

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN TRANSFORMADOR ZIG-
ZAG PARA MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

CRISTIAN XAVIER MUÑOZ PEÑAFIEL

DIRECTOR: DR. ING GABRIEL BENJAMÍN SALAZAR YÉPEZ

Quito, mes año (Arial negrilla 12)

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Cristian Xavier Muñoz Peñafiel, bajo mi supervisión.

DR. ING GABRIEL BENJAMÍN SALAZAR YÉPEZ
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Cristian Xavier Muñoz Peñafiel, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

CRISTIAN XAVIER MUÑOZ PEÑAFIEL

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a Dios, mi familia, mi esposa e hija, a ustedes les debo todo este logro, porque siempre estuvieron pendientes de que cumpla esta gran meta.

Y me dedico todo esto a mí, porque todo el esfuerzo que hice valió la pena, porque nací para hacer cosas grandes e importantes.

Cristian Xavier Muñoz Peñafiel

AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios, la vida y al destino por haber permitido que nazca dentro de una familia llena de amor y felicidad.

Primero agradecer a mis padres que son mis mejores amigos: A mi padre por enseñarme el valor de la constancia, el trabajo duro, el sacrificio, a ti te debo todo lo que soy, gracias por hacer de mi vida una etapa increíble llena de amor, confianza y ganas de seguir adelante, gracias a tu ejemplo soy y seré grande como tú lo eres, gracias por apoyarme en todo por darme un excelente ejemplo por enseñarme a ser un gran ser humano, por apoyarme en todas mis locuras universitarias, te amo padre.

A mi madre por siempre darme amor, por apoyarme en todo, por ayudarme en mi etapa más difícil de la vida, tu fuiste la que con su amor me sacó de esa penumbra de tristeza en la que estaba, eres la mujer perfecta y espero tenerte muchos años más a mi lado, siempre has estado pendiente de mí, con tu amor, paciencia y ganas de que triunfe, siempre diste todo para que me convierta en el ser que ahora soy, eres la única que siempre me ha tratado con amor a pesar de mi mal humor, por eso este título es tuyo también, porque sin ti no sé qué hubiera sido de mí, te amo madre.

A mis hermanos porque sin ustedes la vida hubiese sido vacía y solitaria, gracias por ayudarme a ser mejor persona, a siempre ser el mejor y que así ustedes puedan tener una referencia de buen hermano.

A mis abuelos porque siempre estuvieron pendientes de que esté enfocado en mis estudios, en salir adelante, abuelita super pendiente que tenga energía y ofreciendo siempre ese amor y cariño, a que siempre vaya bien comido a la universidad, a mi abuelo que solía esperarme fuera de la universidad para que no regrese en bus y tener esas charlas tan interesantes de su vida, a ustedes dos mis abuelitos les agradezco por ese amor extra que tuvo mi vida.

A mi esposa terroncito Angee y a mi hermosa hija Amelia Martina, les agradezco por todo ese amor y apoyo en este trabajo de titulación, a ti mi Angee gracias por ayudarme y desvelarte conmigo durante este proceso de tesis, por darme tanto amor, por ayudarme a confiar poco a poco en mí, espero que la vida nos mantenga juntos por siempre porque eres el amor de mi vida y siempre lo supimos sin darnos cuenta, a ti mi Ame gracias porque con tu sonrisa y locuras me ayudabas y me ayudas a sacar energía cuando ya no avanzaba más, amo nuestra familia, y siempre estaré agradecido con ustedes, Ame siempre ten en cuenta que papá estará para ti porque tú le devolviste el brillo a mi vida y como usualmente te digo en las noches me siento muy orgulloso de ser tu papá.

A mis tíos, tías, primos y primas, gracias por confiar en mí, por siempre darme ánimo y confianza de que podía con todo.

A mis compañeros y colegas, gracias por hacer de la universidad una etapa interesante y llena de nuevas experiencias.

Al señor Leonardo Zambrano por haberme ayudado de una manera inmensa en el desarrollo experimental de mi tesis.

A mi director de tesis, gracias por su tiempo, sabiduría y por siempre ser ese profesional tan ejemplar que nos ha mostrado.

Cristian Xavier Muñoz Peñafiel

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. INTRODUCCION.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
1.2 ALCANCE	3
2. MARCO TEORICO.....	5
2.1 ENERGIA ELECTRICA.....	5
2.2 ASPECTOS IMPORTANTES DENTRO DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA ELECTRICA.....	6
2.3 CALIDAD DEL PRODUCTO ELECTRICO	7
2.4 FENOMENOS ELECTROMAGNETICOS PERTURBADORES DE LA CALIDAD DEL PRODUCTO ELECTRICO.....	9
2.5 TIPOS DE CARGAS	11
2.5.1 CARGA LINEAL	12
2.5.2 CARGA NO LINEAL	16
2.6 DEFINICIONES MATEMATICAS Y ELECTRICAS DE LAS PROPIEDADES NO LINEALES DE LA CARGA	17
2.6.1 SERIES DE FOURIER.....	17
2.6.2 CONDICIONES DE DIRICHLET	17
2.6.3 TERMINOS DE LAS SERIES DE FOURIER	18
2.7 ARMONICOS.....	19
2.7.1 DEFINICION.....	20
2.7.2 FUENTES ARMONICAS	24
2.7.3 EFECTOS PRODUCIDOS POR LOS ARMONICOS	25
2.8 MEDICION DE ARMONICOS	26

2.8.1	LUGARES DE MEDICION	28
2.8.2	EQUIPOS PARA MEDICION	28
2.9	METODOS DE MITIGACION DE ARMONICOS	30
2.9.1	TRANSFORMADORES CON ARROLLAMIENTOS EN TRIANGULO.....	32
2.9.2	TRANSFORMADORES CON DISTINTO GRUPO DE CONEXION.....	32
2.9.3	TRANSFORMADORES EN ZIG-ZAG.....	33
2.9.4	INDUCTANCIAS DE CHOQUE, ALIZAMIENTO O AMORTIGUAMIENTO.	33
2.10	TRANSFORMADOR ZIG-ZAG.....	34
2.10.1	FUNCIONAMIENTO.....	34
2.10.2	ESTRUCTURA Y CONEXIONES INTERNAS.....	35
2.10.3	DIMENSIONAMIENTO.....	36
3.	METODOLOGIA.....	38
3.1	ENTORNO DE SIMULACION	38
3.1.1	Digsilent POWER FACTORY	38
3.1.2	MATLAB-SIMULINK.....	39
3.2	MODELACION DE UN SISTEMA ELECTRICO PARA ESTUDIOS DE ARMONICOS.....	40
3.2.1	MODELACION DE LA CARGA O TIPO DE CARGA.....	40
3.3	SIMULACIONES DE SISTEMAS ELECTRICOS CON Y SIN TRANSFORMADOR EN CONEXION ZIG-ZAG.....	41
3.4	DISEÑO DE CARGA NO LINEAL	62
3.5	DISEÑO DEL TRANSFORMADOR ZIG-ZAG	74
3.5.1	POTENCIA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR	75
3.5.2	DISEÑO Y CALCULOS DEL TRANSFORMADOR	76
3.6	CONSTRUCCION DEL TRANSFORMADOR	81
3.7	CONEXIONADO FINAL DE LA MAQUETA.....	85
4.	RESULTADOS Y DISCUSION	87
4.1	LAMPARAS FLUORESCENTES	87
4.2	VARIADOR DE VELOCIDAD.....	89
4.3	CARGA NO LINEAL FINAL (VARIADOR DE VELOCIDAD EN CONJUNTO CON LAMPARAS FLUORESCENTES PARA VARIAS FRECUENCIAS).....	90
4.4	CARGA NO LINEAL FINAL SIN TRANSFORMADOR ZIGZAG (VARIADOR DE VELOCIDAD EN CONJUNTO CON LAMPARAS FLUORESCENTES PARA FRECUENCIA DE 5 HZ).	96

4.5 CARGA NO LINEAL FINAL CON TRANSFORMADOR ZIGZAG (VARIADOR DE VELOCIDAD EN CONJUNTO CON LAMPARAS FLUORESCENTES PARA FRECUENCIA DE 5 HZ).	100
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
5.1 CONCLUSIONES.	102
5.2 RECOMENDACIONES.	104
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	105
7. ANEXOS	108
ANEXO I	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO II	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO III	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

El análisis de la calidad del producto eléctrico en la actualidad es un factor muy importante, debido a la gran cantidad de cargas no lineales que se encuentran presentes en las redes eléctricas, tanto en el ámbito residencial como a nivel industrial, en especial a nivel industrial este tipo de análisis es de suma importancia por el excesivo costo que implica para una empresa el pago por pérdidas eléctricas debido a la presencia de estas cargas.

Se conoce que existe un sin número de cargas no lineales conectadas a nuestro SEP, las mismas que ocasionan distorsión de la onda sinusoidal, produciendo que aparezcan armónicos en la red, los mismos que son una contaminación para la red eléctrica, lo que ocasiona el daño de la onda sinusoidal.

Los armónicos son señales de voltaje o corriente que poseen una frecuencia múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la red eléctrica, que se suman a la onda principal de voltaje o corriente, distorsionándola. Se conoce que las corrientes no generan un trabajo útil, por lo que la presencia de estas se traduce en pérdida de potencia y energía. Han sido constantemente un problema importante dentro del campo de la electricidad, produciendo graves inconvenientes en la red eléctrica. Dentro de los armónicos, tenemos las terceras armónicas, que en este trabajo de titulación serán el objetivo principal de estudio y mitigación.

Por tal razón, es de suma importancia la reducción del impacto que las mismas producen, usualmente estos armónicos son producidos por cargas no lineales dentro de las cuales tenemos inversores fotovoltaicos, máquinas de inducción con inversores, fuentes conmutadas, LFC, balasto electrónico, hornos de arco, etc.

En este trabajo de titulación se recalcará las terceras armónicas producidas por lámparas LED en combinación con un variador de velocidad SIEMENS SINAMICS V20 que alimenta un motor trifásico y el método del transformador ZIGZAG para la correcta mitigación de estas.

PALABRAS CLAVE: calidad del producto eléctrico, cargas no lineales, distorsión armónica, onda sinusoidal, armónicos, transformador ZIGZAG.

ABSTRACT

The analysis of the power quality at present is a very important factor, due to the large number of non-linear loads that are present in the electricity networks, both at the residential and industrial level, especially at an industrial level of this type. Analysis is extremely important due to the excessive cost that the payment for electrical losses due to the presence of these charges implies for a company.

It is known that there are a number of non-linear loads connected to our SEP, the same ones that cause distortion of the sinusoidal wave, causing harmonics to appear in the grid, the same ones that are a pollution to the electrical grid, which causes the sinusoidal wave damage.

Harmonics are voltage or current signals that have a whole frequency multiple of the fundamental frequency of the electrical network, which are added to the main voltage or current wave, distorting it. It is known that currents do not generate useful work, so the presence of these results in loss of power and energy. They have consistently been a major problem in the field of electricity, causing serious inconveniences in the electricity grid. Within the harmonics, we have the third harmonics, which in this degree work will be the main objective of study and mitigation.

For this reason, it is of utmost importance the reduction of the impact that they produce, usually these harmonics are produced by nonlinear loads within which we have photovoltaic inverters, induction machines with inverters, switched sources, LFC, electronic ballast, arc furnaces, etc.

In this titling work, the third harmonics produced by LED lamps in combination with a SIEMENS SINAMICS V20 speed variator that powers a three-phase motor and the ZIGZAG transformer method for the correct mitigation of these will be highlighted.

KEYWORDS: electrical power quality, non-linear loads, harmonic distortion, sine wave, harmonics, ZIGZAG transformer.

1. INTRODUCCION

Durante varios años el análisis de las pérdidas eléctricas ha sido una gran problemática a nivel mundial, debido a los efectos que las mismas producen tanto en cuestión costos como en vida útil de los diferentes equipos, cargas y demás elementos presentes en el SEP.

Dichas pérdidas son ocasionadas por varios factores dentro de los cuales se pueden recalcar los famosos armónicos de voltaje o corriente, los mismos que usualmente son generados por la presencia de cargas no lineales.

Los armónicos son señales de voltaje o corriente que poseen una frecuencia múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la red eléctrica ecuatoriana (60Hz), que se suman a la onda principal de voltaje o corriente, distorsionándola. Se conoce que las corrientes no generan un trabajo útil, por lo que la presencia de estas se traduce en pérdidas de potencia y energía. Han sido constantemente un problema importante dentro del campo de la electricidad, los mismos provocan deformaciones a las ondas de voltaje y corriente, produciendo posibles problemas dentro de la operatividad de la red eléctrica [1].

Al referirse a los efectos que los armónicos producen en el SEP, se aprecian dos efectos, uno de carácter instantáneo que usualmente interfiere a los equipos eléctricos, electrónicos y de comunicación; y, por otro lado; los de carácter de largo plazo, que ocasionan pérdidas a los elementos del SEP, lo que conlleva al deterioro de la vida útil de los mismos, así como el incremento económico por temas de reparación.

Algunas cargas no lineales que inyectan armónicos triples son motores, televisores, radios, estéreos y lámparas fluorescentes.

Las lámparas fluorescentes con balasto electrónico producen corrientes de secuencia cero de armónicos triples, las mismas que producen un efecto en el neutro de sobrecarga.

La luz por descarga gaseosa (fluorescentes) es importante dentro de la inyección de armónicos en la red de potencia, la operación de este tipo de lámparas fluorescentes dentro de las componentes armónicas representativas son la fundamental y la tercera armónica [2].

De igual manera existen otro tipo de efectos que generan los armónicos como pérdida de capacidad del aislamiento de los equipos y cables, actuación inadecuada de los sistemas de protección, etc.

Por tal motivo, el estudio y mitigación de estos es de extrema importancia.

Dentro de la clasificación de los armónicos, se tiene que las terceras armónicas son uno de los que más afectan la calidad del producto eléctrico, por tal razón en este trabajo de titulación serán el objetivo principal para la mitigación de estas.

Existen diferentes maneras de contrarrestar los problemas generados por los armónicos, las cuales han permitido mejorar la calidad del producto eléctrico. Algunas de las técnicas que cabe mencionar son:

- uso de transformadores de conexión delta.
- transformadores con distinto grupo de conexión.
- transformadores en ZIG-ZAG.
- inductancia de choque.
- aumento del número de pulsos en convertidores.
- aumento del calibre del neutro.
- filtros.

Para mejorar de manera adecuada el problema de este trabajo de titulación, se procederá a utilizar los transformadores zigzag los cuales fundamentalmente desvían hacia ellos y atrapan a los armónicos triples, es decir a los homopolares.

El uso de este tipo de transformadores es para proteger al transformador principal y a la red, lo que hace es derivar la corriente de secuencia cero al transformador en ZIG-ZAG, se le conoce como una trampa de armónicos.

Comúnmente se lo instala cerca del tablero de control o en el mismo tablero. Es importante su uso debido a la baja impedancia que presenta evitando que la acometida externa y el transformador se contaminen. Este método solo es una trampa para las cargas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar una carga trifásica no lineal que genere armónicos triples y un transformador en ZIG-ZAG para mitigación de armónicos triples de corriente producidos

por dicha carga no lineal, para así verificar este método como una correcta forma de contrarrestar los terceros armónicos.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Diseñar e implementar una carga no lineal que inyecte armónicos triples de corriente.
- Diseñar e implementar un transformador en ZIG-ZAG para la mitigación de las terceras armónicas.
- Diseñar un tablero que estará conformado por un analizador de red, el transformador ZIG-ZAG y la carga no lineal, dicho tablero (maqueta) permite observar por medio del analizador de red la mitigación de la tercera armónica producida por la carga no lineal haciendo uso del transformador.
- Analizar e interpretar los resultados obtenidos mediante las mediciones, para caracterizar la distorsión armónica generada.

1.2 ALCANCE

El presente trabajo se enfoca en mitigar las terceras armónicas producidas por el uso de una carga no lineal, para de esta manera mejorar la calidad de la energía y evitar posibles problemas en los equipos y en la red eléctrica. Para lo cual se implementará un tablero con la carga no lineal para mostrar la producción de terceras armónicas, esta medición se la realizará por medio de un analizador de red, además de mostrar el efecto que tienen las terceras armónicas al implementar un transformador en ZIG-ZAG.

Para esto se realizará el diseño y construcción de una carga trifásica no lineal que genere armónicos triples donde se podrá observar las terceras armónicas que estas producen.

Además, la implementación de un transformador en ZIG-ZAG con el cuál será posible reducir ese impacto ocasionado por las terceras armónicas y de esa manera mejorar la calidad de la señal de onda entregada a la red eléctrica.

Como primera parte se iniciará con pruebas a la carga no lineal, mediante el uso de un analizador de red, con el mismo que se tomarán las mediciones de armónicos para adquirir

un porcentaje de tercer armónico seguro para el correcto diseño del transformador de mitigación.

Como segundo paso, con los datos obtenidos del analizador de red, se procederá a diseñar y construir un transformador en ZIG-ZAG que mitigue el tercer armónico de la carga no lineal, para lo cual se utilizará toda la información existente tanto en libros, sitios web. El transformador contará con seccionadores para poder conectarlo y desconectarlo, el objetivo de esto es observar el cambio que produce cuando entra a operar.

A continuación, se construirá un tablero en el cual se armará todo el circuito, el transformador en ZIG-ZAG, la carga no lineal y el respectivo analizador de red que permite observar la mitigación del tercer armónico.

Una vez realizadas las mediciones con el transformador ZIG-ZAG y corroborada la adecuada mitigación del tercer armónico, se procederá al análisis de los resultados obtenidos para poder proponer dicho método como una forma segura de mitigar armónicos y así mejorar el impacto en la red eléctrica.

2. MARCO TEORICO

2.1 ENERGIA ELECTRICA

La energía eléctrica es sin duda una necesidad básica en la actualidad tanto para las personas, como para el sector industrial, por tal razón es considerada un servicio básico de buena calidad para los habitantes.

La producción de la energía eléctrica depende de la demanda de los centros de consumo. La misma que está relacionada directamente con las centrales generadoras y el suministro a los centros de consumo, por medio de las redes de transporte y distribución [3].

Una vez que el suministro llegue desde la central de generación hasta el consumidor final, se debe realizar un análisis a la calidad del producto eléctrico que se consume. Esto se debe a la importancia que se tiene dentro de los sistemas eléctricos de potencia [3].

Se conoce de igual manera que la calidad de la energía eléctrica no tiene una definición exacta y que abarca tanto la disponibilidad del suministro eléctrico como la forma y calidad de las ondas de voltaje y corriente suministradas [4][5].

Por tal motivo en el caso de presentarse una distorsión o desviación de la forma de la onda se considera un decremento de calidad. Por eso, es de suma importancia tener un estudio y análisis constante de las ondas para cerciorarse el correcto suministro hacia los consumidores [6].

La energía eléctrica es generada como un sistema trifásico equilibrado, la misma atraviesa una serie de etapas que permiten llegar hasta el consumidor final. Como se mencionó anteriormente, la energía eléctrica posee una serie de etapas hasta llegar al consumidor final, etapas como: generación, transmisión, distribución. En cada una de estas etapas la onda sufre una serie de alteraciones que pueden afectar al consumidor final, pero por factores ajenos al cliente [6].

Pero de igual manera y en mayor porcentaje es el propio consumidor el que ocasiona una contaminación más grande, debido a las cargas no lineales (equipos electrónicos, entre otros), las mismas que inyectan corrientes eléctricas con distorsión, las cuales producen distintos efectos en la energía eléctrica y en los demás equipos conectados al sistema eléctrico [6].

Dentro de los efectos que se tiene son pérdidas, calentamientos, actuación de protecciones, y principalmente el mal funcionamiento de los equipos. Este mal funcionamiento ocasiona problemas sobre todo a nivel industrial, en donde los efectos se ven principalmente afectados al tema económico de las planillas.

Aunque aún el estudio de este tema económico no se lo ha realizado con profundidad se estima que los problemas relacionados con la calidad de producto en el sector comercial e industrial en la Unión Europea es de aproximadamente 10.000 millones de euros al año, caso parecido a nivel de Estados Unidos [7][8].

2.2 ASPECTOS IMPORTANTES DENTRO DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA ELECTRICA

La calidad de la energía eléctrica, por lo general engloba 3 aspectos de gran importancia, como son:

- Calidad del servicio técnico: Conocido de igual manera como la confiabilidad pues se presenta cuando la energía suministrada a cierta carga desaparece, creando un descontento en el consumidor, entendiéndose como la continuidad con la que se brinda el servicio.
- Calidad del producto técnico: Define que tan apropiado es un equipo, que tan bueno o malo es el mismo. Se analiza la forma de onda para ver qué tan adecuada es o si ocasiona daños. Mide el nivel de voltaje, frecuencia y formas de onda, este aspecto será de vital importancia para este trabajo de titulación y es en donde se hará un análisis más minucioso.
- Calidad del servicio comercial: Esta se basa en la atención al usuario, que tan bueno o malo puede llegar a ser el servicio a un cliente por ejemplo en la equivocación de la facturación de una planilla eléctrica.

Esto se puede observar en la Figura 2.1:

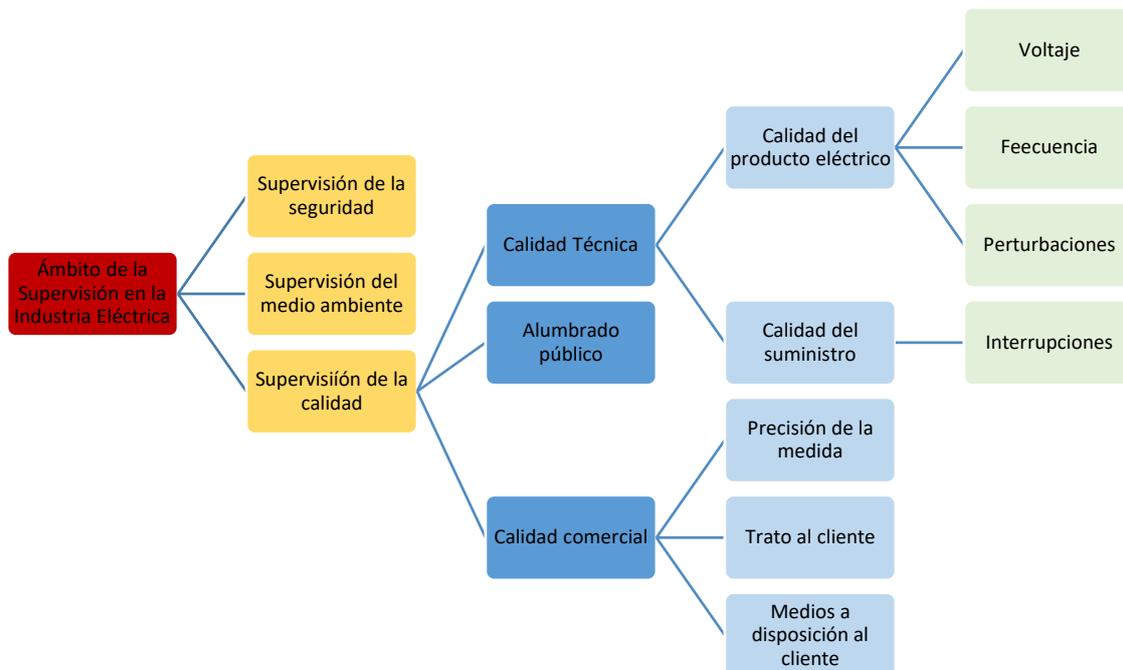


Figura 2.1. Componentes de la calidad de la energía eléctrica [ELABORACIÓN PROPIA].

2.3 CALIDAD DEL PRODUCTO ELECTRICO

En el ámbito actual debido al gran desarrollo de la tecnología los sistemas eléctricos cuentan con una gran variedad tanto en cantidad como en calidad de cargas no lineales, las cuales a partir de una onda fundamental producen otro tipo de ondas que poseen una amplitud proporcional a la de la onda fundamental y además cuentan con una frecuencia múltiplo-entera de la fundamental con lo que se forman los armónicos, ocasionando distorsiones de la onda y perjudicando con la contaminación del sistema eléctrico de potencia.

Ahora bien, al referirse a la calidad del producto eléctrico se tiene en cuenta algunos parámetros eléctricos que necesariamente deben estar dentro de ciertos rangos para poder brindar un servicio de buena calidad y confiable. Entrando en resoluciones dentro del Ecuador, se tiene que la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, REGULACION No. ARCERNNR-002/20, manifiesta que los atributos de la calidad de la energía eléctrica son, calidad de la distribuidora y calidad del consumidor, dentro de los cuales se tiene diferentes subtemas como se puede apreciar en la Figura 2.2:

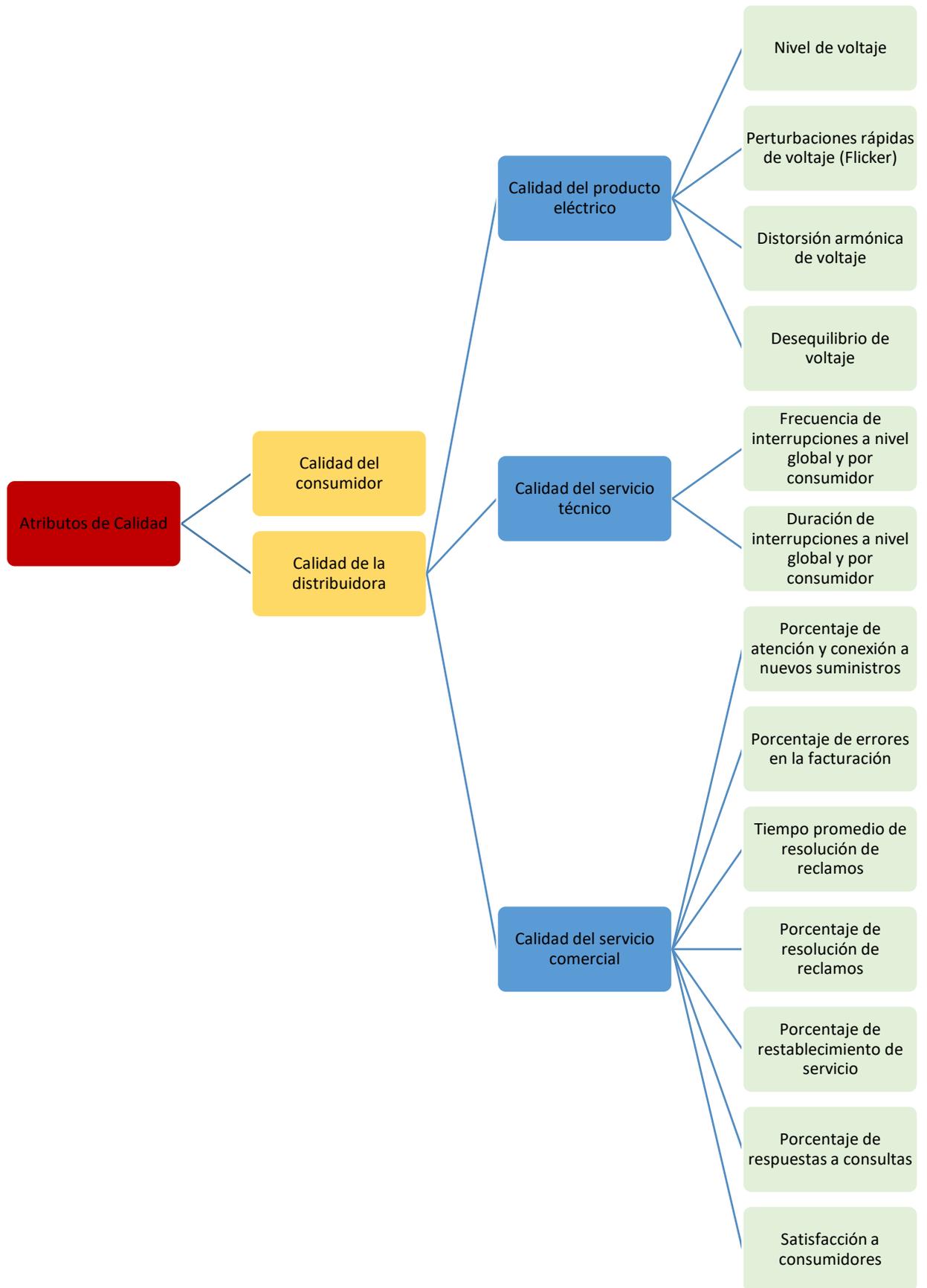


Figura 2.2. Atributos de la calidad de la energía eléctrica [22].

2.4 FENOMENOS ELECTROMAGNETICOS PERTURBADORES DE LA CALIDAD DEL PRODUCTO ELECTRICO

Según el estándar americano, IEEE 1159 (1995), se clasifican en 7 categorías, dentro de las mismas se recalcan los fenómenos que cumplen con las características de cada categoría, las cuales son [1]:

- Transitorios: Son conocidos como los cambios bruscos que tiene una señal, duran menor de medio ciclo y se dan en señales de voltaje o corriente, en ciertas ocasiones en ambas señales [1].
 - Impulsivo: Son cambios repentinos en la señal de voltaje o corriente, o en ambas, pero son de gran magnitud, no presentan cambios en la polaridad y se dan tanto para arriba o abajo, teniendo en cuenta que no tienen afectación en la frecuencia de la onda fundamental [1].
 - Oscilatorio: Son cambios bruscos de gran magnitud en la señal de voltaje o corriente con cambio de polaridad. Estos cambios se atenúan rápidamente hasta llegar a un nuevo estado estable. No existe cambio en la frecuencia de la onda fundamental pero cada transitorio presenta una frecuencia fundamental [1].
- Variación de voltaje de corta duración
 - SAG: Es una disminución de la amplitud o valor RMS de voltaje, con una duración que va entre medio ciclo y un minuto y la posterior recuperación del voltaje a su valor nominal. Se encuentra en un porcentaje de 10% al 90% del voltaje nominal. No presenta cambios en la frecuencia ni en la forma de la onda, este tipo de fenómeno no daña los equipos, solo los apaga [1].
 - SWELL: Es un aumento de la amplitud o valor RMS del voltaje entre 1,1 y 1,8 en por unidad, con una duración de entre medio ciclo y un minuto y la posterior recuperación del voltaje a su valor nominal. No existe cambio en la frecuencia ni en la forma de onda [1].
 - Interrupción breve: Es una desaparición o disminución de la amplitud o valor RMS del voltaje del más del 90% con una duración entre medio ciclo y un minuto y la posterior recuperación del voltaje a su valor nominal, de igual manera no presenta cambios en la frecuencia [1].

- Variación de voltaje de larga duración
 - Bajo voltaje: Es la disminución de la amplitud o valor RMS del voltaje (0,8-0,9 en por unidad) con una duración mayor a un minuto con la recuperación a su valor nominal. No existe variación en la frecuencia ni en la forma de onda [1].
 - Sobre voltaje: Es un aumento de amplitud o valor RMS del voltaje de entre 1,1 y 1,2 en por unidad con una duración mayor a un minuto y la posterior recuperación del voltaje a su valor nominal. No existe cambio en la frecuencia ni en la forma de onda [1].
 - Interrupción sostenida: Son desapariciones del voltaje con una duración de más de un minuto y la posterior conexión con recuperación del voltaje a su valor nominal [1].
- Desbalance de voltaje: Se da cuando existe variación en la amplitud en la onda de voltaje trifásico o de igual manera cuando no existe desplazamiento de 120° eléctricos entre las ondas, o de igual manera cuando se presentan al mismo tiempo las dos condiciones [1].
- Deformación de onda
 - Armónicos: Son señales de voltaje o corriente de frecuencia múltiplo entero de la frecuencia fundamental que se suman a la onda principal de voltaje o corriente, distorsionándola, las corrientes armónicas no generan un trabajo útil por lo tanto se traducen en pérdidas de potencia y energía [1].
 - Inter armónicos: Son señales de voltaje o corriente de frecuencia múltiplo no entero de la fundamental que se suman a la onda principal de voltaje o corriente, distorsionándola. Éstas no generan un trabajo útil por lo tanto se traduce en pérdidas de potencia y energía [1].
 - Componente DC: Desplazamiento en el eje de las ordenadas sinusoidales, por lo general es decreciente [1].
 - Ruido: Es una señal de voltaje de muy alta frecuencia y de pequeñísima magnitud que se monta sobre la onda fundamental para distorsionar su forma [1].
 - Notch: También denominado muescas o huecos de voltaje, es un calado o protuberancia en la onda de voltaje de pequeña magnitud y de duración menor

a medio ciclo. Es un fenómeno transitorio aperiódico que deforma la onda de voltaje [1].

- Fluctuaciones de voltaje: Son cambios cíclicos de le envolvente de voltaje que ocasionan una variación en la amplitud del voltaje; que presenta un porcentaje de 10%. La variación de voltaje es un fenómeno de larga duración, en otras palabras, es cuasi estacionario [1].
- Variaciones de frecuencia: Es un cambio de frecuencia fuera de su valor nominal, hacia arriba o hacia abajo, debido a los desbalances instantáneos entre la potencia mecánica y potencia eléctrica; en otras palabras; la variación entre la generación y la demanda. No existe deformación de onda y no existe variación de la amplitud de la onda [1].

2.5 TIPOS DE CARGAS

Dentro de los sistemas eléctricos de potencia, se encuentra un gran número de cargas, las mismas que pueden ser clasificadas de varias maneras dependiendo de la persona que las esté analizando.

Por naturaleza se tiene que son lineales la iluminación incandescente, cargas de calefacción o los mismos motores de inducción, es decir que maneja una impedancia de carga que precede del voltaje aplicado, para el caso de voltaje alterno la corriente tiene un comportamiento proporcional al mismo, es decir, si el voltaje crece la corriente igual y viceversa si el voltaje decrece la corriente disminuirá.

De manera general para este caso se las clasificará en cargas lineales y no lineales.

Usualmente se tienen presentes 3 tipos de cargas, que son:

Convertidores estáticos: son los que poseen dentro de ellos electrónica de potencia, dentro de los mismos se tienen controladores de velocidad, UPS, inversores, fuentes de poder de equipos eléctricos y hornos de inducción [9].

Equipos ferromagnéticos: Dentro de los mismos se encuentran motores, equipos magnéticos y transformadores, usualmente la contaminación que es ocasionada por los transformadores se debe al grupo de estos, ya que de manera individual no producen una

distorsión mayor al 1%, pero al analizarlos en grupo debido a la excesiva presencia dentro de nuestro sistema eléctrico ecuatoriano, se tiene una gran contaminación [9].

Equipos de arco: generalmente dentro de este tipo de cargas, se tienen los famosos hornos de arco, soldadoras, y alumbrado de carácter fluorescente [9].

2.5.1 CARGA LINEAL

Se conoce como carga lineal aquella que posee una corriente con una misma forma de onda que el voltaje que la alimenta, y esta corriente que absorbe la carga no posee contenido armónico, de manera general se conoce que resistencias, inductancias y capacitancias son dispositivos lineales [10].

En la Figura 2.1. se puede apreciar un circuito simple en serie, donde una fuente de voltaje alterno alimenta una resistencia, los datos de la fuente y de la carga se observan en la Figura 2.2. y Figura 2.3., respectivamente.

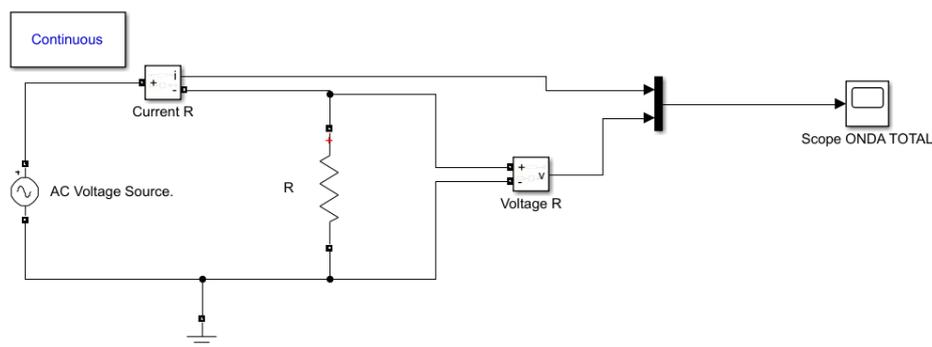


Figura 2.1. Circuito puramente resistivo R [ELABORACION PROPIA].

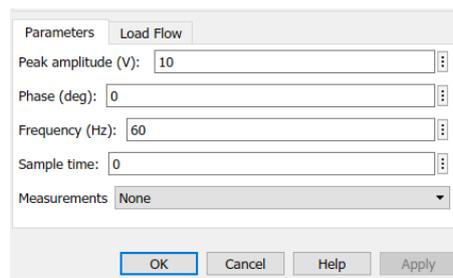


Figura 2.2. Parámetros de la fuente de voltaje [ELABORACION PROPIA].

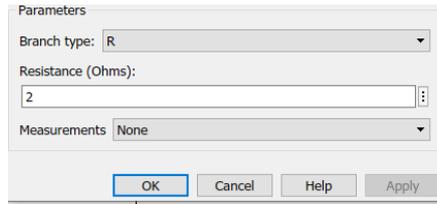


Figura 2.3. Parámetros de la resistencia [ELABORACION PROPIA].

En la Figura 2.4 y Figura 2.5 se aprecia la onda sinusoidal de voltaje y corriente, respectivamente, que circula por la carga.

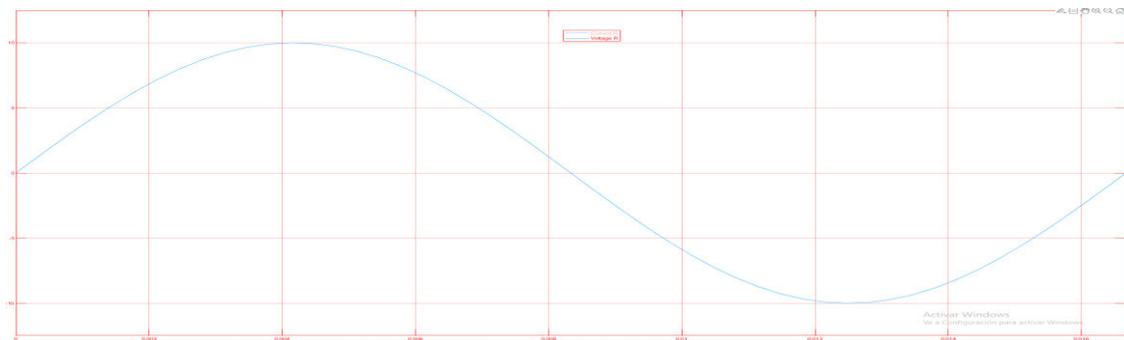


Figura 2.4. Forma de onda del voltaje en la carga [ELABORACION PROPIA].

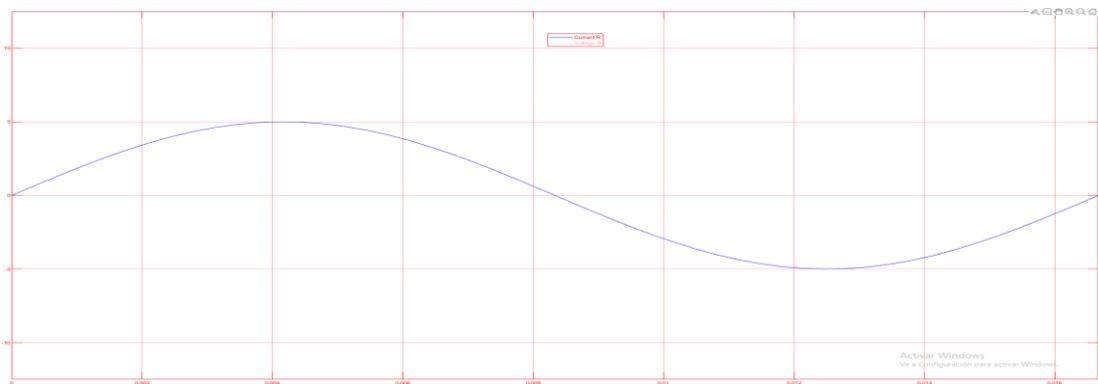


Figura 2.5. Forma de onda de la corriente en la carga [ELABORACION PROPIA].

Al conectar una carga de carácter puramente resistivo a una fuente de alimentación de potencia AC, la corriente que esta carga consume tiene una forma sinusoidal, como se muestra en la Figura 2.6.

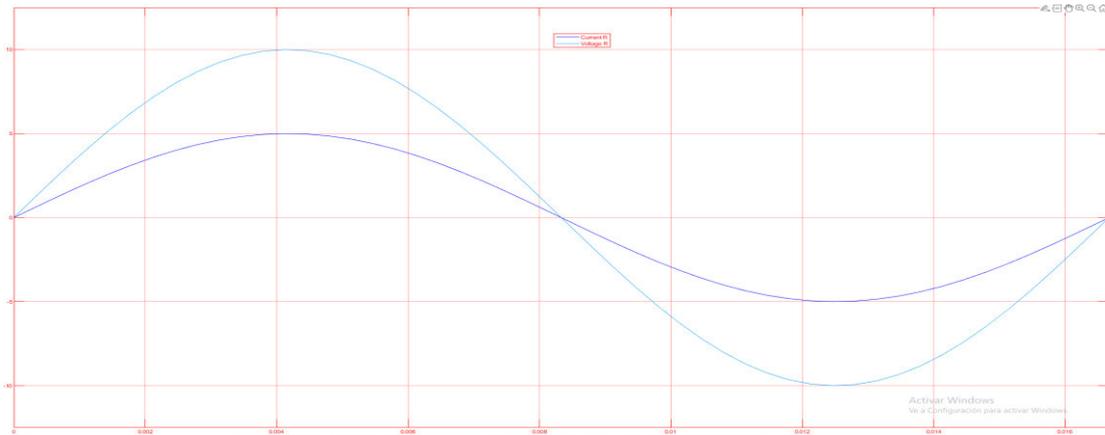


Figura 2.6. Forma de onda del voltaje y corriente en la carga [ELABORACION PROPIA].

Como se puede observar, este es un circuito puramente resistivo, con un factor de potencia de uno, lo que conlleva a que la corriente se encuentre en fase con el voltaje

De igual manera al conectar una carga de carácter resistivo-inductivo, la corriente que esta carga consume tiene forma sinusoidal, que no está en fase, pero sigue manteniendo la forma de onda. Este circuito se presenta en la Figura 2.7.

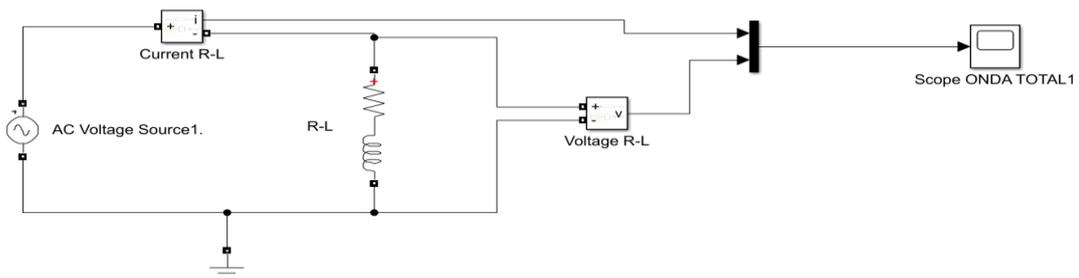


Figura 2.7. Circuito R-L [ELABORACION PROPIA].

Los parámetros de la fuente de voltaje y la carga se aprecian en Figura 2.8, Figura 2.9.

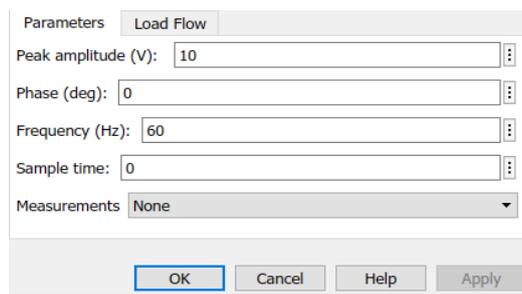


Figura 2.8. Parámetros de la fuente de voltaje [ELABORACION PROPIA].

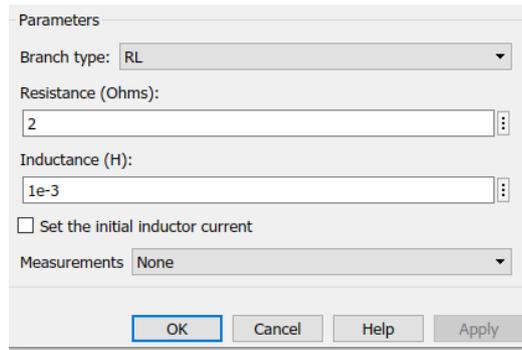


Figura 2.9. Parámetros de la carga R-L [ELABORACION PROPIA].

En la Figura 2.10 y Figura 2.11 se observa la onda sinusoidal que absorbe la carga, tanto en voltaje como en corriente, respectivamente.

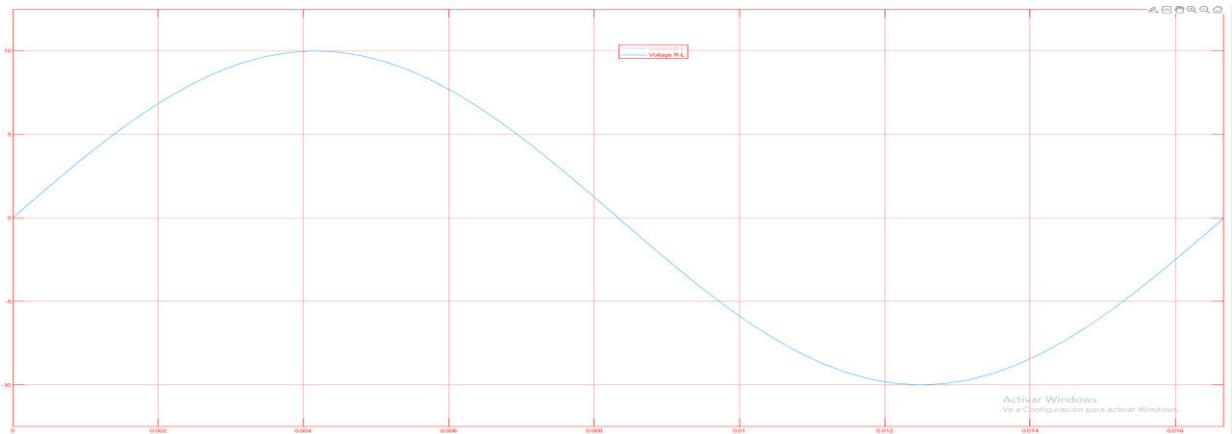


Figura 2.10. Forma de onda del voltaje en la carga [ELABORACION PROPIA].

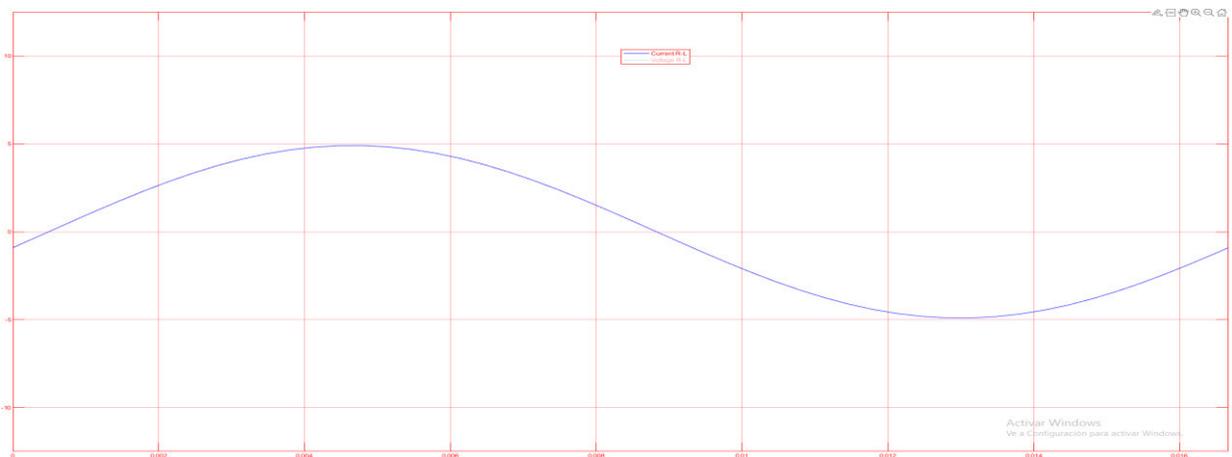


Figura 2.11. Forma de onda de la corriente en la carga [ELABORACION PROPIA].

Como se muestra en la Figura 2.12, la corriente está en retraso con el ángulo de fase del voltaje. Pero sigue manteniendo la forma sinusoidal.

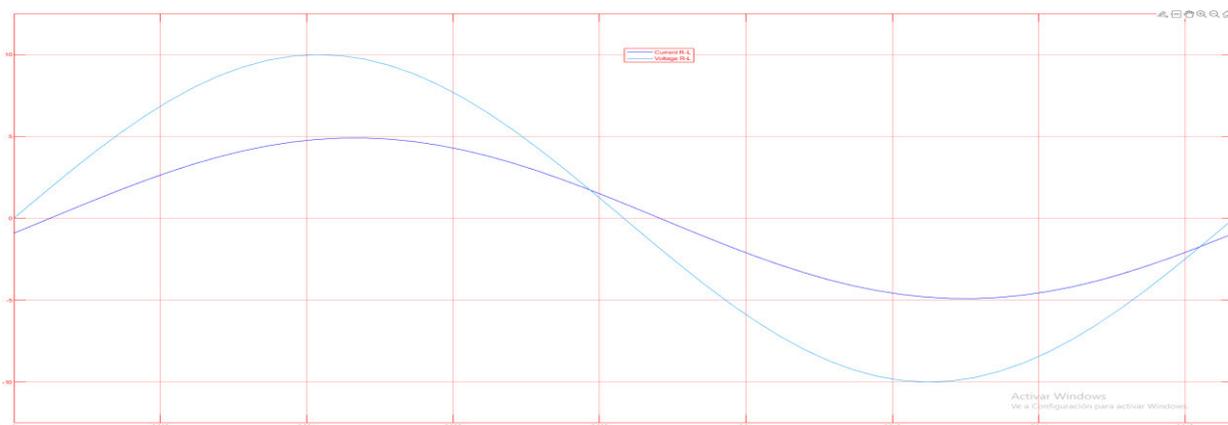


Figura 2.12. Forma de onda del voltaje y corriente en la carga [ELABORACION PROPIA].

2.5.2 CARGA NO LINEAL

Con el surgimiento de la revolución industrial, la tecnología tomó un salto realmente abismal, con la cual aumentó la contaminación de las redes eléctricas debido a la aparición de cargas electrónicas dentro de las cuales se tienen UPS, variadores de velocidad, balastos electrónicos, etc.

Principalmente a nivel de sistemas de distribución este tipo de cargas han alcanzado un gran impacto debido al cuantioso número de estas, debido a que en su gran mayoría las cargas electrónicas son de carácter no lineal.

Se conoce como carga no lineal aquella que posee una corriente con una diferente forma de onda que el voltaje que la alimenta, la corriente no es proporcional al voltaje instantáneo y usualmente esta corriente que absorbe la carga posee contenido armónico [10].

Es decir, son aquellas en las que su característica de onda de voltaje y/o corriente no presentan una naturaleza sinusoidal pura, lo que ocasiona que cuando se descomponga la señal total en SERIES DE FOURIER se encontrarán más componentes que la fundamental.

El efecto más grande de este tipo de cargas es la creación de gran distorsión armónica en el sistema eléctrico de potencia.

En la actualidad existen diferentes clasificaciones para las mismas, pero de cierta manera son las siguientes [10]:

- Convertidores.
- Dispositivos de arco.
- Lámparas fluorescentes.
- Dispositivos o equipos controlados por electrónica.
- Dispositivos ferromagnéticos.
- Motores eléctricos con par de torsión brusco y variable.

2.6 DEFINICIONES MATEMATICAS Y ELECTRICAS DE LAS PROPIEDADES NO LINEALES DE LA CARGA

El uso de las matemáticas como respaldo de los diferentes experimentos han permitido el perfeccionamiento y avance de soluciones más idóneas para los distintos fenómenos, por tal razón es necesario en este proyecto de tesis explicar las diferentes propiedades utilizadas para cuantificar estas características, de tal manera que permita tener una base que indique la no linealidad de la carga [23].

2.6.1 SERIES DE FOURIER

Son herramientas matemáticas de uso común en la actualidad, permiten descomponer cualquier señal de carácter periódico, es decir, que cumpla con las condiciones de DIRICHLET, la descomposición la hace en una suma infinita de ondas sinusoidales, cada una de ellas posee frecuencias que son múltiplo de una frecuencia fundamental [23].

2.6.2 CONDICIONES DE DIRICHLET

Son condiciones, que permiten la utilización de las Series de Fourier, fue hasta 1829 que fueron proporcionadas con la demostración adecuada las mismas son [23]:

- Que la función $f(t)$ sea periódica $f(t + nT)$ [23].
- Si $f(t)$ tiene máximos o mínimos en el período, estos deben ser en número y en magnitud finitos [23].
- Si $f(t)$ tiene discontinuidades en el periodo, éstas deben ser en número y en magnitud finitas [23].
- $\int_0^T f(t) * dt < \infty$; debe ser finitamente integrable [23].

Dichas condiciones antes mencionadas generalmente son usadas y son suficientes para validar una Serie de Fourier, claro está que existen ciertas funciones que no satisfacen las condiciones mencionadas, pero aun así cuentan con representaciones válidas para Series de Fourier [23].

2.6.3 TERMINOS DE LAS SERIES DE FOURIER

La Serie de Fourier se encuentran compuestas por un término constante A_o y un número infinito de términos senos y cosenos, los mismos que poseen frecuencias múltiplo enteras de la frecuencia fundamental [23].

Por lo que la Serie de Fourier se representa con la siguiente ecuación [23]:

$$f(t) = A_o + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n * \cos (2 * \pi * f * n * t) + B_n * \sin (2 * \pi * f * n * t)]$$

O de una manera más simplificada es [23]:

$$f(t) = A_o + \sum_{n=1}^{\infty} [C_n * \sin (2 * \pi * f * n * t + \phi_n)]$$

Dichos coeficientes se encuentran dados por las siguientes expresiones matemáticas [23]:

$$A_o = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) * dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) * d(\omega t)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) * \cos (2 * \pi * f * n * t) * dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) * \cos (2 * \pi * f * n * t) * d(\omega t)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) * \sin(2 * \pi * f * n * t) * dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) * \sin(2 * \pi * f * n * t) * d(\omega t)$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

$$\phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{A_n}{B_n}\right)$$

C_n es conocida como la amplitud del armónico [23].

Conforme mayor sea el número de términos de la Serie de Fourier infinita, se tendrá una mejor aproximación del resultado a la función original [23].

A_0 es la magnitud de la componente de frecuencia cero, a la misma también se le conoce como la componente DC o continua [23].

Para el caso de la componente AC o alterna se encuentra conformada por la sumatoria de las funciones sinusoidales de amplitud C_n , su frecuencia angular $n\omega$ y el ángulo de fase ϕ_n [23].

Cuando $n=1$, se conoce como componente fundamental y las demás son las componentes armónicas [23].

2.7 ARMONICOS

Dentro de la calidad del producto eléctrico, uno de los problemas más frecuentes que se tienen, sobre todo a nivel de Distribución es la deformación de la onda, producida por cargas no lineales conectadas al sistema, generando el fenómeno de la distorsión armónica.

Los armónicos ocasionan problemas tanto en los equipos electrónicos, y en los usuarios finales, sobre todo por el pago excesivo en la planilla debido a las pérdidas ocasionadas.

Se tienen armónicos impares y pares, cada uno de ellos ocasionan distintos efectos y problemas a los elementos del sistema de potencia.

Los armónicos de orden impar usualmente se suman al neutro lo que ocasiona una sobrecarga en el mismo

Las formas de onda de los armónicos de corriente tanto para la onda fundamental como para los armónicos 3, 6, 9, 12 y 15 se pueden apreciar en la Figura 2.14, Figura 2.15, Figura 2.16, Figura 2.17, Figura 2.18 y Figura 2.19, respectivamente.

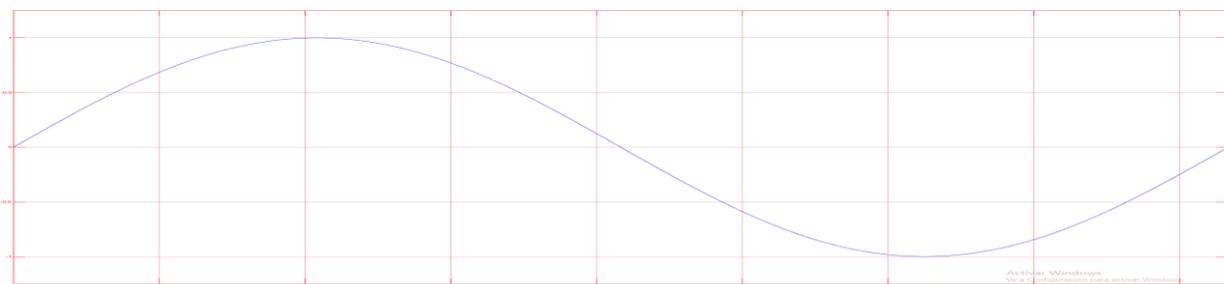


Figura 2.14. Forma de onda de la corriente fundamental [ELABORACION PROPIA].

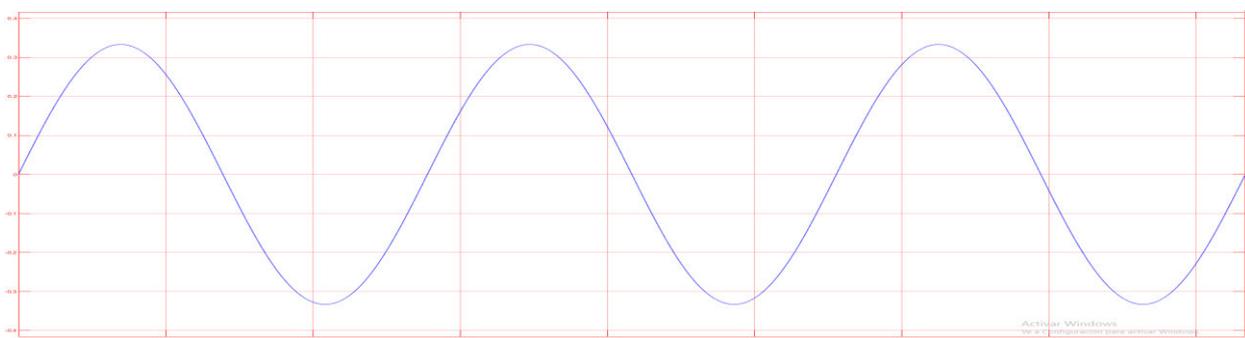


Figura 2.15. Forma de onda de la corriente del tercer armónico [ELABORACION PROPIA].

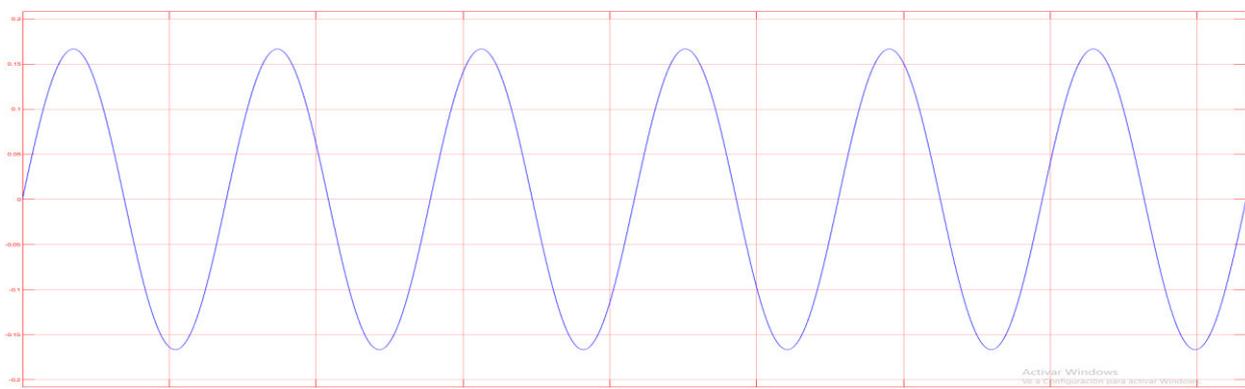


Figura 2.16. Forma de onda de la corriente del sexto armónico [ELABORACION PROPIA].

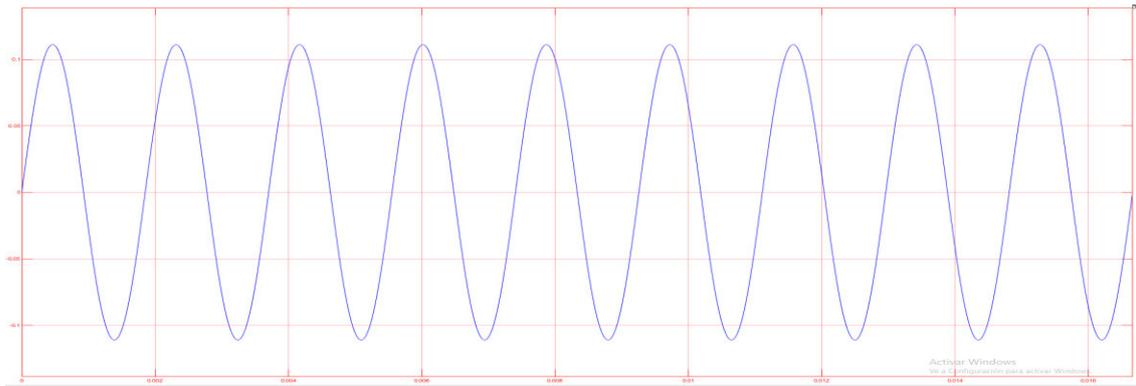


Figura 2.17. Forma de onda de la corriente del noveno armónico [ELABORACION PROPIA].

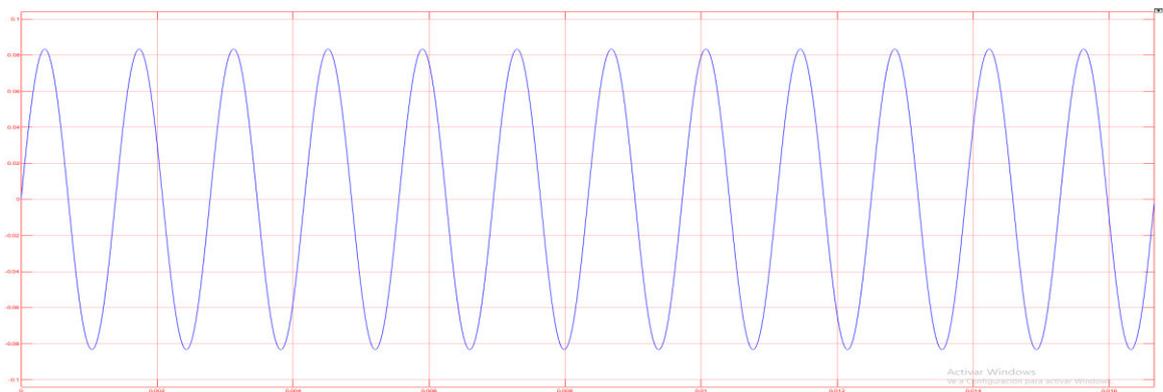


Figura 2.18. Forma de onda de la corriente del doceavo armónico [ELABORACION PROPIA].

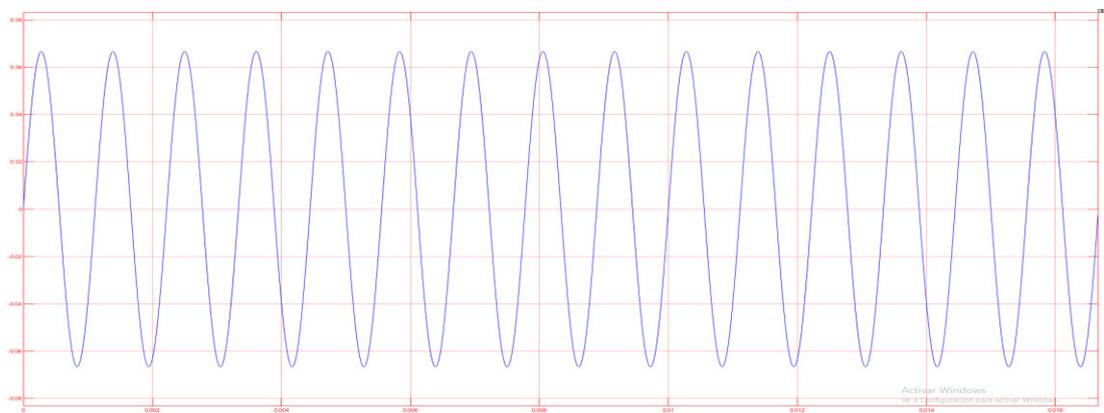


Figura 2.19. Forma de onda de la corriente del quinceavo armónico [ELABORACION PROPIA].

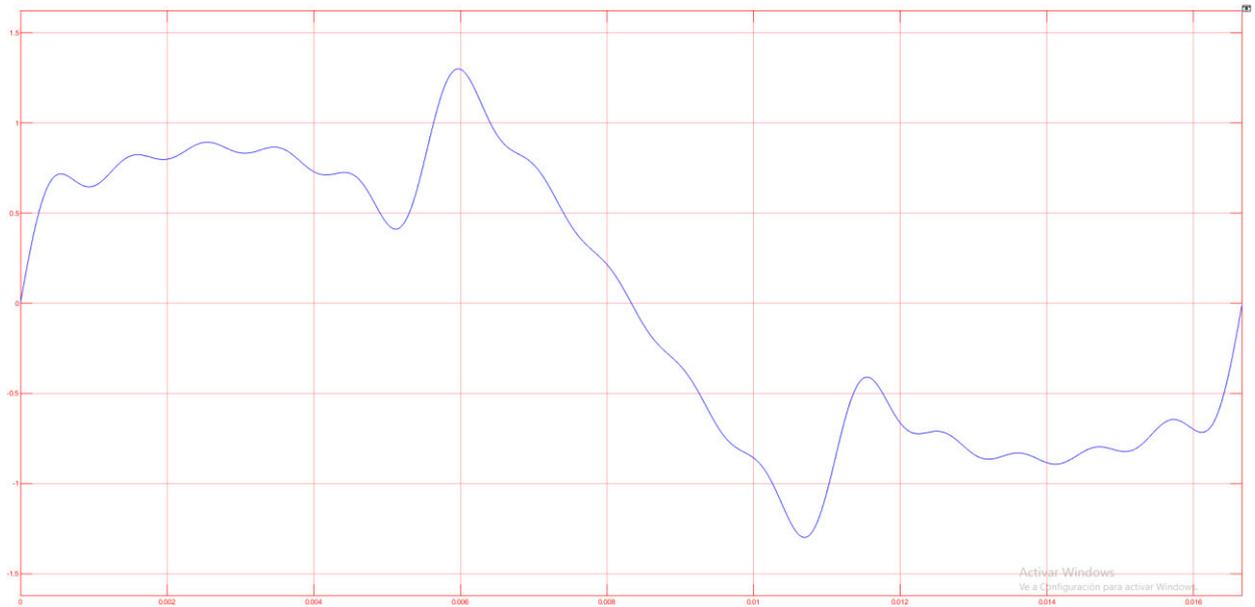


Figura 2.20. Forma de onda total de la corriente armónica [ELABORACION PROPIA].

En la Figura 2.21., se observa las amplitudes y frecuencias de las formas de onda de la señal fundamental y de los armónicos anteriormente mencionados. Ahora bien, se aprecia como de una suma de diferentes señales se tiene una onda completamente distorsionada, este tipo de simulación es una aproximación bastante apegada a la realidad que presentan las ondas distorsionadas por las cargas no lineales.

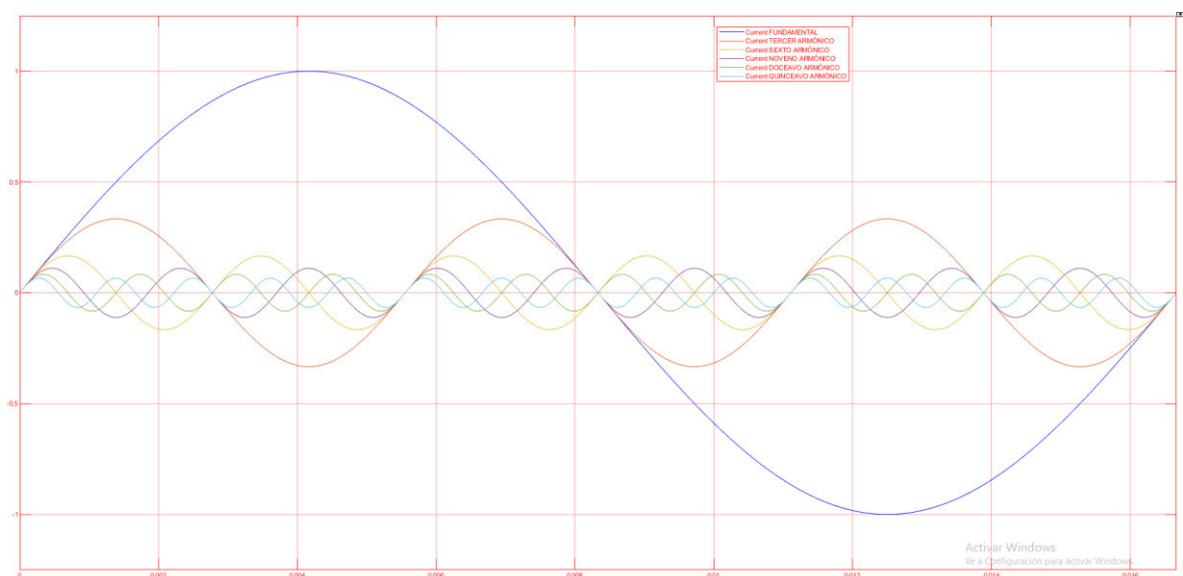


Figura 2.21. Forma de onda de la corriente fundamental y sus componentes armónicas [ELABORACION PROPIA].

En la Tabla 2.1 se muestra una estimación realizada para la simulación, tanto en la amplitud como en la frecuencia de cada una de las fuentes de corrientes usadas en el circuito presentado anteriormente.

Tabla 2.1. Características de las componentes armónicas utilizadas en las fuentes de corriente de SIMULINK [ELABORACION PROPIA].

Orden del armónico	Amplitud	Frecuencia
1	1	60 Hz
3	1/3	180 Hz
6	1/6	360 Hz
9	1/9	540 Hz
12	1/12	720 Hz
15	1/15	900 Hz

2.7.2 FUENTES ARMONICAS

Los armónicos son conocidos por ser producidos por cargas no lineales, las mismas que presentan una impedancia no constante, las cuales a pesar de ser alimentadas por una onda de voltaje sinusoidal absorben una corriente no sinusoidal [10].

Se conoce que existen dos maneras marcadas de generar armónicos, la primera es por cargas no lineales en las que fluye corriente por ellas y la segunda por aquellos que poseen una impedancia que depende de la frecuencia [10].

Para el primer caso, al aplicar una onda de voltaje sinusoidal con una frecuencia establecida a una carga no lineal, la corriente que resulta de esto no posee una sola frecuencia, esto se debe a distintas razones, que serán mencionadas más adelante [10].

Los sistemas eléctricos cuentan con un gran número de cargas, cada una de ellas ocasiona un efecto distinto a las ondas, de cierta manera se puede señalar las siguientes [6]:

- Dispositivos con arcos de descarga.
 - Soldadura por arco.
 - Hornos de inducción.
 - Hornos de arco.
 - Lámparas de descarga con balasto magnético.

- Dispositivos que trabajan en saturación.
 - Motores.
 - Transformadores.
 - Lámparas de descarga con inductancias saturadas.
- Equipos electrónicos.
 - Lámparas tipo Led.
 - Fluorescentes compactos con balasto electrónico.
 - Equipos electrónicos con fuentes conmutadas.
 - Ordenadores.
 - Dispositivos electrónicos de control.
 - Inversores.
 - Rectificadores.
 - Variadores de velocidad o frecuencia.

Para generalizar de manera adecuada las fuentes de los armónicos, se las clasifican en dos grandes grupos, red eléctrica y cargas, dentro de los cuales se tienen subgrupos como se muestra a continuación:

- Red eléctrica.
 - Generación: fotovoltaico+inversor, eólico+inversor, eólico+full-converter, baterías.
 - Transmisión: FACTS (SVC, STATCOM).
 - Distribución: transformadores saturados, alumbrado público+balasto electrónico.
- Cargas.
 - Residenciales: fuentes conmutadas (dispositivos electrónicos), lámparas fluorescentes compactas, cocinas de inducción.
 - Comerciales: lámparas fluorescentes compactas, congeladores, balasto electrónico.
 - Industriales: grandes motores, hornos de arco, convertidores.

2.7.3 EFECTOS PRODUCIDOS POR LOS ARMONICOS

Los efectos que los armónicos producen son de distinta índole, pero se pueden mencionar con facilidad los siguientes:

- Actuación u operación en falso de distintos mecanismos de control por la interferencia de sus señales armónicas.

- Interferencia con sistemas de onda portadora.
- Calentamiento en máquinas de inducción.
- Calentamiento en máquinas sincrónicas.
- Fallas en bancos de capacitores por sobrecarga de potencia reactiva o daño del dieléctrico.
- Ruptura dieléctrica de cables.
- Errores de medición.
- Calentamiento del neutro.
- Operación inestable de dispositivos de conmutación.
- Distorsión en la onda de voltaje y corriente.
- Pérdidas innecesarias en sistemas eléctricos.
- Aumento de temperatura de bobinados.
- Pérdida de la vida útil de máquinas rotativas y bobinados.

2.8 MEDICION DE ARMONICOS

La medición de armónicos en la actualidad se ha vuelto una necesidad de vital importancia, claro está que el análisis de estos a simple vista es difícil de realizar y de predecir sin antes realizar mediciones o un respectivo estudio de flujo de armónicos [11].

El realizar este tipo de mediciones son de gran utilidad para conocer la calidad del producto eléctrico y el estado en el que se encuentra la red eléctrica, para de esta manera evitar los diferentes efectos antes mencionados [11].

Para la medición de los armónicos se utiliza un analizador de red o de carga, el cual mide de manera permanente las señales de voltaje y corriente, las descompone en las componentes de Fourier graficándolas y calculándolas mediante un microprocesador, claramente antes de ingresar la señal al microprocesador, la misma es captada por un transformador de corriente TC, o un transformador de voltaje TP [1][11].

Se convierte la señal, de analógica a digital, debido a que el microprocesador trabaja con señales digitales. En forma general la medición se da como la Figura 2.22, este tipo de proceso ayuda a cambiar la señal analógica en una señal digital, estas señales luego son procesadas por filtros digitales o las Series de Fourier [1].

Para generalizar de mejor manera este proceso se sabe que el muestreo y digitalización de una señal por parte del analizador de red tiene las siguientes etapas [1]:

- 1.- Adaptación: En esta etapa, sea mediante un TP o un TC, la señal que pasa del primario al secundario debe ser exactamente la misma con escalamiento, no se puede tener un filtro en esta etapa, el dispositivo captador de la señal debe reflejar la misma señal con el mismo contenido armónico, pero a escala.
- 2.- Muestreo: Se toma una serie de fotografías a la señal cada cierto tiempo, este tiempo es determinado por el reloj, funcionando, así como un interruptor.
- 3.- Reloj o toma de datos: Esta etapa determina la velocidad para abrir o cerrar el interruptor.
- 4.- Tenencia: Detiene el valor de la muestra n-1 hasta que la muestra n sea digitalizada.
- 5.- Cuantización: Asigna el valor de la muestra a un nivel digital, teniendo en cuenta que el número de niveles digitales depende de número de bits del microprocesador.
- 6.- Codificación: Transforma el nivel digital en una palabra digital, posterior a esto la señal puede ingresar al microprocesador.

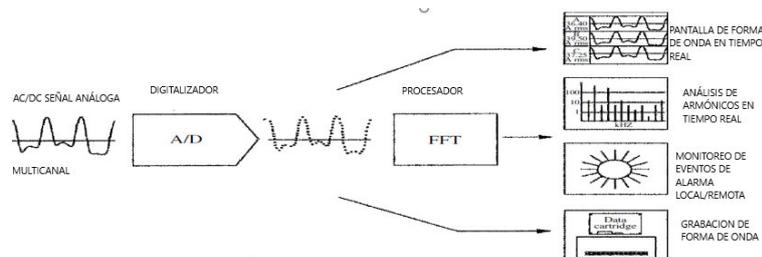


Figura 2.22. Diagrama general de bloques de digitalización de señal [ELABORACION PROPIA][24].

De igual manera al observar la segunda parte de la Figura 2.22, se plantea de forma general [24]:

- Subsistema de adquisición y acondicionamiento de la señal de entrada: Lo importante de esta etapa es la conversión de señales analógicas a señales digitales. En esta parte de la digitalización se simplifican los diseños de circuitos analógicos y permite una mayor flexibilización para alterar los algoritmos que procesan los datos. Es importante considerar las frecuencias de la muestra, un filtrado que determina el ancho de banda de la señal a medirse, en el caso de usar varios canales se debe sincronizar y temporizar [24].
- Subsistema de procesamiento y almacenamiento digital: Las muestras digitales se pasan a este subsistema de procesamiento y registro. Este subsistema puede ser un sistema de registro de datos o de potencia [24].
- Subsistema de interfaz de usuario: Se proporciona a los usuarios el acceso a los datos tomados en la medición, por medio de visualización en pantalla o en impresos, también permite controlar y configurar el monitoreo del sistema ocultando los detalles complicados del sistema, de esta manera ayuda a apreciar correctamente los datos obtenidos [24].

2.8.1 LUGARES DE MEDICION

De manera general el sitio donde se realiza la medición es en las cargas no lineales o cerca de las mismas, en el caso de tener elementos pasivos se debe realizar la medición en los mismos pues estos se consideran un “sumidero” para los armónicos que se generan en otras partes del SEP.

2.8.2 EQUIPOS PARA MEDICION

Esto varía dependiendo de la aplicación que se requiera realizar, dentro de los principales equipos que se usan son:

- Analizadores de red.
- Osciloscopios.

- Registradores.
- Multímetros.
- Sistemas de adquisición de datos.
- Analizadores de armónicos.
- Medidores de flicker.
- Medidores de energía.
- Instrumentos de verificación de cableado y puestas a tierra.

En la actualidad existen equipos altamente sofisticados que permiten adquirir de manera mucho más fácil los datos y realizan análisis matemáticos confiables de la información tomada. Dichos equipos son conocidos propiamente como analizadores de armónicos los cuales cuentan con software y hardware propio para este tipo de estudios.

A continuación, se presenta en la Tabla 2.2 las características de los equipos para medición de armónicos.

Tabla 2.2. Características de los equipos para medición de armónicos [ELABORACION PROPIA].

Característica	Osciloscopio	Analizador de espectro	Analizador de redes
Canales	Dos	Generalmente 1	4 corriente y 3 voltaje
Frecuencia de muestreo	Mayor a 10 Mhz	128, 256, 512 muestras por ciclo	128, 256, 512 muestras por ciclo
Memoria	Algunas formas de onda	Generalmente no	Almacenamiento de múltiples variables
Tipo de medición	Puntual	Puntual	Puntual, periódica o por evento
Captura formas de onda	Si	No	Opcional
Captura otros eventos de calidad de energía	Picos de voltaje	No	

Para el presente caso de titulación se utilizó un analizador de red “CIRCUTOR MYeBOX 1500”, como se muestra en la Figura 2.23.



Figura 2.23. CIRCUTOR MYeBOX 1500 [ELABORACION PROPIA].

El mismo presenta distintos tipos de mediciones de circuitos y su respectivo manual de programación y sincronización con un dispositivo móvil que se encuentra en el ANEXO I.

Las pinzas utilizadas para este trabajo tanto de voltaje como de corriente son las mostradas en las figuras; Figura 2.24 y Figura 2.25:



Figura 2.24. Pinza de voltaje del CIRCUTOR MYeBOX 1500 [ELABORACION PROPIA].



Figura 2.25. Pinza de corriente del CIRCUTOR MYeBOX 1500 [ELABORACION PROPIA].

2.9 METODOS DE MITIGACION DE ARMONICOS

Dentro de los métodos de mitigación se pueden recalcar 3 tipos de soluciones [1]:

- Soluciones de carácter preventivo: evitan la producción de armónicos y sus efectos.
 - Aplicación de técnicas de cancelación de fase.
 - Control de armónicos en convertidores.
- Soluciones de carácter correctivo: reducción de armónicos existentes.
 - Filtros para desviar armónicos de corriente fuera del sistema.
 - Filtros para bloquear corrientes que ingresan al sistema.
 - Reconfiguración de circuitos alimentadores.
 - Reubicación de bancos de compensación.
- Otras soluciones:
 - Uso de transformadores estándares desclasificados.
 - Utilización de “transformadores de factor k” especialmente diseñados para tolerar armónicos.
 - Aumentos de la sección del conductor neutro.

En general, los métodos conocidos para mitigar armónicos son:

- Transformadores con arrollamientos en triángulo.
- Transformadores con distinto grupo de conexión.
- Transformadores en ZIG-ZAG o Reactores derivadores de corrientes de secuencia cero.
- Inductancias de choque o de aislamiento.
- Conversores con mayor cantidad de pulsos.
- Aumento del calibre del neutro.
- Desclasificación de transformadores.
- Uso de transformadores con factor “k”.
- Filtros pasivos
 - Serie.

- Shunt.
- ❖ Filtros activos
 - F Voltaje (serie).
 - F Corriente (shunt).

A continuación, se encuentran características de algunos de los métodos mencionados.

2.9.1 TRANSFORMADORES CON ARROLLAMIENTOS EN TRIANGULO

Encierra a los armónicos triples en el bobinado DELTA del transformador evitando de esta manera que los armónicos fluyan hacia la red.

Es importante la mitigación de los armónicos triples debido a que ocasionan varios efectos perjudiciales para el SEP dentro de los cuales están:

- Sobrecalentamiento del neutro.
- Sobrecalentamiento de los devanados.
- Daño de máquinas rotativas.
- Sobrecalentamiento del transformador.

Este método presenta ciertas desventajas, que son:

- Solo brinda protección a la línea.
- No protege a los transformadores, máquinas y demás elementos del SEP.

2.9.2 TRANSFORMADORES CON DISTINTO GRUPO DE CONEXION.

Esta metodología es usada comúnmente en industrias muy grandes, usualmente es implementada en lugares donde se tengan cargas idénticas conectadas a diferentes transformadores.

De igual manera protege a la línea evitando que los armónicos fluyan hacia ella, pero como desventaja es la no protección hacia transformadores.

2.9.3 TRANSFORMADORES EN ZIG-ZAG.

Este tipo de metodología se basa en dejar encerrados los armónicos en el transformador, eso se logra con la baja impedancia que tiene el mismo, evitando que la acometida y el transformador se contaminen.

El transformador se instala cerca del tablero de control o en el mismo tablero, este método tiene ciertas características:

- Presenta baja impedancia para secuencia cero.
- Presenta alta impedancia para secuencia positiva y para secuencia negativa.
- Brinda protección al transformador principal y a la red.
- Deriva o desvía la corriente de secuencia cero al transformador ZIG-ZAG.
- Es una trampa de armónicos triples.

2.9.4 INDUCTANCIAS DE CHOQUE, ALIZAMIENTO O AMORTIGUAMIENTO.

Este método usa la propiedad de las inductancias al cambiar el sentido de la corriente, las inductancias almacenan campo magnético y se oponen al cambio de sentido de la corriente.

Esta propiedad se usa para algún cambio fuerte de corriente.

Lo interesante de esta metodología es que brinda protección tanto a la línea como a la carga.

Todo este proceso se basa en el campo magnético que es generado por las inductancias de choque.

2.10 TRANSFORMADOR ZIG-ZAG

El transformador ZIG-ZAG es un equipo de potencia que es fabricado con propósitos especiales, teniendo en cuenta que en la salida se tendrá una suma vectorial de dos de sus fases desplazadas 120 grados. Es usado comúnmente para reducir flujos homopolares de armónicos triples, como un transformador de puesta a tierra pues crea un neutro faltante en un sistema trifásico de potencia o en ciertos casos para adicionar potencia trifásica desfasada no convencional [12] [13] [14].

El transformador ZIG-ZAG forma parte de los sistemas de protecciones para neutros aislados, el cuál es un sistema que aterriza mediante un conexionado de 6 bobinas, las cuales en cierto punto eléctrico se derivan a tierra [15].

Este tipo de transformadores es usado para ofrecer una línea de neutro a equipos que inicialmente no cuentan con una. Usualmente son sistemas en delta o estrella sin neutro. Este tipo de transformadores son usualmente de tipo trifásico con un solo bobinado, como se muestra en la Figura 2.26 [15].

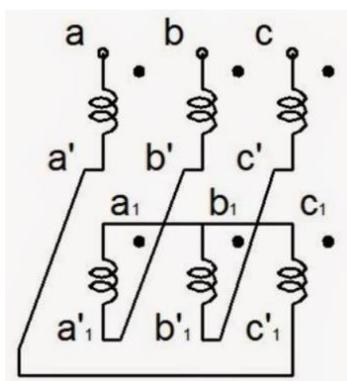


Figura 2.26. Diagrama general de conexión ZIG-ZAG [26].

2.10.1 FUNCIONAMIENTO

Un transformador ZIG-ZAG presenta dos clases de impedancias, dependiendo del flujo de corriente que circule por sus devanados.

La impedancia en condiciones normales es sumamente alta y por el mismo circula un bajo flujo de corriente y pasa desapercibido de cierta manera. Por otro lado, cuando ocurre una falla o presencia de armónicos, la impedancia cambia al contrario que el caso antes

mencionado, es decir, baja la impedancia de manera importante de tal manera que fluyan altas corrientes y armónicos.

Se debe considerar que cada par de los devanados están conectados en diferente sentido, de manera que sus fuerzas eléctricas sean iguales y opuestas, teniendo en cuenta que los devanados tienen el mismo número de vueltas [16].

2.10.2 ESTRUCTURA Y CONEXIONES INTERNAS

Se conoce que este tipo de transformador es para un conexionado trifásico, por lo tanto, se encuentra conformado por tres devanados externos y tres devanados internos, generalmente a los devanados externos se los conoce como Zig, y a los internos como Zag.

Los devanados Zig son los que se conectan a las fases de alimentación, mientras que los devanados Zag se conectan entre sí para unirlos al neutro del sistema, esta conexión de los devanados internos con el neutro del sistema suele hacerse de forma directa o mediante el uso de una resistencia.

Al observar la Figura 2.27, cada uno de los brazos se encuentra formado por dos devanados de iguales condiciones, pero su enrollamiento es en dirección opuesta con los que se asegura una impedancia alta cuando se encuentra en operación normal.

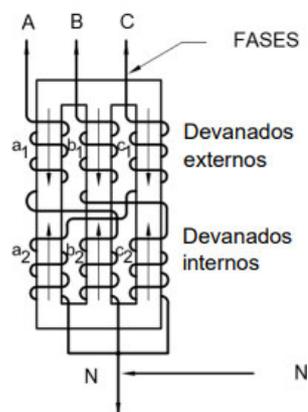


Figura 2.27. Devanados y conexiones de un transformador ZIG-ZAG.

En resumen, el devanado Zig de la primera fase A se conecta al devanado Zag de la segunda fase B, el devanado Zig de la segunda fase B se conecta al devanado Zag de la

tercera fase C, y finalmente el devanado Zig de la tercera fase C se conecta al devanado Zag de la primera fase A.

2.10.3 DIMENSIONAMIENTO

El dimensionamiento de un transformador tiene una variedad de metodologías, desde pruebas de cortocircuito hasta estimaciones que el diseñador logre sustentar.

Una de las maneras para poder realizar el dimensionamiento de un transformador ZIG-ZAG es considerar el valor de corriente de falla que se requiere contrarrestar en el sistema, la misma que se controla con una resistencia o inductancia [15].

Para el valor de sobrevoltajes se debe realizar la respectiva valoración de red de secuencias del sistema y determinar las relaciones de $X0/X1$ y $R0/X1$. Una vez analizadas las relaciones se tiene que, si es menor que 3 para la primera relación, y menor que 1 para la segunda relación se puede considerar que el sistema está correctamente conectado a tierra [15].

Las relaciones $R0/X1$ y $X0/X1$, se pueden cambiar variando la resistencia existente entre el punto de neutro y el sistema de electrodos de tierra. De manera general se tiene un valor común de 400 Amperios como corriente máxima de falla a tierra, pero de cierta manera para sensibilizar las protecciones dentro de un rango de 200 a 1000 Amperios [15].

Este tipo de transformadores se pueden también usar en bajo y medio voltaje, por lo que usualmente la capacidad es igual a la del transformador delta estrella de 1,73 veces [15].

Por otro lado, se puede dimensionar el transformador a partir de una corriente homopolar que viene a ser la corriente RMS conformada por los armónicos generados por la carga no lineal, que en nuestro caso será el modo de dimensionamiento para este trabajo de titulación.

Con esta corriente homopolar se calcula la potencia del transformador y con la misma se siguen los mismos pasos de dimensionamiento y construcción de un transformador tradicional.

Constructivamente las bobinas que forman el neutro son análogas a un transformador trifásico, el núcleo magnético en conjunto a los devanados análogos a los de un transformador conforman la parte activa, esta parte activa en ciertas ocasiones se lo pone

dentro de aceite, muy parecido a lo que sería un transformador en aceite por tal razón son llamados “transformadores de puesta a tierra”.

Y el punto neutro se lo conecta directamente a tierra o ciertas veces mediante una resistencia entre neutro y tierra.

Para el presente trabajo de titulación se construirá un banco de transformadores, simulando de esta manera un transformador trifásico, esto se debe a que no se cuentan con materiales de índole trifásica por escasez en el mercado eléctrico ecuatoriano.

3. METODOLOGIA

Para poder llevar a cabo de manera eficiente este proyecto de titulación se debe tener en cuenta varios aspectos, desde los instrumentos de medición hasta la construcción; en este capítulo se detalla una descripción de la metodología implementada con sus diferentes etapas, para poder modelar una carga adecuada de triples armónicos, una vez alcanzado un valor alto de terceras armónicas se procederá a construir dicha carga, posterior a esto se detallará el proceso de modelado y construcción del transformador ZIG-ZAG para mitigar este valor armónico producido por dicha carga no lineal.

Luego de haber realizado una investigación, esta es la primera experiencia de construir un transformador ZIGZAG para mitigación de armónicos triples de corriente para la mejora de la calidad del producto eléctrico. Con esto se tendrá dentro del país una alternativa adecuada para mejorar la calidad del producto eléctrico sin tener que realizar cambios tan drásticos dentro de las cargas industriales.

3.1 ENTORNO DE SIMULACION

El entorno de simulación y modelación implementado para este proyecto de titulación del diseño e implementación de un transformador ZIGZAG para mitigación de armónicos de corriente fue el software MATLAB, aunque de igual manera DigSILENT POWER FACTORY presenta este tipo de análisis. En primer lugar, se procederá a modelar distintas cargas no lineales en el software, para de esta manera analizar la que mayor contenido de terceras armónicas posea. Una vez realizado esto se simularán distintos transformadores ZIGZAG para mitigar los armónicos de cada carga simulada, para observar el efecto de este.

A continuación, se presenta un resumen de cada software anteriormente mencionado para el modelado.

3.1.1 DIGSILENT POWER FACTORY

DigSILENT Power Factory posee muchas funciones, de suma importancia para el ámbito eléctrico, el mismo es un software de análisis de sistemas eléctricos de potencia para su

uso en el análisis de generación, transmisión, distribución y sistemas industriales. Cubre una gama completa de funcionalidades, desde características estándar hasta aplicaciones altamente sofisticadas y avanzadas. Además, presenta una gran cantidad de componentes y funciones que permiten simplificar la modelación y simulación de los sistemas, mediante algoritmos de última generación y scripts definidos por el usuario. Para el estudio de armónicos se utiliza el módulo de Calidad de Energía que simula flujos de potencia armónica. [17].

Para poder diseñar de manera adecuada el transformador ZIGZAG se debe conocer la corriente que soportará dicho transformador, esto se hace a partir del análisis de armónicos.

Para la determinación de esta corriente existen tres maneras:

- SIMULACIÓN
- MEDICIÓN DIRECTA
- ESTIMACIÓN

3.1.2 MATLAB-SIMULINK

MATLAB presenta una especial caja de herramientas denominada SIMULINK, utilizada para la simulación del comportamiento de diferentes sistemas dinámicos, dentro del cual se pueden realizar una gran variedad de simulaciones de sistemas lineales y no lineales, por tal razón siendo un software adecuado para este trabajo de tesis, que se enfoca en los sistemas no lineales.

Además, presenta otro tipo de ayudas, dentro de ellas la modelación en tiempo continuo y discreto.

SIMULINK presenta una ventaja interesante y es su entorno gráfico, por medio del cual se pueden apreciar los distintos bloques que constituyen nuestro sistema a simular. En los últimos años el software ha sido mejorado en la ampliación de sus librerías de bloques y capacidades, destacando el paquete STATEFLOW que permite simular las máquinas de estado.

Actualmente SIMULINK es utilizado en gran cantidad por ingenieros que realizan modelos de electrónica de potencia pues ayuda al análisis de distorsión armónica, ya que pueden

desarrollar con gran eficacia los sistemas de control digital para convertidores de potencia y motores.

Algunas ventajas adicionales que presenta el software son:

- Genera y simula códigos que permite reducir el tiempo que se demora en desarrollar un proyecto hasta en un 50% en comparación con la codificación tradicional.
- Presenta una gran variedad de componentes eléctricos listos para ser implementados.
- Se puede acceder a diferentes ejemplos de simulación en escritorio.
- Presenta cajas de herramientas complementarias para diseños de control, punto fijo y procesamiento de señales.
- Simulaciones en tiempo real.

3.2 MODELACION DE UN SISTEMA ELECTRICO PARA ESTUDIOS DE ARMONICOS.

Para esto se necesita correr flujos de potencia, cada uno se los hará con distintos cambios en los modelos de los elementos, pues esto significa cambiar para observar el comportamiento a la frecuencia a analizar.

Como los elementos eléctricos varían de acuerdo con la frecuencia se deben considerar dichos aspectos.

3.2.1 MODELACION DE LA CARGA O TIPO DE CARGA

Para esto de deben tener en cuenta ciertos aspectos, dentro de ellos tenemos:

- Se modelan los armónicos como fuentes de corriente.
- Para cada armónico se debe representar su módulo y su fase

- Modelar las redes desbalanceadas (se necesita modelar porque complementa al subir el porcentaje de armónicos triples, además de que si no se diferencia entre lo balanceado y desbalanceado se perdería el tercer armónico).

3.3 SIMULACIONES DE SISTEMAS ELECTRICOS CON Y SIN TRANSFORMADOR EN CONEXION ZIG-ZAG

Para poder verificar el correcto funcionamiento de este tipo de mitigación de armónicos, se procedió a realizar simulaciones con cargas no lineales que se encuentran presentes en nuestro entorno, para poder apreciar de mejor manera se utiliza el analizador de armónicos (FFT POWERGUI) que nos brinda SIMULINK-MATLAB.

Como primer sistema se tiene un rectificador conectado a una carga RL, sin hacer uso del transformador ZIGZAG. El circuito se puede apreciar en la Figura 3.1, y los parámetros de la fuente de alimentación y de la carga en las Figura 3.2 y Figura 3.3, respectivamente.

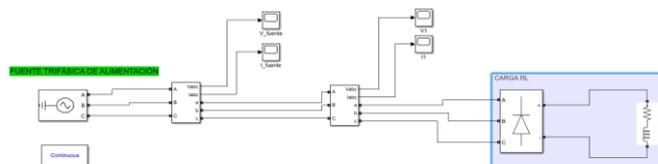


Figura 3.1. Simulación de sistema eléctrico con carga no lineal RL [ELABORACION PROPIA].

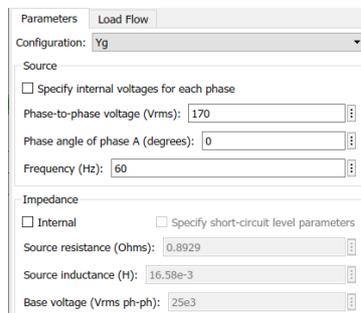


Figura 3.2. Parámetros de la fuente trifásica de alimentación [ELABORACION PROPIA].

Parameters		Parameters	
Number of bridge arms:	3	Branch type:	RL
Snubber resistance Rs (Ohms)	inf	Resistance (Ohms):	100
Snubber capacitance Cs (F)	0	Inductance (H):	0.120
Power Electronic device	Diodes	<input type="checkbox"/> Set the initial inductor current	
Ron (Ohms)	1e-3	Measurements	None
Lon (H)	0		
Forward voltage Vf (V)	0		
Measurements	None		

Figura 3.3. Parámetros de la carga no lineal [ELABORACION PROPIA].

Para el primer caso de simulación, al observar la Figura 3.4 y Figura 3.5; se tiene un valor de corriente pico de aproximadamente 2,5 amperios y un valor de voltaje pico de 120 voltios.

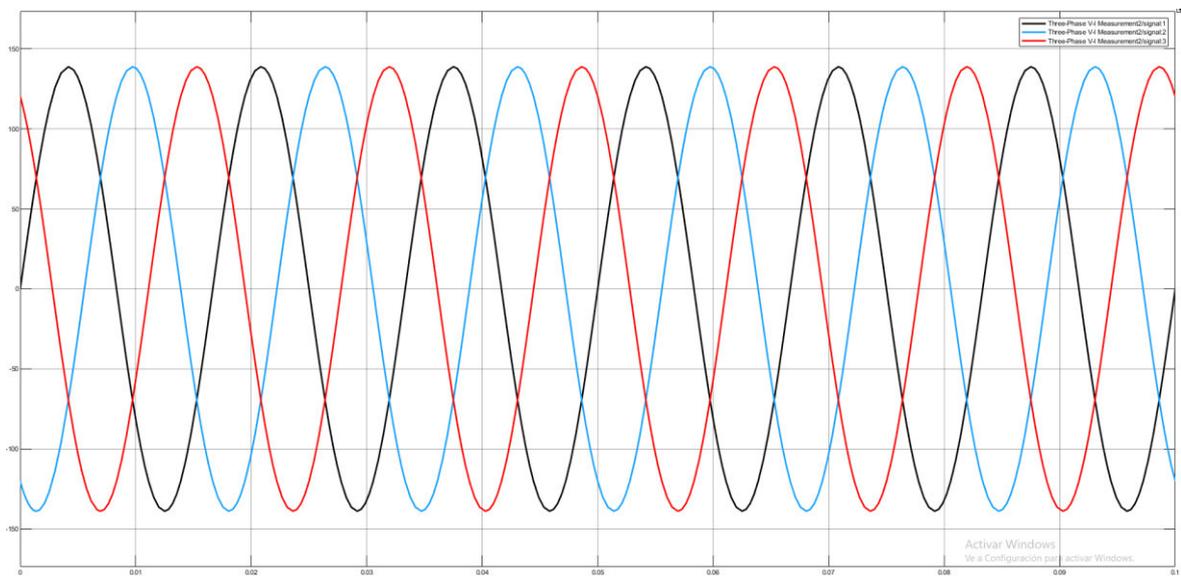


Figura 3.4. Forma de onda de voltaje en la fuente [ELABORACION PROPIA].

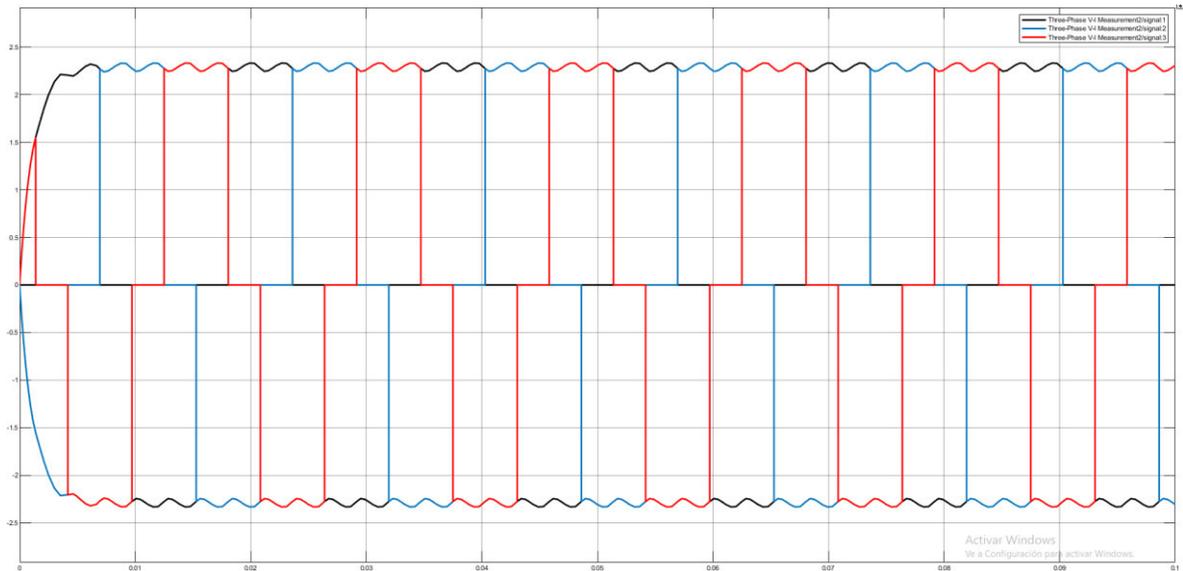


Figura 3.5. Forma de onda de corriente en la fuente [ELABORACION PROPIA].

La forma de onda de la corriente presenta distorsión en comparación a la onda de voltaje, esto se debe por la presencia de armónicos inyectados por la carga no lineal, a continuación, en la Figura 3.6, se muestra el respectivo espectro de armónicos. En donde se tiene un THD (%) de 31,68 y un porcentaje de tercera armónica en porcentaje con respecto a la fundamental de 1,976%.

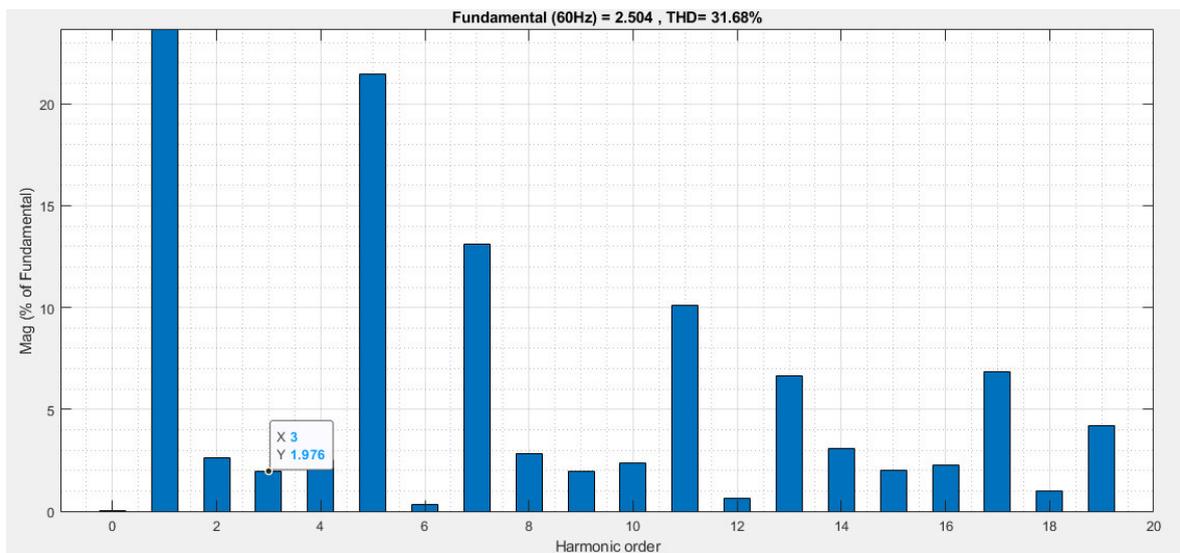


Figura 3.6. Espectro de armónicos inyectados a la red por carga no lineal [ELABORACION PROPIA].

Ahora el mismo sistema anterior, haciendo uso del transformador ZIGZAG.

Para el cálculo de la potencia aparente del transformador se multiplica el voltaje por la corriente, obteniendo así la potencia que para este caso es de 300 VA, normalizando cada transformador se lo aproxima a 1 kVA. El sistema con el transformador se observa en la Figura 3.7; y los parámetros del transformadores en la Figura 3.8.

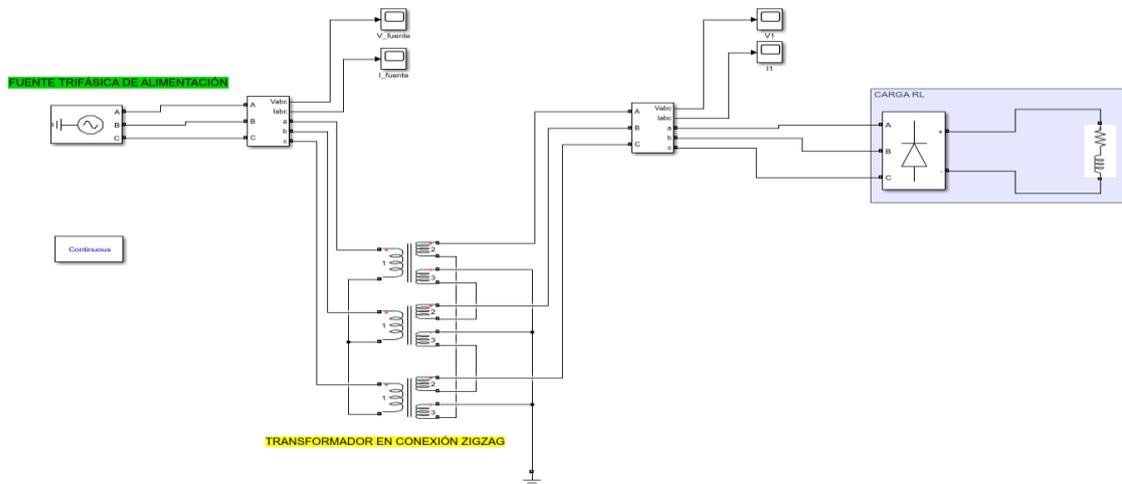


Figura 3.7. Simulación de sistema eléctrico con carga no lineal RL [ELABORACION PROPIA].

Parameters	
Units	pu
Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:	[1e3 60]
Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)]:	[85 0.002 0.08]
Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu) L2(pu)]:	[43 0.001 0.04]
<input checked="" type="checkbox"/> Three windings transformer	
Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(pu) L3(pu)]:	[43 0.001 0.04]
Magnetization resistance and inductance [Rm(pu) Lm(pu)]:	[500 500]
Measurements	None

Figura 3.8. Parámetros de los transformadores [ELABORACION PROPIA].

Para el primer caso de simulación haciendo uso del transformador en conexión ZIG-ZAG, la forma de onda de la corriente presenta una menor distorsión en comparación a la onda de voltaje, tiende a ser un poco más sinusoidal, esto se debe por la presencia del transformador. Esto se observa en la Figura 3.9 y Figura 3.10; respectivamente.

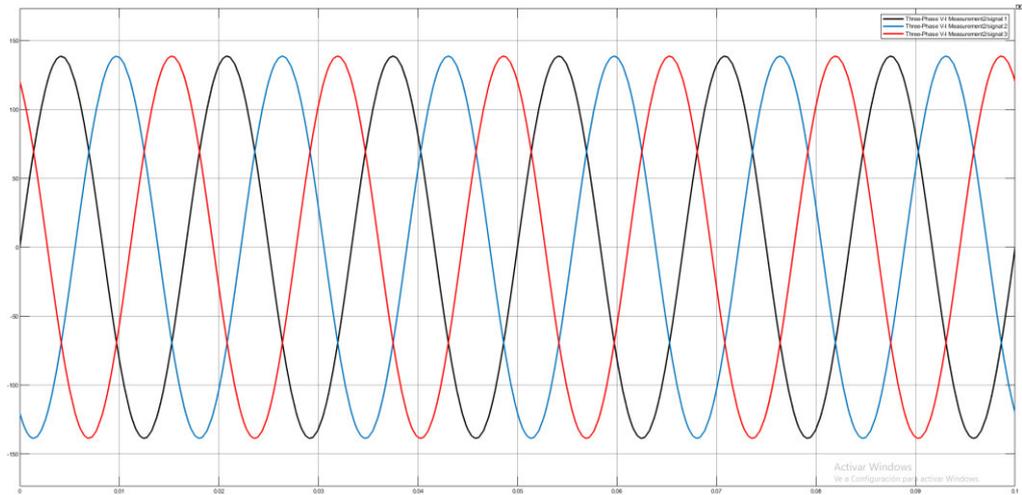


Figura 3.9. Forma de onda de voltaje en la fuente [ELABORACION PROPIA].

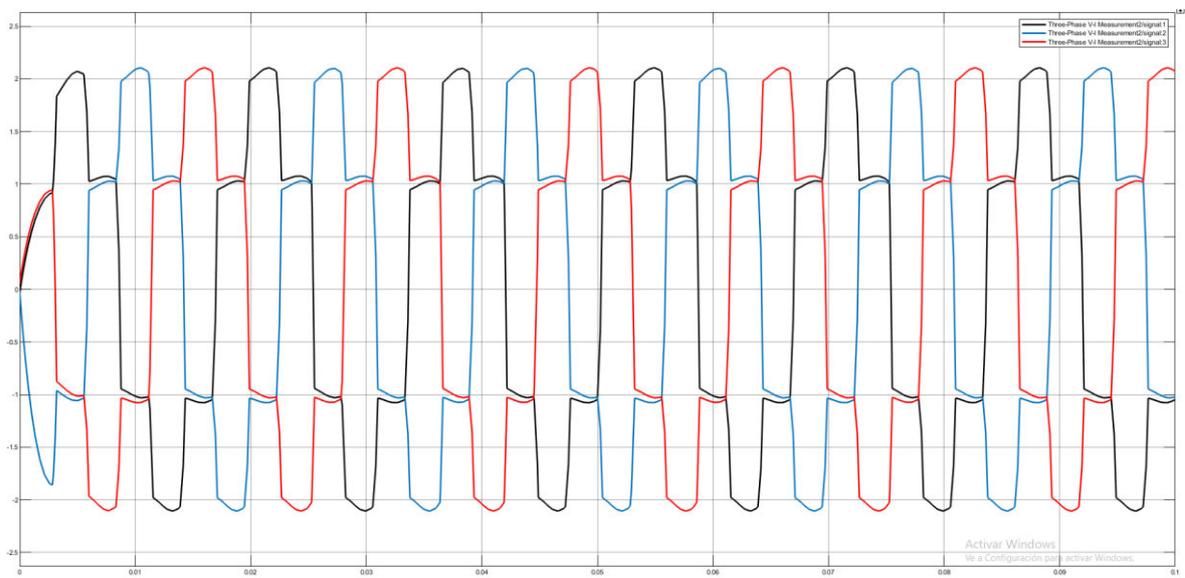


Figura 3.10. Forma de onda de corriente en la fuente [ELABORACION PROPIA].

A continuación, en la Figura 3.11, se muestra el respectivo espectro de armónicos. En donde se tiene un THD (%) de 26,69 y un porcentaje de tercera armónica en porcentaje con respecto a la fundamental de 0,04944.

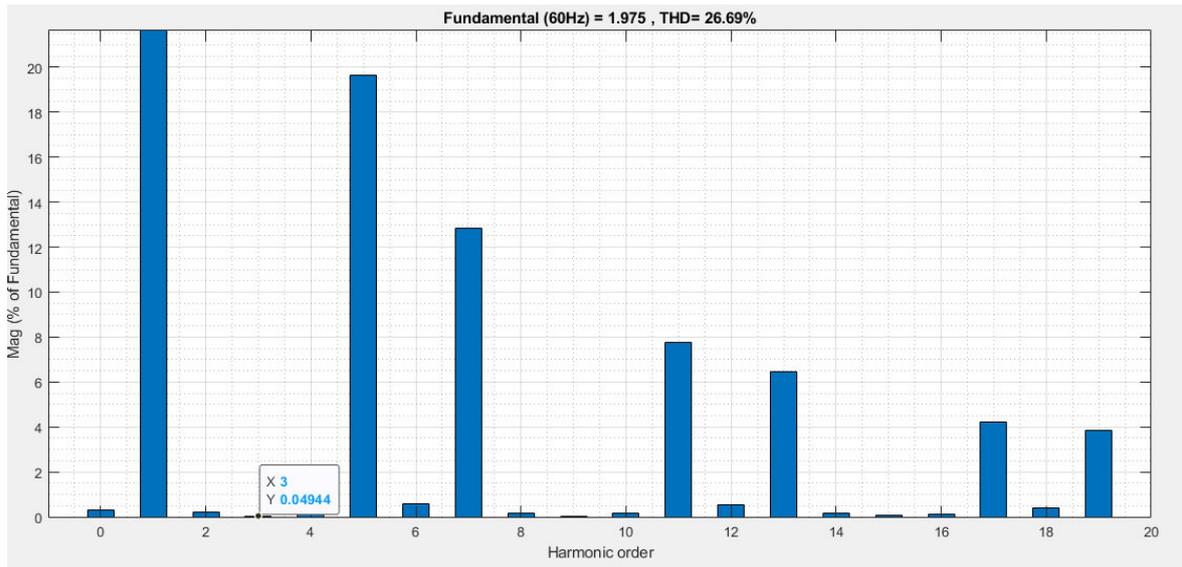


Figura 3.11. Espectro de armónicos inyectados a la red por carga no lineal [ELABORACION PROPIA].

Como segundo sistema tenemos un MOTOR DC, alimentado por un transformador reductor, sin hacer uso del transformador ZIGZAG. El circuito se presenta en la Figura 3.12 y los parámetros de la fuente trifásica y la carga en la Figura 3.13 y Figura 3.14, respectivamente.

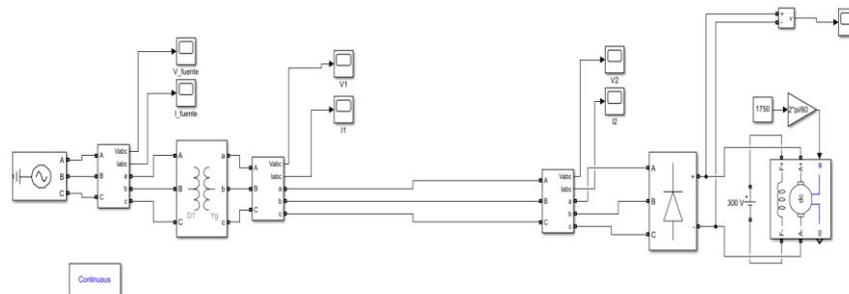


Figura 3.12. Simulación de sistema eléctrico con carga no lineal MOTOR DC [ELABORACION PROPIA].

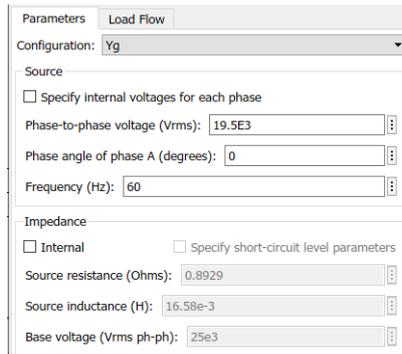


Figura 3.13. Parámetros de la fuente trifásica de alimentación [ELABORACION PROPIA].

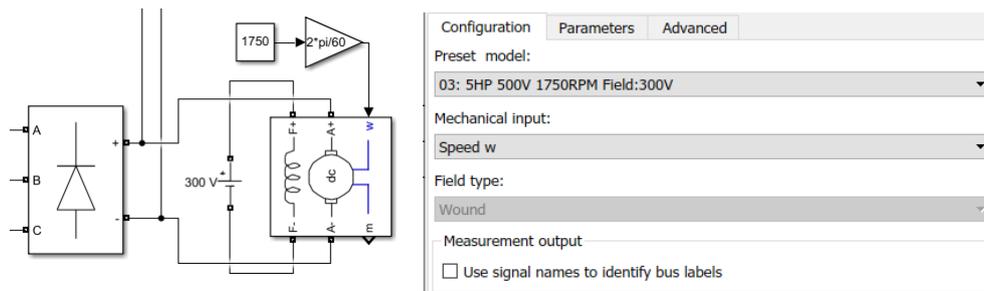


Figura 3.14. Parámetros de la carga no lineal [ELABORACION PROPIA].

Para el segundo caso de simulación, se tiene un valor de corriente pico de aproximadamente 25 amperios y un valor de voltaje pico de 500 voltios. Como se observa en la Figura 3.15 y Figura 3.16, respectivamente.

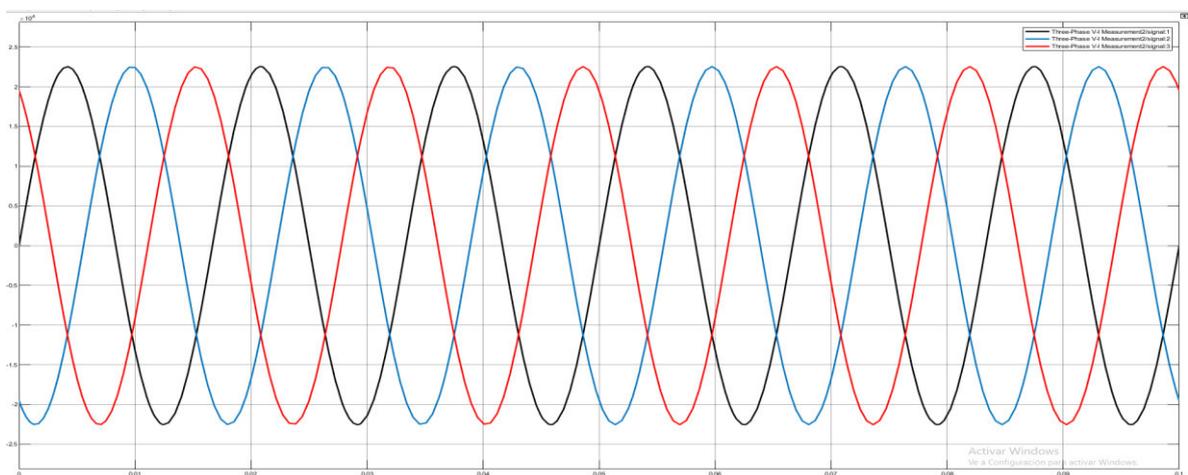


Figura 3.15. Forma de onda de voltaje en la fuente [ELABORACION PROPIA].

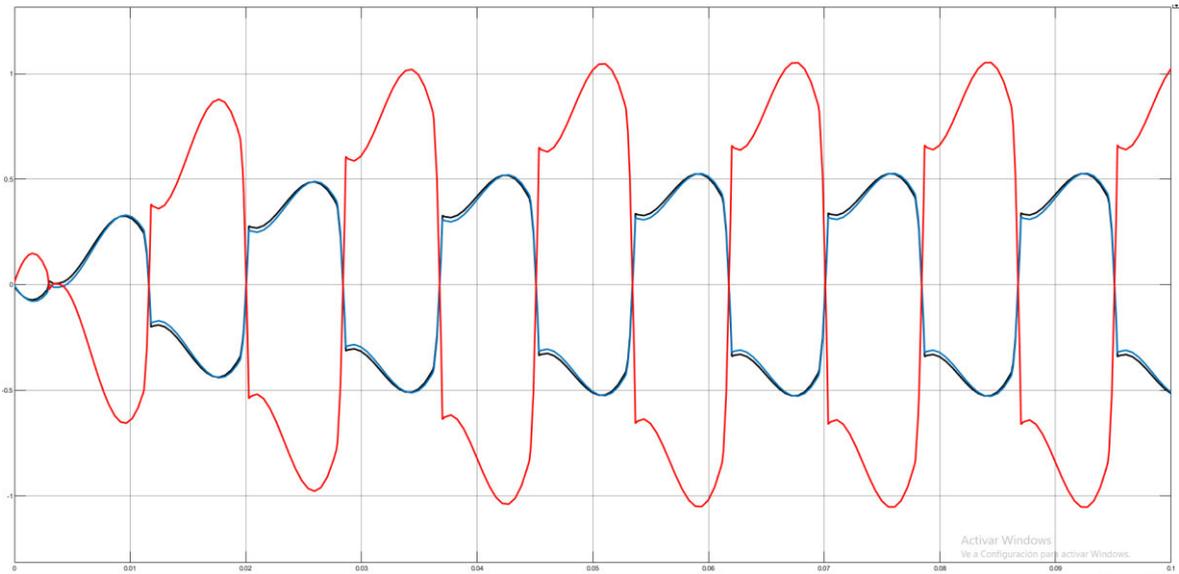


Figura 3.16. Forma de onda de corriente en la fuente [ELABORACION PROPIA].

La forma de onda de la corriente presenta distorsión en comparación a la onda de voltaje, esto se debe por la presencia de armónicos inyectados por la carga no lineal, para este caso se aprecia que sufre una mayor distorsión por el tipo de carga que representa un motor en conjunto con el rectificador, a continuación, en la Figura 3.17, se muestra el respectivo espectro de armónicos. En donde se tiene un THD (%) de 32,73 y un porcentaje de tercera armónica en porcentaje con respecto a la fundamental de 25,53%.

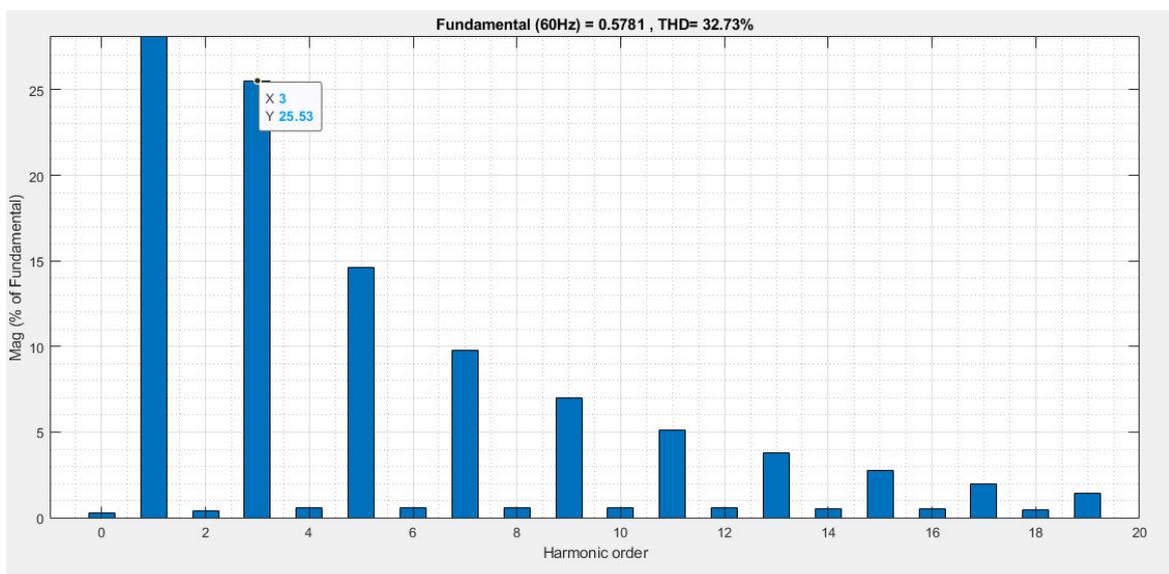


Figura 3.17. Espectro de armónicos inyectados a la red por carga no lineal [ELABORACION PROPIA].

Ahora el mismo sistema anterior, haciendo uso del transformador ZIGZAG.

Para el cálculo de la potencia aparente del transformador se multiplica el voltaje por la corriente, obteniendo así la potencia que para este caso es de 12500 VA, normalizando cada transformador se lo aproxima a 15 kVA. Dicho circuito se observa en la Figura 3.18. Los parámetros de la fuente de alimentación, del transformador reductor y del transformador ZIGZAG en la Figura 3.19, Figura 3.20 y Figura 3.21, respectivamente.

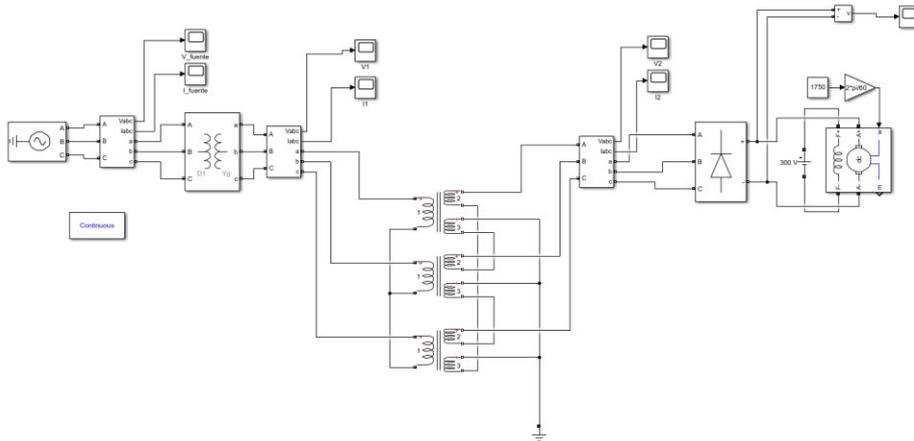


Figura 3.18. Simulación de sistema eléctrico con MOTOR DC [ELABORACION PROPIA].

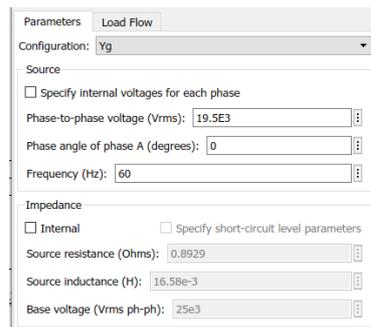


Figura 3.19. Parámetros de la fuente trifásica de alimentación [ELABORACION PROPIA].

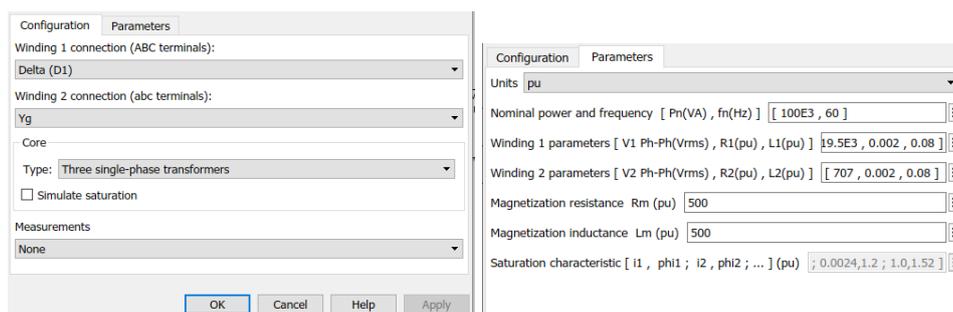


Figura 3.20. Parámetros del transformador reductor [ELABORACION PROPIA].

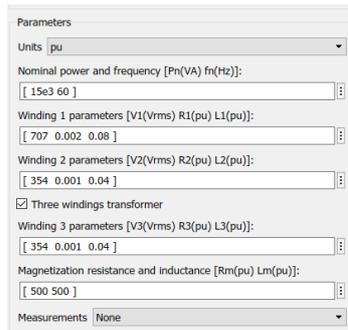


Figura 3.21. Parámetros de los transformadores [ELABORACION PROPIA].

Para el segundo caso de simulación haciendo uso del transformador en conexión ZIG-ZAG, la forma de onda de la corriente presenta una menor distorsión en comparación a la onda de voltaje, tiende a ser un poco más sinusoidal, esto se debe por la presencia del transformador. Esto se observa en la Figura 3.22 y Figura 3.23, respectivamente.

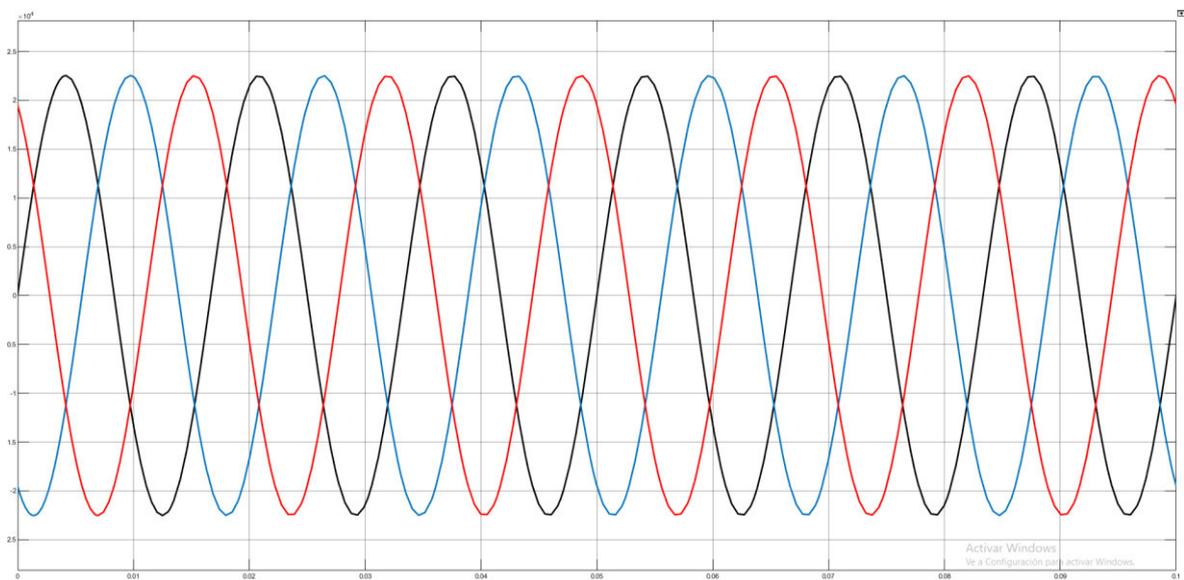


Figura 3.22. Forma de onda de voltaje en la fuente [ELABORACION PROPIA].

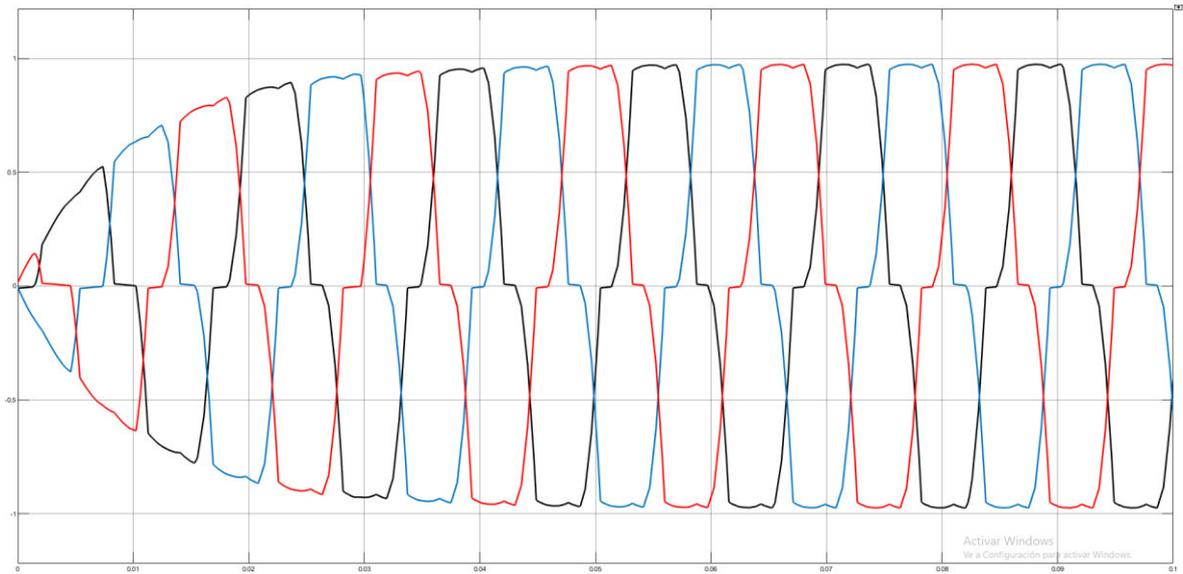


Figura 3.23. Forma de onda de corriente en la fuente [ELABORACION PROPIA].

A continuación, en la Figura 3.24, se muestra el respectivo espectro de armónicos. En donde se tiene un THD (%) de 15,64 y un porcentaje de tercera armónica en porcentaje con respecto a la fundamental de 0,3218%.

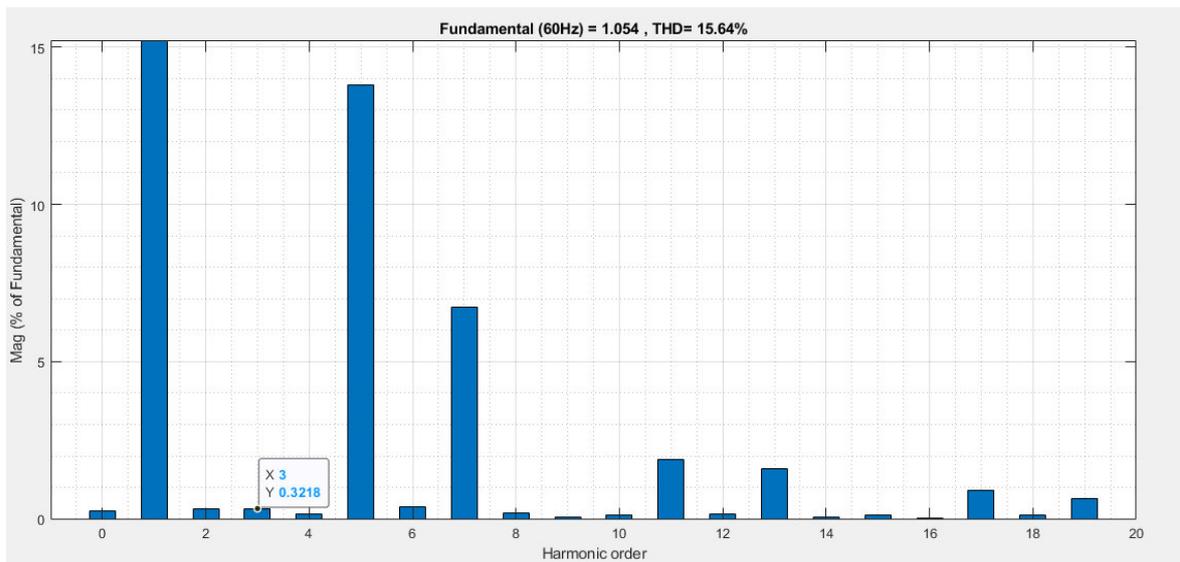


Figura 3.24. Espectro de armónicos inyectados a la red por carga no lineal [ELABORACION PROPIA].

Como tercer sistema tenemos un MOTOR DC con rectificador, alimentado directamente de una fuente, sin hacer uso del transformador ZIGZAG. Dicho circuito se observa en la Figura 3.25. Los parámetros de la fuente de alimentación y de la carga se observa en la Figura 3.26 y Figura 3.27, respectivamente.

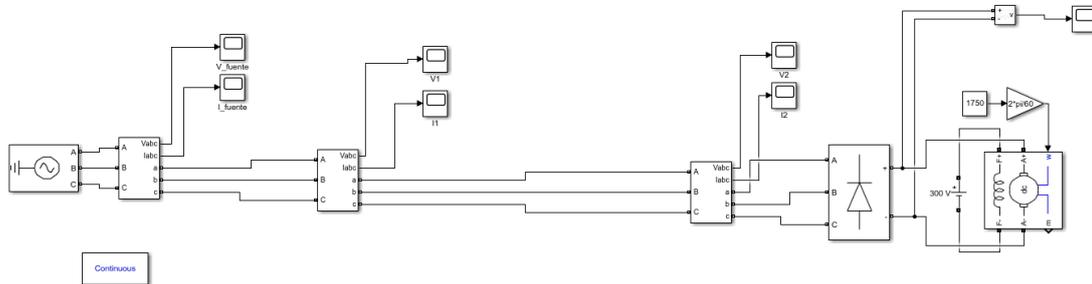


Figura 3.25. Simulación de sistema eléctrico con carga no lineal MOTOR DC [ELABORACION PROPIA].

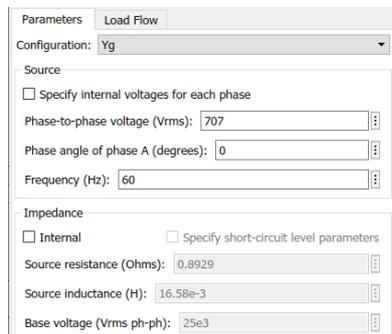


Figura 3.26. Parámetros de la fuente trifásica de alimentación [ELABORACION PROPIA].

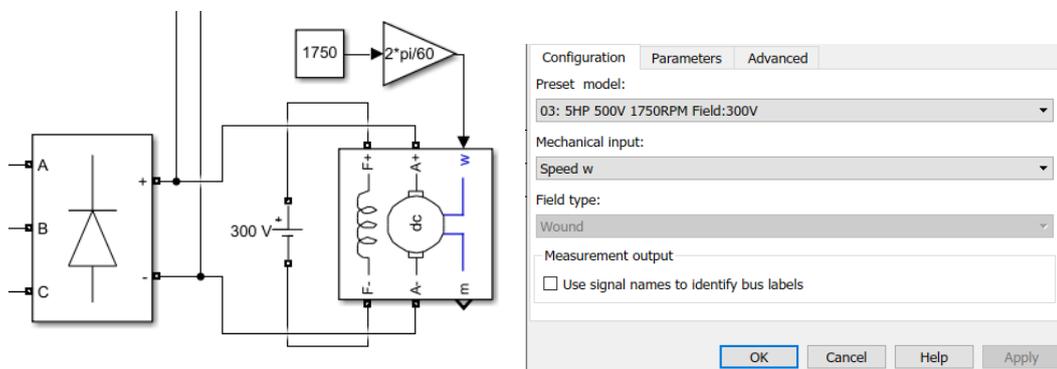


Figura 3.27. Parámetros de la carga no lineal [ELABORACION PROPIA].

Para el tercer caso de simulación, al observar la Figura 3.28 y Figura 3.29, se tiene un valor de corriente pico de aproximadamente 50 amperios y un valor de voltaje pico de 500 voltios.

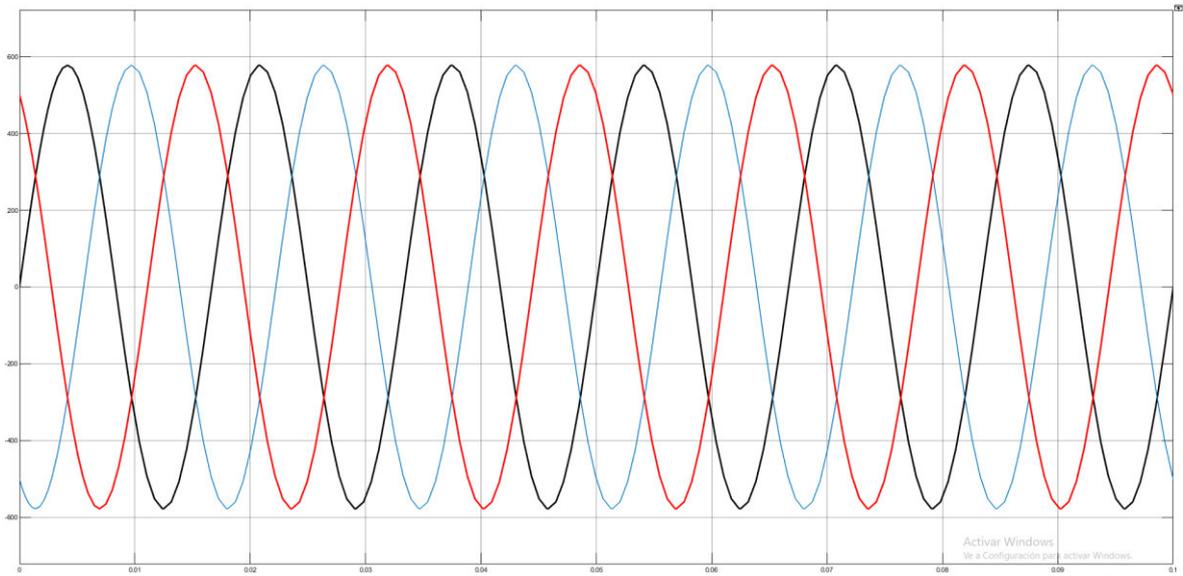


Figura 3.28. Forma de onda de voltaje en la fuente [ELABORACION PROPIA].

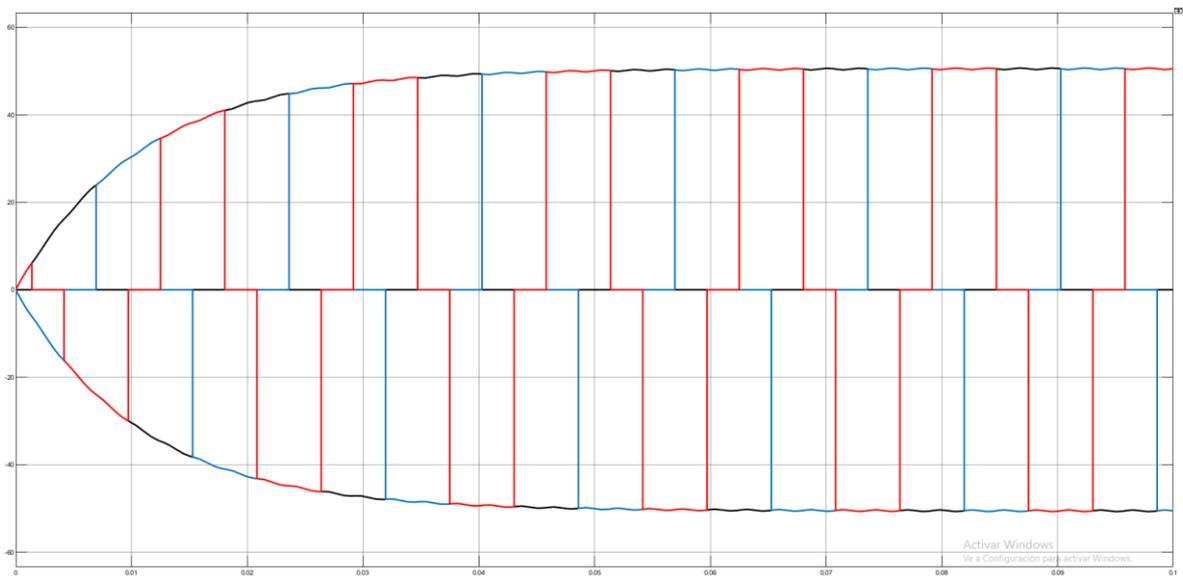


Figura 3.29. Forma de onda de corriente en la fuente [ELABORACION PROPIA].

La forma de onda de la corriente presenta distorsión en comparación a la onda de voltaje, esto se debe por la presencia de armónicos inyectados por la carga no lineal, para este caso se aprecia que sufre una mayor distorsión que el primer circuito pero una menor distorsión en comparación al segundo circuito, esto se debe de cierta manera a que el transformador reductor es posible afecte de cierta manera a la distorsión de la onda de corriente, a continuación, en la Figura 3.30, se muestra el respectivo espectro de

armónicos. En donde se tiene un THD (%) de 31,65 y un porcentaje de tercera armónica en porcentaje con respecto a la fundamental de 2,346%.

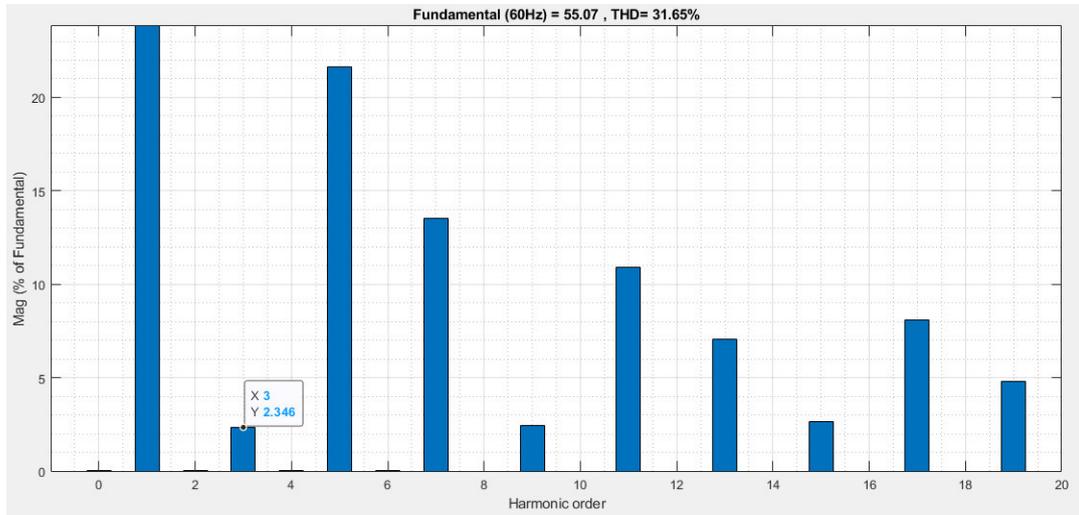


Figura 3.30. Espectro de armónicos inyectados a la red por carga no lineal [ELABORACION PROPIA].

Ahora el mismo sistema anterior, haciendo uso del transformador ZIGZAG.

Para el cálculo de la potencia aparente del transformador se multiplica el voltaje por la corriente, obteniendo así la potencia que para este caso es de 25000 VA, normalizando cada transformador se lo aproxima a 30 kVA. El circuito es presentado en la Figura 3.31. Los parámetros de la fuente de alimentación y de los transformadores se encuentran en la Figura 3.32 y Figura 3.33, respectivamente.

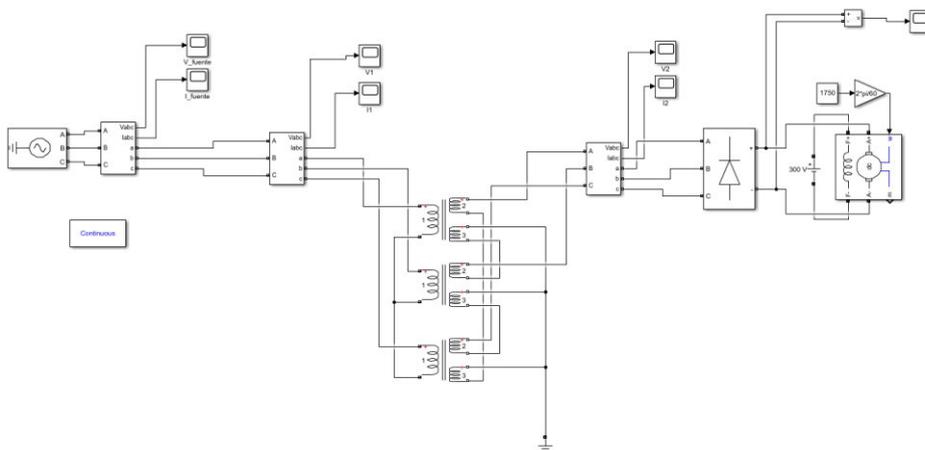


Figura 3.31. Simulación de sistema eléctrico con MOTOR DC [ELABORACION PROPIA].

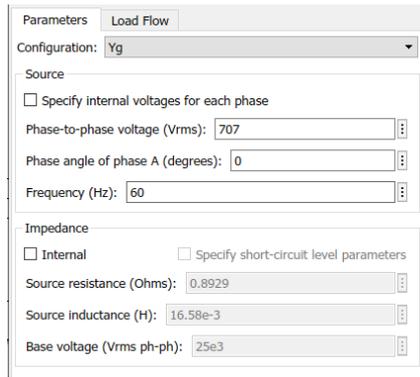


Figura 3.32. Parámetros de la fuente trifásica de alimentación [ELABORACION PROPIA].

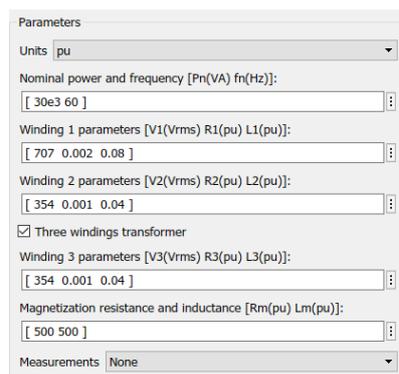


Figura 3.33. Parámetros de los transformadores [ELABORACION PROPIA].

Para el tercer caso de simulación haciendo uso del transformador en conexión ZIG-ZAG, la forma de onda de la corriente presenta una menor distorsión en comparación a la onda de voltaje, tiende a ser un poco más sinusoidal, esto se debe por la presencia del transformador, esto se puede apreciar en la Figura 3.34 y Figura 3.35, respectivamente.

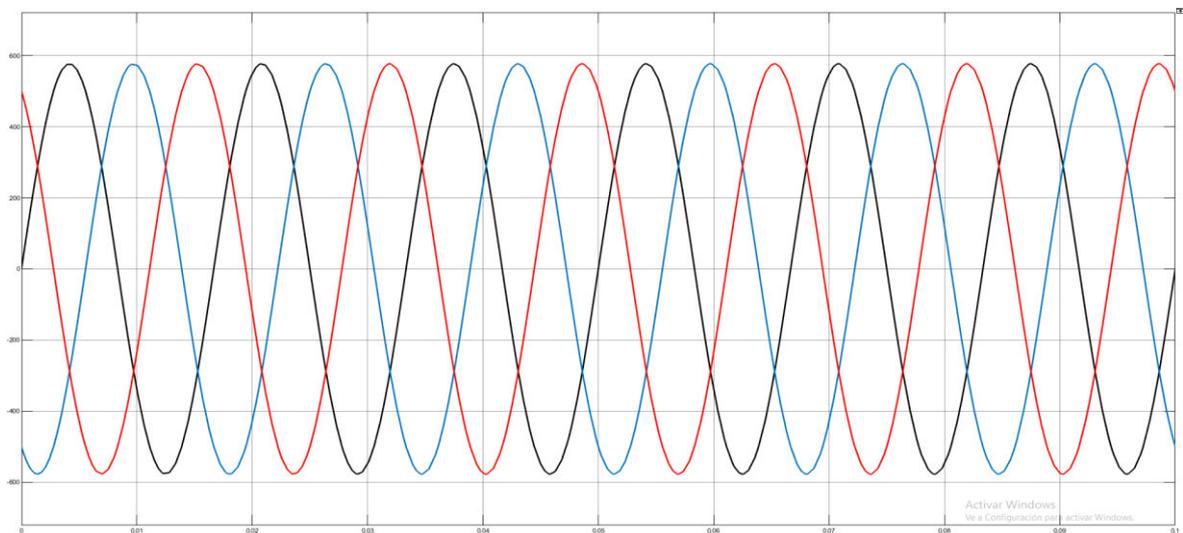


Figura 3.34. Forma de onda de voltaje en la fuente [ELABORACION PROPIA].

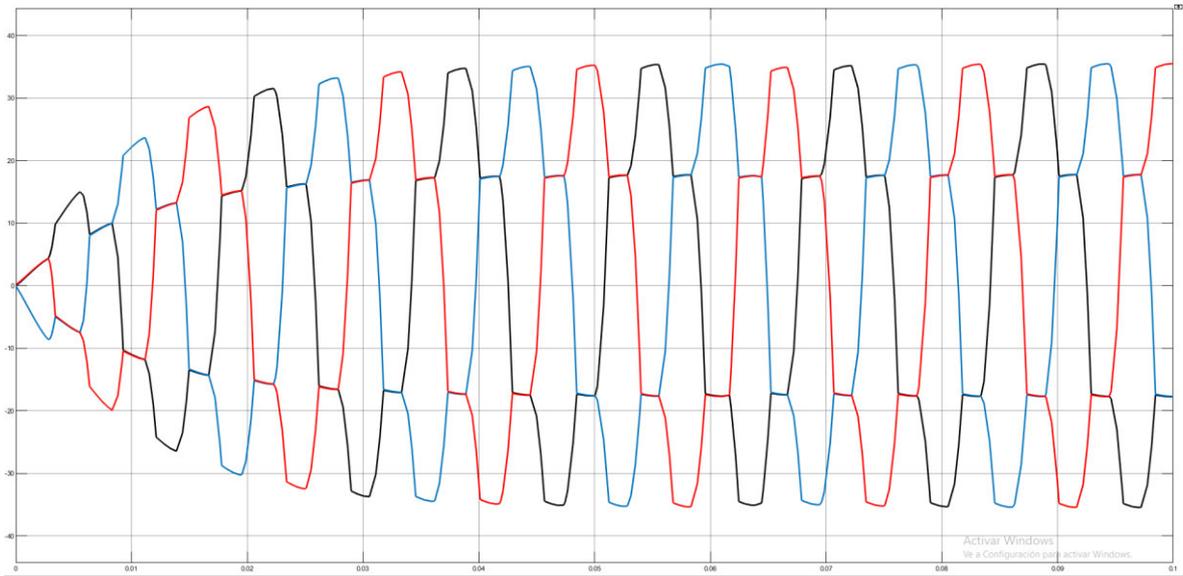


Figura 3.35. Forma de onda de corriente en la fuente [ELABORACION PROPIA].

A continuación, en la Figura 3.36, se muestra el respectivo espectro de armónicos. En donde se tiene un THD (%) de 20,47 y un porcentaje de tercera armónica en porcentaje con respecto a la fundamental de 0,2014%.

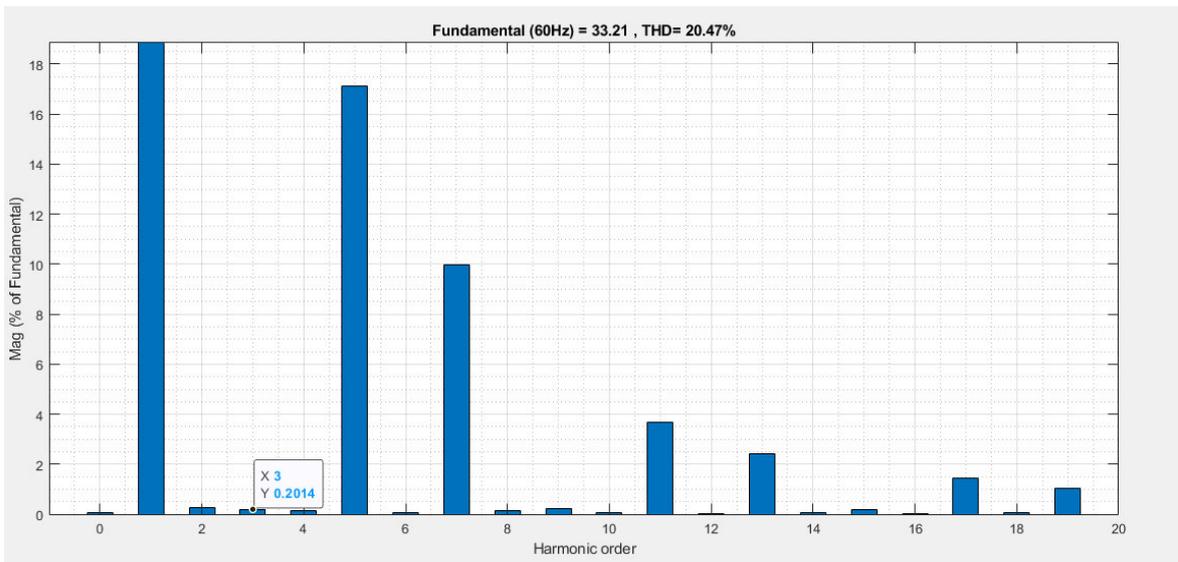


Figura 3.36. Espectro de armónicos inyectados a la red por carga no lineal [ELABORACION PROPIA].

Como cuarto sistema se tiene un circuito rectificador controlado con tiristores, sin hacer uso del transformador ZIGZAG. El circuito se observa en la Figura 3.37 y los parámetros

de la fuente de alimentación y carga no lineal en la Figura 3.38 y Figura 3.39, respectivamente.

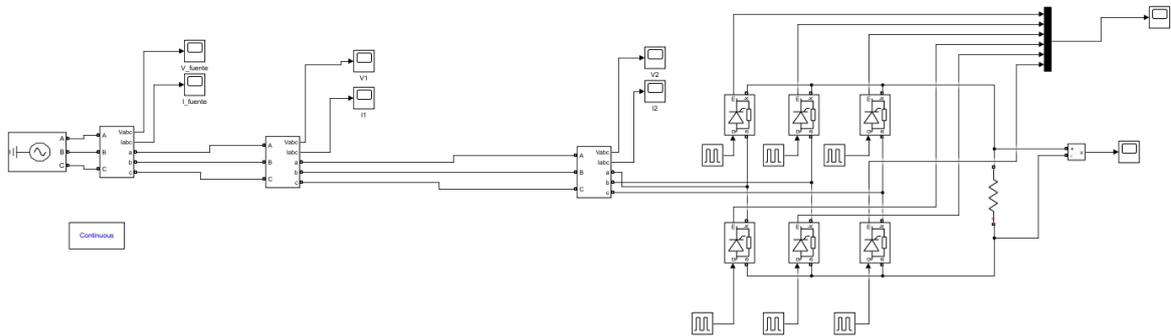


Figura 3.37. Simulación de sistema rectificador controlado con tiristores [ELABORACION PROPIA].

Parameters	
Load Flow	
Configuration:	Yg
Source	
<input type="checkbox"/> Specify internal voltages for each phase	
Phase-to-phase voltage (Vrms):	311
Phase angle of phase A (degrees):	0
Frequency (Hz):	60
Impedance	
<input type="checkbox"/> Internal <input type="checkbox"/> Specify short-circuit level parameters	
Source resistance (Ohms):	0.8929
Source inductance (H):	16.58e-3
Base voltage (Vrms ph-ph):	25e3

Figura 3.38. Parámetros de la fuente trifásica de alimentación [ELABORACION PROPIA].

Thyristor in parallel with a series RC snubber circuit.
 In on-state the Thyristor model has an internal resistance (Ron) and inductance (Lon).
 For most applications the internal inductance should be set to zero.
 In off-state the Thyristor as an infinite impedance.

Parameters

Resistance Ron (Ohms): 0.001

Inductance Lon (H): 0

Forward voltage Vf (V): 0.8

Initial current Ic (A): 0

Snubber resistance Rs (Ohms): 500

Snubber capacitance Cs (F): 250e-9

Show measurement port

Parameters

Branch type: R

Resistance (Ohms): 10

Measurements: None

Figura 3.39. Parámetros de la carga no lineal [ELABORACION PROPIA].

Para el cuarto caso de simulación, al observar la Figura 3.40 y Figura 3.41, se tiene un valor de corriente pico de aproximadamente 43 amperios y un valor de voltaje pico de 220 voltios.

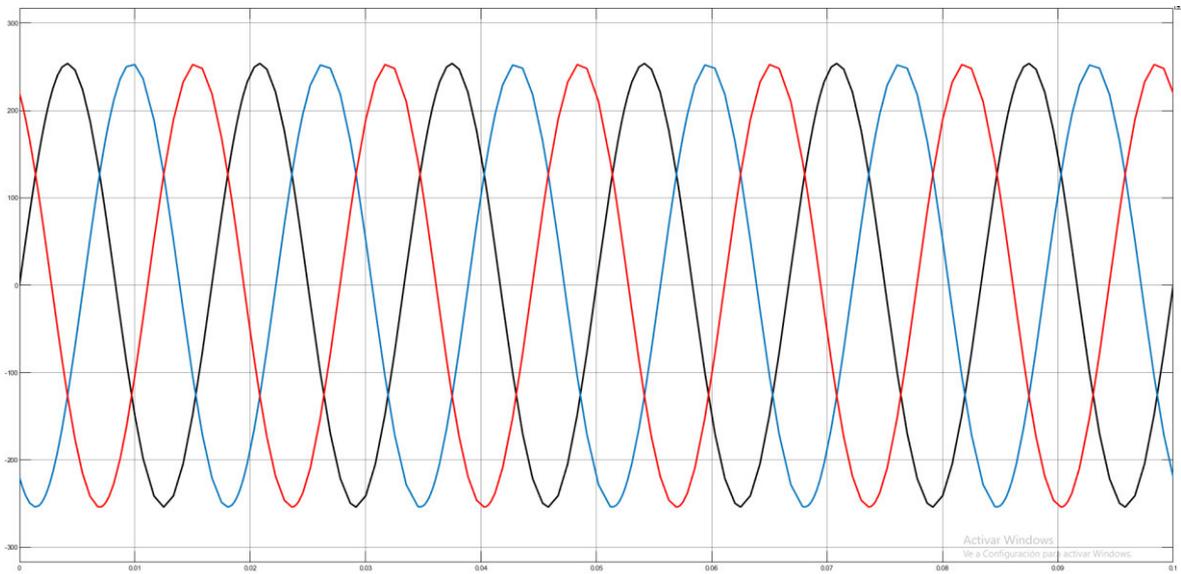


Figura 3.40. Forma de onda de voltaje en la fuente [ELABORACION PROPIA].

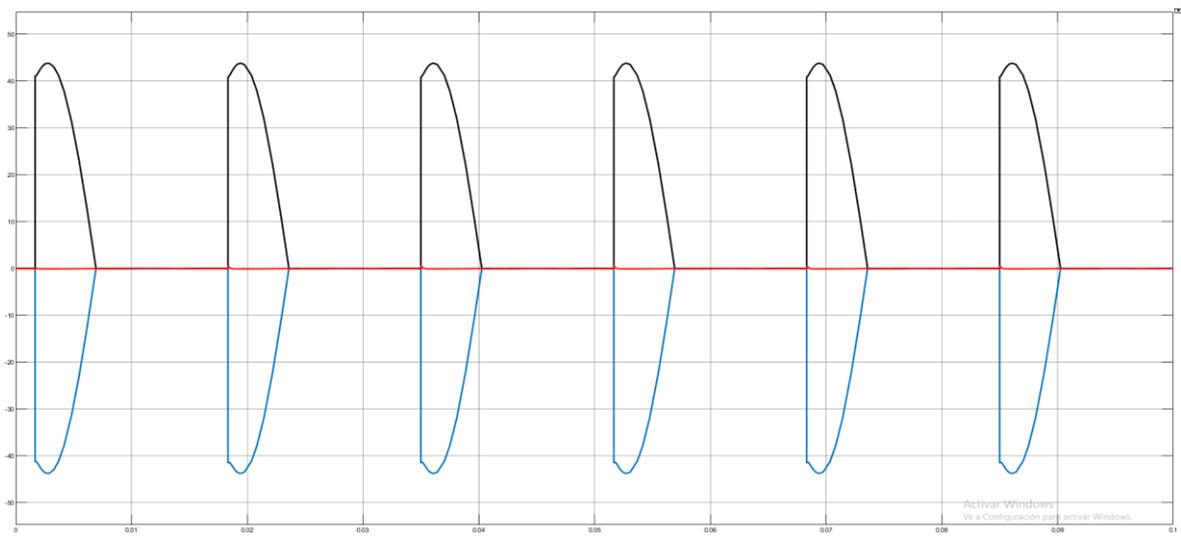


Figura 3.41. Forma de onda de corriente en la fuente [ELABORACION PROPIA].

La forma de onda de la corriente presenta distorsión en comparación a la onda de voltaje, esto se debe por la presencia de armónicos inyectados por la carga no lineal, a continuación, en la Figura 3.42, se muestra el respectivo espectro de armónicos. En donde

se tiene un THD (%) de 82,12 y un porcentaje de tercera armónica en porcentaje con respecto a la fundamental de 30,19%.

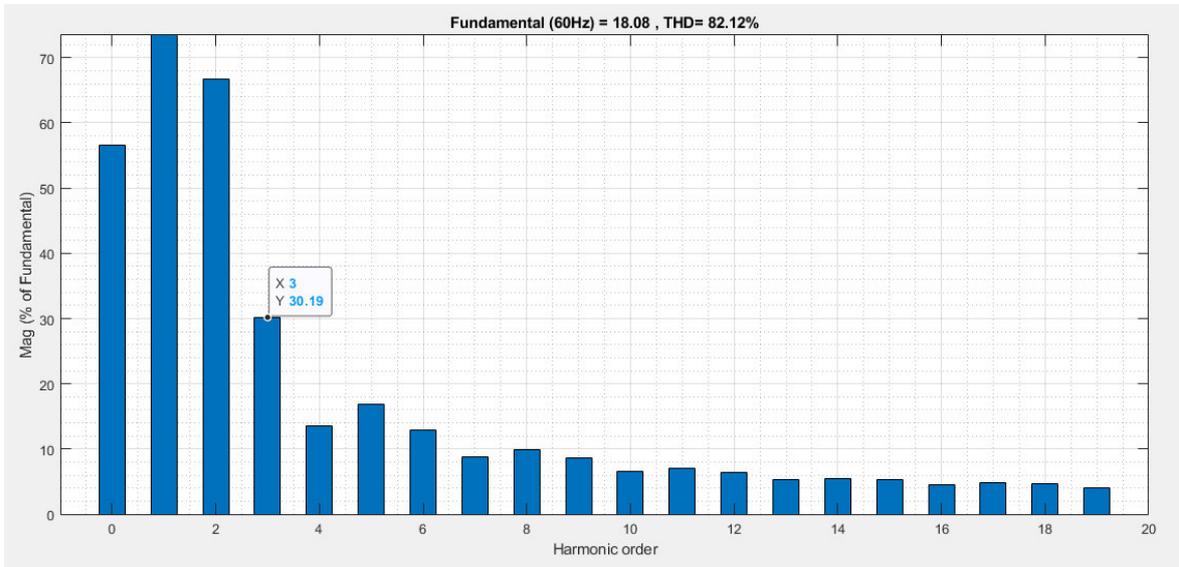


Figura 3.42. Espectro de armónicos inyectados a la red por carga no lineal [ELABORACION PROPIA].

Ahora el mismo sistema anterior, haciendo uso del transformador ZIGZAG.

Para el cálculo de la potencia aparente del transformador se multiplica el voltaje por la corriente, obteniendo así la potencia que para este caso es de 9460 VA, normalizando cada transformador se lo aproxima a 10 kVA. Dicho sistema se observa en la Figura 3.43 y los parámetros de los transformadores en la Figura 3.44.

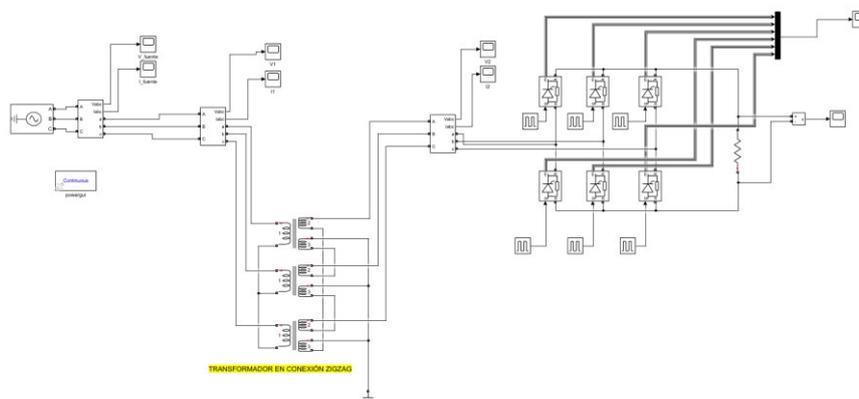


Figura 3.43. Simulación de sistema eléctrico con transformador ZIG-ZAG [ELABORACION PROPIA].

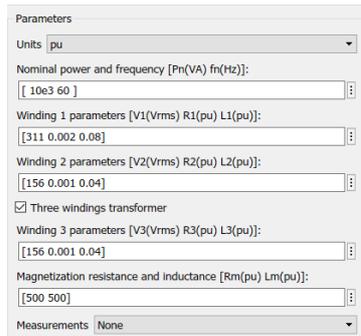


Figura 3.44. Parámetros de los transformadores [ELABORACION PROPIA].

Para el cuarto caso de simulación haciendo uso del transformador en conexión ZIG-ZAG, la forma de onda de la corriente presenta una menor distorsión en comparación a la onda de voltaje, tiende a ser un poco más sinusoidal, esto se debe por la presencia del transformador, esto se observa en la Figura 3.45 y Figura 3.46.

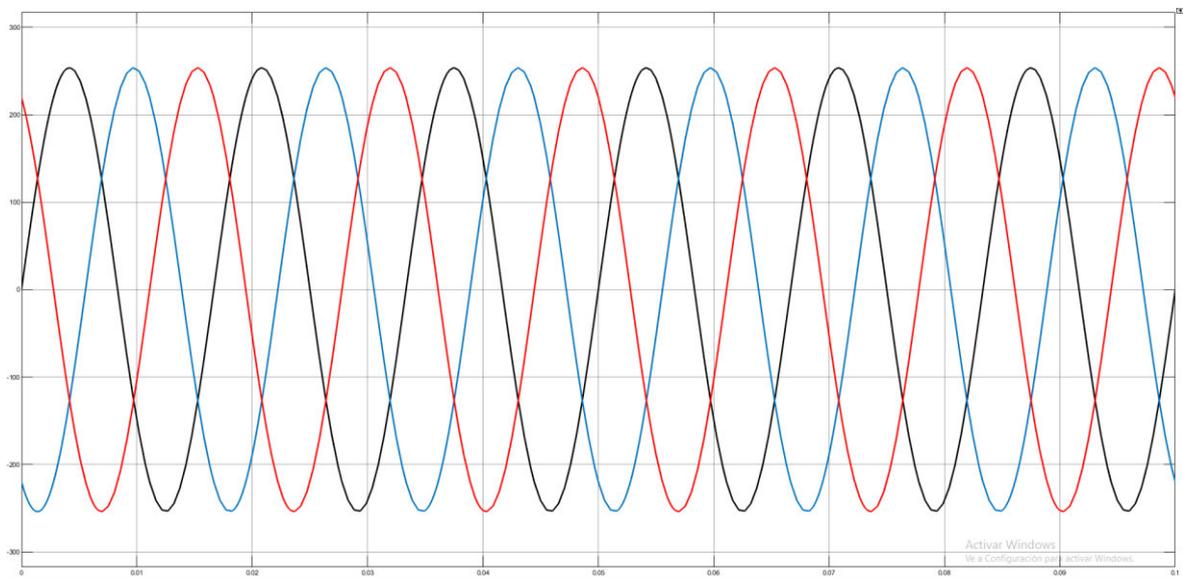


Figura 3.45. Forma de onda de voltaje en la fuente [ELABORACION PROPIA].

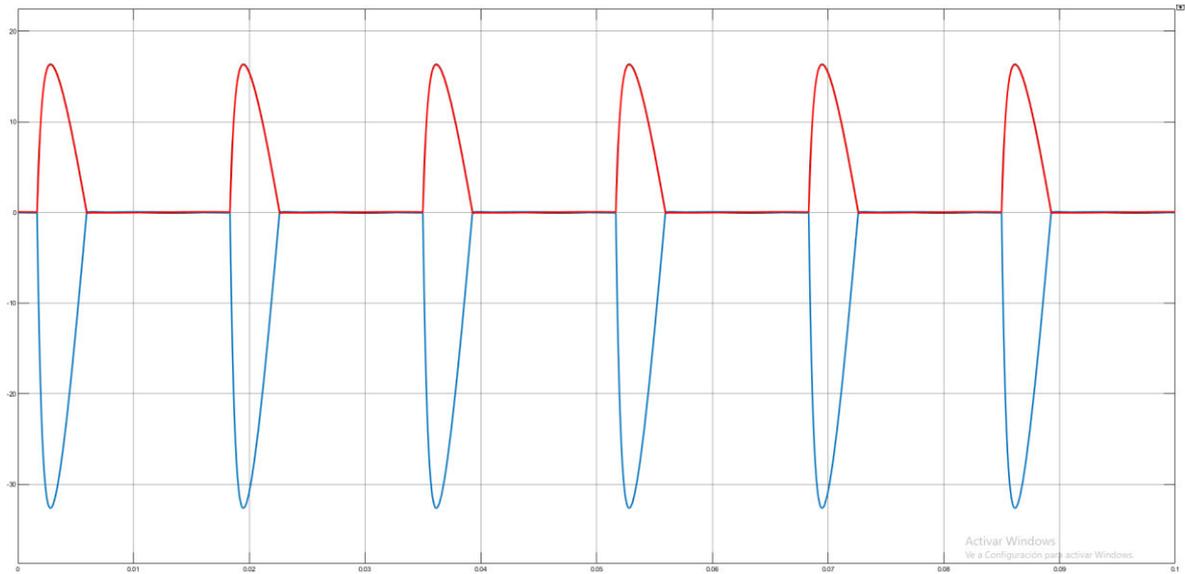


Figura 3.46. Forma de onda de corriente en la fuente [ELABORACION PROPIA].

A continuación, en la Figura 3.47, se muestra el respectivo espectro de armónicos. En donde se tiene un THD (%) de 52,04 y un porcentaje de tercera armónica en porcentaje con respecto a la fundamental de 9,083.

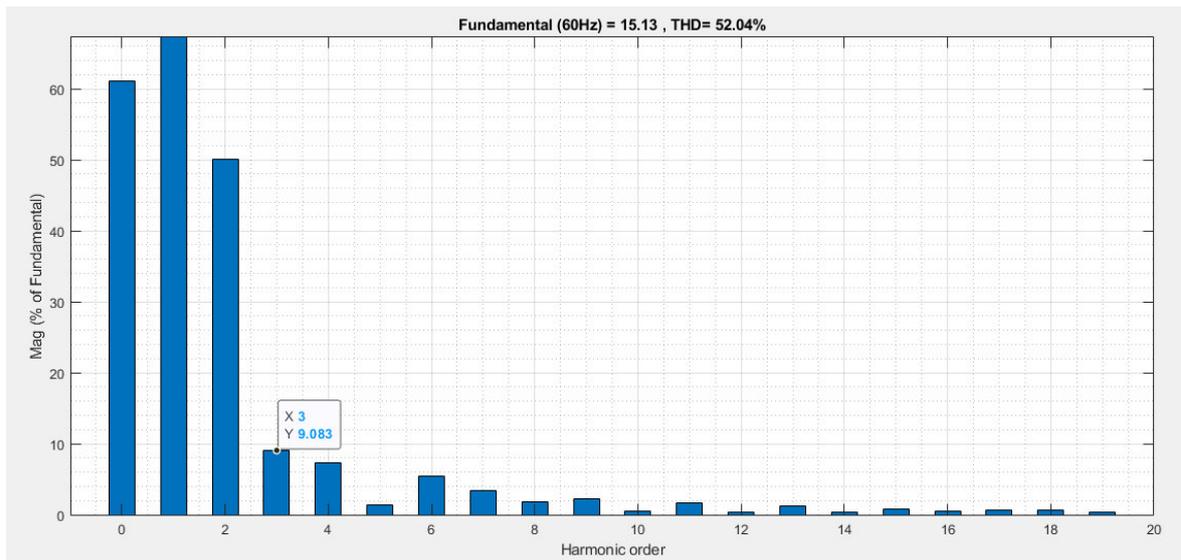


Figura 3.47. Espectro de armónicos inyectados a la red por carga no lineal [ELABORACION PROPIA].

3.4 DISEÑO DE CARGA NO LINEAL

Para el diseño de la carga, se apegará al método experimental; por medio del cual se procederá a realizar una serie de arreglos con distintos tipos de cargas, las cuales luego de varias pruebas se escoja la que sea mayor fuente de armónicos triples, será un diseño basado en experimentos prácticos.

Se realizaron pruebas a distintos tipos de luminarias LED, debido a que estudios presentados en investigaciones afirman que este tipo de luminarias poseen contaminación por terceras armónicas, estos datos pueden ser apreciados de mejor manera en [18].

Las lámparas LED presentan una gran gama de colores, que permiten posicionarse como una opción muy llamativa pues se crean distintos efectos y son dimerizables, que es una propiedad bastante interesante al momento de regular la intensidad de corriente de acuerdo con el uso y ayuda al ahorro de energía [18].

Por tal razón y por investigaciones realizadas se conoce que las lámparas LED poseen un menor impacto ambiental con respecto a las LFC, claro está, que, si bien la tecnología LED conlleva unas buenas características ambientales, al igual que la tecnología LFC tienen un alto contenido armónico principalmente en el análisis de armónicos de corriente [18].

Dentro de los estudios realizados en 2014, en Argentina, se tienen los siguientes resultados para las lámparas LFC, se puede observar la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Principales características de algunas lámparas LFC [18].

LFC	Id	I (mA)	THDI %	P (W)	FP
11W Espiral	S1	61	91	9,5	0,71
11W 3U	S3	76	86	11,8	0,72
18W 3U	S5	116	86	18,2	0,72
18W Espiral	S7	117	92	17,6	0,70
11W Gota	A7	68	102	9,9	0,67
15W Espiral mini	A11	90	103	12,8	0,65
18W Mini 4U	A14	103	100	15,2	0,67
20W Standard 3U	A22	131	101	19,4	0,67
20W Mini 4U	A26	142	103	20,2	0,65
20W Espiral	A28	127	91	19,4	0,70
24W Globo	A30	125	130	16,3	0,59

26W Standard 3U	A34	160	100	23,7	0,67
36W Standard 4U	A36	233	111	32,2	0,63
22W 3U	J1	55	61	9,0	0,75
20W 3U	E1	71	88	10,8	0,70
13W 2U	AL1	78	86	12,0	0,70
13W 2U b	AL2	53	87	8,1	0,70
20W 3U	GE7	96	125	12,8	0,61

Para el caso de lámparas con tecnología LED, se tiene la siguiente tabla:

Lámparas LED	Id	I (mA)	THDI %	P (W)	FP
12W 6 LED	A1	80	141	9,3	0,54
8W 6 LED	A11	60	125	7,7	0,60
7W 16 LED	A13	55	135	6,4	0,53
4W 4 LED	A16	43	168	4,7	0,53
10W 8 LED	A21	43	52	6,5	0,71
12W 1 LED	A23	97	152	10,7	0,51
15W 12 LED	A25	67	9	13,5	0,92
9W 3 LED	G1	57	140	6,8	0,54
6W 3 LED	W1	51	137	6,5	0,59
1,7W 32 LED	J1	18	39	1,3	-
1,5W 15 LED	J5	21	27	0,9	-
1,7W 32 LED	J7	42	26	2,2	-
1,3W 20 LED	J8	21	31	1,2	-

Para el caso de lámparas con tecnología LED, se tiene la Tabla 3.2:

Tabla 3.2. Principales características de electrodomésticos [18].

ELECTRODOMESTICO	Id	I (mA)	THDI %	P (W)	FP
TV CRT 21"	2	0,378	150,5	46,2	0,55
TV CRT 14"	4	0,315	87,5	53,0	0,71
TV LCD 32"	5	0,500	11,3	107,0	0,88
DECO TV DIG	7	0,065	140,2	8,1	0,57

EQUIPO AUDIO 2 CANALES	8	0,113	41,0	19,7	0,80
LAVADORA	9	1,470	4,0	300,0	0,91
MICROONDAS	10	4,950	35,6	980,0	0,92
REFRIGERADORA C/FREEZER	11	1,720	13,3	160,0	0,42
REFRIGERADORA S/FREEZER	13	1,001	7,00	125,2	0,57
FREEZER	15	0,900	10,0	90,0	0,45
MONITOR LCD 19"	17	0,259	121,6	35,7	0,63
CPU ENCENDIDA	18	0,347	112,2	50,7	0,66
CPU GRBANDO DATOS	18,1	0,578	127,6	76,6	0,62
MODEM INTERNET	19	0,080	31,2	10,9	0,62
ROUTER WIFI	20	0,053	60,0	9,4	0,79

Al observar este estudio, las lámparas LFC y lámparas LED en general poseen una alta distorsión armónica en la corriente que inyectan a la red, en ciertos casos hay valores que superan el 100% de THD.

Para el caso de los electrodomésticos la gran mayoría de ellos presenta generación de armónicos, claramente esto se deriva por la electrónica de potencia que se encuentran en ellos.

Se presentan algunos espectros de armónicos obtenidos de [18], que se observan en la Figura 3.48, Figura 3.49, Figura 3.50, Figura 3.51, Figura 3.52 y Figura 3.53.

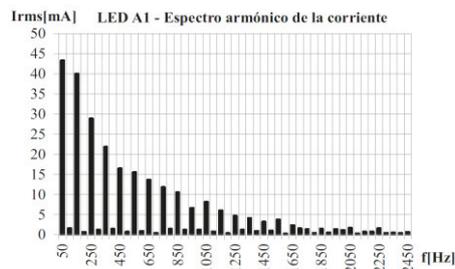


Figura 3.48. Espectro de armónicos de la corriente de una lámpara LED [18].

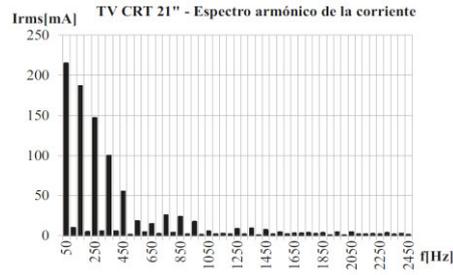


Figura 3.49. Espectro de armónicos de la corriente de una TV CRT 21" [18].



Figura 3.50. Espectro de armónicos de la corriente de una lámpara LFC [18].

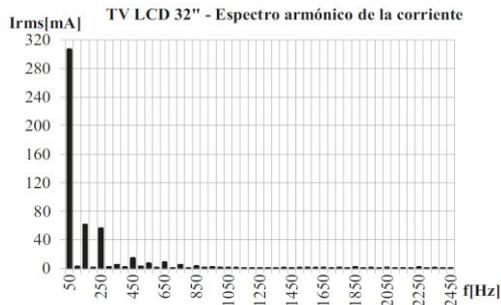


Figura 3.51. Espectro de armónicos de la corriente de un TV LCD 32" [18].

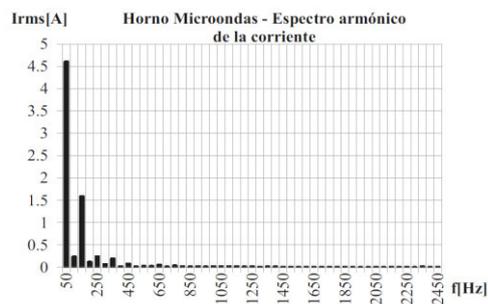


Figura 3.52. Espectro de armónicos de la corriente de un microondas [18].

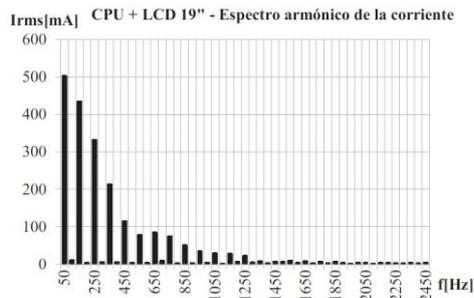


Figura 3.53. Espectro de armónicos de corriente de una computadora (CPU+LCD 19”) [18].

Por esta razón se escogió como parte de la carga no lineal este tipo de luminarias por el gran contenido armónico que inyectan, de igual manera este tipo de cargas son muy comunes en la zonas residenciales e industriales del mundo, un estudio en el país de Argentina muestra el siguiente resultado [18][19][20].

Dicho resultado se observa en la Figura 3.54 y Figura 3.55.

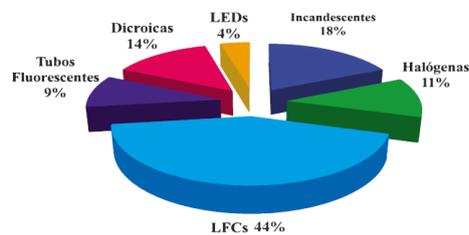


Figura 3.54. Distribución de lámparas en instalaciones residenciales [18][19][20].

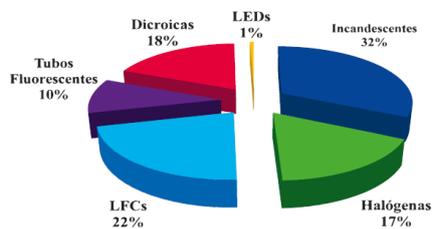


Figura 3.55. Distribución de potencias en instalaciones residenciales [18][19][20].

Para este proyecto de tesis se escogieron luminarias LED de dos tipos, la primera SPLENDOR LED TIPO REGLETA DE 9W y la segunda una SYLVANIA TOLEDO PREMIUM TIPO BOMBILLA DE 9W, pero por temas del tipo de analizador que se utilizó y las pinzas de corriente que censan solamente altas corrientes no se pudo apreciar el espectro de terceras armónicas que presentan las luminarias SYLVANIA TOLEDO, por dicha razón no se presentan gráficas del espectro de armónicos de estas.

Por otro lado, en el caso del variador de velocidad y el motor trifásico, se trabajó con un VARIADOR SIEMENS SINAMICS V20 y un motor WEG W22 HIGH EFF.

Dichas cargas se observan en la Figura 3.56, Figura 3.57, Figura 3.58 y Figura 3.59, respectivamente.



Figura 3.56. Luminarias LED SPLENDOR Tipo Regleta 9W [ELABORACION PROPIA].



Figura 3.57. Luminarias SYLVANIA TOLEDO Tipo Bombilla 9W [ELABORACION PROPIA].



Figura 3.58. Variador de velocidad SIEMENS SINAMICS V20 [ELABORACION PROPIA].

trifásico del taller, donde se puede apreciar las 3 fases, para el neutro se realizó una conexión directa hacia tablero de distribución principal del taller.



Figura 3.61. Enchufe trifásico [ELABORACION PROPIA].

Para realizar el experimento se solicitó un área de trabajo totalmente independiente al resto del taller, de esta manera se tiene una acometida propia sin afecciones de otros instrumentos.

En la Figura 3.62, se aprecia el sistema anteriormente mencionado.



Figura 3.62. Acometida trifásica de 220V con neutro [ELABORACION PROPIA].

Como se muestra en la Figura 3.63, se tiene un sistema trifásico con neutro, balanceado, posterior a esto se tomaron medidas de voltajes fase neutro para verificación de estas. Medidas que se aprecian en la Figura 3.64.

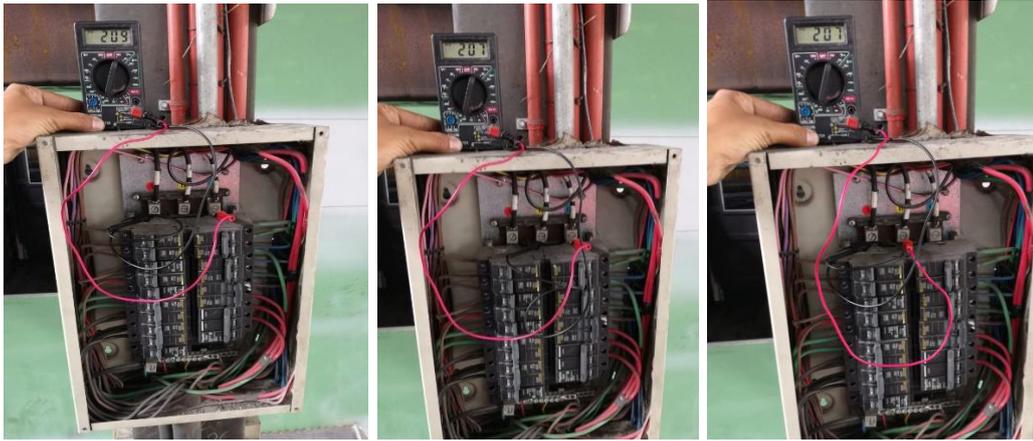


Figura 3.63. Amplitud de voltaje fase-fase [ELABORACION PROPIA].

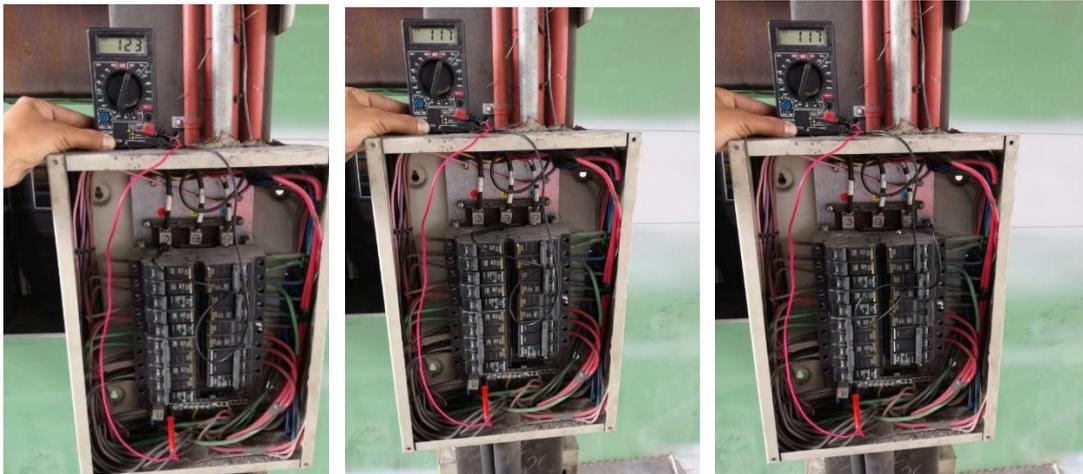


Figura 3.64. Amplitud de voltaje fase A-neutro [ELABORACION PROPIA].

Una vez verificadas las acometidas se procede a realizar el conexionado de las cargas no lineales en conjunto con el analizador de red.

Se arma un conector trifásico para una mejor manipulación de la acometida del taller, como se muestra en la Figura 3.65.



Figura 3.65. Conector trifásico [ELABORACION PROPIA].

Posterior se desarma el motor para realizar el conexionado interno del mismo, teniendo en cuenta el manual de este. Como se observa en la Figura 3.66.



Figura 3.66. Conexión interno de los bobinados del motor [ELABORACION PROPIA].

Una vez realizadas todas las conexiones respectivas y teniendo en cuenta que todo se encuentre correctamente ajustado, se procede a poner en marcha el sistema como se muestra en la Figura 3.67 y Figura 3.68, respectivamente.



Figura 3.67. Puesta en marcha del sistema con la carga no lineal trifásica [ELABORACION PROPIA].



Figura 3.68. Armado final de la carga no lineal de la maqueta [ELABORACION PROPIA].

Finalmente, la carga no lineal queda conformada por tres luminarias LED SPLENDOR TIPO REGLETA DE 9W, conectadas en paralelo, y de un variador de velocidad Siemens V20 con un motor trifásico. Al tener un sistema trifásico para este caso una de las fases será compartida para la conexión de uno de los terminales de las lámparas y una entrada del variador, y las dos fases restantes se conectan a la fase restante de las lámparas y del variador respectivamente. Tal y como se puede observar en el siguiente diagrama:

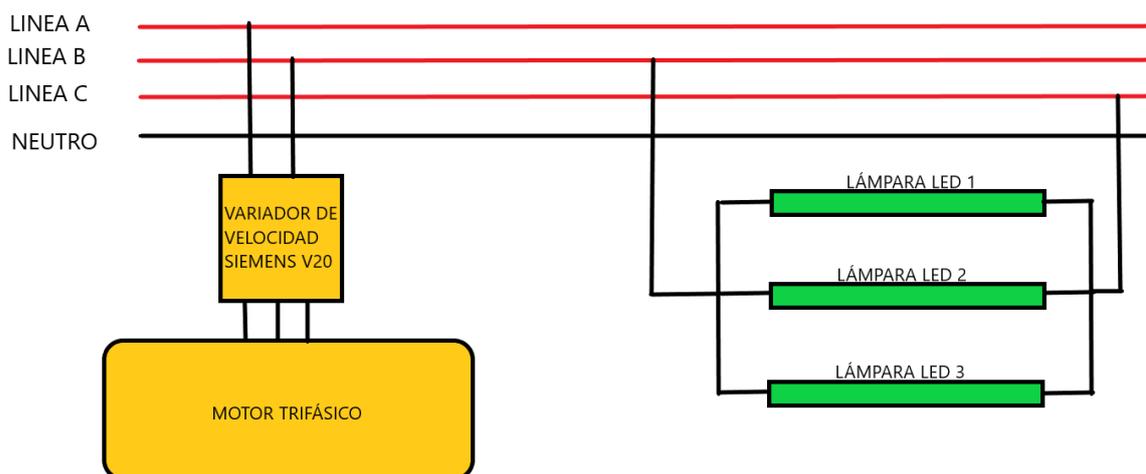


Diagrama 3.1. Conexión final de carga no lineal [ELABORACION PROPIA].

Los mismos se dejan operando durante largos periodos de tiempo, de donde se pueden obtener los siguientes datos presentados en la Tabla 3.3

Tabla 3.3. Mediciones de corriente para intervalos de 10 Hz y 3 lámparas LED tipo regleta [ELABORACION PROPIA].

Frecuencia [Hz]	Promedio de corriente de fase [A]
10	0,94
20	1,02
30	1,13
40	1,25
50	1,35
60	1,46

Para los siguientes días se toman datos con un intervalo de 5 Hz, donde se obtiene los datos presentados en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Mediciones de corriente para intervalos de 5 Hz y 3 lámparas LED tipo regleta [ELABORACION PROPIA].

Frecuencia [Hz]	Promedio de corriente de fase [A]
5	0,92
10	0,96
15	1,05
20	1,10
25	1,24
30	1,33
35	1,41
40	1,45
45	1,54
50	1,65
55	1,72
60	1,83

Dichas mediciones pueden ser observadas en el ANEXO III.

De igual manera luego de realizar varias pruebas y tomar datos se procedió a escoger un escenario para el diseño del transformador y así lograr la mitigación de armónicos, en el cual el variador de velocidad trabaja a una frecuencia de 5Hz, en conjunto con 3 lámparas

LED tipo regleta para las demás fases, con esta temática se presenta la Tabla 3.5 del espectro de armónicos.

Tabla 3.5. Mediciones de corriente para frecuencia de 5 Hz y 3 lámparas LED tipo regleta [ELABORACION PROPIA].

Orden del armónico	Porcentaje de armónico	Valor del armónico [A]
1	100%	0,46
3	40%	$0,46 \cdot 0,4 = 0,184$
5	50%	$0,46 \cdot 0,5 = 0,23$
7	90%	$0,46 \cdot 0,9 = 0,414$
9	75%	$0,46 \cdot 0,75 = 0,345$
11	25%	$0,46 \cdot 0,25 = 0,115$
13	35%	$0,46 \cdot 0,35 = 0,161$
15	50%	$0,46 \cdot 0,50 = 0,23$
17	50%	$0,46 \cdot 0,50 = 0,23$
19	35%	$0,46 \cdot 0,35 = 0,161$
21	25%	$0,46 \cdot 0,25 = 0,115$
23	20%	$0,46 \cdot 0,20 = 0,092$

Dichos valores de porcentajes presentados en la Tabla 3.5 pueden ser observados en el Capítulo 4, en donde se presentan los espectros de armónicos del analizador.

3.5 DISEÑO DEL TRANSFORMADOR ZIG-ZAG

El diseño del transformador se lo hace para una corriente homopolar, esta es la corriente RMS generada por la carga total tomando en cuenta solo la componente fundamental y las terceras armónicas para este caso de investigación.

Una vez obtenido el análisis de armónicos, se procederá a escoger el valor de la corriente fundamental en conjunto con el valor de las terceras armónicas, con ello se podrá determinar la corriente RMS de diseño de nuestro caso, esta es considerada la corriente homopolar a la cual añadiremos un factor del +20%.

3.5.1 POTENCIA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR

Para determinar la potencia del transformador que mitigará las corrientes armónicas se requieren ciertos datos básicos que vienen del analizador de red, con lo cual se obtiene la corriente con la que se encontrará la potencia equivalente del transformador ZIGZAG.

Se debe considerar que este transformador está diseñado para mitigar los armónicos triples de la carga diseñada.

Una vez obtenida la potencia aparente de nuestro transformador se realizará el procedimiento cotidiano para el diseño y construcción de un transformador.

De forma general del analizador de red se obtiene el espectro armónico de la corriente de carga, que se nota por la Tabla 3.6:

Tabla 3.6. Tabla de medidas generales del analizar de armónicos [ELABORACION PROPIA].

Armónico (h)	Corriente armónica (A)
1	I_1
3	I_3
5	I_5
7	I_7
9	I_9
11	I_{11}
13	I_{13}
15	I_{15}
19	I_{19}

Usando los valores de la corriente armónica del cuadro anterior se determina la potencia del transformador para la carga analizada y especificada.

Posterior a esto se debe determinar la corriente nominal del transformador, para ello se determina el valor eficaz RMS de la corriente de carga armónica con la siguiente ecuación:

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{hmax} (I_h)^2}$$

Una vez obtenida la corriente se puede llegar a determinar la potencia nominal del transformador con la siguiente expresión:

$$S_{nombanco} = 3 * V * I$$
$$S_{nombanco} = 3 * V * \sqrt{\sum_{h=1}^{hmax} (I_h)^2}$$

Con este valor se puede, posteriormente, llegar a calcular la potencia equivalente del transformador.

Para nuestro caso y como se mencionó anteriormente solo tomaremos el valor de la tercera armónica en conjunto con la fundamental para el diseño del mismo.

3.5.2 DISEÑO Y CALCULOS DEL TRANSFORMADOR

Para este proyecto de titulación se implementará un banco de transformadores para así simular de cierta manera un transformador trifásico tipo núcleo debido a que no se cuenta con material para realizar un transformador trifásico, por lo que una vez obtenida la potencia equivalente del transformador a partir de la corriente homopolar que entrega el analizador de red en conjunto con el voltaje de alimentación de la carga, se procede a diseñar de acuerdo con los pasos cotidianos.

Para el diseño se siguen ciertos pasos generales tomados del “Diseño de Transformador Tipo Acorazado de la empresa MAGNUM TyC”, que puede encontrarse en [21]; es necesario dos datos importantes, el voltaje de salida (V_{out}) y la corriente de carga (I_{out}), con estos datos se obtiene la potencia nominal (P) por fase, con la siguiente expresión:

$$P = V_{out} * I_{out}$$

Posterior a este se encuentra la sección del núcleo (S), la misma que se encuentra formada por los elementos metálicos del transformador, b y h , como se muestra en la Figura 3.69:

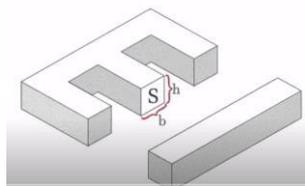


Fig 3.69. Sección de las chapas del transformador.

Para obtener este dato de la sección se procede a usar la siguiente expresión:

$$S = 0,903 * \sqrt{P}$$

Donde 0,903 es la constante de la frecuencia del voltaje de entrada, y P la potencia nominal.

El voltaje de entrada V_{in} es de 220 V, a 60 Hz, la constante para esa frecuencia es de 0,903.

Una vez obtenida la sección, pasamos a calcular el tamaño de la placa o chapa (N° de chapa), estos son los elementos metálicos, es decir, las E y las I que luego se van uniendo para formar el núcleo del transformador, tal y como se muestra en la Figura 3.70.



Fig 3.70. Chapas en formas de E I del tranformador.

Para obtener el N° de chapa se utiliza la siguiente expresión:

$$N^{\circ} \text{ de chapa} = \sqrt{S}$$

Una vez obtenido el resultado, se procede a buscarlo en la Tabla 3.7:

Tabla 3.7. Estándar de mediciones de chapas [ELABORACION PROPIA].

Número de chapa	Medición [cm]
½"	1,28
¾"	1,90
1"	2,54
1¼"	3,17
1½"	3,80
1¾"	4,45
2"	5,09
2½"	6,35

Seleccionado el más cercano al valor obtenido, con lo cual obtenemos "b" que es el tamaño de la lámina.

Una vez calculado el núcleo del transformador, se calcula el número de espiras de la bobina o número de vueltas (Neb) con la siguiente expresión:

$$Neb = \frac{Vin * 37,53}{S}$$

Ahora bien, como se menciona en los primeros capítulos, una de las particularidades del transformador ZIG-ZAG es que presenta 3 bobinados principales iguales, los mismos que se encuentran divididos en dos partes iguales cada uno de ellos obteniendo así las 6 ramas de bobinados, por tal razón al calcular el número de espiras para un brazo, se obtiene el resultado de los demás bobinados.

Como siguiente pasó se procede a calcular la corriente máxima, con la fórmula:

$$Imax = \frac{P}{Vp}$$

En nuestro caso dicha corriente ya es calculada con el espectro de armónicos, y con la misma se obtiene la sección del cable (Scu) a usar, por medio de la siguiente expresión:

$$Scu = \frac{Imax}{J}$$

Donde J es la densidad de la corriente, que se obtiene de la Tabla 3.8:

Tabla 3.8. Estándar de la densidad de corriente en función de la potencia.

P	J	P	J
0,8-1	1,6	40-50	5,5
1-3	1,8	50-60	6,0
3-5	2,0	60-100	6,2
5-8	2,5	100-200	6,4
8-10	3,0	200-300	6,6
10-15	3,5	300-400	6,8
15-20	4,0	400-600	7,0
20-30	4,5	600-800	7,2
30-40	5,0	800-1000	7,4

Se selecciona de acuerdo con la potencia del transformador que estamos calculando, el resultado de esto se debe analizar nuevamente en la Tabla 3.9 que se muestra a continuación, en donde finalmente se escogerá el cable requerido.

Tabla 3.9. Estándar del número de galga del cable requerido.

Número de galga	Diámetro en mm	Sección en mm ²	Peso g/m	Resistencia por km [Ω]
35	0,143	0,0160	0,142	1079,44
34	0,160	0,0201	0,180	856,010
33	0,180	0,0254	0,226	678,830
32	0,202	0,0320	0,285	538,410
31	0,227	0,0404	0,359	426,850
30	0,255	0,0509	0,453	339,590
29	0,286	0,0642	0,571	268,510
28	0,321	0,0810	0,720	212,930
27	0,361	0,1020	0,908	168,870
26	0,405	0,1290	1,145	133,890
25	0,455	0,1620	1,443	106,200
24	0,511	0,2050	1,820	84,2200
23	0,573	0,2580	2,295	66.8000
22	0,644	0,3260	2,894	52,9500
21	0,723	0,4110	3,649	41,9970
20	0,812	0,5180	4,602	33.3020

El resultado obtenido en los cálculos se debe comparar con el de la tabla y escoger el más cercano.

Ahora bien, para esta tesis en particular se tienen los siguientes datos para el diseño del transformador.

$$V_{out}=220 \text{ V}$$

Al sacar la corriente RMS de la Tabla 8, se obtiene un valor de 0,8839, teniendo en cuenta que se está considerando todo el espectro de armónicos, para nuestro caso en especial solo se incluirá el valor de las terceras armónicas en donde en tal escenario el valor de corriente RMS es de 0,66.

$$I_{RMS}=0,66 \text{ A}$$

$$I_{pico}=0,93 \text{ A}$$

Añadiendo el factor de seguridad antes mencionado del 20% se tiene una corriente de diseño de 1,11 A, que serán aproximados a 1 A, como se muestra a continuación

$$I_{out}=1 \text{ A}$$

Con estos datos se calcula la potencia nominal del transformador,

$$P = V_{out} * I_{out}$$

$$P = 220 [V] * 1[A]$$

$$P = 220 [W]$$

Como siguiente paso calculamos la sección del núcleo.

$$S = 0,903 * \sqrt{P}$$

$$S = 0,903 * \sqrt{220}$$

$$S = 13,3937 \text{ cm}^2$$

Con este valor calculamos el número de chapa.

$$N^{\circ} \text{ de chapa} = \sqrt{S}$$

$$N^{\circ} \text{ de chapa} = \sqrt{13,3937}$$

$$N^{\circ} \text{ de chapa} = 3,65 \text{ cm}$$

De acuerdo con la Tabla 10. este resultado de número de chapa se lo estandariza a 3,80 cm que corresponde a una chapa de $1\frac{1}{2}$ " .

Este valor de 3,80 cm corresponde al largo de la chapa, que según la nomenclatura propuesta es b, y así poder elegir un carrete adecuado para las chapas.

Posterior a esto calculamos el número de vueltas por brazo, con la expresión mencionada con anterioridad.

$$N_{eb} = \frac{V_{out} * 37,53}{S}$$

$$N_{eb} = \frac{220 * 37,53}{13,3937}$$

$$N_{eb} = 616 \text{ vueltas}$$

Ahora seleccionamos el número de calibre a utilizar en el bobinado, teniendo en cuenta que la corriente máxima es de 1 amperio.

$$Scu = \frac{I_{max}}{J}$$

Según la Tabla 11 para una potencia de 220W, se tiene una densidad de corriente (J) de 6,6.

$$Scu = \frac{1}{6,6}$$

$$Scu = 0,1515 \text{ mm}^2$$

Con este valor, se procede a observar la Tabla 12, en donde se recomienda escoger un cable de calibre número 25, pero por temas de falta de materiales eléctricos se usa un alambre de cobre de con número de galga 22.

3.6 CONSTRUCCION DEL TRANSFORMADOR

Con el número de espiras calculadas anteriormente que deben ir por bobinado se procede al armado de los transformadores monofásicos, como se muestran en las siguientes figuras.

En la Figura 3.71 se puede apreciar el carrete usado para los transformadores, en el mismo se envuelve el alambre de cobre de acuerdo con las vueltas calculadas, este tipo de carrete suele ser estándar, aunque en raros casos se pueden conseguir de diferentes medidas.



Figura 3.71. Carrete de bobinado y chapas [ELABORACION PROPIA].

En la Figura 3.72 se presenta la cinta aislante para los bobinados, generalmente se recomienda que cada 3 capas de hilo de cobre bobinado se utilice un recubrimiento de

cinta aislante, en este caso se usó esta cinta al momento de culminar el número de vueltas por cada bobina que para este trabajo de titulación son 6 bobinas, 2 por cada carrete



Figura 3.72. Papel de cinta aislante [ELABORACION PROPIA].

En la Figura 3.73 observamos el carrete de cable de cobre de galga 22, con el cual se procede a bobinarlo en el carrete respectivo.



Figura 3.73. Carrete de cable de cobre [ELABORACION PROPIA].

Para el inicio del bobinado se procedió con el bobinado en sentido antihorario, hasta completar el total de vueltas anteriormente calculadas y mencionadas, que son 308 por bobina. Como se observa en la Figura 3.74.



Figura 3.74. Bobinado del hilo de cobre en el carrete (Sentido Antihorario)
[ELABORACION PROPIA].

Posterior a bobinar las 308 vueltas se recubre el bobinado con cinta aislante completamente.

Dicho recubrimiento se observa en la Figura 3.75.



Figura 3.75. Colocación de la cinta aislante [ELABORACION PROPIA].

Como siguiente paso se empieza el segundo bobinado en sentido contrario al primero, en este caso horario, hasta completar las 308 vueltas restantes. De igual manera al finalizar las vueltas se recubre con cinta aislante. Tal y como se presenta en la Figura 3.76.

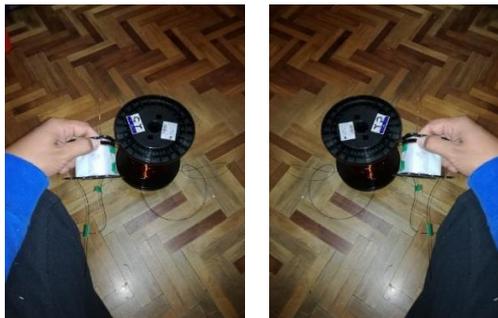


Figura 3.76. Bobinado del hilo de cobre en el carrete (Sentido Horario) [ELABORACION PROPIA].

En la Figura 3.77 se observa la colocación de las chapas en forma de E, las mismas se introducen de forma alternada, una por cada lado para ir formando así la sección del entrehierro.



Figura 3.77. Colocación de las chapas en forma de E [ELABORACION PROPIA].

Una vez colocadas todas las chapas en forma de E, se procede a colocar las chapas en forma de I, en los orificios respectivos dejados por las chapas E, esto ayuda a tener un flujo más compacto. Como se muestra en la Figura 3.78.



Figura 3.78. Colocación de las chapas en forma de I [ELABORACION PROPIA].

Finalmente se agrupa y alinea todo el transformador y se procede a etiquetar sus terminales, en la Figura 3.79 podemos observar finalmente los 3 transformadores monofásicos que conforman el banco de transformadores para mediante una conexión ZIGZAG de sus terminales puedan mitigar los armónicos triples.



Figura 3.79. Banco de transformadores terminado [ELABORACION PROPIA].

3.7 CONEXIONADO FINAL DE LA MAQUETA

Una vez armado el conector trifásico y antes de conectarlo al interruptor, se verifica mediante un multímetro que las fases se encuentren activas del interruptor, los terminales tanto de las tres fases como del neutro deben estar conectas a sus respectivos interruptores de potencia desde los cuales se energiza el sistema de la maqueta.

Esto se observa en la Figura 3.80.

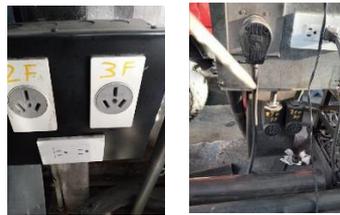


Figura 3.80. Conexionado tomacorriente [ELABORACION PROPIA].

Se debe conectar el variador de velocidad a dos fases, antes de energizarlo se debe verificar que las bornas se encuentren correctamente ajustadas y sujetas a los respectivos cables, por el lado de la alimentación al motor se conecta cada salida con la entrada correspondiente del motor, vienen notadas con letra U V W, respectivamente, tanto en la salida del variador como en el motor, y la conexión debe ir de manera adecuada. Esto se presenta en la Figura 3,81.



Figura 3.81. Conexionado del variador de velocidad [ELABORACION PROPIA].

De igual manera para el caso de las luminarias LED, se las conecta en paralelo y como se mencionó anteriormente un terminal de estas se conecta a la fase restante del sistema trifásico y la otra fase de las luminarias se conecta a una fase compartida con el variador. Se tiene así finalmente la carga no lineal conectada en su totalidad como se muestra en la Figura 3.82. y en el diagrama mostrado en Diagrama 3.1.



Figura 3.82. Conexión total de la carga no lineal [ELABORACION PROPIA].

Una vez verificadas todas las conexiones se cierran los interruptores de potencia, y se pone en marcha la carga no lineal, teniendo en cuenta que debe programarse el variador de velocidad y activar la puesta en marcha rápida para empezar con la operación del sistema. Una vez energizado y puesto en activación el variador se puede observar el espectro de armónicos generados por la carga no lineal, como se muestra en el Capítulo 4.

Esto se aprecia en la Figura 3.83.



Figura 3.83. Conexión final y puesta en marcha sin transformador ZIG-ZAG [ELABORACION PROPIA].

Con el sistema puesto en marcha y al observar un alto porcentaje de armónicos triples, se procede a cerrar los interruptores de potencia del sistema de banco de transformadores en conexión ZIGZAG, una vez cerrados dichos interruptores se observa nuevamente el espectro de armónicos en donde la mitigación de armónicos triples es de manera adecuada. Dichos resultados de igual manera se pueden apreciar en el siguiente capítulo.

Dicho proceso de cierre de interruptores y puesta en marcha de la mitigación se observa en la Figura 3.84.



Figura 3.84. Conexionado final y puesta en marcha con transformador ZIG-ZAG
[ELABORACION PROPIA].

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 LAMPARAS FLUORESCENTES

El uso de lámparas LED es en la actualidad una realidad que invade en gran parte a la población mundial, tanto en el ámbito residencial como industrial, estudios pasados presentan a este tipo de lámparas como una gran fuente contaminadora de la red eléctrica, para este trabajo de titulación se pusieron a prueba varios tipos de luminarias, para este proyecto se escogieron las luminarias LED SPLENDOR TIPO REGLETA 9W, las mismas al ser conectadas a una fuente de 220V son grandes contaminadores.

Como se puede apreciar en la primera y segunda imagen de la Figura 4.1, no se visualiza espectro de armónicos, pero al conectar una tercera lámpara la contaminación e inyección de armónicos es ya censada por las pinzas del analizador y como se puede apreciar en la última imagen de la misma figura el espectro de color azul se presenta en el sistema.

Estas lámparas se encuentran conectadas en paralelo para de esta manera forzar a tener una demanda de corriente más fuerte desde la fuente.

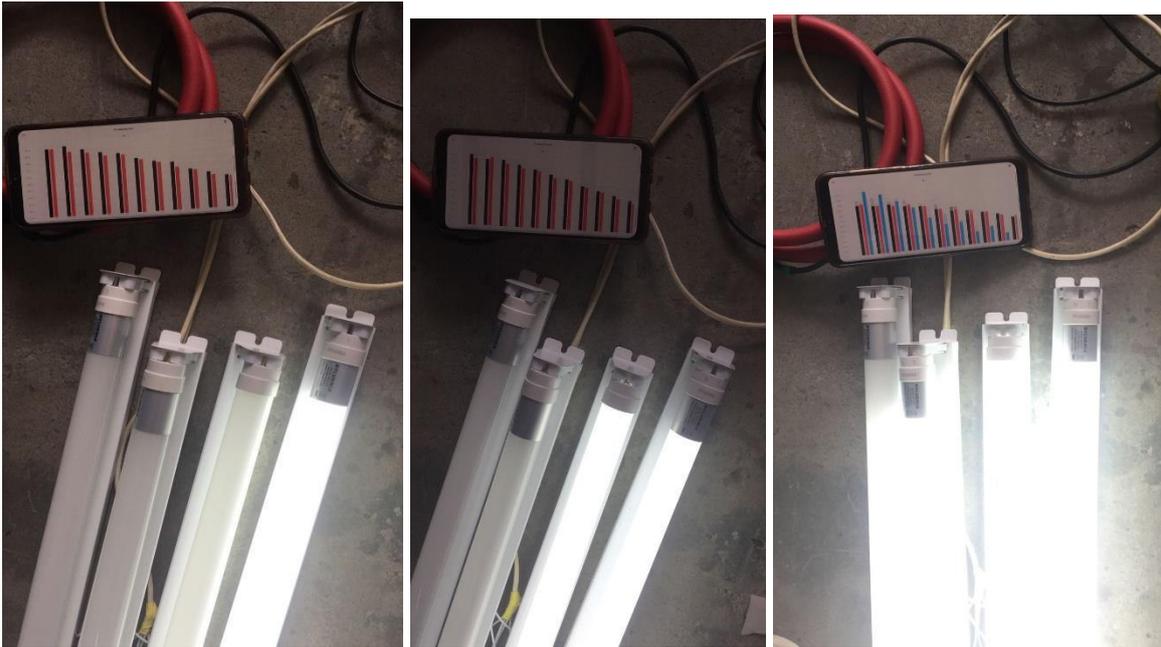


Figura 4.1. Lámparas LED puestas en marcha [ELABORACION PROPIA].

El espectro de armónicos permite apreciar el alto porcentaje que inyectan estas lámparas al sistema de potencia, en rangos de 20% al 130%, esto se debe a que incorporan dentro de los mismos elementos de electrónica de potencia.

Al observar la Figura 4.2, el espectro de armónicos presentado es el resultado de la conexión en paralelo de las lámparas LED anteriormente mencionadas, dicho espectro presenta altos índices de armónicos triples para este tipo de luminarias, siendo así comprobada la hipótesis de que son una gran fuente de terceras armónicas.

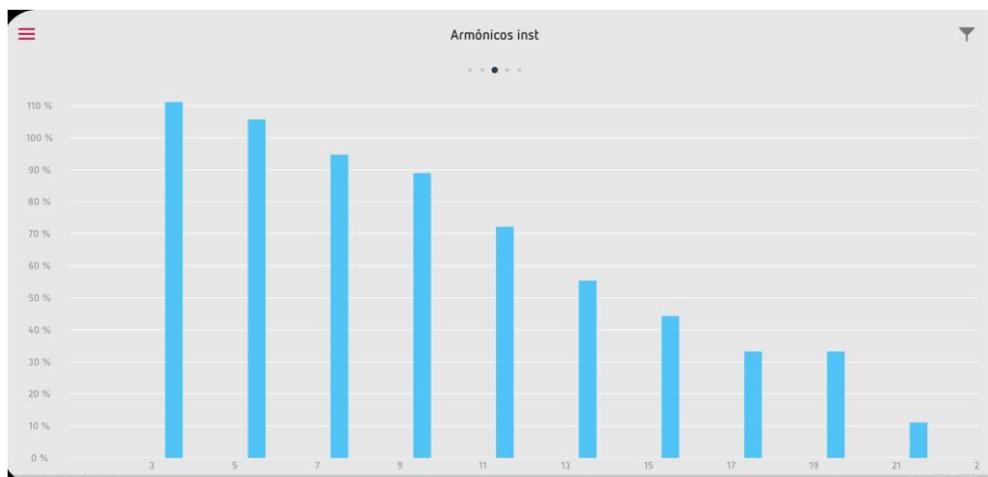


Figura 4.2. Espectro de armónicos de las 3 lámparas conectadas [ELABORACION PROPIA].

4.2 VARIADOR DE VELOCIDAD

Para el caso de variador de velocidad Siemens V20, es considerada también una gran fuente de triples armónicos, este variador cuenta con circuitos de electrónica de potencia lo que lo hace contaminador de la red eléctrica, es importante considerar que al observar la Figura 4.3 y Figura 4.4, el espectro mostrado posee altos índices de armónicos, especialmente de los triples, con esto se logra demostrar que este tipo de elementos son una gran fuente de contaminación.

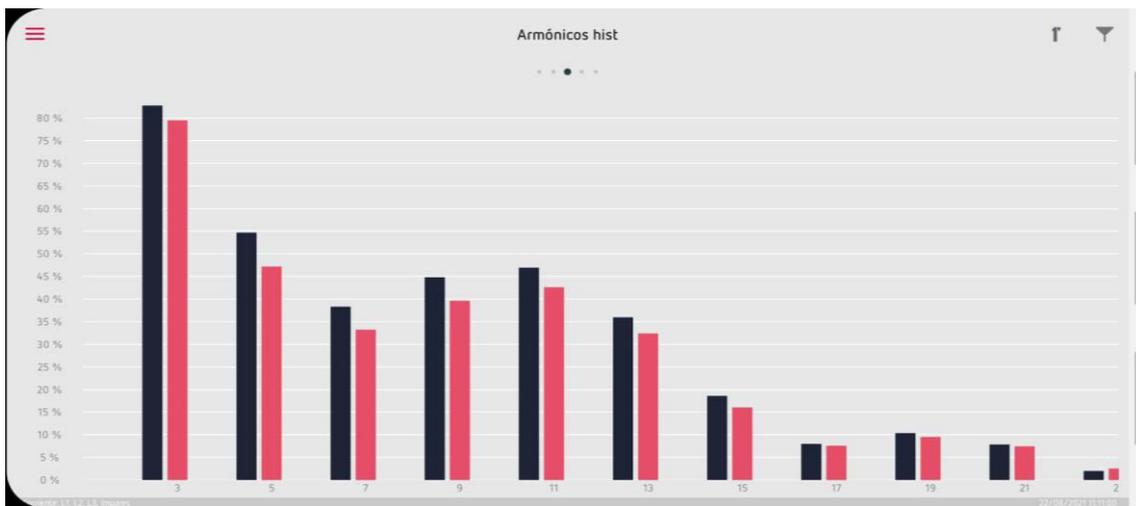


Figura 4.3. Espectro de armónicos del variador de velocidad [ELABORACION PROPIA].

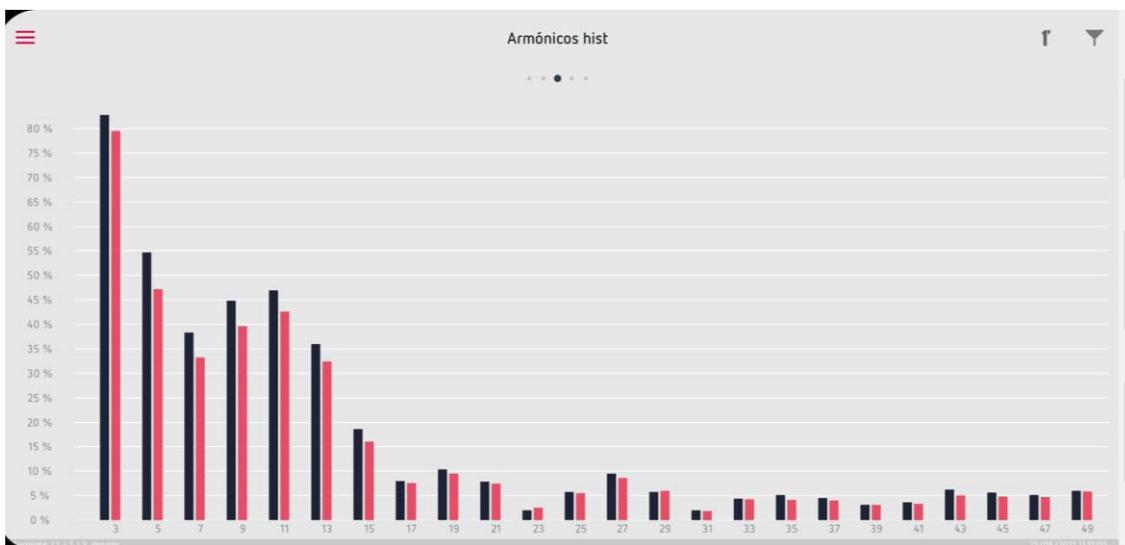


Figura 4.4. Espectro total de armónicos del variador de velocidad [ELABORACION PROPIA].

4.3 CARGA NO LINEAL FINAL (VARIADOR DE VELOCIDAD EN CONJUNTO CON LAMPARAS FLUORESCENTES PARA VARIAS FRECUENCIAS).

Como se mencionó en la metodología, el diseño de carga no lineal se basa netamente en la parte experimental, se obtuvieron los siguientes resultados al combinar el variador de velocidad con el motor en conjunto con las lámparas LED tipo regleta, donde se obtienen los siguientes espectros de armónicos. Cabe recalcar que cada uno de los datos mostrados a continuación fueron tomados en instantes de tiempo dentro de los largos rangos de operación que tuvo el sistema, esto con el fin de analizar un caso promedio que ayude en la futura construcción de nuestro banco de transformadores en conexión ZIGZAG.

Para un primer instante de tiempo, como se puede mostrar en la Figura 4.5 se obtiene un gran aporte de terceras armónicas en las tres fases de la red eléctrica, para el caso de las fases que alimentan el variador se tiene un rango de 100% de tercera armónica, para la fase que alimenta las lámparas de observa un 140% de tercera armónica. Esto claro está para un instante de tiempo. Con un valor de corriente fundamental del 0,65 A 0,66 A y 0,25 A, respectivamente.

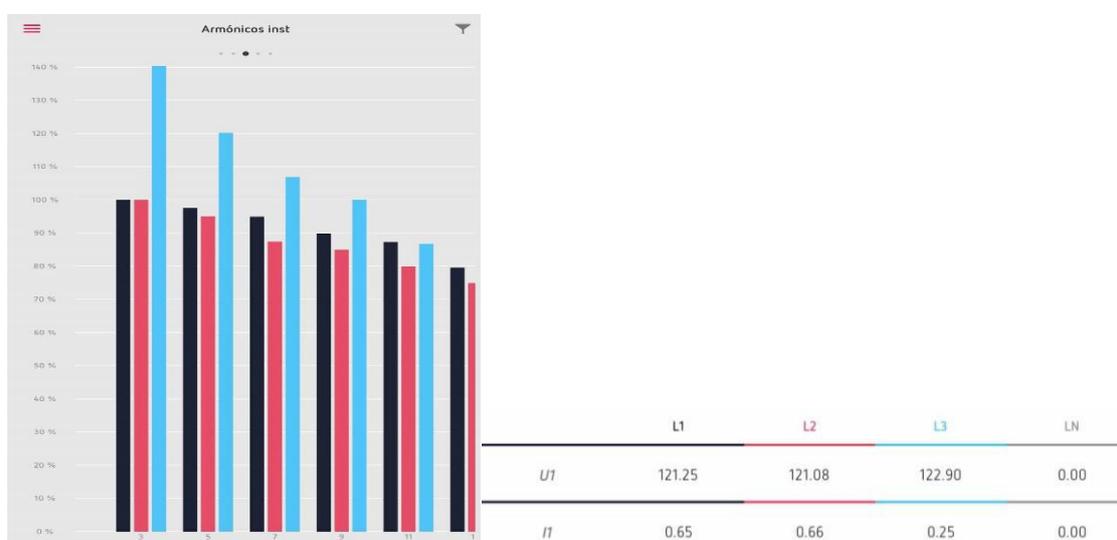


Figura 4.5. Espectro 1 de armónicos [ELABORACION PROPIA].

Para un segundo instante de tiempo se obtiene el siguiente diagrama mostrado en la Figura 4.6, en donde para este caso de tienen valores de terceras armónicas de aproximadamente 92%, 108% y 113%, respectivamente.



Figura 4.6. Espectro 2 de armónicos [ELABORACION PROPIA].

Para un tercer instante de tiempo, como se puede mostrar en la Figura 4.7 se obtiene un porcentaje apreciable de terceras armónicas en las tres fases de la red eléctrica, para el caso de las fases que alimentan el variador se tiene un rango de 110% de tercera armónica, para la fase que alimenta las lámparas de observa un 109% de tercera armónica. Esto claro está para un instante de tiempo. Con un valor de corriente fundamental del 0,25 A y 0,32 A, respectivamente. Esto variando la frecuencia de operación del motor conectado al variador.

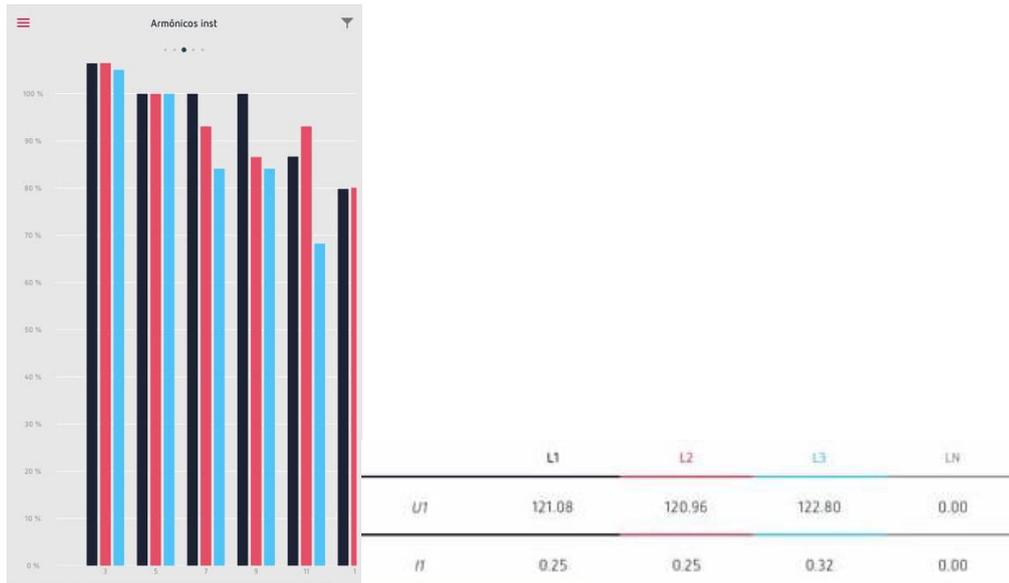


Figura 4.7. Espectro 3 de armónicos [ELABORACION PROPIA].

Para un cuarto instante de tiempo, como se puede mostrar en la Figura 4.8 se obtiene un porcentaje un tanto variado de terceras armónicas en las tres fases de la red eléctrica, para el caso de las fases que alimentan el variador se tiene un rango de 100% de tercera armónica, para la fase que alimenta las lámparas de observa un 111% de tercera armónica. Esto claro está para un instante de tiempo. Con un valor de corriente fundamental del 0,66 A 0,64 A y 0,30 A, respectivamente. Esto variando la frecuencia de operación del motor conectado al variador.

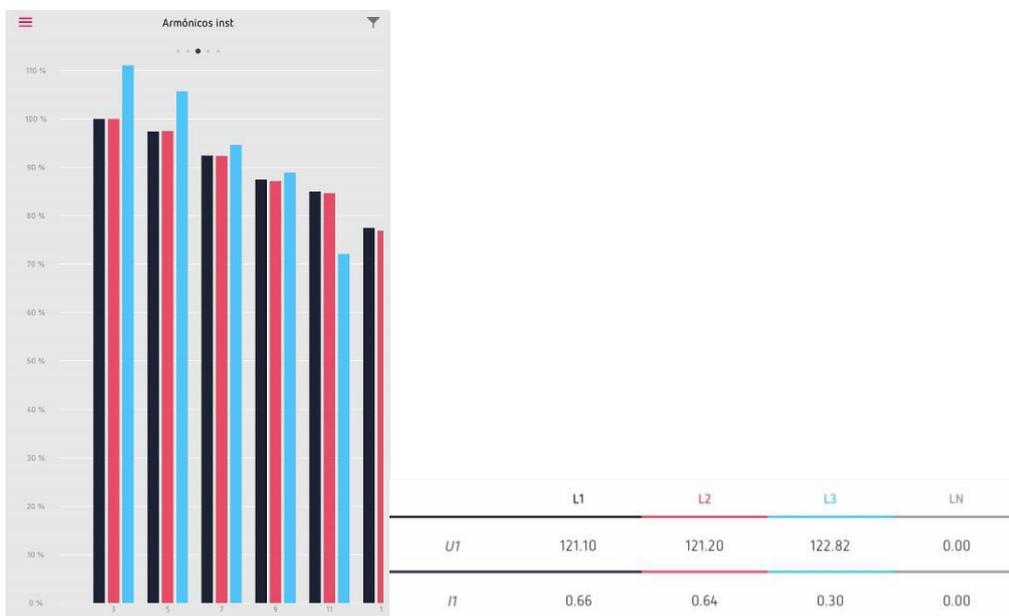


Figura 4.8. Espectro 4 de armónicos [ELABORACION PROPIA].

Para un quinto instante de tiempo, como se puede mostrar en la Figura 4.9 se obtiene un porcentaje de tercera armónica de 95% para la primera fase, 108% para la segunda fase y 118% para la tercera fase, con un valor de corriente fundamental de 0,26 A 0,25 A y 0,30 A respectivamente para cada fase.

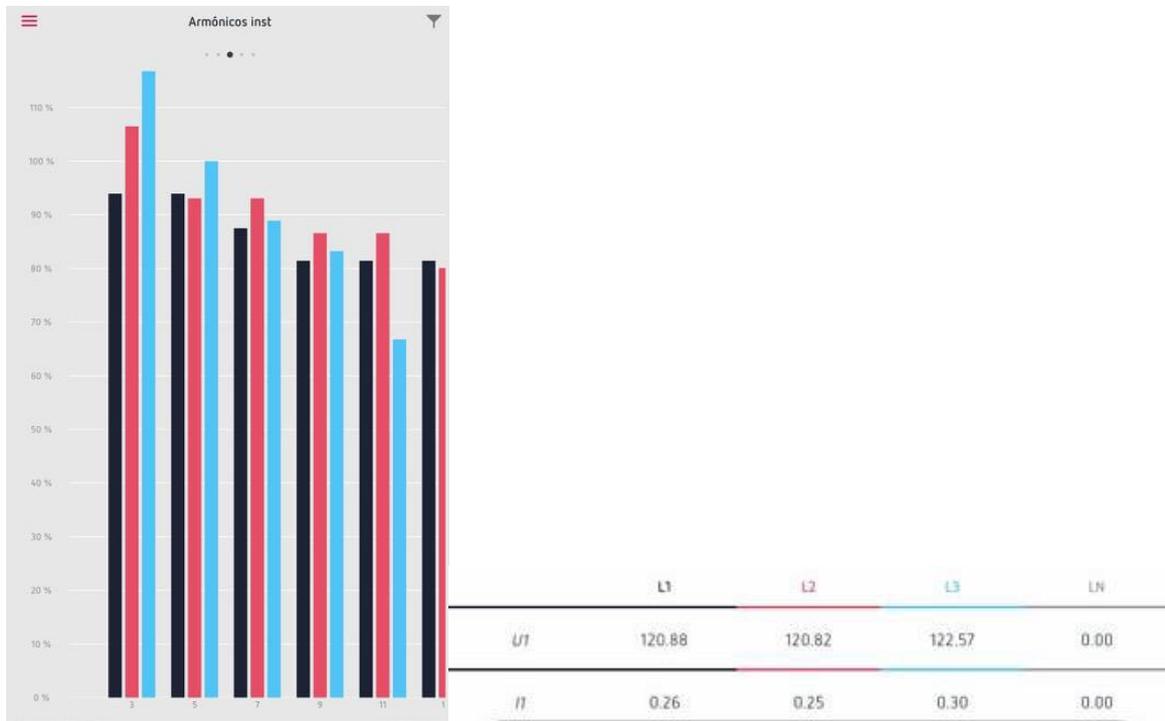


Figura 4.9. Espectro 5 de armónicos [ELABORACION PROPIA].

A continuación, se muestran espectros más completos de la carga no lineal, esto de igual manera para distintos instantes de tiempo y a diferentes frecuencias de operación del motor que es alimentado por el variador.

La finalidad de las figuras mostradas a continuación en; Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14 y Figura 4.15, es observar la gran afección armónica que produce este tipo de carga seleccionada, que para nuestro caso es de importancia la tercera armónica por motivo de mitigación de la misma, pero al observar el espectro en mayor rango de armónicos se aprecia altos porcentajes de contaminación para la red eléctrica para distintos armónicos.

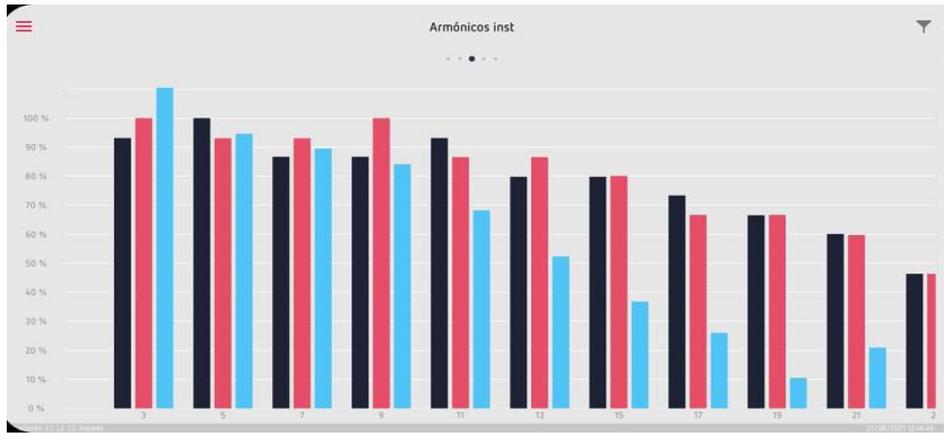


Figura 4.10. Espectro 6 de armónicos [ELABORACION PROPIA].

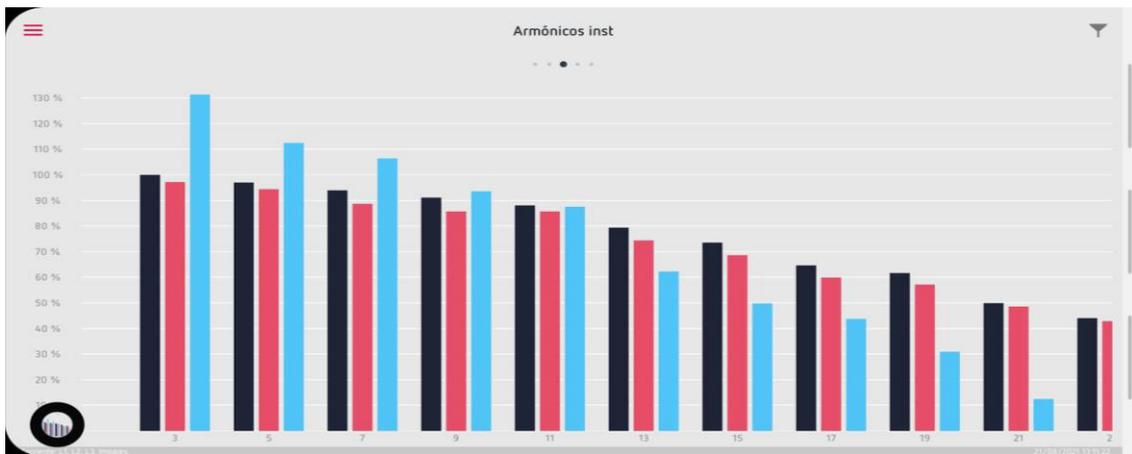


Figura 4.11. Espectro 7 de armónicos [ELABORACION PROPIA].

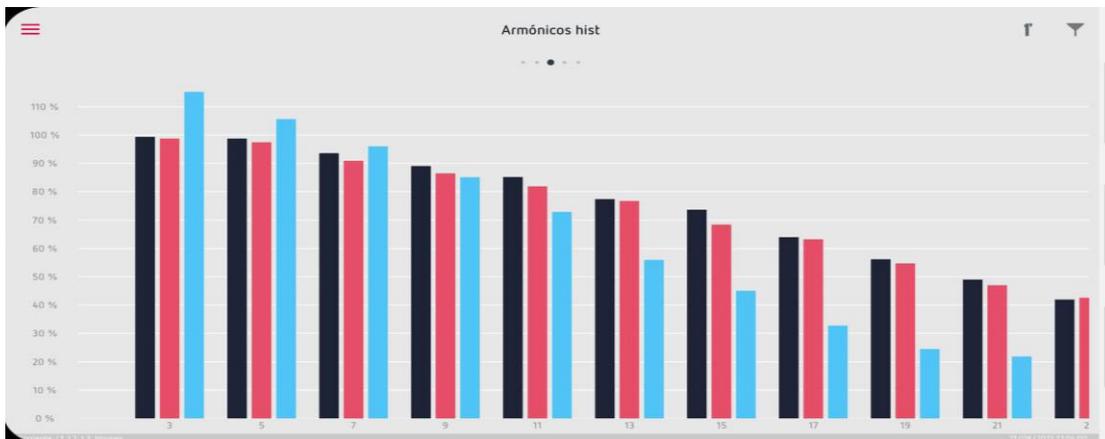


Figura 4.12. Espectro 8 de armónicos [ELABORACION PROPIA].

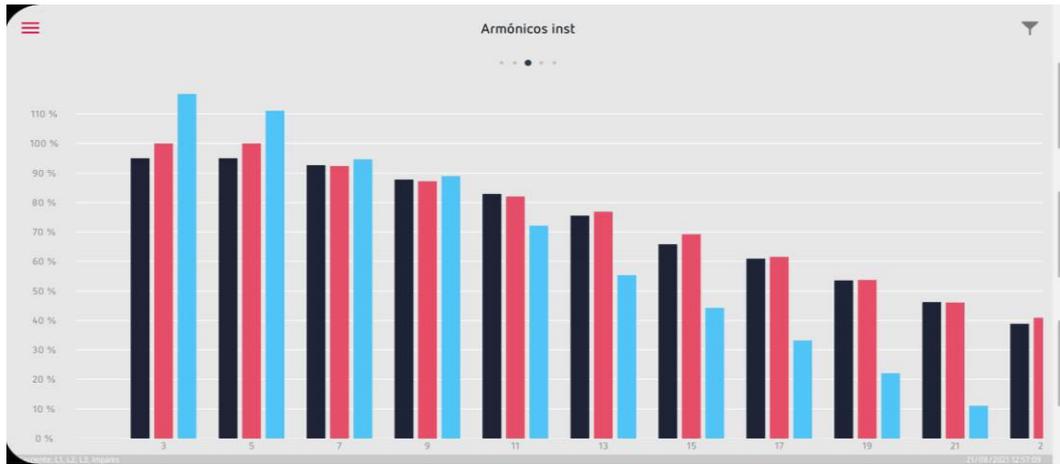


Figura 4.13. Espectro 9 de armónicos [ELABORACION PROPIA].

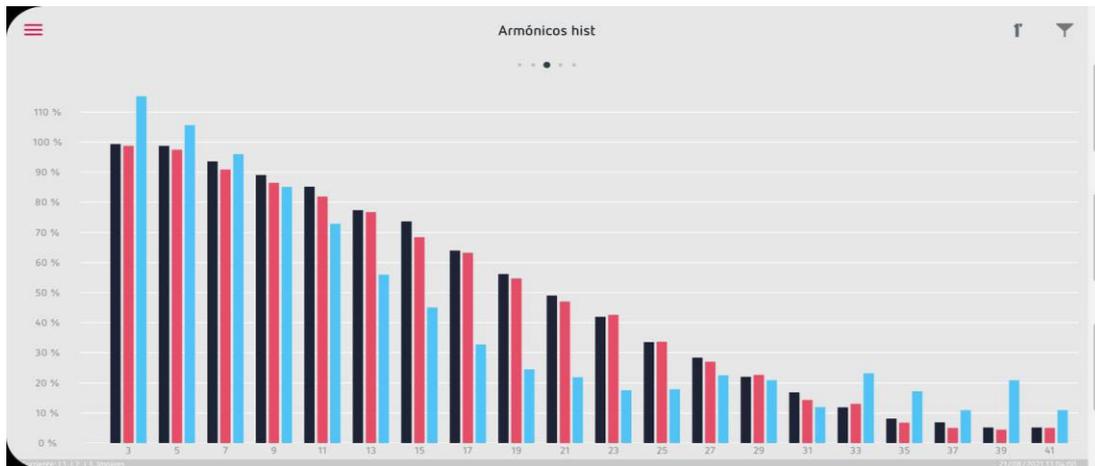


Figura 4.14. Espectro 10 de armónicos [ELABORACION PROPIA].

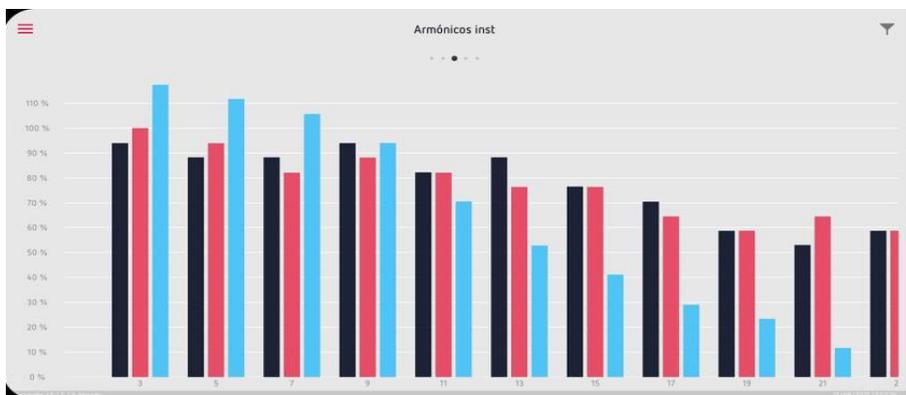


Figura 4.15. Espectro 11 de armónicos [ELABORACION PROPIA].

Como se observa en los 11 espectros presentados el porcentaje de terceras armónicas es bastante alto para cada uno de ellos, con esto se puede verificar que se cuenta con una carga no lineal trifásica portadora de la armónica en análisis, la misma que posee

elementos que tienen electrónica de potencia, lo que permite una inyección de armónicos a la red eléctrica que los alimenta.

4.4 CARGA NO LINEAL FINAL SIN TRANSFORMADOR ZIGZAG (VARIADOR DE VELOCIDAD EN CONJUNTO CON LAMPARAS FLUORESCENTES PARA FRECUENCIA DE 5 HZ).

Una vez comprobada la efectividad que tiene la carga no lineal seleccionada para ser una fuente de terceros armónicos, se escogió un escenario pertinente para realizar el desarrollo de la tesis, para este caso se seleccionó como carga no lineal a tres lámparas LED tipo regleta en conjunto con un variador de velocidad SIEMENS V20 que alimenta un motor trifásico a frecuencia de 5 Hz en vacío.

Una vez puesto en marcha el sistema en las condiciones anteriormente mencionadas se procede a extraer datos del analizador de red que son mostrados a continuación.

En la Figura 4.16 se puede apreciar la corriente por fase que circula por el sistema, obteniendo valores de 0,93 A 0,92 A y 0,93 A respectivamente para cada fase.

En la Figura 4.17 se observa el voltaje fase a fase del sistema, con valores de 208,5 V 211,6 y 211,7 V, respectivamente.



Figura 4.16. Espectro de armónicos con datos de corriente por fase [ELABORACION PROPIA].

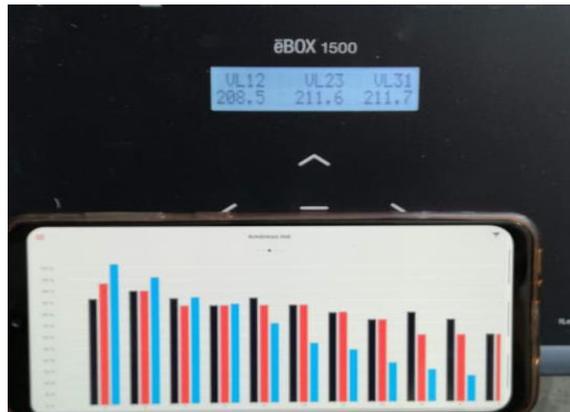


Figura 4.17. Espectro de armónicos con datos de voltaje línea a línea [ELABORACION PROPIA].

En la Figura 4.18 se presentan los valores de voltaje fase neutro que opera en el sistema, con valores de 120,9 V 120,8 V y 122,6 V; respectivamente.



Figura 4.18. Espectro de armónicos con datos de voltaje línea neutro [ELABORACION PROPIA].



Figura 4.19. Espectro de armónicos con datos de potencia aparente por fase [ELABORACION PROPIA].

Como se muestra en las figuras anteriores, se tomaron datos de corriente por fase, voltaje línea a línea, voltaje línea neutro y potencia aparente por fase, cada una de ellas para una frecuencia de 5Hz en condiciones normales de operación del variador en conjunto con las luminarias, esto con la finalidad de tener un respaldo de que el análisis es el adecuado y correcto. Dichas medidas se presentan en resumen en la Figura 4.20.

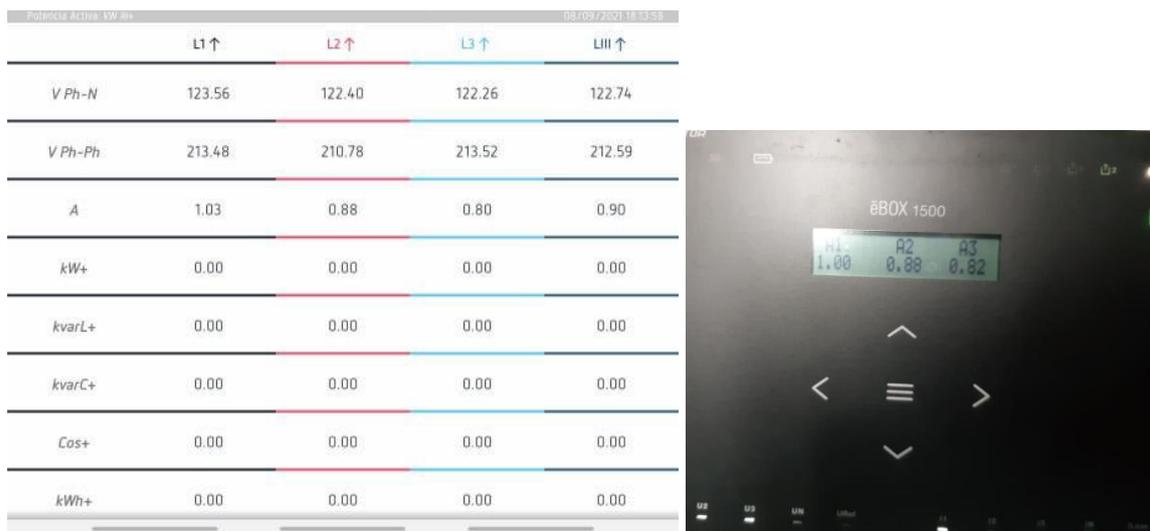


Figura 4.20. Datos de las magnitudes eléctricas [ELABORACION PROPIA].

En la Figura 4.21, Figura 4.22 y Figura 4.23 se evidencia el espectro de armónicos de la carga no lineal para una frecuencia de operación del variador de 5 Hz, se observa un alto índice de terceras armónicas con una corriente fundamental de valor 0,46 A, la misma que en conjunto con las terceras armónicas pasan a ser la corriente homopolar de diseño del

transformador, es interesante el tener valores tan altos de terceras armónicas que rondan los rangos de 30% al 140%, para de esta manera cumplir con uno de los objetivos del trabajo de titulación, en el siguiente apartado se muestra la respectiva mitigación de estos por medio del uso del transformador ZIGZAG.

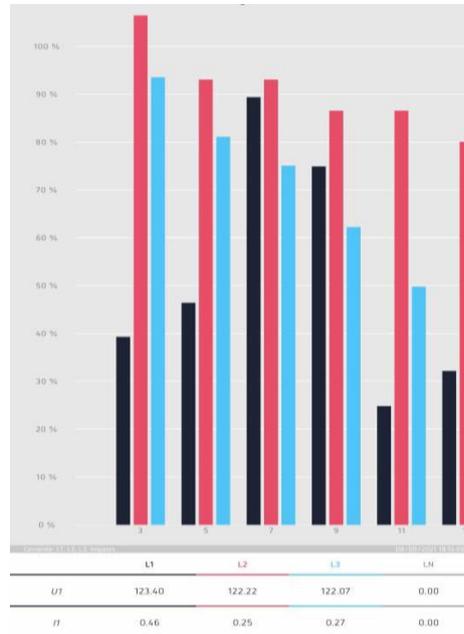


Figura 4.21. Espectro de armónicos con datos de corriente fundamental de diseño [ELABORACION PROPIA].

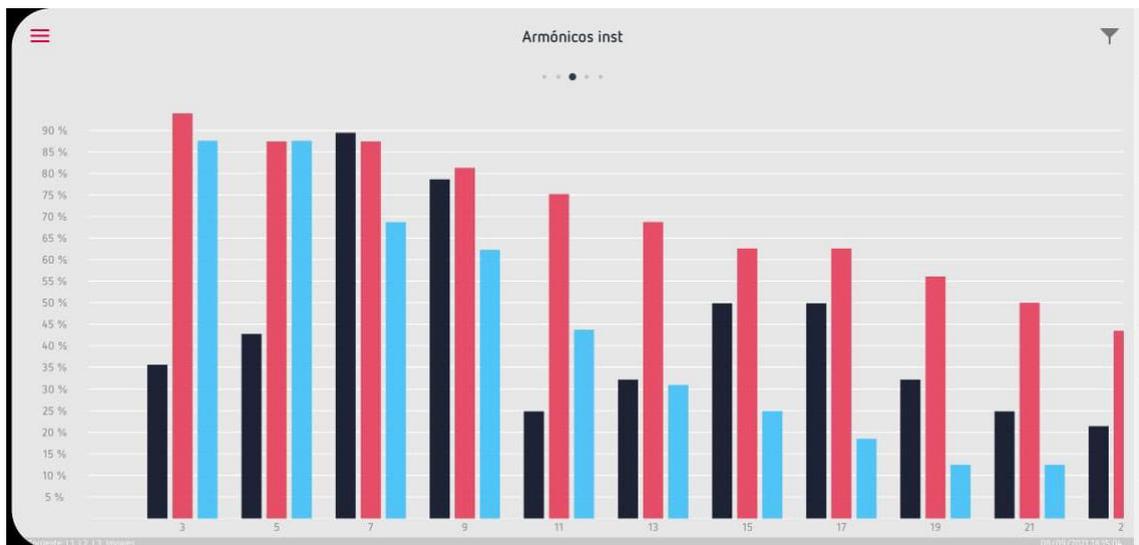


Figura 4.22. Espectro 1 de armónicos totales [ELABORACION PROPIA].

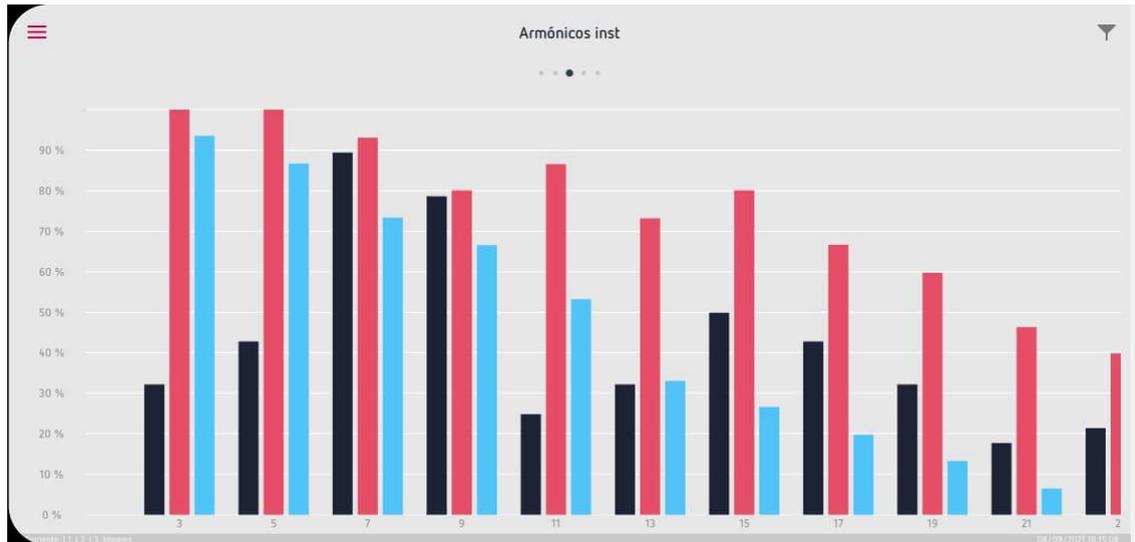


Figura 4.23. Espectro 2 de armónicos [ELABORACION PROPIA].

De forma general el espectro de armónicos que presenta nuestra carga finalmente elegida tiene porcentajes de tercera armónica de 32%, 100% y 94% aproximadamente para cada una de las fases, respectivamente. Estos valores son el objetivo de mitigación para así corroborar que el transformador ZIGZAG es una alternativa adecuada trampa de terceras armónicas.

4.5 CARGA NO LINEAL FINAL CON TRANSFORMADOR ZIGZAG (VARIADOR DE VELOCIDAD EN CONJUNTO CON LAMPARAS FLUORESCENTES PARA FRECUENCIA DE 5 HZ).

Una vez obtenidos los valores respectivos para mitigación se construyó el transformador ZIGZAG para reducir dichos valores, en donde los resultados de la operación continua del transformador arrojan los siguientes valores presentados.

Al observar la Figura 4.24, se aprecia la mitigación de triples armónicos por uso del transformador ZIGAG para el sistema, es interesante el recalcar que para la tercera fase que se observaba la inyección de armónicos triples por parte de las luminarias es eliminado en su totalidad, logrando así mitigar completamente los armónicos triples, de igual manera el rango de reducción para las fases restantes es de aproximadamente 20% al 80%.

Para la primera fase el porcentaje se redujo de 32% a 26% aproximadamente, para la segunda fase se redujo del 100% a 45% y para la fase restante se reduce de 94% a 0%, la mitigación del tercer armónico se realiza de una manera adecuada.

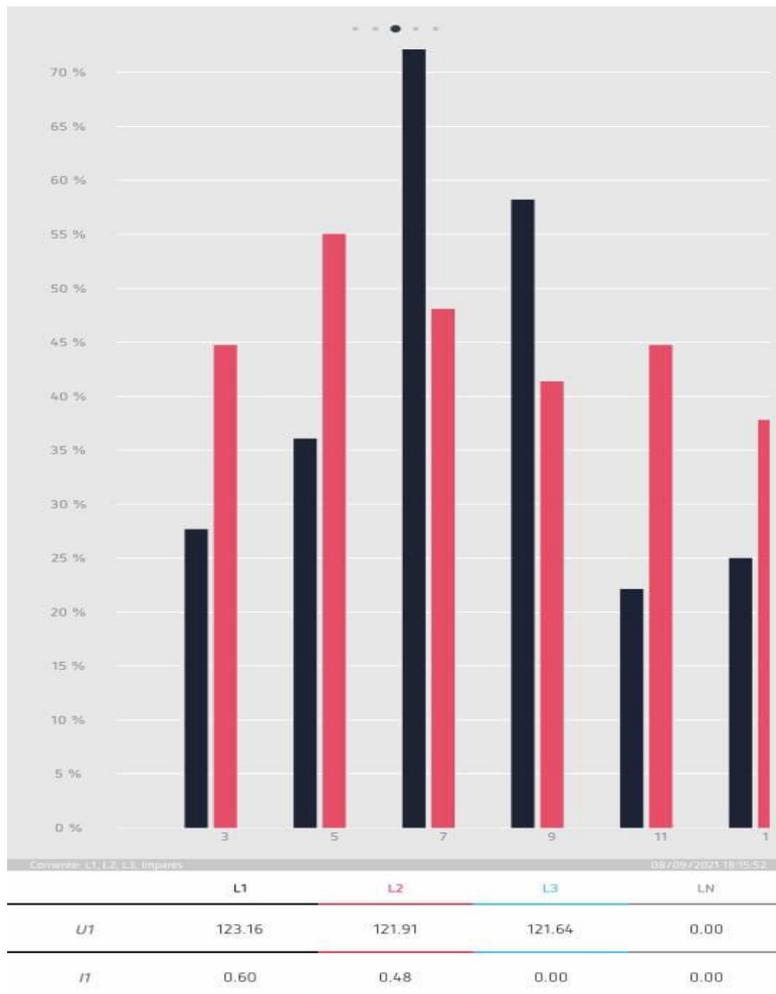


Figura 4.24. Espectro de armónicos con uso del transformador [ELABORACION PROPIA].

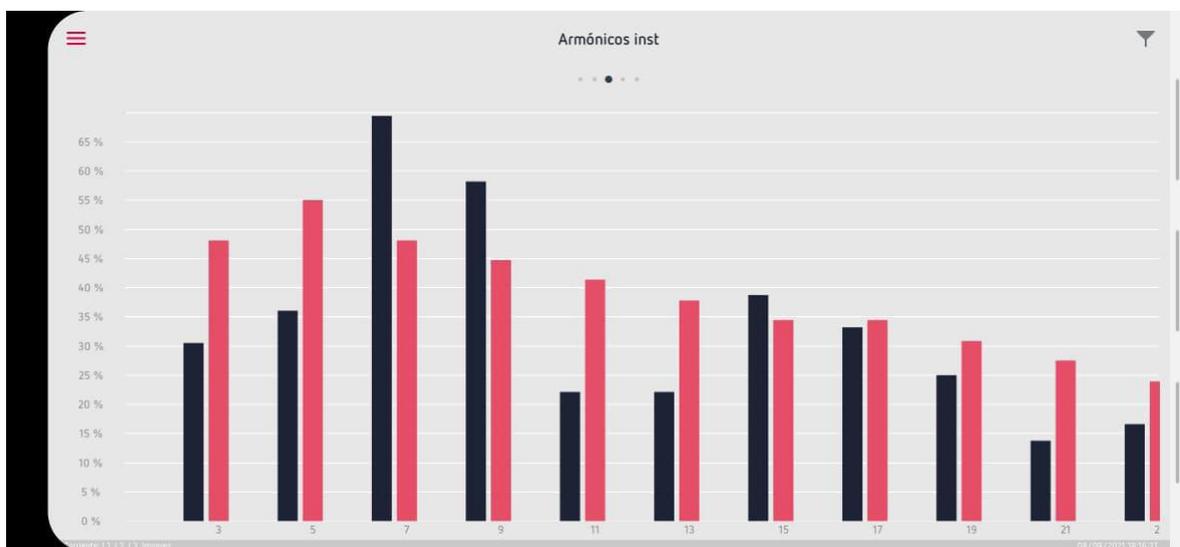


Figura 4.25. Espectro 2 de armónicos con uso del transformador [ELABORACION PROPIA].

Al comparar este espectro de armónicos con el anterior en donde no se hace uso del transformador ZIGZAG se comprueba la teoría de la mitigación de los armónicos triples por medio del uso del transformador ZIGZAG. Lo importante de esta mitigación es que permite minimizar de manera adecuada los terceros armónicos sin tener que cambiar los elementos del sistema eléctrico inicial, es decir, solo se incorpora el transformador en conexionado paralelo hacia la carga no lineal.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.

- Se comprobó que las luminarias tipo LED son una fuente de alto porcentaje de terceras armónicas, se puso a prueba distintos tipos de luminarias, pero la con mayor porcentaje pudo observarse es la SPLENDOR TIPO LED REGLETA DE 9W, con porcentajes de armónicos que van desde 30% hasta 140% con respecto a la fundamental.
- Se verificó que los variadores de velocidad son una fuente de alto porcentaje de armónicos triples, para este trabajo de titulación se incorporó un Variador de

Velocidad SIEMENS V20 que alimenta un motor trifásico, con porcentajes de armónicos que van desde 5% hasta 100% con respecto a la fundamental.

- Se diseñó, construyó y dimensionó una carga trifásica no lineal por medio del método experimental, la misma que se encuentra formada por 3 luminarias SPLENDOR TIPO LED REGLETA DE 9W en conjunto con un variador de velocidad SIEMENS V20 que alimenta un motor trifásico WEG W22 High Eff, que forman una carga altamente portadora de la tercera armónica en rangos de 10% al 140%.
- Se comprobó que para tener inyección de armónicos por parte de las luminarias SPLENDOR TIPO LED REGLETA DE 9W se debe tener operativas mínimo 3 luminarias, ya que con 1 o 2 luminarias no se presentan inyección de armónicos.
- El espectro de armónicos que presenta la carga no lineal finalmente elegida tiene porcentajes de tercera armónica de 32%, 100% y 94% aproximadamente para cada una de las fases, respectivamente.
- El transformador en conexión Zig-Zag, es considerado una gran alternativa para mitigar corrientes armónicas que afectan al sistema eléctrico de potencia, haciendo hincapié en la eliminación de las terceras armónicas, esto de cierta manera se debe al conexionado de sus devanados, los cuales proporcionan una baja impedancia a las corrientes armónicas de orden tres.
- El modelado de un sistema eléctrico de potencia permite un correcto análisis sobre los efectos que ocasionan las componentes armónicas de corriente, para esto es importante la consideración de la capacidad de cortocircuito de cada elemento, de igual manera con el comportamiento que cada uno de esos tendrá siendo minuciosos en las características de la carga y sus afecciones al sistema de potencia.
- La modelación de diferentes sistemas eléctricos en SIMULINK-MatLab, ayuda con el estudio de armónicos presentes en la actualidad, de igual manera nos acerca de mejor manera a la realidad de un sistema eléctrico sin la necesidad de hacer el estudio de manera física.
- Se aprecia la mitigación de armónicos triples debido al uso del transformador ZIGAG para el sistema, es interesante el recalcar que para la tercera fase que se observaba la inyección de armónicos triples por parte de las luminarias es eliminado en su totalidad, logrando así mitigar completamente los armónicos triples, de igual

manera el rango de reducción para las fases restantes es de aproximadamente 20% al 80%.

Para la primera fase el porcentaje se redujo de 32% a 26% aproximadamente, para la segunda fase se redujo del 100% a 45% y para la fase restante se reduce de 94% a 0%, la mitigación del tercer armónico se realiza de una manera adecuada.

5.2 RECOMENDACIONES.

- Se recomienda la implementación de un transformador trifásico con conexionado ZIGZAG, para corroborar la mitigación de terceras armónicas que realiza el banco de transformadores en conexión ZIGZAG. Esto con la finalidad de tener en el mercado eléctrico una opción más compacta de mitigación.
- Es importante utilizar varios tipos de analizadores, debido al tema de las pinzas de medición, esto con el propósito que se pueda analizar luminarias más pequeñas y observar el aporte de terceras armónicas que la mismas producen.
- Usar diferentes tipos de carga, sobre todo de cargas en gran masa de las industrias, para realizar un análisis de mitigación a gran escala y ofrecer el método de transformador ZIGZAG para mitigar y aportar a la reducción de pérdidas en el sistema eléctrico.
- El uso de simuladores aporta de mejor manera los análisis de los sistemas eléctricos de potencia, y permite corroborar los datos obtenidos de manera práctica, por eso la importancia de realizar diferentes simulaciones con cargas variadas y que sean lo más acercadas a la realidad.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Dr. Ing. Gabriel Benjamín Salazar Yépez, “Calidad de la Energía Eléctrica”, Escuela Politécnica Nacional, apuntes de clases y diapositivas.
- [2] O. Padilla, “Estudio de frecuencias armónicas”, Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, 1995.
- [3] R. I. Diego-García, “Análisis wavelet aplicado a la medida de armónicos, interarmónicos y subarmónicos en redes de distribución de energía eléctrica”, Universidad de Cantabria, 2006.
- [4] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, and H. W. Beaty, “Electric Power Quality”, McGraw Hill, New York, 1996.
- [5] J. Arrillaga, N. R. Watson, and S. Chen, “Power System Quality Assessment”, John Wiley and Sons, Chichester, 2000.
- [6] J. Cunill Solá, “Estudio y caracterización armónica de las lámparas fluorescentes compactas de baja potencia”, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 2017.
- [7] D. Chapman, “The Cost of Poor Quality”, 2001.
- [8] M. F. McGranaghan and B. Roettger, “Economic Evaluation of Power Quality”, IEEE Power Eng. Rev., vol 22, no. 2, pp. 8-12, 2002.
- [9] K. Rasheed Hameed, “ZIG-ZAG GROUNDING TRANSFORMER MODELING FOR ZERO-SEQUENCE IMPEDANCE CALCULATION USING FINITE ELEMENT METHOD,” Diyala Journal of Engineering Sciences., Iraq, ISSN 1999-8716, Sep. 2015.
- [10] N. Proaño, V. Velásquez, “Estudio de efectos y métodos de minimización de distorsiones armónicas en equipos de distribución eléctrica, comercial e industrial”, Tesis, Facultad de Ingenierías, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2010.

- [11] J. Dariel Arcilla, "Armónicos en Sistemas Eléctricos", INGENIERIA ESPECIALIZADA S.A, Sep. 2015.
- [12] Lawhead, Larry; Hamilton, Randy; Horak, John (May 2006), "Three phase transformer winding configurations and differential relay compensation", 60th Annual Georgia Tech Protective Relay Conference, pp. 8-10.
- [13] Khera, P.P. (October 1990), "Application of zigzag transformers for reducing harmonics in the neutral conductor of low voltage distribution system", (PDF). IEEE Trans. on Industry Applications.
- [14] Sankaran, C. (1 de julio de 2000), "The Basics of Zigzag Transformers", EC&M Magazine.
- [15] W. Culqui, "Diseño de un sistema de protección de los generadores en conexión Y no aterrizados para detectar fallas a tierra en la Central Hidroeléctrica "La Península" perteneciente a la EEASA en el Período Agosto 2013 - Agosto 2014", Tesis, Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2015.
- [16] IEEE 142. 2007, "SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN INDUSTRIAS Y COMERCIALES. [book auth.] COMITE DE INGENIEROS DE SISTEMA DE POTENCIA ", 2007.
- [17] DlgSILENT GmbH, «PowerFactory Applications,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>. [Último acceso: 20 Diciembre 2020].
- [18] J. Strack, J. Suárez, G. Di Mauro and S. Jacob, "Impacto de la Iluminación Residencial Eficiente en la Calidad de la Energía de una Red de Distribución," ING E CUC , vol. 10, no. 2, pp. 9–19, 2014.
- [19] S. Jacob, J. Strack, J. Branda y J. Suárez, "Evaluación del Consumo Eléctrico en el Sector Residencial de Mar del Plata. Propuestas de Ahorro y Eficiencia Energética", Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol.16, pp. 06.65-06.72. 2012..
- [20] S. Jacob, J. Strack, J. Branda, G. Murcia y J. Suárez, "Evaluación del Consumo Eléctrico en el Sector Residencial de Mar del Plata. Aspectos Económicos y

Ambientales”, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol. 1, pp. 01.91-01.98, 2013.

[21] MAGNUM TyC, «Topografías, Ingenierías, Arquitecturas,» 23, dic,2013. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=dkKoSUI8NPQ&t=349s> [Último acceso: 17 Agosto 2021].

[22] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (13 de Noviembre de 2020), "Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica", (PDF). Resolución Nro. ARCERNNR-017/20.

[23] P. Alvarado Moya, “Señales y Sistemas Fundamentos Matemáticos”, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electrónica, Ediciones CENTRO DE DESARROLLO DE MATERIAL BIBLIOGRÁFICO, vol. 1, pp. 131-170, 2005.

[24] Semlyen, A. and Shlash, M. (2000) Principles of modular harmonic power flow methodology, Proc. IEE Gener. Transm. Distrib., 147(1), pp. 1–6.

7. ANEXOS

ANEXO I. MANUAL DE INSTRUCCIONES CIRCUTOR MYeBOX 1500

ANEXO II. PROGRAMACIÓN DEL VARIADOR DE VELOCIDAD SIEMENS V20

ANEXO III. MEDICIONES DE CORRIENTE PARA INTERVALOS DE 5 Hz

ANEXO IV.

ORDEN DE EMPASTADO