

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad De Ingeniería en Ciencias Aplicadas

Carrera de Ingeniería en Electricidad

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE FILTROS PARA LA ATENUACIÓN DE
ARMÓNICOS EN LAS REDES SECUNDARIAS DEL ALIMENTADOR No.2
DE LA SUBESTACIÓN LA ESPERANZA DE LA EMPRESA ELÉCTRICA
REGIONAL NORTE EMELNORTE S.A.**

Trabajo de grado presentado ante la Ilustre Universidad Técnica del Norte previo
a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico.

Autor:

Rommel Gabriel Villarruel Pazmiño

Director:

Ing. Isabel Marina Quinde Cuenca MSc.

Ibarra – Ecuador

2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Identificación de la obra

En 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			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100481615-1		
APELLIDOS Y NOMBRES	Villarruel Pazmiño Rommel Gabriel		
DIRECCIÓN:	Alejandro Villamar 1-29 y Cesar Guerra Dávila		
EMAIL:	rgvillarruel@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0982005329

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Ubicación óptima de filtros para la atenuación de armónicos en las redes secundarias del Alimentador No.2 de la subestación La Esperanza de la Empresa Eléctrica Regional Norte EMELNORTE S.A.
AUTOR (ES):	Villarruel Pazmiño Rommel Gabriel
FECHA: DD/MM/AAAA	23/10/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Quinde Cuenca Isabel Marina MSc.

Constancia

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

Ibarra, a los 23 días del mes de octubre de 2023

EL AUTOR:



Villarruel Pazmiño Rommel Gabriel

C.I. 100481615-1



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

Ing. Quinde Cuenca Isabel Marina MSc.

Certificación

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante: Villarruel Pazmiño Rommel Gabriel, certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado **"UBICACIÓN ÓPTIMA DE FILTROS PARA LA ATENUACIÓN DE ARMÓNICOS EN LAS REDES SECUNDARIAS DEL ALIMENTADOR NO.2 DE LA SUBESTACIÓN LA ESPERANZA DE LA EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL NORTE EMELNORTE S.A."**. Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico: aprobando la defensa, impresión y empastado.

Ing. Quinde Cuenca Isabel Marina MSc.
DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi querida madre, Mónica Pazmiño cuyo amor incondicional, apoyo constante y sacrificio inquebrantable han sido la fuente de mi inspiración y fortaleza a lo largo de este arduo camino académico. Tu fe en mí me ha impulsado a superar obstáculos, y este logro no habría sido posible sin ti. Gracias por ser mi guía y mi mayor motivación. Te amo profundamente y este logro es también tuyo.

Agradecimientos

Agradezco de corazón a mi familia, quienes han sido un soporte fundamental en mi formación académica. Siempre estuvieron dispuestos a extender su mano y brindarme su apoyo incondicional.

Agradezco a la Empresa eléctrica EMELNORTE S.A, en particular al departamento de Estudios eléctricos y Calidad de energía, por su valiosa colaboración y respaldo durante el desarrollo de este trabajo de titulación.

Quiero expresar mi gratitud a mi directora de tesis, Isabel Quinde, cuya dedicación y apoyo constante fueron fundamentales para la exitosa realización de este proyecto. Su orientación y compromiso fueron un referente crucial en cada etapa del proceso.

Deseo manifestar mi sincero agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte por proporcionarme una experiencia educativa excepcional durante estos semestres. La sólida base académica y las oportunidades de aprendizaje que esta institución me brindo resultaron fundamentales para mi crecimiento personal y profesional.

Finalmente, a todos mis amigos y personas cercanas que estuvieron presentes en el desarrollo de esta etapa tan importante.

Tabla de contenido

Resumen	XIII
Abstract	XIV
Contextualización.....	XV
Planteamiento del problema	XVI
Formulación del problema.....	XVI
Justificación	XVII
Alcance.....	XVII
Objetivo general.....	XVIII
Objetivos específicos	XVIII
CAPÍTULO 1	1
1.1. Calidad de energía.....	1
1.2. Perturbaciones en redes eléctricas.....	1
1.2.1. Transitorios.	1
1.2.2. Desbalances de voltaje/corriente.....	2
1.2.3. Disminuciones de voltaje o Sag.....	3
1.2.4. Flickers.	4
1.2.5. Armónicos.	4
1.3. Armónicos en sistemas eléctricos.....	5
1.3.1. Series de Fourier.....	6
1.3.2. Cargas lineales y no lineales.....	6
1.4. Niveles de Tolerancia de armónicos.....	8
1.5. Fuentes de armónicos.....	9
1.5.1. Convertidores estáticos de potencia.....	9
1.5.2. Magnetización lineal de transformadores.	9
1.5.3. Máquinas rotativas.....	10
1.5.4. Reguladores AC.....	10

1.5.5.	Dispositivos de arco.....	10
1.6.	Efecto de armónicos.....	10
1.6.1.	Efecto en conductores.....	11
1.6.2.	Efecto en transformadores.....	11
1.6.3.	Efecto en motores.....	12
1.6.4.	Efecto en capacitores.....	12
1.7.	Métodos de atenuación de armónicos.....	12
1.7.1.	Configuración interna de transformadores.....	12
1.7.2.	Reactancias (Líneas de AC).....	13
1.7.3.	Filtros armónicos.....	13
CAPÍTULO 2		16
2.1.	Introducción.....	16
2.2.	Metodología	16
2.3.	Descripción del lugar de estudio.....	17
2.4.	Softwares de interpretación y simulación.....	19
2.4.1.	Software ArcGIS.....	19
2.4.2.	Software de simulación CYMDIST	19
2.4.3.	Software Power BI.....	20
2.5.	Recopilación de datos.....	20
2.5.1.	Datos del analizador.....	20
2.5.2.	Datos del producto	20
2.6.	Fórmulas.....	21
2.6.1.	Fórmulas de la distorsión armónica de voltaje.....	21
2.6.2.	Fórmula para el cálculo de una muestra.....	22
2.6.3.	Fórmula para combinaciones.....	23
2.7.	Selección de la muestra.....	24
2.7.1.	Cálculo de la muestra.....	24

2.7.2.	Puntos de ubicación de la muestra.....	25
2.8.	Análisis de los datos obtenidos	25
2.8.1.	Exportación a Power BI.....	25
2.8.2.	Visualización de datos.....	26
2.8.3.	Niveles de distorsión armónica de voltaje.....	27
2.8.4.	Nivel de voltaje y cargabilidad de los transformadores.	28
2.9.	Determinación de incumplimientos del alimentador.....	29
2.9.1.	Distorsión armónica de voltaje.....	29
2.9.2.	Incumplimiento en los niveles de distorsión armónica total de voltaje (THDv). .	30
2.9.3.	Incumplimiento en los niveles de distorsión armónica individual de voltaje (IHDv).	32
CAPÍTULO 3	.....	36
3.1.	Simulación de armónicos.	36
3.1.1.	Modelado de filtro armónico.	38
3.2.	Ubicación óptima de filtros.....	40
3.2.1.	Método de eliminación de regiones.	40
3.2.2.	Diagrama de flujo de proceso.....	41
3.2.3.	Determinación de ubicación óptima.....	43
3.3.	Reporte de voltaje.	49
3.4.	Reporte de THDv.	49
Conclusiones.	.....	55
Recomendaciones.	.....	56
Referencias.....	.....	57
Anexos.....	.....	60
Anexo A.....	.....	60
Anexo B.....	.....	60

Índice de Figuras

Figura 1 Perturbación de transitorio impulsivo.....	2
Figura 2 Perturbación de transitorio oscilatorio.....	2
Figura 3 Desequilibrio de onda trifásica.....	3
Figura 4 Perturbación tipo Sag.....	3
Figura 5 Espectro de perturbación flicker.....	4
Figura 6 Onda senoidal sin contenido armónico.....	5
Figura 7 Onda senoidal de voltaje con contenido armónico.....	5
Figura 8 Descomposición de onda cuadrada en ondas senoidales.....	6
Figura 9 Onda de voltaje y corriente con carga lineal.....	7
Figura 10 Onda de voltaje y corriente con carga no lineal.....	7
Figura 11 Efecto skin o pelicular en conductores.....	11
Figura 12 Principio de funcionamiento de un filtro pasivo.....	14
Figura 13 Principio de funcionamiento de un filtro activo.....	14
Figura 14 Principio de funcionamiento de un filtro híbrido.....	15
Figura 15 Ubicación S/E La Esperanza.....	17
Figura 16 Diagrama unifilar S/E La Esperanza.....	18
Figura 17 Topología del circuito No2 S/E de la Esperanza.....	19
Figura 18 Exportación de parámetros eléctricos.....	21
Figura 19 Mediciones de los analizadores de red en Excel.....	21
Figura 20 Transformadores de distribución alimentador No2.....	24
Figura 21 Puntos de ubicación de analizadores de red.....	25
Figura 22 Manejo de datos en PowerBI.....	26
Figura 23 Interpretación de parámetros en PowerBI.....	26
Figura 24 Curva de voltaje y THDv del transformador 16384.....	28
Figura 25 Espectro de THDv del transformador monofásico 16323.....	31

Figura 26 Espectro de THDv del transformador trifásico 16325.....	32
.....	32
Figura 27 Distorsión armónica individual de voltaje en transformador monofásico 16323.....	33
Figura 28 Distorsión armónica individual de voltaje en transformador monofásico 16325.....	34
Figura 29 Alimentador No.2 modelado en el Software Cymdist.	36
Figura 30 Configuración de fuente de frecuencia armónica conectada en las Fases B y C.	37
Figura 31 Configuración de fuente de frecuencia armónica conectada en la Fase A.	37
Figura 32 Configuración de voltaje equivalente en cabecera del alimentador.....	38
Figura 33 Configuración de demanda máxima en cabecera del alimentador.	38
Figura 34 Configuración de parámetros de filtro en Cymdist.	39
Figura 35 Impedancias equivalentes del filtro en Cymdist.	40
Figura 36 Diagrama de flujo para determinar la ubicación óptima de los filtros armónicos.	41
Figura 37 Selección de nodos de la primera etapa de subdivisión de la troncal.	43
Figura 38 subdivisión de la primera subregión seleccionada.	44
Figura 39 Subdivisión de la segunda subregión seleccionada.	46
Figura 40 Puntos de ubicación óptima de filtros en la topología de la red en ArcGIS.	48

índice de Tablas

Tabla 1 <i>Limites de distorsión armónica establecidos por la regulación ARCERNNR 002/20.</i>	8
Tabla 2 <i>Normas internacionales para la medición, prácticas e instrumentación sobre armónicos.</i>	8
Tabla 3 <i>IHDv y THDv Max de cada transformador.</i>	27
Tabla 4 <i>Cargabilidad de los transformadores.</i>	29
Tabla 5 <i>Parámetros de distorsión armónica total de voltaje máxima e Incumplimiento.</i>	30
Tabla 6 <i>Parámetros de distorsión armónica individual de voltaje máxima e Incumplimiento.</i>	32
Tabla 7 <i>Transformadores con su respectivo porcentaje de incumplimiento en IHDv y THDv.</i>	34
Tabla 8 <i>Cuadro de parámetros del alimentador en nodo fuente.</i>	39
Tabla 9 <i>Puntos de ubicación de evaluación 1.</i>	43
Tabla 10 <i>Puntos de ubicación de evaluación 2.</i>	45
Tabla 11 <i>Puntos de ubicación de prueba de evaluación 3.</i>	46
Tabla 12 <i>Coordenadas de ubicación óptima de filtros en Cymdist.</i>	47
Tabla 13 <i>Coordenadas de georreferencia de ubicación óptima en ArcGIS.</i>	48
Tabla 14 <i>Niveles de voltaje evaluados en los tramos secundarios de los transformadores.</i>	49
Tabla 15 <i>Reporte de niveles de IHDv y THDv con las fuentes de frecuencia conectadas.</i>	50
Tabla 16 <i>Reporte de niveles de IHDv y THDv con un filtro de sintonía simple conectado.</i>	51
Tabla 17 <i>Reporte de niveles de IHDv y THDv con dos filtros de sintonía simple conectado.</i>	51
Tabla 18 <i>Reporte de niveles de IHDv y THDv con tres filtros de sintonía simple conectado.</i>	52
Tabla 19 <i>Comparativa de niveles de atenuación armónica con 1, 2, y 3 filtros.</i>	53
Tabla 20 <i>Niveles de distorsión armónica individual de voltaje en transformadores de estudio.</i>	60
Tabla 21 <i>Porcentajes de IHDv y THDv de combinaciones de la Evaluación 1.</i>	60
Tabla 22 <i>Porcentajes de IHDv y THDv de combinaciones de la Evaluación 2.</i>	62
Tabla 23 <i>Porcentajes de IHDv y THDv de combinaciones de la Evaluación 3.</i>	63

Resumen

Los armónicos constituyen perturbaciones no deseadas que inciden de manera adversa en la calidad de la energía eléctrica, generando efectos negativos en los equipos conectados a la red de cualquier sistema eléctrico de potencia. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo estudios de calidad que permitan evaluar el estado del suministro eléctrico y analizar los impactos ocasionados por estos. El presente trabajo de titulación tiene como objetivo determinar la ubicación óptima de filtros armónicos que permitan la atenuación de armónicos de voltaje presentes en la red secundaria del alimentador No2 de la subestación La Esperanza de la empresa eléctrica EMELNORTE. Mediante este estudio se busca mitigar las distorsiones armónicas de voltaje presentes en las redes de distribución. La metodología empleada permitió determinar los niveles y tipo de armónicos predominantes en la red secundaria del alimentador a través del análisis de una base de datos proporcionada por el departamento de Calidad de Energía y Estudios Eléctricos de la empresa distribuidora EMELNORTE. Estos análisis se realizaron siguiendo los criterios y límites de calidad de producto establecidos en la regulación vigente ARCERRNN 002/20, que se refiere a la distorsión armónica de voltaje. Una vez obtenida esta información, se procedió a seleccionar y dimensionar filtros armónicos necesarios para la atenuación de los armónicos presentes. Mediante la implementación de una metodología diseñada para optimizar el proceso de determinación de la ubicación óptima de estos filtros en el software CYMEDIST, se identificaron los puntos de ubicación óptima de los filtros en la red primaria del alimentador. Finalmente, se exponen los resultados de distorsión armónica de voltaje total e individual, los cuales se encuentran dentro de los límites establecidos por la regulación aplicada en el análisis.

Palabras clave: Mitigación de armónicos, Redes de distribución, Distorsión armónica, Filtros armónicos, Calidad de energía.

Abstract

Harmonics are unwanted disturbances that adversely affect the quality of electrical energy, affecting the equipment connected to any electrical power system network. Therefore, it is necessary to carry out quality studies to evaluate the state of the power supply and analyze the impacts caused by these disturbances. This qualification work aims to determine the optimum location of harmonic filters that allow the attenuation of voltage harmonics present in the secondary network of feeder No. 2 of the La Esperanza substation of the EMELNORTE electricity company. This study seeks to mitigate the harmonic voltage distortions present in the distribution networks. The methodology used made it possible to determine the predominant levels and types of harmonics in the feeder's secondary network by analyzing a database provided by the Power Quality and Electrical Studies department of the distribution company EMELNORTE. These analyses were carried out following the criteria and product quality limits established in the current regulation ARCERRNN 002/20, which refers to harmonic voltage distortion. Once this information was obtained, harmonic filters were selected and sized to attenuate the harmonics present. By implementing a methodology designed to optimize the process of determining the optimum location of these filters in the CYMEDIST software, it was possible to identify the optimum location points for the filters in the feeder's primary network. Finally, the results of total and individual harmonic voltage distortion are presented within the limits established by the regulation applied in the analysis.

Keywords: Harmonic mitigation, Distribution networks, Harmonic distortion, Harmonic filters, Power quality

Contextualización

El servicio eléctrico ha experimentado un impacto negativo debido al crecimiento de dispositivos electrónicos conectados a la red, que al ser cargas del tipo no lineal generan una variedad de perturbaciones en la red eléctrica. Según se denota en la regulación ARCERNNR 002/20 “Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica”, la calidad del servicio eléctrico se encuentra estrechamente ligada a las perturbaciones, las cuales abarcan fenómenos tales como armónicos, flickers, fluctuaciones de voltaje, entre otros. (ARCERNNR, 2020).

Las instalaciones eléctricas pueden ser afectadas de diversas maneras, siendo una de ellas la referida a la deficiente calidad del suministro eléctrico, llegando al punto de generar problemas muy significativos en equipos eléctricos conectados e instalaciones. Por lo consiguiente, se han establecido diversas normativas y regulaciones que no sólo definen los niveles mínimos o estándares de la calidad del suministro eléctrico, sino que también describen los métodos y procedimientos para llevar a cabo la medición de estos parámetros, tal como se expone en la norma IEEE 519-2014 “Para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia” (IEEE, 2014).

Según los datos expuestos por e-Comex (2020) “la incorporación creciente de nuevas tecnologías, basadas en electrónica de potencia para la automatización de procesos en el Ecuador ha ido en aumento”. Estas tecnologías introducen equipos que presentan características de carga no lineal y son altamente sensibles a las variaciones de corriente y voltaje, dando lugar a perturbaciones en la red eléctrica convencional.

En los estudios y pruebas realizadas por Qing-fang, determina:

Los sistemas de electrónica de potencia han generado armónicos, factor de potencia bajos, entre otros. Sin embargo, en la actualidad, estas perturbaciones han experimentado un aumento significativo en relación con la revolución electrónica, que ha dado lugar a equipos extremadamente sensibles a las interrupciones y la presencia de cargas no lineales. (2014)

Según Suarez et. al, (2020) quien realizó pruebas con cargas no lineales instaladas en un sistema de distribución eléctrica, evaluó los fenómenos de diversidad y atenuación mediante la conexión de cargas idénticas, variaciones en parámetros de impedancia de la red obtuvo resultados que verifican que el despreciar dichos fenómenos podrían provocar sobreestimaciones hasta de un 40% al momento de evaluar los armónicos en el sistema de distribución estudiado.

Los filtros armónicos ayudan a reducir las corrientes y voltajes armónicos en los sistemas de distribución producidos por las cargas no lineales, como lo comprobaron Guacho y David (2022), en los resultados de su investigación con la aplicación de filtros híbridos en un sistema de barras, esto para la corrección de distorsión armónica total (THD) mediante simulaciones y análisis. En los cuales plantearon varios tipos de posibles perturbaciones y realizando pruebas con los distintos filtros como lo son los activos, pasivos e híbridos. Dando como resultado la selección del filtro híbrido el cual ayudo de mejor manera con el control de THD en dicho sistema.

La presencia de armónicos en una red de distribución puede dar lugar al fenómeno de resonancia, el cual es un problema recurrente. Este fenómeno puede ser provocado por varios factores, entre los que se incluyen el tipo de conexión implementado en la subestación, operación de la subestación, características del transformador de potencia.

El comportamiento de un transformador que presenta una impedancia no lineal, en este caso el sistema es más propenso a tener fenómenos de resonancia por la combinación de capacitancia que pueden ser generadas por un conductor de potencia, Banco de capacitores o cualquier otro generador de carga capacitiva (Editores, 2021).

Planteamiento del problema

El constante aumento de cargas no lineales ha emergido como una problemática que agrava las distorsiones senoidales en los voltajes suministrados, esto mediante la inyección de corrientes armónicas a la red de distribución, generando fallas en equipos eléctricos y dispositivos electrónicos, los cuales son altamente susceptibles a las fluctuaciones de voltaje provocadas por armónicos. En el caso de las empresas distribuidoras que presentan problemas de armónicos, se ven afectadas por el deterioro de sus equipos de transmisión o transformación, reduciendo su tiempo de vida útil y eficiencia, además de enfrentar posibles sanciones en caso del incumplimiento a ciertos límites de calidad de producto establecidos por la REGULACION No. ARCERNNR 002/20 denominada “calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica”.

Formulación del problema

¿Cómo determinar la ubicación óptima de filtros para la atenuación de armónicos en la red secundaria del Alimentador No.2 de la subestación La Esperanza, de la Empresa Eléctrica Regional Norte EMELNORTE S.A?

Justificación

Los sistemas de distribución eléctrica son los encargados de transmitir la potencia eléctrica desde las subestaciones hasta los abonados, quienes necesitan de este servicio eléctrico. La empresa distribuidora encargada deberá entregar un suministro eléctrico de calidad de acuerdo con ciertos límites de parámetros establecidos por las regulaciones vigentes AECERNNR 002/20, pero la calidad del servicio eléctrico generalmente es perjudicada por distintos tipos de afectaciones como lo son los armónicos. Por eso es necesario realizar un análisis que determine el estado actual por armónicos en la red, que permita la selección adecuada de algún método o tecnología para la atenuación de este y mejorar la calidad del servicio eléctrico suministrado por la empresa distribuidora a los abonados o usuarios finales.

La subestación La Esperanza, ubicada en la provincia de Pichincha, en el cantón Pedro Moncayo, bajo la jurisdicción de la empresa eléctrica EMELNORTE S.A, que opera con un voltaje nominal de 69/13.8 kV y cuenta con 4 alimentadores primarios No.1, No.2, No.3, No.4. En el contexto de este estudio, se centrará en el circuito No.2 debido a que presenta varias cargas del tipo no lineal en la red, la cual podría presentar distorsiones armónicas que afecten a la calidad del servicio eléctrico suministrado.

El principal beneficiario será la Empresa Eléctrica Regional Norte EMELNORTE S.A, quien proporcionará el acceso a softwares para el análisis de la red, así como la base de datos necesaria, lo cual resulta fundamental para la viabilidad de este estudio.

Alcance

Se llevará a cabo el análisis de niveles de distorsión armónica total de voltaje (THDv) y distorsión armónica individual de voltaje (IHDv) de la red secundaria del alimentador No.2 de la subestación La Esperanza, tras determinar los niveles de voltajes armónicos de la red, se hará una comparación de los valores obtenidos bajo la regulación vigente ARCERNNR 002/20 denominada "Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica".

La base de datos necesaria para el análisis será proporcionada por el departamento de (Calidad de Energía y Estudios Eléctricos) de la Empresa Eléctrica Regional Norte EMELNORTE S.A, información descargada de los analizadores de la red secundaria del alimentador No.2, topología de la red y alimentadores de la subestación la Esperanza.

Para el análisis se cuenta con el software de modelación de sistemas eléctricos CYME, mediante su módulo de armónicos se llevará acabo el dimensionamiento, cantidad de los filtros

necesarios y se determinará la ubicación óptima de filtros en la red primaria del alimentador para la atenuación de armónicos en la red secundaria, esto mediante simulaciones. En el apartado de topología de la red se utilizará el software ArcGIS.

Objetivo general

- Determinar la ubicación óptima de filtros en la red primaria, usando como línea base datos de analizadores de red de la subestación La Esperanza de la Empresa Eléctrica Regional Norte EMELNORTE S.A para la atenuación de armónicos en la red secundaria del Alimentador No.2.

Objetivos específicos

- Describir los tipos de tecnologías y métodos para la atenuación de armónicos.
- Analizar el estado actual por tipo de armónicos en la red secundaria del alimentador No.2.
- Determinar la ubicación óptima de filtros en la red primaria, mediante los softwares CYMDIST y ArcGIS.

CAPÍTULO 1

Descripción de tecnologías y métodos para la atenuación de armónicos.

1.1. Calidad de energía

Durante los últimos años en la Ingeniería eléctrica el termino de “Calidad de la energía” ha generado un gran interés, especialmente en grandes países donde el crecimiento industrial ha ido incrementándose de manera exponencial, además del crecimiento poblacional y la demanda generada por nuevas tecnologías, lo que conlleva a estos países aumentar la generación de energía eléctrica mediante alternativas renovables (CONELEC, 2022).

La calidad de la energía hace referencia al nivel de pureza de la onda sinusoidal de voltaje y corriente suministrada por un sistema de transmisión o distribución, se espera que la distorsión de la señal provocada por los distintos factores que influyen en todo este proceso sea mínima y que la energía eléctrica entregada sea muy cercana a una señal sinusoidal pura(IECOR, 2021).

Para mantener una calidad de energía se han creado varias regulaciones y normas por organizaciones internacionales dedicadas al análisis y estudio de perturbaciones en los sistemas eléctricos, entre las más reconocidas y aplicadas se encuentran las normativas y estándares dado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), la Comisión electrónica Internacional (IEC) y el Instituto Americano de Normas (ANSI).

1.2. Perturbaciones en redes eléctricas.

En un sistema eléctrico, una perturbación depende de la frecuencia junto con la amplitud o de forma dependiente a cada uno. También puede depender del tiempo de duración y el espectro del voltaje. Estas perturbaciones provocan la disminución de la calidad de energía y pueden estar conectadas al sistema, componentes de generación, subsistemas de transmisión y distribución (Dariel Arcila, 2018).

Según la IEEE 1159, las perturbaciones se clasifican en:

1.2.1. Transitorios.

Este tipo de interrupciones en el sistema eléctrico suceden en tiempos muy cortos, generando grandes aumentos de corriente y voltaje durante este ciclo. Se clasifican como transitorios impulsivos y transitorios oscilatorios, generalmente se producen por la inducción de descargas

atmosféricas cercanas al sistema eléctrico, conexión y desconexión de cargas capacitivas o durante la transición de un sistema estable a otro sistema estable (Soledad & Ortiz, 2019).

En la Figura 1 se aprecia el comportamiento de una perturbación transitoria del tipo impulsivo, causada por un evento de descarga electrostática.

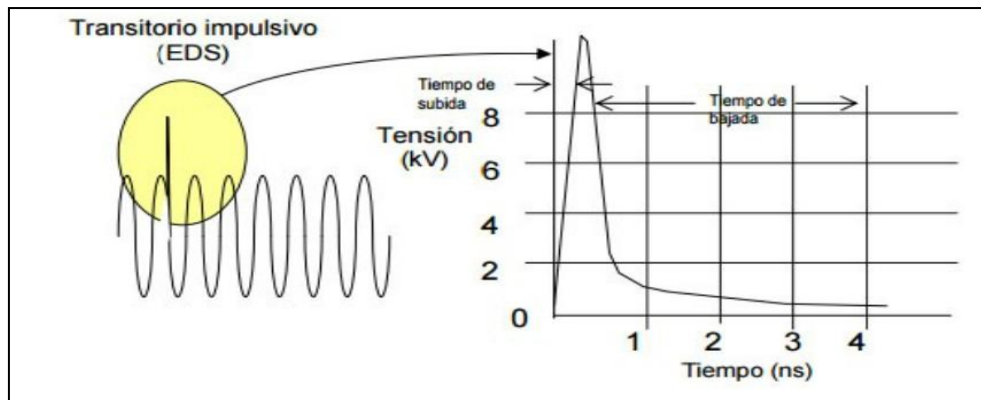


Figura 1 Perturbación de transitorio impulsivo.

Fuente:(Afinidad Eléctrica, 2021).

En la Figura 2 se aprecia el comportamiento de una perturbación transitoria del tipo oscilatorio, un caso típico de baja frecuencia atribuible a la energización de los bancos de capacitores.

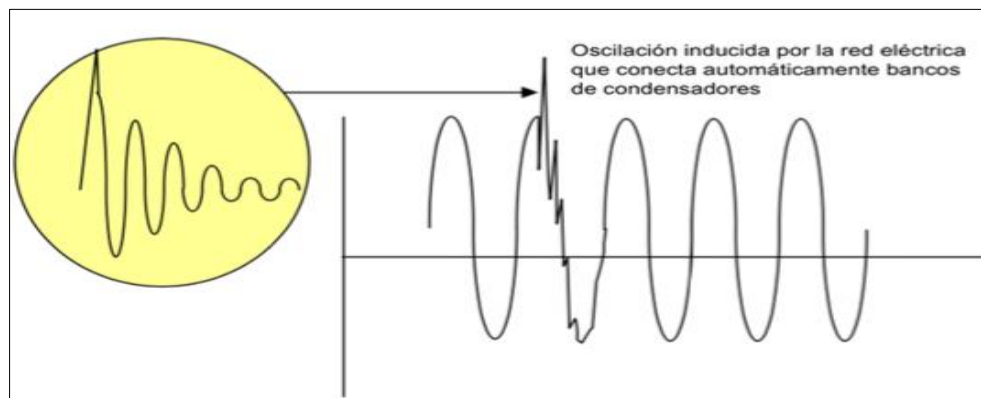


Figura 2 Perturbación de transitorio oscilatorio.

Fuente:(Afinidad Eléctrica, 2021).

1.2.2. Desbalances de voltaje/corriente.

Este fenómeno se presenta en sistemas trifásicos, esto cuando existen desviaciones simultáneas o independientes respecto a las magnitudes de corriente y voltaje del sistema trifásico y esta diferencia de fases es distinta a 120° . Este desequilibrio genera componentes de

secuencia que se evalúan para determinar el desbalance del sistema como se muestra en la Figura 3.

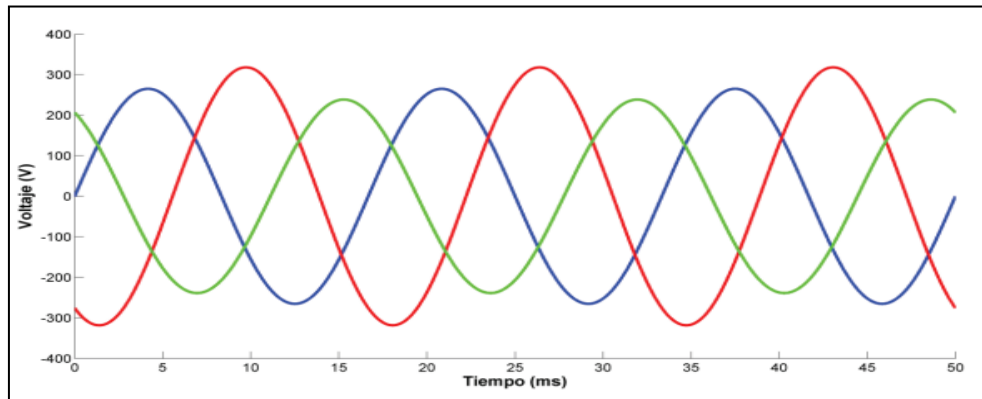


Figura 3 Desequilibrio de onda trifásica.

Fuente: (Soledad & Ortiz, 2015).

1.2.3. Disminuciones de voltaje o Sag.

La disminución de voltaje o también conocida como “sag”, refiere a una reducción de voltaje temporal en un sistema eléctrico. Esta se encuentra entre 0.1 y 0.9 pu de la magnitud de voltaje y su tiempo de prolongación de esta perturbación varía entre (0.5 ciclos y 1min)(Sánchez Huerta et al., 2018). En la Figura 4 se puede apreciar el descenso del voltaje entre 10% y un 90% respecto a sus valores nominales, usualmente asociados con cortocircuitos en las líneas, conexión a la red de grandes cargas o al arranque de motores.

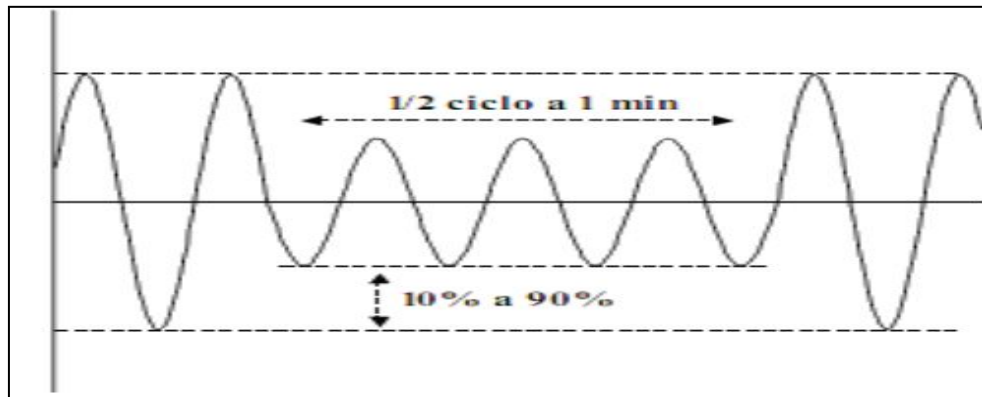


Figura 4 Perturbación tipo Sag.

Fuente: (Sánchez Huerta et al., 2018).

1.2.4. Flickers.

Según Soledad & Ortiz (2019), este tipo de fluctuación de voltaje usualmente se lo asocia con la tecnología de iluminación, generando de forma visible un titileo en estos dispositivos. Se refiere a las variaciones rápidas y continuas de la corriente de carga que produce las fluctuaciones de voltaje.

En la Figura 5 se aprecia la distorsión a la señal suministrada cuando se encuentra en la red un horno de arco conectado.

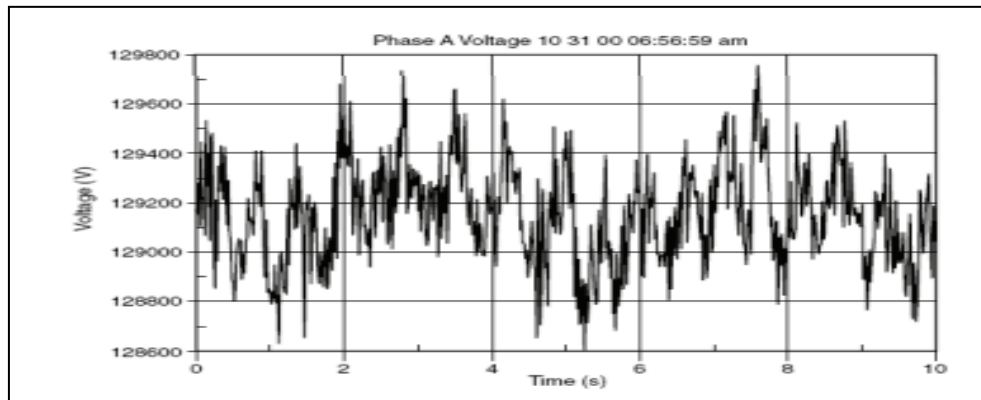


Figura 5 Espectro de perturbación flicker.

Fuente:(Soledad & Ortiz, 2019).

1.2.5. Armónicos.

Los armónicos son las variaciones, alteraciones o distorsiones en la forma de onda sinusoidal de voltaje o corriente de la red. Donde las componentes sinusoidales cuentan con frecuencias de múltiplos enteros respecto a la frecuencia fundamental (Ramon Pinyol, 2017).

En la Figura 6 se muestra una forma de onda sinusoidal de voltaje de acuerdo con los estándares de calidad respecto a la amplitud y frecuencia de la onda pura, sin ninguna interferencia o perturbación que afecten en su estructura.

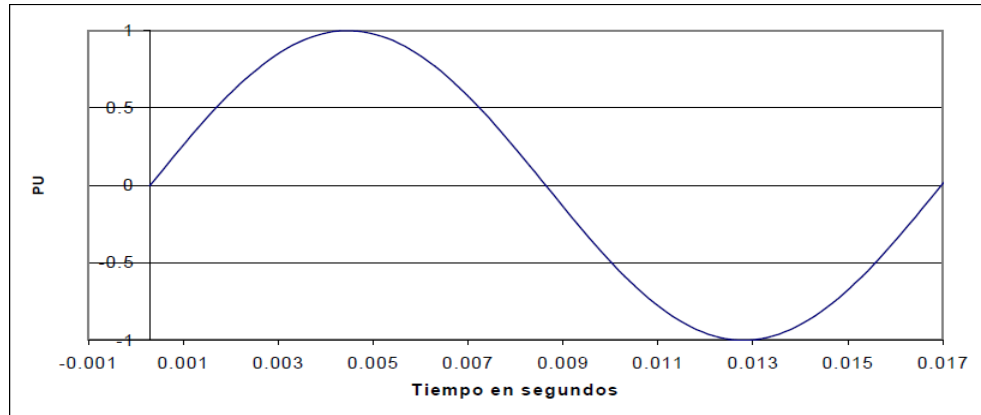


Figura 6 Onda senoidal sin contenido armónico.

Fuente: (Ramon Pinyol, 2017).

El valor pico o valor RMS puede ser alterado cuando la onda periódica no tiene forma sinusoidal debido al contenido armónico en este. En la Figura 7 se presenta una onda con contenido armónico, como se puede apreciar no es una onda puramente sinusoidal donde su valor pico respecto a la Figura 6 ha aumentado.

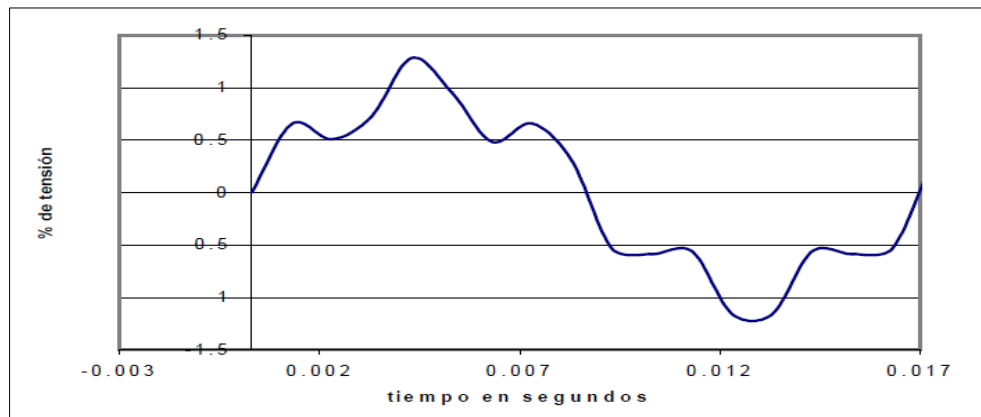


Figura 7 Onda senoidal de voltaje con contenido armónico.

Fuente:(Ramon Pinyol, 2017).

1.3. Armónicos en sistemas eléctricos.

Cuando la forma sinusoidal de una onda periódica del voltaje o corriente no es pura, se asocia directamente a los armónicos y por consiguiente a las series de Fourier. El matemático Jean-Baptiste Joseph Fourier definió una de las técnicas de análisis respecto a las señales sinusoidales, afirmando que “Cualquier función periódica $f(t)$, ya sea más o menos compleja, se puede descomponer en suma de funciones simples, sinusoidales, cuya frecuencia es múltiplo de la función periódica”(Carrillo González, 2018).

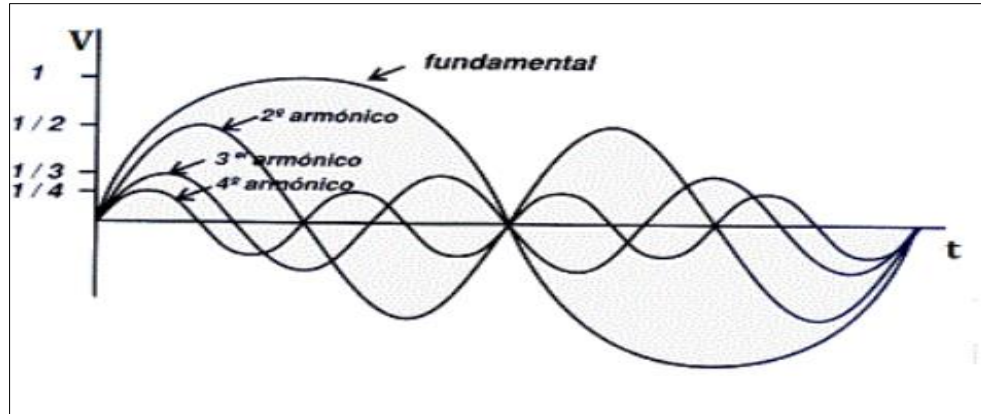


Figura 8 Descomposición de onda cuadrada en ondas senoidales.

Fuente:(Carrillo González, 2018).

En la Figura 8 se muestra una onda senoidal descompuesta en ondas senoidales de diferentes frecuencias, múltiplos de la onda fundamental.

1.3.1. Series de Fourier.

De acuerdo con lo dicho anteriormente, el teorema de Fourier establece que cualquier función periódica sin importar su complejidad puede ser descompuesta como la suma de sus ondas sinusoidales, que deben cumplir ciertas condiciones:

- a) Durante el período la integral de dicha función, de como resultado un valor finito.
- b) Las discontinuidades en un periodo tengan un número finito.
- c) Los máximos y mínimos de la función sean finitos, durante un periodo.

La aplicación del concepto de señales de la Corriente Alterna CA distorsionadas, implica que en la simetría de media onda la señal de su distorsión cuenta con la misma forma durante un semiciclo positivo como negativo, esta es la distorsión más frecuente en un sistema eléctrico de potencia por esta razón solamente se pueden encontrar armónicos impares(Carrillo González, 2018).

1.3.2. Cargas lineales y no lineales.

Las cargas en sistemas eléctricos pueden ser lineales y no lineales, dependiendo del tipo de carga existirán deformaciones en la forma de onda de la fuente de suministro o alimentación.

Con una carga lineal en un sistema, la relación que existe entre una onda de voltaje y corriente es sinusoidal, considerando que la corriente conserva esa misma forma, aunque generalmente

esta se desplazara en el tiempo en ángulo con una relación proporcional al voltaje(RPS Spa, 2018).

A manera ilustrativa, en la Figura 9 se muestra el comportamiento del voltaje y corriente cuando la onda sinusoidal de suministro está sometida a una carga del tipo lineal.

Por otro lado, con las cargas no lineales, la corriente no es proporcional en función del voltaje y fluctúa en función de la impedancia de carga alterna, como se ilustra en la Figura 10.

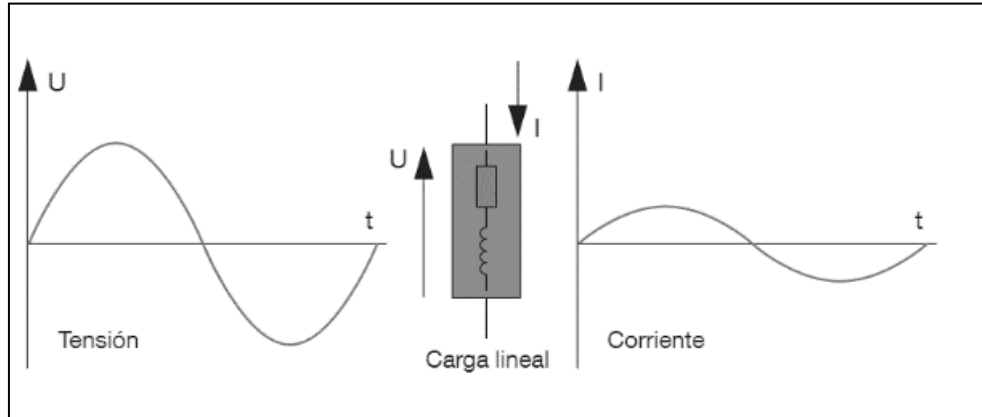


Figura 9 Onda de voltaje y corriente con carga lineal.

Fuente: (SectorElectricidad, 2020).

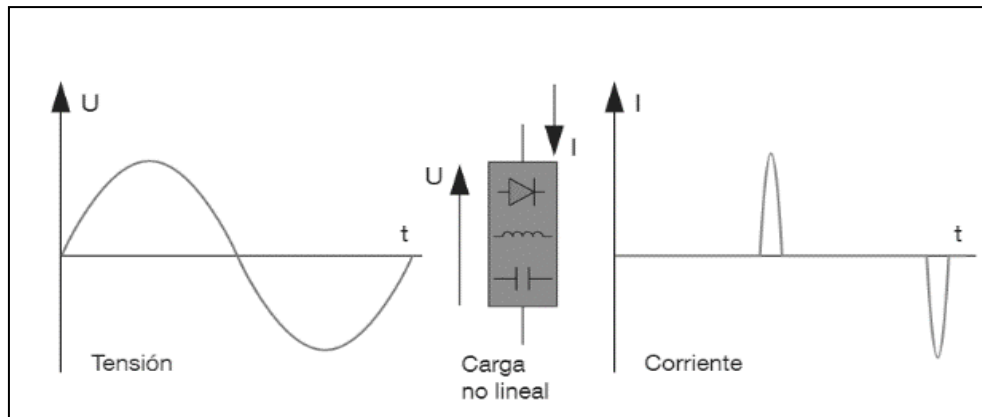


Figura 10 Onda de voltaje y corriente con carga no lineal.

Fuente: (SectorElectricidad, 2020).

Estas cargas no lineales atraen corrientes en pulsos cortos y abruptos que distorsionan las formas de onda de la corriente, generando armónicos que pueden provocar problemas de alimentación, afectando tanto al equipo del sistema de distribución como a las cargas conectadas al mismo. Los dispositivos y elementos que producen este tipo de fluctuaciones son electrónicos

como impresoras, televisores, computadoras y sistemas de telecomunicaciones que usan tecnologías de conversión de energía de fuente de alimentación conmutada.

1.4. Niveles de Tolerancia de armónicos.

En el Ecuador, la norma vigente establecida por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables, en su función asumida de administrador del sistema único de información estadística del sector eléctrico, establece a las instituciones encargadas del suministro de servicio eléctrico una norma técnica de los límites de calidad de estos servicios, estableciendo los valores eficaces (RMS) de la distorsión de voltajes armónicos individuales (IHDv) y niveles de distorsión armónica total de voltaje (THDv) (ARCERNNR, 2020). Son expresados como porcentajes de voltaje nominal en un punto respectivo de medición que no deberá superar estos valores límite indicados en la Tabla 1.

Tabla 1

Límites de distorsión armónica establecidos por la regulación ARCERNNR 002/20.

Nivel de voltaje	Distorsión armónica individual (IHDv) [%]	Distorsión armónica total (THDv) [%]
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. Fuente: (ARCERNNR, 2020).

En las regulaciones de niveles de voltaje en los puntos de suministro a los abonados desde la red pública, existen algunos lineamientos internacionales respecto al nivel de distorsión armónico para equipos y sistemas que se conectan a la red. En la Tabla 2 se mencionan las normas más importantes.

Tabla 2

Normas internacionales para la medición, prácticas e instrumentación sobre armónicos.

Normas.	
IEEE519	Recomendaciones sobre prácticas y requisitos convenientes por parte de la IEEE, para el control de armónicos en los sistemas eléctricos.

IEC61000-4-7	Guía sobre la instrumentación y medición de armónicos e interarmónicos en sistemas de suministro eléctrico y equipos conectados a estos.
IEC61000-4-15	Especificaciones de diseño del medidor de parpadeos.
IEC61000-4-30	Metodologías para determinar el nivel de calidad eléctrica.

Nota. Fuente:(Das, 2015), modificada por el autor.

Estos tipos de regulaciones o normas referentes a la distorsión armónica de voltaje ayudan a establecer límites para mejorar la calidad eléctrica del servicio suministrado.

1.5. Fuentes de armónicos.

El constante desarrollo de equipos basados en electrónica de potencia, las cargas no lineales, así como el aumento de generadores no convencionales han introducido varias fuentes generadoras de corrientes y voltajes armónicos en la red de suministro (Ramon Pinyol, 2017).

Cuando se conecta una carga del tipo no lineal a la red, se da lugar a un flujo de corrientes armónicas que genera perturbaciones en la forma de la onda sinusoidal de la corriente de suministro, cambiando su naturaleza generando distorsiones en la misma. (Abbas et al., 2021).

Entre las principales fuentes generadoras de armónicos se tienen:

1.5.1. Convertidores estáticos de potencia.

Estos tipos de convertidores estáticos de potencia se puede encontrar en una gran cantidad en industrias, constituyen la mayor cantidad de cargas del tipo no lineal en la red de suministro. Entre las aplicaciones más comunes son los variadores de frecuencia o velocidad y fuentes electromagnéticas. En el desarrollo tecnológico, el uso de convertidores se ha vuelto una parte muy importante debido a la aplicabilidad de estos y su capacidad de cambiar corrientes del tipo AC a DC, AC a AC, DC a DC y DC a AC, permitiendo tener un mejor control y manejo de los equipos y maquinarias. Según el tipo de conversión u operación realizado dependerá el orden armónico inyectado a la red.

1.5.2. Magnetización lineal de transformadores.

La magnetización lineal de un transformador durante su excitación da paso a la generación de armónicos. La excitación en los transformadores es no sinusoidal, debido a la secuencia cero que produce armónicos múltiplos de tres presentes en su corriente de excitación. La presencia de armónicos impares se produce durante el aumento de voltaje, generando una sobresaturación

de la corriente magnetizaste o también conocida como sobre tensión simétrica. Otros tipos de fuentes armónicas en los transformadores que pueden estar presentes son:

- a) Corriente de inrush: Genera armónicos de segundo orden.
- b) Magnetización DC: Genera armónicos pares e impares.

1.5.3. Máquinas rotativas.

Son varias las causas de generación de armónicos debido a la operación de máquinas rotativas según Dariel Arcila (2018) estas pueden ser por la distribución de flujo en el entre hierro de forma no uniforme, el delineamiento entre los ciclos de rotación y el rotor de la máquina, además de los dispositivos utilizados para el funcionamiento de estas máquinas, tales como variadores de velocidad o inversores de alimentación.

1.5.4. Reguladores AC.

Estos reguladores son dispositivos electrónicos basados en tiristores, empleados para regular el flujo de potencia desde una fuente AC hasta una carga, variando el valor de voltaje eficaz de llegada. Los tiristores trabajan con media onda, onda completa o ciclo integral que dan paso a la generación de armónicos. Generalmente, los armónicos que se presentan no son de orden par debido a que estos armónicos se anulan si durante el semiciclo positivo la forma de onda es igual a la que se da durante el semiciclo negativo. Los armónicos que circulan por el neutro son homopolares (múltiplos de tres), si no existe un neutro, la carga no va a generar estos armónicos.

1.5.5. Dispositivos de arco.

En un dispositivo de arco, la característica del voltaje respecto a la corriente es altamente no lineal. Entre los principales dispositivos de arco se encuentran los soldadores de arco, hornos de arco, además de la iluminación del tipo descarga.

Las frecuencias predominantes de armónicos que producen estos hornos de arco van desde una segunda a séptima armónica, debido al cambio de resistencia y variación de ciclo a ciclo, generando una corriente con característica no periódica de espectro continuo armónico(Sánchez Huerta et al., 2018).

1.6. Efecto de armónicos.

En los sistemas eléctricos, directamente en varios de sus componentes presentan problemas por armónicos, algo que no es deseable por los efectos que estos producen en los mismos. En

varias de las situaciones es muy difícil calcular los daños que estos producen en la red o en circuitos particulares. Entre los principales efectos se detallan.

1.6.1. Efecto en conductores.

La distribución de corriente alterna no es uniforme en toda la sección de un conductor, sino que esta va desde el núcleo hacia la capa superficial o externa del cable, a este fenómeno se lo denota como efecto pelicular o piel.

Proporcionalmente, al aumento de la frecuencia, el efecto pelicular va incrementando, provocando sobrecalentamiento en los conductores, como se muestra en la Figura 11.

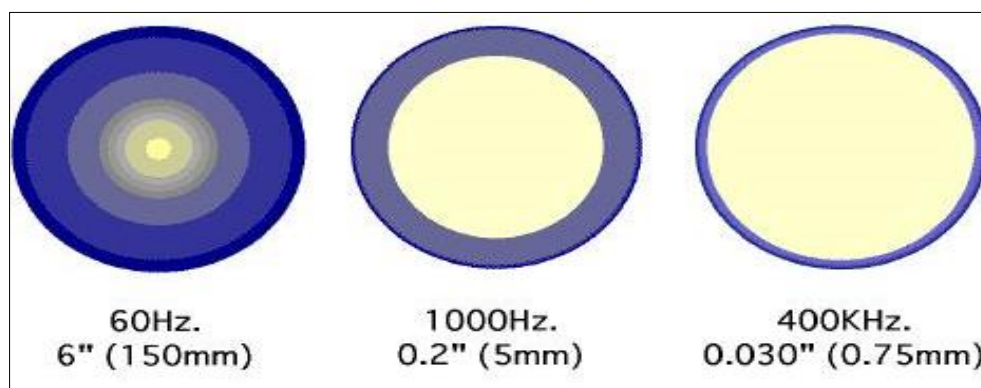


Figura 11 Efecto skin o pelicular en conductores.

Fuente:(APCE, 2018).

La frecuencia (ωL) es directamente proporcional a la reactancia, generando así armónicos con frecuencias mayores a la fundamental, generando mayores pérdidas en las líneas(APCE, 2018).

1.6.2. Efecto en transformadores.

Los transformadores se ven afectados de distintas formas respecto a las pérdidas generadas por los armónicos, según Vásquez Stanescu et al., (2017) estas se clasifican en:

- **Pérdidas I^2R :** Las pérdidas aumentarán por efecto piel, si la corriente de la carga contiene armónicos.
- **Pérdidas del núcleo:** Se producen por el voltaje de excitación en el núcleo, la onda de voltaje sinusoidal es independiente de la corriente de carga en el primario del transformador. Los armónicos producidos en la corriente de magnetización son muy pequeños en comparación a la corriente de carga, generando pérdidas totales mínimas.

- **Pérdidas por corrientes Eddy:** Estas corrientes son proporcionales al cuadrado de la corriente y frecuencia armónica tomada en consideración, generando un aumento de estas pérdidas en los devanados que conducen corrientes no lineales.

1.6.3. Efecto en motores.

En los motores de inducción y máquinas rotativas el efecto que provoca la presencia de los armónicos de voltaje es en el aumento de calor debido a las pérdidas en el hierro y cobre que este genera cuando son expuestos a altas frecuencias, de tal manera que estos armónicos producen una reducción en el torque desarrollado de este tipo de máquinas y afectaran a la eficiencia de este (Granados, 2018).

1.6.4. Efecto en capacitores.

Cuando se instalan capacitores en un sistema eléctrico de potencia es muy posible encontrar resonancia en el sistema. Cuando no hay esta resonancia, este efecto produce que la magnitud de los voltajes y corrientes sean considerablemente más alta.

Se considera que la resonancia en los capacitores decrece en relación con el aumento de la frecuencia, el comportamiento de este dará paso libre para corrientes de alta frecuencia armónica, incrementando el esfuerzo dieléctrico y el calentamiento interno del capacitor. El calentamiento en algunos de los capacitores no provocará ningún efecto negativo, ya que su construcción con películas y laminillas ayudan a reducir considerablemente las pérdidas que este genera.

1.7. Métodos de atenuación de armónicos

En la actualidad las empresas eléctricas manejan estándares y límites permitidos con relación a los armónicos presentes en la red, debido a que no existe un método para eliminar la presencia de estos desde el diseño de la red. Por lo tanto, se busca técnicas o métodos que permitan la atenuación o mitigación de estos, como se presenta a continuación.

1.7.1. Configuración interna de transformadores.

Los transformadores de manera independiente forman parte de etapas convertidoras activas, esto los hace capaces de evadir ciertos tipos de armónicos que circulen aguas arriba en una instalación en lugar de eliminarlos. Según Ramon Pinyol (2017), estas son algunas de las configuraciones para estos transformadores.

- **Transformador triángulo-estrella:** Los armónicos de tercer orden que se encuentran presentes en el secundario son incapaces de circular por el primario en el sistema de distribución. Esto sucede porque los armónicos se quedan atrapados en la conexión delta o triángulo, impidiendo que estos circulen por el sistema eléctrico.
- **Transformador triángulo-estrella-triángulo:** Para eliminar los armónicos de orden 5° y 7° en el primario del triángulo, se colocan dos cargas no lineales semejantes en los secundarios del transformador.
- **Transformador en zig-zag:** Si se los colocan cerca de las cargas no lineales que generan los armónicos Triplen (múltiplos impares de tercer orden, 3°, 9°, 15°...), estos se encargaran de atraparlos evitando su propagación por la red primaria.

1.7.2. Reactancias (Líneas de AC).

La instalación de inductores en serie en la línea AC puede ayudar a minimizar la contaminación armónica generada por las cargas no lineales, con la capacidad de filtrar la corriente armónica de la red primaria. La instalación de este elemento en la línea puede limitar los picos de voltaje generados por estas cargas (Ramon Pinyol, 2017).

Estas reactancias en la línea tienen el inconveniente de generar una mayor caída de voltaje al sistema, más importante es que su efectividad para la minimización de THD no es tan efectiva, ya que los porcentajes de reducción a niveles de carga completa y debajo de media carga son muy bajos.

1.7.3. Filtros armónicos.

Uno de los métodos más utilizados para la atenuación de armónicos, cuando no se logra un resultado óptimo con la aplicación de métodos de atenuación mostrados en los puntos anteriores, se recomienda la instalación de filtros armónicos en los sistemas eléctricos, Estos se clasifican en:

- **Filtros pasivos:** Este tipo de filtros consisten en un circuito LC (y en ocasiones con una resistencia de amortiguamiento) que se sintoniza al rango necesario para el armónico que se quiere eliminar, generalmente armónicos de bajo orden (5°, 7°, 11°...) (Pérez Abril, 2012). Su instalación es en paralelo como se muestra en la Figura 12.

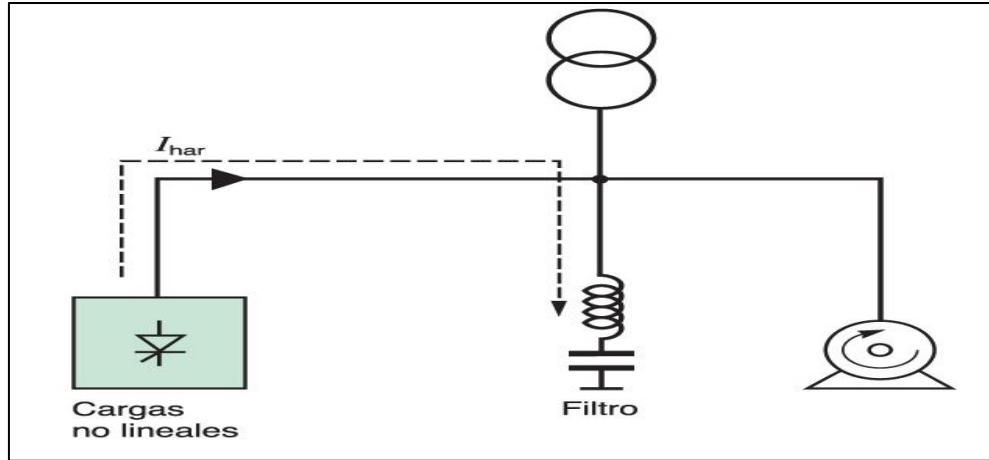


Figura 12 Principio de funcionamiento de un filtro pasivo.

Fuente:(Granados, 2018).

El diseño de este circuito tiene la capacidad de absorber los armónicos, con el objetivo de evitar su propagación por la red de suministro, además de su manera de adaptación frente a los armónicos que se desean mitigar.

- **Filtro activo:** La composición de estos sistemas se conforma con la electrónica de potencia, de tal manera que compensa la intensidad de armónicos generados por cargas no lineales en la red. El principio de funcionamiento de este dispositivo consiste en medir los armónicos y al mismo tiempo generar los mismos armónicos por fase opuesta, generando una reducción de THD normalmente inferior al 5% (Sher et al., 2016).

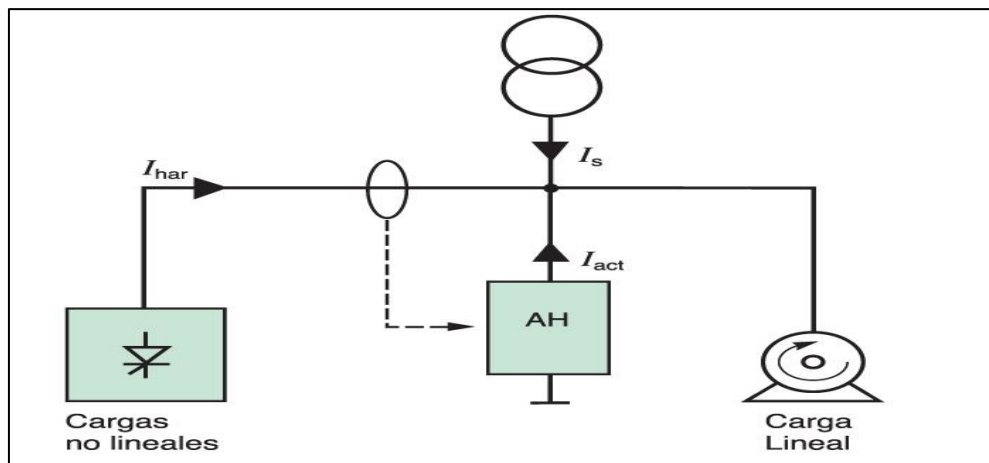


Figura 13 Principio de funcionamiento de un filtro activo.

Fuente:(Granados, 2018).

Estos filtros tienen la capacidad de ser conectados en paralelo o serie como se indica en la Figura 13, este compensa la corriente armónica de tal manera que la corriente de salida del sistema sea sinusoidal. Además de tener la capacidad de reducir la potencia reactiva de la carga, aumentando el factor de potencia (F_p) a valores casi de 1.

- **Filtros híbridos:** Su conexión puede ser en paralelo entre un filtro pasivo y activo, con el fin de generar un formato de sistema único, como indica la Figura 14.

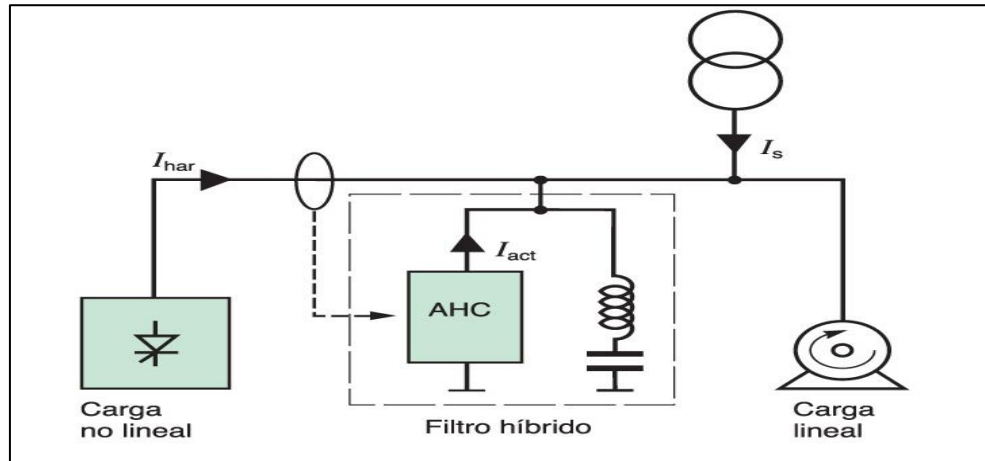


Figura 14 Principio de funcionamiento de un filtro híbrido.

Fuente:(Granados, 2018).

Este tipo de filtro brinda varias ventajas respecto a sus dos filtros, generando una amplia gama de niveles de rendimiento y potencia para el sistema.

En este capítulo se describió información sobre los tipos de perturbaciones que comúnmente afectan a las redes de distribución eléctrica. Dando a conocer el impacto que representan los armónicos en los sistemas eléctricos, que conlleva la generación de desgastes y sobrecalentamiento en los elementos y equipos de distribución, además de las adversas afectaciones en la calidad de la energía eléctrica. Tras describir los métodos para la atenuación de armónicos, se determinó que la utilización de filtros armónicos es la más idónea para la mitigación o atenuación de armónicos en un sistema eléctrico de distribución. Esta elección se fundamenta en su sobresaliente eficacia, versatilidad de ajuste y su capacidad para mejorar la calidad de energía. Cabe destacar que los filtros armónicos son dispositivos diseñados específicamente para atenuar o eliminar los armónicos presentes en la red eléctrica, a diferencia de otros métodos.

CAPÍTULO 2

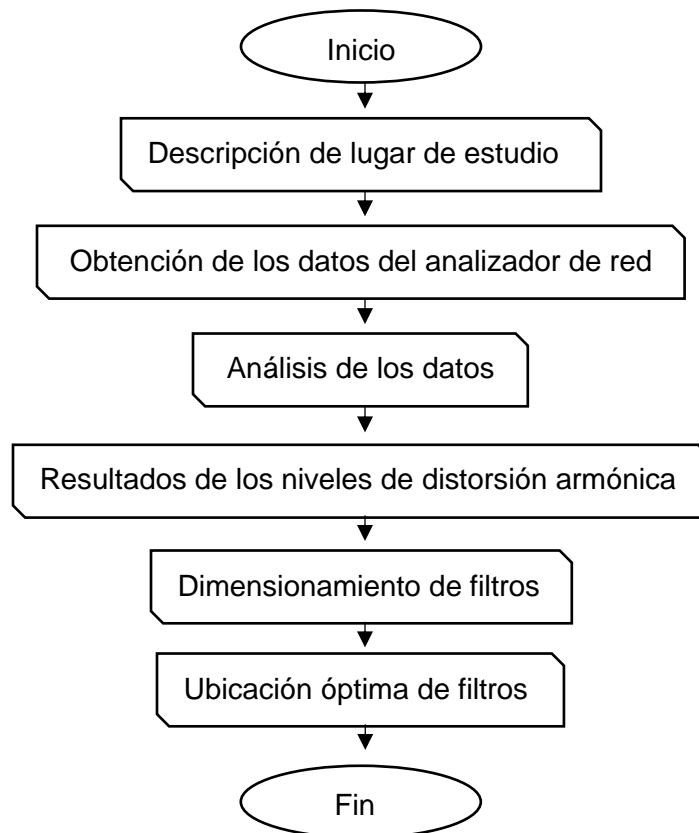
Análisis del estado de la red secundaria del alimentador No2 para determinar el tipo de armónico.

2.1. Introducción

En el presente capítulo, se llevó a cabo un análisis de la información proporcionada por el departamento de Calidad de Energía de EMELNORTE, la cual fue descargada de los analizadores de red. Mediante la metodología planteada se determinaron los niveles de THDv e IHDv en la red secundaria del alimentador No2 de la subestación La Esperanza.

2.2. Metodología

La metodología que se utilizó para efectuar el desarrollo de los capítulos 2 y 3 se describe a continuación:



1. Describir las principales características de la subestación eléctrica y el alimentador seleccionado para el estudio.
2. Recopilación de la base de datos descargados de los analizadores de la red secundaria del alimentador No 2 en el departamento de Calidad de Energía de EMELNORTE.
3. Analizar los niveles de distorsión armónica de voltaje total e individual THDv & IHDv, voltaje y cargabilidad de los transformadores.
4. Determinar los niveles de distorsión armónica de voltaje y el porcentaje de incumplimiento de cada transformador respecto a los límites permitidos por la regulación vigente ARCERNR 002/20.
5. Calcular y determinar los parámetros necesarios para el diseño de filtros para la atenuación de armónicos.
6. Simular fuentes armónicas utilizando el software Cymdist y determina la ubicación óptima de los filtros armónicos mediante el planteamiento de una metodología de optimización.

2.3. Descripción del lugar de estudio

La subestación La Esperanza inició su operación el 01 de enero del 2006 y cuenta con un nivel de voltaje de operación de 13,8/69kV con una potencia nominal de 10MVA. Se encuentra ubicada en el Cantón Pedro Moncayo de la provincia de Pichincha, como se indica en la Figura 15.

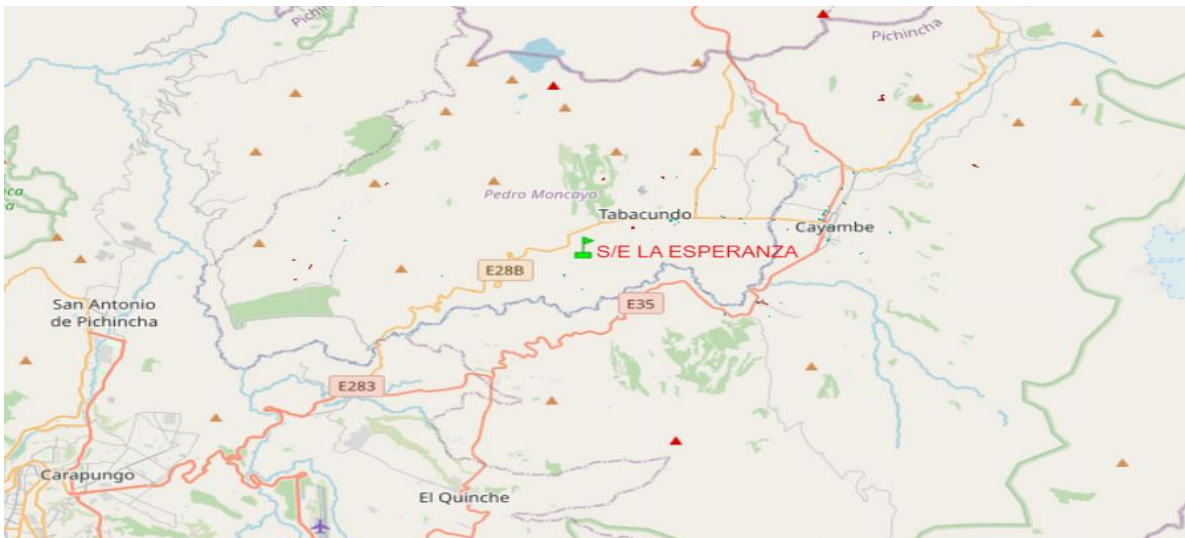


Figura 15 Ubicación S/E La Esperanza.

Fuente: Geoportal Emelnorte 2023.

En la Figura 16 se muestra el diagrama unifilar de la S/E La Esperanza del cómo se encuentra actualmente. Esta subestación se alimenta directamente a través de una línea de transmisión desde la subestación Cayambe a 69kV. Está equipada con un transformador de potencia de dos devanados de 10/12.5 MVA con una configuración Delta – Estrella y para su distribución a consumidores finales actualmente se conforma por 5 alimentadores, de los cuales se consideró exclusivamente a la red correspondiente al Alimentador No.2 como objeto de estudio.

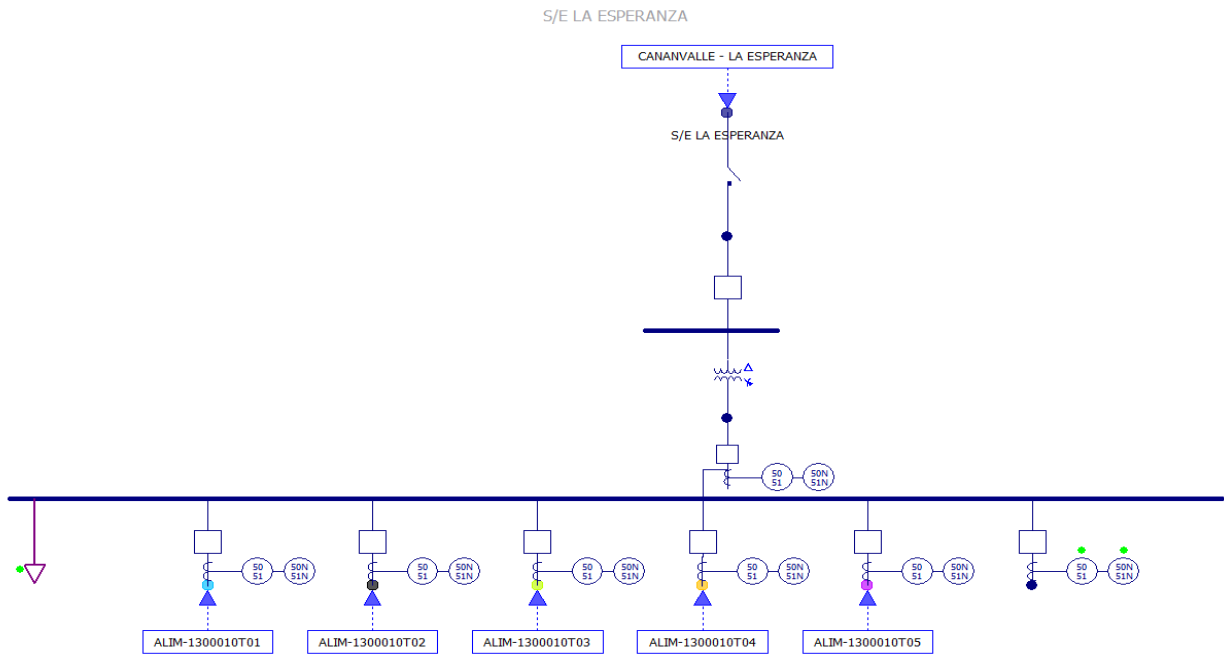


Figura 16 Diagrama unifilar S/E La Esperanza.

Fuente: Base de datos Cymdist EMELNORTE S.A.

Para obtener la disposición de cada uno de los circuitos con sus distintas características se utilizó el software ArcGIS, el cual posee la base de datos de EMELNORTE S.A del año 2022, generando así datos georreferenciados de la red.

En la Figura 17 se puede observar la topología del alimentador No2 de la subestación La Esperanza, con sus respectivas derivaciones primarias y secundarias.

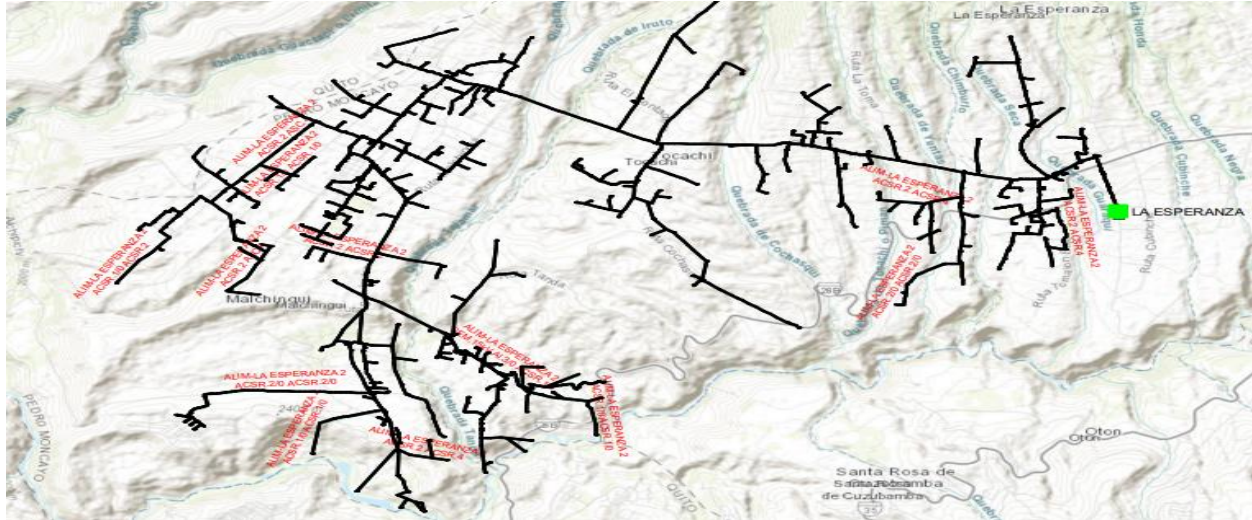


Figura 17 Topología del circuito No2 S/E de la Esperanza.

Fuente: ArcGIS 2023

2.4. Softwares de interpretación y simulación

Se utilizaron las siguientes herramientas para realizar el análisis e interpretación de datos de este estudio.

2.4.1. Software ArcGIS.

ArcGIS es un software de SIG (Sistema de Información Geográfica), desarrollado por visualización de datos geográficos, se utiliza para la planificación, diseño, construcción, monitoreo y gestión de la red eléctrica. Con ArcGIS, los profesionales de la industria eléctrica pueden visualizar y analizar la información geográfica de la red eléctrica, incluyendo la ubicación de las subestaciones, líneas de transmisión y transformadores, y pueden utilizar esta información para tomar decisiones informadas sobre la expansión y mejora de la red eléctrica.(ArcGIS Resources, 2022).

2.4.2. Software de simulación CYMDIST

El software Cymdist ofrece una amplia gama de herramientas de análisis y diseño, incluyendo simulación de flujo de carga, análisis de fallos y optimización de la red, lo que permite a los usuarios tomar decisiones informadas sobre la mejora y expansión de la red eléctrica. La integración de CYMDIST con ArcGIS permite una gestión más eficiente y efectiva de la red eléctrica, lo que a su vez conduce a una mejor calidad de servicio eléctrico(CYME, 2020).

2.4.3. Software Power BI

Este software cuenta con una mejor interpretación y representación de datos puede importar y combinar datos de diversas fuentes, incluyendo datos geográficos de ArcGIS, para crear informes y visualizaciones interactivas. Estos informes y visualizaciones pueden incluir mapas, gráficos, tablas y otros tipos de representaciones visuales de los datos, lo que permite a los usuarios ver y analizar la información de una manera clara y fácil de entender. (PowerBI, 2022).

2.5. Recopilación de datos.

Las bases de datos registradas por los analizadores siguen rigurosamente las especificaciones y configuraciones establecidas por la regulación ARCERNNR 002/20. Esta normativa establece que, para llevar a cabo un estudio de calidad del producto, se requiere que la medición, registro y el almacenamiento de los valores en cada punto seleccionado debe efectuarse durante un periodo de evaluación no inferior a siete (7) días continuos, en intervalos de 10 minutos.

2.5.1. Datos del analizador

En la recopilación de las mediciones por parte de la empresa eléctrica EMELNORTE S.A se utilizaron analizadores de red FLUKE modelo 1744 y 1748 Power Quality Logger de los que se obtuvo los siguientes parámetros eléctricos:

- Voltaje, Corriente, Energía.
- Distorsión armónica de voltaje total (THDv).
- Distorsión armónica de voltaje individual (IHDv).
- Perturbación rápida de voltaje (Flicker).
- Factor de potencia.
- Potencia Activa, Aparente, Reactiva.

2.5.2. Datos del producto

Mediante la utilización de PQ Log, software destinado para el análisis de la calidad de energía eléctrica a partir de registros de los analizadores de red, se procedió a la exportación de la información correspondiente a los parámetros eléctricos, contenidos en los registros previamente almacenados para su posterior análisis. Como se muestra en la Figura 18.

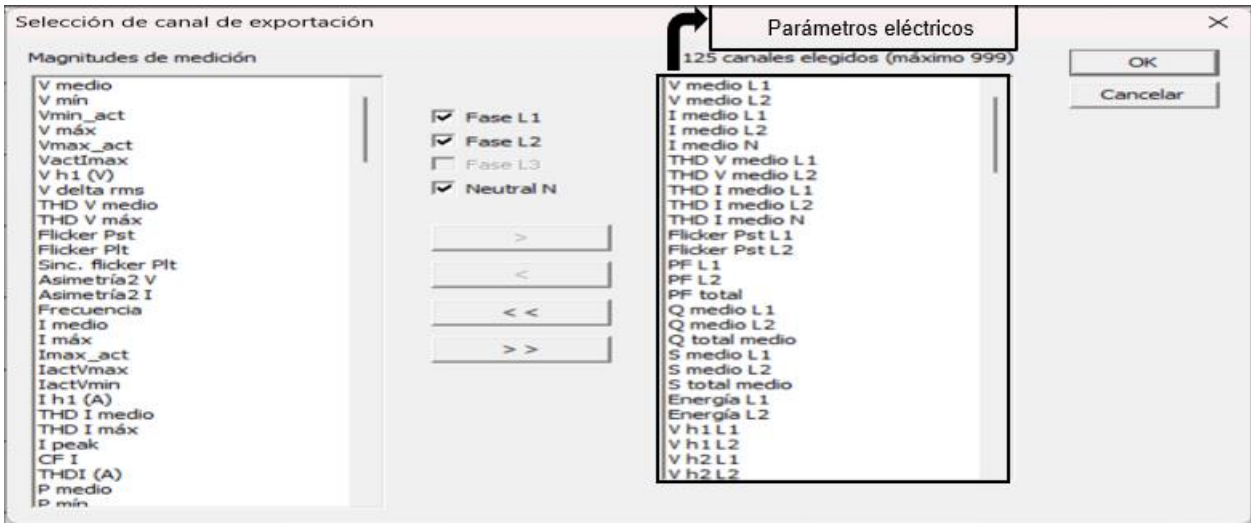


Figura 18 Exportación de parámetros eléctricos.

En la Figura 19 se muestran las mediciones que se exportaron y almacenaron en hojas de Excel de las cuales se pueden mostrar los parámetros eléctricos.

Fecha	Hora	V medio L1	V medio L2	I medio L1	I medio L2	I medio N	THD V medio	THD V medio	THD I medio	THD I medio	THD I medio	Fli
		V	V	A	A	A	%	%	%	%	%	Ps
5/12/2021	13:10:00	123,55	122,64	6,557	19,489	0	3,21	3,14	14,2	5,59	0	
5/12/2021	13:20:00	123,72	122,96	5,267	19,205	0	3,18	3,35	17,8	12,6	0	
5/12/2021	13:30:00	123,89	123,08	5,259	20,634	0	3,16	3,52	17,7	16,3	0	
5/12/2021	13:40:00	124,04	123,53	5,551	13,696	0	3,21	3,27	17,1	11,1	0	
5/12/2021	13:50:00	124,04	123,1	5,261	19,702	0	3,21	3,18	17,9	6,65	0	
5/12/2021	14:00:00	123,71	122,97	6,08	17,031	0	3,14	3,15	14,7	5,8	0	
5/12/2021	14:10:00	123,29	122,72	11,489	22,051	0	3,13	3,4	6,39	12,7	0	
5/12/2021	14:20:00	123,47	123,25	8,443	13,832	0	3,13	3,36	9,43	15,3	0	
5/12/2021	14:30:00	123,38	122,81	7,25	17,389	0	3,26	3,47	10,7	12,8	0	

Figura 19 Mediciones de los analizadores de red en Excel.

2.6. Fórmulas

Para el desarrollo del capítulo se describieron algunas ecuaciones en el tema de calidad eléctrica y probabilística que se muestran a continuación.

2.6.1. Fórmulas de la distorsión armónica de voltaje.

La distorsión armónica es la relación entre el contenido armónico de la señal y la onda sinusoidal fundamental, según la Regulación ARCERNR 002/20 la distorsión armónica

individual de voltaje y la distorsión armónica total de voltaje se evalúan conforme las siguientes ecuaciones.

En la Ecuación 1 se describe la fórmula para el cálculo de la distorsión armónica de voltaje individual en rms.

$$V_{h,k} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} (V_{h,i})^2} \quad (1)$$

El factor de distorsión individual de voltaje armónico en porcentajes es mostrado en la Ecuación 2.

$$DV_{h,k} = \frac{V_{h,k}}{V_{h,1}} \times 100\% \quad (2)$$

Para el cálculo de la distorsión armónica total de voltaje THDv mostrada en la Ecuación 3, permite la obtención porcentual total de la tenencia armónica en una red o equipo.

$$THD_k = \left[\frac{1}{V_{h,1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (V_{h,k})^2} \right] \times 100\% \quad (3)$$

Donde:

$V_{h,k}$ = Armónica de voltaje h en el intervalo k de 10 minutos.

$V_{h,i}$ = Valor eficaz (rms) de la armónica de voltaje h (para $h = 2, 3, \dots, 50$), medido cada 3 segundos ($i=1, 2, \dots, 200$).

$DV_{h,k}$ = Factor de distorsión individual de voltaje de la armónica h (para $h = 2, 3, \dots, 50$) en el intervalo k de 10 minutos.

THD_k = Factor de distorsión armónica total de voltaje.

$V_{h,1}$ = Valor eficaz (rms) de la componente fundamental de voltaje en el punto de medición.

2.6.2. Fórmula para el cálculo de una muestra.

En Ecuación 4 se muestra una fórmula que se aplica para el cálculo de una muestra finita. Permite la selección de una determinada muestra a partir de una determinada población, para un posterior análisis.

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{(N-1)e^2 + Z^2 * p * q} \quad (4)$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra

e = Error de estimación máximo aceptado

N = Tamaño del universo (población total)

Z = Nivel de confianza (correspondiente con tabla de valores Z)

p = Porcentaje de la población que tiene el valor deseado

q = porcentaje de la población que no tiene el atributo deseado.

Nota: Cuando no hay indicación de la población que posee o no el atributo, se asume el 50% para p y el 50% para q.

2.6.3. Fórmula para combinaciones.

En la Ecuación 5 se describe la fórmula para el cálculo de un número de combinaciones “número de formas posibles en las que se puede elegir “r” elementos en un conjunto “n” elementos en los que no se considera el orden”

$$C_r^n = \frac{n!}{r! * (n-r)!} \quad (5)$$

Donde:

n: Número total de elementos de un conjunto.

r: Tamaño del grupo que se va a seleccionar.

!: Representación factorial, es el producto de todos los números enteros positivos desde uno hasta el número en cuestión.

2.7. Selección de la muestra.

En la población total del alimentador No2, existe un total de 407 transformadores registrados, divididos en 40 transformadores trifásicos y 367 transformadores monofásicos, cada uno con su red de distribución, como se muestra en la Figura 20.

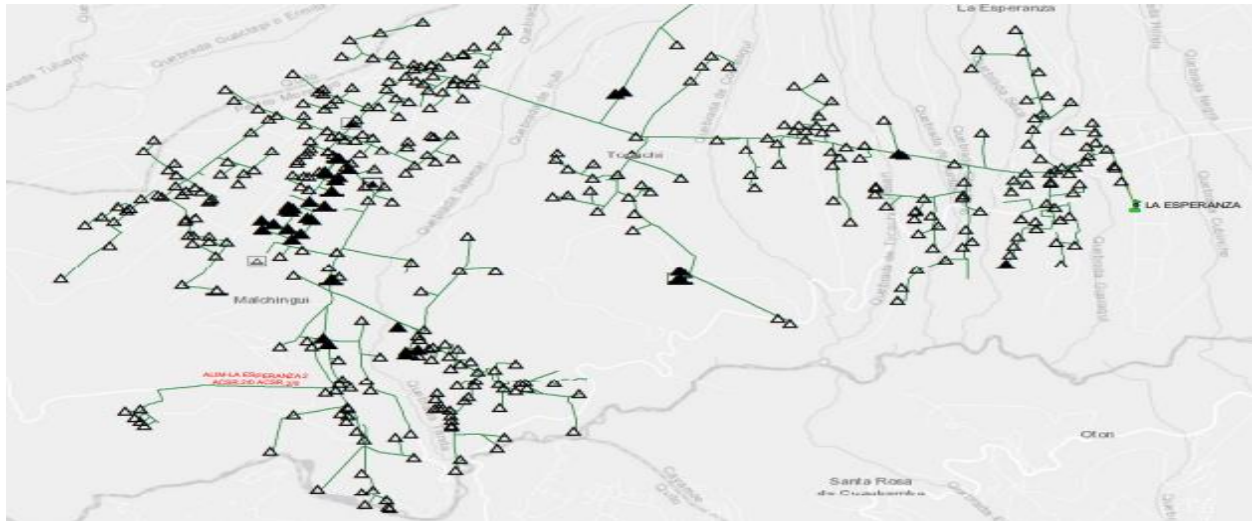


Figura 20 Transformadores de distribución alimentador No2.

Fuente: ArcGIS.

2.7.1. Cálculo de la muestra

Debido a la cantidad limitada de registros y/o mediciones disponibles en la base de datos del departamento de Calidad de Energía de EMELNORTE con respecto al Alimentador No.2 de La Subestación La Esperanza, se eligió calcular el tamaño de la muestra considerando un nivel de confiabilidad del 55% con un margen de error del 10%.

Aplicando la Ecuación 4 se determinó:

$$n = \frac{407 * 0.755^2 * 0,5 * 0,5}{(407 - 1) * 0,10^2 + 0.755^2 * 0,5 * 0,5} = 14 \text{ Transformadores}$$

Conforme a los resultados obtenidos en el cálculo del tamaño de la muestra, se obtiene un total 14 mediciones. En lo que respecta a los transformadores trifásicos, no fue posible aplicar el cálculo muestral debido a su reducida presencia en el circuito del alimentador. Por lo tanto, se optó llevar a cabo un análisis de todas las mediciones disponibles, seleccionando 12 transformadores monofásicos y 2 transformadores trifásicos para el estudio en cuestión.

2.7.2. Puntos de ubicación de la muestra

La selección de la muestra para el estudio se basó en función del cronograma con el que cuenta el departamento de estudios eléctricos y calidad de energía de EMELNORTE S.A, en coordinación con la entidad reguladora ARCERNNR. Se recopiló un total de 14 registros de los analizadores, mediciones realizadas de manera aleatoria en la red secundaria de este alimentador durante los años 2021 y 2022. La ubicación de estos puntos de referencia se indica en la Figura 21.

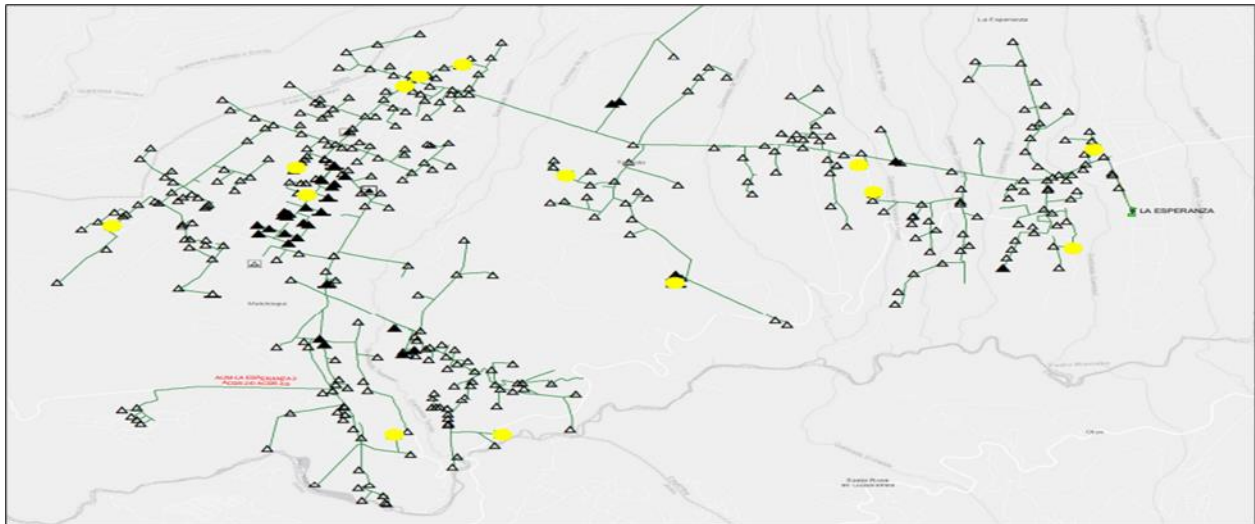


Figura 21 Puntos de ubicación de analizadores de red.

Fuente: EMELNORTE S.A.

2.8. Análisis de los datos obtenidos

El análisis de estas bases de datos permitió la identificación de los niveles de distorsión armónica de voltaje presentes en la red secundaria del alimentado. Asimismo, permitió examinar el comportamiento del voltaje en presencia de este y evaluar la capacidad de carga de los transformadores.

2.8.1. Exportación a Power BI.

Con el propósito de mejorar la eficiencia y la efectividad en la visualización y análisis de los datos se procedió a exportar, clasificar y ordenar los datos almacenados en hojas de Excel como se indica en la Figura 22. Además, se incorporaron parámetros e información específica de cada transformador, lo que contribuyó a obtener resultados más precisos y completos.

Hora	# Transformador	# Fases	Distancia	#Clientes	Potencia	Cargabilidad	V medio L1	V medio L2	V medio L3	THD V medio L1	THD V medio L2
0:00:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	119,84	119,86	0	2,46	
0:10:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	120,01	120,02	0	2,45	
0:20:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	120,1	120,13	0	2,42	
0:30:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	120,08	120,1	0	2,38	
0:40:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	119,76	119,79	0	2,42	
0:50:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	119,95	119,97	0	2,39	
1:00:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	119,77	119,8	0	2,35	
1:10:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	120,12	120,15	0	2,32	
1:20:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	119,87	119,89	0	2,31	
1:30:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	120,06	120,08	0	2,32	
1:40:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	120,18	120,2	0	2,28	
1:50:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	120,25	120,27	0	2,29	
2:00:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	120,44	120,47	0	2,32	
2:10:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	120,18	120,21	0	2,32	
2:20:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	120,31	120,34	0	2,31	
2:30:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	120,28	120,31	0	2,25	
2:40:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	119,84	119,86	0	2,25	
2:50:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	119,78	119,8	0	2,25	
3:00:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	119,78	119,8	0	2,25	
3:10:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	119,78	119,8	0	2,25	
3:20:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	119,86	119,89	0	2,25	
3:30:00	F11-1F-16346	1F	6	null	25	0	119,89	119,91	0	2,29	

Figura 22 Manejo de datos en PowerBI.

2.8.2. Visualización de datos.

A través del uso de ventanas de visualización y etiquetas, se consiguió una visualización personalizada del comportamiento de los parámetros eléctricos seleccionados tanto a nivel grupal como individual de cada transformador, tras la exportación de datos en PowerBI. En la Figura 23 se muestra la ventana general creada en el lienzo proporcionado por este software.

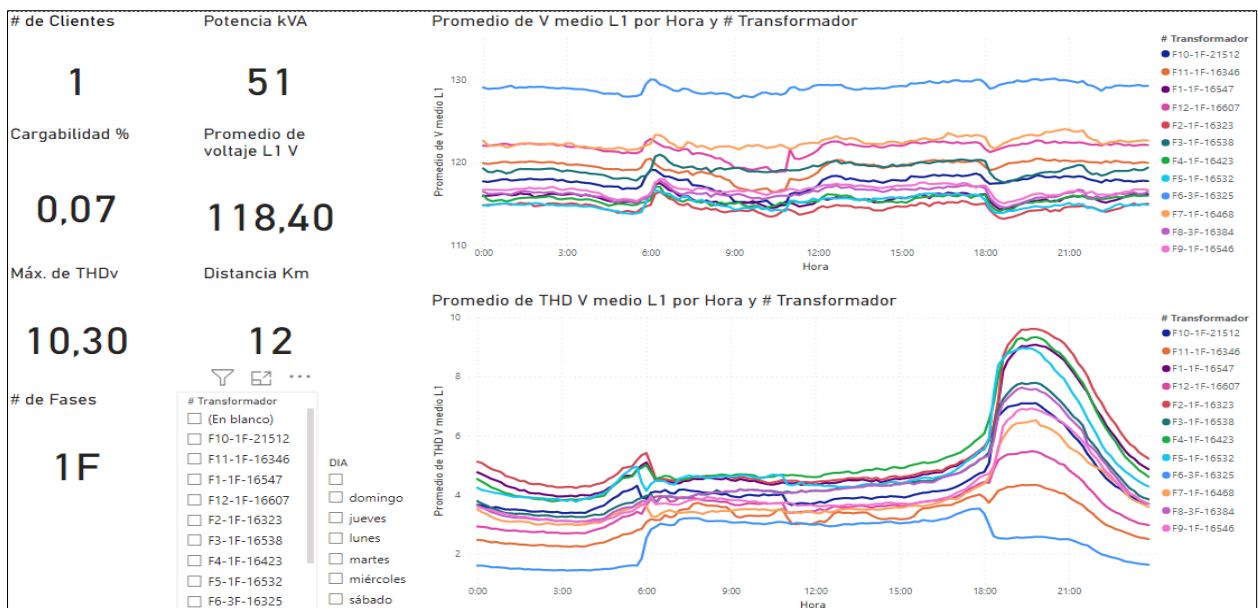


Figura 23 Interpretación de parámetros en PowerBI.

Con la implementación de los nuevos parámetros, tales como el número de fases, la potencia nominal del transformador, la distancia desde la cabecera del alimentador al punto de transformación, el número de clientes y la capacidad de carga, se facilitó el análisis completo del estado de los transformadores y el comportamiento de las distorsiones armónicas en la red.

2.8.3. Niveles de distorsión armónica de voltaje.

Se determinó los niveles máximos de distorsión armónica de voltaje utilizando la base de datos correspondiente a la muestra seleccionada. Es importante destacar que los analizadores de red cuentan con capacidad de calcular y registrar estos parámetros de manera simplificada para su posterior análisis.

- **Niveles máximos de distorsión armónica IHDv y THDv.**

En la Tabla 3 se muestran los niveles máximos de distorsión armónica en cada uno de los transformadores seleccionados. Se consideró la fase L1 en el caso de los transformadores monofásicos y en el caso de los transformadores trifásicos la fase con mayor contenido armónico de voltaje.

Tabla 3

IHDv y THDv Max de cada transformador.

ALIMENTADOR	CODIGO TRANSFORMADOR	POTENCIA [kVA]	Nro. FASES	IHDv MAX [%]	THDv MAX [%]	HORA
No2	16547	25	1	8,49	9,62	19:40:00
No2	16323	37,5	1	8,79	10,3	19:40:00
No2	16538	50	1	6,49	8,01	19:50:00
No2	16423	10	1	8,17	9,85	19:50:00
No2	16532	37,5	1	8,28	9,25	19:20:00
No2	16325	400	3	0,82	3,79	17:50:00
No2	16468	10	1	6,84	6,89	19:50:00
No2	16384	25	3	5,94	7,96	20:20:00
No2	16546	15	1	6,33	7,3	19:20:00
No2	21512	25	1	6,6	7,21	19:50:00
No2	16346	25	1	3,58	5,08	8:30:00
No2	16607	37,5	1	4,9	5,62	19:30:00
No2	16299	10	1	0,77	3,67	7:10:00

No2	16605	25	1	0,85	4,61	6:10:00
-----	-------	----	---	------	------	---------

2.8.4. Nivel de voltaje y cargabilidad de los transformadores.

Los niveles de voltaje se ven afectados por la distorsión armónica existente en el circuito, lo que provoca caídas de voltaje durante los periodos de demanda máxima, tal como se ilustra en las Figura 23 y 24. En la Figura 24 se muestra con mejor detalle las curvas de voltaje y THDv de uno de los transformadores a lo largo de un día. Estas graficas evidencian que los intervalos entre 18:00pm-20:00 horas representan los momentos en los que se registra la mayor presencia de distorsión armónica total de voltaje, lo que resulta en pequeñas caídas de voltaje en la red.

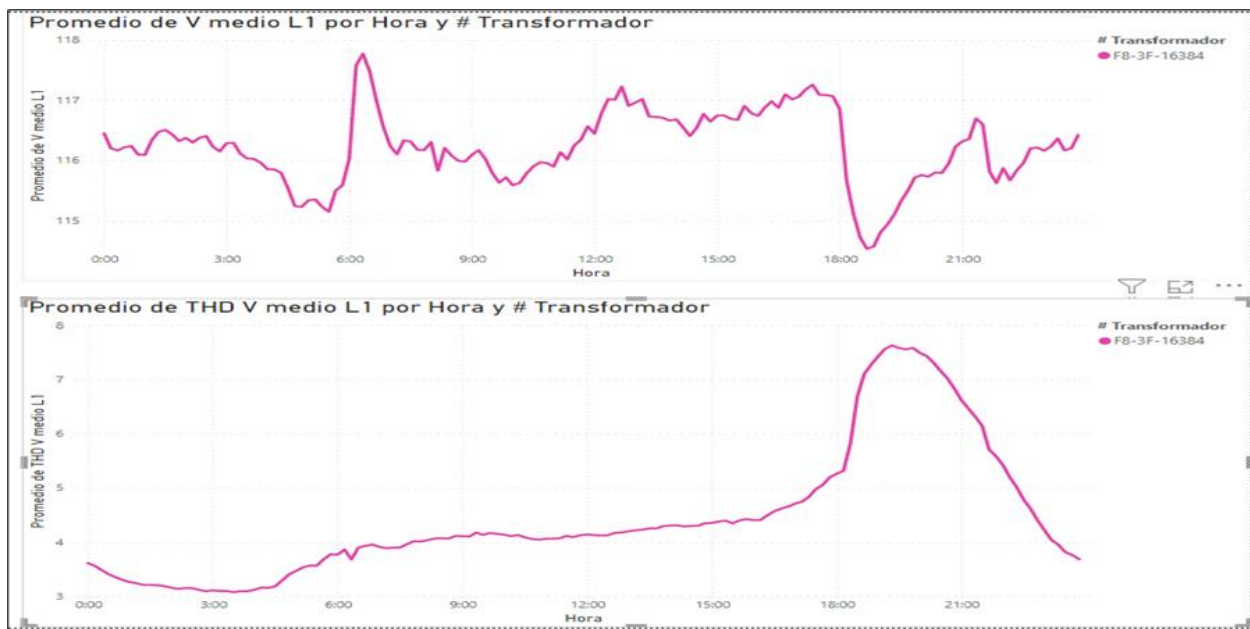


Figura 24 Curva de voltaje y THDv del transformador 16384.

La evaluación de la capacidad de carga o cargabilidad en los transformadores adquiere una relevancia significativa durante el estudio de armónicos de voltaje en una red, debido a que la existencia de una sobrecarga en alguno de los transformadores podría ocasionar una distorsión en la forma de onda de voltaje, lo que, a su vez, daría lugar al incremento de la presencia de armónicos de voltaje en el sistema eléctrico. Con base en esta consideración, se procedió a determinar los niveles de cargabilidad de cada transformador de la muestra seleccionada, tal como se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4*Cargabilidad de los transformadores.*

ALIMEN TADOR	CODIGO TRANSFORMADOR	POTENCIA [kVA]	Nro. FASES	Nro.CLIENT ES	CARGABILIDAD [%]
No2	16547	25	1	1	2
No2	16323	37,5	1	23	43
No2	16538	50	1	4	24
No2	16423	10	1	3	55
No2	16532	37,5	1	7	29
No2	16325	400	3		0
No2	16468	10	1	5	48
No2	16384	25	3	52	78
No2	16546	15	1		2
No2	21512	25	1		25
No2	16346	25	1		4
No2	16607	37,5	1	23	33
No2	16299	10	1	7	0,08
No2	16605	25	1	10	0,05

Nota. *Los espacios vacíos son datos no disponibles en la base de datos de ArcGis.

Como se puede apreciar en la Tabla 4, los porcentajes de cargabilidad en los transformadores de estudio no reveló ninguna anomalía en cuanto a niveles de carga. No obstante, se identificó sobredimensionamiento en el caso de los transformadores 16325, 16299, 16325 y 16605.

2.9. Determinación de incumplimientos del alimentador.

Tras realizar un análisis exhaustivo y obtener información relevante sobre el comportamiento de los parámetros eléctricos, que incluyeron los niveles de distorsión armónica de voltaje THDv e IHDv, así como la cargabilidad y voltaje en los 14 transformadores de estudio, se determinaron varios incumplimientos bajo los criterios de evaluación estipulados en la regulación ARCERN 002/20 en lo referente a la calidad del producto eléctrico.

2.9.1. Distorsión armónica de voltaje.

Para evaluar el cumplimiento con respecto a la distorsión armónica de voltaje, se tomó en consideración los límites de distorsión armónica establecidos en regulación ARCERNR 002/20,

que establece un límite máximo del 5% de distorsión armónica individual de voltaje y del 8% para la distorsión armónica de voltaje total en redes de bajo voltaje como se especifica en la Tabla 1.

Adicionalmente, se determinó que, para que una de las mediciones efectuadas en los transformadores seleccionados cumpla con los criterios de distorsión armónica individual de voltaje y con el factor de distorsión total de voltaje, el 95% o más de los valores registrados en todas y cada una de las fases, en un periodo de evaluación de siete (7) días continuos en intervalos de 10 minutos deben ser menores a los límites anteriormente establecidos.

En cuanto a la clasificación de incumplimiento al índice de armónicos en un punto de medición, se determinó que el porcentaje [%] de Incumplimiento calculado no debe exceder el 5% del total de los valores registrados.

2.9.2. Incumplimiento en los niveles de distorsión armónica total de voltaje (THDv).

En la Tabla 5, se presentan los niveles de distorsión armónica de voltaje máxima, junto con la especificación del tipo de armónico predominante durante el análisis. Además, se identificaron los transformadores que no cumplieron con los límites establecidos previamente para los índices de armónicos.

Tabla 5

Parámetros de distorsión armónica total de voltaje máxima e Incumplimiento.

CODIGO TRANSFORMADOR	THDv MAX [%]	INCUMPLIMIENTO [%]	TIPO DE ARMÓNICO	HORA
16547	9,62	11	TERCERO	19:40:00
16323	10,3	13	TERCERO	19:40:00
16538	8,01	0	NINGUNO	19:50:00
16423	9,85	12	TERCERO	19:50:00
16532	9,25	10	TERCERO	19:20:00
16325	3,79	0	NINGUNO	17:50:00
16468	6,89	0	NINGUNO	19:50:00
16384	7,96	0	TERCERO	20:20:00
16546	7,3	0	NINGUNO	19:20:00
21512	7,21	0	NINGUNO	19:50:00
16346	5,08	0	NINGUNO	8:30:00
16607	5,62	0	NINGUNO	19:30:00

16299	3,67	0	NINGUNO	7:10:00
16605	4,61	0	NINGUNO	6:10:00

Como indica en la Tabla 5, en el alimentador 2 de la S/E La Esperanza, en relación con la muestra del estudio, se constató un total de 4 transformadores que excedieron los límites establecidos en cuanto a distorsión armónica total de voltaje, de acuerdo con la regulación ARCERNR 002/20. Es relevante señalar que en estos transformadores se identificó la predominancia del armónico de tercer orden.

El comportamiento del espectro armónico de THDv del transformador 16323, que fue identificado como aquel con mayor contaminación armónica según se establece en la Tabla 5, se ilustra de manera grafica en la Figura 25. En esta representación, es posible observar picos representados de color azul que superan el 8 % de distorsión. Estos picos son pertenecientes a las mediciones realizadas por el analizador de red durante el periodo de 7 días mismas que corresponden al 13% del total de registros.

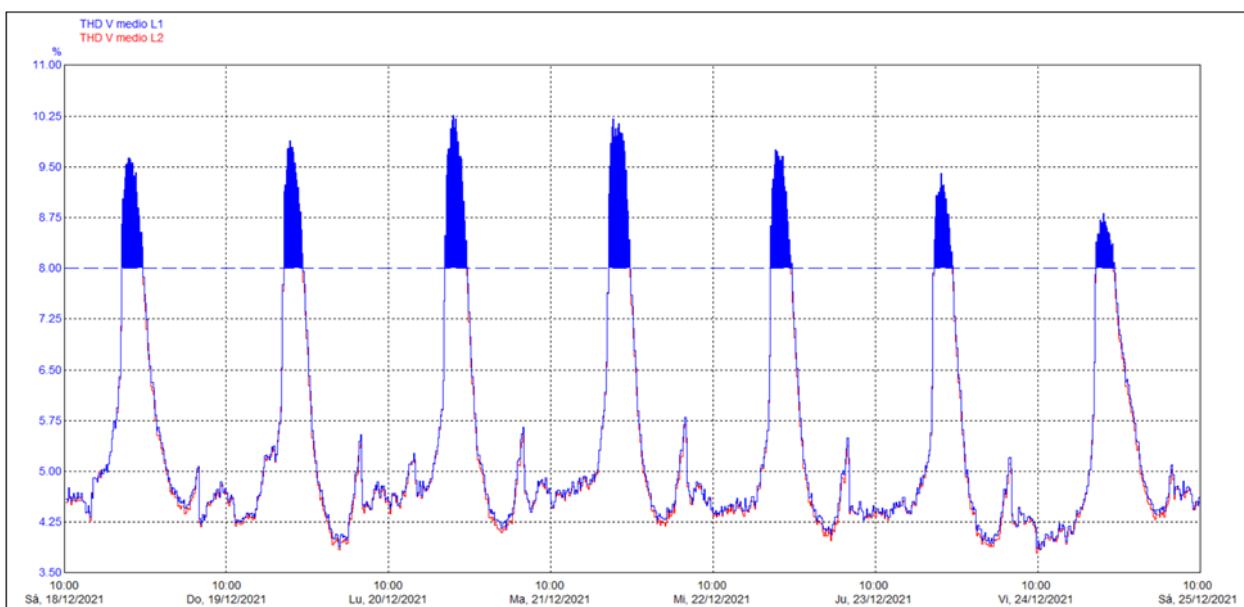


Figura 25 Espectro de THDv del transformador monofásico 16323.

Por otra parte, en la Figura 26 se presenta el espectro de THDv correspondiente al transformador trifásico 16325, el cual fue identificado como aquel que no presentó ningún tipo de incumplimiento respecto a sus niveles de distorsión armónica total de voltaje en ninguna de sus fases según la Tabla 5, durante el periodo de evaluación de 7 días.

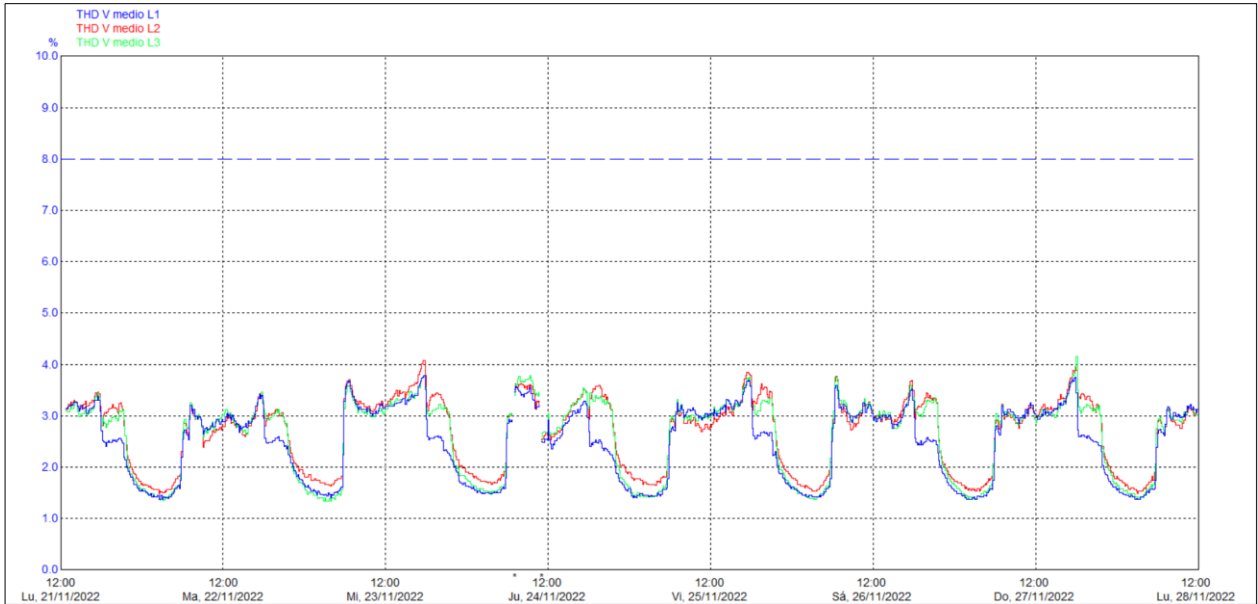


Figura 26 Espectro de THDv del transformador trifásico 16325.

2.9.3. Incumplimiento en los niveles de distorsión armónica individual de voltaje (IHDv).

En la Tabla 6 se indican los niveles de distorsión armónica individual máxima de voltaje, con el tipo de armónico predominante durante su análisis y los transformadores que incumplen con los límites a los índices de armónicos que se establecieron.

Tabla 6

Parámetros de distorsión armónica individual de voltaje máxima e Incumplimiento.

CODIGO TRANSFORMADOR	IHDv MAX [%]	INCUMPLIMIENTO [%]	TIPO DE ARMÓNICO	HORA
16547	8,49	18	TERCERO	19:40:00
16323	8,79	19	TERCERO	19:40:00
16538	6,49	13	TERCERO	19:50:00
16423	8,17	17	TERCERO	19:50:00
16532	8,28	16	TERCERO	19:20:00
16325	0,82	0	NINGUNO	17:50:00
16468	6,84	13	TERCERO	19:50:00
16384	5,94	11	TERCERO	20:20:00
16546	6,33	10	TERCERO	19:20:00

21512	6,6	13	TERCERO	19:50:00
16346	3,58	0	NINGUNO	8:30:00
16607	4,09	1	NINGUNO	19:30:00
16299	0,77	0	NINGUNO	7:10:00
16605	0,85	0	NINGUNO	6:10:00

De acuerdo con la Tabla 6 se constató que en el alimentador no.2, en lo que respecta a la muestra del estudio, un total de 8 transformadores no cumplieron con los límites de distorsión armónica individual de voltaje, de acuerdo con los límites establecidos en la regulación ARCERNNR 002/20.

De manera ilustrativa, en la Figura 27 se indican los niveles de distorsión armónica individual de voltaje correspondientes al transformador monofásico 16363, el cual cuenta con mayor porcentaje de incumplimiento según indica en la Tabla 6. En esta representación gráfica, se visualiza como el armónico de tercer orden (Vh3) sobrepasa los límites establecidos del 5%, esto en el 19% del total de los registros del analizador en el periodo de evaluación.

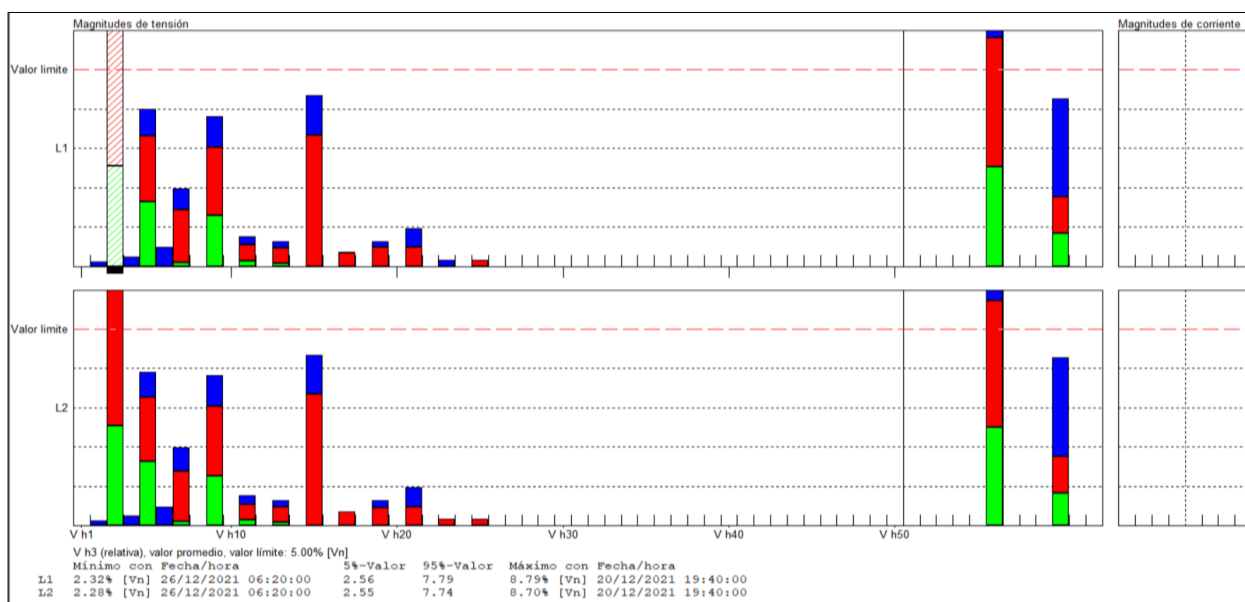


Figura 27 Distorsión armónica individual de voltaje en transformador monofásico 16323.

Por otra parte, en la Figura 28 se presentan los niveles de distorsión armónica individual de voltaje correspondiente al transformador trifásico 16325, el cual se identificó como aquel que no presentó ningún tipo de incumplimiento en lo que concierne a sus niveles de distorsión armónica

individual de voltaje, en todas sus fases según la Tabla 6. En esta representación gráfica, se visualiza que todos los armónicos se encuentran bajo los límites permitidos del 5%, en donde el armónico de quinto orden V_{h5} es quien predomina en el caso de este transformador.

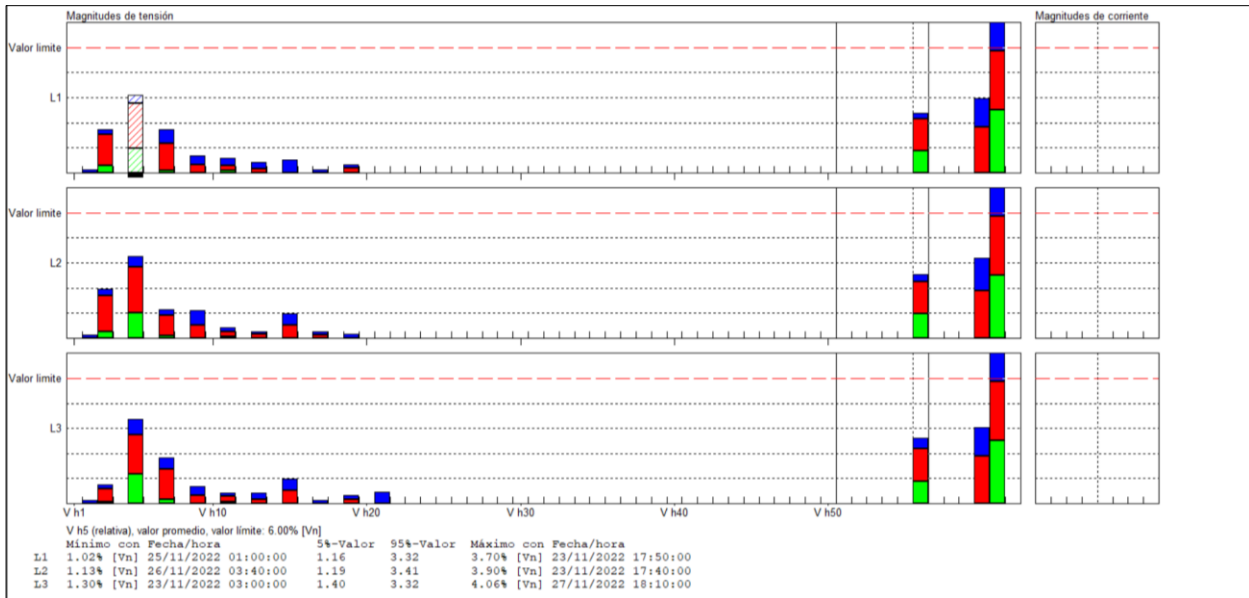


Figura 28 Distorsión armónica individual de voltaje en transformador monofásico 16325.

Durante el desarrollo de este capítulo se determinaron los niveles de distorsión armónica tanto en IHDv y THDv, además del tipo de armónico predominante de cada transformador de la muestra seleccionada con sus respectivos porcentajes [%] de incumplimiento. En la Tabla 7 se detalla un resumen de los datos anteriormente mencionados en el que solamente se encuentran los transformadores que incumplen con los límites establecidos por el ente regulador ARCERNR 002/20 respecto a la calidad del producto.

Tabla 7

Transformadores con su respectivo porcentaje de incumplimiento en IHDv y THDv.

CODIGO TRANSFORMADOR	[%] INCUMPLIMIENTO		TIPO DE ARMÓNICO
	THDv	IHDv	
16547	11	18	TERCERO
16323	13	19	TERCERO
16538	0	13	TERCERO
16423	12	17	TERCERO
16532	10	16	TERCERO

16468	0	13	TERCERO
16384	0	11	TERCERO
16546	0	10	TERCERO
21512	0	13	TERCERO

Se determinó que 9 de los 14 transformadores evaluados de la muestra no cumplieron con los límites establecidos por la regulación empleada durante su análisis. Dentro de esta muestra, el transformador monofásico 16323 presentó el mayor porcentaje de incumplimiento, con un 13% de distorsión armónica total de voltaje THDv y un 19% en distorsión armónica individual de voltaje en lo que respecta a los criterios de evaluación establecidos. Además, se determinó que el armónico de 3er orden predominó en el 100% de los transformadores que superaron los límites de distorsión armónica en el estudio.

CAPÍTULO 3

Determinación de la ubicación óptima de filtros para la atenuación de armónicos.

En el presente capítulo, se determinó la ubicación óptima de filtros destinados a la atenuación de los armónicos de voltaje THDv que se identificaron en la red secundaria correspondiente al Alimentador No.2 de la subestación La Esperanza, bajo los límites establecidos por la regulación vigente ARCERNR 002/20. Mediante una metodología de optimización basada en el principio fundamental de los métodos de eliminación de región.

3.1. Simulación de armónicos.

Con el propósito de establecer un punto de referencia a los niveles de distorsión armónica IHDv y THDv en el circuito de la red modelada en el software Cymdist, tal como se ilustra en la Figura 29, se procedió a conectar fuentes de frecuencias shunt en tramos de la red primaria seleccionados.

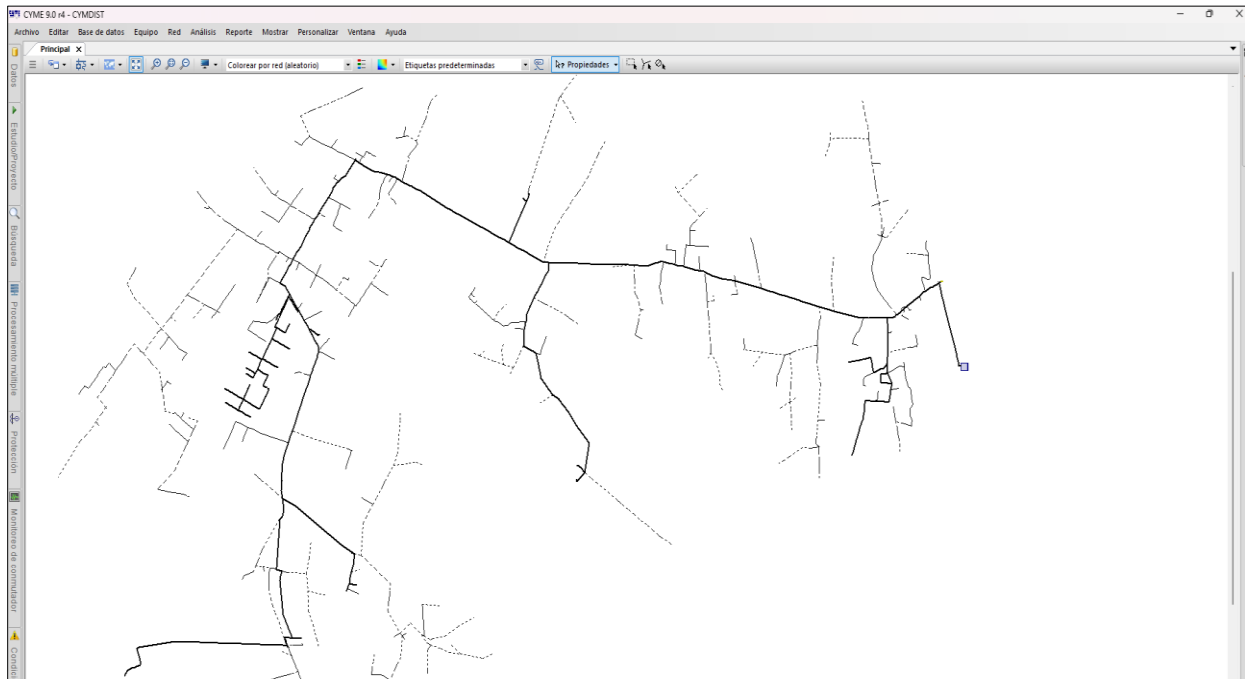


Figura 29 Alimentador No.2 modelado en el Software Cymdist.

En el proceso de configuración de cada una de estas fuentes de frecuencia armónica, se utilizaron los datos reales de IHDv que se encuentran en la Tabla 20 del Anexo A, en la Figura 30 se indica la configuración correspondiente a la fuente que se instaló en las fases B y C del

tramo 289780_MTA, mientras que en la Figura 31 se muestra la configuración de la fuente que fue instalada en la fase A del tramo 290253_MTA de la red simulada.

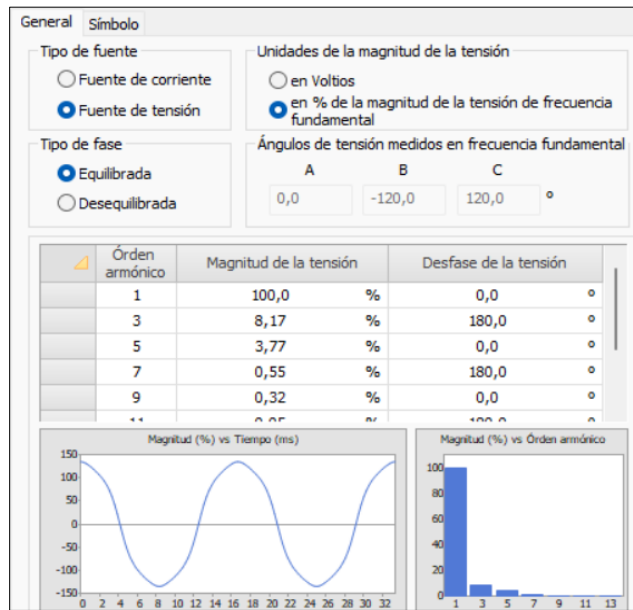


Figura 30 Configuración de fuente de frecuencia armónica conectada en las Fases B y C.

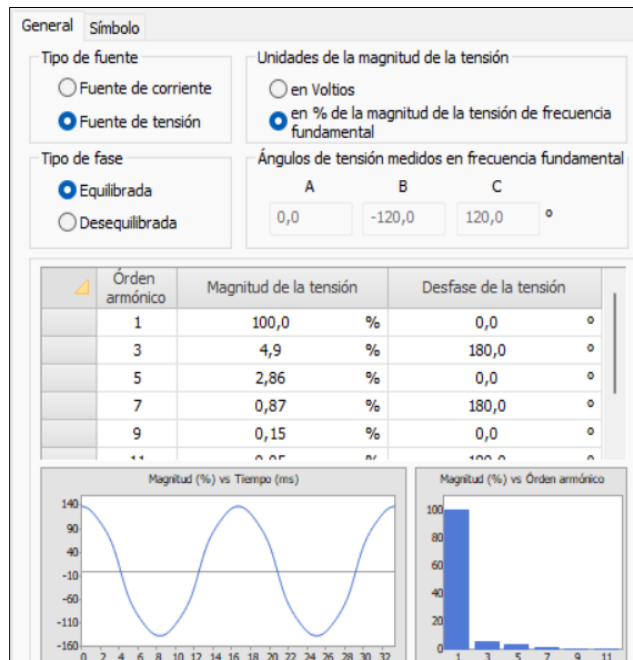


Figura 31 Configuración de fuente de frecuencia armónica conectada en la Fase A.

3.1.1. Modelado de filtro armónico.

A través de los registros de mediciones efectuados por los medidores ION (Intelligent Optical Network) ubicados alimentadores de la subestación, los cuales tienen como finalidad monitorizar la calidad de la energía eléctrica, pertenecientes a la empresa de distribución eléctrica EMELNORTE S.A., se llevó a cabo la distribución y flujo de carga en el circuito. En la Figura 32 y Figura 33, se indica la configuración del voltaje equivalente y se detalla el registro correspondiente a la demanda máxima en la red de manera respectiva.

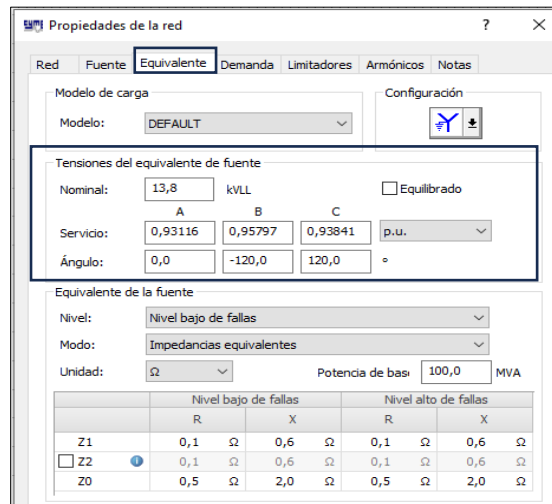


Figura 32 Configuración de voltaje equivalente en cabecera del alimentador.

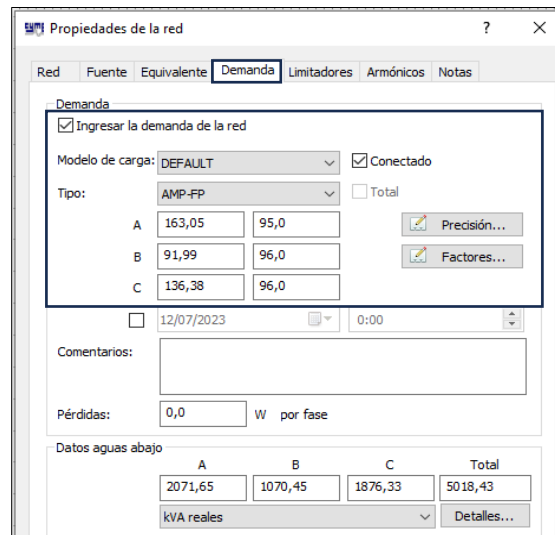


Figura 33 Configuración de demanda máxima en cabecera del alimentador.

A partir de los niveles de potencia reactiva registrados en el circuito tras realizar el flujo de carga, se realizó el diseño de los filtros armónicos, como se indican en la Tabla 8 donde se muestra un total de 860 kVAR en el nodo fuente del alimentador en demanda máxima.

Tabla 8

Cuadro de parámetros del alimentador en nodo fuente.

Vp.u.	kVLL	kVLN	i (A)	kVA	kW	kVAR
0,943	13	7,5	130,3	2931	2802	860

Como resultado del análisis de los registros obtenidos de los analizadores, con la consecuente determinación de los niveles de distorsión de armónicos de voltaje presentes y la identificación del armónico predominante, se tomó la decisión de seleccionar filtros de sintonía simple. En este contexto, con el objetivo de atenuar la distorsión armónica, se asignó una capacidad de 250 kVAR a cada filtro, de manera equitativa.

En la Figura 34 se muestran la configuración de uno de estos filtros tomando en cuenta los distintos parámetros como: potencia reactiva del condensador, frecuencia sintonizada, factor de calidad, tipo de configuración y el voltaje nominal del condensador. Donde se insertó la potencia reactiva requerida, una frecuencia sintonizada para el armónico de 3er orden, con un factor de calidad de 70, una configuración de estrella a tierra y un voltaje nominal de 13,8 kV debido a que estos fueron situados en la troncal del circuito y una frecuencia de 60Hz.

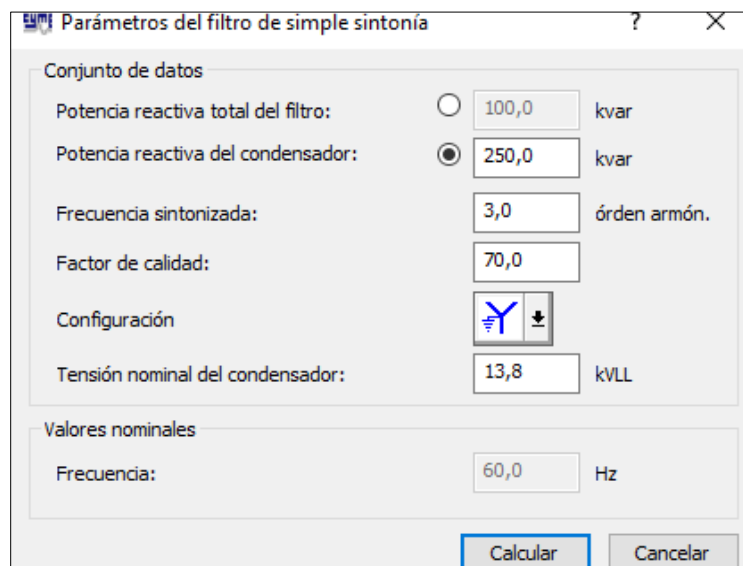


Figura 34 Configuración de parámetros de filtro en Cymdist.

Tras configurar los parámetros y dar en el botón “Calcular”, automáticamente el software efectuó el cálculo de impedancias equivalentes tanto de los valores de resistencia, inductancia y capacitancia del filtro como se indican en la Figura 35, teniendo listo el filtro para su instalación en la red.

Impedancias equivalentes	
Resistencia (R):	3,62743 Ω
Inductancia (L):	224,51457 mH
Capacitancia (C):	3,48218 μF
<input type="button" value="Calcular..."/>	

Frecuencia sintonizada: 3,0 orden armónico

Conexión:

Figura 35 Impedancias equivalentes del filtro en Cymdist.

3.2. Ubicación óptima de filtros.

Para la identificación de la ubicación óptima de los filtros, se diseñó y adoptó una metodología fundamentada en el concepto central de los métodos de eliminación de regiones, con el objetivo de encontrar la máxima atenuación posible de armónicos de voltaje en la red secundaria del alimentador.

3.2.1. Método de eliminación de regiones.

Los métodos de eliminación de regiones, también conocidos como métodos de eliminación de intervalos o métodos de partición, son una clase de algoritmos que se utilizan para determinar los valores máximos o mínimos de una función en un dominio específico. Estos métodos se basan en la idea de dividir el dominio en subintervalos más pequeños de manera iterativa y descartar las áreas que no tengan el valor mínimo o máximo deseado.

En la mayoría de los casos, el proceso de eliminación de regiones comienza con un intervalo inicial que cubre todo el dominio de la función. Luego se evalúa la función en puntos específicos dentro del intervalo para determinar dónde podría estar el valor mínimo o máximo deseado. Si se encuentra un punto que indica la existencia del valor mínimo o máximo, se reduce la distancia para concentrarse en esa área específica.

3.2.2. Diagrama de flujo de proceso.

En la Figura 36 se indica el diagrama de flujo del proceso planteado para determinar la ubicación óptima de los filtros en la red.

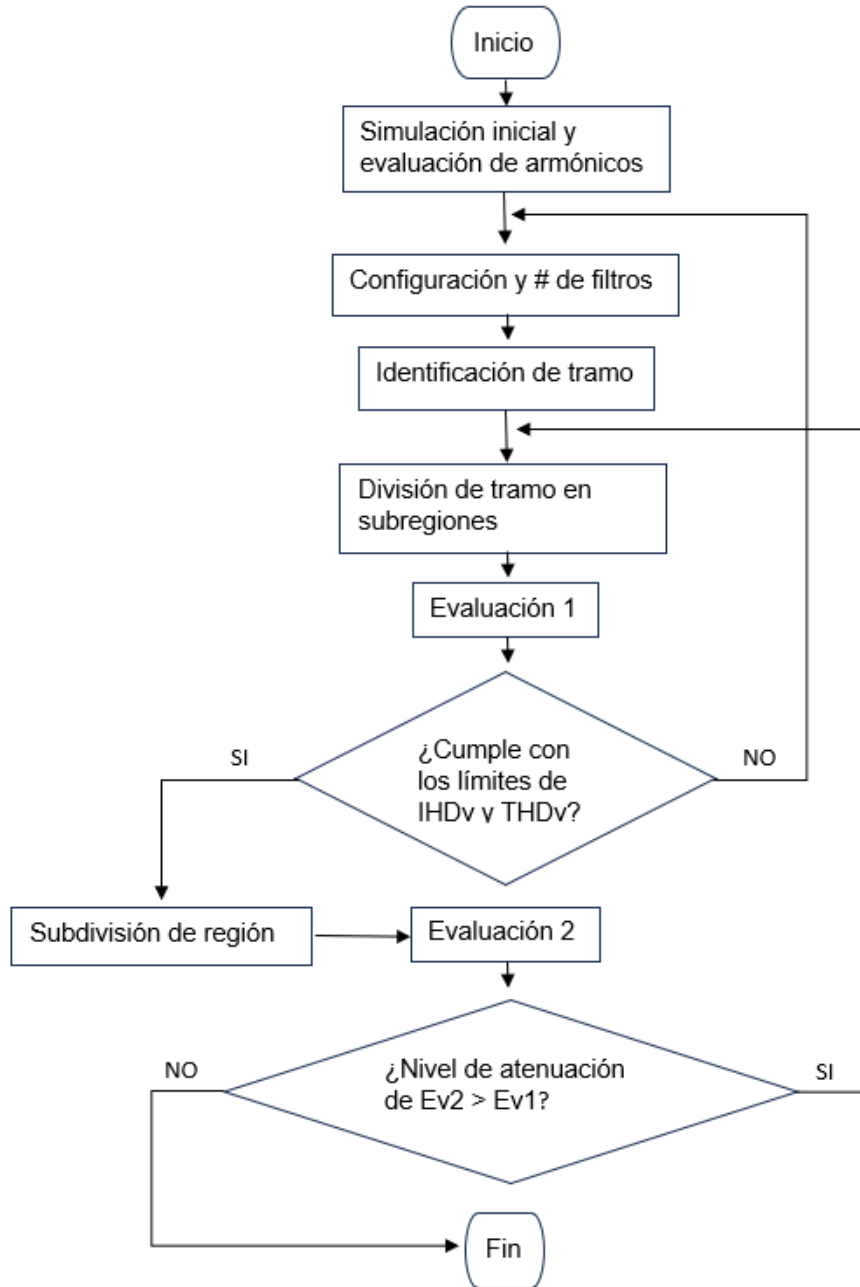


Figura 36 Diagrama de flujo para determinar la ubicación óptima de los filtros armónicos.

A continuación, se detalla cada uno de los pasos a seguir dentro del flujograma mostrado:

1. Se realiza la simulación y exportación de los niveles de IHDv y THDv correspondientes de cada uno de los transformadores previamente seleccionados en los nodos de bajo voltaje de la red en el software de Cymdist.
2. Se configura y determina la cantidad de filtros necesarios para compensar la distorsión armónica que se encuentra presente en la red secundaria del alimentador.
3. Se lleva a cabo la selección del tramo principal de la red (troncal), en el cual se realizan las pruebas para determinar la ubicación óptima de los filtros armónicos.
4. Se implementa el método de eliminación de regiones, dividiendo el tramo principal de la red en partes iguales y se establecen los nodos de división correspondientes.
5. Se efectúa una evaluación de armónicos en los nodos previamente establecidos del tramo seleccionado. Durante este proceso, se consideran todas las combinaciones posibles con los filtros. Para identificar la nueva subregión, se calcula el promedio en THDv de los nodos de los transformadores en cada una de las combinaciones realizadas. La nueva subregión se define en un rango interno, delimitado por la ubicación del primer y último filtro de la combinación con menor porcentaje de THDv promedio resultante.
6. Se verifica que los niveles de IHDv y THDv de los nodos de cada transformador cumplan con los límites de armónicos de voltaje establecidos según la regulación ARCNERRN 002/20 indicados en la Tabla 1. En caso de incumplimiento en alguno de los niveles de distorsión, se retorna el proceso a partir del punto (2).
7. Si se cumple la condición establecida, la subregión en cuestión se somete al mismo procedimiento descrito en los incisos número (4) y (5).
8. En el supuesto de que, en la nueva subregión resultante, el promedio de THDv de la evaluación 2 sea menor o que el nivel de atenuación obtenido en ese intervalo de pruebas sea mayor al de la evaluación 1, se retoma el proceso descrito a partir del (4).
9. Si no se cumple la condición donde el porcentaje de atenuación de la evaluación 2 no es mayor que el obtenido en la evaluación 1, se considera que el proceso ha llegado a su conclusión y se selecciona la combinación con el mejor promedio de atenuación de armónicos proveniente de la última iteración realizada en la evaluación 2.

3.2.3. Determinación de ubicación óptima.

Como aplicación de la metodología planteada se dividió el tramo principal de la red, donde se evaluó la primera etapa de selección de la ubicación óptima, en la Figura 37 se muestra la selección de los tramos evaluados, donde hay una distancia aproximada de 4 km entre puntos.

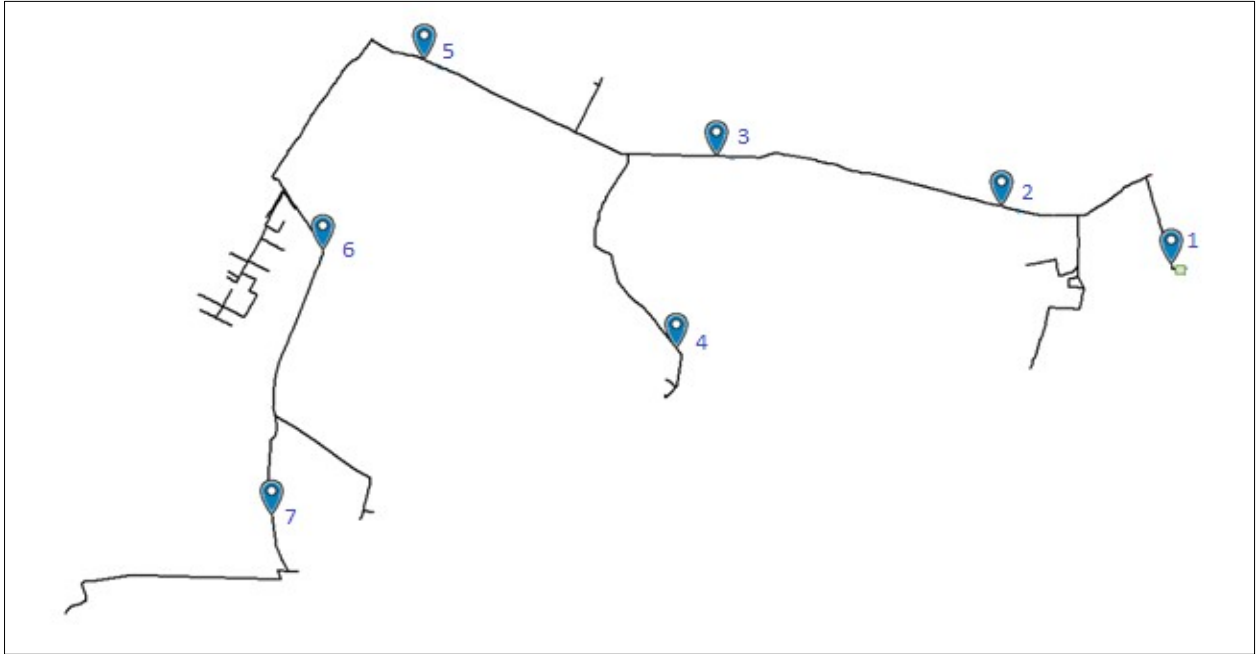


Figura 37 Selección de nodos de la primera etapa de subdivisión de la troncal.

En la Tabla 9 se describen los nombres referentes a los nodos que fueron seleccionados en la primera evaluación en Cymdist.

Tabla 9

Puntos de ubicación de evaluación 1.

Nro.	Nodo
1	MTA_S_288903
2	MTA_S_289643
3	MTA_S_289777
4	MTA_S_289081
5	MTA_S_290290
6	MTA_S_583525
7	MTA_S_289451

Con la aplicación de la Ecuación 5 se determinó la cantidad de combinaciones, donde se consideró que “n” es el número total de nodos en la división del tramo de la red, y “r” como el número de filtros seleccionados. En este caso el número de nodos de evaluación son 7 y la cantidad de filtros son 3.

$$C_3^7 = \frac{7!}{3! * (7 - 3)!}$$

$$C_3^7 = \frac{7 * 6 * 5 * 4 * 3 * 2 * 1}{(3 * 2 * 1) * (4 * 3 * 2 * 1)} = 35 \text{ combinaciones}$$

Se obtuvo un total de 35 posibles combinaciones, en la Tabla 21 del Anexo B se encuentra la tabla con todos los resultados obtenidos tras haber realizado las respectivas simulaciones, en donde se determinó que la combinación de nodos con mayor atenuación de armónicos de voltaje en la red es 2-4-5, donde se obtuvo un 3,3958% en THDv promedio en los tramos secundarios de los transformadores de estudio.

Tras definir la primera subregión, se dividió en puntos de evaluación aproximados de 2 Km entre nodos, como se observa en la Figura 38.

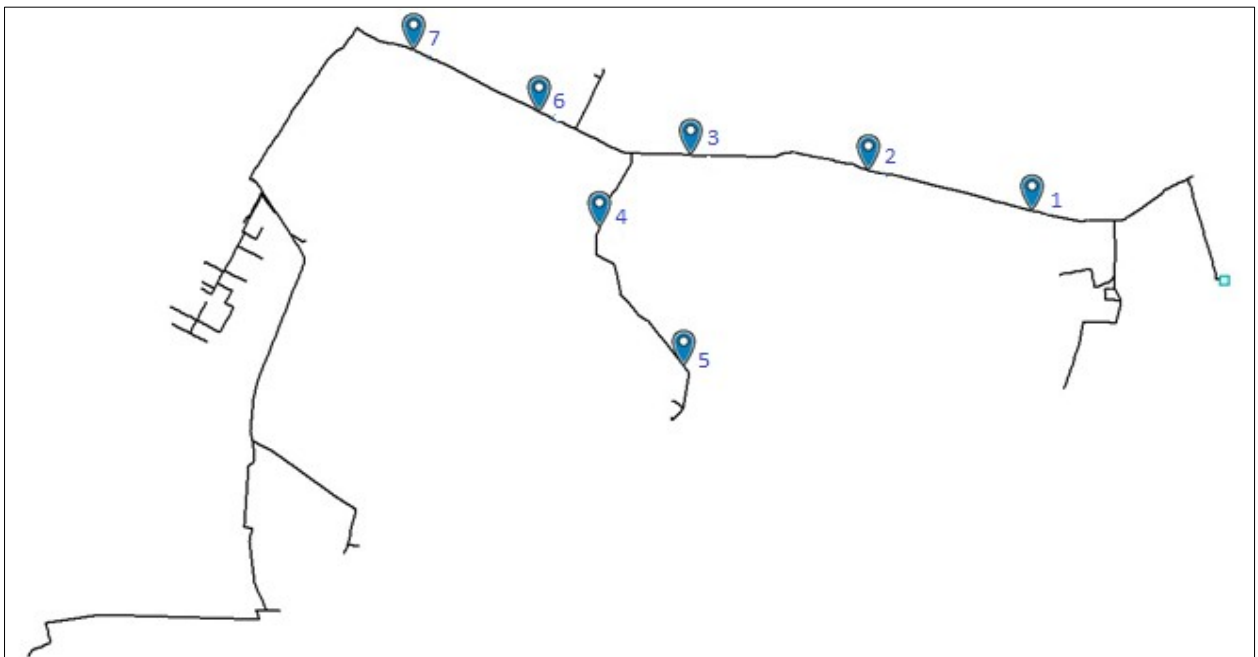


Figura 38 subdivisión de la primera subregión seleccionada.

En la Tabla 10 se describen los nombres referentes a los nodos de la segunda evaluación realizada en Cymdist.

Tabla 10

Puntos de ubicación de evaluación 2.

Nro.	Nodo
1	MTA_S_289643
2	MTA_S_289209
3	MTA_S_289777
4	MTA_S_289819
5	MTA_S_289081
6	MTA_S_288963
7	MTA_S_290290

Con la aplicación de la Ecuación 5 se determinó la cantidad de combinaciones en esta etapa, donde el número de nodos de evaluación son 7 y la cantidad de filtros son 3.

$$C_3^7 = \frac{7!}{3! * (7 - 3)!}$$

$$C_3^7 = \frac{7 * 6 * 5 * 4 * 3 * 2 * 1}{(3 * 2 * 1) * (4 * 3 * 2 * 1)} = 35 \text{ combinaciones}$$

Se obtuvo un total de 35 posibles combinaciones, en la Tabla 22 del Anexo B se encuentra la tabla con todos los resultados obtenidos tras realizar las respectivas simulaciones, en donde se determinó que la combinación de nodos con mayor atenuación de armónicos de voltaje en la red es 1-4-7, donde se obtuvo un 3,2965% en THDv promedio en los tramos secundarios de los transformadores de estudio.

Luego de llevar a cabo la segunda evaluación y confirmar que el porcentaje de atenuación en dicha evaluación supero el obtenido en la evaluación 1, se procedió a subdividir nuevamente la subregión con mayor atenuación obtenida en la evaluación 2, en la Figura 39 se indica la selección de esta nueva subdivisión, donde los puntos tienen una distancia aproximada de 1 km entre nodos.

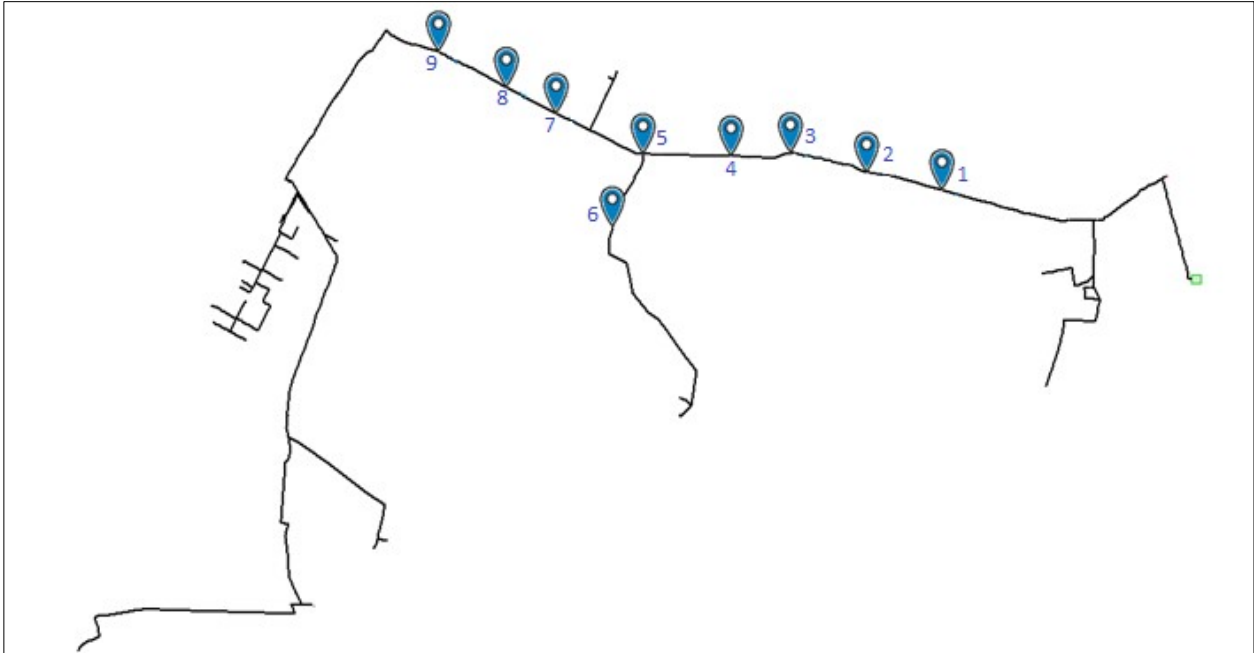


Figura 39 Subdivisión de la segunda subregión seleccionada.

La Tabla 11 proporciona una descripción de los nombres asociados a los nodos en los que fueron seleccionados durante la tercera evaluación efectuada en Cymdist.

Tabla 11

Puntos de ubicación de prueba de evaluación 3.

Nro.	Nodo
1	MTA_S_289678
2	MTA_S_289209
3	MTA_S_289737
4	MTA_S_289777
5	MTA_S_289793
6	MTA_S_289819
7	MTA_S_288963
8	MTA_S_288968
9	MTA_S_290290

Con la aplicación de la Ecuación 5 se determinó la cantidad de combinaciones en esta etapa, donde el número de nodos de evaluación son 9 y la cantidad de filtros son 3.

$$C_3^9 = \frac{9!}{3! * (9 - 3)!}$$

$$C_3^9 = \frac{9 * 8 * 7 * 6 * 5 * 4 * 3 * 2 * 1}{(3 * 2 * 1) * (6 * 5 * 4 * 3 * 2 * 1)} = 84 \text{ combinaciones}$$

Se obtuvo un total de 84 posibles combinaciones, en la Tabla 23 del Anexo B se encuentra la tabla con todos los resultados obtenidos tras realizar las respectivas simulaciones, en donde se determinó que la combinación de nodos con mayor atenuación de armónicos de voltaje en la red en esta etapa de evaluación fue la 2-6-9, donde se obtuvo un 3,3058% en THDv promedio en los tramos secundarios de los transformadores de estudio.

Debido a que en esta tercera etapa de evaluación el porcentaje de atenuación obtenido fue del 3,3058% y que el mejor porcentaje de atenuación obtenido en la evaluación 2 fue del 3,2965% en promedios de THDv, se consideró la condición descrita en el flujograma de proceso de la Figura 36, donde se estableció que si el último porcentaje de evaluación es inferior al anterior en este caso evaluación 3 < evaluación 2, se finaliza la etapa de evaluaciones.

Una vez concluido el proceso de determinación de ubicación óptima, se determinó que los puntos de ubicación óptima de los filtros donde se obtuvo la mayor atenuación de armónicos de voltaje en la red secundaria, es la combinación de puntos 1-4-7 de la evaluación 2.

En la Tabla 12 se describen los nombres correspondientes a los nodos de la ubicación óptima de los filtros, los cuales fueron determinados. La nomenclatura de los nodos hace referencia a la representación que se utilizó para identificar estos puntos en el software Cymdist.

Tabla 12

Coordenadas de ubicación óptima de filtros en Cymdist.

Nro.	Nodo
1	MTA_S_289643
4	MTA_S_289819
7	MTA_S_290290

Una vez identificados los puntos de ubicación óptima de los filtros en el software Cymdist, se llevó a cabo el proceso de generación de datos georreferenciados con el uso del software ArcGIS.

Este proceso permitió la obtención de coordenadas geográficas precisas para cada uno de los filtros en la red del Alimentador. Los detalles de estas coordenadas se especifican en la Tabla 13 y se pueden visualizar en la Figura 40, esto en la topología de la red en el software de ArcGIS.

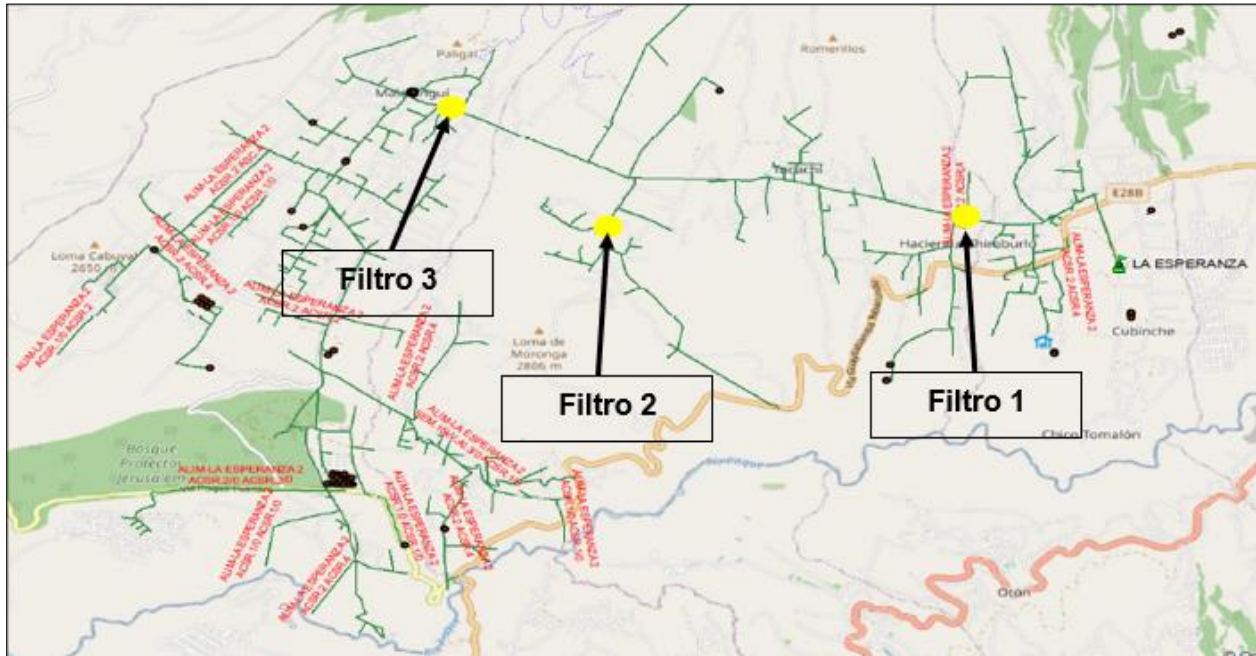


Figura 40 Puntos de ubicación óptima de filtros en la topología de la red en ArcGIS.

En la Tabla 13 se proporciona una especificación detallada de las coordenadas de georreferencia en ArcGIS que indican la ubicación precisa de los nodos correspondientes a la ubicación óptima de los filtros en la red primaria del alimentador Nro. 2 de la subestación La Esperanza.

Tabla 13

Coordenadas de georreferencia de ubicación óptima en ArcGIS.

Nro.	ObjectID *	Coord_X	Coord_Y
Filtro 1	449351	804273,603	10004047,5
Filtro 2	420774	799011,227	10003842,9
Filtro 3	422784	796710,001	10006073,5

Nota. El ObjectID es un código único referente al poste que se encuentra representado como nodo en el software de Cymdist.

3.3. Reporte de voltaje.

Los niveles de voltaje nominal evaluados en el secundario de los transformadores se vieron afectados tras la instalación de los filtros de sintonía simple en la red. Este hecho puede apreciarse en la Tabla 14, donde se comprueba que la incorporación de los filtros armónicos generó una pequeña mejoría en los voltajes nominales. Esto se debió a la compensación de reactivos que proporcionan estos filtros, lo que, a su vez, generó una mejora en el factor de potencia y, por ende, un pequeño aumento en los niveles de voltaje.

Tabla 14

Niveles de voltaje evaluados en los tramos secundarios de los transformadores.

CODIGO TRANSFORMADOR	Sin fuentes [V]	Con fuentes [V]	Con 1 Filtro [V]	Con 2 Filtros [V]	Con 3 Filtros [V]
16547	108,41	108,40	108,80	109,50	110,47
16323	115,13	115,12	114,90	115,34	115,35
16538	110,13	110,12	110,52	111,19	112,16
16423	116,44	116,43	116,30	117,28	117,35
16532	119,94	119,93	119,90	120,24	120,52
16325	125,33	125,32	125,55	126,02	126,40
16468	107,56	107,56	107,95	108,65	109,61
16384	120,70	120,69	120,99	122,01	121,58
16546	112,09	112,08	112,47	113,08	114,03
21512	123,69	123,68	123,75	123,55	123,75
16346	121,98	121,98	122,34	122,55	122,83
16607	123,46	123,45	123,82	124,58	125,05
16299	130,33	130,33	130,50	130,41	130,47
16605	127,08	127,08	127,25	127,34	127,47

3.4. Reporte de THDv.

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos en relación con los niveles de IHDv y THDv presentes en la red eléctrica tras la instalación de las fuentes de frecuencias armónicas en la red modelada de Cymdist, seguida por la implementación de los filtros de sintonía simple en las ubicaciones óptimas previamente establecidas de la red. Se incluyeron los porcentajes de

atenuación correspondientes con 1, 2 y 3 filtros. Cabe destacar que estos resultados se obtuvieron directamente de la simulación en el software Cymdist.

En la Tabla 15, se presentan los niveles de distorsión armónica de voltaje generados en el secundario de los transformadores tras la instalación de las fuentes de frecuencias shunt en la red primaria del alimentador de la subestación.

Tabla 15

Reporte de niveles de IHDv y THDv con las fuentes de frecuencia conectadas.

CODIGO TRANSFORMADOR	3er. [%]	5to. [%]	7mo. [%]	9no. [%]	11avo. [%]	THDv. [%]	Distancia [km]
16547	7,709	2,982	0,382	0,232	0,031	8,278	2
16323	8,108	3,201	0,448	0,264	0,036	8,732	4
16538	7,803	3,042	0,394	0,244	0,033	8,388	5
16423	8,157	3,223	0,452	0,269	0,036	8,786	6
16532	8,327	3,323	0,474	0,289	0,040	8,983	10
16325	1,834	3,185	0,576	0,104	0,048	3,722	12
16468	7,640	2,954	0,375	0,227	0,030	8,203	12
16384	5,012	2,254	0,649	0,119	0,030	5,535	12
16546	8,013	3,154	0,415	0,262	0,036	8,626	12
21512	8,562	3,473	0,510	0,319	0,045	9,260	12
16346	4,608	1,645	0,213	0,168	0,021	4,901	15
16607	5,191	2,341	0,677	0,124	0,031	5,736	17
16299	3,607	1,169	0,172	0,133	0,015	3,798	19
16605	2,877	0,834	0,100	0,105	0,011	2,999	23

La implementación de las fuentes permitió la simulación de niveles de distorsión armónica que se asemejaron a los obtenidos durante el análisis de las bases de datos, los cuales se encuentran sintetizados en la Tabla 20 del Anexo A. Esto permitió tener una referencia al estado real en el que se encuentran los transformadores en la red, respecto a sus niveles de distorsión armónica, para su posterior simulación con los filtros armónicos.

En las Tablas 16, 17, 18 se indican los porcentajes de atenuación que se obtuvieron tras la instalación de 1, 2, y 3 filtros respectivamente. En estas, se puede observar un progreso

significativo de atenuación en los niveles armónicos a medida que se incrementa el número de filtros en los puntos de ubicación óptima determinados.

Tabla 16

Reporte de niveles de IHDv y THDv con un filtro de sintonía simple conectado.

CODIGO TRANSFORMADOR	3er. [%]	5to. [%]	7mo. [%]	9no. [%]	11avo. [%]	THDv. [%]	Distancia [km]
16547	7,133	2,998	0,384	0,233	0,031	7,751	2
16323	7,525	3,221	0,449	0,264	0,036	8,202	4
16538	7,219	3,057	0,397	0,245	0,033	7,854	5
16423	7,564	3,241	0,453	0,269	0,036	8,246	6
16532	7,717	3,339	0,475	0,288	0,040	8,427	10
16325	1,850	3,200	0,580	0,104	0,048	3,743	12
16468	7,070	2,971	0,378	0,228	0,030	7,682	12
16384	4,403	2,274	0,653	0,118	0,030	5,000	12
16546	7,411	3,169	0,418	0,262	0,036	8,075	12
21512	7,930	3,488	0,510	0,318	0,045	8,684	12
16346	1,874	1,601	0,210	0,164	0,021	2,480	15
16607	4,559	2,360	0,681	0,123	0,031	5,180	17
16299	1,398	1,132	0,167	0,129	0,014	1,812	19
16605	1,133	0,810	0,098	0,102	0,011	1,400	23

Tabla 17

Reporte de niveles de IHDv y THDv con dos filtros de sintonía simple conectado.

CODIGO TRANSFORMADOR	3er. [%]	5to. [%]	7mo. [%]	9no. [%]	11avo. [%]	THDv. [%]	Distancia [km]
16547	5,642	2,976	0,384	0,232	0,031	6,395	2
16323	5,989	3,222	0,447	0,263	0,036	6,821	4
16538	5,710	3,034	0,397	0,244	0,033	6,483	5
16423	5,995	3,229	0,449	0,267	0,036	6,829	6
16532	6,101	3,319	0,470	0,286	0,040	6,967	10
16325	1,670	3,032	0,563	0,101	0,046	3,508	12

16468	5,593	2,949	0,378	0,227	0,030	6,339	12
16384	1,665	2,158	0,629	0,114	0,029	2,799	12
16546	5,864	3,144	0,417	0,261	0,036	6,672	12
21512	4,126	3,402	0,498	0,311	0,044	5,380	12
16346	1,878	1,606	0,212	0,164	0,021	2,485	15
16607	4,311	2,353	0,681	0,123	0,032	4,960	17
16299	1,393	1,135	0,165	0,129	0,015	1,809	19
16605	1,136	0,813	0,101	0,102	0,010	1,404	23

Tabla 18

Reporte de niveles de IHDv y THDv con tres filtros de sintonía simple conectado.

CODIGO TRANSFORMADOR	3er. [%]	5to. [%]	7mo. [%]	9no. [%]	11avo. [%]	THDv. [%]	Distancia [km]
16547	1,800	2,839	0,373	0,225	0,030	3,390	2
16323	1,894	3,069	0,429	0,255	0,035	3,641	4
16538	1,821	2,892	0,384	0,236	0,032	3,448	5
16423	1,895	3,074	0,431	0,258	0,035	3,646	6
16532	2,042	3,165	0,451	0,276	0,039	3,804	10
16325	1,566	2,955	0,557	0,100	0,045	3,392	12
16468	1,785	2,814	0,367	0,220	0,029	3,361	12
16384	0,438	1,998	0,593	0,108	0,028	2,132	12
16546	1,870	2,996	0,404	0,252	0,035	3,564	12
21512	3,694	3,383	0,494	0,310	0,044	5,043	12
16346	1,885	1,612	0,215	0,164	0,021	2,495	15
16607	4,278	2,357	0,681	0,123	0,032	4,933	17
16299	1,397	1,140	0,164	0,129	0,015	1,815	19
16605	1,141	0,816	0,103	0,103	0,010	1,410	23

En la Tabla 19, se presenta un resumen de la comparativa de los niveles de atenuación de los THDv, destacando la efectividad de la instalación de los filtros de sintonía simple, con el que se obtuvo un nivel de atenuación por debajo de los límites establecidos por la regulación ARCERNR 002/20.

Tabla 19

Comparativa de niveles de atenuación armónica con 1, 2, y 3 filtros.

CODIGO TRANSFORMADOR	THDv. [%]				
	Sin Filtros	Con 1 Filtro	Con 2 Filtros	Con 3 Filtros	Limite THDv
16547	8,278	7,751	6,395	3,39	8,0
16323	8,732	8,202	6,821	3,641	8,0
16538	8,388	7,854	6,483	3,448	8,0
16423	8,786	8,246	6,829	3,646	8,0
16532	8,983	8,427	6,967	3,804	8,0
16325	3,722	3,743	3,508	3,392	8,0
16468	8,203	7,682	6,339	3,361	8,0
16384	5,535	5	2,799	2,132	8,0
16546	8,626	8,075	6,672	3,564	8,0
21512	9,26	8,684	5,38	5,043	8,0
16346	4,901	2,48	2,485	2,495	8,0
16607	5,736	5,18	4,96	4,933	8,0
16299	3,798	1,812	1,809	1,815	8,0
16605	2,999	1,4	1,404	1,41	8,0
\bar{x}	6,853	6,038	4,918	3,291	
[%] de disminución		11,89	28,24	51,98	

Nota. \bar{x} símbolo estadístico de la media muestral o promedio*

Con el propósito de establecer una referencia estadística que representara el porcentaje de atenuación logrado por cada filtro en la totalidad de los transformadores en este estudio, se procedió al cálculo de la media muestral a partir de los niveles porcentuales de armónicos THDv. Con esta media del 6.853% de distorsión armónica total de voltaje como base, se llevó a cabo la determinación del porcentaje de reducción alcanzado después de la instalación de cada filtro. Como se detalla en la Tabla 19, se constató una atenuación del 11,89% después de la instalación del primer filtro armónico, un 28,24% tras la instalación del segundo filtro y un total del 51.98% de atenuación armónica de voltaje después de la instalación de los tres filtros armónicos, en comparación con los niveles previos a la instalación de estos en la red eléctrica.

En la Tabla 19, en lo que respecta al transformador trifásico 16325 se puede observar un nivel de atenuación mínimo en comparación con otros transformadores monofásicos. En este transformador, la distorsión armónica total de voltaje disminuyó de un 3,722% a un 3,39%, lo que representó un porcentaje de apenas el 8% con relación al 51,98% de eficiencia de atenuación que se obtuvo en los demás transformadores tras la instalación de los tres filtros armónicos. Esta particularidad se atribuyó a la configuración interna del transformador siendo esta ΔY_{11} . Esta configuración, se caracteriza por tener un lado delta en el primario y un lado estrella en el secundario, lo cual dificultó la eficiencia de atenuación de armónicos de tercer orden. Esto debido a que la configuración delta en el primario impide la propagación de estos armónicos hacia la red primaria, dificultando así la acción de los filtros armónicos desde su ubicación en este lado del transformador.

Por otro lado el transformador trifásico 16384, no presentó esta particularidad. Esto se debió a que en la red modelada en cymdist, la configuración y los tramos de la red conectados a este transformador son del tipo monofásico, lo que permitió una mayor eficiencia en la atenuación de armónicos y, por ende, una reducción más significativa de THDv como se apreció en el resto de los transformadores monofásicos.

Conclusiones.

La mitigación de los armónicos en sistemas eléctricos es una cuestión crítica para garantizar el funcionamiento eficiente y confiable de la red. La exhaustiva revisión de las distintas tecnologías y metodologías empleadas en la atenuación de armónicos proporcionó una visión integral de las soluciones disponibles en la actualidad. Entre estas alternativas, se constató que los filtros resultan ser una de las opciones más efectivas aplicadas para reducir los armónicos no deseados y mejorar la calidad del servicio eléctrico en sistemas eléctricos de distribución, debido a su practicidad y versatilidad de ajuste, además de su capacidad de atenuación en sistemas con varias cargas.

El análisis de los registros descargados de los analizadores en los transformadores seleccionados de la red secundaria del alimentador Nro.2 de la subestación La Esperanza, reveló la presencia de distorsiones armónicas, tanto en distorsión armónica individual de voltaje (IHDv) como en distorsión armónica total de voltaje (THDv), las cuales excedieron los límites establecidos por la regulación vigente ARCERNR 002/20. Esta evaluación permitió determinar los niveles máximos de distorsión armónica presentes y calcular el porcentaje de incumplimiento de cada uno de los registros pertenecientes a los transformadores de la muestra seleccionada, en la que se constató un total de 9 transformadores que incumplieron con los límites tanto en niveles de IHDv y THDv establecidos por la regulación. Además, se identificó que el armónico de 3er orden prevalece de manera predominante en todos estos transformadores.

Mediante el empleo del software Cymdist y el desarrollo e implementación de la metodología basada en el método de eliminación de regiones, se determinó la ubicación óptima de los filtros armónicos de sintonía simple en la red primaria, mismos que fueron georreferenciados en coordenadas geográficas con la ayuda del software ArcGIS. La selección minuciosa de estas tres ubicaciones condujo a la obtención de niveles de atenuación adecuados, con porcentajes por debajo del 5,043% de distorsión armónica total de voltaje en los puntos de medición del secundario de los transformadores seleccionados, bajo los límites de distorsión armónica establecidos de un 8% por la regulación ARCERNR 00/20. Además se determinó la eficacia de atenuación tras la instalación de los tres filtros armónicos, en el que se obtuvo un porcentaje promedio de reducción total de armónicos del 51,98%.

Recomendaciones.

Es recomendable el desarrollo de un script de optimización destinado al módulo de Python que se encuentra incorporado en el software Cymdist. Este script tendría como finalidad la aplicación de la metodología propuesta en este estudio, para determinar la ubicación óptima de los filtros armónicos en la red. Esta implementación conllevaría mejoras notables en la eficiencia de búsqueda y precisión al momento de determinar los puntos de ubicación de los filtros, además de su aplicabilidad en cualquier sistema de distribución eléctrica modelada en el software.

Referencias

- Abbas, A. S., El-Sehiemy, R. A., Abou El-Ela, A., Ali, E. S., Mahmoud, K., Lehtonen, M., & Darwish, M. M. F. (2021). Optimal harmonic mitigation in distribution systems with inverter based distributed generation. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(2), 1–16. <https://doi.org/10.3390/app11020774>
- Afinidad Electrica. (2021, January 30). *Los siete tipos de problemas en el suministro eléctrico – Afinidad Eléctrica*. <https://afinidadelectrica.com/2021/01/30/los-siete-tipos-de-problemas-en-el-suministro-electrico/>
- APCE. (2018, February 22). *EL EFECTO “SKIN” EN CONDUCTORES ELECTRICOS* – . <http://www.apcetech.com/BLOG/uncategorized/el-efecto-skin-en-conductores-electricos/>
- ARCERNNR. (2020). *Regulacion-No.-ARCERNNR-002_20-Calidad-de-Distribucion*. 11–35. https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/12/Regulacion-No.-ARCERNNR-002_20-Calidad-de-Distribucion.pdf
- ArcGIS Resources. (2022). *¿Qué es ArcGIS? | ArcGIS Resource Center*. <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- Carrillo González, C. J. (2018). *Fundamentos del Análisis de Fourier*.
- CONELEC. (2022). Aspectos de sustentabilidad y sostenibilidad social y ambiental. In *PLAN MAESTRO DE ELECTRIFICACION* (Vol. 4, pp. 7–11). <https://www.regulacionelectricagob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/Vol4-Aspectos-de-sustentabilidad-y-sostenibilidad-social-y-ambiental.pdf>
- CYME. (2020). *CYME - Software, Análisis de sistemas de distribución*. <https://www.cyme.com/es/software/cymdist/>
- Dariel Arcila, J. (2018). *ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS*. http://ingenieros.es/files/proyectos/Armonicos_en_sistemas_electricos
- Das, J. C. (2015). Harmonic Distortion Limits According to Standards. In *Power System Harmonics and Passive Filter Designs* (pp. 427–451). IEEE. <https://doi.org/10.1002/9781118887059.ch10>

- ecomex. (2020, December 3). *La automatización avanza en el Ecuador - Ecomex360 | Especialistas en comercio exterior y logística de importaciones en Ecuador*. <https://www.ecomex.com/la-automatizacion-avanza-en-el-ecuador/>
- Editores. (2021). *Efectos de los armónicos en motores y generadores, transformadores, condensadores, etc.* | Editores. https://www.editores-srl.com.ar/Efectos_arm%C3%B3nicos_en_motores_y_generadores
- Granados, J. P. (2018). *ANÁLISIS DE LOS ARMÓNICOS EN UNA RED DE MEDIA TENSIÓN DE FERROCARRILES METROPOLITANOS*. <https://repositorio.comillas.edu/jspui/bitstream/11531/25259/1/TFM000851.pdf>
- IECOR. (2021). *Calidad de energía eléctrica*. <https://www.iecor.com/calidad-de-energia-electrica/>
- IEEE. (2014). IEEE Std 519™-2014: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control. *ANSI/IEEE Std. 519, 2014, 5–9*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6826459>
- Paladines Guacho, C. D. (2022). *Filtrado de armónicos en un sistema de distribución con cargas no lineales para el control de la distorsión armónica*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22554>
- Pérez Abril, I. (2012). Cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos. *Ingeniería Energética*, 33, 133–142.
- PowerBI. (2022). *Visualización de datos | Microsoft Power BI*. <https://powerbi.microsoft.com/es-es/>
- Ramon Pinyol, P. (2017). *ARMÓNICOS: CAUSAS, EFECTOS Y MINIMIZACIÓN*. https://www.salicru.com/files/pagina/72/278/jn004a00_whitepaper-armonics_.pdf
- RPS Spa. (2018). *The Difference Between Linear And Non-Linear Loads*. <https://www.riello-ups.co.uk/questions/39-what-s-the-difference-between-linear-and-non-linear-loads>
- Sánchez Huerta, V., Bahía, B., Ignacio Comonfort, esq, del Bosque Chetumal, C., & Roo, Q. (2018). Perturbaciones en la red eléctrica. In *Caos Conciencia* (Vol. 1).
- SectorElectricidad. (2020, October 1). *¿Qué son los armónicos y como nos afectan? Profesionales en Ingeniería Eléctrica*. <https://www.sectorelectricidad.com/13810/armonicos-que-son-y-como-nos-afectan/>

Sher, H. A., Addoweesh, K. E., & Khan, Y. (2016). Harmonics Generation, Propagation and Purging Techniques in Non-Linear Loads. *An Update on Power Quality*. <https://doi.org/10.5772/53422>

Soledad, K., & Ortiz, C. (2019). *CARACTERIZACIÓN DE ARMÓNICOS EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO (SNI) A PARTIR DE INFORMACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO DE ÁREA EXTENDIDA (WAMS)*.

Vásquez Stanescu, C. L., Naranjo, E., González, C., & Osal Herrera, W. J. (2017). Influencia de las tensiones armónicas en el comportamiento térmico de transformadores de distribución sumergidos en aceite. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 15, 65–74.

Anexos

Anexo A.

En la Tabla 20 se muestran los niveles de IHDv obtenidos tras el análisis realizado en el capítulo 2.

Tabla 20

Niveles de distorsión armónica individual de voltaje en transformadores de estudio.

CODIGO TRANSFORMADOR	3er. [%]	5to. [%]	7mo. [%]	9no. [%]	11avo. [%]	13avo. [%]	15avo. [%]	17avo. [%]
16547	8,49	3,62	0,68	0,39	0,05	0,1	0,05	0,05
16323	8,79	4,06	0,91	0,81	0,19	0,24	0,05	0,05
16538	6,49	4,47	0,93	0,34	0,15	0,05	0	0,05
16423	8,17	3,77	0,55	0,32	0,05	0,05	0,05	0
16532	8,28	2,9	0,38	0,24	0,05	0,05	0	0,05
16325	0,82	3,7	0,87	0,05	0,21	0,1	0	0
16468	6,84	1,87	0,52	0,72	0,21	0,1	0	0
16384	5,94	2,97	0,09	0,27	0,05	0,14	0	0
16546	6,33	2,93	0,43	0,38	0,14	0,1	0,05	0,05
21512	6,6	2,51	0,69	0,1	0,25	0	0,05	0,05
16346	3,58	2,83	1,32	0,38	0,42	0,14	0,09	0,09
16607	4,9	2,86	0,87	0,15	0,05	0	0	0
16299	0,77	3,44	0,92	0,18	0,34	0,16	0,04	0,06
16605	0,85	4,32	1,30	0,12	0,43	0,20	0,12	0,08

Anexo B.

Tabla 21

Porcentajes de IHDv y THDv de combinaciones de la Evaluación 1.

Combinación	3er. [%]	5to. [%]	7mo. [%]	9no. [%]	11avo. [%]	13avo. [%]	THDv [%]	IHD>5 %	THD> 8%
1,2,3	5,285	2,669	0,426	0,207	0,032	0,026	5,9988	x	x
1,2,4	4,437	2,631	0,421	0,205	0,032	0,025	5,2701	x	

1,2,5	2,479	2,571	0,415	0,202	0,032	0,025	3,6783	x	
1,2,6	2,658	2,538	0,412	0,201	0,031	0,025	3,8145	x	x
1,2,7	3,235	2,532	0,412	0,200	0,031	0,025	4,2241	x	x
1,3,4	4,691	2,626	0,420	0,206	0,032	0,025	5,4869	x	
1,3,5	2,833	2,569	0,414	0,203	0,031	0,025	3,9794	x	
1,3,6	3,006	2,537	0,410	0,201	0,031	0,025	4,1128	x	x
1,3,7	3,564	2,530	0,410	0,202	0,031	0,025	4,5034	x	x
1,4,5	2,390	2,532	0,409	0,201	0,031	0,025	3,6590		
1,4,6	2,523	2,499	0,406	0,200	0,031	0,025	3,7497		
1,4,7	3,015	2,494	0,406	0,200	0,031	0,025	4,0745	x	
1,5,6	2,214	2,450	0,401	0,197	0,031	0,025	3,5875	x	
1,5,7	2,366	2,447	0,401	0,197	0,031	0,025	3,6455	x	
1,6,7	2,919	2,419	0,398	0,196	0,031	0,025	3,9926	x	x
2,3,4	4,401	2,626	0,420	0,205	0,032	0,025	5,2390	x	
2,3,5	2,542	2,565	0,414	0,202	0,032	0,025	3,7283	x	
2,3,6	2,712	2,533	0,411	0,201	0,031	0,025	3,8610	x	x
2,3,7	3,273	2,530	0,410	0,201	0,031	0,025	4,2548	x	x
2,4,5	2,082	2,531	0,409	0,201	0,031	0,025	3,3958		
2,4,6	2,212	2,499	0,406	0,199	0,031	0,025	3,4843		
2,4,7	2,703	2,496	0,406	0,199	0,031	0,025	3,8087	x	
2,5,6	1,904	2,446	0,400	0,197	0,031	0,025	3,3195	x	
2,5,7	2,055	2,446	0,400	0,196	0,031	0,025	3,3799		
2,6,7	2,598	2,416	0,398	0,196	0,031	0,025	3,7162	x	x
3,4,5	2,503	2,530	0,409	0,202	0,031	0,025	3,7621		
3,4,6	2,621	2,496	0,405	0,200	0,031	0,025	3,8430		
3,4,7	3,101	2,491	0,405	0,200	0,031	0,025	4,1589	x	
3,5,6	2,372	2,445	0,400	0,198	0,031	0,025	3,7267	x	
3,5,7	2,518	2,442	0,400	0,197	0,031	0,025	3,7819	x	
3,6,7	3,052	2,414	0,397	0,197	0,031	0,025	4,1169	x	x
4,5,6	2,017	2,412	0,395	0,196	0,030	0,024	3,4756		
4,5,7	2,153	2,406	0,395	0,196	0,030	0,024	3,5208		
4,6,7	2,624	2,382	0,393	0,195	0,030	0,024	3,7946		
5,6,7	2,369	2,339	0,388	0,193	0,030	0,024	3,6528	x	
Mayor % de atenuación armónica:							3,3958		

Tabla 22*Porcentajes de IHDv y THDv de combinaciones de la Evaluación 2.*

Combinación	3er. [%]	5to. [%]	7mo. [%]	9no. [%]	11avo. [%]	13avo. [%]	THDv [%]	IHD>5 %	THD> 8%
1,2,3	5,121	2,640	0,420	0,204	0,032	0,025	5,8634	x	x
1,2,4	3,916	2,608	0,416	0,202	0,032	0,025	4,8073	x	
1,2,5	4,247	2,599	0,415	0,202	0,031	0,025	5,1053	x	
1,2,6	3,006	2,583	0,413	0,201	0,031	0,025	4,0369	x	
1,2,7	2,370	2,544	0,409	0,199	0,031	0,025	3,5830	x	
1,3,4	4,045	2,606	0,415	0,203	0,032	0,025	4,9036	x	
1,3,5	4,351	2,604	0,414	0,202	0,031	0,025	5,1840	x	
1,3,6	3,143	2,585	0,413	0,201	0,031	0,025	4,1424	x	
1,3,7	2,527	2,546	0,408	0,200	0,031	0,025	3,7036	x	
1,4,5	3,841	2,576	0,411	0,201	0,031	0,025	4,7424	x	
1,4,6	2,506	2,553	0,409	0,200	0,031	0,025	3,6544		
1,4,7	1,966	2,513	0,405	0,198	0,031	0,025	3,2965		
1,5,6	2,655	2,543	0,408	0,200	0,031	0,025	3,7672		
1,5,7	2,068	2,511	0,404	0,198	0,031	0,025	3,3707		
1,6,7	1,974	2,493	0,403	0,197	0,031	0,024	3,3464	x	
2,3,4	4,077	2,607	0,414	0,203	0,032	0,025	4,9301	x	
2,3,5	4,386	2,601	0,414	0,203	0,031	0,025	5,2118	x	
2,3,6	3,195	2,583	0,412	0,202	0,031	0,025	4,1840	x	
2,3,7	2,577	2,546	0,408	0,200	0,031	0,025	3,7440	x	
2,4,5	3,867	2,568	0,411	0,201	0,031	0,025	4,7598	x	
2,4,6	2,550	2,553	0,409	0,200	0,031	0,025	3,6889		
2,4,7	2,011	2,512	0,405	0,198	0,031	0,025	3,3296		
2,5,6	2,694	2,547	0,408	0,200	0,031	0,025	3,8005		
2,5,7	2,108	2,510	0,404	0,198	0,031	0,025	3,4000		
2,6,7	2,035	2,494	0,403	0,197	0,031	0,024	3,3933	x	
3,4,5	4,238	2,570	0,410	0,202	0,031	0,025	5,0961	x	
3,4,6	2,930	2,554	0,408	0,201	0,031	0,025	4,0261		
3,4,7	2,397	2,517	0,404	0,199	0,031	0,025	3,6727		

3,5,6	3,068	2,543	0,407	0,201	0,031	0,025	4,1307	
3,5,7	2,486	2,507	0,403	0,199	0,031	0,025	3,7311	
3,6,7	2,424	2,491	0,402	0,198	0,031	0,025	3,7342	x
4,5,6	2,820	2,515	0,404	0,199	0,031	0,025	3,9496	
4,5,7	2,281	2,480	0,399	0,198	0,031	0,024	3,5968	
4,6,7	2,028	2,464	0,398	0,197	0,031	0,024	3,4683	
5,6,7	2,092	2,458	0,398	0,196	0,030	0,024	3,5097	
Mayor % de atenuación:							3,2965	

Tabla 23

Porcentajes de IHDv y THDv de combinaciones de la Evaluación 3.

Combinación	3er. [%]	5to. [%]	7mo. [%]	9no. [%]	11avo. [%]	13avo. [%]	THDv [%]	IHD>5 %	THD> 8%
1, 2, 3	5,040	2,607	0,414	0,199	0,031	0,025	5,7785	x	x
1, 2, 4	5,078	2,610	0,414	0,199	0,031	0,025	5,8066	x	x
1, 2, 5	4,126	2,583	0,411	0,198	0,031	0,024	4,9519	x	
1, 2, 6	3,889	2,579	0,410	0,198	0,031	0,024	4,7628	x	
1, 2, 7	3,000	2,552	0,408	0,196	0,031	0,024	4,0086	x	
1, 2, 8	2,668	2,538	0,406	0,196	0,031	0,024	3,7632	x	
1, 2, 9	2,379	2,516	0,404	0,195	0,031	0,024	3,5657	x	
1, 3, 4	5,107	2,610	0,413	0,200	0,031	0,025	5,8333	x	x
1, 3, 5	4,162	2,584	0,411	0,198	0,031	0,024	4,9832	x	
1, 3, 6	3,910	2,575	0,410	0,198	0,031	0,024	4,7782	x	
1, 3, 7	3,038	2,551	0,407	0,197	0,031	0,024	4,0395	x	
1, 3, 8	2,710	2,537	0,406	0,196	0,031	0,024	3,7975	x	
1, 3, 9	2,429	2,518	0,403	0,195	0,031	0,024	3,6077	x	
1, 4, 5	4,264	2,584	0,410	0,199	0,031	0,025	5,0610	x	
1, 4, 6	4,011	2,575	0,409	0,199	0,031	0,024	4,8544	x	
1, 4, 7	3,141	2,551	0,407	0,197	0,031	0,024	4,1180	x	
1, 4, 8	2,818	2,537	0,405	0,196	0,031	0,024	3,8794	x	
1, 4, 9	2,538	2,517	0,403	0,195	0,031	0,024	3,6903	x	
1, 5, 6	3,383	2,556	0,407	0,197	0,031	0,024	4,3240		

1, 5, 7	2,679	2,532	0,405	0,196	0,031	0,024	3,7628	x	
1, 5, 8	2,417	2,518	0,403	0,195	0,031	0,024	3,5844	x	
1, 5, 9	2,185	2,498	0,401	0,195	0,030	0,024	3,4417	x	
1, 6, 7	2,503	2,523	0,404	0,196	0,031	0,024	3,6314		
1, 6, 8	2,223	2,509	0,402	0,195	0,030	0,024	3,4394		
1, 6, 9	1,978	2,485	0,399	0,194	0,030	0,024	3,3195		
1, 7, 8	2,189	2,490	0,400	0,194	0,030	0,024	3,4448	x	
1, 7, 9	1,991	2,466	0,398	0,193	0,030	0,024	3,3359	x	
1, 8, 9	1,973	2,454	0,396	0,192	0,030	0,024	3,3272	x	
2, 3, 4	5,121	2,605	0,413	0,200	0,031	0,025	5,8433	x	x
2, 3, 5	4,175	2,580	0,410	0,198	0,031	0,025	4,9907	x	
2, 3, 6	3,922	2,574	0,409	0,198	0,031	0,024	4,7861	x	
2, 3, 7	3,057	2,551	0,406	0,197	0,031	0,024	4,0537	x	
2, 3, 8	2,733	2,533	0,405	0,196	0,031	0,024	3,8106	x	
2, 3, 9	2,453	2,513	0,403	0,195	0,031	0,024	3,6211	x	
2, 4, 5	4,286	2,580	0,410	0,199	0,031	0,025	5,0785	x	
2, 4, 6	4,032	2,575	0,409	0,199	0,031	0,024	4,8732	x	
2, 4, 7	3,172	2,547	0,407	0,197	0,031	0,024	4,1418	x	
2, 4, 8	2,851	2,536	0,405	0,197	0,031	0,024	3,9060	x	
2, 4, 9	2,572	2,516	0,403	0,196	0,031	0,024	3,7175	x	
2, 5, 6	3,401	2,556	0,407	0,198	0,031	0,024	4,3395		
2, 5, 7	2,709	2,529	0,404	0,196	0,031	0,024	3,7850	x	
2, 5, 8	2,450	2,512	0,402	0,195	0,031	0,024	3,6070	x	
2, 5, 9	2,218	2,494	0,400	0,195	0,030	0,024	3,4650	x	
2, 6, 7	2,531	2,524	0,403	0,196	0,031	0,024	3,6534		
2, 6, 8	2,252	2,507	0,401	0,195	0,030	0,024	3,4602		
2, 6, 9	2,005	2,489	0,399	0,194	0,030	0,024	3,3058		
2, 7, 8	2,224	2,484	0,399	0,194	0,030	0,024	3,4676	x	
2, 7, 9	2,029	2,465	0,397	0,193	0,030	0,024	3,3643	x	
2, 8, 9	2,017	2,452	0,395	0,192	0,030	0,024	3,3579	x	
3, 4, 5	4,401	2,583	0,410	0,199	0,031	0,025	5,1807	x	
3, 4, 6	4,140	2,574	0,408	0,199	0,031	0,025	4,9669	x	
3, 4, 7	3,285	2,549	0,406	0,198	0,031	0,024	4,2416	x	
3, 4, 8	2,965	2,538	0,404	0,197	0,031	0,024	4,0057	x	

3, 4, 9	2,689	2,517	0,403	0,196	0,031	0,024	3,8191	x
3, 5, 6	3,520	2,550	0,406	0,198	0,031	0,024	4,4395	
3, 5, 7	2,827	2,529	0,404	0,196	0,031	0,024	3,8869	x
3, 5, 8	2,573	2,514	0,402	0,196	0,030	0,024	3,7136	x
3, 5, 9	2,346	2,489	0,400	0,195	0,030	0,024	3,5701	x
3, 6, 7	2,648	2,520	0,403	0,196	0,031	0,024	3,7516	
3, 6, 8	2,370	2,505	0,401	0,196	0,030	0,024	3,5591	
3, 6, 9	2,129	2,484	0,399	0,194	0,030	0,024	3,4069	
3, 7, 8	2,353	2,481	0,399	0,194	0,030	0,024	3,5750	x
3, 7, 9	2,157	2,464	0,396	0,193	0,030	0,024	3,4727	x
3, 8, 9	2,146	2,451	0,395	0,193	0,030	0,024	3,4684	x
4, 5, 6	3,784	2,554	0,406	0,198	0,031	0,024	4,6790	
4, 5, 7	3,086	2,528	0,403	0,197	0,031	0,024	4,1189	x
4, 5, 8	2,834	2,516	0,402	0,196	0,031	0,024	3,9492	x
4, 5, 9	2,603	2,495	0,400	0,195	0,030	0,024	3,8058	x
4, 6, 7	2,583	2,503	0,400	0,196	0,030	0,024	3,7613	
4, 6, 8	2,355	2,488	0,398	0,195	0,030	0,024	3,6164	
4, 6, 9	2,151	2,466	0,396	0,194	0,030	0,024	3,4966	
4, 7, 8	2,338	2,464	0,396	0,194	0,030	0,024	3,6281	
4, 7, 9	2,175	2,446	0,394	0,193	0,030	0,024	3,5485	x
4, 8, 9	2,168	2,429	0,392	0,192	0,030	0,024	3,5428	x
5, 6, 7	2,624	2,501	0,400	0,196	0,030	0,024	3,7933	
5, 6, 8	2,393	2,485	0,398	0,195	0,030	0,024	3,6460	
5, 6, 9	2,185	2,468	0,397	0,194	0,030	0,024	3,5274	
5, 7, 8	2,372	2,464	0,396	0,194	0,030	0,024	3,6564	x
5, 7, 9	2,205	2,443	0,394	0,193	0,030	0,024	3,5720	x
5, 8, 9	2,196	2,434	0,392	0,192	0,030	0,024	3,5710	x
6, 7, 8	2,194	2,459	0,396	0,193	0,030	0,024	3,5294	
6, 7, 9	2,023	2,438	0,393	0,192	0,030	0,024	3,4418	
6, 8, 9	2,002	2,421	0,391	0,192	0,030	0,024	3,4237	
7, 8, 9	2,166	2,405	0,390	0,191	0,030	0,024	3,5678	x
Mayor % de atenuación:							3,3058	