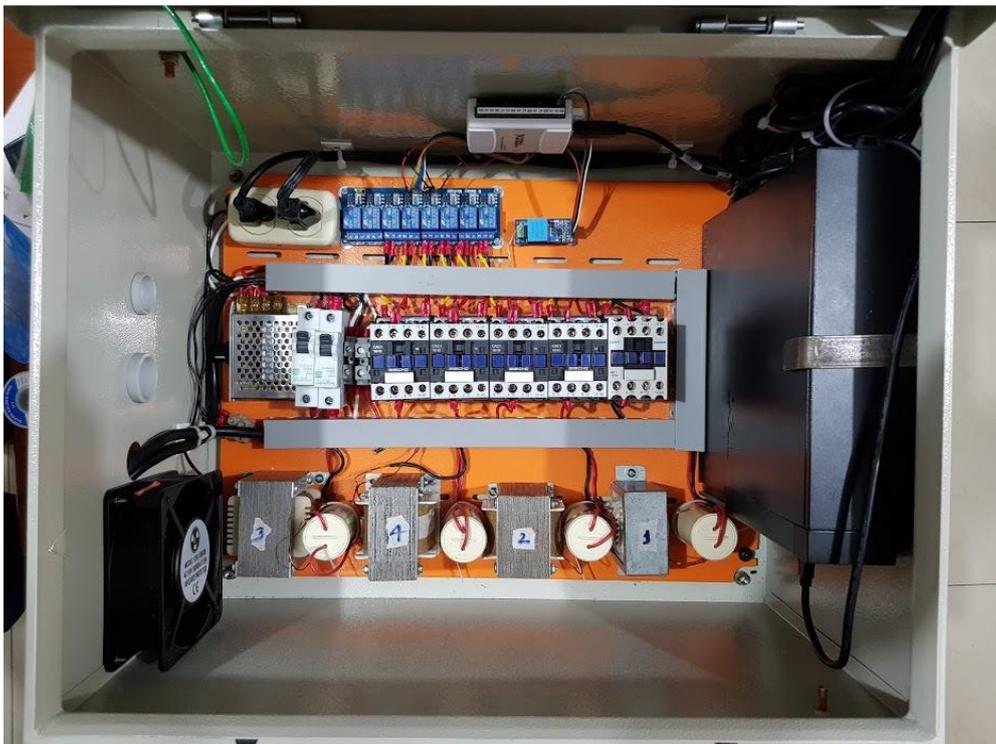


Figura 77 Instalación del PC al módulo



Figura 78 Módulo terminado

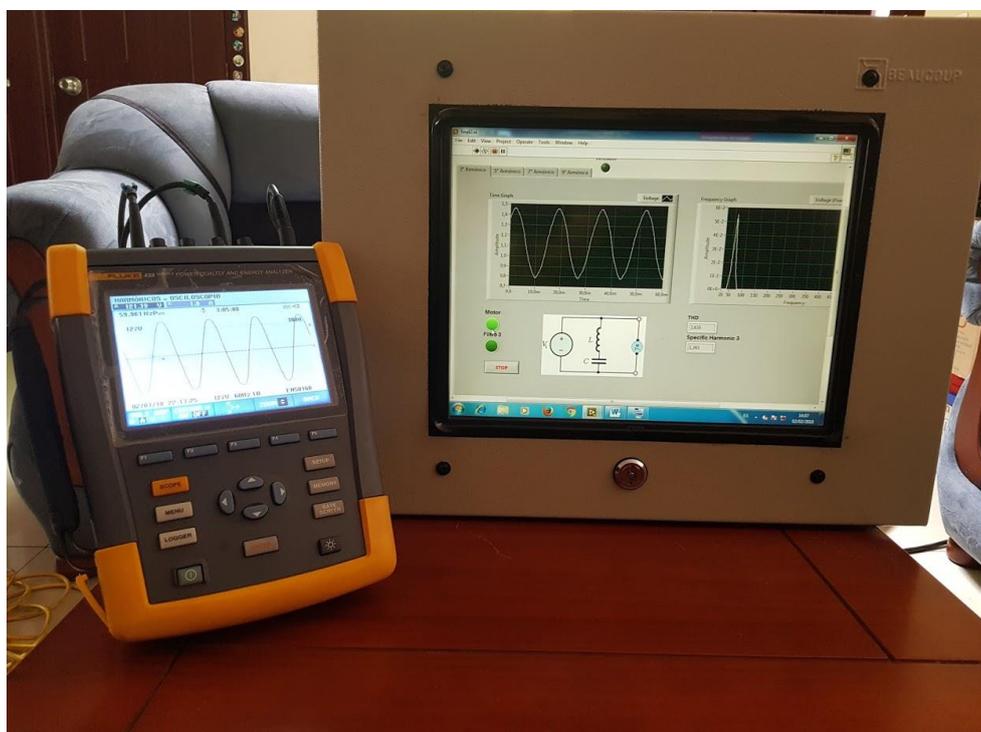


Figura 79 Comparación de dos formas de onda fundamental entre LABVIEW y analizador fluke



Figura 80 Comparación de ondas del 3^{er} armónico



Figura 81 Comparación de ondas del 5^{to} armónico



Figura 82 Comparación de ondas del 7^{mo} armónico

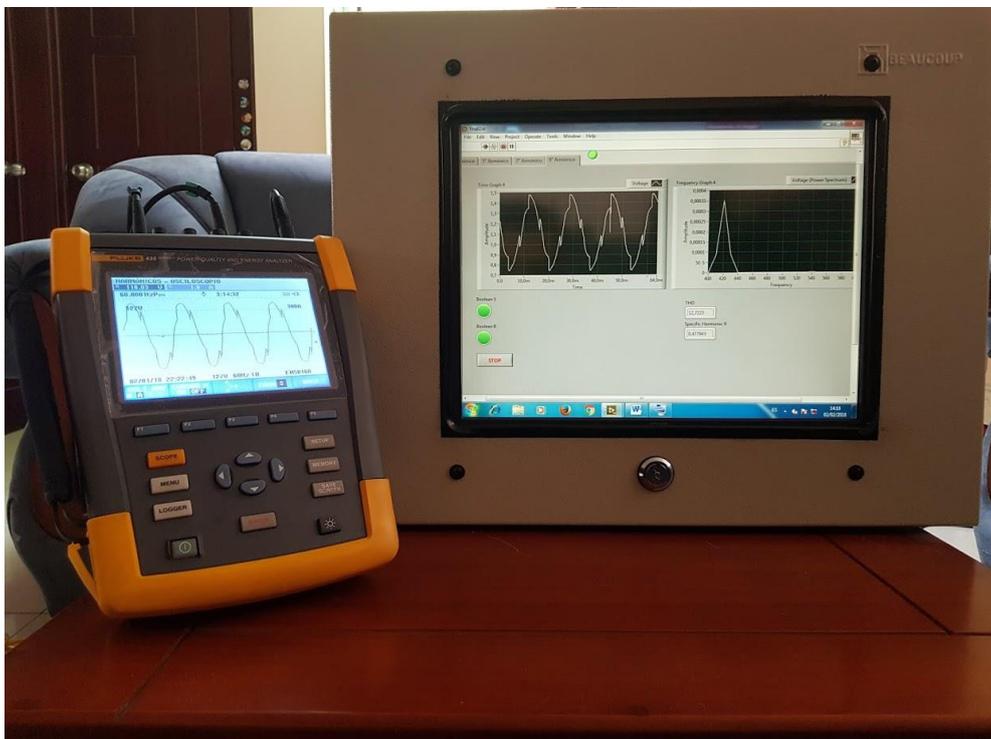


Figura 83 Comparación de ondas del 9^{no} armónico