



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN**  
**CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**TEMA:**

**“DISEÑO DE UN FILTRO PARA LA MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS  
PRODUCIDOS POR UN VARIADOR DE FRECUENCIA ACOPLADO A UN  
MOTOR - GENERADOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO DE 1,5 KW”.**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico**

**Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible**

**AUTOR(A):**

**Jorge Luis Montenegro López**

**DIRECTOR(A):**

**Isabel Marina Quinde Cuenca**

**Ibarra, 2024**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA**

**1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

En el cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	0401997572
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Montenegro López Jorge Luis
<b>DIRECCIÓN:</b>	Ibarra
<b>EMAIL:</b>	jlmontenegroll@utn.edu.ec
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b> 0968829645

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	DISEÑO DE UN FILTRO PARA LA MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS PRODUCIDOS POR UN VARIADOR DE FRECUENCIA ACOPLADO A UN MOTOR - GENERADOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO DE 1,5 KW.
<b>AUTOR (ES):</b>	Montenegro López Jorge Luis
<b>FECHA DE APROBACIÓN:</b> DD/MM/AAAA	29/11/2024
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero Eléctrico
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	MSc. Isabel Marina Quinde Cuenca MSc. Edgar Daniel Jaramillo Vinueza

**2. CONSTANCIAS**

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar los derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular el de los derechos patrimoniales, por ende, asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 29 días del mes de noviembre del 2024

**AUTOR:**

(Firma).....

Jorge Luis Montenegro López



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE  
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Yo, Isabel Marina Quinde Cuenca, en calidad de director del señor estudiante Montenegro López Jorge Luis certifico que, ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: "DISEÑO DE UN FILTRO PARA LA MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS PRODUCIDOS POR UN VARIADOR DE FRECUENCIA ACOPLADO A UN MOTOR - GENERADOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO DE 1,5 KW".

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

.....  
MSc. Isabel Marina Quinde Cuenca  
DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



### **3. DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi abuelo, quien, aunque nunca llegó a verme iniciar este camino universitario, fue un pilar fundamental durante mi corta vida. Su apoyo incondicional, sus consejos y su ejemplo de vida dejaron en mí una huella imborrable que me ha guiado hasta aquí. Hoy, al culminar esta etapa, quiero dedicarle este logro, con profunda gratitud y con la certeza de que su influencia sigue presente en cada paso que doy. Gracias por ser mi inspiración y por enseñarme a perseverar.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



#### **4. AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis. En primer lugar, agradezco a Dios por darme la salud, la fortaleza y la sabiduría para llevar a cabo este proyecto.

Quiero agradecer a mi familia por la amor incondicional y apoyo constante que me han motivado a alcanzar mis metas. Gracias por creer en mí en todo momento y brindarme los recursos necesarios para continuar mis estudios.

También quiero agradecer a mis compañeros y amigos, quienes con su amistad y apoyo emocional han sido un pilar importante durante esta etapa. Su compañía ha hecho que el camino sea más llevadero y motivador.

Finalmente, agradezco a la Universidad Técnica del Norte por facilitarme los recursos necesarios para la obtención de datos y por permitirme acceder a sus instalaciones.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Tabla de Contenido**

1.	IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA .....	II
2.	CONSTANCIAS .....	II
3.	DEDICATORIA.....	IV
4.	AGRADECIMIENTO.....	V
	Tabla de Contenido .....	VI
	Índice de figuras .....	X
	Índice de tablas .....	XIII
	RESUMEN .....	XIV
	Palabras clave .....	XIV
	ABSTRACT .....	XV
	Keywords: .....	XV
<b>CAPITULO I</b>		
	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Tema.....	1
1.2.	Problema.....	1
1.2.1.	Planteamiento del problema .....	1
1.2.2.	Formulación de la pregunta de investigación.....	2
1.3.	Objetivo general .....	2
1.4.	Objetivos específicos.....	2
1.5.	Alcance.....	3
1.6.	Justificación.....	4





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**CAPÍTULO II**

Marco Teórico .....	6
2.1. Antecedentes .....	6
2.2. Bases teóricas .....	7
2.2.1. Introducción a los armónicos .....	8
2.2.1.1. Cargas lineales y no lineales .....	8
2.2.1.2. Armónicos .....	9
2.2.1.3. Tipos de armónicos.....	10
2.2.1.3.1. Orden de los armónicos.....	10
2.2.1.3.2. Frecuencia de los armónicos .....	10
2.2.1.3.3. Secuencia de los armónicos.....	11
2.2.1.4. Fuentes de armónicos .....	13
2.2.1.4.1. Dispositivos electrónicos.....	13
2.2.1.4.2. Conversores Estáticos .....	13
2.2.1.4.3. Dispositivos de arco .....	13
2.2.1.4.4. Dispositivos saturados o ferromagnéticos .....	14
2.2.1.5. Principales armónicos en cargas no lineales.....	15
2.2.1.6. Efectos de los armónicos .....	16
2.2.2. Armónicos con relación a calidad de energía.....	16
2.2.3. Métodos de mitigación de armónicos.....	17
2.2.3.1. Transformadores.....	17
2.2.3.2. Filtro activo .....	18
2.2.3.3. Filtro pasivo.....	18
2.2.3.4. Filtro mixto.....	19



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**CAPITULO III**

Materiales y Métodos .....	21
3.1. Enfoque y tipo de investigación .....	21
3.1.1. Enfoque cualitativo .....	21
3.1.2. Tipo de investigación.....	21
3.2. Materiales, equipos y software.....	21
3.2.1. Motor - generador .....	21
3.2.2. Variador de frecuencia o velocidad (VFD).....	23
3.2.3. Analizador de red METREL PowerQ4 Plus .....	25
3.2.4. PowerView v2.0.....	25
3.2.5. Simulink.....	26
3.2.6. Norma IEEE 519.....	26
3.2.7. Ecuaciones para el diseño del filtro .....	26
3.3. Métodos de investigación.....	28
3.4. Procedimiento.....	30

**CAPITULO IV**

Resultados y Análisis .....	34
4.1. Análisis de datos obtenidos por el analizador de red .....	34
4.1.1. Método de medición.....	34
4.2. Análisis de la medición .....	35
4.3. Elección del filtro para la mitigación de armónicos.....	39
4.3.1. Diseño del filtro pasivo .....	40
4.4. Modelamiento del sistema eléctrico .....	42
4.4.1. Simulación de la carga no lineal .....	48





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



4.5. Simulación de los filtros pasivos con la carga no lineal .....	53
Conclusiones .....	68
Recomendaciones .....	69
Referencias .....	70
Anexos.....	74



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



### Índice de figuras

Fig. 1. Comportamiento impedancia lineal y no lineal .....	9
Fig. 2. Comportamiento de onda de voltaje y corriente de un inversor .....	9
Fig. 3. Onda sinusoidal de la frecuencia fundamental con su 2do, 3ro y 4to armónicos ..	11
Fig. 4. Diagrama unifilar general de un APF .....	18
Fig. 5. Filtro mixto .....	20
Fig. 6. Grupo Motor-Generador .....	22
Fig. 7. Variador de frecuencia .....	24
Fig. 8. Analizador de red PowerQ4 Plus .....	25
Fig. 9. Flujograma .....	31
Fig. 10. Conexión del analizador de red.....	34
Fig. 11. Conexión del analizador de red en el laboratorio de Máquinas Eléctricas .....	35
Fig. 12. THDv (%) en las fases L1, L2 Y L3 .....	36
Fig. 13. THDi (%) en las fases L1, L2 Y L3 .....	37
Fig. 14. Espectro de armónicos resultante de corriente.....	38
Fig. 15. Conexión en paralelo de filtros sintonizados .....	41
Fig. 16. Circuito base del motor-generador con variador de frecuencia .....	42
Fig. 17. Variador de frecuencia desarrollado en Simulink.....	43
Fig. 18. Rectificador, filtro CD e inversor del variador de frecuencia desarrollado en Simulink .....	44



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Fig. 19. Controlador y generador PWM del variador de frecuencia desarrollado en simulink ..... 45

Fig. 20. Parámetros generales del motor-generador ..... 46

Fig. 21. Medición de voltaje y corriente del motor-generador ..... 47

Fig. 22. Ondas de voltaje y corriente durante el arranque del motor ..... 47

Fig. 23. Espectro de armónicos de voltaje asociado a la simulación ..... 48

Fig. 24. Espectro de armónicos de corriente asociado a la simulación ..... 49

Fig. 25. Espectro de armónicos de corriente de la Línea 1 ..... 51

Fig. 26. Espectro de armónicos de corriente de la Línea 2 ..... 52

Fig. 27. Espectro de armónicos de corriente de la Línea 3 ..... 53

Fig. 28. Simulación de los filtros pasivos en paralelo con la carga no lineal ..... 54

Fig. 29. Parámetros para el filtro pasivo de 3er orden ..... 55

Fig. 30. Parámetros para el filtro pasivo de 5to orden ..... 55

Fig. 31. Parámetros para el filtro pasivo de 7mor orden ..... 55

Fig. 32. Espectro de armónicos de corriente con el filtro pasivo sintonizado para el tercer armónico ..... 56

Fig. 33. Espectro de armónicos de corriente con el filtro pasivo sintonizado para el quinto armónico ..... 57

Fig. 34. Espectro de armónicos de corriente con el filtro pasivo sintonizado para el séptimo armónico ..... 57

Fig. 35. Espectro de armónicos de corriente con los tres filtros en simultaneo ..... 58



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Fig. 36. Espectro de armónicos de corriente con los tres filtros con primera modificación ..... 61

Fig. 37. Espectro de armónicos de corriente con los tres filtros con la modificación final ..... 62

Fig. 38. Espectro de armónicos de corriente de la L1 con los tres filtros con la modificación final..... 64

Fig. 39. Espectro de armónicos de corriente de la L2 con los tres filtros con la modificación final..... 65

Fig. 40. Espectro de armónicos de corriente de la L3 con los tres filtros con la modificación final..... 66

Fig. 41. Espectro de armónicos de voltaje con filtros conectados..... 67



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Índice de tablas**

TABLA I PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS ARMÓNICOS ..... 12

TABLA II LÍMITES DE ARMÓNICOS DE VOLTAJE (% DEL VOLTAJE NOMINAL)  
 ..... 17

TABLA III PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL MOTOR ..... 22

TABLA IV PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL VFD ..... 24

TABLA V PORCENTAJE DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE PARA CADA LÍNEA  
 ..... 37

TABLA VI PORCENTAJES DE LOS ARMÓNICOS INDIVIDUALES PROMEDIO 38

TABLA VII COMPARACIÓN PORCENTAJES PROMEDIO REAL VS SIMULACIÓN  
 ..... 50

TABLA VIII VALORES DE COMPONENTES DE LOS FILTROS Y SU REDUCCIÓN  
 DE ARMÓNICOS..... 60

TABLA IX COMPARACION DE THD CON LOS FILTROS CONECTADOS EN  
 SIMULATANEO CON DIFERENTES MODIFICACIONES ..... 63



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



## RESUMEN

El presente trabajo de investigación se enfoca en el diseño y simulación de filtros pasivos para la mitigación de los armónicos generados por un variador de frecuencia acoplado a un motor-generador. El objetivo principal es reducir los armónicos producidos por el variador de frecuencia dentro de la red del laboratorio de máquinas eléctricas. Para ello, se describieron las causas y efectos de los armónicos, así como los métodos de mitigación. Se realizó un análisis en donde los datos se obtuvieron mediante mediciones experimentales realizadas con un analizador de red, mientras que el diseño del filtro se basó en un enfoque matemático, realizando cálculos con ecuaciones necesarias para determinar los parámetros de los filtros pasivos. Estos parámetros se introdujeron dentro del entorno de simulación de Simulink, donde también se modeló el sistema eléctrico que incluye tanto el variador de frecuencia como el motor-generador. Se empleó el método correlacional para comparar los resultados obtenidos con y sin los filtros pasivos. Las simulaciones revelaron un espectro de armónicos elevado cuando el variador de frecuencia está en uso, pero gracias a los filtros pasivos se logra mitigar eficazmente las corrientes indeseadas, reduciendo significativamente tanto el THD total como el individual. Se recomienda realizar simulaciones con cargas que representen fielmente las condiciones reales para garantizar la viabilidad del filtro y optimizar los resultados en la práctica en caso de una futura implementación.

### **Palabras clave**

Armónicos, Filtro Pasivo, Calidad de Energía, Mitigación. Variador de frecuencia.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS****CARRERA DE ELECTRICIDAD****ABSTRACT**

The present research focuses on the design and simulation of passive filters for the mitigation of harmonics generated by a frequency converter coupled to a motor-generator. The main objective is to reduce the harmonics produced by the frequency converter within the electrical machines laboratory network. To achieve this, the causes and effects of harmonics, as well as mitigation methods, were described. An analysis was conducted, where the data was obtained through experimental measurements using a power quality analyzer, while the filter design was based on a mathematical approach, performing calculations with the necessary equations to determine the parameters of the passive filters. These parameters were introduced into the Simulink simulation environment, where the electrical system, including both the frequency converter and the motor-generator, was also modeled. A correlational method was used to compare the results obtained with and without the passive filters. The simulations revealed a high harmonic spectrum when the frequency converter was in use, but thanks to the passive filters, undesirable currents were effectively mitigated, significantly reducing both the total and individual THD. It is recommended to perform simulations with loads that closely represent real-world conditions to ensure the filter's feasibility and optimize results in practice for future implementation.

**Keywords:**

Harmonics, Filter, Power Quality, Mitigation, frequency converter





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



## CAPITULO I INTRODUCCIÓN

### 1.1. Tema

Diseño de un filtro para la mitigación de armónicos producidos por un variador de frecuencia acoplado a un motor - generador asíncrono trifásico de 1,5 kW.

### 1.2. Problema

#### 1.2.1. Planteamiento del problema

En los sistemas eléctricos desde la distribución hasta el usuario es fundamental la calidad de energía, el continuo incremento en la producción de contenido armónico debido a las cargas no lineales que han ido incrementando con los años, creándose distorsión de onda sinusoidal de voltaje y corriente por estas cargas no lineales lo que quiere decir que la impedancia es no lineal (no es constante en función del voltaje). Estas cargas causantes de distorsiones armónicas pueden ser equipos industriales (soldadura, hornos de arco), variadores de frecuencia, rectificadores conmutados, fuentes de alimentaciones conmutadas, balastos para iluminación, entre otros.

La presencia de corrientes y/o voltajes armónicas en un sistema eléctrico son múltiplos integrales de la frecuencia fundamental de la onda sinusoidal tanto de corriente como tensión que pueden causar problemas como pérdida de potencia activa, sobretensión en condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de las protecciones, daños en el aislamiento, desgaste del dieléctrico, reducción de la vida útil del dispositivo, también afectan con interferencia en sistemas de comunicación debido a disturbios en la línea eléctrica.

Para el motor – generador asíncrono trifásico se tiene un variador de frecuencia que ayuda a acoplar a este a la red eléctrica, el variador de frecuencia es necesario para el funcionamiento del motor - generador, pero también causante de la distorsión armónica difiriendo del voltaje nominal modificando la onda fundamental de voltaje y/o corriente.

El variador de frecuencia tiene en su interior varios componentes de electrónica de potencia como rectificadores, inversores, transistores y dispositivos de conmutación, que trabajan juntos para generar una salida de frecuencia y voltaje ajustables, los armónicos se generan debido a la modulación de la señal de salida, esto implica la generación de pulsos de tensión con una



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



frecuencia mucho mayor que la frecuencia de salida deseada. Estos pulsos de alta frecuencia contienen componentes armónicos que se propagan por el sistema eléctrico.

Los armónicos producidos por el variador de frecuencia afectan al buen funcionamiento del motor – generador presentando problemas como el sobrecalentamiento del motor – generador, la reducción de eficiencia, problemas de aislamiento, vibraciones y ruidos, e incluso interferencia electromagnética.

Al presentarse estas distorsiones, se ve afectada la potencia aparente que requiere el sistema, por otro lado la potencia activa no se ve beneficiada, por lo que el sistema requerirá de mayor corriente, lo que supone una mayor sección del cable, circuito de protección más robusto, lo que a la larga genera la desclasificación del transformador en la red; además que en el equipo se presentarán pérdidas en el núcleo(hierro), pérdidas en el cobre correspondientes a la corriente armónica presente y reducción del par del motor – generador por secuencias negativas de los armónicos.

### **1.2.2. Formulación de la pregunta de investigación**

¿Como diseñar un filtro que mitigue los armónicos inducidos por el variador de frecuencia acoplado al motor – generador asíncrono trifásico?

### **1.3. Objetivo general**

Diseñar un filtro para la mitigación de armónicos producidos por el variador de frecuencia acoplado al motor - generador asíncrono trifásico de 1,5 kW mediante Simulink.

### **1.4. Objetivos específicos**

- Describir los armónicos presentes en cargas no lineales y métodos para la mitigación.
- Analizar los armónicos producidos en el variador de frecuencia acoplado al motor – generador asíncrono trifásico de 1,5kW.
- Diseñar el filtro que mitigue los armónicos del variador de frecuencia acoplado al motor – generador asíncrono trifásico de 1,5kW.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



### 1.5. Alcance

El desarrollo del presente trabajo de grado busca diseñar un filtro que mitigue los armónicos inducidos por el variador de frecuencia conectado al motor – generador asíncrono trifásico y reducir los efectos contaminantes que son producidos tanto hacia la red eléctrica como hacia el motor, y así, tener una mejor calidad de energía y mejor funcionamiento del equipo.

Se usará como método la revisión bibliográfica de libros, artículos científicos, revistas, tesis y otros documentos para dar respuesta a las interrogantes sobre cómo se producen los armónicos, cómo mitigar estas distorsiones de onda, y el filtro por el cual se optará para la mitigación que puede ser activo o pasivo.

Se obtendrán datos mediante un analizador de red para identificar y verificar qué tipo de armónicos se tienen en la red eléctrica al estar conectado el variador de frecuencia junto con el motor - generador asíncrono trifásico de 1,5kW ubicado en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Carrera de Electricidad.

Con la información recolectada se identificará los armónicos presentes en el módulo y con esa información se procederá a simular los efectos que producen estos armónicos a la carga y a la red; posteriormente se realizará la selección del filtro, que puede ser activo o pasivo, dependiendo del armónico a mitigar y tomando en cuenta el efecto que causa hacia el motor – generador y hacia la red eléctrica.

Finalmente se diseñará el filtro elegido en el anterior capítulo, que puede ser activo o pasivo, para lograr mitigar el armónico más perjudicial producido por la carga no lineal que afecta al motor – generador y al sistema eléctrico.

Se usará como simulador Matlab (Simulink) para validar el funcionamiento del filtro, simulando mediante bloques al variador de frecuencia, el motor – generador y al filtro elegido, insertando parámetros y características generales del filtro, modelando el sistema eléctrico correspondiente al motor – generador con lo que se buscará verificar el correcto desempeño del filtro.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Para concluir se realizará una simulación conjunta de todo el modelado del sistema eléctrico para verificar la reducción de armónicos con respecto a los datos arrojados anteriormente por el analizador de red cuando todavía no había el filtro. Se examinará los resultados de la simulación para evaluar la mitigación de armónicos, observando los niveles de armónicos antes y después de la mitigación del filtro diseñado.

### **1.6. Justificación**

La calidad de energía en un sistema eléctrico es primordial, pero debido a la existencia de cargas no lineales conectadas a la red se producen armónicos, los dispositivos electrónicos crean distorsiones de onda de tensión y/o corriente que son perjudiciales para la red eléctrica.

Al pasar los años, los dispositivos electrónicos estarán en todo lado, esto obligará a buscar métodos para mitigar los armónicos producidos por las cargas no lineales, para poder tener un factor de calidad asociado.

La carga no lineal al estar conectada a la red, simultáneamente con otros dispositivos electrónicos o eléctricos provoca el deterioro de sus protecciones y la reducción de su vida útil, estas características hacen importante el diseño de filtros que mitiguen los armónicos generados y así evitar los problemas mencionados anteriormente tanto en la red eléctrica como en los equipos conectados a la misma.

Dentro de una industria el motor-generador es capaz de convertir energía mecánica en energía eléctrica. Esto permite a las industrias generar su propia electricidad de manera independiente, lo que reduce la dependencia de la red eléctrica externa y garantiza un suministro constante de energía, este puede entrar en funcionamiento de manera automática o manual para proporcionar energía de respaldo. Esto asegura que las operaciones en la industria no se detengan y evita pérdidas económicas significativas. Además, ayuda a reducir los costos de energía en las industrias al generar electricidad internamente, las empresas pueden evitar los altos precios de la electricidad de la red o incluso vender el exceso de energía generado.

El variador de frecuencia acoplado al motor – generador asíncrono trifásico, al conectarse a la red ya sea para uso o inyección de energía presenta problemas como distorsiones en la forma



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



de onda de la corriente y la tensión eléctrica. Estos armónicos pueden afectar negativamente la calidad de la energía suministrada a la red eléctrica, por ello la importancia de un filtro para mitigar la contaminación producida por la carga y lograr mantener los estándares establecidos en cuanto a calidad de energía.

La factibilidad del diseño de un filtro para el equipo es buena e importante, ya que ayuda a eliminar una gran gama de frecuencias de armónicos, dependiendo del tipo de filtro y que tanto se quiere atenuar la distorsión de onda, sea con un filtro pasivo que es más sencillo y económico, pero su eficacia se basa a ciertas frecuencias de armónicos, mientras que los filtros activos son más costosos y complicados de diseñar, pero con una efectiva atenuación en varias frecuencias.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



## CAPÍTULO II

### Marco Teórico

#### 2.1. Antecedentes

En el estudio de la calidad de energía se debe identificar parámetros que determinen un adecuado y correcto funcionamiento de una red eléctrica, así como los factores que caracterizan una onda de corriente alterna perfecta y los nombres de los efectos que distorsionan la señal y las causas que lo provocan, dónde se menciona el fenómeno de las armónicas desde un punto conceptual y los diferentes tipos de carga que influyen en la generación de las armónicas en un sistema. [1]

Los armónicos son un fenómeno que genera problemas tanto para los usuarios como para la entidad encargada de la prestación del servicio de energía eléctrica ocasionando diversos efectos nocivos en los equipos de la red, es importante recordar la calidad de la onda de tensión la cual debe tener amplitud y frecuencia constantes al igual que una forma sinusoidal. [2]

Una gran contradicción consiste en que una gran parte de estas cargas no lineales, responsables de los grandes logros en la industria debido a la automatización, o son cargas electrónicas altamente sensibles a las variaciones en el suministro eléctrico que está siendo perturbado por su propia presencia. [3]

Los armónicos generados por cargas no lineales, que conectadas a la red eléctrica alterna y senoidal, absorben corrientes no lineales, cuya amplitud y frecuencia dependen de la deformación de la onda de corriente al aplicar una tensión senoidal estas cargas lineales son por lo general periódicas. [4]

El grado de tolerancia de los armónicos está determinado por la susceptibilidad de las cargas a estos. Los equipos eléctricos menos afectados por la presencia de armónicos son aquellos cuya función fundamental es generar calor, como es el caso de los hornos, mientras que los elementos más afectados, son aquellos diseñados para trabajar con ondas de tensiones y corrientes perfectamente sinusoidales. [5]



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



La frecuencia de la onda periódica se denomina frecuencia fundamental y los armónicos son señales cuya frecuencia es un múltiplo entero de esta frecuencia. Cuando una onda periódica no tiene esta forma sinusoidal se dice que tiene contenido armónico, lo cual puede alterar su valor pico y/o valor RMS causando alteraciones en el funcionamiento normal de los equipos que estén sometidos a esta tensión o corriente. La distorsión armónica total (THD) va a ser fundamental para el análisis de fallas mecánicas o eléctricas en el motor ya que es una herramienta para definir los efectos de los armónicos en el motor y así poder comparar en base a los valores establecidos por la CONELEC para que un motor este en correcto funcionamiento. [6]

La distorsión armónica es un inconveniente que surge en los sistemas eléctricos de distribución, en los cuales los armónicos causan afectaciones al sistema, generando altos niveles de distorsión armónica, para poder mitigar estas perturbaciones del sistema, se necesita de la implementación de un sistema de potencia activo para que así los valores de distorsión sean anulados o reducidos, rectificando las señales de corriente y corriente del sistema. [7]

A partir de la existencia de armónicos dentro de la red de distribución, nace la necesidad de crear soluciones para estas distorsiones o también llamadas armónicos, analizando y buscando alternativas para reducir los efectos que producen en la red, que en este caso son los filtros. [7]

En las últimas décadas los crecientes desarrollos de la tecnología han impulsado el uso de dispositivos basado en la electrónica, susceptibles a perturbaciones tales como: distorsión armónica, fluctuaciones rápidas de tensión (Flicker), transitorios, Sags, Swell, Notch, entre otros. Los usuarios del sector industrial que dependen de procesos productivos, en ocasiones las 24 horas del día durante todo el año, exigen una calidad del servicio de energía eléctrica tal que no afecte sus procesos productivos. [8]

## **2.2. Bases teóricas**

En este apartado se presentan los conceptos fundamentales y los principios teóricos para llevar a cabo este trabajo de integración curricular.





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Todo sistema eléctrico que tenga cargas electrónicas y dispositivos que funcionan en condición de saturación son la principal causa de los armónicos en los sistemas eléctricos y para ello es necesario definir que son las cargas lineales y no lineales para entender mejor sobre los armónicos.

### **2.2.1. Introducción a los armónicos**

Los armónicos son corrientes o voltajes que tienen una frecuencia múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la fuente de alimentación. Estos armónicos pueden causar problemas en los sistemas eléctricos, como distorsión de la forma de onda, pérdidas de energía y calentamiento excesivo de equipos. [9]

#### **2.2.1.1. Cargas lineales y no lineales**

Para entender los armónicos primero se tiene que conocer quien lo causa y para ello están las cargas “lineales” y “no lineales”.

##### **Carga Lineal**

La carga lineal o también carga convencional, se comporta linealmente es decir que su relación entre voltaje y corriente es constante, al aplicar una tensión se tendrá que la onda de voltaje es igual a la onda de corriente, aunque esta será desplazada con un ángulo en el tiempo y amplitud menor. [10]

##### **Carga No Lineal**

La carga no lineal hace que su impedancia cambie dependiendo del voltaje aplicado, en otras palabras, no tiene una relación constante entre voltaje y corriente, esto significa que la corriente consumida será no senoidal incluso si está conectado a un voltaje senoidal, se muestra la diferencia de impedancia lineal a la no lineal con relación al voltaje y la corriente aplicada en la Fig. 1. [10]



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

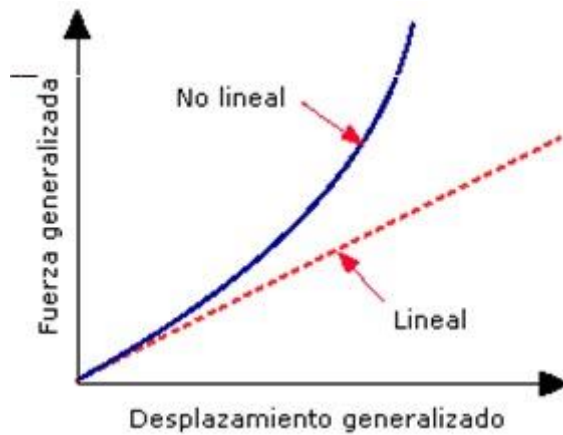


Fig. 1. Comportamiento impedancia lineal y no lineal. [11]

Ejemplos claros de carga no lineal son equipos que tienen elementos de electrónica en su etapa de entrada tales como son equipos industriales, inversores, rectificadores, variadores de frecuencia, fuentes de alimentación, los elementos de electrónica de potencia son de conmutación rápida como son los diodos, transistores, tiristores, que afectan a la onda senoidal sea de voltaje o corriente mostrada en la Fig. 2. [10]

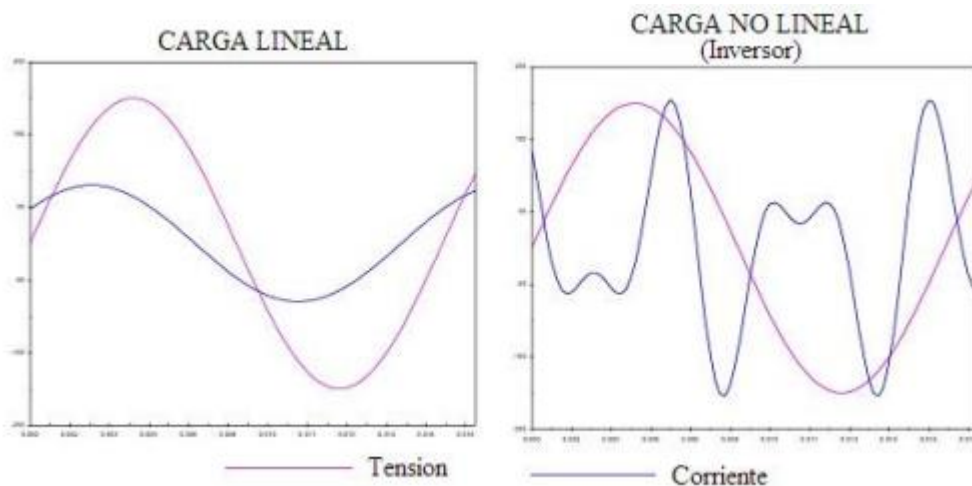


Fig. 2. Comportamiento de onda de voltaje y corriente de un inversor. [12]

**2.2.1.2. Armónicos**

Los armónicos en una red eléctrica producen continuos problemas al usuario y al sistema eléctrico y junto a la onda fundamental se generan distorsiones. Las formas de onda distorsionadas



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



pueden ser descompuestas en una suma de la señal de frecuencia fundamental y las armónicas mediante Fourier. [10]

### 2.2.1.3. Tipos de armónicos

Para caracterizar a los armónicos se toma en cuenta los parámetros más importantes que son orden, frecuencia y secuencia mostrado en la TABLA I.

#### 2.2.1.3.1. Orden de los armónicos

“Partiendo de que la frecuencia fundamental en Ecuador es de 60 Hz, el número de orden determina el número de veces que la frecuencia de ese armónico es mayor que la fundamental: 1,2,3,4,5,6,7... orden natural de los números”. [13]

“También se define como la relación que hay entre la frecuencia del armónico ( $f_n$ ) y la frecuencia fundamental( $f_{60}$ )”. [4]

#### 2.2.1.3.2. Frecuencia de los armónicos

“Se define como el resultado de multiplicar el número de orden del armónico por la frecuencia fundamental (60 Hz), por ejemplo: [13]

$$3^{\text{ra}} \text{ Armónica } 3 \times 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$$

$$5^{\text{ta}} \text{ Armónica } 5 \times 60 \text{ Hz} = 300 \text{ Hz}$$

$$7^{\text{ma}} \text{ Armónica } 7 \times 60 \text{ Hz} = 420 \text{ Hz}$$

“Las frecuencias de los armónicos que más problemas generan en el flujo de potencia son aquellas que son múltiplos enteros de la fundamental (60 Hz) como son: 120, 180, 240, 300, y 360 Hz y las que siguen sucesivamente, la frecuencia fundamental del sistema es la primera armónica como se muestra en la Fig. 3, donde se muestra la comparación de la onda fundamental junto a las ondas armónicas y la unificación de la dos ondas ya nombradas formando una tercera onda compleja” [14]

“Por otro lado los inter armónicos no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Esto significa que, a diferencia de los armónicos, que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, los inter armónicos pueden tener cualquier valor de frecuencia, tanto entre los



armónicos como fuera de ellos, estos son los que se encuentran en las redes eléctricas de la industria, edificios y explotaciones industriales, etc.” [13]

“Las frecuencias no armónicas (inter-armónicas), por ejemplo 217 Hz, generalmente son generadas e inyectadas al sistema de transmisión y distribución con algún objetivo especial, estos casos son producidos deliberadamente o en algunos casos inadvertidamente.” [14]

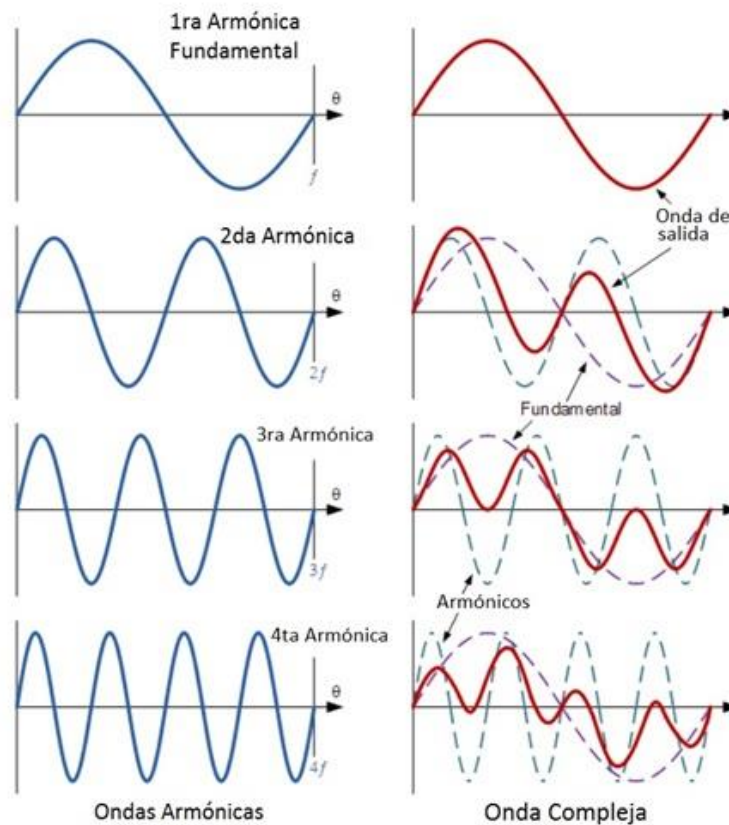


Fig. 3. Onda sinusoidal de la frecuencia fundamental con su 2do, 3ro y 4to armónicos. [15]

### 2.2.1.3.3. Secuencia de los armónicos

En sistemas trifásicos balanceados se toma en cuenta la secuencia de fases, estos armónicos llegan a ser de secuencia positiva, negativa o cero en la frecuencia fundamental.

- Secuencia positiva se encuentran la fundamental junto con las armónicas cuarta, séptima..., puede producir calentamiento de conductores, rotura de circuitos.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



- Secuencia negativa están las armónicas segunda, quinta, octava..., produce un freno, calentamiento de conductores.
- Secuencia homopolar o cero se identifican las armónicas triples (tercera, sexta, novena).

La secuencia positiva y negativa independiente del comportamiento de sus armónicos son igual de perjudiciales unos de los otros.

La secuencia cero al ser múltiplo de la fundamental se desplazan por el neutro, teniendo igual o más corriente que por las fases, por consiguiente, el sobrecalentamiento del neutro, obligando a igualar la sección del neutro al de las fases.

TABLA I  
 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS ARMÓNICOS

Orden	Frecuencia (Hz)	Secuencia
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
7	420	+
8	480	-
9	540	0
...	...	...



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



$n$	$nx60$	$\dots$
-----	--------	---------

Nota: Parámetros para identificar los armónicos más usuales en un sistema eléctrico. [13]

**2.2.1.4. Fuentes de armónicos**

La distorsión de onda llamada armónicas son producidos por cargas no lineales, se nombran algunas de estas cargas productoras de armónicos:

**2.2.1.4.1. Dispositivos electrónicos**

La mayoría de la tecnología moderna se basa en la construcción de sistemas con componentes electrónicos de estado sólido, donde su presencia puede resultar en averías debido a la inyección de corrientes dañinas en los componentes fundamentales. Como resultado, es más probable que los consumidores domésticos experimenten los efectos de estas corrientes parásitas porque utilizan dispositivos como computadoras, televisores, cargadores de baterías, luces LED y otros elementos similares. [16]

**2.2.1.4.2. Conversores Estáticos**

La forma en que operan los convertidores o conmutadores se basa en componentes de "switchero" porque pueden cambiar la energía de un régimen con una frecuencia determinada a otro sistema con una frecuencia diferente. Típicamente, este fenómeno ocurre en una brecha entre la corriente alterna (AC) y corriente continua (CC) donde se incluyen tiristores, diodos y GTO, entre otros, es decir la función principal de estos convertidores es regular el voltaje de salida para mantener un nivel continuo y estable, adaptándose a las necesidades específicas del sistema. El proceso antes mencionado implica que los convertidores aporten directamente flujos de armónica a la red, dos de los convertidores eléctricos más populares, que pueden ser monofásicos o trifásicos. [17]

**2.2.1.4.3. Dispositivos de arco**

Los dispositivos incluyen estaciones de soldadura y lámparas con balastos magnéticos, la corriente aumenta y solo está limitada por la impedancia a lo largo del proceso de producción de un arco, mismo proceso de conceptualización que la arquitectura del dispositivo, se desarrollan respuestas armónicas a la rotación del sistema. La impedancia del sistema de potencia y el



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE ELECTRICIDAD



transformador del horno en conjunto conforman la impedancia condicionante de arco que se produce en el mismo cable del horno, lámparas se crea en el balastro, lo que lleva a resonancias armónicas que sesgan la forma de onda fundamental. [16]

#### 2.2.1.4.4. Dispositivos saturados o ferromagnéticos

La corriente de magnetización de los transformadores es una fuente importante de generación de armónicos; sin embargo, debido a los avances tecnológicos, los transformadores no producen este efecto cuando operan en estado estable, pero en un estado transitorio, la contribución armónica es un problema importante. Se debe a que, en el estado transitorio, el flujo que produce el transformador no es proporcional a la corriente de magnetización, provocando saturación del núcleo y distorsión en la corriente por armónicos impares donde los armónicos homopolares quedan atrapados en el lado delta del transformador deformando la onda fundamental. [16]

“Los dispositivos electrónicos son principales generadores de armónicos debido a la presencia de semiconductores, elementos de conmutación rápida, a continuación, se presenta una lista de equipos industriales generadores de armónicos de corriente o voltaje tomada de [9]

- Hornos de arco y otros elementos de descarga de arco, tales como lámparas fluorescentes. Los hornos de arco se consideran más como generadores de armónicos de voltaje que de corriente. Núcleos magnéticos en transformadores y máquinas rotativas que requieren corriente de tercer armónico para excitar el hierro. La corriente Inrush de los transformadores produce segundo y cuarto armónico.
- Controladores de velocidad ajustables usados en ventiladores, bombas y controladores de procesos.
- Switches en estado sólido que modulan corrientes de control, intensidad de luz, calor, etc. Fuentes controladas para equipos electrónicos.
- Rectificadores basados en diodos o tiristores para equipos de soldadura, cargadores de baterías, etc.
- Compensadores estáticos de potencia reactiva.





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



- Estaciones en DC de transmisión en alto voltaje.
- Convertidores de AC a DC (inversores).

#### **2.2.1.5. Principales armónicos en cargas no lineales**

Se toma en consideración como carga no lineal máquinas rotatorias, controladores de velocidad, compensadores estáticos de vars, hornos de arco, lámparas de descarga y transformadores.

Los transformadores generan armónicos de corriente cuando se opera a los transformadores con un sobrevoltaje, saturándose su núcleo e incrementando la corriente de excitación y las magnitudes de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, y 7<sup>a</sup>, armónica debido a la característica no lineal de su núcleo ferromagnético. [18]

Las lámparas de descarga se basan en un arco eléctrico controlado, por lo que presentan una característica voltaje – corriente altamente no lineal. Las armónicas generadas por este tipo de fuente son predominantemente de 3<sup>a</sup> armónica, debido a que el balastro es un dispositivo ferromagnético que requiere corriente de excitación que contiene 3<sup>a</sup> armónica. [18]

Las máquinas rotatorias presentan armónicas, pero mucho menor que las de los transformadores, las corrientes armónicas se deben principalmente a las variaciones periódicas de velocidad o de carga, los devanados típicos del motor tienen 5 o 7 ranuras por polo, produciendo 5<sup>a</sup> y 7<sup>a</sup> armónicas. El voltaje inducido en el estator es ligeramente deformado y contiene una componente predominante de 3<sup>a</sup> armónica, esto causa que corriente de 3<sup>a</sup> armónica fluya cuando el generador opera bajo carga. [18]

Dentro de controladores de velocidad se encuentran los de corriente alterna y corriente directa. El circuito es un rectificador estático de 6 pulsos que alimenta con D.C. a la armadura del motor cuando los motores a controlar son trifásicos o caso contrario rectificador monofásico si el motor es monofásico, para este tipo de controladores las armónicas predominantes son las impares, y principalmente la 5<sup>a</sup> y la 3<sup>a</sup> armónica para controladores trifásicos y monofásicos respectivamente, esto se debe a que la forma de onda que requieren para su alimentación es no senoidal. [18]



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Los compensadores estáticos de vars controlan voltaje ajustando la cantidad de potencia reactiva suministrada o absorbida del sistema. El CEV usa reactores y capacitores controlados con tiristores. Como los controladores de voltaje operan por fase, estos generan armónicas típicas de convertidores de dos pulsos, en condiciones de desbalance u otras condiciones anormales, podrán también producir armónicas no características. [18]

Estas cargas no lineales tienen en común que generan armónicas de corriente entre ellos las más comunes 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> y 9<sup>a</sup> siendo estas las más predominantes en los sistemas eléctricos en presencia de cargas no lineales.

#### **2.2.1.6. Efectos de los armónicos**

Efecto que producen los armónicos de voltaje se tiene aumento de pérdidas y calentamiento en equipos eléctricos, registro incorrecto en sistemas de control y monitoreo, sobrecalentamiento de equipo rotatorio, transformadores y conductores eléctricos, aumento en niveles de ruido audible de equipos eléctricos, fallas en aislamientos de equipos eléctricos, fallas u operación prematura de dispositivos de protección, deterioro de la operación y confiabilidad del sistema y los equipos. [8]

Los armónicos de corriente también producen efectos en la carga (equipos conectados) como son el sobrecalentamiento y daños en transformadores con baja carga, motores, generadores y balastos electrónicos, corrientes excesivas en neutros conllevando a un cambio en la sección del conductor neutro, operación de protecciones sin causa aparente, fallas en equipos electrónicos., aumento de pérdidas de energía en los equipos eléctricos debido al sobrecalentamiento de los equipos, y como ultimo pero no menos importante el riesgo de incendio y explosiones por existencia de resonancia eléctricas en el sistema eléctrico. [8]

#### **2.2.2. Armónicos con relación a calidad de energía**

A tomar en consideración para calidad de energía de la distribuidora se toma los atributos enunciados en la regulación ARCERNR 002/20 que son calidad de producto, calidad de servicio técnico y calidad de servicio comercial.

Los armónicos son analizados en calidad de producto que también toman en cuenta el nivel de voltaje, Flicker, distorsión de armónicos total e individual y desequilibrio de voltaje.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



“Los límites máximos del factor de distorsión armónica individual de voltaje y del factor de distorsión armónica total de voltaje son los siguientes”. [19]

TABLA II  
 LÍMITES DE ARMÓNICOS DE VOLTAJE (% DEL VOLTAJE NOMINAL)

Nivel de voltaje	Factor de distorsión armónica individual (%)	THD (%)
Bajo Voltaje	5.0	8.0
Medio Voltaje	3.0	5.0
Alto Voltaje (Grupo 1)	1.5	2.5
Alto Voltaje (Grupo 2)	1.0	1.5

Nota: Límites tomados para la evaluación de la calidad de la prestación del servicio de energía eléctrica. [19]

**2.2.3. Métodos de mitigación de armónicos**

Sección donde se revisará los métodos para mitigar o reducir armónicos, métodos ya existentes y aplicados en sistemas eléctricos.

**2.2.3.1. Transformadores**

Los transformadores son un método para la mitigación de armónicos por medio de configuraciones estrella- delta que bloquean el tercer armónico, el noveno, el quinceavo, etc. Esto debido a que, en su lado primario, en la configuración estrella las corrientes armónicas retornan por el neutro de la conexión por lo que en el lado secundario la señal pasa sin estos. También como método de mitigación se utilizan los transformadores como aisladores, como suelen ser transformadores 1:1, la tensión aplicada en el primario se verá en el secundario, la ventaja de aislar una red con transformadores es que las perturbaciones en el lado primario no afectarán al lado secundario, por lo que habrá reducción de corrientes armónica. La desventaja es que estos



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



dispositivos son costosos y tienen diseños intrincados, lo que requiere una cuidadosa consideración de parámetros de diseño para evitar la transmisión de perturbaciones. [9]

**2.2.3.2. Filtro activo**

“Una forma de compensación más sofisticada son los filtros activos de potencia o active power filters (APF) considerado en los últimos años. Los APF tienen entre sus principales ventajas la reducción del contenido armónico y el aumento del factor de potencia.” [20]

“El principio de funcionamiento de los filtros activos es la generación de corrientes y/o voltajes que al sumarse con las corrientes y/o voltajes provenientes de la red anulen las señales y corrientes armónicas.” [9]

La generación de estas corrientes correctivas de armónicos es por medio de inversores monofásicos o trifásicos (CC-CA), por tanto, los elementos para la construcción de estos filtros son dispositivos de conmutación y elementos pasivos. Estos pueden ir en serie para corregir armónicos de voltaje o en paralelo para corregir los armónicos de corriente, para mayor entendimiento se tiene la Fig. 4, que muestra un diagrama donde las corrientes de la carga se denotan con el subíndice L, las de la fuente con el subíndice S y las que inyecta el APF o de compensación con el subíndice C. [9]

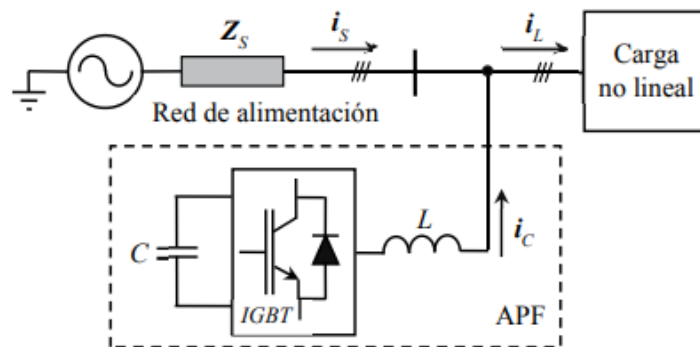


Fig. 4. Diagrama unifilar general de un APF. [20]

**2.2.3.3. Filtro pasivo**

Los filtros pasivos de armónicos son filtros formados por Inductores y Capacitores y en ocasiones resistencia de amortiguamiento configurados para cancelar o atrapar una determinada



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



frecuencia armónica, generalmente de orden bajo ( $5^{\circ}$ ,  $7^{\circ}$ ,  $11^{\circ}$ , ...). Si se necesitará mitigar algunas frecuencias armónicas en la misma instalación, sería necesario añadir algunos filtros pasivos (L,C) regulados a esas frecuencias armónicas. [10]

Estos filtros solo atrapan armónicos de una determinada frecuencia, los filtros pasivos tienen la función de mitigar armónicos solo en un determinado punto de trabajo (por ejemplo, con una determinada carga, es decir que no reducen los armónicos fuera de ese punto de conexión de la carga. Aun así, este método son una solución sencilla, robusta y económica para instalaciones o sistemas “cerrados”, condiciones de funcionamiento repetitivas, como encendido y apagado de motores. [10]

#### **2.2.3.4. Filtro mixto**

“Los filtros mixtos o híbridos componen en su configuración tanto a filtros pasivos, así como filtros activos. Estas combinaciones mejoran la eliminación armónica que puede estar presente en un sistema eléctrico, pues las características de cada filtro se juntan. En la Fig. 5 se muestra un de filtros híbridos, se observa la estructura formada por un filtro activo en paralelo con un filtro pasivo shunt; por otro lado, también se puede apreciar un filtro activo en serie con un filtro pasivo shunt. Estas combinaciones son frecuentemente usadas en controladores de motores y en equipos basados en dispositivos de estado sólido como los convertidores. [16]



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

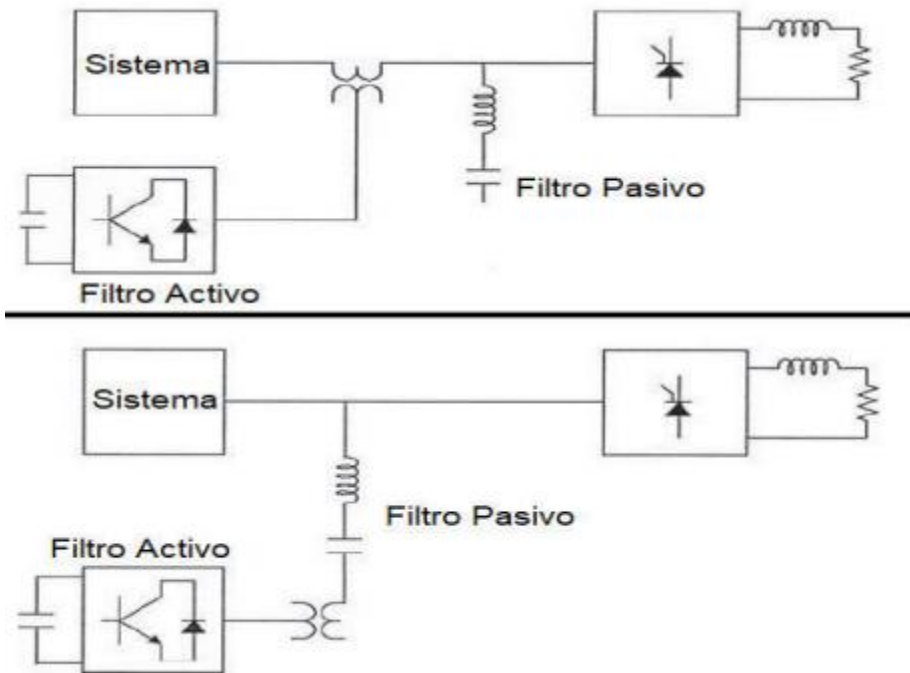


Fig. 5. Filtro mixto. [16]



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



## CAPITULO III

### Materiales y Métodos

En el presente capítulo se abordan los materiales y métodos usados para la realización del trabajo de integración curricular.

#### 3.1. Enfoque y tipo de investigación

Para entrar en una descripción de la metodología se da por sentado el enfoque de la investigación y de que tipo se trata el trabajo de integración curricular desarrollado.

##### 3.1.1. Enfoque cualitativo

La presente investigación adopta un enfoque cualitativo, siguiendo una secuencia estructurada por un conjunto de procesos claramente definidos. Comienza con el planteamiento del problema y la definición de objetivos precisos, continúa con la delimitación de la propuesta y los fundamentos teóricos, y culmina con un plan detallado para probar y solucionar el problema identificado.

##### 3.1.2. Tipo de investigación

En el presente trabajo de integración curricular se emplea una investigación mixta. El **CAPÍTULO II; Error! No se encuentra el origen de la referencia.** utiliza una investigación descriptiva para fundamentar la base teórica y proporcionar una mayor comprensión de la investigación. Esta se complementa con una investigación explicativa en el **CAPÍTULO III**, que detalla la metodología al igual que el **CAPÍTULO IV**, que ofrece una explicación del problema abordado y un análisis de los resultados obtenidos a lo largo de la investigación.

#### 3.2. Materiales, equipos y software

A continuación, se detallan los equipos, software que se utilizaron para la realización de este trabajo de integración curricular:

##### 3.2.1. Motor - generador

El grupo motor-generador se tomó como principal generador de armónicos, compuesto por dos motores de inducción trifásico de tipo jaula de ardilla de la marca Siemens 1LA7 090-4YA60





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



acoplados por medio de un matrimonio flexible como se muestra en la Fig. 6. Además, en la TABLA III se muestra los datos característicos de estos motores.



Fig. 6. Grupo Motor-Generador

TABLA III  
 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL MOTOR

Características del motor	
Voltaje Nominal	220 YY / 440 YD (V)
Frecuencia	60 Hz
Numero de polos	4
Potencia nominal	2 HP
Torque nominal	8.7 Nm
Corriente nominal	7 / 3.5 (A)
Corriente de arranque	4.4



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Velocidad nominal	1645 rpm
Torque de arranque	2.2 Nm
Factor de potencia	0.77
Eficiencia	76.7
Factor de servicio	1.15
Tipo de motor	1LA7 090-4YA60
Peso	11.6 Kg
Tipo de producto	Motor trifásico de jaula de ardilla

Nota: Información de placa del motor usado. [21]

### 3.2.2. Variador de frecuencia o velocidad (VFD)

Un variador de frecuencia (siglas VFD, del inglés: Variable Frequency Drive), es un sistema que se utiliza para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. [22]

Parte de la carga no lineal es el Variador de velocidad marca LS Industrial Systems SV015iG5A-2 mostrado en la Fig. 7 que va acoplado al grupo motor- generador con sus aspectos técnicos detallados.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Fig. 7. Variador de frecuencia. [23]

TABLA IV  
 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL VFD

Datos nominales de entrada	
Numero de fases	1 AC
Voltaje de línea	200 ~ 230VAC (+10%, -15%)
Frecuencia de línea	50-60 Hz (±5%)
Datos nominales de salida	
Numero de fases	3 AC
Voltaje Nominal	200 ~ 230V
Potencia nominal (Alta Sobrecarga)	1.5 kW
Corriente nominal	8 A



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Frecuencia de salida	0.1 ~ 400 Hz
----------------------	--------------

Nota: Información técnica de fabrica del dispositivo. [23]

**3.2.3. Analizador de red METREL PowerQ4 Plus**

De acuerdo con el manual de usuario, es un instrumento multifunción portátil para el análisis de la calidad de energía y mediciones de eficiencia energética donde se tomaron datos pertinentes al tema tratado. Puede medir y registrar armónicos y señalización de la red, con ayuda de un potente registrador se guarda toda esta información en una memoria de 8 MB. Para la Fig. 8 se muestra el aspecto físico de este dispositivo. [24]

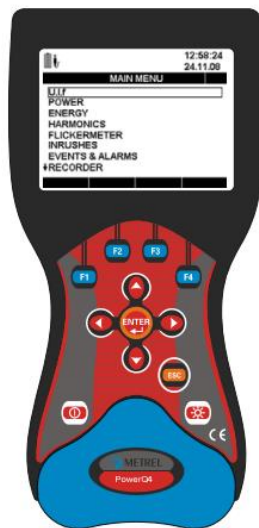


Fig. 8. Analizador de red PowerQ4 Plus. [24]

**3.2.4. PowerView v2.0**

Es un software con una interfaz sencilla y potente para descargar, visualizar y analizar datos medidos con Analizador de red METREL PowerQ4 Plus, específicamente datos relacionados con la calidad de la energía (armónicos). Este software permite al usuario descargar datos del instrumento, generar gráficos y tablas para el análisis de datos, crear informes profesionales, exportar datos a otras aplicaciones como hojas de cálculo y realizar análisis simultáneos de múltiples registros de datos.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



### 3.2.5. Simulink

Matlab es un lenguaje de programación donde permite la creación de algoritmos y modelos complejos, en su caja de herramientas se encuentra SIMULINK que proporciona un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables con un gran número de funciones especiales que ayudan a modelar y simular diversas simulaciones de sistemas lineales y no lineales para sistemas dinámicos.

El uso de este software es de manera fundamental para la simulación del filtro en el sistema eléctrico conectado el motor-generador convirtiendo su enfoque en los sistemas no lineales y manera de mitigarlos.

### 3.2.6. Norma IEEE 519

La norma en cuestión presenta un proceso detallado destinado al diseño de filtros especializados en la mitigación de armónicos. En este contexto, se centra específicamente en la creación de un filtro diseñado para mitigar armónicos de tercer y quinto orden. La norma proporciona ecuaciones fundamentales para el cálculo preciso de los elementos necesarios para dimensionar el filtro, garantizando así su eficacia en la supresión de estas frecuencias no deseadas.

### 3.2.7. Ecuaciones para el diseño del filtro

Para el diseño del filtro pasivo se tomó en consideración las siguientes ecuaciones para el cálculo de los elementos.

Al iniciar el diseño, se consideró el factor de potencia del sistema analizado que de acuerdo con las regulaciones del Operador Nacional de Electricidad (CENACE), el factor de potencia en sistemas eléctricos conectados a la red debe ser mayor a 0,9. Sin embargo, se busca mantenerlo lo más cercano a la unidad para reducir pérdidas y mejorar la eficiencia energética. Por ello, se decidió mejorar el factor de potencia del sistema a 0,93, utilizando la ecuación correspondiente para calcular la compensación reactiva necesaria.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



$$Q_c = P[\tan(\cos^{-1}(FPF_{anterior})) - \tan(\cos^{-1}(FPF_{nuevo}))] \quad (1)$$

Donde:

Q<sub>c</sub>: Potencia reactiva a compensar

FPF: Factor de Potencia de la Fundamental

P: Potencia activa

Una vez calculado la potencia reactiva de compensación se continúa calculando la reactancia efectiva que va a ser dividida a través de los diferentes filtros, esta reactancia representa la impedancia la cual alcanza la resonancia, para luego continuar con el cálculo del capacitor.

$$X_{eff} = \frac{V^2}{Q_c} \quad (2)$$

La Norma IEEE 519 manifiesta que se debe considerar el factor de sintonía que va desde un 3% a un 15% del valor de la frecuencia de sintonización para una correcta operación del filtro que conlleve a un tiempo de vida útil más extenso, para ello se tiene la siguiente ecuación:

$$h = ht \times \frac{100 - fs}{100} \quad (3)$$

h: Orden armónico para el diseño

ht: Orden armónico que se desea mitigar

fs: factor de sintonía en porcentaje (%)

La resonancia ocurre cuando la reactancia inductiva es igual a la reactancia capacitiva, lo que provoca que estas reactancias se cancelen mutuamente, a esta condición se la conoce como reactancia efectiva pero ahora se requiere el cálculo de la reactancia capacitiva.

$$X_c = \left( \frac{h^2}{h^2 - 1} \right) \times X_{eff} \quad (4)$$

Para el cálculo de la capacitancia se tiene que:



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



$$C = \frac{1}{2\pi \times f \times X_C} \quad (5)$$

Para encontrar el valor de la inductancia se realiza de igual manera que la capacitancia, se define primero la reactancia inductiva. Para la frecuencia fundamental se tiene la ecuación de la reactancia:

$$X_{filtro} = X_C - X_L \quad (6)$$

Para la reactancia inductiva se tiene que alcanzar la resonancia donde entra en función el armónico que se quiere mitigar.

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad (7)$$

Una vez que se tiene la reactancia inductiva se tiene la posibilidad de calcular la inductancia por medio de la siguiente ecuación:

$$L = \frac{X_L}{2\pi \times f} \quad (8)$$

Obtenidos los valores tanto del capacitor como del inductor, se procede al cálculo del último parámetro necesario para el filtro que es el factor de calidad Q con ayuda de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad o \quad Q = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (9)$$

### 3.3. Métodos de investigación

Como primer método usado se tiene el método documental en el cual se hizo una revisión bibliográfica buscando referencias relacionadas con el tema de estudio que es armónicos y métodos de mitigación, mediante la recopilación y análisis de una amplia variedad de documentos ayudando a la comprensión de los armónicos presentes en las cargas no lineales y métodos de mitigación de estos para lograr respaldar argumentos, contextualizar la investigación y conseguir el desarrollo de una tesis sólida, bien fundamentada en cuanto a la teoría.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Se realizó un análisis bibliográfico con el propósito de excluir datos de menor importancia, ya sea basado en el año de publicación máximo (5 años) o en la pertinencia de la información es decir que tan importante es conocer la información brindada por la investigación. A través de este proceso, se llevó a cabo la evaluación de los documentos, incluyendo sitios web, publicaciones científicas y libros, que abordan los temas de calidad de energía, armónicos eléctricos y su influencia en la red eléctrica.

En el análisis de los armónicos en el laboratorio de Máquinas Eléctricas, se emplea un enfoque cuantitativo con ayuda del método investigación-acción. Esto se justifica por la recopilación de datos proporcionados por el analizador de red que se conectó a la red y al motor-generador para medir y caracterizar los armónicos presentes en el sistema, estos datos obtenidos se emplearon para la selección de filtro según los armónicos a mitigar, definiendo las especificaciones del filtro, incluyendo las frecuencias de corte, las atenuaciones requeridas para cada armónico y la topología del filtro (activo o pasivo), para una posterior representación en una simulación en Simulink. Esta simulación permitió representar gráficamente las irregularidades de manera más comprensible.

El inicio del proceso de diseño involucró la realización de un exhaustivo análisis bibliográfico. Este análisis se centró en adquirir un conocimiento profundo sobre electrónica de potencia, una base esencial para el diseño del filtro. Para ello, se examinaron tesis y libros especializados que abordan detalladamente el diseño de filtros, proporcionando una comprensión completa de los cálculos realizados mediante ecuaciones específicas. Este método bibliográfico se orientó hacia fuentes que explican con detalle el método experimental y matemático empleado en la creación y desarrollo del filtro.

Para el diseño del filtro se usó el método matemático que con ayuda de cálculos y ecuaciones matemáticas se modeló el comportamiento del filtro, estableciendo las especificaciones del filtro, incluyendo las frecuencias de interés, las magnitudes de atenuación requeridas y cualquier otra característica deseada.





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Para la simulación del filtro diseñado se usó el método experimental basándose en tecnologías computacionales como es Simulink, los resultados de las simulaciones fueron analizados para conocer si el filtro realiza la mitigación de los armónicos en el motor generador, para esto se hizo uso del método analítico que sirvió para verificar el buen funcionamiento de este en cuanto a la mitigación de armónicos junto con todo el sistema que genera estos armónicos.

Por último, se usó el método inductivo para realizar las conclusiones y emitir recomendaciones que permitan ampliar el campo de estudio de los armónicos y las herramientas de mitigación más adecuadas que puedan aplicarse en el laboratorio de máquinas eléctricas para el par motor generador y así poder llegar al objetivo esperado que es mitigación de armónicos con ayuda del filtro.

### **3.4. Procedimiento**

A continuación, se describirá de manera detallada los procesos realizados en este trabajo de integración curricular.

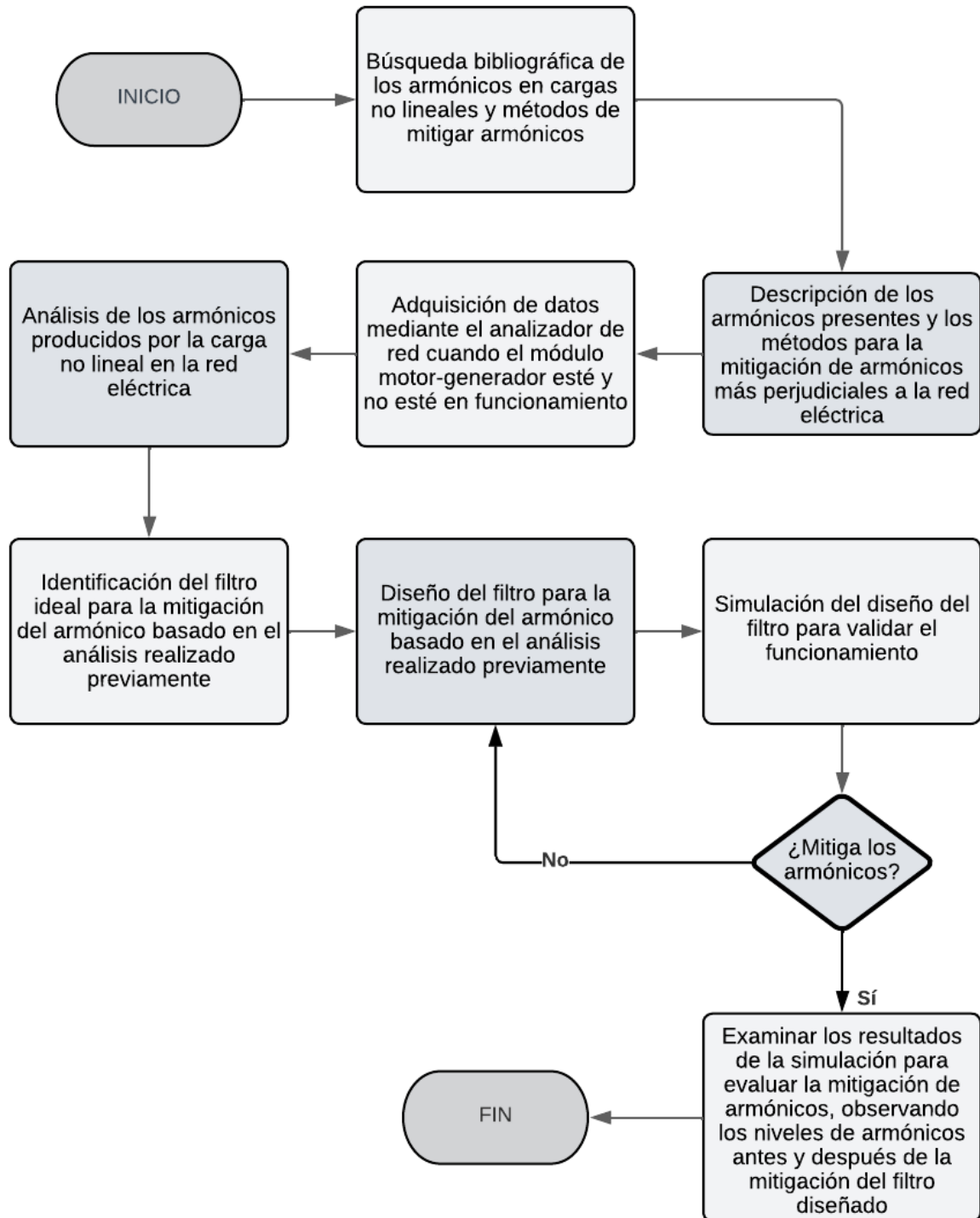


Fig. 9. Flujograma



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



El punto de partida de la investigación consistió en la búsqueda y recopilación de información relacionada con el tema de estudio. Este proceso se fundamentó en el primer objetivo, que se centra en la descripción de los armónicos presentes en cargas no lineales y los métodos de mitigación. Para abordar este objetivo, se llevó a cabo un análisis bibliográfico exhaustivo con el fin de obtener una comprensión profunda de los conceptos clave y las estrategias existentes en relación con los armónicos y sus mitigaciones.

La elaboración del segundo capítulo inició con un análisis de la red eléctrica en el laboratorio de Máquinas Eléctricas en cuanto a calidad de energía, específicamente en torno al Motor-Generador acoplado a un variador de frecuencia. Para llevar a cabo la medición de la calidad de energía, se utilizó el Analizador de Red METREL PowerQ4 Plus. Este dispositivo se conectó a cada fase de la red eléctrica, seleccionando un punto común después de la salida del módulo. La medición se llevó a cabo siguiendo las pautas de la regulación 002/2020 establecida por la Agencia de Regulación y Control de Energías de Recursos Naturales no Renovables (ARCERNNR). Conforme a esta regulación, se implementó el método de toma de datos cada 10 minutos a lo largo de un período de evaluación no inferior a siete días continuos, tanto cuando el motor-generador estaba en funcionamiento como cuando no lo estaba.

La obtención de datos se llevó a cabo mediante el uso del software PowerView v2.0, que facilitó la manipulación eficiente de la información. Este software permitió realizar tareas como la descarga, visualización y análisis de los datos medidos de manera intuitiva. Además, para iniciar el análisis de manera más accesible y comprensible, se exportaron los datos a otro software, en este caso, Excel. Esta transición hacia Excel proporcionó una plataforma familiar y versátil para llevar a cabo un análisis más detallado y efectivo.

Después de la obtención de datos del analizador de red, se llevó a cabo una comparación entre los datos recopilados durante el funcionamiento y apagado módulo. La conclusión de este análisis permitió identificar cuáles son los armónicos más perjudiciales generados por la carga no lineal. Como resultado, se determinó que los armónicos de tercer quinto y séptimo orden eran especialmente problemáticos. En consecuencia, se tomó la decisión de implementar un filtro para mitigar estos armónicos. Tras evaluar diversas opciones, se optó por la instalación de un filtro



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



pasivo como la solución más adecuada para abordar eficazmente los armónicos de tercer, quinto y séptimo orden.

La iniciativa del tercer capítulo involucró el diseño de un filtro pasivo destinado a mitigar armónicos, empleando un método matemático especificado por la norma IEEE 1531. Dicha norma proporciona un proceso detallado para diseño de filtros pasivos, los cuales comúnmente están compuestos por inductores y capacitores, y ocasionalmente por resistencias de amortiguamiento. Estos componentes se ajustan según el algoritmo de la norma para contrarrestar frecuencias armónicas específicas. En el presente caso, el filtro se diseñó para mitigar los armónicos de tercer, quinto y séptimo orden, según lo especificado por el análisis previo de los datos obtenidos del analizador de red.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**CAPITULO IV**  
**Resultados y Análisis**

En el siguiente capítulo se presenta el análisis de la recolección de datos para la identificación de armónicos generados por el variador de frecuencia conectado al motor-generador. Adicionalmente, se describen el diseño y las simulaciones realizadas para la validación y verificación efectiva del filtro pasivo, mostrando su capacidad para mitigar la distorsión armónica total.

**4.1. Análisis de datos obtenidos por el analizador de red**

Para llevar a cabo el análisis y la identificación de armónicos en el sistema eléctrico se tomó en cuenta el método de conexión y medición para terminar escogiendo el mejor filtro que logre mitigar estos armónicos generados.

**4.1.1. Método de medición**

Para iniciar la medición, se tomó como referencia la Fig. 10, en donde se identifica los elementos generadores de armónicos como la conexión del analizador de red. La medición se realizó en un punto donde la señal senoidal de voltaje y corriente no estuviera afectada por otras cargas presentes en la red eléctrica, asegurando así la precisión de los datos obtenidos. Cabe mencionar que el sistema trifásico de 4 hilos con protección a tierra.

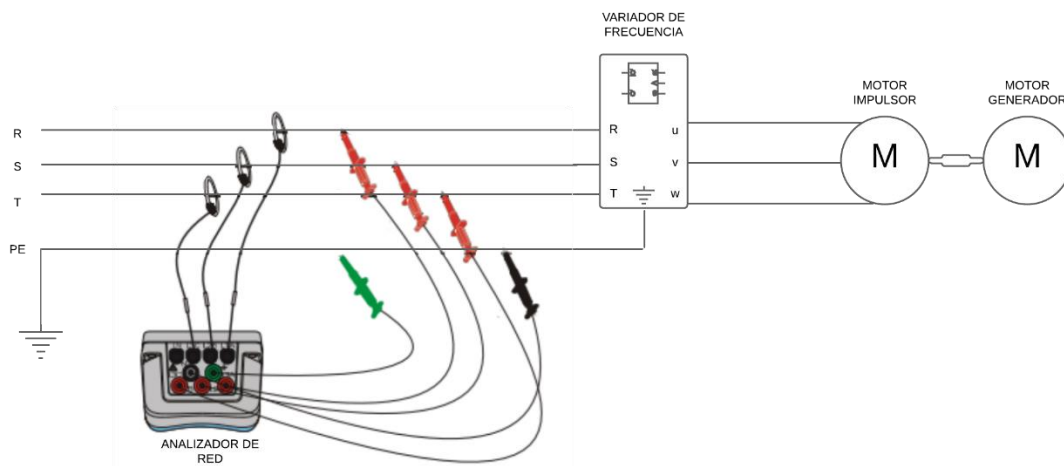


Fig. 10. Conexión del analizador de red



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE ELECTRICIDAD



En la Fig. 11 se muestra la conexión del analizador de red en el tablero eléctrico para la medición donde las pinzas de cocodrilo rojas miden voltaje, las pinzas azules flexibles miden corriente y son conectadas a las fases R, S y T anteriormente ya identificadas, y las pinzas verde y negra conectadas al cable de protección eléctrica.



Fig. 11. Conexión del analizador de red en el laboratorio de Máquinas Eléctricas

#### 4.2. Análisis de la medición

Para el análisis de armónicos, se recopilaron los datos mediante el analizador de red y se procesaron en el software PowerView. Estos datos muestran los valores del THDv (Total Harmonic Distortion de voltaje) y THDi (Total Harmonic Distortion de corriente) en porcentajes. Estos porcentajes son cruciales para seleccionar el filtro más adecuado para mitigar los armónicos presentes en el sistema eléctrico.

Para interpretar adecuadamente los resultados obtenidos por el analizador de red, se tuvo los porcentajes de armónicos presentes en cada fase del sistema trifásico. Sin embargo, para un análisis más preciso, se realizó un promedio de las tres fases, obteniendo un valor de THD (Distorsión Armónica Total) representativo de todo el sistema. Este valor promedio sirvió como base para el diseño del filtro, cuyo objetivo es mitigar los armónicos presentes en el sistema trifásico completo, reduciendo la distorsión total y mejorando la calidad de energía en cada línea.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



En la Fig. 12 se observa el THD promedio de las tres líneas, con respecto al voltaje no supera los límites admitidos por la Regulación ARCERNNR 002/20 donde el límite admisible no debe ser mayor al 8% por lo que el THDv está completamente correcto ya que no incumple con esta regulación.

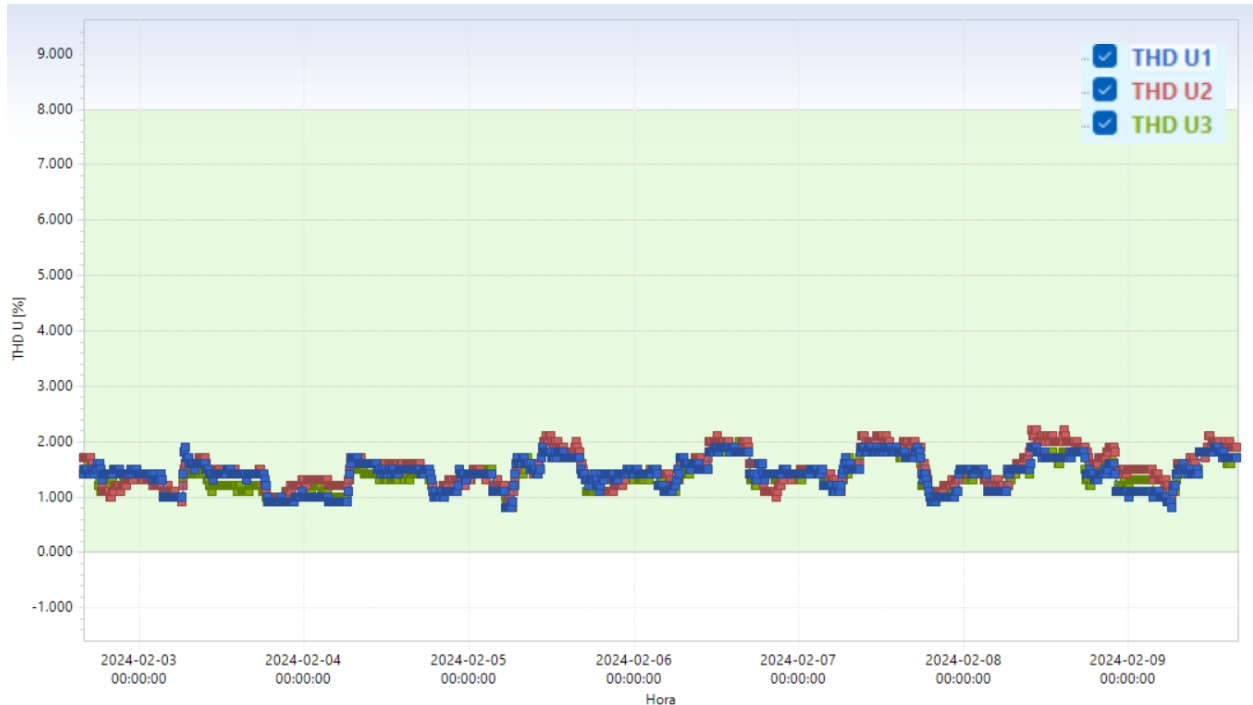


Fig. 12. THDv (%) en las fases L1, L2 Y L3

En la Fig. 13 se muestran los porcentajes de THD de corriente para las 3 fases, en donde se identifica los porcentajes para cada línea además de un promedio del 73,429% que presentan que la carga es no lineal por la gran distorsión armónica de corriente que existe en el sistema eléctrico.

El uso del variador de frecuencia provoca fluctuaciones en la corriente, lo que genera variaciones en los porcentajes de armónicos entre fases. Estas variaciones dependen de la carga desbalanceada en cada fase, ya que el variador ajusta la frecuencia y corriente para cumplir con los requerimientos del sistema. En consecuencia, la fase más sobrecargada tiende a experimentar un mayor nivel de distorsión armónica.





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

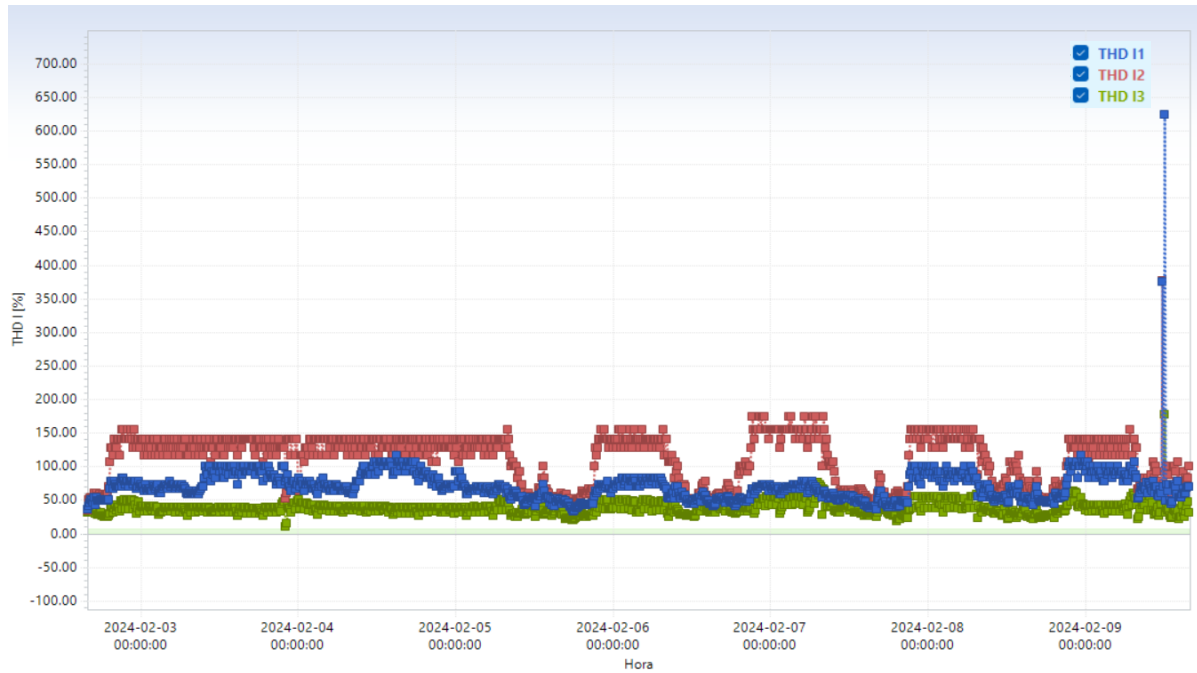


Fig. 13. THDi (%) en las fases L1, L2 Y L3

Para una mejor visualización, la TABLA V presenta los armónicos predominantes en cada línea desde el tercer armónico hasta quinceavo armónico, mostrando los porcentajes registrados por el analizador de red durante el estudio del sistema trifásico.

TABLA V  
 PORCENTAJE DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE PARA CADA LÍNEA

FASES	PORCENTAJE ARMÓNICOS DE CORRIENTE							THD
	3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°	
L1	25.0863	18.1793	14.7247	8.7257	4.6878	3.7653	2.8023	70.7482
L2	35.2294	31.4579	23.6439	17.6387	12.6060	11.7555	10.7483	111.2998
L3	26.3463	9.8016	3.1552	0.3346	0.5016	0.5187	0.2444	38.2394

En la Fig. 14 se exhibe un espectro armónico de corriente promedio de todo el sistema eléctrico trifásico desde el 1° armónico (fundamental) hasta el 39° armónico de corriente por lo que se puede decir que la carga estudiada en no lineal por la gran distorsión que existe para la onda senoidal en cuanto a corriente.





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

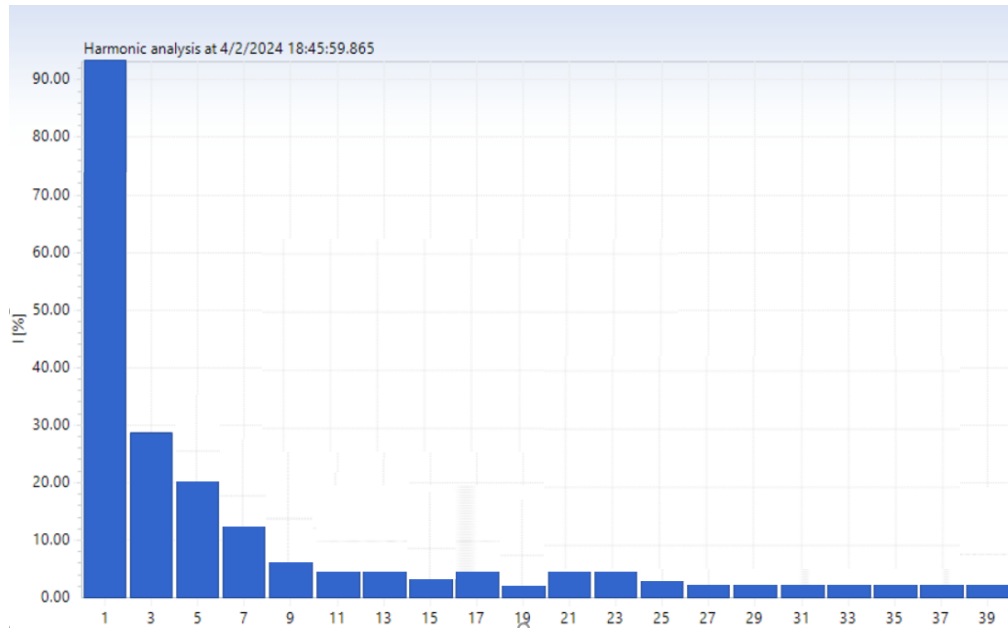


Fig. 14. Espectro de armónicos resultante de corriente

Los resultados mostraron una presencia significativa de armónicos, específicamente el tercer, quinto y séptimo armónico de corriente, con niveles que exceden los valores recomendados para un funcionamiento óptimo del sistema trifásico. A continuación, se presenta en la TABLA VI los porcentajes de estos armónicos.

TABLA VI  
 PORCENTAJES DE LOS ARMÓNICOS INDIVIDUALES PROMEDIO

Orden del armónico	Porcentaje del armónico
1	100 %
3	28.63 %
5	19.65 %



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



7	15.51 %
9	9.36 %
11	6.12 %
13	5.93 %
15	4.65 %

La presencia del tercer, quinto y séptimo armónico en niveles elevados indica un problema en este sistema eléctrico además de ser significativos pueden causar varios problemas operativos.

**4.3. Elección del filtro para la mitigación de armónicos**

Una vez identificados los armónicos de corriente presentes en el sistema eléctrico, se analizan los porcentajes más elevados para determinar el filtro más adecuado que pueda mitigar eficazmente estos armónicos.

Tercer Armónico (180 Hz con la frecuencia fundamental de 60 HZ)

Quinto Armónico (300 Hz con la frecuencia fundamental de 60 Hz)

Séptimo Armónico (420 Hz con la frecuencia fundamental de 60 Hz)

Se eligió un filtro pasivo entre los tipos de filtros que existen para mitigar los armónicos de corriente previstos, debido a que los porcentajes de distorsión de los armónicos 3°, 5° y 7° son 28.63 %, 19.65 % y 15.51 % respectivamente dentro del THD promedio de las tres fases. Estas magnitudes relativamente altas sugieren que los armónicos son consistentes y predecibles, características para las cuales los filtros pasivos son especialmente eficaces. Además, los filtros pasivos suelen ser más económicos y tienen una menor complejidad de mantenimiento en



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



comparación con los filtros activos, lo que los convierte en una opción práctica y eficiente para este tipo de aplicación.

Ahora bien, para diseñar un filtro pasivo, se suelen utilizar configuraciones en serie o en paralelo. Las configuraciones más versátiles para este tipo de armónicos son:

**Filtro de Paso Bajo:** Atenúa todos los armónicos por encima de una frecuencia de corte.

**Filtro Sintonizado:** Se ajusta específicamente a una frecuencia armónica, como un filtro para el tercer armónico o quinto armónico.

Se optó por seleccionar el filtro pasivo sintonizado debido a su versatilidad para ser instalado tanto en serie como en paralelo. Este tipo de filtro permite ajustar la atenuación de armónicos al incorporar resistencias pasando de ser un filtro LC a un filtro RLC, esto facilita la mitigación de una amplia variedad de armónicos presentes en el sistema trifásico. Además, su capacidad de adaptación lo convierte en una solución eficaz para mejorar la calidad de la energía eléctrica.

#### **4.3.1. Diseño del filtro pasivo**

Según la normativa ARCERNNR, el factor de potencia en redes de distribución debe ser de al menos 0,92. Por lo tanto, se decidió mejorar el factor de potencia del motor, que originalmente era de 0,77, elevándolo a un valor de 0,93 para cumplir con los estándares establecidos.

Se consideró el sistema eléctrico como un sistema trifásico para el diseño del filtro, con el objetivo de mejorar el factor de potencia del conjunto. Partiendo de una potencia nominal de 1,5 kW y aplicando los valores en la ecuación de compensación reactiva, se obtuvo un valor de 811,51 Var, que será distribuido entre los distintos filtros pasivos.

Continuando con el diseño del filtro pasivo se tiene valores para los diferentes elementos dependiendo el armónico que se quiere mitigar y aquí están los valores calculados:



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Filtro Pasivo Sintonizado para Tercer Armónico:**

- Capacitor (C3): 44  $\mu\text{F}$
- Inductor (L3): 25 mH

**Filtro Pasivo Sintonizado para Quinto Armónico:**

- Capacitor (C5): 42,27  $\mu\text{F}$
- Inductor (L5): 8,22 mH

**Filtro Pasivo Sintonizado para Séptimo Armónico:**

- Capacitor (C7): 43,35  $\mu\text{F}$
- Inductor (L7): 4,09 mH

**Conexión de los filtros en el sistema**

Para la conexión del filtro pasivo, se priorizó la efectividad en la mitigación de armónicos. Se decidió una configuración en paralelo para los filtros sintonizados, los cuales se conectaron en paralelo con la carga y están diseñados para desviar los armónicos específicos hacia tierra, evitando que circulen por el sistema eléctrico. Esta conexión permite que los filtros sintonizados se ajusten a las frecuencias específicas de los armónicos que se desean mitigar, en este caso, el 3°, 5° y 7°, absorbiendo estas corrientes indeseadas y minimizando su impacto en el resto del sistema.

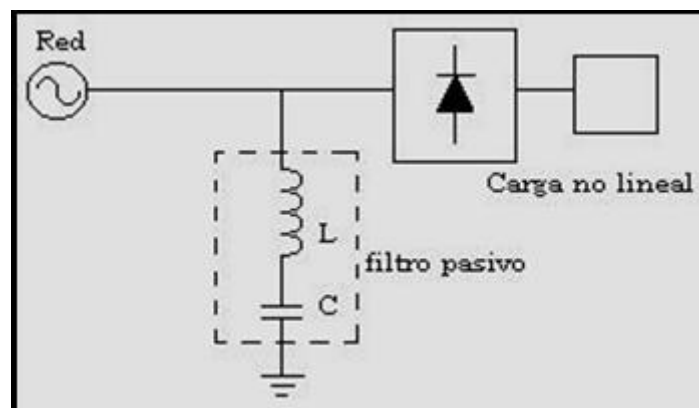


Fig. 15. Conexión en paralelo de filtros sintonizados [25]



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**4.4. Modelamiento del sistema eléctrico**

Para el modelamiento del sistema, se consideraron valores reales obtenidos a partir de mediciones directas y datos precisos de las hojas de especificaciones técnicas de los equipos involucrados. Este enfoque garantiza que la simulación refleje de manera fiel los comportamientos y resultados esperados en un entorno real, logrando así que los valores obtenidos sean lo más cercanos posible a la realidad. En la Fig. 16 se muestra el sistema completo modelado a través de Simulink.

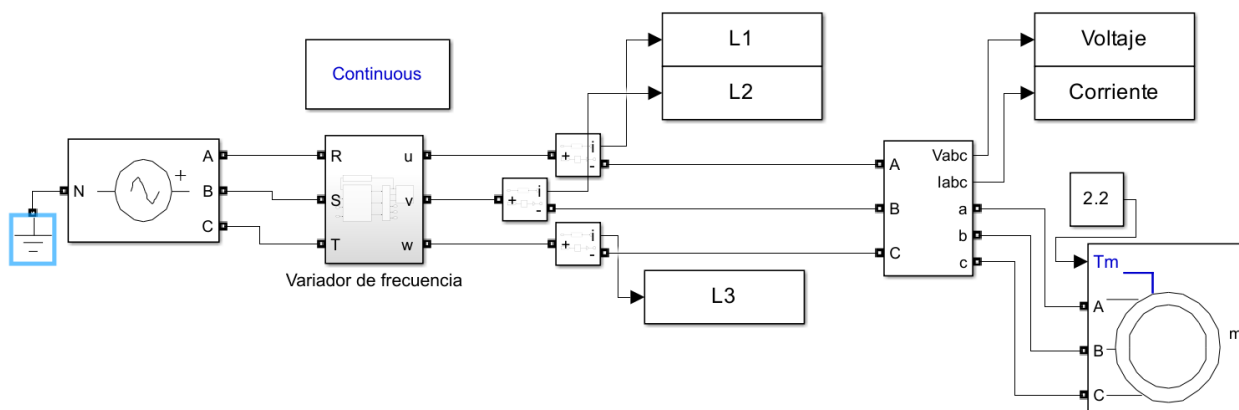


Fig. 16. Circuito base del motor-generador con variador de frecuencia

Se inicia con una fuente de alimentación trifásica, la cual genera voltajes de línea a línea de 220v con sus respectivos desfases para alimentar el sistema. Para modelar el variador de frecuencia, se diseñó un subsistema que simula su funcionamiento. En la Fig. 17 se muestra el subsistema del variador de frecuencia que incluye un circuito que realiza la rectificación de la corriente alterna, un filtro para suavizar la corriente continua y un inversor que reconvierte la corriente continua a alterna mostrado en la Fig. 18 con un controlador PWM que permite variar la frecuencia de salida según las necesidades del sistema exhibido en la Fig. 19, ya sea incrementándola o disminuyéndola, además de una carga que simule las pérdidas que existen en el variador de frecuencia.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

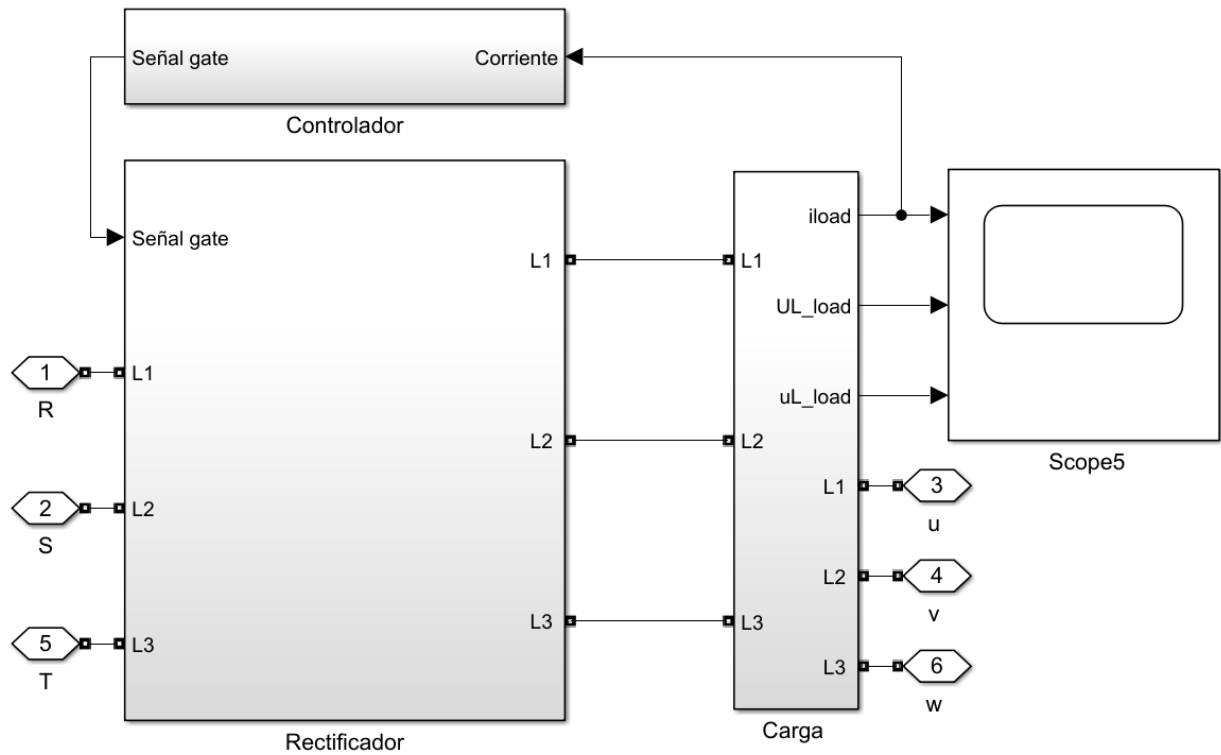


Fig. 17. Variador de frecuencia desarrollado en Simulink



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

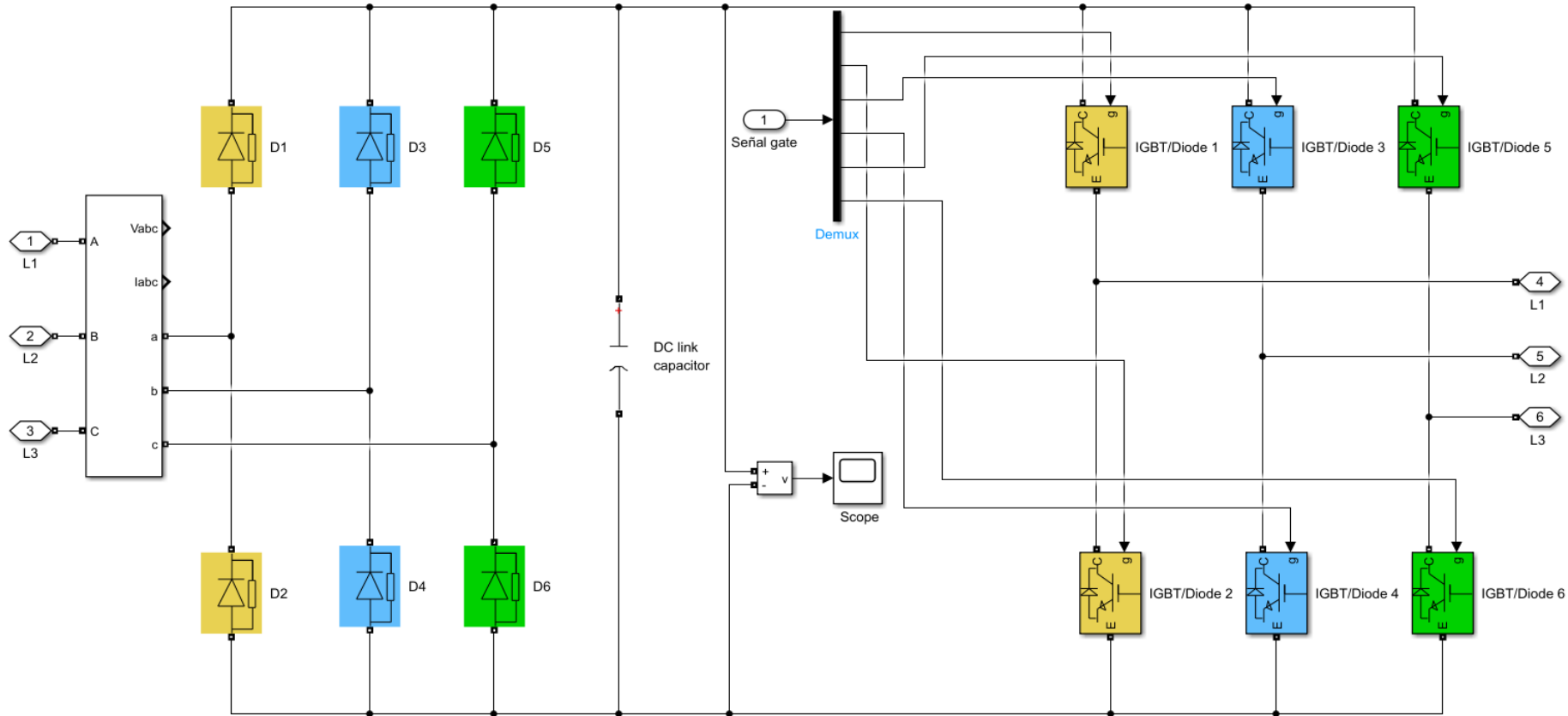


Fig. 18. Rectificador, filtro CD e inversor del variador de frecuencia desarrollado en Simulink



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

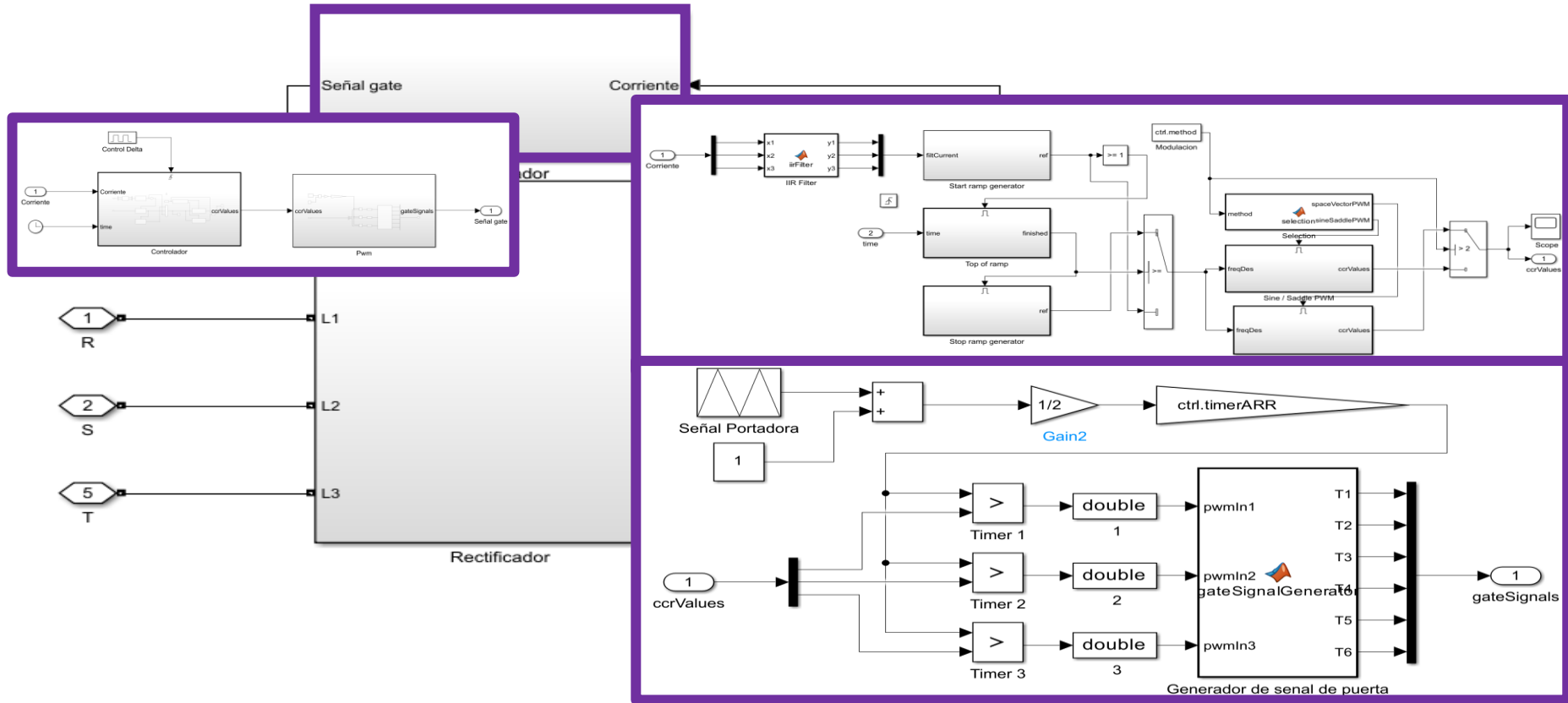


Fig. 19. Controlador y generador PWM del variador de frecuencia desarrollado en simulink





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



El motor conectado a la salida del variador de frecuencia es alimentado por las tensiones trifásicas moduladas donde su funcionamiento está directamente relacionado con las señales de salida del variador de frecuencia. Además de ingresar parámetros necesarios como resistencia e inductancia del rotor y estator, inductancia mutua, inercia, y factor de fricción con valores obtenidos del datasheet del motor expuesto en la Fig. 20.

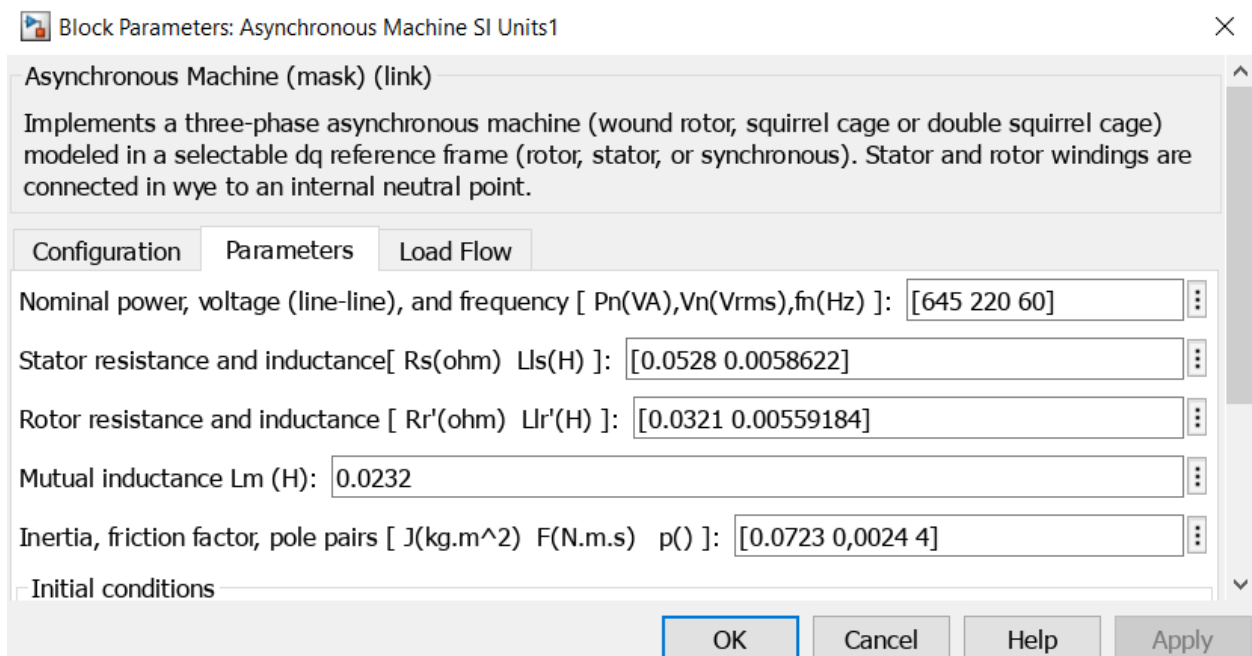


Fig. 20. Parámetros generales del motor-generador

Para una pequeña verificación del funcionamiento del motor generador, se realizan mediciones RMS tanto de corriente como de voltaje mediante bloques de medición. Estas mediciones son fundamentales para evaluar el rendimiento del sistema y garantizar que opere dentro de los parámetros deseados, mediciones como los voltajes y corrientes de arranque similares a los valores reales. Los resultados presentados en la Fig. 22 y en la Fig. 22 muestran una corriente elevada durante el arranque del motor, causada por el par de arranque necesario para iniciar su funcionamiento. Posteriormente, la corriente se estabiliza y se mantiene constante en todas las fases a medida que el motor alcanza su régimen de operación.

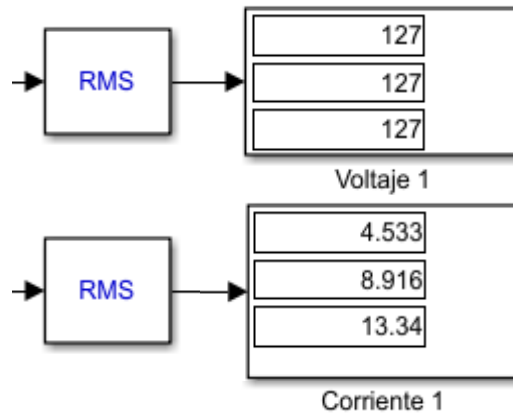


Fig. 21. Medición de voltaje y corriente del motor-generator

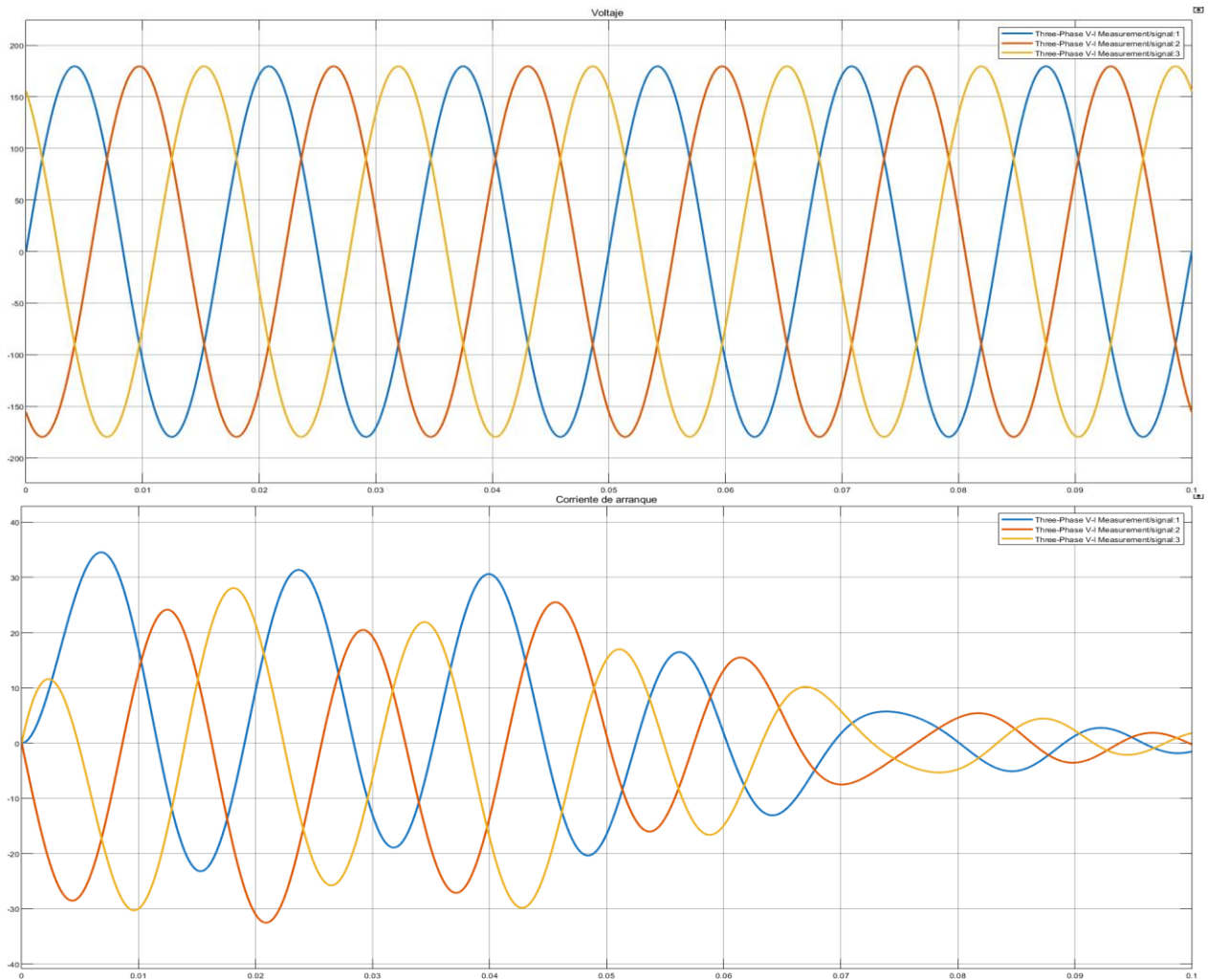


Fig. 22. Ondas de voltaje y corriente durante el arranque del motor



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**4.4.1. Simulación de la carga no lineal**

Durante la fase de simulación del sistema motor-generator acoplado al variador de frecuencia utilizando Simulink, se encontró que los siguientes resultados:

En la Fig. 23 se presenta el espectro de armónicos de voltaje promedio al tomar como sistema trifásico, donde se observa un THD (Distorsión Armónica Total) de 3.06% marcado con un recuadro rojo. Este valor indica que los armónicos presentes en el sistema tienen un porcentaje muy bajo, lo que significa que su influencia es mínima y no representa un riesgo significativo para el rendimiento del sistema. La distribución de los armónicos es tal que no generan distorsiones notables en la forma de onda del voltaje, permitiendo así que el sistema funcione de manera eficiente. Este bajo nivel de armónicos es un indicador positivo, ya que asegura que el sistema eléctrico opera dentro de los límites aceptables.

Para entender mejor los porcentajes se enmarca en recuadros de colores, rojo para THD, amarillo para el tercer armónico, verde para el quinto armónico, naranja para el séptimo armónico para que sea más fácil visualizar los porcentajes dentro de las diferentes figuras.

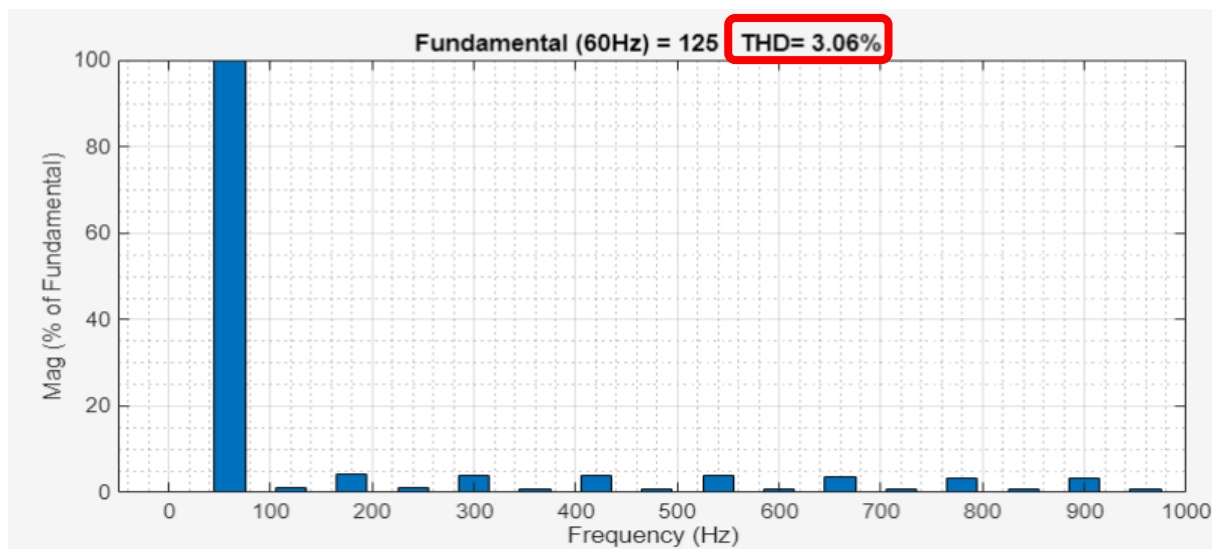


Fig. 23. Espectro de armónicos de voltaje asociado a la simulación

En la Fig. 24 se presenta el espectro de armónicos de corriente promedio de todo el sistema trifásico, donde se destaca un THD (Distorsión Armónica Total) del 41.24%. Existe una presencia



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



significativa de armónicos en el sistema, particularmente los de orden 3°, 5° y 7°, estos armónicos son los principales contribuyentes a la distorsión observada y coinciden bastante con los valores obtenidos a través del análisis al sistema real del motor-generador conectado al variador de frecuencia mediante el analizador de red. La presencia de estos armónicos en niveles tan altos puede afectar el desempeño del sistema, generando efectos negativos como sobrecalentamiento, pérdida de eficiencia y posibles daños a los equipos. Por lo tanto, este análisis subraya la necesidad de implementar medidas correctivas como lo es un filtro pasivo.

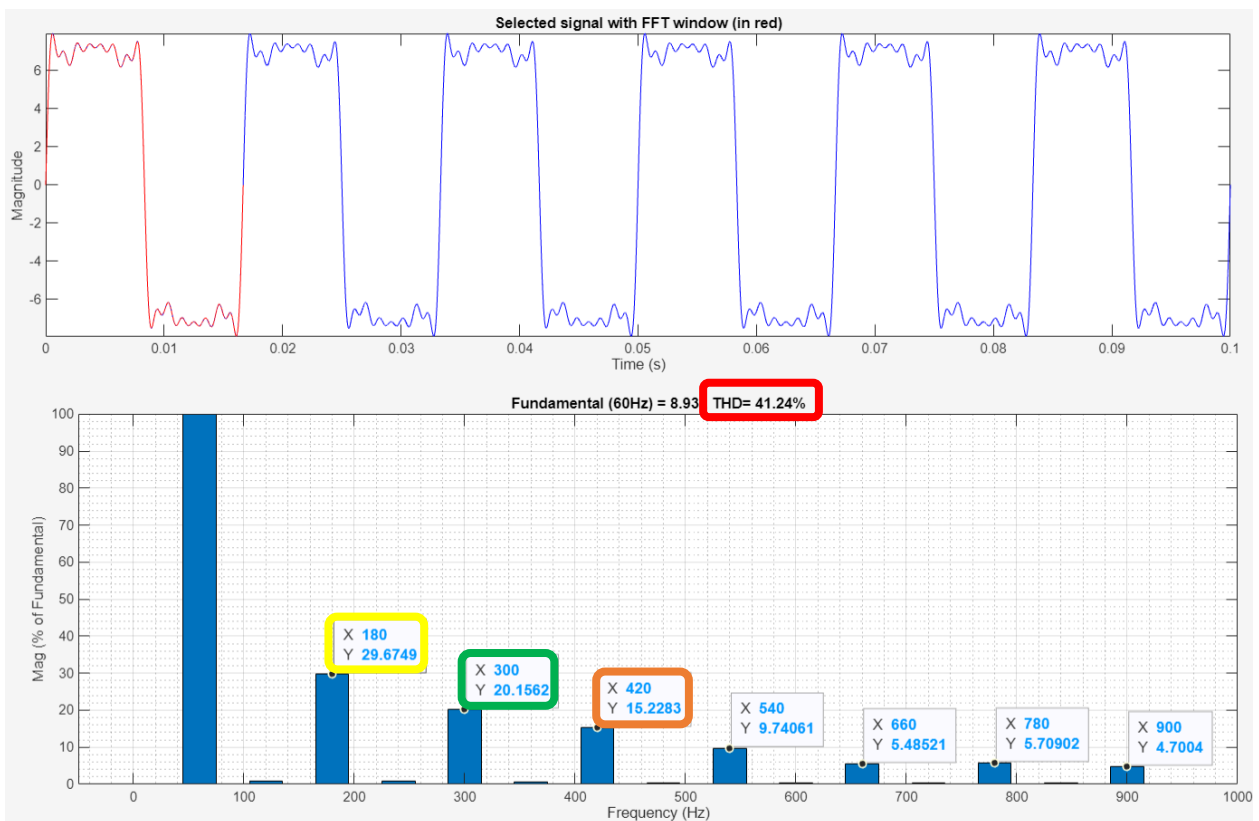


Fig. 24. Espectro de armónicos de corriente asociado a la simulación



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



TABLA VII  
 COMPARACIÓN PORCENTAJES PROMEDIO REAL VS SIMULACIÓN

Orden del armónico	Datos Obtenidos	
	Analizador de red	Simulación
3	28.63 %	29.67%
5	19.65 %	20.15%
7	15.51 %	15.22%
9	9.36 %	9.74%
11	6.12 %	5.48%
13	5.93 %	5.70%
15	4.65%	4.70%

Para identificar claramente los armónicos presentes en cada línea, se presenta un análisis del espectro de armónicos. En la Fig. 25, se tiene la línea 1 donde se observa que el tercer armónico tiene una frecuencia de 180 Hz y representa el 24.32% respecto a la fundamental. El quinto armónico, con una frecuencia de 300 Hz, muestra un 19.10%, mientras que el séptimo armónico alcanza un 14.8% en la frecuencia de 420 Hz. Para la línea 2 se tiene la Fig. 26, se destacan los armónicos con mayor presencia: el tercero, quinto y séptimo, con frecuencias de 180 Hz, 300 Hz y 420 Hz respectivamente, y con porcentajes de 35.23%, 30.78% y 23.63% en ese orden. Por último, en la línea 3, en la Fig. 27, se identifican con mayor porcentaje en el tercer, quinto y séptimo armónico, alcanzando valores de 20.34%, 9.15% y 8.14% respectivamente, aunque los armónicos son menos pronunciados. A lo largo de estas tres figuras, se observa que los armónicos de 3°, 5° y 7° orden son predominantes, aunque los niveles varían según la línea analizada. Estos resultados coinciden con las mediciones obtenidas en el diagnóstico real realizado mediante el analizador de red, validando la precisión del análisis espectral.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

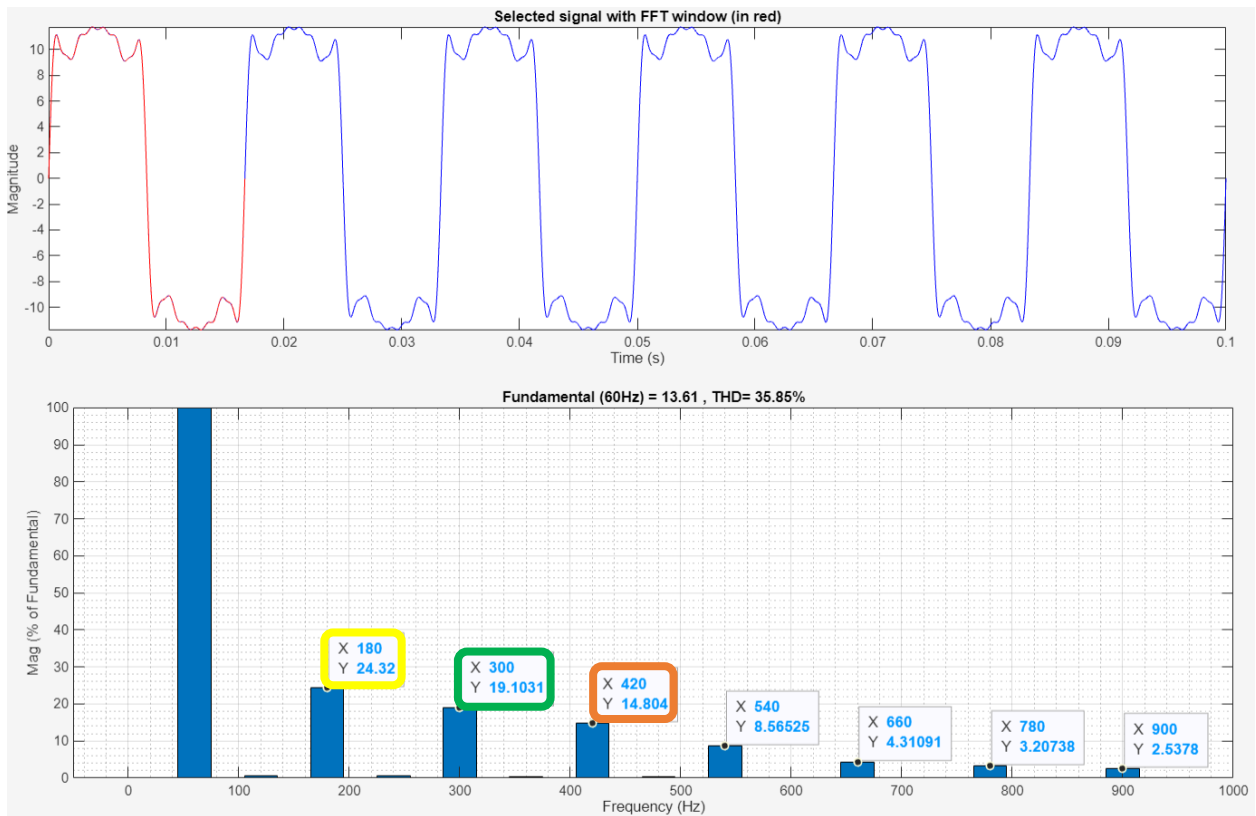


Fig. 25. Espectro de armónicos de corriente de la Línea 1



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

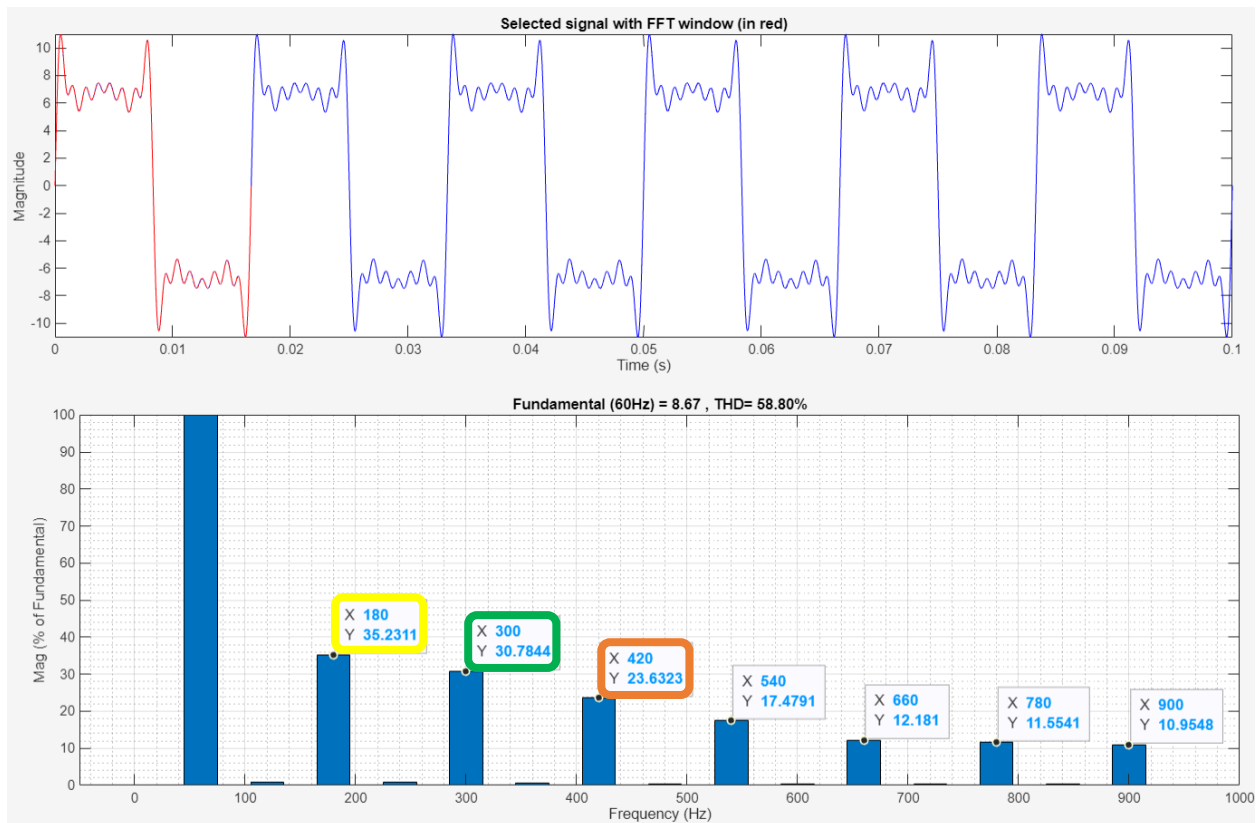


Fig. 26. Espectro de armónicos de corriente de la Línea 2





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

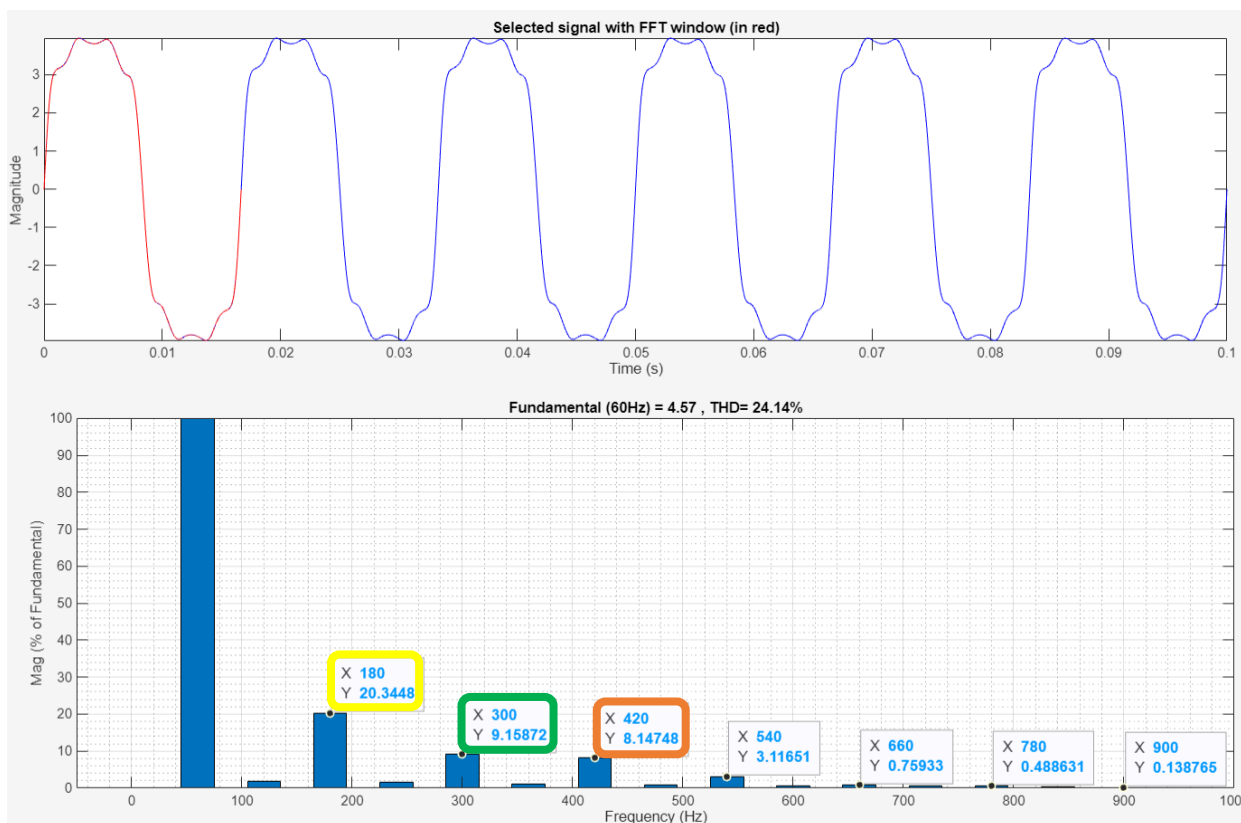


Fig. 27. Espectro de armónicos de corriente de la Línea 3

#### 4.5. Simulación de los filtros pasivos con la carga no lineal

En la Fig. 28 se presenta el sistema base, que ha sido modelado utilizando Simulink, con una actualización significativa: se han integrado tres filtros pasivos, cada uno diseñado y sintonizado específicamente para mitigar los armónicos de tercer, quinto y séptimo orden. Estos filtros se ajustan a los parámetros que se ilustran en las Fig. 29, Fig. 30 y Fig. 31 respectivamente. Los valores de los componentes de los filtros han sido calculados cuidadosamente y seleccionados en base a elementos disponibles en el mercado. Este enfoque asegura que los filtros no solo sean teóricamente efectivos, sino que también sean lo más realistas posible para una futura implementación práctica. La selección de componentes comerciales facilita la viabilidad y aplicación de estos filtros en sistemas reales, ofreciendo una representación precisa de cómo se comportarán en un entorno operativo real. Así, se busca que el modelo no solo sea una simulación idealizada, sino que también refleje fielmente las condiciones y limitaciones del mundo real.





# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

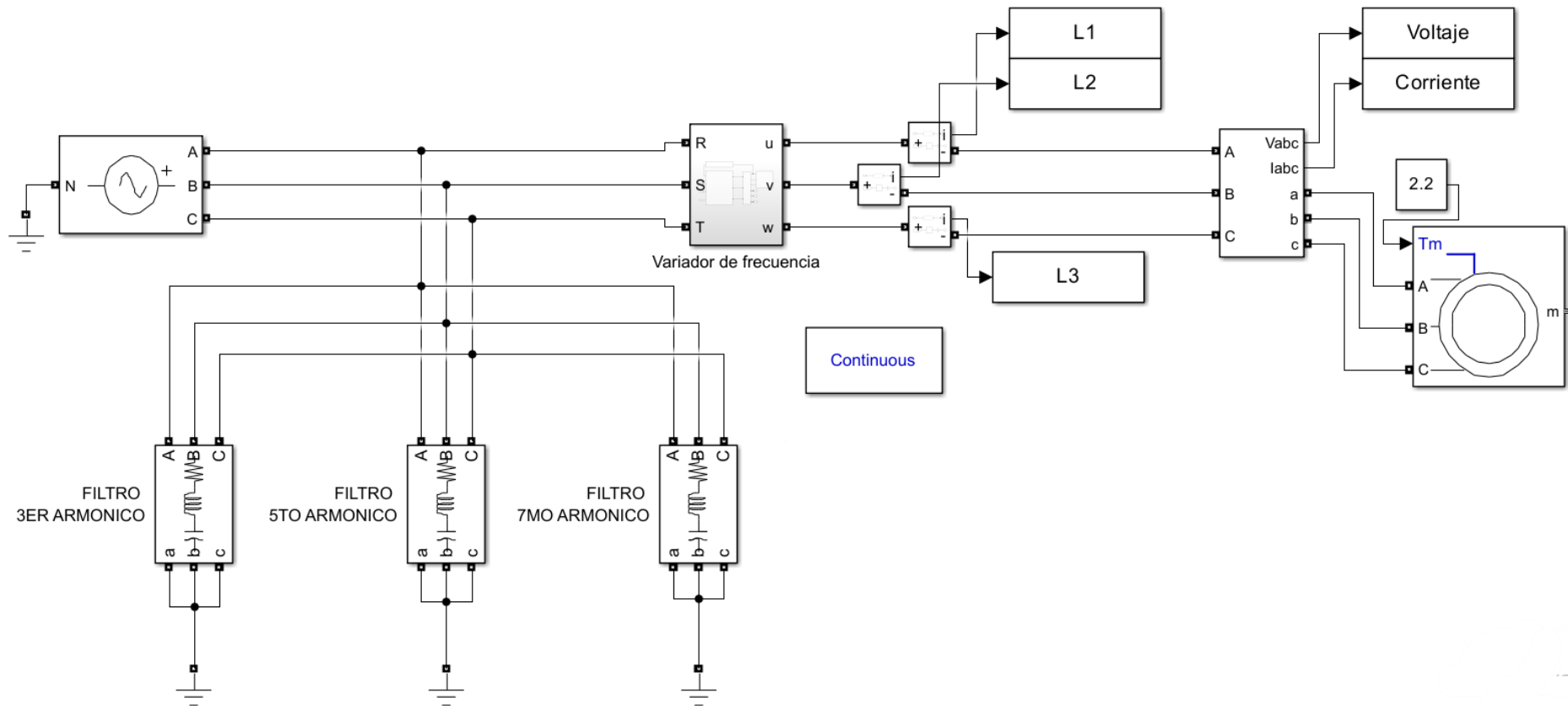


Fig. 28. Simulación de los filtros pasivos en paralelo con la carga no lineal



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Parameters

Branch type: LC

Inductance (H):  
 25e-3

Set the initial inductor current

Capacitance (F):  
 47e-6

Fig. 29. Parámetros para el filtro pasivo de 3er orden

Parameters

Branch type: LC

Inductance (H):  
 8e-3

Set the initial inductor current

Capacitance (F):  
 47e-6

Fig. 30. Parámetros para el filtro pasivo de 5to orden

Parameters

Branch type: LC

Inductance (H):  
 4e-3

Set the initial inductor current

Capacitance (F):  
 47e-6

Fig. 31. Parámetros para el filtro pasivo de 7mo orden

Se inicia el proceso de simulación conectando el filtro diseñado para mitigar el tercer armónico. Esta etapa permite evaluar su impacto en el sistema mediante la observación del espectro de armónicos de corriente promedio de todo el sistema trifásico. La Fig. 32 ilustra la reducción del tercer armónico después de la instalación de un filtro pasivo específico para dicho armónico. Inicialmente, el tercer armónico representaba un 29.67% del total mostrado en la Fig. 24, pero tras la instalación del filtro, este valor disminuyó a un 6.11%. Además, la distorsión



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



armónica total (THD) también experimentó una mejora significativa, reduciéndose del 41.24% original al 28.11% que se muestra en el gráfico. Esta reducción indica una mejora notable en la calidad de la señal, disminuyendo la distorsión en la onda de corriente y confirmando la efectividad del filtro en la reducción de armónicos.

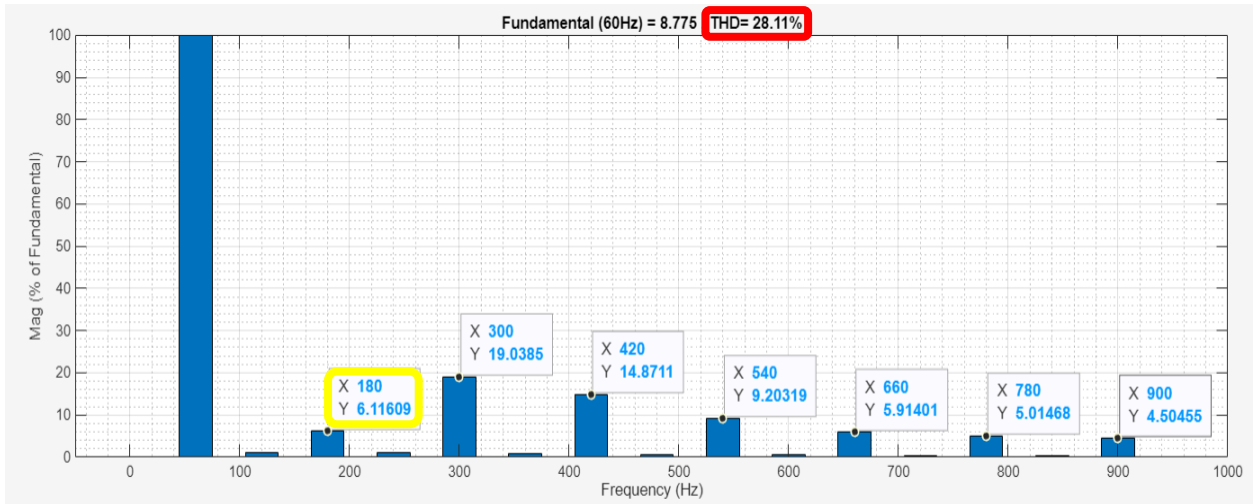


Fig. 32. Espectro de armónicos de corriente con el filtro pasivo sintonizado para el tercer armónico

Para avanzar en el proceso de mitigación de armónicos, se procedió a conectar el filtro que ha sido sintonizado específicamente para el quinto armónico. Esta fase de la simulación permite evaluar la efectividad del filtro en la reducción del armónico objetivo. Tras la conexión de este filtro, se observó en la Fig. 33 una disminución significativa en la magnitud del quinto armónico, pasando de un 20.15% a un 4.04%. Además, la distorsión armónica total de corriente promedio del sistema también experimentó una mejora notable, con una reducción del 35.16%.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

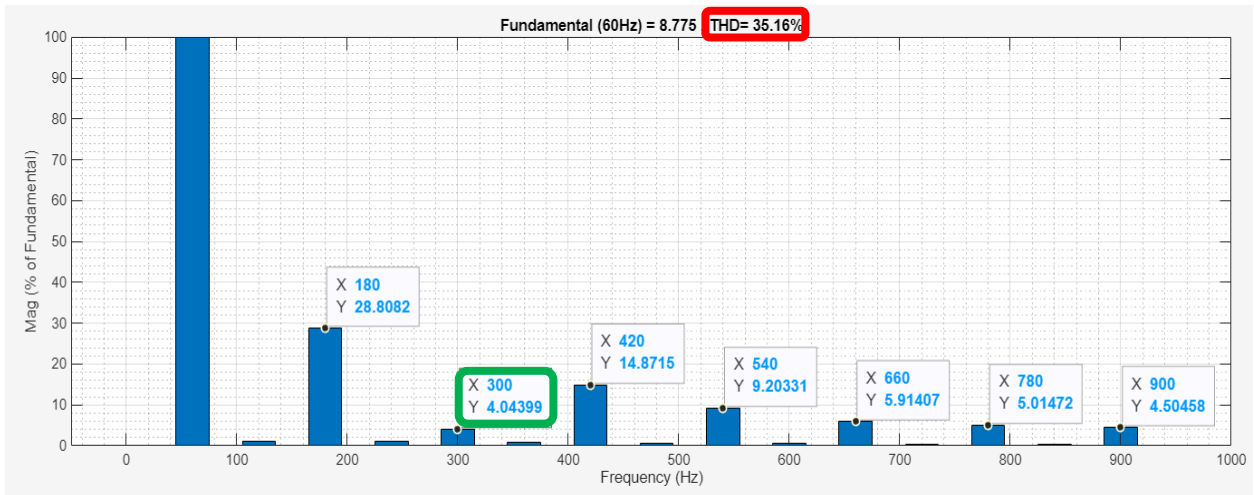


Fig. 33. Espectro de armónicos de corriente con el filtro pasivo sintonizado para el quinto armónico

Avanzando en el proceso de mitigación, se implementó un filtro diseñado específicamente para el séptimo armónico. Los resultados mostrados en la Fig. 34 fueron notables, mostrando una reducción significativa en la distorsión armónica total (THD) promedio del sistema, que se situó en 36.62%. En lo que respecta al séptimo armónico, la disminución fue aún más destacada, reduciéndose del 15.22% a solo 1.58%. Este resultado demuestra de manera concluyente la efectividad del filtro en la mitigación del armónico específico, subrayando un enfoque integral y preciso para el control de los armónicos en el sistema.

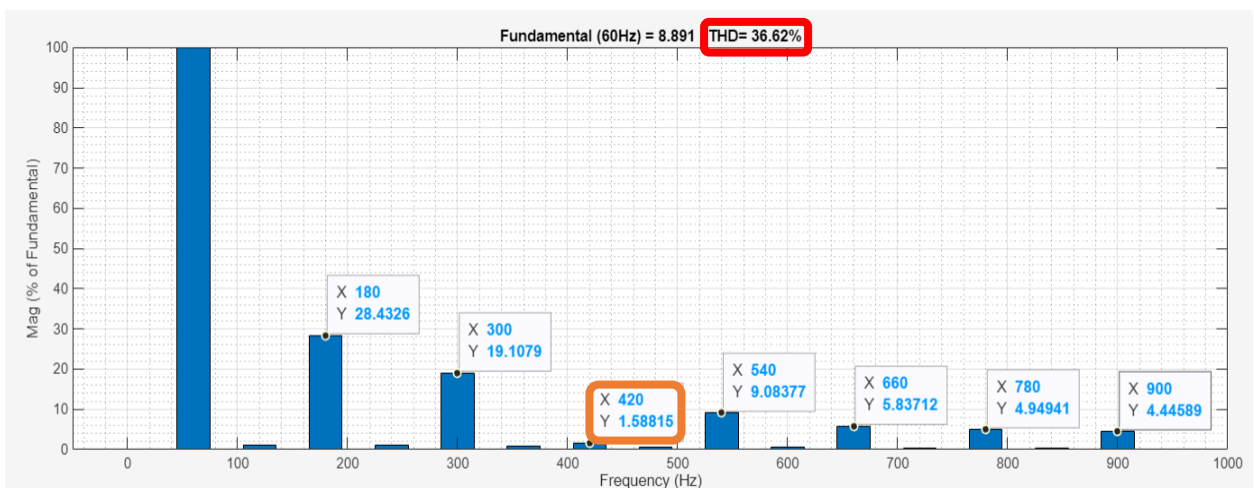


Fig. 34. Espectro de armónicos de corriente con el filtro pasivo sintonizado para el séptimo armónico



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



Para comprender mejor estos resultados, es fundamental reconocer que cada filtro se conectó individualmente al sistema base compuesto por el motor-generador y el variador de frecuencia. Este enfoque permitió evaluar la efectividad de cada filtro por separado, asegurando que las mejoras observadas en la calidad de la señal y la reducción de armónicos fueran atribuibles a la acción específica de cada filtro. Al analizar los efectos de cada filtro individualmente, se obtuvo una comprensión más detallada de cómo contribuyen a la mitigación de armónicos y a la mejora del rendimiento global del sistema.

Para verificar la eficacia de la mitigación de los armónicos de corriente y observar el impacto en la reducción del THD, se procedió a instalar los tres filtros pasivos de manera simultánea en el sistema. Esta configuración tenía como objetivo comprobar la capacidad combinada de los filtros para reducir los tres armónicos específicos y, al mismo tiempo, observar si el THD global disminuía significativamente con todos los filtros en acción. En la Fig. 35 se encuentra el resultado de esta prueba, se logró una notable reducción del THD, que pasó del 41.24% inicial a un 14.47%. Esta disminución demuestra la efectividad de los filtros al trabajar en conjunto, mejorando considerablemente la calidad de la señal en comparación con el estado previo a la instalación de los filtros.

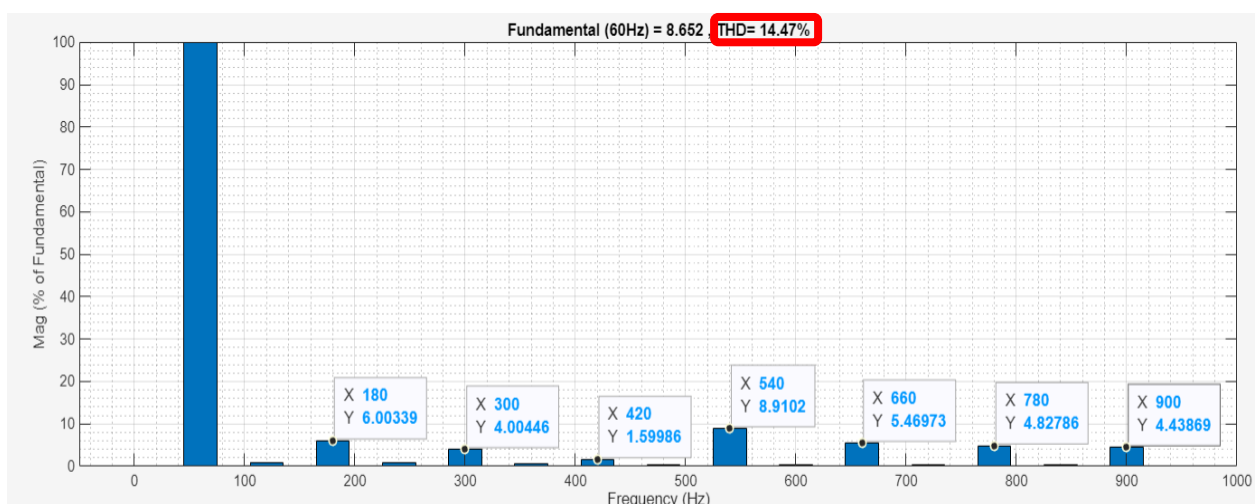


Fig. 35. Espectro de armónicos de corriente con los tres filtros en simultaneo

A pesar de los resultados positivos obtenidos, todavía es necesario alcanzar el límite admisible del 8% en el THD del sistema. Para lograr esto, se decidió realizar ajustes adicionales



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



en el factor de calidad del filtro, lo que implicó hacerlo menos selectivo y ampliar su banda de atenuación. Bajo el criterio del autor se tomaron valores bajos de resistencias que van desde 1 ohmio hasta los 10 ohmios, para lo cual se implementaron dos variaciones clave en los tres filtros: la primera fue la inclusión de resistencias de 1 ohmio en serie, y la segunda fue el uso de resistencias de 5,1 ohmios, también en serie. Estas modificaciones permitieron una atenuación más gradual y efectiva en un rango más amplio de frecuencias. Este ajuste resultó crucial para mejorar la eficiencia del sistema en la reducción de armónicos, acercándose significativamente al cumplimiento de los estándares de calidad de energía requeridos.

Para verificar la eficacia de la mitigación de los armónicos mediante los filtros pasivos, se presentan en la TABLA VIII que muestra los valores de las resistencias, inductores y capacitores utilizados en cada filtro. Además, se muestran los porcentajes de reducción de los armónicos, desde el tercero hasta el quinceavo armónico. Durante el estudio, los filtros pasivos fueron sometidos a tres configuraciones diferentes: en la primera configuración, los filtros no incluían resistencias; en la segunda, se incorporaron resistencias de 1 ohmio en cada filtro; y en la tercera, las resistencias se ajustaron a 5,1 ohmios (valores de resistencias que se encuentran en el mercado). Estos ajustes permitieron evaluar cómo cada modificación impactaba en la atenuación de los armónicos, proporcionando una visión clara de la efectividad de cada filtro en diversas condiciones operativas.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



TABLA VIII  
 VALORES DE COMPONENTES DE LOS FILTROS Y SU REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS

Filtros			Porcentaje de armónicos								Corriente
R ( $\Omega$ )	L (mH)	C ( $\mu F$ )	3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°	THD	A
-	-	-	29.676	20.157	15.191	9.046	5.485	5.373	4.688	42.53	8.93
-	25	47	6.116	19.038	14.871	9.203	5.914	5.014	4.504	28.11	8.775
-	8	47	28.808	4.043	14.871	9.203	5.911	5.014	4.504	35.16	8.775
-	4	47	28.432	19.107	1.588	9.083	5.837	4.949	4.445	36.62	8.809
1	25	47	6.246	17.279	13.808	7.244	4.227	4.33	2.827	25.05	8.723
1	8	47	28.591	4.287	13.745	7.637	3.450	3.859	3.547	33.54	8.759
1	4	47	28.122	16.508	1.928	7.476	3.020	3.329	2.943	33.97	8.716
5.1	25	47	5.517	16.887	13.675	6.856	4.005	4.184	2.579	24.33	8.743
5.1	8	47	28.320	4.038	13.227	7.134	3.308	3.497	3.117	32.89	8.756
5.1	4	47	28.060	19.043	2.095	7.069	3.278	3.465	3.088	35.20	8.837

Continuando con la búsqueda de la mejor configuración para la mitigación se tiene la Fig. 36 que ilustra el espectro de armónicos al estar conectado los tres filtros con la inclusión de resistencias de 1 ohmio en los filtros donde la distorsión armónica total (THD) se mejoró aún más en comparación con el estado anterior en el que estas resistencias no estaban presentes. Sin embargo, a pesar de esta mejora significativa, el THD aún no alcanza el límite deseado.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

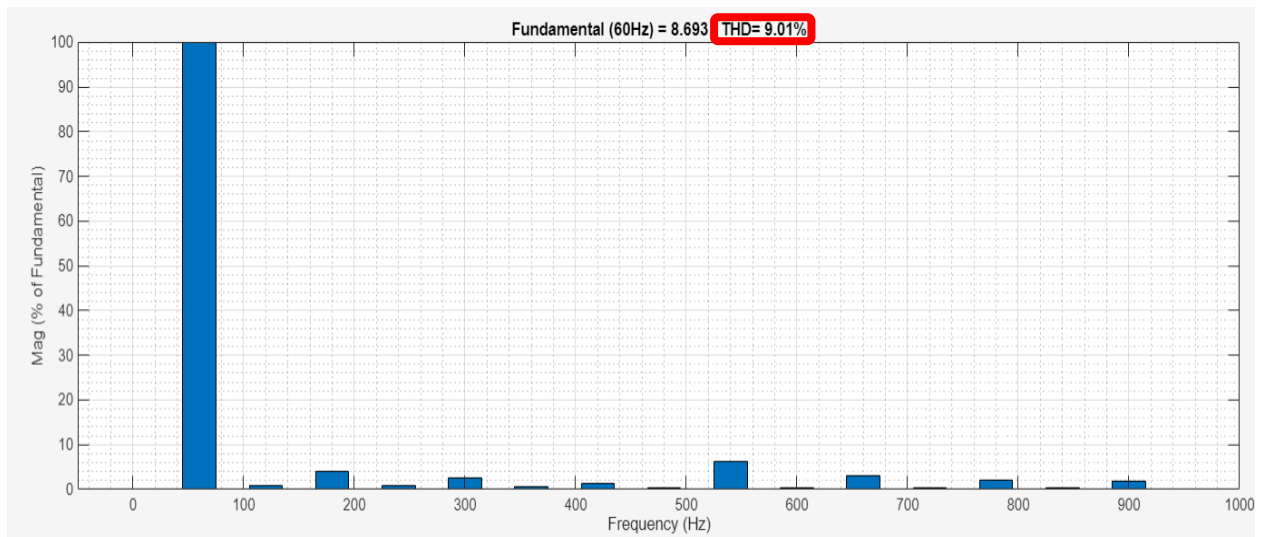


Fig. 36. Espectro de armónicos de corriente con los tres filtros con primera modificación

Después de realizar un pequeño análisis de la efectividad de los filtros con y sin resistencias, se concluyó que la configuración óptima para lograr la mayor eficiencia en la mitigación de armónicos y la reducción del THD era modificar los filtros del tercer y quinto armónico con resistencias de 5.1 ohmios, estos ajustes permiten que los filtros no solo mitiguen su armónico objetivo, sino que también reduzcan las frecuencias asociadas a sus secuencias respectivas. Por otro lado, se mantuvo la resistencia de un ohmio en el filtro del séptimo armónico para preservar su eficacia en la reducción de este componente específico. Esta configuración final se seleccionó para maximizar la atenuación en sus respectivos armónicos específicos, optimizando así el rendimiento global del sistema.

En la Fig. 37 se muestra el funcionamiento con los filtros de 3°, 5° y 7° orden con la configuración final con un THD promedio del 6.87%, un valor que se encuentra dentro del límite aceptable. Los filtros con los valores seleccionados son efectivos para mitigar los armónicos sintonizados y, al mismo tiempo, contribuyen a la reducción de la distorsión total del sistema trifásico.





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

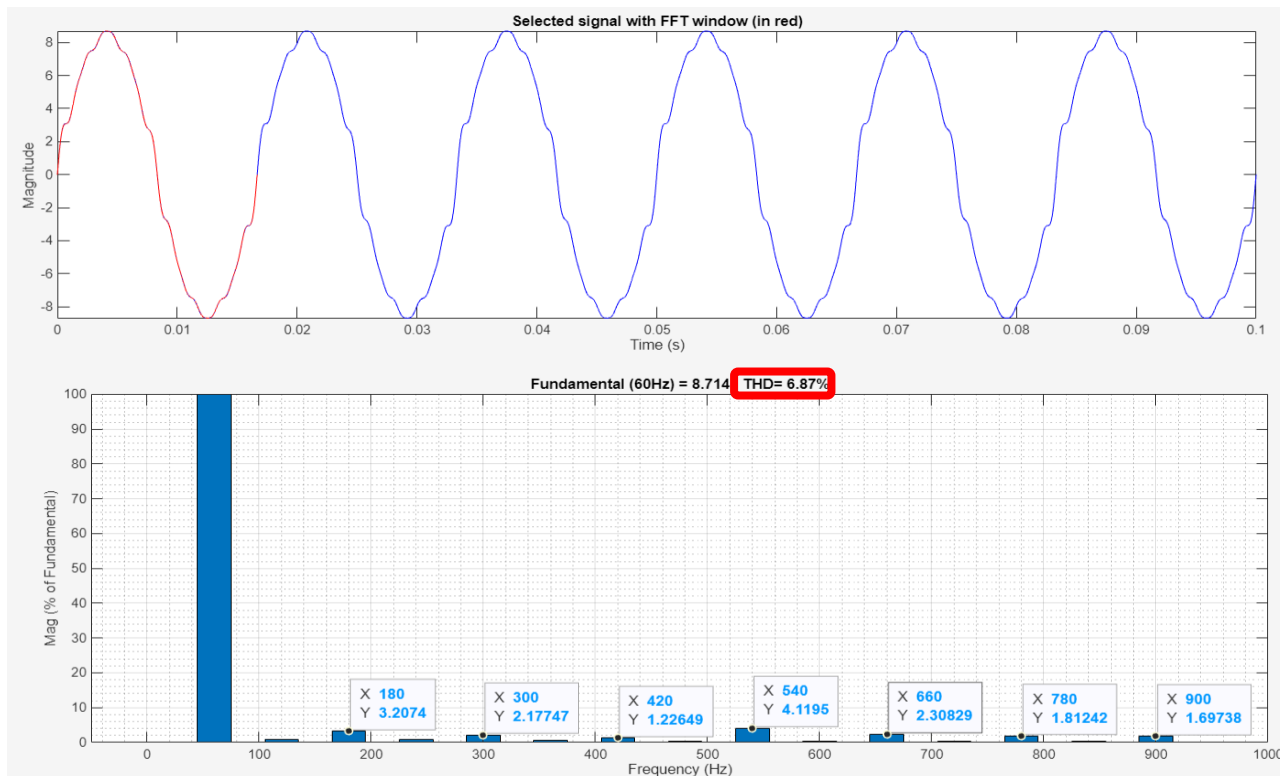


Fig. 37. Espectro de armónicos de corriente con los tres filtros con la modificación final

Finalmente, se presenta la TABLA IX, que muestra la comparación de los porcentajes de THD mitigados tras la implementación de los tres filtros bajo las tres configuraciones diferentes. Estas modificaciones fueron realizadas con el objetivo de maximizar el rendimiento de los filtros, logrando así una reducción significativa en la distorsión armónica total promedio del sistema.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



TABLA IX  
 COMPARACION DE THD CON LOS FILTROS CONECTADOS EN SIMULATANEOS CON DIFERENTES MODIFICACIONES

	Valores de los elementos									THD	Corriente (A)
	Filtro 3° armónico			Filtro 5° armónico			Filtro 7° armónico				
	R (Ω)	L (mH)	C (uF)	R (Ω)	L (mH)	C (uF)	R (Ω)	L (mH)	C (uF)		
Sin filtros	-			-			-			41.24%	8.93
LC	-	25	47	-	8	47	-	4	47	14.47%	8.652
RLC (primera modificación)	1	25	47	1	8	47	1	4	47	9.01%	8.693
RLC (segunda modificación)	5.1	25	47	5.1	8	47	5.1	4	47	9.85%	8.7
RLC (modificación final)	5.1	25	47	5.1	8	47	1	4	47	6.87%	8.714

En las Fig. 38, Fig. 39 y Fig. 40 se presenta la mitigación de armónicos en las tres fases, lograda mediante la conexión de los tres filtros en la configuración final. Se puede observar la reducción significativa de la distorsión de la onda en cada fase, lo que demuestra la efectividad de los filtros pasivos en la mejora de la onda dependiendo de los porcentajes presentados para cada una de las fases.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

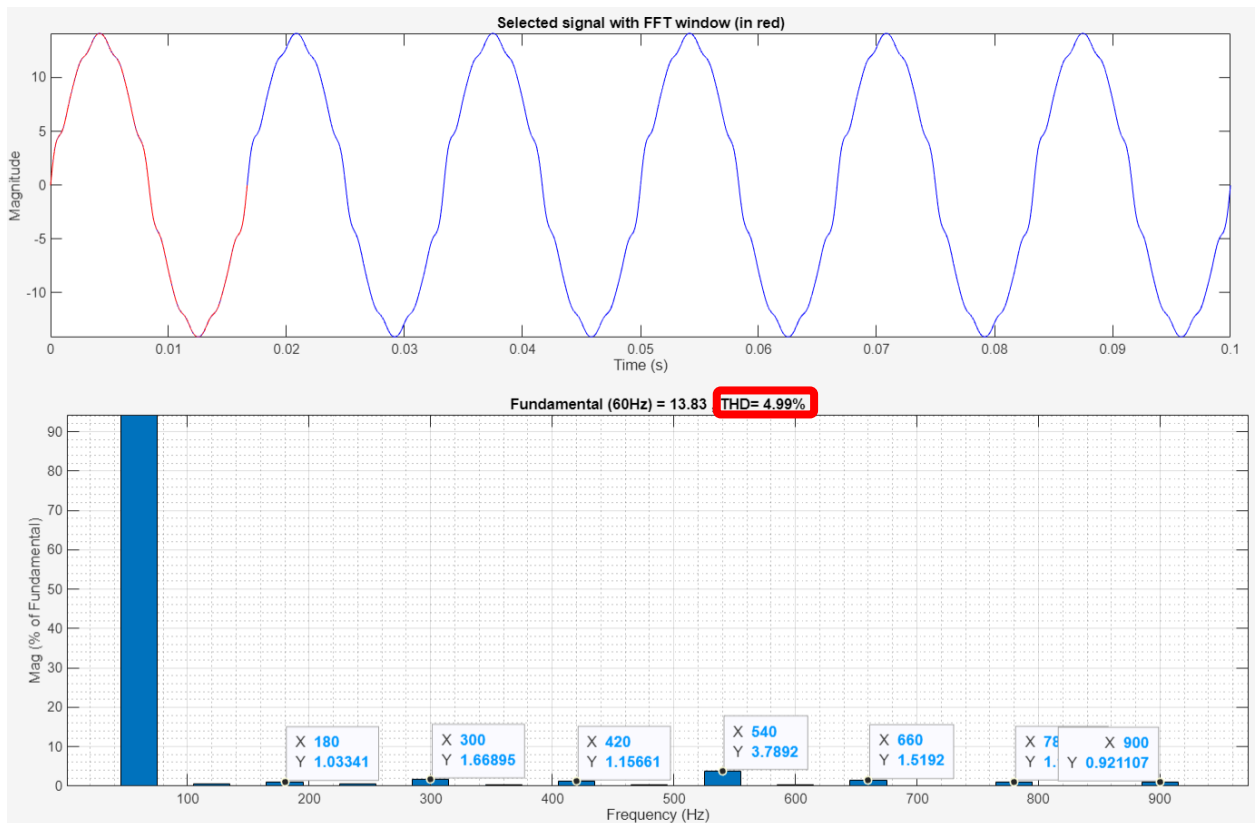


Fig. 38. Espectro de armónicos de corriente de la L1 con los tres filtros con la modificación final



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

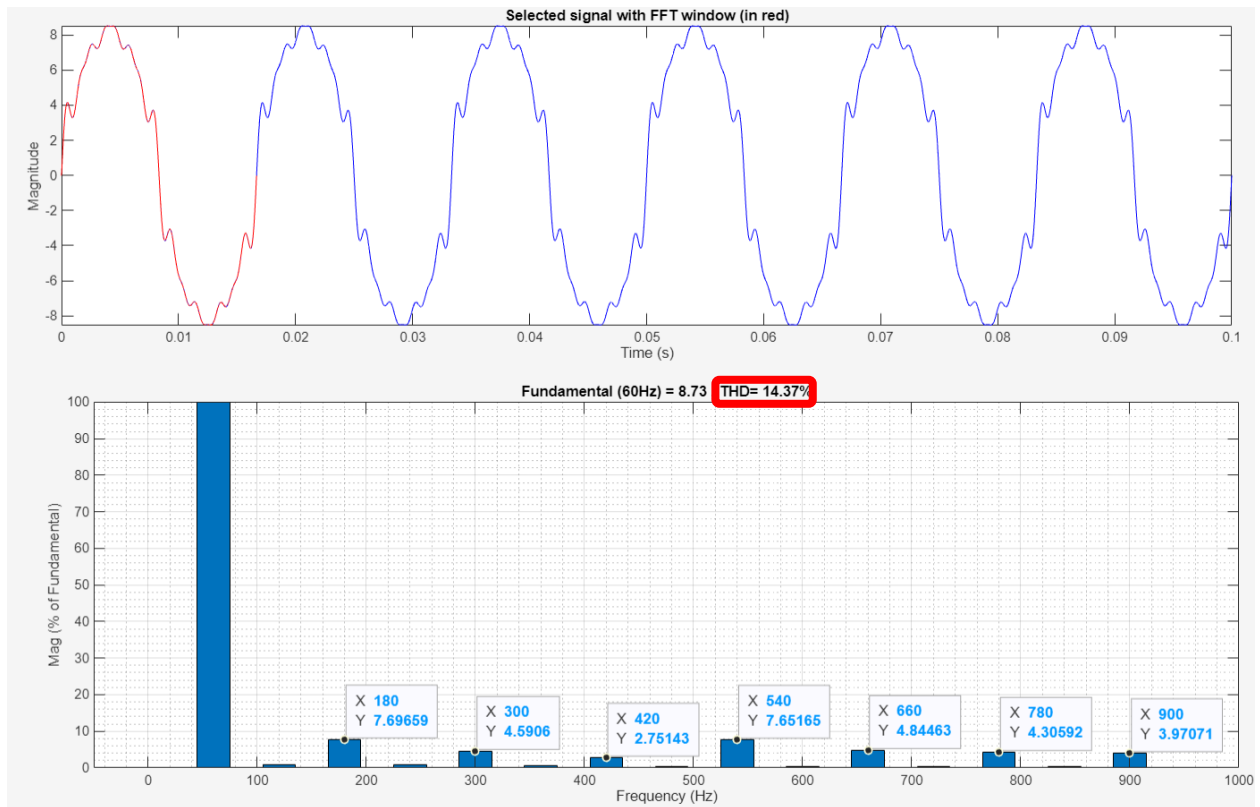


Fig. 39. Espectro de armónicos de corriente de la L2 con los tres filtros con la modificación final



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

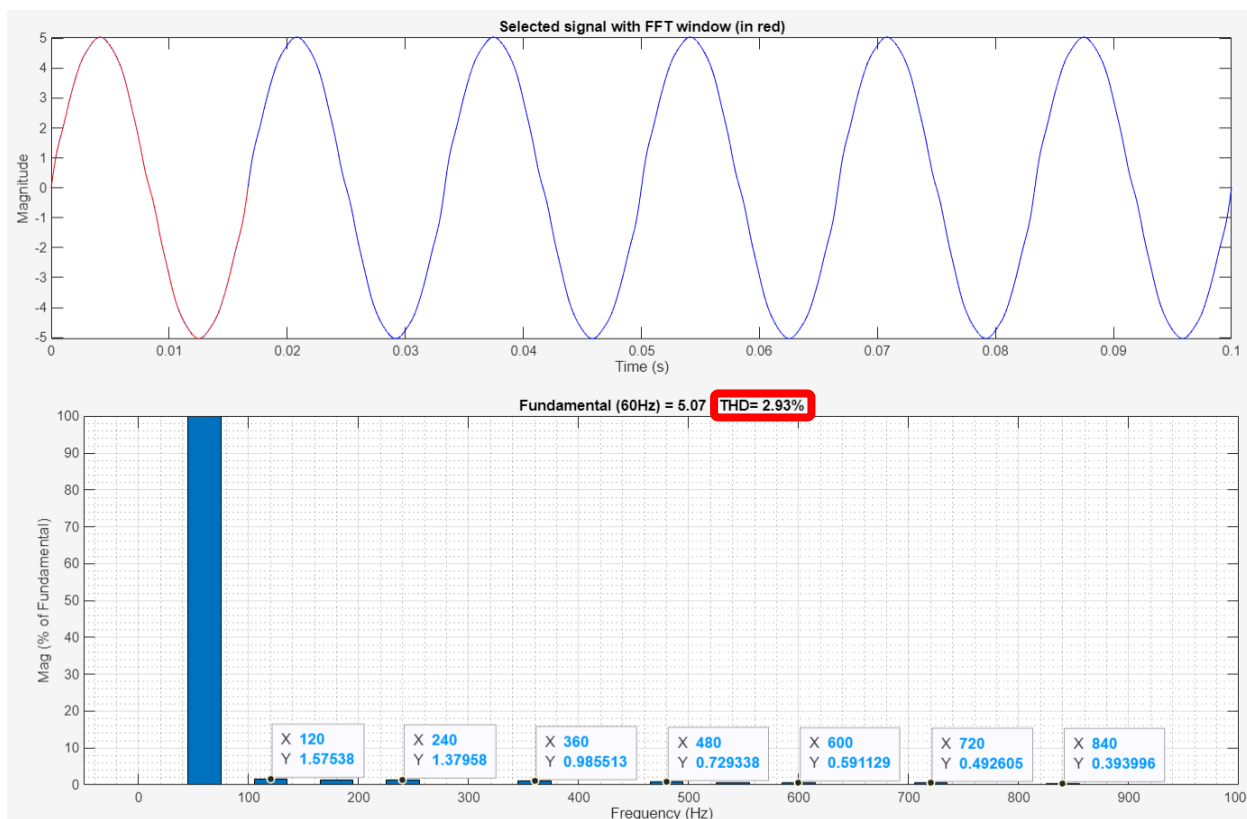


Fig. 40. Espectro de armónicos de corriente de la L3 con los tres filtros con la modificación final

Como punto final se muestra la Fig. 41 muestra el espectro de armónicos de voltaje, donde se observa del THD casi sin ninguna variación pasando de un 3.06% a 2.52%, esto confirma la efectividad de los filtros instalados. Los filtros no solo cumplen su función de mitigación de armónicos de corriente, sino que también preservan la integridad de la onda de voltaje, la cual inicialmente no presentaba ninguna distorsión significativa. Este resultado respalda la eficacia del diseño del sistema en mantener la calidad de energía dentro de los estándares requeridos.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

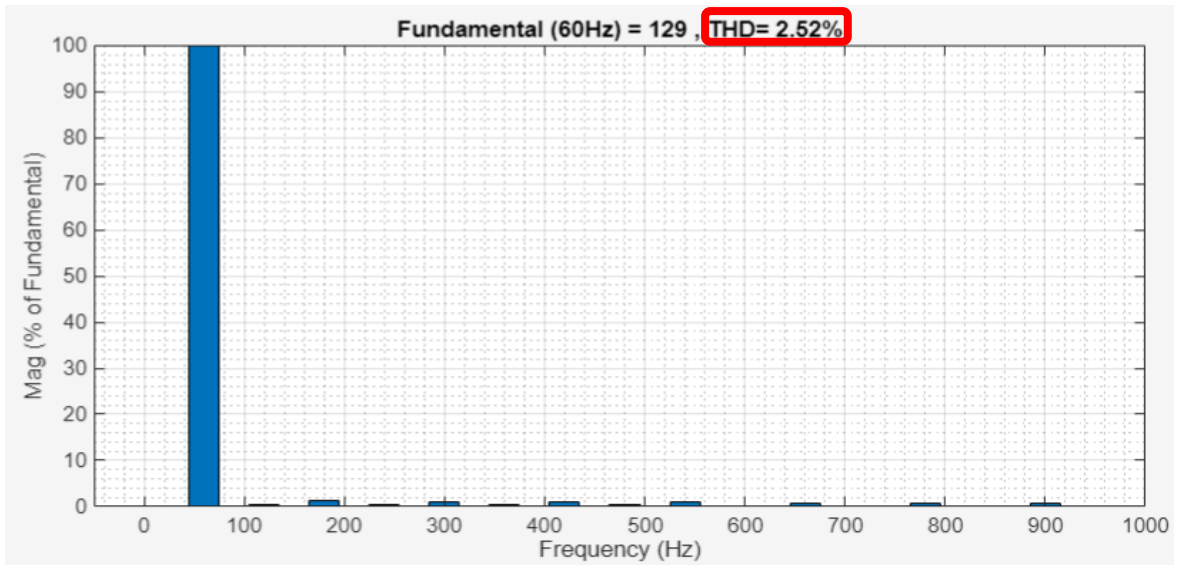


Fig. 41. Espectro de armónicos de voltaje con filtros conectados



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD



## Conclusiones

- Se ha descrito la naturaleza y los efectos de los armónicos presentes en cargas no lineales, los cuales surgen debido a la distorsión de corriente y tensión en sistemas eléctricos. Además, se han explorado y evaluado diferentes métodos de mitigación, entre los cuales destacan el uso de filtros pasivos, filtros activos y configuraciones de diseño específicas que ayudan a reducir el impacto de estos armónicos en los sistemas eléctricos. De este modo, el análisis realizado contribuye a una mejor comprensión de los armónicos en cargas no lineales y permite identificar soluciones efectivas para minimizar sus efectos, favoreciendo la estabilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos.
- El análisis realizado ha permitido caracterizar los armónicos de corriente presentes en el sistema conformado por un variador de frecuencia acoplado al motor-generador asíncrono trifásico de 1,5 kW. Se identificaron armónicos de tercer, quinto, séptimo y noveno orden con valores de media de 28.63 %, 19.65 %, 15.51 % y 9.36 % respectivamente. La identificación y cuantificación de estos armónicos resultaron clave para evaluar el impacto en el rendimiento del sistema y seleccionar métodos de mitigación adecuados. En este contexto, el uso de filtros específicos permite reducir la magnitud de los armónicos mejorar la calidad de energía y la confiabilidad del sistema.
- El diseño de filtros pasivos permitió atenuar los armónicos sintonizados además de otros armónicos que estén bajo la misma secuencia del armónico sintonizado y así asegurar un rendimiento adecuado del motor-generador. La simulación permitió confirmar que la presencia de armónicos en los sistemas eléctricos es un fenómeno originado principalmente por cargas no lineales. El variador de frecuencia se clasifica como una carga no lineal, la rápida conmutación de sus componentes electrónicos genera distorsiones en la forma de onda de la corriente y mediante la simulación de filtros pasivos ha demostrado ser efectiva para mitigar armónicos de tercer, quinto y séptimo orden en el sistema trifásico, logrando mitigar tanto los armónicos individuales como la distorsión armónica total del sistema analizado, además de mejorar la calidad de energía en la red eléctrica.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



### Recomendaciones

- Se recomienda que, en futuros proyectos, se investigue la implementación de diversas configuraciones de filtros pasivos, evaluando y comparando su rendimiento. Asimismo, es aconsejable realizar pruebas experimentales en condiciones reales para validar los resultados obtenidos a través de simulaciones, lo que permitirá ajustar y optimizar el diseño de los filtros según las características específicas del sistema. Esta aproximación no solo validará las simulaciones, sino que también facilitará el desarrollo de soluciones más económicas y efectivas para abordar las cargas no lineales en sistemas trifásicos. Por último, es crucial monitorear y controlar de manera continua los niveles de armónicos en el sistema, ya que el uso prolongado de equipos con distorsión armónica puede comprometer la eficiencia y la vida útil de los componentes, afectando la estabilidad y confiabilidad de la red eléctrica.





**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



## Referencias

- [1] J. D. Mora Sánchez y Y. J. Cevallos Chávez, «Estudio y análisis de calidad de energía enfocado en nivel de armónicos en el sistema eléctrico de la subestación enfriadora 1 de Holcim Ecuador planta Guayaquil,» p. 29, 2010.
- [2] J. D. Arcila, «ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS,» *INGENIERÍA ESPECIALIZADA S.A.*, p. 1, 2012.
- [3] M. Holguin y D. Gomezcoello, «Análisis de calidad de energía eléctrica en el nuevo campus de la universidad politécnica salesiana,» p. 16, 2010.
- [4] H. A. Tnlg. Bueno Muñoz y M. V. Tnlg. Fajardo Muzo, «Diseño y construcción de un filtro activo para la eliminación de armónicos de una red bifásica residencial,» p. 8, 2013.
- [5] P. C. Sarmiento Crespo y H. D. Manotas Matos, «EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DEL EFECTO DE LOS ARMÓNICOS,» p. 23, 2018.
- [6] W. M. Román Vargas, N. d. P. Barreno Layedra, J. M. Martínez y J. Cachuput Gusñay, «Análisis de armónicos de un motor trifásico mediante transformadas integrales para analizar fallas de funcionamiento,» p. 249, 2019.
- [7] B. F. Álvarez Tana, «MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS BASADO EN EL CONTROL PREDICTIVO DE CORRIENTE MEDIANTE UN FILTRO DE POTENCIA ACTIVO CONECTADO AL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN,» p. 3, 2022.



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE ELECTRICIDAD



- [8] D. F. Céspedes Montoya, «MITIGACIÓN DEL NIVEL DE ARMÓNICOS EN UN SISTEMA ELÉCTRICO INDUSTRIAL,» p. 23, 2016.
- [9] C. A. Garzón Arévalo y W. E. Lozano Beltran, «Propuesta de Filtro activo de potencia para mitigacion armonicos de corriente con controlador no lineal basado en CBR,» p. 16, 2020.
- [10] R. Pinyol, «ARMONICOS: CAUSAS, EFECTOS Y MINIMIZACION,» *SALICRU WHITE PAPERS*, 2016.
- [11] dassault systemes, «<https://help.solidworks.com/>,» 2011. [En línea]. Available: [https://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/legacyhelp/simulation/art\\_local/Force-displ-cr.gif](https://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/legacyhelp/simulation/art_local/Force-displ-cr.gif).
- [12] P. C. Sarmiento Crespo y H. D. Manotas Matos, «EFECTOS DE ARMÓNICOS PRODUCIDOS POR VARIADORES DE FRECUENCIA,» 2018.
- [13] H. A. Bueno Muñoz y M. V. Fajardo Muzo, «Diseño y construccion de un filtro activo para al eliminacion de armonicos de una red bifasica residencial,» 2013.
- [14] N. F. Proaño Pérez y V. A. Velasquez Zharate, «ESTUDIO DE EFECTOS Y METODOS DE MINIMIZACION DE DISTORSIONES ARMÓNICAS EN EQUIPOS DE DISTRIBUCION ELECTRICA, COMERCIAL E INDUSTRIAL,» 2010.
- [15] A. Gajardo, «<https://motoresygeneradores.com/>,» 2020. [En línea]. Available: <https://motoresygeneradores.com/images/Armonicos/imagen-armonico2.jpg>.



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

### FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

#### CARRERA DE ELECTRICIDAD



- [16] D. H. Quinteros Hidalgo, «DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN FILTRO PASIVO SHUNT MULTITAPA RESONANTE PARA LA MITIGACION DE ARMÓNICOS PRODUCIDOS POR UNA CARGA NO LINEAL,» 2021.
- [17] A. Ramírez Fernández, «CONVERTIDORES ESTÁTICOS DE POTENCIA CON PLACAS HARDWARE DE BAJO COSTE Y SOFTWARE DE FABRICANTE MEDIDAS PRÁCTICAS,» España, 2024.
- [18] J. D. Martinez y M. R. Valencia, «APLICACIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE FILTROS DE ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA,» 2008.
- [19] ARCERNNR, «REGULACIÓN Nro. ARCERNNR - 002/20,» *AGENCIA DE REGULACION Y CONTROL DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES*, 2020.
- [20] J. J. Marulanda Durango, A. E. Mejía y A. A. Gómez, «Estudio comparativo de cinco estrategias de compensación de armónicos en filtros activos de potencia,» *Tecnura*, 2017.
- [21] S. Industry, «Motores eléctricos industriales,» 2012. [En línea]. Available: <https://www.sumecon.com/pdf/Catalogo%20Motores%20Electricicos%202012.pdf>. [Último acceso: 31 Octubre 2023].
- [22] S. S. C. A. Recalde Morales Edison Fernando, «IMPLEMENTACIÓN Y MONTAJE DE UN MOTOR – GENERADOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO DE 1.5 KW, Y EXTRACCIÓN DE DATOS MEDIANTE UN PLC, PARA REALIZAR PRÁCTICAS



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

### CARRERA DE ELECTRICIDAD



DEMOSTRATIVAS EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO ELÉCTRICO,» 2015.

- [23] «INNOVA ELECTRIC,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.innovaelectricc.com/products/drive-2hp-240v-sv015ig5a-2/799>. [Último acceso: 31 Octubre 2023].
- [24] METREL, *Manual de Funcionamiento*, vol. No. 20 751 904, 2011.
- [25] «patricioconcha,» [En línea]. Available: <http://patricioconcha.ubb.cl/410021/WEB%20Final/7.4.htm>. [Último acceso: 25 Agosto 2024].
- [26] espinoza, sistemas de distribucion, ibarra : edds, 2023.
- [27] EMELNORTE, «INDICADORES COMERCIALES E INDICADORES DE CALIDAD DE SERVICIO ELÉCTRICO,» IBARRA , 2022.
- [ I. d. I. Tecnológica, «Vol. 1 Investigación Tecnológica IST Central Técnico,»
- 28] *INVESTIGACION TECNOLÓGICA*, 2019.
- [29] U. d. Concepción, *Departamento de Ingeniería Eléctrica* , 2008.
- [30] E. P. R. Institute, 2021.
- [31] P. S. E. R. Center, Understanding and Mitigating Voltage Unbalance, 2014.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Anexos**

**Anexo 1.** Tabla de 1008 mediciones con THD de voltajes de L1, L2 Y L3

Limite admisible menor al 8%		
Promedio tres lineas	1.435846561	
Si cumple	Si cumple	Si cumple
1.41468254	1.502579365	1.390277778
THD U1(ProAct) [%]	THD U2(ProAct) [%]	THD U3(ProAct) [%]
1.4	1.7	1.5
1.5	1.7	1.5
1.5	1.7	1.5
1.5	1.7	1.5
1.4	1.7	1.6
1.4	1.7	1.5
1.4	1.7	1.5
1.5	1.6	1.4
1.5	1.6	1.4
1.4	1.5	1.4
1.5	1.5	1.4
1.5	1.5	1.4
1.6	1.5	1.4
1.5	1.5	1.2
1.6	1.5	1.3
1.5	1.4	1.1
1.3	1.2	1.1
1.4	1.1	1.2



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Anexo 2.** Tabla de 1008 mediciones con THD de corrientes de L1, L2 Y L3

Limite admisible menor al 8%		
Promedio tres lineas	73.42913381	
No cumple	No cumple	No cumple
70.74821429	111.2998022	38.23938489
THD I1(ProAct) [%]	THD I2(ProAct) [%]	THD I3(ProAct) [%]
36.799999	35.400002	31.799999
41.900002	50	30.9
46.200001	51.599998	33.5
50	53.299999	34
48.599998	51.700001	35.700001
46.200001	50	31.700001
54.099998	60.700001	44
42.900002	50	29.4
53.299999	60	33.299999
48.400002	56	28.4
48.400002	56	27.5
48.400002	58.299999	29.9
50	56	30.700001
48.400002	53.799999	26.299999
48.400002	58.299999	26.700001
48.400002	56	25.6
50	58.299999	27.4
48.400002	58.299999	24.700001



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Anexo 3.** Tabla de 1008 mediciones con armónicos de corriente individuales impares desde el primero hasta el quinceavo de la L1.

LINEA 1								
99.48055596	25.086318870	18.179349880	14.724746540	8.725756490	4.687835690	3.765325454	2.802352769	
I1 a1(ProAct) [%]	I1 a3(ProAct) [%]	I1 a5(ProAct) [%]	I1 a7(ProAct) [%]	I1 a9(ProAct) [%]	I1 a11(ProAct) [%]	I1 a13(ProAct) [%]	I1 a15(ProAct) [%]	
100	30.9	7.4	5.9	4.4	4.4	2.9	2.9	
100	27.9	7	7	7	7	4.7	4.7	
100	28.200001	7.7	7.7	7.7	7.7	5.1	5.1	
100	30.6	8.3	8.3	8.3	8.3	5.6	5.6	
100	28.6	8.6	8.6	8.6	8.6	5.7	5.7	
100	28.200001	7.7	7.7	7.7	7.7	5.1	5.1	
94.599998	37.799999	13.5	10.8	8.1	8.1	5.4	5.4	
97.099998	22.9	11.4	8.6	8.6	8.6	5.7	5.7	
93.300003	26.700001	13.3	10	10	10	6.7	6.7	
87.099998	22.6	12.9	9.7	9.7	9.7	6.5	6.5	
93.5	22.6	12.9	9.7	9.7	9.7	6.5	6.5	
100	22.6	12.9	9.7	9.7	9.7	6.5	6.5	
95	23.299999	13.3	10	10	10	6.7	6.7	
90.300003	22.6	12.9	9.7	9.7	9.7	6.5	6.5	
95.5	19.4	12.9	9.7	9.7	9.7	6.5	6.5	
90.300003	19.4	12.9	9.7	9.7	9.7	6.5	6.5	
86.699997	20	13.3	10	10	10	6.7	6.7	
90.300003	19.4	12.9	9.7	9.7	9.7	6.5	6.5	

**Anexo 3.** Tabla de 1008 mediciones con armónicos de corriente individuales impares desde el primero hasta el quinceavo de la L2.

LINEA 2								
98.99482152	35.22945786	31.4579557	23.64391248	17.63872878	12.60686738	11.75555387	10.748375758	
I2 a1(ProAct) [%]	I2 a3(ProAct) [%]	I2 a5(ProAct) [%]	I2 a7(ProAct) [%]	I2 a9(ProAct) [%]	I2 a11(ProAct) [%]	I2 a13(ProAct) [%]	I2 a15(ProAct) [%]	
100	30.5	7.3	4.9	3.7	3.7	2.4	2.4	
100	28.1	9.4	9.4	9.4	9.4	6.3	6.3	
96.800003	25.799999	9.7	9.7	9.7	9.7	6.5	6.5	
93.300003	26.700001	10	10	10	10	6.7	6.7	
93.099998	27.6	10.3	10.3	10.3	10.3	6.9	6.9	
93.800003	25	9.4	9.4	9.4	9.4	6.3	6.3	
92.900002	35.700001	17.9	10.7	10.7	10.7	7.1	7.1	
92.900002	21.4	14.3	10.7	10.7	10.7	7.1	7.1	
84	28	12	12	12	12	8	8	
84	24	16	12	12	12	8	8	
88	24	16	12	12	12	8	8	
87.5	25	16.700001	12.5	12.5	12.5	8.3	8.3	
84	24	16	12	12	12	8	8	
84.599998	23.1	15.4	11.5	11.5	11.5	7.7	7.7	
87.5	25	16.700001	12.5	12.5	12.5	8.3	8.3	
88	24	16	12	12	12	8	8	
83.300003	25	16.700001	12.5	12.5	12.5	8.3	8.3	
87.5	25	16.700001	12.5	12.5	12.5	8.3	8.3	



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**Anexo 3.** Tabla de 1008 mediciones con armónicos de corriente individuales impares desde el primero hasta el quinceavo de la L3.

LINEA 3								
100	26.3463	9.8016	3.1552	0.3346	0.5016	0.5187	0.2444	
I3 a1(ProAct) [%]	I3 a3(ProAct) [%]	I3 a5(ProAct) [%]	I3 a7(ProAct) [%]	I3 a9(ProAct) [%]	I3 a11(ProAct) [%]	I3 a13(ProAct) [%]	I3 a15(ProAct) [%]	
100	30.9	4.8	3.5	2.3	2.6	1.6	1	
100	30.200001	4	2.9	2.5	2.2	1.8	1.1	
100	32.299999	4.8	3.2	2.4	2.8	2	1.2	
100	32.799999	6	3.4	2.6	2.6	2.1	1.3	
100	34.400002	6.3	3.6	2.7	2.7	2.2	1.3	
100	30.5	5.4	3.5	1.9	2.3	1.9	1.2	
100	41.700001	11.9	6.9	3.7	2.8	1.8	1.8	
100	25.9	9.1	6.6	3.6	2.5	1.5	1.5	
100	30.5	6.8	7.3	4.5	2.8	1.7	1.7	
100	25.9	3.1	6.2	4.9	2.5	1.2	1.9	
100	25.799999	2.8	5.6	4.5	2.2	1.1	1.7	
100	27.4	2.4	6.1	4.9	2.4	1.2	1.8	
100	28.200001	2.5	6.1	4.3	2.5	1.8	1.8	
100	24	2.2	5.6	3.9	1.7	1.7	1.7	
100	24.200001	2.5	5.6	4.3	1.9	1.9	1.9	
100	23.299999	2.3	4.7	4.1	1.7	1.7	1.2	
100	24.799999	2.5	5.1	5.1	1.9	1.9	1.3	
100	22.299999	2.4	4.8	4.8	1.8	1.8	1.2	