

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

PROPUESTA DE DISMINUCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE VOLTAJE EN LOS ALIMENTADORES PRIMARIOS X1 Y X2 DE LA SUBESTACIÓN EL CHOTA.

Trabajo de grado presentado ante la Universidad Técnica del Norte previo a la
obtención del Título de grado de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico

AUTOR:

VÍCTOR ALEJANDRO CRUZ PONCE

DIRECTOR:

ING. OLGER GILBERTO ARELLANO BASTIDAS MSc.

ASESORES:

ING. SEGUNDO HERNÁN PÉREZ CRUZ, MBA.

ING. JHONNY JAVIER BARZOLA IZA, MSc.

IBARRA-ECUADOR

2022

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

1. 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:	1004175129		
APELLIDOS Y NOMBRES:	CRUZ PONCE VICTOR ALEJANDRO		
DIRECCIÓN:	URCUQUI		
EMAIL:	vacruzp@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062939239	TELÉFONO MÓVIL:	0959870796

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	PROPUESTA DE DISMINUCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE VOLTAJE EN LOS ALIMENTADORES PRIMARIOS X1 Y X2 DE LA SUBESTACIÓN EL CHOTA.
AUTOR (ES):	VICTOR ALEJANDRO CRUZ PONCE
FECHA: DD/MM/AAAA	04/05/2022
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN MANTENIMIENTO ELECTRICO
ASESOR /DIRECTOR:	ING. OLGER GILBERTO ARELLANO BASTIDAS MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) 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 (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 4 días del mes de mayo de 2022

EL AUTOR:

(Firma).....

Nombre: Víctor Alejandro Cruz Ponce

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR

Por medio del presente yo MSc. Olger Gilberto Arellano Bastidas, certifico que el Sr. Víctor Alejandro Cruz Ponce, portador de la cédula de identidad Nro. 1004175129. Ha trabajado en el desarrollo del proyecto de tesis "PROPUESTA DE DISMINUCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE VOLTAJE EN LOS ALIMENTADORES PRIMARIOS X1 Y X2 DE LA SUBESTACIÓN EL CHOTA", previo a la obtención del título de ingeniería en mantenimiento eléctrico, lo cual ha realizado en su totalidad con responsabilidad.

Es todo cuanto puedo certificar en honor de la verdad.

Atentamente:

MSc. Olger Gilberto Arellano Bastidas

DIRECTOR DE TESIS

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de grado a mi Tío Fabian Cruz, ya que, sin su ayuda, sin su ejemplo y sin su gran corazón esto no hubiera sido posible, con esto quiero demostrarle que todo lo que se siembra se cosecha en algún momento, tal vez la vida no me alcance para agradecerle todo lo que ha hecho por mí, pero sé que Dios le dará el doble, de mi parte simplemente un Dios le pague para toda la vida.

Con cariño

El Autor

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a todas las personas que de una u otra manera estuvieron ahí apoyándome en toda mi carrera universitaria.

Agradezco a mis padres por sus consejos por su apoyo y por su sacrificio a la hora de darme la educación y la vida que tengo.

Agradezco a mis hermanos por su ayuda en todo lo que fue el proceso universitario, gracias por estar siempre ahí cuando los necesite.

Agradezco a mi familia por el apoyo que me supieron brindar siempre en cada paso que daba en esta larga trama de mi vida.

Agradezco a mi tutor el ingeniero Olger Arellano, por haber sido guía en mi trabajo de titulación.

Agradezco a mis amigos con los que se vivieron las mejores épocas universitarias, gracias por haber formado parte de esta etapa de la vida.

Con cariño

El Autor

CONTENIDO

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD. I	
CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
CONTENIDO.....	V
INDICE DE FIGURAS	IX
INDICE DE TABLAS	XI
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
CONTEXTUALIZACIÓN.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
OBJETIVOS.....	3
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
JUSTIFICACIÓN.....	4
ALCANCE.....	5
VIABILIDAD	5
CAPÍTULO 1	6
1. MARCO TEÓRICO.....	6
1.1 CALIDAD DE LA ENERGÍA.....	6
1.2 PERTURBACIONES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS:.....	6
1.2.1 Desbalances de voltaje/corriente.	7
1.2.2 Armónicos.	7
1.2.3 Interrupciones, bajo voltaje y sobre voltaje.	7
1.2.4 Transitorios.	8

1.2.5 Disminuciones de voltaje Sag.	8
1.2.6 Subidas de voltaje Swell.	9
1.2.7 Flicker.....	9
1.3 ARMÓNICOS EN EL SEP	10
1.3.1 Análisis de Fourier.....	11
1.3.2 Cargas lineales y no lineales.....	11
1.4 MEDIDAS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN VOLTAJE.....	12
1.4.1 Distorsión armónica.....	12
1.4.2 Características de la distorsión armónica.....	13
1.4.3 Distorsión armónica de voltaje.	13
1.5 NIVELES DE TOLERANCIA DE ARMÓNICOS.....	14
1.6 MEDICIÓN DE ARMÓNICOS.....	15
1.7 EFECTO DE LOS ARMÓNICOS.	16
1.7.1 Efecto en cables y conductores.....	17
1.7.2 Efecto en transformadores.	17
1.7.3 Efecto en Motores.	20
1.7.4 Efecto sobre los capacitores.	20
1.7.5 Efecto sobre otros equipos.....	21
1.8 SOLUCIÓN A PROBLEMAS DE ARMÓNICOS.	22
CAPITULO 2	25
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.	25
2.1.1 Método Inductivo.....	25
2.1.2 Softwares de simulación e interpretación.....	26
2.1.3 Muestra.	27
2.1.4 Cálculo del tamaño de la muestra.....	27
2.2 MODELADO DE LAS REDES.	28
2.2.1 Datos de los analizadores de red.....	28

2.2.2	Localización de la red en el sistema eléctrico	29
2.2.3	Diagrama unifilar de la red	29
2.2.4	Datos del producto.	30
2.3	ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS.	30
2.3.1	Selección de los parámetros eléctricos.	30
2.3.2	Tratamiento de datos.	31
2.3.3	Traslado de datos a Power BI.	31
2.3.4	Visualización de datos.....	32
2.4	DETERMINACIÓN DE INCUMPLIMIENTO EN EL ALIMENTADOR X1	33
2.4.1	Distorsión armónica de Voltaje en el circuito X1.	33
2.4.2	Distancias de los transformadores.	34
2.4.3	Voltaje y Cargabilidad de los transformadores.....	35
2.5	DETERMINACIÓN DE INCUMPLIMIENTO EN EL ALIMENTADOR X2	38
2.5.1	Distorsión armónica de Voltaje en el circuito X2.	38
2.5.2	Distancias Circuito Alimentador X2.	40
2.5.3	Voltajes y Cargabilidad de los transformadores.	41
2.6	DETERMINACIÓN DEL INCUMPLIMIENTO EN MEDIO VOLTAJE.	43
2.6.1	Distorsión Armónica en el Alimentador X1.	43
2.6.2	Distorsión Armónica en el Alimentador X2.	45
CAPÍTULO 3	47
3.1	CASO DE ESTUDIO 1: Circuito Alimentador X1	47
3.1.1	Modelado del filtro armónico.	48
3.1.2	Ubicación de los filtros.	49
3.1.3	Reporte de voltaje.	50
3.1.4	Reporte de distorsión armónica.....	52
3.1.5	Comparación de resultados.	54
3.2	CASO DE ESTUDIO 2: Circuito Alimentador X2	55

3.2.1 Modelado del filtro armónico.	56
3.2.3 Ubicación de los filtros.	57
3.2.4 Reporte de voltaje.	58
3.2.5 Reporte de distorsión armónica.....	60
3.2.6 Comparación de resultados.	63
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
Conclusiones.	65
Recomendaciones	66
REFERENCIAS.....	67

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Desbalance trifásico.....	7
Figura 2 Sobrevoltaje	8
Figura 3 Bajo voltaje.....	8
Figura 4 Transitorios impulsivos y oscilatorios.	8
Figura 5 Voltaje Sag.....	9
Figura 6 Voltaje Swell.....	9
Figura 7 Flicker ocasionado por operación de horno de arco.	10
Figura 8 Descomposición Armónica.....	10
Figura 9 Carga lineal: La corriente y el voltaje siempre son proporcionales a lo largo de la línea de su impedancia.....	11
Figura 10 Carga no lineal de una resistencia controlada por SCR en la que la corriente y el voltaje no son proporcionales.	12
Figura 11 Efecto en el voltaje por la conmutación de capacitores.....	13
Figura 12 Características de los equipos para medición de equipos.	16
Figura 13 Densidades de corriente en un mismo conductor, (a) a corriente directa y (b) a corriente	17
Figura 14 Conexión estrella-triángulo de un transformador.	19
Figura 15 Impedancia de un condensador no ideal.....	21
Figura 16 Impedancia de una Bobina no ideal.	21
Figura 17 Conexión en paralelo de condensadores.....	21
Figura 18 Filtro de entrada de alimentación de equipos informáticos.	22
Figura 19 Representación de un transformador de aislamiento.....	23
Figura 20 A) Solución a corregir B) Solución preferible.....	23
Figura 21 Alimentadores primarios Subestación El Chota en ArcGIS.....	29
Figura 22 Datos de mediciones exportados a Excel.	30
Figura 23 Parámetros eléctricos THDv obtenidos de las bajantes de los transformadores.	30
Figura 24 Datos que se han tratado para su posterior análisis.	31
Figura 25 Tabla exportada de Excel con los datos de los diferentes parámetros eléctricos.	31
Figura 26 Parámetros eléctricos graficados en el software Power bi.....	32
Figura 27 Voltajes graficados en el software Power Quality Logger.	32

Figura 28 Circuito Alimentador X1 Subestación El Chota.	33
Figura 29 Transformadores Circuito Alimentador X1 Subestación El Chota. ...	33
Figura 30 Rutas en ArcGIS.	35
Figura 31 Relación Distancia vs THDv en los transformadores circuito X1.....	35
Figura 32 Caídas de Voltaje Circuito Alimentador X1.	36
Figura 33 Curva de cargabilidad de un transformador de 5 kVA.....	36
Figura 34 Circuito Alimentador X2 Subestación El Chota.	38
Figura 35 Transformadores Circuito Alimentador X2 Subestación El Chota. ...	38
Figura 36 Distorsión armónica Total de un transformador separado en un día y 7 días.	40
Figura 37 Relación Distancia vs THDv en los transformadores circuito X2.....	40
Figura 38 Caídas de Voltaje Circuito Alimentador X2.	41
Figura 39 Curva de cargabilidad, Transformador Sobrecargado-10 kVA.....	41
Figura 40 Gráficas de THDVA, THDVB, THDVC Alimentador X1.....	43
Figura 41 Gráficas de Voltaje por fase Alimentador X1.....	44
Figura 42 Gráficas de Voltaje línea-línea Alimentador X1.....	44
Figura 43 Gráficas de THDVA, THDVB, THDVC Alimentador X2.....	45
Figura 44 Gráficas de Voltaje por fase Alimentador X2.....	46
Figura 45 Gráficas de Voltaje línea-línea Alimentador X2.....	46
Figura 46 Circuito Alimentador X1 modelado en el Software CYME.....	47
Figura 47 Datos de una fuente armónica en CYME.	48
Figura 48 Parámetros del filtro en CYME.....	49
Figura 49 Impedancias equivalentes en CYME.....	49
Figura 50 Bajos Voltajes nodales ilustrados.....	51
Figura 51 Medios Voltajes nodales Ilustrados.....	52
Figura 52 Circuito del alimentador X2 en CYME.....	55
Figura 53 Fuente de voltaje armónico.	56
Figura 54 Bajos Voltajes nodales ilustrados.....	59
Figura 55 Bajos Voltajes nodales ilustrados.....	59

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal)...	15
Tabla 1.2 Normas para medición, instrumentación, prácticas y requisitos sobre armónicos.....	15
Tabla 1.3 Numeración de factor K en transformadores comerciales.	20
Tabla 2.1 Máximos de THDv Circuito Alimentador X1.	34
Tabla 2.2 Parámetros Generales de Transformadores del Alimentador X1	37
Tabla 2.3 Máximos de THDv Circuito Alimentador X2.	39
Tabla 2.4 Parámetros Generales de Transformadores del Alimentador X2	42
Tabla 2.7 Máxima distorsión individual, Alimentador X1.	44
Tabla 2.8 Máxima distorsión individual, Alimentador X2.	45
Tabla 3.0 Parámetros del Alimentador X1 en máxima demanda.	48
Tabla 3.1 Ubicaciones de los filtros.....	50
Tabla 3.2 Simulación en Bajo Voltaje.....	51
Tabla 3.3 Simulación en Medio Voltaje.	51
Tabla 3.4 Porcentajes Armónicos con una fuente armónica conectada.....	52
Tabla 3.5 Porcentajes Armónicos con fuente y filtro armónico conectado.	53
Tabla 3.6 Porcentajes Armónicos con una fuente y 2 filtros conectados.	53
Tabla 3.7 Distorsión en medio voltaje con una fuente armónica.	53
Tabla 3.8 Distorsión en medio voltaje con una fuente y un filtro armónico.....	54
Tabla 3.9 Distorsión en medio voltaje con una fuente y 2 filtros armónicos.	54
Tabla 3.10 Distorsión armónica total en bajo voltaje resultados.....	55
Tabla 3.11 Distorsión Armónica Total en Medio Voltaje resultados.	55
Tabla 3.12 Parámetros del alimentador X2 en máxima demanda.....	56
Tabla 3.13 Ubicaciones de los filtros.....	57
Tabla 3.14 Simulación en Bajo Voltaje.....	58
Tabla 3.15 Simulación en Medio Voltaje.	59

Tabla 3.16 Porcentajes Armónicos con una fuente armónica conectado.	60
Tabla 3.17 Porcentajes Armónicos con fuente y filtro armónico conectado.	61
Tabla 3.18 Porcentajes Armónicos con fuente y 2 filtros armónicos conectado.	61
Tabla 3.19 Porcentajes Armónicos con fuente y 3 filtros armónicos conectados.	61
Tabla 3.20 Porcentajes Armónicos con fuente armónica conectado.	62
Tabla 3.21 Porcentajes Armónicos con fuente y filtro armónico conectado.	62
Tabla 3.22 Porcentajes Armónicos con fuente y 2 filtros armónicos conectado.	63
Tabla 3.23 Porcentajes Armónicos con fuente y 3 filtros armónicos conectado.	63
Tabla 3.24 Distorsión armónica total en bajo voltaje resultados.....	64
Tabla 3.25 Distorsión armónica total en Medio Voltaje resultados.	64

RESUMEN

El presente estudio se lo plantea con el fin de reducir los niveles de distorsión armónica de voltaje presentes en los circuitos de los alimentadores X1 Y X2 conectados a la subestación el chota y llevarlos hasta los niveles de cumplimiento, según dicta la REGULACIÓN No. ARCERNNR 002/20.

Los datos recolectados por los analizadores de red de la empresa Emelnorte indican que los diferentes puntos de medición a los que han sido conectados incumplen con la norma, lo que lleva a un problema técnico-económico a la empresa encargada de la distribución de energía, para lo cual se necesita una solución rápida y eficaz.

Mediante el uso del software ArcGIS se logró localizar los puntos de medición a los que fueron acoplados los analizadores de red, para con esto tener una mejor perspectiva de los circuitos en estudio.

Mediante el software CYMDIST se realizó el modelamiento de cada uno de los circuitos, a los cuales se les conecto diferentes fuentes armónicas para analizar su comportamiento, finalizando con un análisis armónico propio del sistema con el cual se pudo calcular los filtros necesarios para la atenuación de armónicos.

Finalmente se presentan los resultados obtenidos de la distorsión armónica de voltaje total e individual de cada orden armónico dentro de los valores aceptables en la regulación, con lo cual representa una mejora en la calidad de energía y ondas de voltaje de los circuitos.

Palabras Claves: Calidad de energía, distorsión armónica, filtros armónicos.

ABSTRACT

The present study is proposed in order to reduce the levels of voltage harmonic distortion present in the circuits of the feeders X1 and X2 connected to the El Chota substation and bring them up to compliance levels, as dictated by REGULATION No. ARCERNNR 002 /twenty.

The data collected by the network analyzers of the company Emelnorte indicate that the different measurement points to which they have been connected do not comply with the standard, which leads to a technical-economic problem for the company in charge of energy distribution, which requires a quick and effective solution.

Through the use of ArcGIS software, it was possible to locate the measurement points to which the network analyzers were coupled, in order to have a better perspective of the circuits under study.

Through the CYMDIST software, the modeling of each of the circuits was carried out, to which different harmonic sources were connected to analyze their behavior, ending with a harmonic analysis of the system with which it was possible to calculate the necessary filters for the attenuation of harmonics.

Finally, the results obtained from the total and individual voltage harmonic distortion of each harmonic order within the acceptable values in the regulation are presented, which represents an improvement in the quality of energy and voltage waves of the circuits.

Keywords: Power quality, harmonic distortion, harmonic filters.

CONTEXTUALIZACIÓN.

Los sistemas eléctricos cuentan actualmente con una gran cantidad de elementos pasivos denominados no lineales, los cuales generan a partir de formas de onda sinusoidales y con la frecuencia de la red, otras ondas de diferentes frecuencias ocasionando el fenómeno conocido como armónicos. Los armónicos son un fenómeno que genera problemas tanto para los usuarios como para la entidad encargada de la prestación del servicio de energía eléctrica ocasionando diversos efectos nocivos en los equipos de la red (Arcila, 2016).

La presencia de armónicos de bajo orden en la red eléctrica causa numerosas pérdidas económicas a la industria. Por ello, se están dedicando muchos esfuerzos en la búsqueda de soluciones para reducir su presencia en la red eléctrica (Montero-Robina & Alvarez, 2019).

Con una gran cantidad de cargas no lineales integradas en la red eléctrica, la distorsión armónica se ha convertido en una de las grandes preocupaciones para los clientes de energía y las empresas de servicios públicos. La detección de fuentes armónicas es esencial para compartir la responsabilidad y la mitigación armónicas (Li et al., 2016).

Como lo menciona (Aranda Mendoza, 2015), entre los problemas más frecuentes se pueden mencionar los siguientes:

- ✓ Destrucción de condensadores por sobretensión.
- ✓ Destrucción de cables por sobretensión.
- ✓ Operación incorrecta de relés de protección.
- ✓ Calentamiento de motores de inducción.
- ✓ Oscilaciones mecánicas en motores y generadores.
- ✓ Errores de medición de energía activa y reactiva.
- ✓ Interferencias con sistemas de comunicación.
- ✓ Aumento de pérdidas

La distorsión armónica en redes de distribución está aumentando debido a la penetración de múltiples cargas no lineales, incluyendo tecnologías modernas como los vehículos eléctricos y las lámparas de alta eficiencia

energética (por ejemplo, lámparas compactas fluorescentes y LEDs) (Caicedo et al., 2017).

Entre los equipos que han sufrido un impacto considerable debido a corrientes distorsionadas están los transformadores de distribución cuyo rendimiento está estrechamente relacionado con el tipo de carga a la que suministra energía, generándose incrementos de pérdidas de energía cuando se trata de cargas no-lineales (Carrión et al., 2019).

Los límites que se debe considerar en la contaminación por armónicos se pueden tomar de varias normas como nos lo muestra (Téllez, 2015). Para asegurar la integridad en el sistema de potencia global, es preciso establecer límites sobre los niveles de distorsión permisibles que apliquen tanto a los usuarios como a los suministradores de la energía. Resulta especialmente delicada la relación usuario / compañía suministradora, ya que esta última tiene derecho a pedir al usuario que limite la contaminación al sistema de transmisión y distribución y el usuario tiene el derecho a pedir el suministro de una energía con la menor contaminación posible.

Existen directrices para mantener niveles aceptables de distorsión armónica: distorsión armónica total (THD) y distorsión de la demanda total (TDD). Normas: IEC61000-4-7: guía general de instrumentación y mediciones de armónicos e Inter armónicos para sistemas de suministro de energía y equipos conectados a estos. IEC61000-4-15: Medidor de parpadeos: especificaciones funcionales y de diseño IEC61000-4-30: Métodos de medición de la calidad eléctrica. IEEE519: Prácticas y requisitos recomendados por el IEEE para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica (FLUKE, 2015).

En el Ecuador la norma vigente y aquella que está encargada de regular los diferentes rangos de distorsión armónica es la REGULACIÓN No. ARCERNNR 002/20 denominada "**Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica**" en la cual se muestra claramente como se deberá realizar las mediciones, cuáles serán sus restricciones y en caso de merecerlo cuáles serán las sanciones.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un problema presente en las redes eléctricas de distribución de energía es el aumento progresivo de cargas no lineales que ayudan a incrementar la inyección de corrientes y tensiones armónicas. La presencia de armónicos puede originar problemas como: calentamiento en transformadores, vibraciones en motores, bajo factor de potencia, disparos indeseados en equipos de protección, excesiva corriente por el conductor neutro, entre otros (Kanjiya et al., 2015)

En el Ecuador las empresas distribuidoras están sujetas a medir sus niveles de Distorsión Armónica Total de voltaje (THDv) y los niveles de Distorsión Armónica Individual de voltaje (IHDv) según lo especifica la REGULACIÓN No. ARCERNNR 002/20 en la cual los máximos límites son del 8% en bajo voltaje y del 5% en medio voltaje, cuando es mayor al 5% y 8% de los valores registrados, en el período de evaluación de al menos siete (7) días continuos, la distribuidora incumple con el límite máximo establecido en la regulación (ARCERNNR, 2020).

Según los informes de realizados por el área de Calidad de Energía de la Empresa Eléctrica Regional Norte EMELNORTE S.A. indican que los transformadores públicos de los circuitos X1 y X2 de la Subestación El Chota presentan un elevado nivel de Distorsión Armónica Total de Voltaje (THDv) superior al 8% permitido por la regulación vigente, dando como efecto negativo, sanciones a la Empresa, reducción de la vida útil en sus transformadores y teniendo pérdidas de energía activa.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL.

Elaborar una Propuesta de disminución, en la distorsión armónica total (THDv) de los circuitos conectados a los alimentadores primarios X1 y X2 en la Subestación El Chota, al fin de que el nivel de armónicos se encuentre dentro de los parámetros que establece la **REGULACIÓN No. ARCERNNR 002/20** denominada ***“Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica”***.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Analizar documentación técnica referente al tema de armónicos de voltaje, sus orígenes, efectos y soluciones.

- Determinar las condiciones actuales de operatividad de los circuitos primarios que brindan el servicio de energía eléctrica X1 y X2.
- Realizar la propuesta de disminución del THDv con los resultados obtenidos del estudio y posterior análisis.

JUSTIFICACIÓN.

La Subestación El Chota, ubicada en la provincia de Imbabura, cantón Ibarra, perteneciente a la EMPRESA ELÉCTRICA EMELNORTE S.A, conectada a un voltaje nominal de 69/13,8 kV y 4 alimentadores primarios X1, X2, X3 y X4. Es motivo de estudio en 2 de ellos X1 y X2 por la problemática de distorsión de armónicos totales de voltaje (THDv).

Actualmente la Subestación El Chota distribuye energía a distintos sectores de la provincia como lo son:

Circuito X1: San Vicente de Pusir, Antena Movistar, Tababuella, Pisquer, Huaquer, Piquer, Antenas de Andinatel, Juan Montalvo, Santiaguillo, Cabuyal, La Concepción (Tomado de Arc-GIS octubre 2019).

Circuito X2: Hosterías de la recta de Ambuqui, Ambuquí, Pusir, Carpuela, Tumbatú, El Tambo, El Lavadero, Peñaherrera, Juncal, Chalguayacu, Pimampiro, Paragachi, Colimbuero, Mariano Acosta, Chuga, Piquiucho, La Caldera, San Rafael, Monte Olivo, El Sigzal (Tomado de Arc-GIS octubre 2019).

Estos circuitos están incumpliendo en los rangos moderados de armónicos de voltaje, los cuales su principal efecto negativo es que los transformadores reducen su vida útil y se tiene una gran pérdida de energía activa, afectando directamente al factor costo-beneficio de la empresa distribuidora.

Se pretende realizar una propuesta de disminución del THDv en los circuitos primarios de los alimentadores X1 y X2 después de un análisis basado en datos recopilados de analizadores de red tomados en el lado secundario de los transformadores de mencionados circuitos.

Es así como la propuesta de disminución de armónicos de voltaje será de gran ayuda para que la empresa distribuidora no se vea afectada con la

reducción de vida útil en sus transformadores, pérdidas de energía activa y las multas regidas por su normativa.

ALCANCE.

Para el desarrollo de esta propuesta, se prevé realizar un estudio y análisis del THDv en los circuitos de los alimentadores primarios X1 y X2 de la subestación El Chota, mediante datos que serán obtenidos de los analizadores de red los cuales son propiedad de la Empresa Eléctrica Regional Norte EMELNORTE S.A.

Los Analizadores de Red y su respectivo software se utilizarán en la toma de datos y registro de lecturas, para la topología de la red se contará con el programa Arc-GIS de la misma empresa, que cuenta con licencias originales, también el programa CYME con el cual se podrá modelar la red.

Para esta propuesta se trabajará juntamente con la Empresa Eléctrica Regional Norte EMELNORTE S.A. y su personal técnico del área de Calidad de Energía los cuales serán parte fundamental en esta investigación.

VIABILIDAD

Mediante el convenio de cooperación interinstitucional entre la Universidad Técnica Del Norte y la Empresa Eléctrica Regional Norte EMELNORTE S.A. Se elaborará una propuesta para la Disminución del THDv que es de importancia para la empresa distribuidora.

El estudio contara con el respaldo de información del Departamento de la Calidad de Energía y Estudios Eléctricos, los cuales proporcionaran datos de los analizadores de red, información acerca de la topología de la red y de los alimentadores de la subestación El Chota.

Los softwares por utilizarse serán ArcGIS y CYME los cuales serán proporcionados por la propia empresa ya que cuentan con licencias originales vigentes dentro de la empresa, facilitando de esta manera el estudio y análisis.

Por otro lado, se cuenta con los recursos económicos para suplir con los gastos mínimos que presentaran, lo que permite el desarrollo y cumplimiento del cada uno de los objetivos además de que se cumple con el aspecto ético y legal.

CAPÍTULO 1

1. MARCO TEÓRICO.

El capítulo inicia con una descripción de la calidad de energía seguido por un concepto acerca de las perturbaciones existentes en la red eléctrica continuando con el tema de armónicos eléctricos, sus aspectos a considerar en la calidad de energía a la que afectan. Se presentan conceptos de las perturbaciones armónicas, teoría de armónicos, fuentes que los generan y efectos que producen en el sistema de distribución.

1.1 CALIDAD DE LA ENERGÍA.

El término “calidad de la energía” en los últimos años ha captado la atención de la ingeniería eléctrica, presentándose este fenómeno con mayor interés en los países con mayor potencial industrial y con economías en desarrollo, al tener una gran demanda en nuevas tecnologías y un incremento significativo de la población, lo que conlleva a tener más generación de energía eléctrica y una de las alternativas más empleadas es la energía limpia y renovable (Chugá Ortiz, 2015).

Al mencionar calidad de la energía se hace referencia a la pureza de la onda sinusoidal de las señales de voltaje y corriente entregadas por el sistema, es decir, se espera que la onda se mantenga lo más cercana posible a la onda sinusoidal pura. En lo que respecta a esto se ha podido crear varias normas elaboradas por organizaciones técnicas internacionales, las cuales se han dedicado al estudio de las perturbaciones en los sistemas eléctricos. Los aportes de estándares más utilizados son los dados por la IEEE, ANSI e IEC (Chugá Ortiz, 2015).

1.2 PERTURBACIONES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS:

En la actualidad, las normas internacionales referentes a la calidad de la energía eléctrica y la contaminación hacia la red eléctrica con corrientes armónicas han cobrado especial interés debido a las perturbaciones que presenta la onda de tensión que proporciona la red. Idealmente esta onda de tensión debe ser una senoide pura con una frecuencia fundamental; sin embargo, en la realidad esto no sucede, ya que la onda de tensión presenta

perturbaciones como: distorsión armónica y variaciones de frecuencia, impulsos eléctricos, ruidos en modo diferencial o común, variaciones rápidas o lentas de tensión, parpadeo (flicker) (Sánchez Huerta, 2016).

Las perturbaciones que provocan la disminución de la calidad de energía pueden encontrarse en la carga conectada al sistema, en los equipos y componentes de la generación, así como en los subsistemas de transmisión y distribución (Chugá Ortiz, 2015). A continuación, se detallan algunas de estas perturbaciones.

1.2.1 Desbalances de voltaje/corriente.

Es un fenómeno que surge en los sistemas trifásicos, este aparece cuando existen desviaciones en magnitud de voltaje o corriente (o los dos simultáneamente) en el sistema trifásico y la diferencia de fases no es exactamente 120° . Al existir un desequilibrio en el sistema se producen componentes de secuencia, estas componentes son las que se evalúan para determinar el desbalance del sistema. La Figura 1 muestra un desbalance trifásico de voltaje (Chugá Ortiz, 2015).

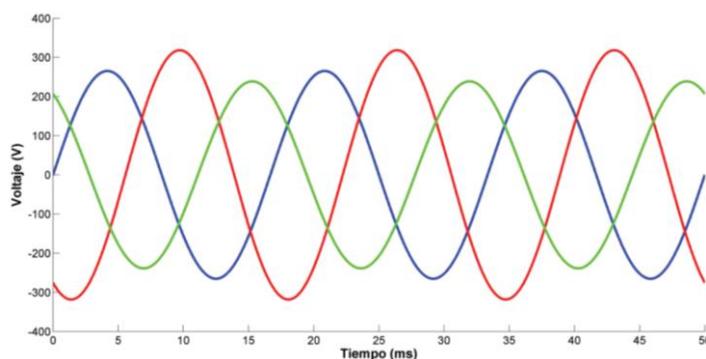


Figura 1. Desbalance trifásico.
Fuente: (Chugá Ortiz, 2015).

1.2.2 Armónicos.

Los armónicos son alteraciones en la forma de onda, cuyas componentes sinusoidales tienen frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia fundamental en las señales de corriente y voltaje (Chugá Ortiz, 2015).

1.2.3 Interrupciones, bajo voltaje y sobre voltaje.

En un sistema de potencia, las interrupciones son eventos que ocurren cuando el voltaje de alimentación o la corriente de carga es menor que 0,1 pu. Las interrupciones pueden ocurrir para un corto o mediano o largo período de

tiempo. Se puede tolerar hasta ciertos valores el bajo y sobre voltaje, pero si superan los límites pasan a ser perturbaciones. Se considera bajo voltaje si la reducción del voltaje rms está entre 0,8-0,9 pu por más de un minuto. Para el sobrevoltaje el incremento del voltaje rms debe estar entre 1,1-1,2 pu por más de un minuto (Chugá Ortiz, 2015).

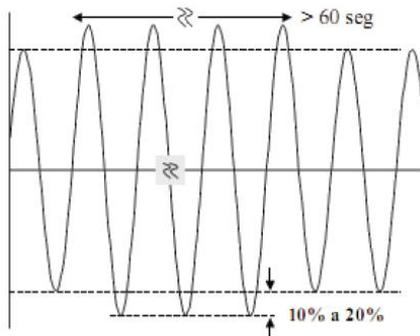


Figura 2 Sobrevoltaje
Fuente:(Chugá Ortiz, 2015)

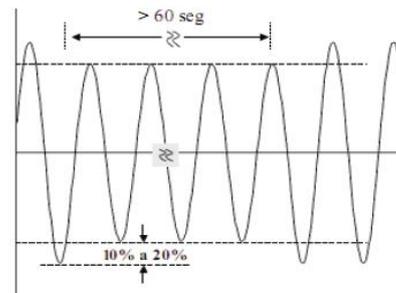


Figura 3 Bajo voltaje
Fuente:(Chugá Ortiz, 2015)

1.2.4 Transitorios.

Son cambios repentinos en las señales debido al alto aumento de voltaje y corriente en un corto período de tiempo. Pueden generarse dentro del sistema o haberse propagado de otros sistemas externos. Ocurren durante la transición de un sistema estable a otro sistema estable. Se los puede clasificar en dos grupos: transitorios impulsivos y transitorios oscilatorios como se muestra en la Figura 4 (Chugá Ortiz, 2015).

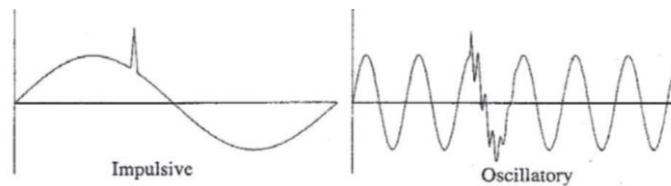


Figura 4 Transitorios impulsivos y oscilatorios.
Fuente: (Chugá Ortiz, 2015)

1.2.5 Disminuciones de voltaje Sag.

Cuando existe una caída del voltaje rms o depresión de este en corta duración se habla de Sag, también se le conoce como Dip (según IEC) o huecos. Esta depresión se encuentra entre 0,1 y 0,9 pu de la magnitud del voltaje. La duración de estas perturbaciones oscila en 0.5 ciclos y un minuto.

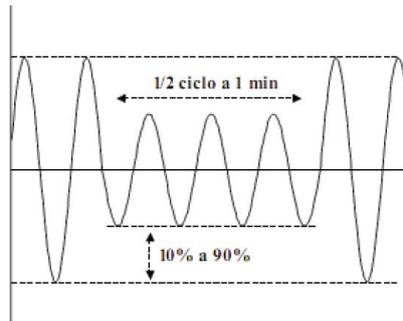


Figura 5 Voltaje Sag.
Fuente: (Chugá Ortiz, 2015)

1.2.6 Subidas de voltaje Swell.

Al igual que el voltaje sag, este tipo de perturbaciones es de corta duración (número de ciclos entre 0,5 a 1 minuto), pero la diferencia es que en lugar de darse una depresión del voltaje rms, se produce un incremento el cual se encuentra entre 1,1 y 1,8 pu la magnitud del voltaje, véase Figura 6.

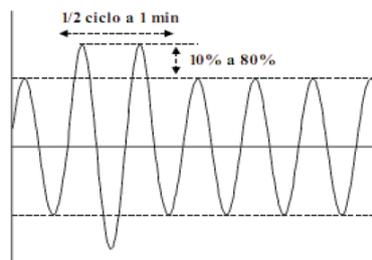


Figura 6 Voltaje Swell.
Fuente: (Chugá Ortiz, 2015)

1.2.7 Flicker.

Es un tipo de fluctuación de voltaje; visiblemente se lo aprecia como un titileo (en las lámparas, por lo que usualmente este término se asocia con tecnología de iluminación). Se puede referir a las “variaciones continuas y rápidas en la magnitud de la corriente de carga que provoca variaciones de voltaje”. Una de las mayores fuentes de generación de flickers son los hornos de arco (Chugá Ortiz, 2015).

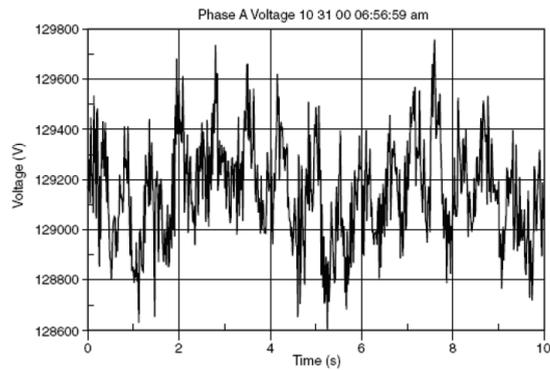


Figura 7 Flicker ocasionado por operación de horno de arco.

Fuente: (Chugá Ortiz, 2015)

1.3 ARMÓNICOS EN EL SEP

Cuando se hace referencia a desviaciones en las ondas sinusoidales puras de corriente y voltaje, se asocia automáticamente a los armónicos y estos a su vez a las series de Fourier. Un armónico constituye “una componente sinusoidal de una onda periódica o cantidad que posee una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental”. El matemático y físico francés Jean-Baptiste Joseph Fourier define una de las técnicas para explicar el análisis de las señales sinusoidales, afirmando que “cualquier señal periódica, por compleja que sea, se puede descomponer en una suma de señales senoidales cuya frecuencia es múltiplo de la frecuencia fundamental o de referencia” (Chugá Ortiz, 2015).

A manera ilustrativa, en la Figura 8 se muestra la onda sinusoidal pura, el armónico cinco (frecuencia quíntuple de la frecuencia fundamental) y la onda distorsionada resultante.

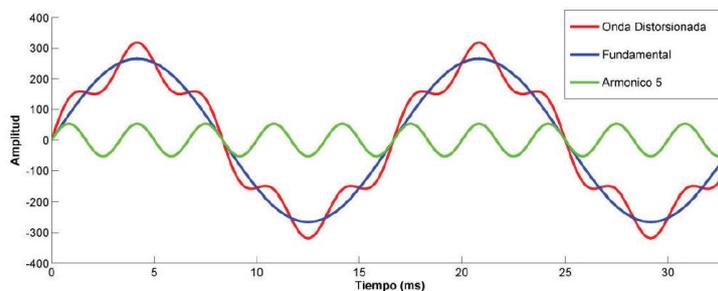


Figura 8 Descomposición Armónica.

Fuente: (Chugá Ortiz, 2015)

1.3.1 Análisis de Fourier.

El teorema de Fourier dice que toda onda periódica no sinusoidal puede ser descompuesta como la suma de ondas sinusoidales, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Que la integral a lo largo de un periodo de la función sea un valor finito.
- Que la función posea un número finito de discontinuidades en un periodo.
- Que la función posea un número finito de máximos y mínimos en un periodo.

En términos prácticos, aplicando el concepto a señales de Corriente Alterna (CA) distorsionadas, la simetría de media onda implica una señal cuya distorsión tiene la misma forma tanto en el semiciclo positivo como en el semiciclo negativo, lo que quiere decir que este tipo de distorsión es la que más frecuente que se encontrara en los Sistemas de Potencia Eléctrica (SEP), esta sería la razón por la cual se plantea que en estos sistemas encontramos típicamente sólo armónicas impares (Paredes de Vásquez, 2009).

1.3.2 Cargas lineales y no lineales.

Cuando se aplica un voltaje senoidal directamente a cargas compuestas por resistencias, inductancias, capacitores o una combinación de ellos, se produce una corriente proporcional que también es senoidal, por lo que se les denomina cargas lineales (Mora Sanchez & Cevallos Chavez, 2014).

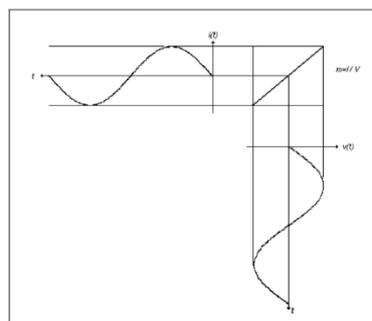


Figura 9 Carga lineal: La corriente y el voltaje siempre son proporcionales a lo largo de la línea de su impedancia.

Fuente: Libro Distorsión Armónica por Eugenio Téllez.

En los circuitos en los que su curva Voltaje – Corriente no es lineal, el voltaje aplicado no es proporcional a la corriente, resultando una señal distorsionada con respecto a la senoidal (Mora Sanchez & Cevallos Chavez, 2014).

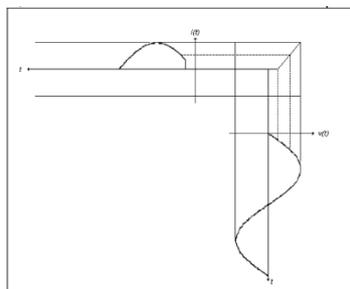


Figura 10 Carga no lineal de una resistencia controlada por SCR en la que la corriente y el voltaje no son proporcionales.

Fuente: Libro Distorsión Armónica por Eugenio Téllez.

La curva característica Voltaje – Corriente de la carga define si es o no lineal su comportamiento y no se debe pensar que todos los equipos que tienen semiconductores por definición son no lineales. Existen aplicaciones donde se emplean SCR's conectados en antiparalelo con control de cruce por cero en los que prácticamente no existe distorsión, considerándose lineales y por otro lado una resistencia con control de fase es una carga no lineal (Mora Sanchez & Cevallos Chavez, 2014).

La distorsión armónica en los sistemas eléctricos es causada por aquellas cargas no lineales, contaminando la red afectando incluso a diversos usuarios entre ellos también usuarios que únicamente posean cargas lineales (Téllez, 2015).

1.4 MEDIDAS DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EN VOLTAJE.

Para llegar a tener un valor exacto de la distorsión existente en una señal, es preciso definir parámetros que determinen su magnitud y contar con equipos de medición adecuados. Aquí tenemos algunas expresiones necesarias para efectuar los cálculos relacionados con la distorsión armónica.

1.4.1 Distorsión armónica.

Cuando el voltaje de un sistema eléctrico tiene deformaciones con respecto a la forma de onda senoidal, se dice que la señal está distorsionada, esta distorsión o deformación se puede deber a:

- Fenómenos transitorios tales como efectos de tormentas o fallas por cortocircuito, arranque de motores, conmutación de capacitores, entre otras.
- Condiciones permanentes que están relacionadas con armónicas de estado estable. En los sistemas eléctricos es común encontrar que las señales tendrán una cierta distorsión que al ser baja, no ocasionarán problemas en la operación de equipos y dispositivos (Téllez, 2015).

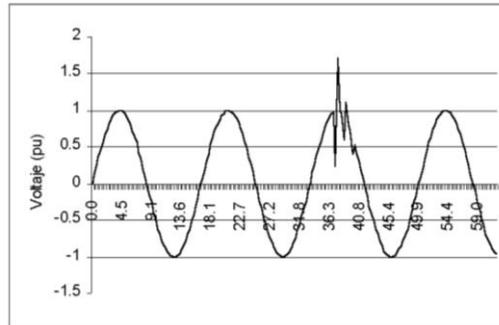


Figura 11 Efecto en el voltaje por la conmutación de capacitores.
Fuente: Libro Distorsión Armónica por Eugenio Téllez.

1.4.2 Características de la distorsión armónica.

Cuando la onda de voltaje medida en cualquier punto de un sistema eléctrico se encuentra distorsionada, con relación a la onda sinusoidal que idealmente deberíamos encontrar, podemos decir que tenemos o que se tratase de una onda contaminada con componentes armónicos (Téllez, 2015).

Para considerar una distorsión armónica, deben cumplirse ciertas condiciones:

- a) Que la señal tenga valores definidos dentro del intervalo, lo que implica que la energía contenida es finita
- b) Que la señal sea periódica, teniendo la misma forma de onda en cada ciclo de la señal de corriente o voltaje.
- c) Permanente. - Cuando la distorsión armónica se presenta en cualquier instante de tiempo, es decir, que no es pasajera.

1.4.3 Distorsión armónica de voltaje.

Es la relación entre el contenido armónico de la señal y la primera armónica o fundamental. Su valor se ubica entre 0% e infinito.

Es el parámetro de medición de distorsión más conocido, así que es recomendable para medir la distorsión en parámetros individuales y totales de voltaje de acuerdo con las siguientes expresiones.

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

$$DV_{h,k} = \frac{V_{h,k}}{V_{h,1}} \times 100\%$$

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

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, ...,50), medido cada 3 segundos (i=1, 2, ...,200).

$DV_{h,k}$ = Factor de distorsión individual de voltaje de la armónica h (para h=2,3, ...,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.

1.5 NIVELES DE TOLERANCIA DE ARMÓNICOS.

Según la norma ecuatoriana vigente, Norma técnica de la calidad de los servicios eléctricos, los valores eficaces (RMS) de los Voltajes Armónicos Individuales (V_i) y los THD, expresado como porcentaje de la tensión nominal del punto de medición respectivo, no deben superar los valores límite (V_i' y THD') indicados en la Tabla 1.1 (ARCERNNR, 2020).

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

Tabla 1.1 Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal)
Fuente: (ARCERNR, 2020)

Para limitar y regular los niveles de distorsión de voltaje en los puntos de unión de los abonados a la red pública, existen una serie de normas internacionales que establecen límites de emisión de armónicos para los equipos y sistemas que deban conectarse a la red. Como se detalla en la Tabla 1.4 con las normativas más importantes (FLUKE, 2015).

NORMAS.	
IEC61000-4-7	Guía general de instrumentación y mediciones de armónicos e interarmónicos para sistemas de suministro de energía y equipos conectados a estos.
IEC61000-4-15	Medidor de parpadeos: especificaciones funcionales y de diseño.
IEC61000-4-30	Métodos de medición de la calidad eléctrica.
IEEE519	Prácticas y requisitos recomendados por el IEEE para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica.

Tabla 1.2 Normas para medición, instrumentación, prácticas y requisitos sobre armónicos.
Fuente: (FLUKE, 2015)

1.6 MEDICIÓN DE ARMÓNICOS.

A fin de predecir problemas de armónicos, es necesario realizar mediciones dado que el flujo y las respuestas del sistema pueden variar sustancialmente de un sistema a otro con pequeñas desviaciones tales como tolerancias de los equipos, desbalances, etc. Muchos problemas de armónicos pueden ser fácilmente resueltos reubicando equipos, instalando filtros, o limitando algunos pasos de la compensación del factor de potencia. Sin

embargo, antes de llegar a una solución viable se deben identificar plenamente las distorsiones armónicas y sus fuentes, lo cual puede hacerse con base en modelos de flujo de armónicos o midiendo directamente en la instalación (Condori & Ramos, 2016).

Un tema importante que tomar en consideración es la selección del equipo a utilizar, para ello, se tiene las siguientes opciones:

- Osciloscopios
- Analizadores de espectro
- Registradores: pueden reunir en algunos casos las características de osciloscopios y analizadores de espectro, además, tienen la capacidad de almacenar los datos tomados.

Actualmente se dispone de analizadores de armónicos muy sofisticados equipados con software y hardware que permiten una fácil adquisición de datos y un confiable análisis matemático de la información.

Característica	Osciloscopio	Analizador de Espectro	Analizador de Redes
Canales	dos	generalmente 1	4 corriente y 3 tensión
Frecuencia de muestreo	> 10 Mhz	128, 256, 512 muestras por ciclo	
Memoria	Algunas formas de onda	generalmente no	Almacenamiento de múltiples variables durante varios días
Tipo de medición	Puntual	Puntual	Puntual, periódica o por evento
Captura formas de onda	Sí	No	Opcional
Captura otros eventos de calidad de energía	Picos de tensión	No	

Figura 12 Características de los equipos para medición de equipos.
Fuente:(Condori & Ramos, 2016)

Una pregunta común es donde instalar estos equipos, por ello, se sugiere escoger los sitios donde se encuentren cargas generadoras de armónicos o se tengan instalados elementos pasivos tales como condensadores que puedan convertirse en sumideros para los armónicos generados en otros sitios (Condori & Ramos, 2016).

1.7 EFECTO DE LOS ARMÓNICOS.

Los armónicos han producido varios efectos en los componentes de los sistemas eléctricos y estos han sido analizados tanto para circuitos particulares como para toda una red interconectada, no obstante, en algunos casos es muy

difícil calcular que tanto dañan la red eléctrica de forma específica puesto que dependen de muchos factores; a continuación, se presenta un resumen de estos efectos.

1.7.1 Efecto en cables y conductores.

Cuando la corriente circular a través de un conductor este produce calentamiento como resultado de las pérdidas por el efecto Joule, (I^2R), donde R es la oposición al paso de la corriente directa del cable y la corriente está dada por el producto de la densidad de corriente por el área transversal del conductor. A medida que aumenta la corriente que se transporta por cable (manteniendo su valor rms igual al valor de corriente directa) disminuye el área efectiva por donde ésta circula puesto que la densidad de corriente crece en la periferia exterior (Figura 13), lo cual se refleja como un aumento en la resistencia efectiva del conductor (Condori & Ramos, 2016).



Figura 13 Densidades de corriente en un mismo conductor, (a) corriente directa (b) corriente continua

Fuente: (Condori & Ramos, 2016)

Por lo tanto, la resistencia a la corriente alterna de un conductor es mayor que su valor a la corriente directa y va en aumento con la frecuencia, por esto, también aumentarían las pérdidas por calentamiento. Con una frecuencia de 60 Hz, este efecto se puede despreciar, no porque no exista, sino porque este factor se considera en la elaboración de los conductores. A pesar de esto, con corrientes distorsionadas, las pérdidas por efecto Joule son mayores por la frecuencia de las componentes armónicas de la corriente (Condori & Ramos, 2016).

1.7.2 Efecto en transformadores.

La mayoría de los transformadores están diseñados para operar con corriente alterna a una frecuencia fundamental (50 o 60 Hz), lo que implica que operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador debe ser capaz de disipar

el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil (Condori & Ramos, 2016).

Las pérdidas en los transformadores consisten en pérdidas sin carga o de núcleo y pérdidas con carga, que incluyen las pérdidas I^2R , pérdidas por corrientes de Eddy y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores, u otras partes de hierro (Condori & Ramos, 2016). De tal manera el efecto de las armónicas en dichas pérdidas está explicadas a continuación:

- **Pérdidas sin carga o de núcleo:** Producidas por el voltaje de excitación en el núcleo. La forma de onda de voltaje en el primario es considerada senoidal independientemente de la corriente de carga, por lo que no se considera que aumentan para corrientes de carga no senoidales (Condori & Ramos, 2016).
- **Pérdidas I^2R :** Si el valor rms de la corriente de carga aumenta debido a componentes armónicos, entonces las pérdidas deberían incrementarse (Carrión, 2019).
- **Pérdidas por corrientes de Eddy:** Dichas pérdidas a frecuencia fundamental son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, razón por la cual se puede tener un aumento excesivo de éstas en los devanados que conducen corrientes de carga no senoidal (y por lo tanto en también en su temperatura). Las pérdidas por corrientes de Eddy son proporcionales al cuadrado de la corriente y la frecuencia armónica considerada (Carrión, 2019).
- **Pérdidas adicionales:** estas pérdidas aumentan la temperatura en las partes estructurales del transformador y dependiendo del tipo de transformador contribuirán o no en la temperatura más caliente del devanado. Se considera que varían con el cuadrado de la corriente y la frecuencia (Condori & Ramos, 2016).

Un aspecto por considerar es que las terceras armónicas crean pérdidas en el hierro del núcleo, debido a las corrientes parásitas y causan saturación del núcleo, ello conlleva a temperaturas altas, degradación del aislamiento y disminución de la vida útil. En conexiones delta – estrella como se observa en la

Figura 14, que alimentan cargas no lineales, se refleja las corrientes armónicas “triplen” (múltiplos de 3) produciendo:

- Sobrecalentamiento del neutro por la circulación de armónicas triplen (múltiplos de 3) en el lado de la estrella.
- En el delta del transformador las armónicas triplen se quedan atrapados en está y origina calentamiento en el núcleo y los devanados.

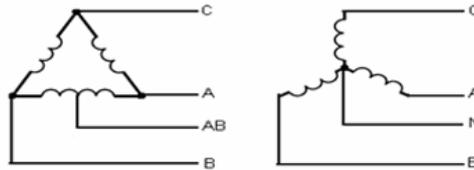


Figura 14 Conexión estrella-triángulo de un transformador.
Fuente:(Condori & Ramos, 2016)

Para transformadores que operan bajo condiciones de carga no lineal es conveniente en lugar de sobredimensionar el transformador estándar, utilizar un transformador con factor k mayor a 1, este tipo de transformador está diseñado para soportar una carga adicional causada por los altos niveles de distorsión armónica existentes en la instalación, posee aislamiento galvánico entre primario y secundario, con blindaje electrostático, posee también características constructivas especiales que protegen el transformador de los armónicos de corriente que provocan pérdidas y sobrecalentamiento en los bobinados de los transformadores. El factor "K" es una constante que indica la capacidad del transformador para alimentar cargas no lineales (por ejemplo: hornos de inducción, variadores de velocidad de motores, rectificadores, inversores, Sistemas de Alimentación Ininterrumpida –SAI, etc.) y soportar las corrientes de armónicos sin exceder su temperatura de funcionamiento, la diferencia entre transformadores estándar y transformadores con factor K son:

- a) El tamaño del conductor primario se incrementa para soportar las corrientes armónicas “triplen” circulantes. Por la misma razón se dobla el conductor neutro.
- b) Se diseña el núcleo magnético con una menor densidad de flujo normal, utilizando acero de mayor grado.
- c) Utilizando conductores secundarios aislados de menor calibre, devanados en paralelo y transpuestos para reducir el calentamiento por el efecto piel.

El factor K se puede encontrar mediante un análisis armónico de la corriente de la carga o del contenido armónico estimado de la misma (Condori & Ramos, 2016).

El factor K es un indicador que permite estimar la capacidad que tiene un transformador de soportar los efectos térmicos producidos por las corrientes armónicas.

FACTOR-K TRANSFORMADORES
K-4
K-9
K13
K-20
K-30
K-40

Tabla 1.3 Numeración de factor K en transformadores comerciales.
FUENTE: (Condori & Ramos, 2016)

1.7.3 Efecto en Motores.

Los principales efectos en los motores son:

- Funcionamiento irregular en Máquinas Eléctricas incrementándose las pérdidas por calentamiento en el núcleo (histéresis y corrientes parásitas).
- Dependiendo del voltaje aplicado puede haber una reducción en el par promedio de la máquina.
- Bajo torque de partida, en Motores de gran potencia.
- El flujo de las corrientes armónicas de secuencia negativa: 5th,11th etc, producen frenado en los motores AC creando vibración e inestabilidad mecánica.
- Debido a que las corrientes armónicas se combinan y afectan el flujo giratorio de la máquina es necesaria más corriente para producir el mismo trabajo, por lo tanto, la eficiencia disminuye.

1.7.4 Efecto sobre los capacitores.

Los condensadores reducen su impedancia con la frecuencia $X_c = 1/(2\pi * f * C)$, lo cual genera una sobrecarga que puede llegar a quemarlos, en

tanto las inductancias incrementan su impedancia $X_L = 2\pi * f * L$. Tal como se muestra en las Figuras 15, 16.

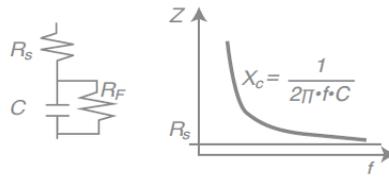


Figura 15 Impedancia de un condensador no ideal.

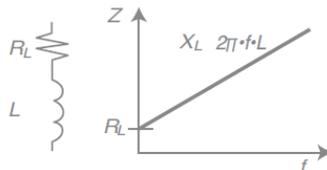


Figura 16 Impedancia de una Bobina no ideal.

Por lo general en las instalaciones industriales los condensadores están situados en paralelo, como puede observarse en la Figura 17 del circuito equivalente.

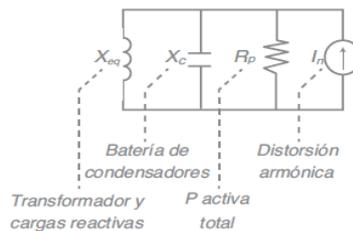


Figura 17 Conexión en paralelo de condensadores.

Al operar el sistema en esta configuración se genera un divisor de corriente y al ser X_C el valor más pequeño, la intensidad pasa principalmente por los condensadores, siendo esta la razón por la que fallan los condensadores (Condori & Ramos, 2016).

1.7.5 Efecto sobre otros equipos.

Podemos mencionar los siguientes:

- **Barras de neutros:** Calentamiento por la circulación de corrientes de secuencia cero por armónicas triples.
- **Disparo intempestivo de las protecciones:** La impedancia de los condensadores disminuye a medida que aumenta la frecuencia. De esta manera, los armónicos de alta frecuencia dan lugar a corrientes a tierra a

través de los condensadores, los cuales pueden dar lugar al disparo de las protecciones diferenciales (Condori & Ramos, 2016).

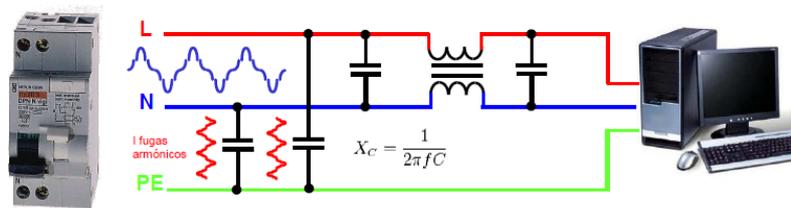


Figura 18 Filtro de entrada de alimentación de equipos informáticos.
Fuente: (Condori & Ramos, 2016)

- **Equipos electrónicos sensitivos:** Su operación podría ser incorrecta a causa de las armónicas, debido a que estos equipos dependen de la determinación precisa del cruce por cero del voltaje u otros aspectos de la forma de onda, por lo que condiciones de distorsión pueden afectar su operación adecuada (Condori & Ramos, 2016).
- **Equipo de medición e instrumentación:** éstos son afectados por las componentes armónicas, principalmente si se tienen condiciones de resonancia que causen altos voltajes armónicos en los circuitos. Para el caso de medidores se pueden tener errores positivos o negativos, dependiendo del tipo de medidor y de las armónicas involucradas (Condori & Ramos, 2016).

1.8 SOLUCIÓN A PROBLEMAS DE ARMÓNICOS.

- Sobredimensionamiento de conductores y pletinas.
- Utilización de un neutro para cada fase.
- Utilización de transformadores de aislamiento: este método consiste en utilizar transformadores de aislamiento, los cuales están diseñados “a la medida” de la aplicación como:
 - Tamaño de la carga.
 - Espectro emitido por la misma.
 - Impedancia de la fuente, etc.

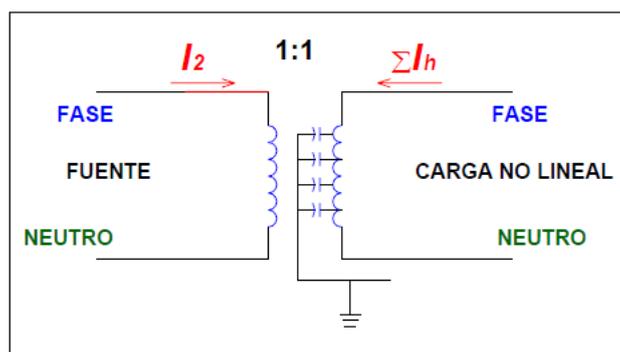


Figura 19 Representación de un transformador de aislamiento.
Fuente:(Condori & Ramos, 2016)

- Utilización de diferenciales “superinmunizados” calibrados para soportar altas tasas de THD.
- Separación de los elementos no lineales de las “cargas limpias” en una instalación eléctrica.

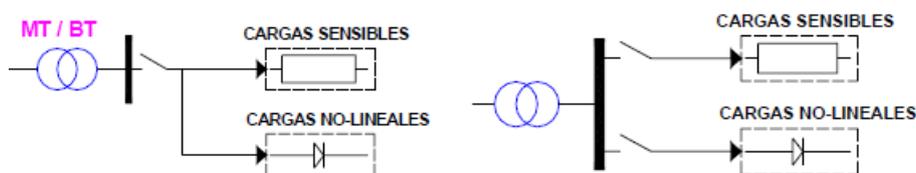


Figura 20 A) Solución a corregir B) Solución preferible
Fuente:(Condori & Ramos, 2016)

- Impedancias de alisado, conectadas a las cargas no lineales. Filtros en cargadores y alimentadores.
- Utilización de filtros: Es un dispositivo que proporciona una trayectoria de baja impedancia para las corrientes armónicas que emiten las cargas no lineales, con el objetivo de que éstas no circulen por el sistema de distribución y no distorsionen la forma de onda de voltaje a través de caídas de armónicas de voltaje en las impedancias del sistema eléctrico (Condori & Ramos, 2016).
 - **Filtros pasivos:** Estos filtros presentan una baja impedancia de una determinada frecuencia, formados por elementos pasivos como inductancias y condensadores. Los filtros pasivos tienen componentes con elementos reactivos (bobinas y condensadores) que se conectan en paralelo con la carga. El objetivo es que los

elementos instalados entren en resonancia a la frecuencia del armónico que se quiere eliminar (previamente se tiene la orden del armónico a eliminar), así la componente no deseada encontrará una ruta de una impedancia muy baja y se irá a tierra. En tanto, para la frecuencia fundamental (60 Hz) el filtro debe tener una impedancia de un valor alto, con el objetivo de no incrementar demasiado la corriente adicional provocada por este nuevo elemento. Este tipo de filtro tiene cualidades como son: simplicidad, fiabilidad y robustez, además es posible sintonizar el filtro para la eliminación de un sólo armónico (Lastre et al., 2017).

- **Filtros Activos:** Está formado por fuentes de corriente, las cuales genera una corriente distorsionada que sumada a la que absorbe la carga hace que se registre un consumo de forma sinusoidal, reemplazando la porción de onda seno que está faltando debido a la corriente no lineal de la carga. Sus ventajas son (Lastre et al., 2017):
 - Compensan las corrientes armónicas y el factor de potencia de la carga
 - No produce resonancia en el sistema
 - Tienen capacidad de eliminar interarmónicos y armónicas no convencionales como 2^a, 4^a, 6^a, etc.
 - No se sobrecargan.

Estos filtros son capaces de eliminar prácticamente todos los armónicos de baja frecuencia y no tienen los inconvenientes de los filtros pasivos.

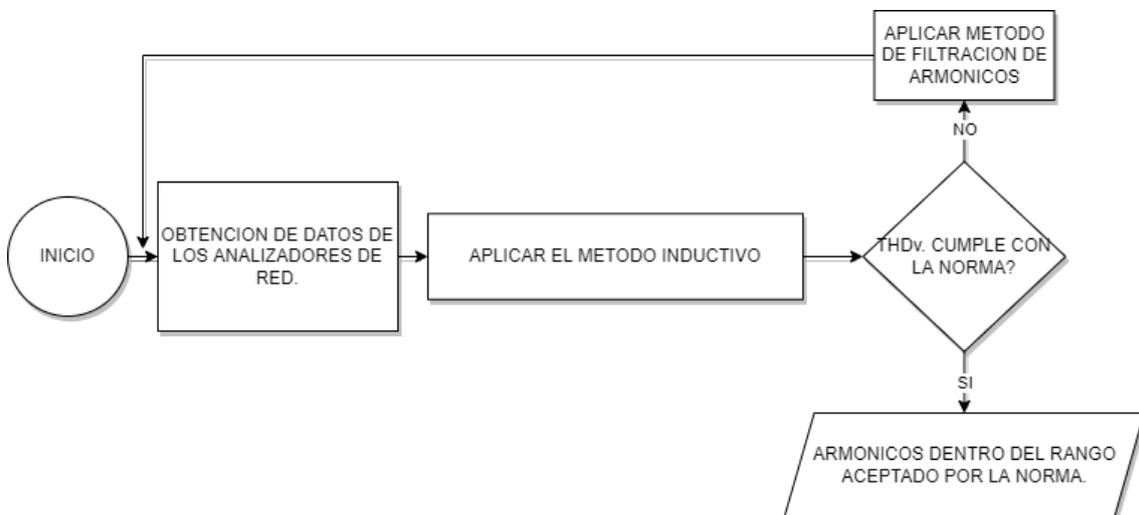
Los filtros activos pueden ser conectados en serie o en paralelo. Los filtros conectados en serie actúan como fuente de voltaje, proporcionando una alta impedancia para los armónicos e impedancia reducida para la frecuencia de la red. Los filtros activos en paralelo actúan como fuente de corriente en paralelo con la carga, inyectando o absorbiendo corriente según sea necesario (Lastre et al., 2017).

CAPITULO 2

Desarrollo

El presente trabajo de grado está enfocado a la investigación y aplicación de métodos que se podrían implementar para la atenuación de armónicos, adecuándolos a las necesidades de la Subestación El Chota y que serán plasmados y documentados en la propuesta. Toda la investigación será sustentada y descrita en los siguientes puntos del desarrollo que se muestran a continuación.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.



2.1.1 Método Inductivo.

El desarrollo de la investigación hace inclusión al método inductivo, ya que, de preposiciones particulares como la distorsión armónica, permitió definir aspectos generales tales como el análisis del caso de estudio presentado para la validación de la propuesta de mitigación, con la finalidad de iniciar el proceso de toma de decisiones en la distribución de energía eléctrica para la mejora y la conservación de la calidad de energía bajo los rangos e índices estipulados en la REGULACIÓN No. ARCERNNR 002/20 denominada “**Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica**”.

Las diferentes etapas desarrolladas de este método fueron:

- **OBSERVACION:** Con la finalidad de comprender la problemática vigente, se aplicó la etapa mencionada, la cual destaca la necesidad de

obtener un método de corrección para la distorsión armónica en los alimentadores de la Subestación El Chota.

- **REGISTRO:** Se registro las premisas particulares por medio de las mediciones obtenidas por la empresa de distribución EMELNORTE S.A.
- **ANALISIS:** Se evidencia el registro de las señales eléctricas detectando componentes armónicas y parámetros que afectan la calidad del producto que es parte de la calidad de energía.
- **CONCLUSIÓN:** A partir de los pasos antes mencionados y analizados se destaca la problemática vigente de armónicos eléctricos en redes de energía eléctrica y la necesidad de desarrollar una medida mitigante, que para esta investigación será una propuesta de disminución de armónicos.

2.1.2 Softwares de simulación e interpretación.

- **Software de simulación CYME-DIST.**

En el presente estudio se utiliza el software de simulación CYME-DIST. "El software CYME es una herramienta enfocada y poderosa que se utiliza para modelar todo el sistema de distribución y abordar las necesidades de la simulación en cuanto a los análisis de capacidad, contingencia, calidad de energía y optimización"(Soluciones, 2018).

- **Software ArcGIS.**

ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG), ArcGIS es utilizada por Emelnorte para llevar el inventario de sus redes eléctricas y como base de información migrada al software CYME-DIST para la modelación de las redes en medio voltaje. ArcGIS permite publicar la información geográfica para que esté accesible para cualquier usuario. El sistema está disponible en cualquier lugar a través de navegadores Web, dispositivos móviles como smartphones y equipos de escritorio (esri, 2017).

- **Software Power BI.**

Para una mejor representación e interpretación de los datos se tiene el software Power BI que facilita la Universidad Técnica del Norte. Power BI es una

colección de servicios de software, aplicaciones y conectores que funcionan conjuntamente para convertir orígenes de datos sin relación entre sí en información coherente, interactiva y atractiva visualmente. Sus datos pueden ser una hoja de cálculo de Excel o una colección de almacenes de datos híbridos locales y basados en la nube. Power BI permite conectarse con facilidad a los orígenes de datos, visualizar y descubrir qué es importante y compartirlo con cualquiera o con todos los usuarios que desee (Microsoft, 2021).

2.1.3 Muestra.

La muestra seleccionada fue en función de los datos recogidos por el departamento de Calidad de Energía, según el cronograma que se tiene previsto con el ente regulador ARCERNNR, mediante los analizadores de red instalados en el lado secundario de los transformadores en los circuitos de los alimentadores X1 y X2 por un periodo de 7 días con intervalos de medición de 10 minutos, las selecciones de los puntos de medición fueron ubicados como dicta la regulación de manera aleatoria en diferentes zonas del área de concesión de la empresa, se realizó el análisis de aquellas que presentaron niveles de armónicos que sobrepasan los valores límites que se establecen en la Regulación.

2.1.4 Cálculo del tamaño de la muestra.

De la población total del circuito X1, existen 364 transformadores registrados, divididos en 341 transformadores monofásicos y 23 transformadores trifásicos, todos ellos con sus respectivas redes de distribución.

La fórmula aplicada para la muestra es la siguiente:

$$n = \frac{N * Z^2 * \sigma^2}{e^2(N - 1) + Z^2 * \sigma^2}$$

Donde:

n: Tamaño de la muestra poblacional a obtener.

N: Tamaño de la población total.

σ : Desviación estándar de la población.

Z: Grado de confianza que se desee.

e: Representa el límite aceptable de error muestral.

$$n = \frac{341 * 0.5^2 * 0.5^2}{0.073^2 * (341 - 1) + 0.5^2 * 0.5^2} = 11 \text{ monofásicos}$$

De la población total del circuito X2, existe 771 transformadores registrados, divididos en 734 transformadores monofásicos y 37 transformadores trifásicos, todos ellos con sus respectivas redes de distribución.

$$n = \frac{734 * 0.55^2 * 0.5^2}{0.073^2 * (734 - 1) + 0.55^2 * 0.5^2} = 14 \text{ monofásicos}$$

De acuerdo con los resultados de la muestra se tiene 118 mediciones en transformadores monofásicos para el circuito X1 y 144 mediciones para el circuito X2 los dos cálculos con un porcentaje de confianza del 95% y un porcentaje de error del 7%, para los transformadores trifásicos no se obtuvo una muestra ya que al ser una cantidad menor se opta por analizar las mediciones a la totalidad de transformadores que presentan problemas de armónicos.

2.2 MODELADO DE LAS REDES.

En el desarrollo de la metodología, el objetivo principal es determinar las causas de la generación de armónicos, para ello es necesario el levantamiento de información que debe incluir las características de la red y las características de la carga, de manera que se disponga de los datos necesarios para ejecutar los cálculos.

2.2.1 Datos de los analizadores de red

El equipo usado para las mediciones es el Fluke modelo 1744 Power Quality Logger del cual se obtiene:

- Distorsión armónica total voltaje (THDv).
- Distorsión armónica individual de voltaje (IHDv).
- Distorsión armónica total corriente (THDi).

- Desequilibrio de voltaje (Flicker).
- Potencia Activa, Reactiva y Aparente.
- Factor de Potencia.
- Voltajes de las líneas.

2.2.2 Localización de la red en el sistema eléctrico

La ubicación de los alimentadores y transformadores se encuentra registrada en el programa ArcGIS y de acuerdo con cada código se puede localizar el alimentador que corresponde.

2.2.3 Diagrama unifilar de la red

Para la obtención de la disposición de cada una de las redes con sus diferentes características se utiliza el software ArcGIS el cual, cuenta con la base de datos de la empresa eléctrica EMELNORTE S.A. datos que están detallados y georreferenciados para que el usuario tenga una mayor información acerca de la red.

La figura 21 muestra cómo se observa una parte de lo que sería el diagrama unifilar de la Subestación El Chota con todos sus alimentadores primarios como son el X1, X2, en el software ArcGIS.

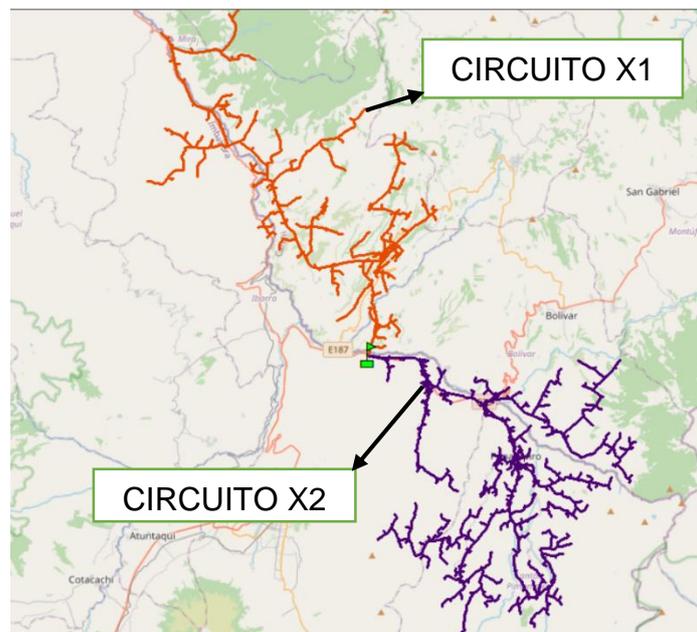


Figura 21 Alimentadores primarios Subestación El Chota en ArcGIS.

Fuente: ArcGIS.

2.2.4 Datos del producto.

Los datos son exportados y almacenados en una hoja de Excel de los cuales se observa los parámetros eléctricos.

10	Fecha	Hora	V medio L1	V medio L2	I medio L1	I medio L2	I medio N	THD V me	THD V me	L2	THD I medio	THD I medio L2	THD I medio	Flicker Pst L1	Flicker Pst L2	
11			V	V	A	A	A	%	%		%	%	%	Pst	Pst	
12	15/04/2020	13:10:00	117,54	117,52	1,11	1,95	1,42	6,3	6,3		15,4	10,8		17,9	0,268	0,267
13	15/04/2020	13:20:00	119,14	119,2	1,86	0	1,75	6,21	6,18		19,7	0		18,5	0,217	0,216
14	15/04/2020	13:30:00	118,92	118,92	0,72	0,98	1,17	6,09	6,09		14,8	11,8		15,7	0,191	0,214
15	15/04/2020	13:40:00	119,16	119,2	1,1	0,48	1,06	6,13	6,13		14,8	7,99		14,5	0,221	0,239
16	15/04/2020	13:50:00	119,02	119,06	1,1	0,87	1,11	6,21	6,2		14,8	10,8		15,8	0,154	0,154
17	15/04/2020	14:00:00	118,43	118,46	1,1	0,96	1,16	6,18	6,19		14,7	12,9		15,9	0,164	0,203
18	15/04/2020	14:10:00	119,22	119,27	1,1	0	1,02	6	5,99		14,7	0		12,2	0,155	0,155
19	15/04/2020	14:20:00	118,64	118,67	1,1	0,98	1,17	5,95	5,96		14,7	11,7		15,6	0,327	0,333
20	15/04/2020	14:30:00	119,14	119,18	1,11	0,96	1,17	6,17	6,13		15,3	12,9		15,8	0,181	0,205
21	15/04/2020	14:40:00	119,27	119,27	0,55	0	0,51	6,37	6,37		14,7	0		12,7	0,15	0,15
22	15/04/2020	14:50:00	119,14	119,11	0	0,97	0,95	6,45	6,44		0	11,7		16,6	0,158	0,202
23	15/04/2020	15:00:00	119,01	118,99	0	0,97	0,94	6,33	6,33		0	11,6		16,6	0,16	0,206
24	15/04/2020	15:10:00	119,14	119,13	0	0	0	6,12	6,12		0	0		0	0,192	0,191
25	15/04/2020	15:20:00	119,26	119,23	0	0,97	1,01	6,02	6,02		0	11,7		12,2	0,167	0,203

Figura 22 Datos de mediciones exportados a Excel.
Fuente: EMELNORTE S.A.

2.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS.

Con el análisis de todos los datos obtenidos del analizador de red se puede determinar la calidad del servicio eléctrico en lo referente a calidad del producto.

2.3.1 Selección de los parámetros eléctricos.

Con los datos del analizador, se diagnostica si existe o no incumplimiento alguno, en los diferentes parámetros de la calidad del producto. ver la figura 23

10	Fecha	Hora	V medio L1	V medio L2	I m	THD V medio L1		
11			V	V	A	%		
12	12/03/2020	15:50:00	115,18	115,22	1,02	0	1,18	6,4
13	12/03/2020	16:00:00	114,94	115	1,14	0	12,22	6,27
14	12/03/2020	16:10:00				0	2,4	6,2
15	12/03/2020	16:20:00				0	1,52	6,24
16	12/03/2020	16:30:00				0	1,6	6,29
17	12/03/2020	16:40:00				0	2,01	6,34
18	12/03/2020	16:50:00				0	1,47	6,4
19	12/03/2020	17:00:00				0	12,53	6,48
20	12/03/2020	17:10:00	114,68	114,76	1,06	0	2,44	6,54
21	12/03/2020	17:20:00	114,38	114,42	1,04	0	2,34	6,69
22	12/03/2020	17:30:00	113,51	113,56	1,02	0	1,99	6,94
23	12/03/2020	17:40:00	113,41	113,45	1,02	0	1,69	7,02
24	12/03/2020	17:50:00	114,37	114,41	1,02	0	1,67	7,07
25	12/03/2020	18:00:00	114,2	114,24	1,02	0	1,84	7,28
26	12/03/2020	18:10:00	114,19	114,27	1,02	0	12,9	7,6
27	12/03/2020	18:20:00	113,79	113,83	1,01	0	2,39	8,3
28	12/03/2020	18:30:00	110,21	110,26	1,06	5,98	2,8	9,93
29	12/03/2020	18:40:00	105,99	106,04	0,92	1,28	5,03	13,7

Distorsión Armónica Total registrada por los analizadores.

Figura 23 Parámetros eléctricos THDv obtenidos de las bajantes de los transformadores.
Fuente: EMELNORTE S.A.

2.3.2 Tratamiento de datos.

De los diferentes parámetros obtenidos, existe una gran variedad de los cuales no serán útiles para el análisis en el software Power bi, ni el análisis en el software Power Quality Logger propio del analizador Fluke, los parámetros omitidos son, la distorsión armónica de corriente, las potencias activa y reactiva, el desequilibrio de voltaje, el factor de potencia y la energía medida, en la figura 24 se observa los datos que se han incluido.

1	Transformador	Cientes	Distancia	Potencia	Fases	Dias	Fecha	Hora	V medio L1	V medio L2	V medio L3	THD V medio L1	THD V medio L2	THD V medio L3	S total medio
2	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	13:00:00	127,08	127,39	0,00	3,09	3,27	0	4456,577
3	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	13:10:00	127,49	127,69	0,00	3,14	3,14	0	6092,386
4	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	13:20:00	126,77	126,99	0,00	3,19	3,14	0	4954,474
5	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	13:30:00	126,69	126,9	0,00	3,24	3,19	0	4843,722
6	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	13:40:00	126,4	126,62	0,00	3,24	3,22	0	4449,716
7	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	13:50:00	126,15	126,39	0,00	3,24	3,26	0	4825,099
8	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	14:00:00	125,6	125,85	0,00	3,15	3,16	0	5437,67
9	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	14:10:00	125,13	125,33	0,00	3,1	3,06	0	5109,332
10	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	14:20:00	124,78	124,99	0,00	3,09	3,08	0	5010,341
11	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	14:30:00	125,25	125,44	0,00	3,12	3,09	0	5224,006
12	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	14:40:00	125,07	125,28	0,00	2,99	3,02	0	4927,051
13	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	14:50:00	124,98	125,2	0,00	3,07	3,02	0	4927,031
14	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	15:00:00	125,07	125,28	0,00	3,04	3	0	4696,705
15	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	15:10:00	125,15	125,35	0,00	2,98	2,97	0	4599,673
16	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	15:20:00	125,97	125,17	0,00	3,01	2,98	0	4636,918
17	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	15:30:00	125,12	125,32	0,00	3,03	3,04	0	4390,909
18	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	15:40:00	125,45	125,64	0,00	3,17	3,11	0	4700,625
19	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	15:50:00	125,76	125,98	0,00	3,2	3,17	0	4161,563
20	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	16:00:00	126,19	126,41	0,00	3,19	3,18	0	4834,901
21	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	16:10:00	126,6	126,83	0,00	3,15	3,18	0	4538,906
22	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	16:20:00	126,73	126,94	0,00	3,18	3,19	0	5332,798
23	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	16:30:00	126,85	127,04	0,00	3,17	3,17	0	4832,94
24	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	16:40:00	127,14	127,34	0,00	3,3	3,26	0	4768,253
25	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	16:50:00	127,12	127,48	0,00	3,44	3,39	0	4427,173
26	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	17:00:00	127,72	127,96	0,00	3,5	3,52	0	5041,705
27	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	17:10:00	128,09	128,34	0,00	3,64	3,64	0	4264,474
28	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	17:20:00	127,92	128,15	0,00	3,77	3,74	0	4440,895
29	F9-1F-X1T28-X1P5004-37,5KVA_I	36	37	37,5 KVA	1F	Martes	10/03/2020	17:30:00	127,33	127,55	0,00	3,78	3,73	0	5322,997

Figura 24 Datos que se han tratado para su posterior análisis.
Fuente: EMELNORTE S.A.

2.3.3 Traslado de datos a Power BI.

Con toda la tabla previamente armada se realizó el traslado de datos a Power BI, la figura 25 muestra la tabla creada en Excel y trasladada a la aplicación, donde se realizan las diferentes gráficas y visualizaciones de datos máximos y mínimos de los parámetros investigados.

Potencia	Fases	Dias	Fecha	Hora	V medio L1	V medio L2	V medio L3	THD V medio L1	THD V medio L2	THD V medio L3	S total medio	Cargabilidad	Horas seg	Day
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	22:30	121,26	120,98	0	9,12	9,48	0	6217,841	6,217841	22	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	22:20	120,95	120,75	0	9,42	9,79	0	6870,597	6,870597	22	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	22:10	120,21	120,06	0	9,79	10,2	0	6903,92	6,90392	22	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	22:00	119,83	119,57	0	9,83	10,2	0	6914,702	6,914702	22	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	21:50	119,72	119,46	0	10,1	10,5	0	6946,236	6,946236	21	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	21:40	119,67	119,62	0	10,3	10,7	0	7423,381	7,423381	21	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	21:30	119,68	119,33	0	10,4	10,9	0	6211,96	6,21196	21	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	21:20	118,97	118,61	0	10,4	10,8	0	6478,551	6,478551	21	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	21:10	119,08	118,62	0	10,6	10,8	0	7174,432	7,174432	21	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	21:00	118,02	117,97	0	10,7	10,8	0	12472,526	12,472926	21	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	20:50	118,47	117,74	0	10,7	10,8	0	7299,886	7,299886	20	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	20:40	118,5	117,25	0	10,7	11,7	0	9557,088	9,557088	20	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	20:30	117,46	116,97	0	10,7	11,7	0	6609,886	6,609886	20	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	20:20	116,8	116,29	0	10,6	11,7	0	6610,866	6,610866	20	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	20:10	116,96	116,21	0	10,6	11,7	0	7129,347	7,129347	20	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	20:00	116,39	116,44	0	10,6	11,7	0	9567,866	9,567866	20	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	19:50	116,55	115,92	0	10,6	11,6	0	6189,418	6,189418	19	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	19:40	116,17	115,54	0	10,6	11,6	0	6904,091	6,904091	19	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	19:30	115,99	115,47	0	10,6	11,6	0	6107,088	6,107088	19	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	19:20	115,75	115,24	0	10,6	11,6	0	6311,932	6,311932	19	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	19:10	115,14	114,56	0	10,5	11,6	0	6299,19	6,29919	19	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	19:00	115,87	115,25	0	10,3	10,6	0	6259,006	6,259006	19	2
37,5 KVA	1F	Martes	martes, 21 de abril de 2020	18:50	115,99	114,5	0	10,1	10,5	0	9083,693	9,083693	18	2

Figura 25 Tabla exportada de Excel con los datos de los diferentes parámetros eléctricos.
Fuente: EMELNORTE S.A.

2.3.4 Visualización de datos.

Con la base de datos construida y exportada a Power BI, es momento de que todos los datos se representen gráficamente y se den a conocer mediante ventanas de texto o ventanas de visualización, la figura 26 muestra cuadros con sus etiquetas como Días, Número de clientes, Distancia, etc.

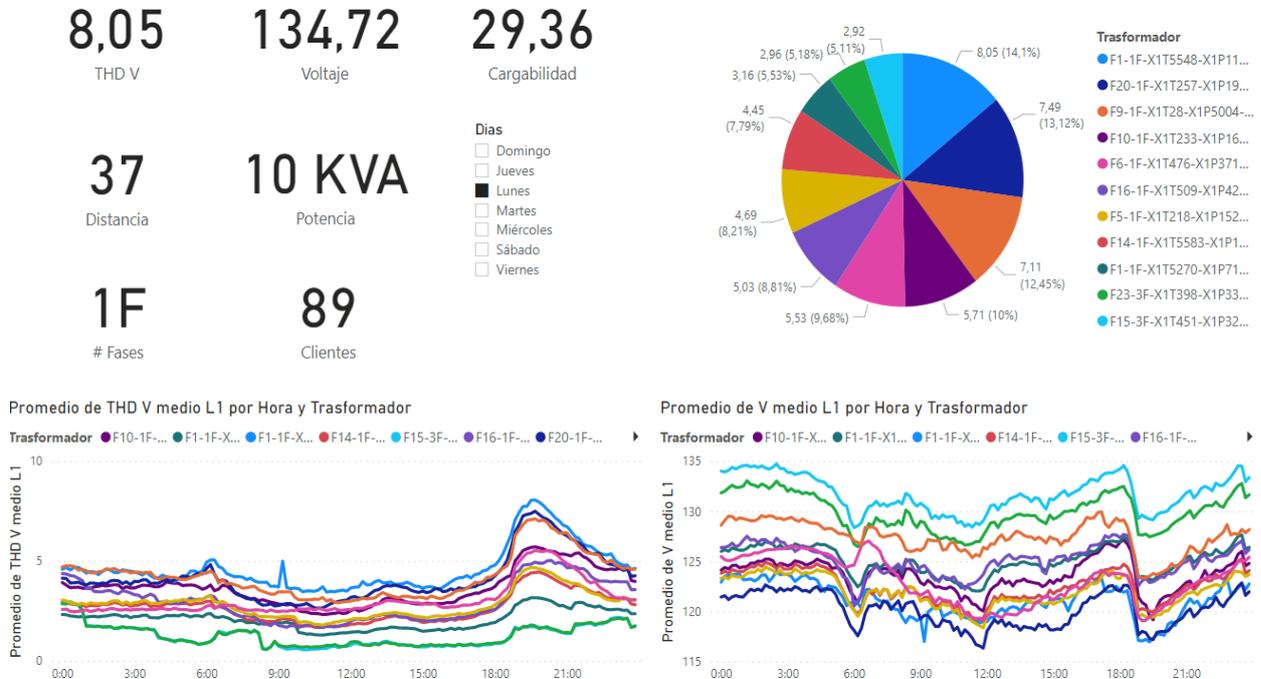


Figura 26 Parámetros eléctricos graficados en el software Power bi.
Fuente: Autor

Además de gráficas como THDv y Voltaje respectivamente, en el software Power bi, mientras que en la figura 27 se puede observar las diferentes graficas del software Power Quality Logger.

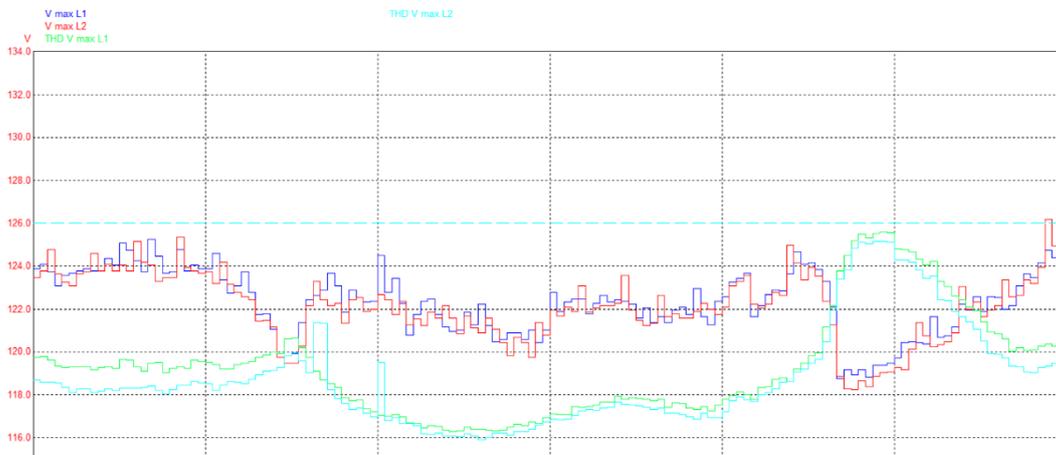


Figura 27 Voltajes graficados en el software Power Quality Logger.
Fuente: Autor

2.4 DETERMINACIÓN DE INCUMPLIMIENTO EN EL ALIMENTADOR X1

Mediante el análisis de los datos que se muestran en las gráficas, los transformadores en el circuito de bajo voltaje del alimentador X1 se encuentran con problemas en el parámetro de Distorsión Armónica Individual (IHDv), a continuación, se detalla la problemática.

2.4.1 Distorsión armónica de Voltaje en el circuito X1.

Para empezar el circuito X1 de la subestación El Chota observado en la figura 28 cuenta con las siguientes características:



Figura 28 Circuito Alimentador X1 Subestación El Chota.
Fuente: Autor

- Tramo de medio voltaje aéreo que ronda los 207 km de longitud, cálculo que se realiza con la base de datos de la empresa y el software ArcGIS.
- Un total de 364 transformadores de distribución los que se observa en la figura 29 de los cuales 23 son trifásicos.

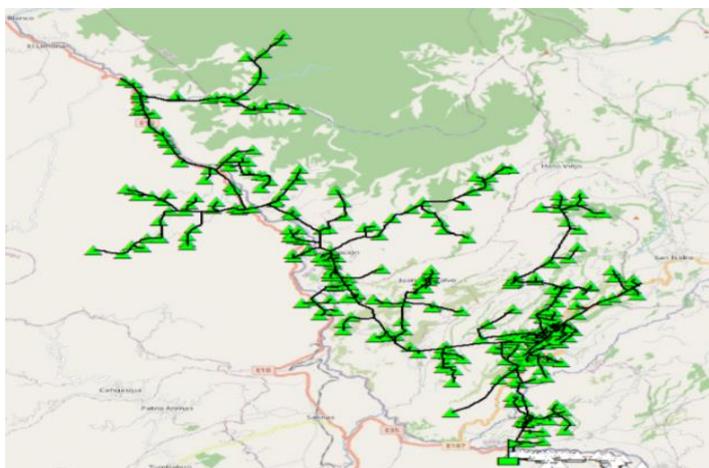


Figura 29 Transformadores Circuito Alimentador X1 Subestación El Chota.
Fuente: Autor

El estudio realizado en los 11 transformadores de la muestra da como resultado un incumplimiento en la variable de Distorsión Armónica Individual de voltaje (IHDv) según la REGULACIÓN No. ARCERNNR 002/20 denominada “Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica”; en la que dicta que, si la distorsión armónica individual de voltaje supera el 5% en la red de bajo voltaje, con un índice mayor al 5% en los valores registrados en un punto de medición en todas y cada una de sus fases en un periodo de al menos 7 días, se encuentra incumpliendo con la regulación, en la tabla 2.1 se detalla los transformadores con el máximo porcentaje de armónicos.

ALIMENTADOR	CODIGO TRANSFORMADOR	ARMONICO	MAX IHDv [%]	HORARIO
X1	X1T28-37	TERCERO	6,75	19:00-21:00
X1	X1T257	TERCERO	7,23	19:00-21:10
X1	X1T233	TERCERO	5,52	19:00-21:10
X1	X1T218	TERCERO	5,58	19:00-21:00
X1	X1T5548	NINGUNO	4,59	19:00-20:40
X1	X1T476	NINGUNO	4,78	18:50-21:20
X1	X1T398	NINGUNO	2,61	19:00-21:00
X1	X1T509	NINGUNO	5	18:50-22:30
X1	X1T5583	NINGUNO	4,35	19:00-21:00
X1	X1T451	NINGUNO	2,6	19:00-21:00
X1	X1T5270	NINGUNO	2,85	19:00-21:00

Tabla 2.1 Máximos de THDv Circuito Alimentador X1.
Fuente: Autor.

2.4.2 Distancias de los transformadores.

Uno de los factores a estudiar fueron las diferentes distancias que existen entre la subestación y el transformador en estudio, para de esta manera buscar una relación de la distorsión armónica, para saber cuál sería el trecho existente se utiliza el software ArcGIS donde se traza las diferentes rutas para obtener un resultado, en la figura 30 se mira el ejemplo de trazo de ruta.

La relación entre la distancia y la distorsión armónica total de voltaje fue que a mayores kilómetros de distancia mayor es la distorsión ya que al existir un tramo considerable de distancia también existe una mayor impedancia la cual provoca caídas de tensión en la red y una mayor distorsión de la onda de voltaje, en la imagen 31 se observa la relación.

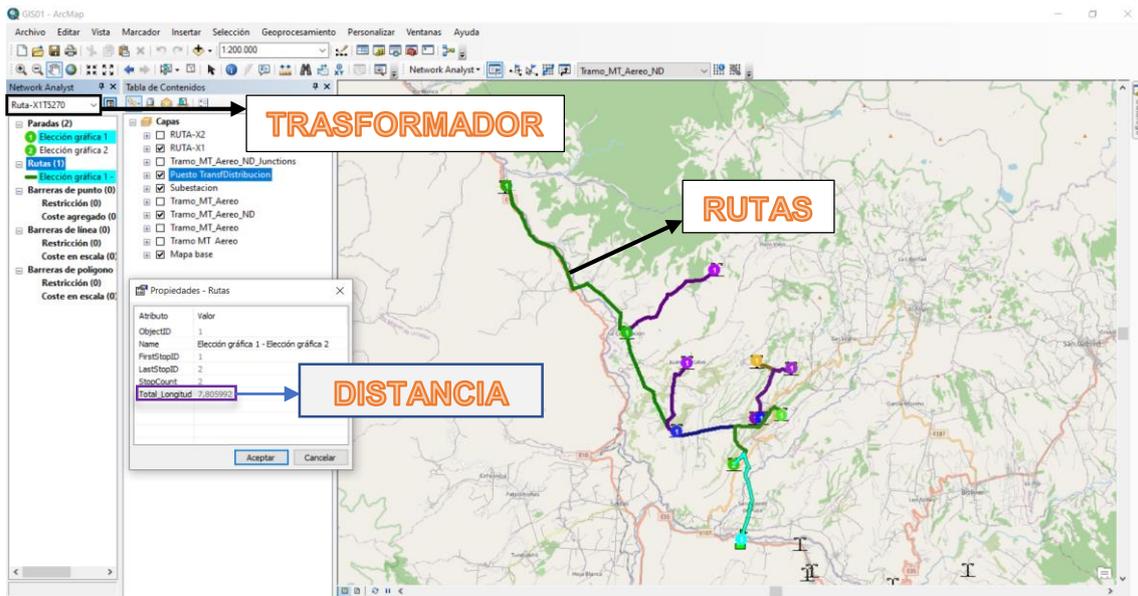


Figura 30 Rutas en ArcGIS.
Fuente: ArcGIS.

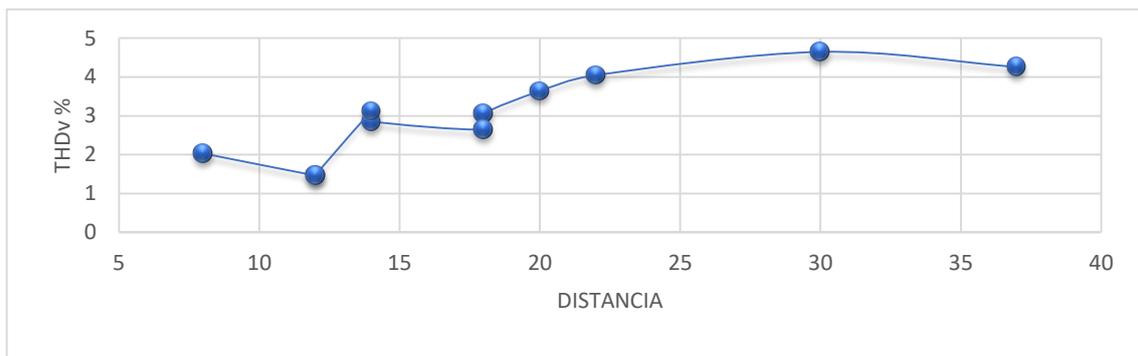


Figura 31 Relación Distancia vs THDv en los transformadores circuito X1.
Fuente: Autor.

2.4.3 Voltaje y Cargabilidad de los transformadores.

El voltaje se ve afectado por la distorsión armónica existente, sufre caídas de tensión en los horarios de máxima demanda, esto se da en su mayor parte en el horario de la noche, pasadas las 19:00 Pm, para este análisis volvemos al software Power BI, la figura 32 muestra la curva de caída de tensión, además se verifica el máximo de cargabilidad en su respectivo horario, mostrado en la Tabla 2.2.

En el parámetro de cargabilidad se pudo comprobar que ninguno de los transformadores del estudio se encontraba sobrecargado o con niveles próximos a su límite de carga, en la siguiente imagen 33 se puede observar la curva de cargabilidad la que se encuentra muy por debajo del límite del transformador.

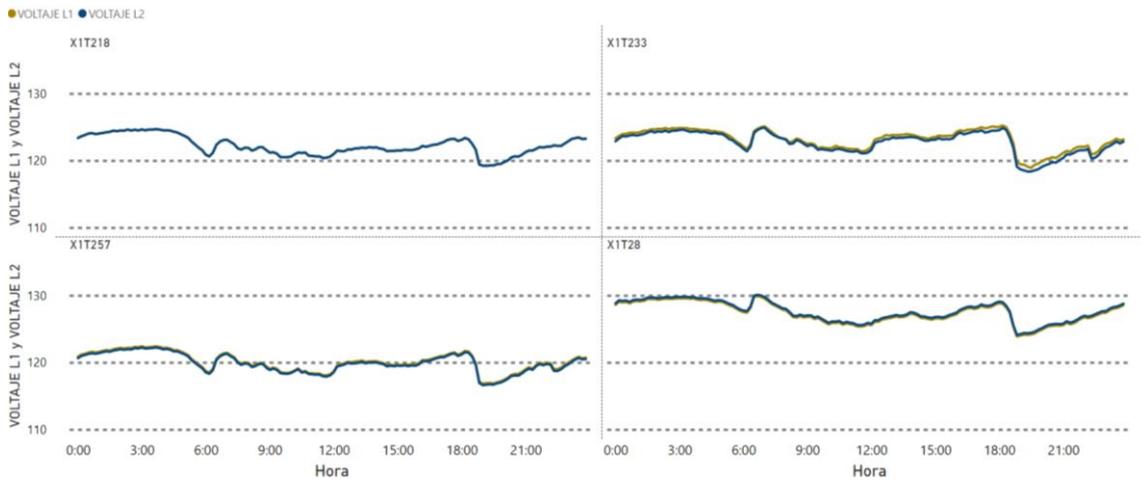


Figura 32 Caídas de Voltaje Circuito Alimentador X1.
Fuente: Autor.

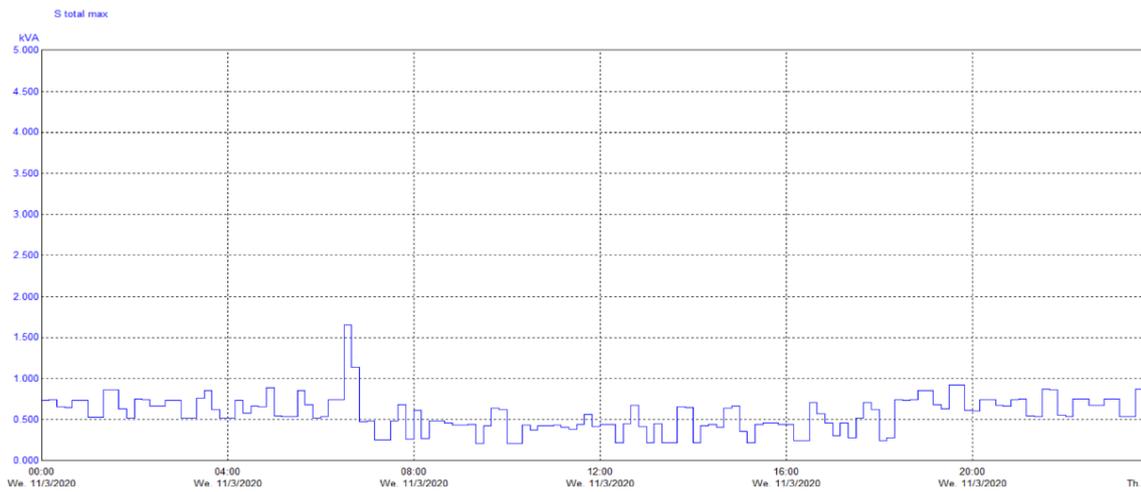


Figura 33 Curva de cargabilidad de un transformador de 5 kVA.
Fuente: Autor.

ALIMENTADOR	CODIGO TRANSFORMADOR	POTENCIA [kVA]	CARGABILIDAD [%-kVA]	FASES	DISTANCIA [KM]	MAX IHDv [%]	MAX THDv [%]	HORARIO [Horas]	CLIENTES
X1	X1T28	37,5 KVA	12,51	1	37	6,75	4.26	19:00-21:00	36
X1	X1T5548	5 KVA	0,56	1	30	7,23	4.65	19:00-21:10	2
X1	X1T257	25 KVA	9,14	1	22	5,52	4.05	19:00-21:10	62
X1	X1T233	15 KVA	13,3	1	20	7,7	3.64	19:00-20:40	26
X1	X1T5583	15 KVA	5,62	1	18	4,28	2.65	19:00-21:00	7
X1	X1T476	10 KVA	0,23	1	18	4,78	3.05	18:50-21:20	1
X1	X1T509	15 KVA	8,82	1	14	5	3.12	18:50-22:30	19
X1	X1T218	15 KVA	4,62	1	14	2,61	2.86	19:00-21:00	2
X1	X1T398	100 KVA	46,3	3	12	4,35	1.48	19:00-21:00	89
X1	X1T451	50 KVA	24,23	3	12	2,6	1.46	19:00-21:00	72
X1	X1T5270	25 KVA	0,77	1	8	2,85	2.03	19:00-21:00	2

Tabla 2.2 Parámetros Generales de Transformadores del Alimentador X1
Fuente: Autor.

2.5 DETERMINACIÓN DE INCUMPLIMIENTO EN EL ALIMENTADOR X2

Mediante el análisis de los datos que se muestran en las gráficas, los transformadores en el circuito de bajo voltaje del alimentador X2 se encuentran con problemas en los parámetros de, Distorsión Armónica Individual (IHDv) y Distorsión Armónica Total de voltaje (THDv) a continuación, se detalla la problemática.

2.5.1 Distorsión armónica de Voltaje en el circuito X2.

Para empezar, se tiene que el circuito X2 de la Subestación El Chota se observa en la figura 34 cuenta con las siguientes características:



Figura 34 Circuito Alimentador X2 Subestación El Chota.

Fuente: ArcGIS

- Tramo de media tensión aéreo que ronda los 325 km de longitud, siendo el circuito más grande de la subestación El Chota, cálculo realizado con la base de datos de la empresa y el software ArcGIS.
- Un total de 771 transformadores de distribución los que se observa en la figura 35 de estos 37 son trifásicos.

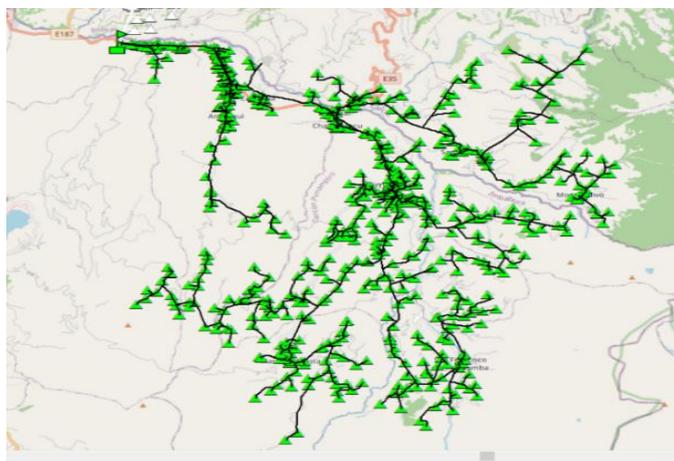


Figura 35 Transformadores Circuito Alimentador X2 Subestación El Chota.

Fuente: Autor.

El análisis realizado en los 14 transformadores de la muestra da como resultado un incumplimiento en la variable de Distorsión Armónica Individual de voltaje (IHDv) y la Distorsión Armónica Total de voltaje (THDv) según la REGULACIÓN No. ARCERNR 002/20 denominada “*Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica*”; en la que dicta que, si la distorsión armónica individual de voltaje supera el 5% de los valores registrados en un punto de medición y la distorsión total de voltaje supera el 8% de los valores registrados en un punto de medición en la red de bajo voltaje en un periodo de al menos 7 días, se encuentra incumpliendo con la regulación, en la tabla 2.3 se detalla el transformador y sus máximos porcentaje de armónicos.

ALIMENTADOR	CODIGO TRANSFORMADOR	ARMONICO	IHDv (%)	MAX THDv (%)	HORARIO
X2	X2T345	TERCERO	15	16,68	19:00-21:00
X2	X2T5270	TERCERO	15,2	9,47	19:20-21:40
X2	X2T402	TERCERO	12,9	13,78	19:00-21:10
X2	X2T407	TERCERO	14,6	12,87	19:00-21:10
X2	X2T141	TERCERO	12,5	10,75	19:10-21:40
X2	X2T152	TERCERO	13	12,37	18:40-22:20
X2	X2T5061	TERCERO	11,9	14,58	19:10-20:40
X2	X2T5323	TERCERO	11,7	16,11	19:00-21:00
X2	X2T650	TERCERO	11	14,57	19:00-21:10
X2	X2T5285	TERCERO	9,46	9,75	18:50-21:40
X2	X2T302	TERCERO	9,16	16,82	19:00-21:10
X2	X2T62	NINGUNO	2,87	2,56	22:00-23:30
X2	X2T24	NINGUNO	2,72	4,54	18:50-22:40
X2	X2T71	NINGUNO	2,41	2,55	21:50-23:30

Tabla 2.3 Máximos de THDv Circuito Alimentador X2.
Fuente: Autor.

Este circuito dobla el circuito anterior en trayecto y en transformadores, es así como existe también una mayor contaminación de la red ya que se tiene un mayor número de cargas no lineales conectadas a la red y una impedancia mucho mayor, en la imagen 36 se ve la contaminación que existe en un día y en los 7 días de medición en un mismo transformador.

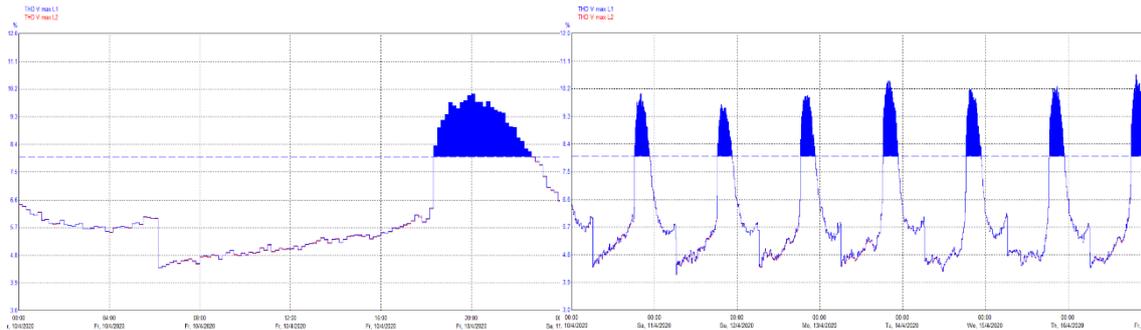


Figura 36 Distorsión armónica Total de un transformador separado en un día y 7 días.

Fuente: Autor.

2.5.2 Distancias Circuito Alimentador X2.

Como se menciona anteriormente se realiza el mismo análisis del circuito del Alimentador X1, las distintas distancias que existen entre la subestación y el transformador, para de esta manera buscar la relación entre distancia y distorsión armónica. Para saber el aproximado de la distancia se utilizó el software ArcGIS donde se trazó las diferentes rutas para obtener un resultado, en la figura 2.9 se mira el trazo de las rutas.

La relación entre la distancia y la distorsión armónica total de voltaje fue que a mayores kilómetros de distancia mayor es la distorsión ya que al existir un tramo considerable de distancia también existe una mayor impedancia la cual provoca caídas de tensión en la red y una mayor distorsión de la onda de voltaje, en la imagen 37 se observa la relación.

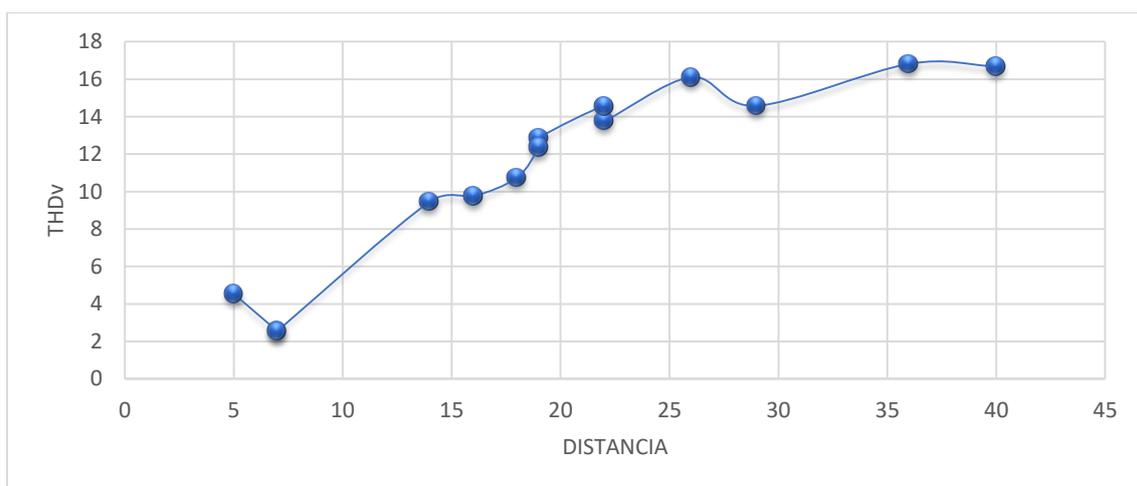


Figura 37 Relación Distancia vs THDv en los transformadores circuito X2.

Fuente: Autor.

2.5.3 Voltajes y Cargabilidad de los transformadores.

El voltaje se ve afectado por la distorsión armónica existente, sufre caídas de tensión en los horarios de máxima demanda, esto se da en su mayor parte en el horario de la noche, pasadas las 19:00 Pm, para este análisis volvemos al software Power BI, la figura 38 muestra la curva de caída de tensión, además se verifica el máximo de cargabilidad en su respectivo horario, mostrado en la Tabla 2.4

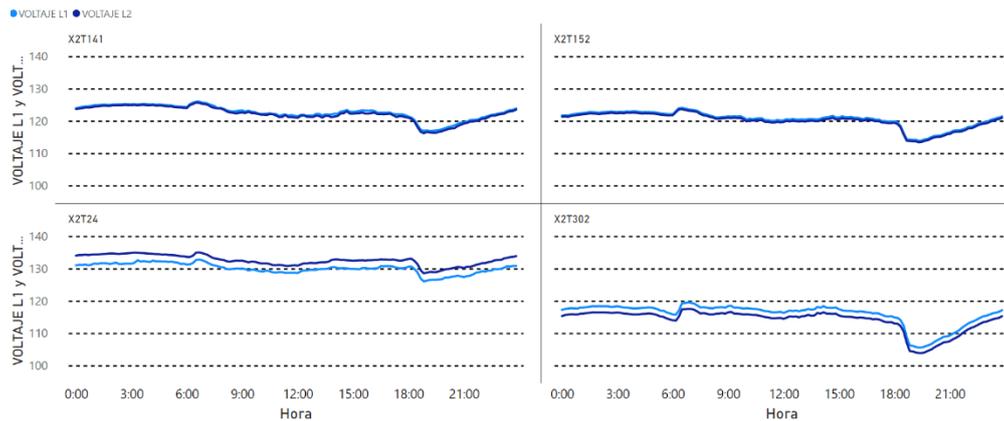


Figura 38 Caídas de Voltaje Circuito Alimentador X2.
Fuente: Autor.

En el parámetro de cargabilidad se encontró una novedad con los transformadores

X2T650
X2T302

los cuales se encuentran con niveles de sobrecarga, la imagen 39 muestra la curva de uno de los transformadores sobrecargados, los transformadores restantes se encuentran con un nivel aceptable.

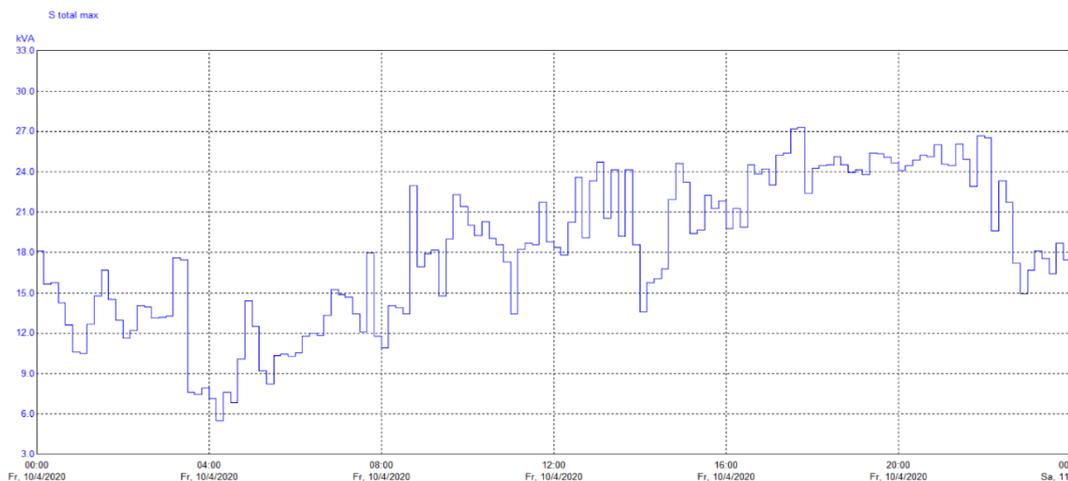


Figura 39 Curva de cargabilidad, Transformador Sobrecargado-10 kVA.
Fuente: Autor.

ALIMENTADOR	CODIGO TRANSFORMADOR	POTENCIA [kVA]	FASES	DISTANCIA [KM]	MAX IHDv [%]	MAX THDv [%]	HORARIO [Horas]	CLIENTES	CARGABILIDAD [kVA]
X2	X2T345	25 KVA	1	40	15	16,68	19:00-21:00	17	1,32
X2	X2T302	10 KVA	1	36	15,2	16,82	19:20-21:40	1	27,54
X2	X2T5061	5 KVA	1	29	12,9	14,58	19:00-21:10	2	0,29
X2	X2T5323	5 KVA	1	26	14,6	16,11	19:00-21:10	3	0,48
X2	X2T402	15 KVA	1	22	12,5	13,78	19:10-21:40	33	11,23
X2	X2T650	10 KVA	1	22	13	14,57	18:40-22:20	8	15,27
X2	X2T407	10 KVA	1	19	11,9	12,87	19:10-20:40	4	1,42
X2	X2T152	50 KVA	1	19	11,7	12,37	19:00-21:00	75	29,42
X2	X2T141	37.5 KVA	1	18	11	10,75	19:00-21:10	31	13,46
X2	X2T5285	15 KVA	1	16	9,46	9,75	18:50-21:40	1	1,47
X2	X2T5270	37,5 KVA	1	14	9,16	9,47	19:00-21:10	23	6,7
X2	X2T62	30 KVA	3	7	2,87	2,56	22:00-23:30	2	6,23
X2	X2T71	75 KVA	3	7	2,72	2,55	18:50-22:40	3	47,4
X2	X2T24	15 KVA	1	5	2,41	4,54	21:50-23:30	11	4,24

Tabla 2.4 Parámetros Generales de Transformadores del Alimentador X2
Fuente: Autor.

2.6 DETERMINACIÓN DEL INCUMPLIMIENTO EN MEDIO VOLTAJE.

Para el análisis en medio voltaje se lo realizó gracias a las diferentes mediciones obtenidas en la cabecera del circuito, en los alimentadores X1 y X2, en el transformador de la Subestación El Chota, mediciones tomadas del lado secundario, en la red de 13,8 kV.

2.6.1 Distorsión Armónica en el Alimentador X1.

Las diferentes variables que fueron analizadas fueron otorgadas por el módulo de calidad de energía SEL-735 el cual se encuentra instalado en la Subestación y el cual brindo diferentes mediciones, este análisis tubo como resultado el cumplimiento de la REGULACIÓN No. ARCERNNR 002/20 en dicha locación.

La figura 40 muestra la gráfica de la distorsión armónica total de voltaje (THDv) de las fases A, B, C, donde se observa que los límites máximos alcanzados por las diferentes fases van del 2,44% para la fase A, el 2,66% para la fase B y el 2,44% para la fase C, del 5% permitido por la regulación a las 5:55 am.

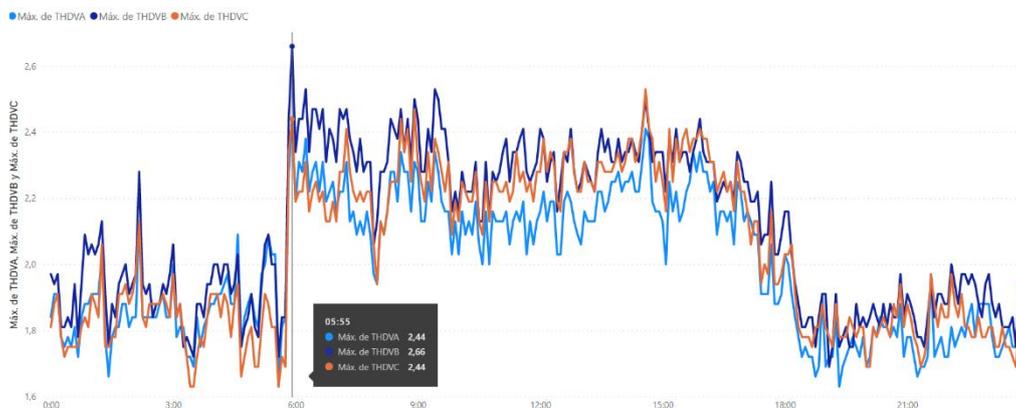


Figura 40 Gráficas de THDVA, THDVB, THDVC Alimentador X1.

Fuente: Autor.

Por otro lado, para los valores de la distorsión armónica individual de voltaje (IHDv) se tomó en cuenta los múltiplos enteros de la frecuencia fundamental siendo estos el 3er, 5to, 7mo, 9no, 11vo, 13vo, 15vo, 17vo, 19vo, armónico individual para cada una de sus fases los cuales sus valores máximos están dados en porcentaje y están indicados en la Tabla 2,7.

ARMÓNICOS INDIVIDUALES EN PORCENTAJE									
FASES	3er	5to	7mo	9no	11vo	13vo	15vo	17vo	19vo
A	1,13	2,38	0,69	0,34	0,29	0,17	0,04	0,09	0,12
B	0,91	2,59	0,73	0,29	0,36	0,29	0,12	0,16	0,11
C	0,96	2,52	0,65	0,31	0,35	0,24	0,08	0,15	0,08

Tabla 2.7 Máxima distorsión individual, Alimentador X1.
Fuente: Autor.

Los valores del voltaje se mantuvieron constantes y con caídas de voltaje en el horario de alta demanda que van desde las 6:00 am hasta las 9:15 am en lo que va de la mañana y el horario de la tarde desde las 17:10 pm hasta las 21:15 en lo que respecta tarde y noche, en ningún otro caso, la figura 41, muestra las formas de voltaje en las tres fases VA, VB, VC del transformador y la figura 42 indica los voltajes entre líneas VAB, VBC, VCA, donde de la misma forma que los voltajes de fase, tienen caídas de voltaje comprendidas en las horas de alta demanda en el mismo horario.

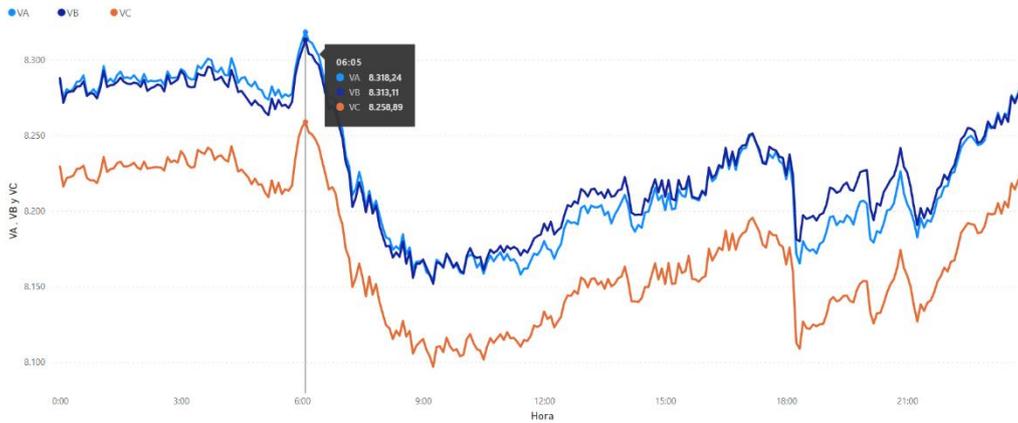


Figura 41 Gráficas de Voltaje por fase Alimentador X1.
Fuente: Autor.

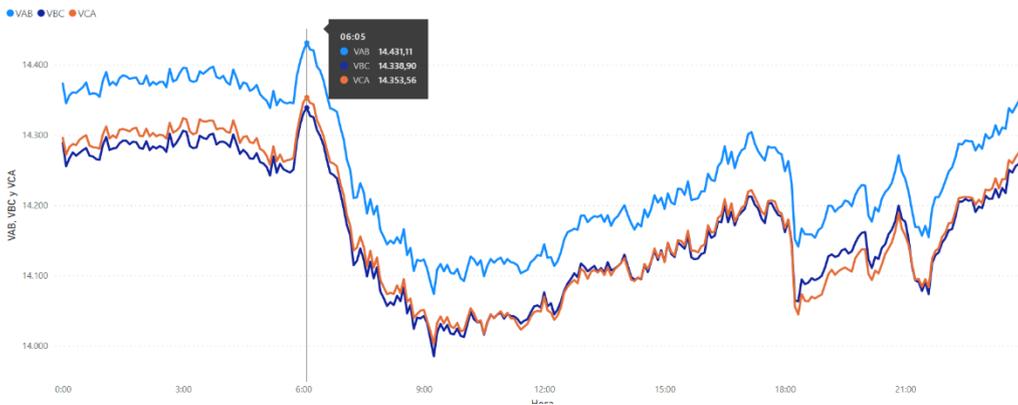


Figura 42 Gráficas de Voltaje línea-línea Alimentador X1.
Fuente: Autor.

2.6.2 Distorsión Armónica en el Alimentador X2.

En este nuevo análisis para el alimentador número 2 de la Subestación se obtiene un resultado muy similar al que se tuvo con el alimentador X1, las mediciones fueron recolectadas por el mismo módulo de medición SEL -735 y mediante las cuales se determinó que no existe incumplimiento por parte de La distorsión armónica total (THDv) en la cabecera del circuito.

En la gráfica 43, muestra la gráfica de la distorsión armónica total de voltaje, de las fases A, B, C, donde se observa que los límites máximos alcanzados por las diferentes fases van del 2,50% para la fase A, el 2,66% para la fase B y el 2,44% para la fase C, del 5% permitido por la regulación a las 5:55 am.

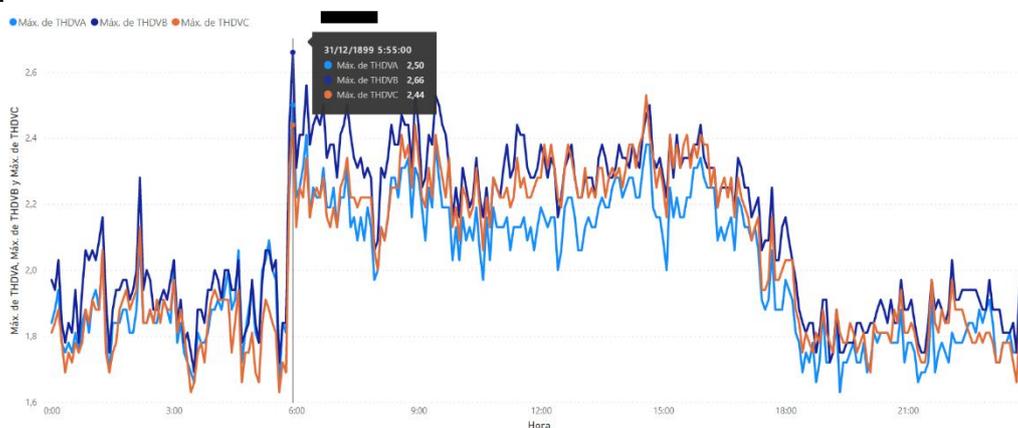


Figura 43 Gráficas de THDVA, THDVB, THDVC Alimentador X2.
Fuente: Autor.

Por otro lado, para los valores de la distorsión armónica individual de voltaje (IHDv) se tomó en cuenta los múltiplos enteros de la frecuencia fundamental siendo estos el 3er, 5to, 7mo, 9no, 11vo, 13vo, 15vo, 17vo, 19vo, armónico individual para cada una de sus fases los cuales sus valores máximos están dados en porcentaje y están indicados en la Tabla 2,8.

ARMÓNICOS INDIVIDUALES EN PORCENTAJE									
FASES	3er	5to	7mo	9no	11vo	13vo	15vo	17vo	19vo
A	1,13	2,41	0,73	0,34	0,30	0,17	0,07	0,14	0,12
B	0,87	2,58	0,73	0,31	0,38	0,29	0,13	0,16	0,15
C	0,98	2,52	0,65	0,31	0,36	0,24	0,08	0,16	0,09

Tabla 2.8 Máxima distorsión individual, Alimentador X2.
Fuente: Autor.

Los valores del voltaje también tienen mucha similitud con el alimentador X1, sus caídas de tensión en el horario de alta demanda que van desde las 6:00 am hasta las 9:15 am en lo que va de la mañana y el horario de la tarde desde las 17:10 pm hasta las 21:35 en lo que respecta tarde y noche, en ningún otro caso, la figura 44 muestra las formas de voltaje en las tres fases VA, VB, VC del transformador y la figura 45 indica los voltajes entre líneas VAB, VBC, VCA, donde de la misma forma que los voltajes de fase, tienen caídas de voltaje comprendidas en las horas de alta demanda en el mismo horario.

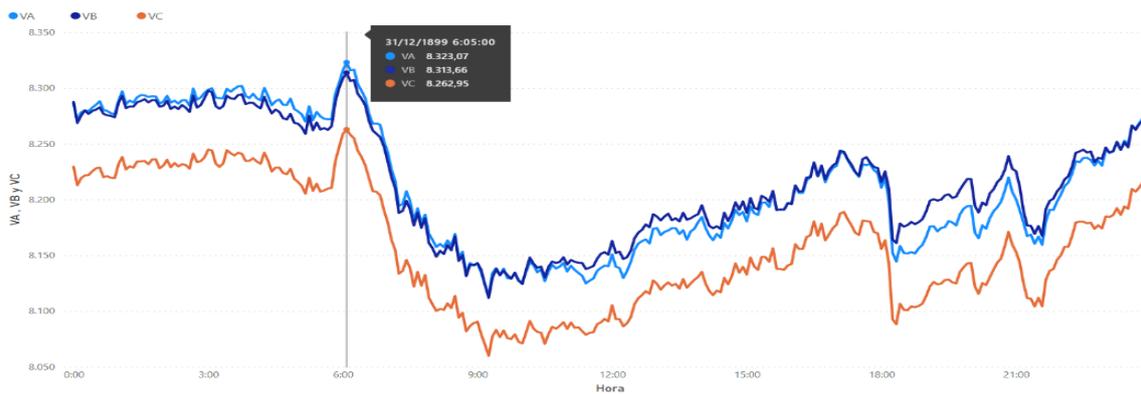


Figura 44 Gráficas de Voltaje por fase Alimentador X2.
Fuente: Autor

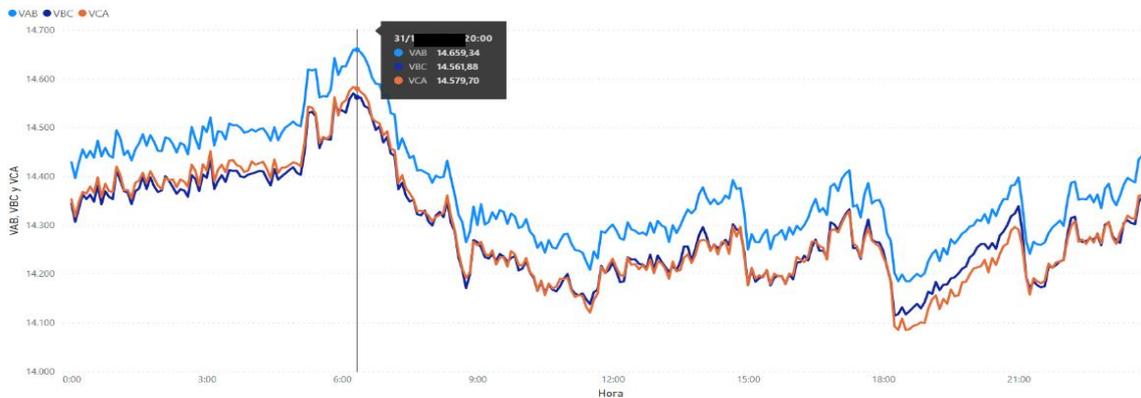


Figura 45 Gráficas de Voltaje línea-línea Alimentador X2.
Fuente: Autor.

Al ser los datos tomados en la cabecera de los circuitos, las ondas de voltaje no se ven distorsionadas, pero se evidencia perturbaciones de armónicos quintos que no llegan al límite permitido por la regulación pero que se puede ver que existen, los armónicos terceros en cambio no se ven reflejados ya que como dicta la teoría estos quedan atrapados en los transformadores de conexión triangulo-estrella y fugan por el neutro.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza el análisis de los resultados obtenidos en la implementación de la metodología utilizada, para la disminución del THDv en los alimentadores de la Subestación El Chota, la propuesta sugerida para realizar este estudio es la simulación de la implementación de filtros pasivos en diferentes puntos del ramal de cada circuito.

Para encontrar la mejor solución al problema presente se realizó el modelamiento de los filtros en el software CYMDIST implementando filtros de sintonía simple que varían en su capacidad.

3.1 CASO DE ESTUDIO 1: Circuito Alimentador X1

En el siguiente apartado se va a revisar los diferentes THDv de los nodos seleccionados gracias a la distribución de los transformadores, con una fuente armónica conectada y diseñada con los datos reales proporcionados por los analizadores de redes pertenecientes a la empresa eléctrica EMELNORTE S.A. la empresa, dando una idea de la realidad que tienen los transformadores.

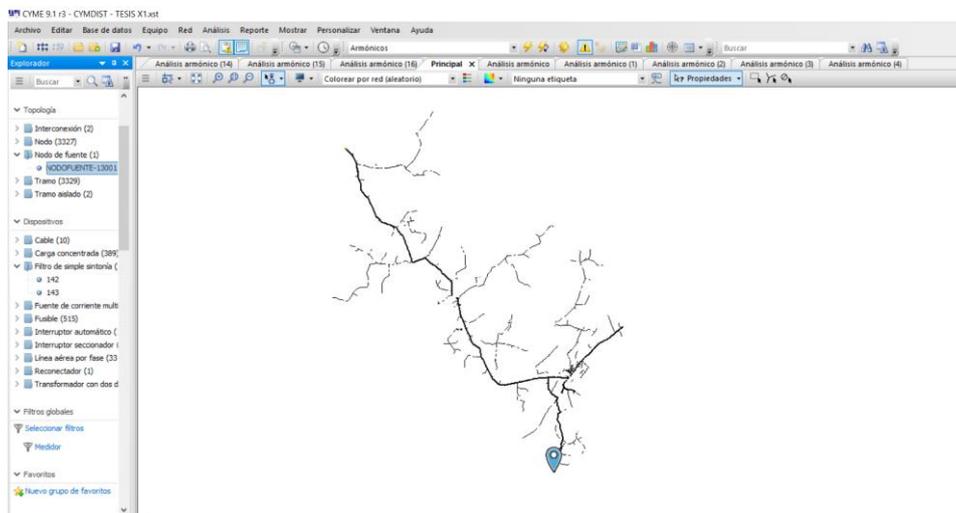


Figura 46 Circuito Alimentador X1 modelado en el Software CYME.
Fuente: Autor.

En la figura 46 se aprecia el circuito X1 al cual para el análisis de distorsión armónica se le ha conectado una fuente de voltaje armónico para este caso de estudio, la figura 47 muestra los niveles de distorsión aplicados a la fuente, estos

serían los otorgados por los analizadores instalados en el secundario de los transformadores en estudio.

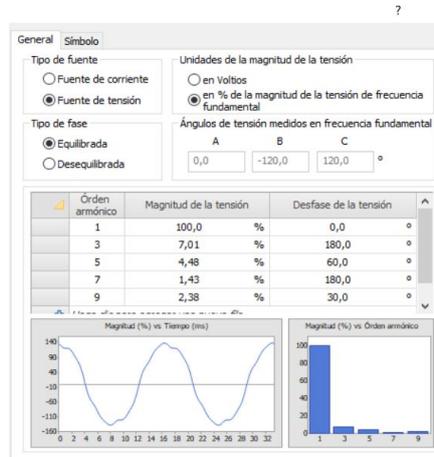


Figura 47 Datos de una fuente armónica en CYME.
Fuente: Autor.

3.1.1 Modelado del filtro armónico.

Para la modelación del filtro armónico se tomó en cuenta los datos obtenidos por los medidores ION instalados en los alimentadores y que son propiedad de la empresa distribuidora EMELNORTE SA, tal como se observa en la tabla 3.0, donde se tiene en cuenta que la potencia reactiva requerida en el circuito del alimentador X1 es de 419,56 kVAR en demanda máxima.

Local Time	kVA	kW	kVAR	PF	VLL ab	VLL bc	VLL ca	I a	I b	I c	Freq
2021-sep-14 19:20:00.000	1571.89	1513.20	419.56	0.96	14260.00	14180.00	14140.00	73.30	50.76	67.87	60.00

Tabla 3.0 Parámetros del Alimentador X1 en máxima demanda.
Fuente: Autor.

Al utilizar dos filtros para compensar la distorsión armónica se ha dividido en 250 kVAR para cada filtro armónico los cuales son calculados en el simulador teniendo en cuenta los parámetros de: frecuencia sintonizada, factor de calidad, configuración y voltaje de funcionamiento tal como se observa en la figura 48, iniciamos insertando la potencia reactiva requerida, sintonizamos el tercer armónico, el cual es el que está dando problemas, un factor de calidad de 70 la configuración del filtro en estrella con conexión a tierra y un voltaje nominal del condensador de 13800 voltios.

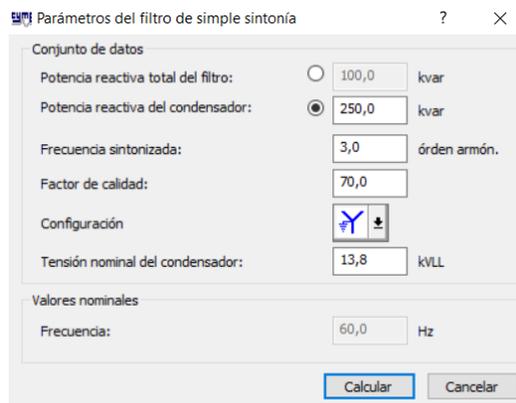


Figura 48 Parámetros del filtro en CYME.
Fuente: Autor.

Después de darle al botón calcular, las diferentes impedancias equivalentes son calculadas por el software y el filtro está listo para ser conectado a nuestro circuito, la figura 49 se verifica los diferentes valores que se han dado para resistencia, inductancia y capacitancia.

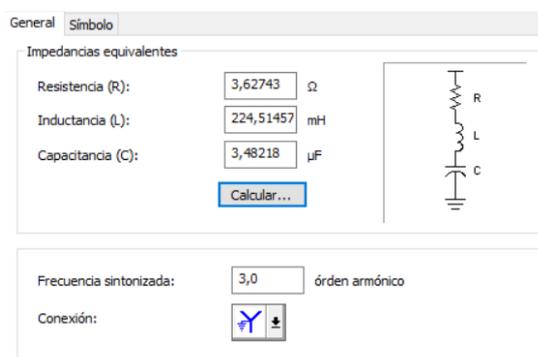


Figura 49 Impedancias equivalentes en CYME.
Fuente: Autor.

3.1.2 Ubicación de los filtros.

Los filtros de armónicos se pueden ubicar en dispositivos individuales o en un bus común que alimenta muchas cargas, que puede ubicarse a bajo voltaje o a medios voltajes, para este estudio los filtros se ubicaran en la troncal para la cual se tomara en cuenta parte del circuito que cuenta con la mayor distorsión armónica.

Para encontrar la mejor ubicación de los filtros se los ubico de manera ordenada comenzando desde el alimentador con el primer filtro y con el segundo filtro en

el fin del tramo, recorriendo un aproximado de 1 km por ubicación y comparando los datos de distorsión, obteniendo como resultado la ubicación en la tabla 3.1.

FILTRO	NODO	CORDENADAS	
		X	Y
1	MTA_S_315171	812219,51	10075664,25
2	MTA_S_315612	819855,68	10067116,89

Tabla 3.1 Ubicaciones de los filtros.
Fuente: Autor.

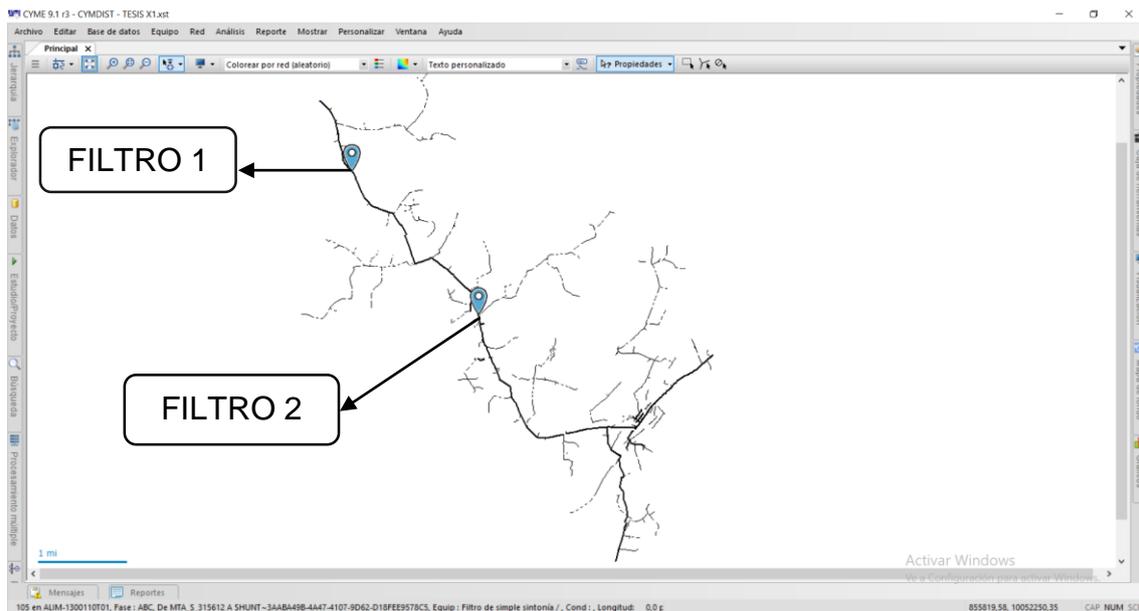


Figura 50 Ubicación de los filtros en el modelado CYME.
Fuente: Autor.

3.1.3 Reporte de voltaje.

Los voltajes nodales que se presentan en las diferentes tablas se obtienen mediante el flujo de carga que se corre en el mismo simulador, estos voltajes están divididos en aquellos que se obtuvieron antes que se conecte la fuente armónica, aquellos que se obtuvieron después de conectarse la fuente armónica y después de que se conecte el filtro armónico, en sus diferentes niveles de voltaje.

La tabla 3.2 y 3.3 muestran los voltajes ordenados de acuerdo con la distancia del nodo y la fuente de alimentación, que se obtiene del simulador en sus diferentes casos, las figuras 51 y 52 muestra los voltajes ilustrados para una mejor comprensión.

Los nodos que se presentan son aquellos puntos a los cuales se tiene conectados los transformadores en estudio, para tener una mejor idea.

LADO DE BAJA	BAJO VOLTAJE				DISTANCIA (Km)
	NORMAL (V)	ARMÓNICOS (V)	1 FILTRO (V)	2 FILTROS (V)	
X1T28	133.85	133.83	136.51	142.05	37
X1T5548	139.48	139.46	142.46	146.83	30
X1T257	135.73	135.72	138.44	141.84	22
X1T233	136.99	136.97	138.74	140.92	20
X1T476	136.42	136.41	137.41	138.60	18
X1T5583	136.46	136.45	137.46	138.64	18
X1T218	136.16	136.15	137.63	139.37	14
X1T509	138.64	138.64	139.89	141.69	14
X1T398	139.68	139.67	140.82	142.35	12
X1T451	137.11	137.10	138.19	139.57	12
X1T5270	139.87	139.87	140.60	141.45	8

Tabla 3.2 Simulación en Bajo Voltaje.
Fuente: Autor.

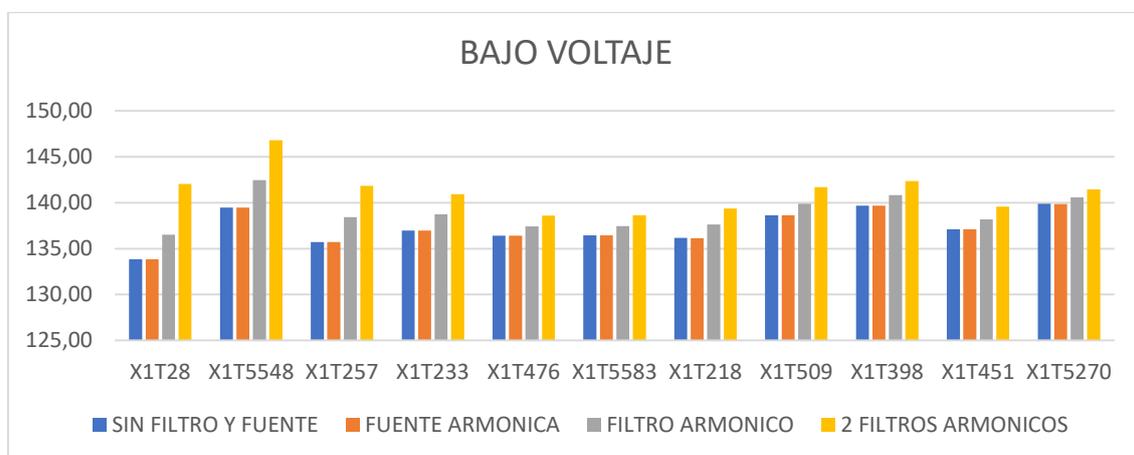


Figura 51 Bajos Voltajes nodales ilustrados.
Fuente: Autor.

LADO DE MEDIA	MEDIO VOLTAJE				DISTANCIA (Km)
	NORMAL (V)	ARMÓNICOS (V)	1 FILTRO (V)	2 FILTROS (V)	
X1T28	7530.83	7529.72	7679.54	7989.56	37
X1T5548	7829.16	7828.21	7996.30	8241.18	30
X1T257	7675.47	7674.52	7826.13	8015.43	22
X1T233	7723.68	7723.06	7821.63	7943.35	20
X1T476	7652.96	7652.56	7708.99	7775.39	18
X1T5583	7661.82	7661.42	7717.78	7784.10	18
X1T218	7666.84	7666.27	7748.76	7846.45	14
X1T509	7917.76	7917.37	7986.15	8085.21	14
X1T398	7841.00	7840.60	7902.64	7978.50	12
X1T451	7708.25	7707.86	7763.86	7829.76	12
X1T5270	7849.22	7848.93	7889.74	7937.59	8

Tabla 3.3 Simulación en Medio Voltaje.
Fuente: Autor.

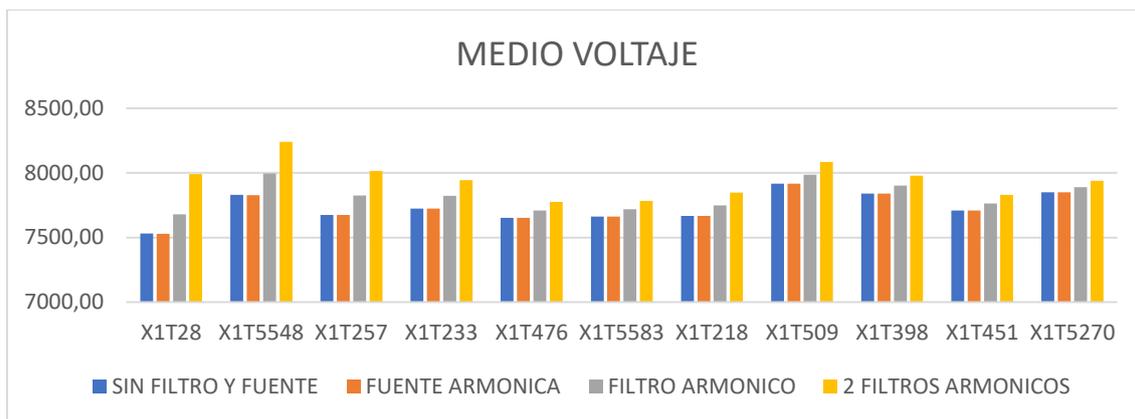


Figura 52 Medios Voltajes nodales Ilustrados
Fuente: Autor.

3.1.4 Reporte de distorsión armónica.

En el presente reporte de distorsión armónica se indicará cuáles fueron los resultados de la simulación al tener conectada la fuente armónica, seguido de eso se obtendrá el reporte al conectarse el filtro pasivo y las diferentes comparaciones al tener dos o más filtros conectados a la red y en qué porcentaje se redujo la distorsión armónica.

La tabla 3.4, 3.5 y 3.6 nos muestra los diferentes porcentajes de distorsión armónica individual existente en el circuito simulado con un nivel de bajo voltaje, las tablas 3.7, 3.8 y 3.9 muestran los porcentajes con un nivel de medio voltaje.

DISTORSION ARMÓNICA INDIVIDUAL EN EL LADO DE BAJO VOLTAJE						
LADO DE BAJA	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	THD (%)	DISTANCIA (Km)
X1T28	6.96	4.21	1.34	2.35	8.57	37
X1T5548	5.74	3.43	1.08	1.92	7.04	30
X1T257	5.71	3.38	1.08	1.90	6.99	22
X1T233	3.81	2.17	0.69	1.24	4.61	20
X1T5583	2.56	1.38	0.42	0.81	3.05	18
X1T476	2.56	1.38	0.42	0.81	3.05	18
X1T509	2.61	1.39	0.43	0.82	3.09	14
X1T218	3.56	2.02	0.63	1.16	4.30	14
X1T451	0.11	1.34	0.45	0.08	1.42	12
X1T398	0.11	1.35	0.45	0.08	1.43	12
X1T5270	2.01	1.04	0.32	0.65	2.38	8

Tabla 3.4 Porcentajes Armónicos con una fuente armónica conectada.
Fuente: Autor.

DISTORSION ARMÓNICA INDIVIDUAL EN EL LADO DE BAJO VOLTAJE CON 1 FILTRO							
LADO DE BAJA	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	THD (%)	DISTANCIA (Km)
X1T28	0.80	2.73	1.54	2.25	0.75	4.02	37
X1T5548	4.40	2.54	1.40	2.03	0.67	5.69	30

X1T257	4.38	2.51	1.38	2.01	0.65	5.64	22
X1T233	2.94	1.62	0.88	1.32	0.41	3.74	20
X1T476	1.99	1.03	0.55	0.87	0.25	2.47	18
X1T5583	1.98	1.03	0.55	0.87	0.25	2.47	18
X1T218	2.75	1.50	0.82	1.24	0.38	3.49	14
X1T509	2.02	1.04	0.56	0.87	0.25	2.51	14
X1T398	0.08	1.09	0.54	0.10	0.28	1.25	12
X1T451	0.08	1.08	0.54	0.09	0.28	1.24	12
X1T5270	1.56	0.77	0.42	0.70	0.20	1.93	8

Tabla 3.5 Porcentajes Armónicos con fuente y filtro armónico conectado.
Fuente: Autor.

DISTORSION ARMÓNICA INDIVIDUAL EN EL LADO DE BAJO VOLTAJE CON 2 FILTROS							
LADO DE BAJA	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	THD (%)	DISTANCIA (Km)
X1T28	0.79	2.75	1.55	2.23	0.76	4.02	37
X1T5548	1.29	2.40	1.33	1.93	0.64	3.66	30
X1T257	1.28	2.37	1.32	1.90	0.63	3.61	22
X1T233	0.86	1.54	0.85	1.26	0.40	2.36	20
X1T476	0.59	0.98	0.53	0.84	0.25	1.53	18
X1T5583	0.59	0.98	0.53	0.84	0.25	1.53	18
X1T218	0.81	1.43	0.78	1.19	0.37	2.21	14
X1T509	0.60	1.00	0.54	0.84	0.24	1.56	14
X1T398	0.03	1.04	0.52	0.10	0.27	1.20	12
X1T451	0.03	1.03	0.52	0.10	0.27	1.19	12
X1T5270	0.46	0.74	0.40	0.67	0.19	1.19	8

Tabla 3.6 Porcentajes Armónicos con una fuente y 2 filtros conectados.
Fuente: Autor.

DISTORSION ARMÓNICA INDIVIDUAL EN EL LADO DE MEDIO VOLTAJE						
LADO DE MEDIA	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	THD (%)	Distancia (Km)
X1T28	7.14	4.32	1.38	2.42	8.79	37
X1T5548	5.88	3.52	1.11	1.97	7.22	30
X1T257	5.86	3.48	1.11	1.96	7.18	22
X1T233	3.91	2.23	0.71	1.27	4.73	20
X1T5583	2.63	1.41	0.43	0.84	3.13	18
X1T476	2.63	1.41	0.43	0.83	3.13	18
X1T509	2.69	1.45	0.46	0.88	3.21	14
X1T218	3.65	2.07	0.65	1.20	4.42	14
X1T398	2.69	1.45	0.46	0.88	3.21	12
X1T451	2.69	1.45	0.46	0.88	3.22	12
X1T5270	2.06	1.06	0.33	0.67	2.44	8

Tabla 3.7 Distorsión en medio voltaje con una fuente armónica.
Fuente: Autor.

DISTORSION ARMÓNICA INDIVIDUAL EN EL LADO DE MEDIO VOLTAJE CON 1 FILTRO							
LADO DE MEDIA	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	THD (%)	DISTANCIA (Km)
X1T28	0.82	2.80	1.59	2.31	0.77	4.12	37
X1T5548	4.51	2.61	1.43	2.08	0.69	5.83	30

X1T257	4.50	2.58	1.42	2.08	0.68	5.80	22
X1T233	3.02	1.66	0.91	1.36	0.42	3.83	20
X1T476	2.04	1.05	0.56	0.89	0.26	2.54	18
X1T5583	2.03	1.05	0.56	0.89	0.26	2.54	18
X1T218	2.82	1.54	0.84	1.28	0.40	3.58	14
X1T509	2.08	1.09	0.60	0.95	0.27	2.62	14
X1T451	2.03	1.05	0.56	0.90	0.26	2.54	12
X1T398	2.03	1.05	0.56	0.90	0.26	2.54	12
X1T5270	1.60	0.79	0.43	0.72	0.20	1.98	8

Tabla 3.8 Distorsión en medio voltaje con una fuente y un filtro armónico.
Fuente: Autor.

DISTORSION ARMÓNICA INDIVIDUAL EN EL LADO DE MEDIO VOLTAJE CON 2 FILTROS							
LADO DE MEDIA	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	THD (%)	DISTANCIA (Km)
X1T28	0.81	2.82	1.60	2.29	0.78	4.12	37
X1T5548	1.32	2.46	1.37	1.98	0.66	3.75	30
X1T257	1.31	2.44	1.36	1.97	0.65	3.72	22
X1T233	0.88	1.58	0.88	1.30	0.41	2.43	20
X1T476	0.60	1.00	0.54	0.86	0.25	1.57	18
X1T5583	0.60	1.00	0.54	0.86	0.25	1.57	18
X1T218	0.83	1.46	0.80	1.23	0.38	2.27	14
X1T509	0.62	1.04	0.58	0.91	0.27	1.64	14
X1T451	0.62	1.04	0.58	0.91	0.27	1.64	12
X1T398	0.62	1.04	0.58	0.91	0.27	1.64	12
X1T5270	0.47	0.76	0.41	0.69	0.20	1.22	8

Tabla 3.9 Distorsión en medio voltaje con una fuente y 2 filtros armónicos.
Fuente: Autor.

3.1.5 Comparación de resultados.

Con los resultados de la simulación, se determina que la implementación de los filtros sintonizados serie RLC reduce satisfactoriamente el valor del %THD. Obteniéndose las siguientes reducciones, en la tabla 3.10 el resultado en un nivel de bajo voltaje y en la tabla 3.11 en un nivel de medio voltaje:

DISTORSION ARMÓNICA TOTAL EN BAJO VOLTAJE					
LADO DE BAJA	ARMÓNICOS (%)	1 FILTRO (%)	2 FILTROS (%)	LIMITE DE THDv (%)	DISTANCIA (Km)
X1T28	8.57	4.02	4.02	8.0	37
X1T5548	7.04	5.69	3.66	8.0	30
X1T257	6.99	5.64	3.61	8.0	22
X1T233	4.61	3.74	2.36	8.0	20
X1T476	3.05	2.47	1.53	8.0	18
X1T5583	3.05	2.47	1.53	8.0	18
X1T218	3.09	3.49	2.21	8.0	14
X1T509	4.30	2.51	1.56	8.0	14
X1T398	1.42	1.25	1.20	8.0	12

X1T451	1.43	1.24	1.19	8.0	12
X1T5270	2.38	1.93	1.19	8.0	8

Tabla 3.10 Distorsión armónica total en bajo voltaje resultados.
Fuente: Autor.

DISTORSION ARMÓNICA TOTAL EN MEDIO VOLTAJE					
LADO DE MEDIA	ARMÓNICOS (%)	1 FILTRO (%)	2 FILTROS (%)	LIMITE DE THDv (%)	DISTANCIA (Km)
X1T28	8.79	4.12	4.12	5.0	37
X1T5548	7.22	5.83	3.75	5.0	30
X1T257	7.18	5.80	3.72	5.0	22
X1T233	4.73	3.83	2.43	5.0	20
X1T476	3.13	2.54	1.57	5.0	18
X1T5583	3.13	2.54	1.57	5.0	18
X1T218	3.21	3.58	2.27	5.0	14
X1T509	4.42	2.62	1.64	5.0	14
X1T451	3.21	2.54	1.64	5.0	12
X1T398	3.22	2.54	1.64	5.0	12
X1T5270	2.44	1.98	1.22	5.0	8

Tabla 3.11 Distorsión Armónica Total en Medio Voltaje resultados.
Fuente: Autor.

3.2 CASO DE ESTUDIO 2: Circuito Alimentador X2

En este apartado se va a revisar los diferentes THDv de los nodos seleccionados en el circuito del alimentador X2, teniendo en cuenta que es el circuito con mayor amplitud de la Subestación El Chota y el que se encuentra con una mayor distorsión armónica.

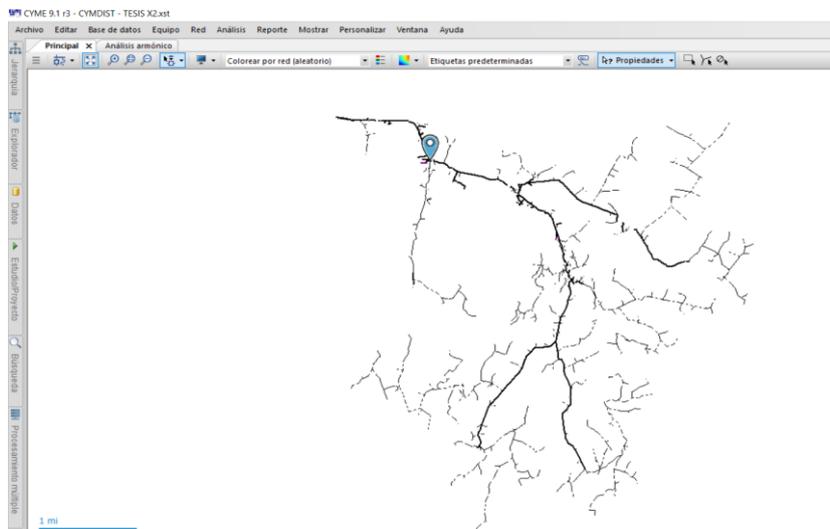


Figura 53 Circuito del alimentador X2 en CYME
Fuente: Autor.

En la figura 53 se aprecia el circuito X2 modelado en el simulador CYME al cual se le ha conectado una fuente de voltaje armónico para nuestro caso de estudio, la figura 54 muestra los niveles de distorsión aplicados a la fuente, estos son los otorgados por los analizadores colocados en el lado secundario de los transformadores en estudio.



Figura 54 Fuente de voltaje armónico.
Fuente: Autor.

3.2.1 Modelado del filtro armónico.

Para la modelación del filtro armónico se tomó en cuenta los datos obtenidos por los medidores ION conectados a los alimentadores que son de propiedad de la empresa de distribución EMELNORTE S.A, tal como se observa en la tabla 3.12, donde se tiene en cuenta que la potencia reactiva requerida en el circuito del alimentador X2 es de 884.83 kVAR en demanda máxima.

Local Time	kVA	kW	kVAR	PF	VLL ab	VLL bc	VLL ca	I a	I b	I c	Freq
2021-sep-11 19:15:00.000	3051.87	2920.78	884.83	95.70	14308.76	14139.80	14081.28	116.51	120.98	136.79	60.01

Tabla 3.12 Parámetros del alimentador X2 en máxima demanda.
Fuente: Autor.

Al utilizar tres filtros para compensar la distorsión armónica se ha dividido en 250 kVAR para cada filtro armónico los cuales son calculados en el simulador teniendo en cuenta los parámetros de: frecuencia sintonizada, factor de calidad, configuración y voltaje de funcionamiento tal como se observa en la figura 48, iniciamos insertando la potencia reactiva requerida, sintonizamos el tercer armónico, el cual es el que está dando problemas, un factor de calidad de 70 la configuración del filtro en estrella con conexión a tierra y una tensión nominal del condensador de 13800 voltios.

Después de darle al botón calcular, las diferentes impedancias equivalentes son calculadas por el software y el filtro está listo para ser conectado a nuestro circuito, la figura 49 se verifica los diferentes valores que se han dado para resistencia, inductancia y capacitancia.

3.2.3 Ubicación de los filtros.

Los filtros de armónicos se pueden ubicar en dispositivos individuales o en un bus común que alimenta muchas cargas, que puede ubicarse a bajo voltaje o a medios voltajes, para este estudio los filtros se ubicaran en la troncal para la cual se tomara en cuenta parte del circuito que cuenta con la mayor distorsión armónica.

Al tener en cuenta que la mayoría del circuito se encuentra contaminado se opta por ubicar los filtros en los mayores ramales que están conectados a los siguientes nodos, ver tabla.

FILTRO	NODO	CORDENADAS	
		X	Y
1	MTA_S_316330	833158,89	10049642,15
2	MTA_S_317918	840188,52	10048466,3
3	MTA_S_316576	840663,23	10043532,97

Tabla 3.13 Ubicaciones de los filtros.
Fuente: Autor.

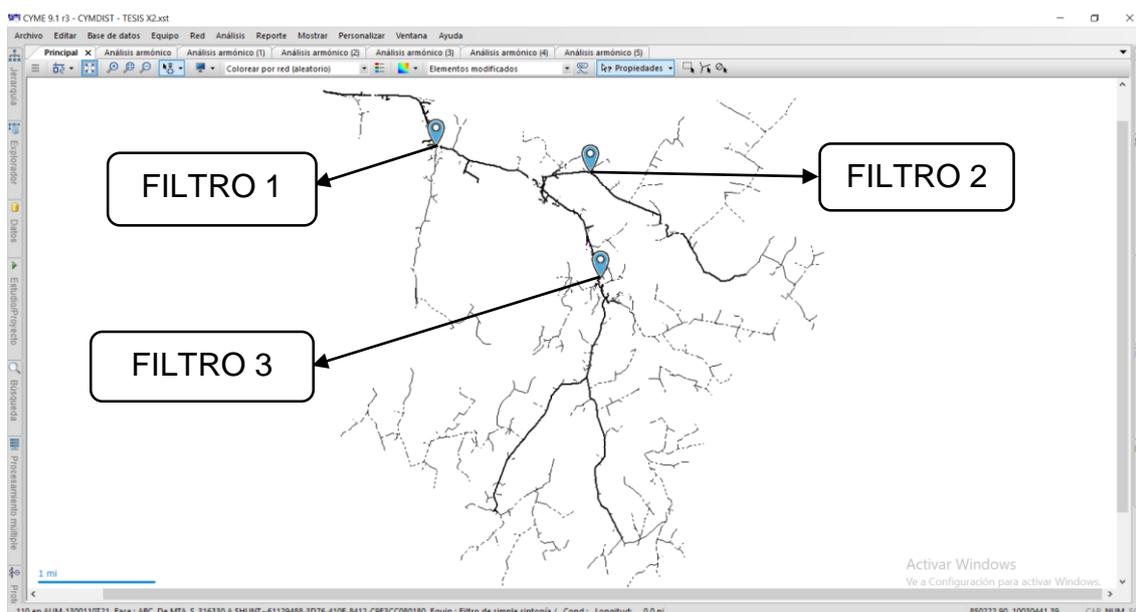


Figura 55 Ubicación de los filtros en el modelado CYME
Fuente: Autor.

3.2.4 Reporte de voltaje.

Los voltajes nodales que se presentan en las diferentes tablas se obtienen mediante el flujo de carga que se corre en el mismo simulador, estos voltajes están divididos en aquellos que se obtuvieron antes que se conecte la fuente armónica, aquellos que se obtuvieron después de conectarse la fuente armónica y después de que se conecte el filtro armónico, en sus diferentes niveles de voltaje.

La tabla 3.14 y 3.15 muestran los voltajes ordenados de acuerdo con la distancia del nodo y la fuente de alimentación, que se obtiene del simulador en sus diferentes casos, las figuras 55 y 56 muestra los voltajes ilustrados para una mejor comprensión.

Los nodos que se presentan son aquellos puntos a los cuales se tiene conectados los transformadores en estudio, para tener una mejor idea.

LADO DE BAJA	BAJO VOLTAJE					DISTANCIA (Km)
	NORMAL (V)	ARMÓNICOS (V)	1 FILTRO (V)	2 FILTROS (V)	3 FILTROS (V)	
X2T345	138.16	138.16	138.90	140.35	142.24	40
X2T302	138.00	137.99	138.74	140.19	142.08	36
X2T5061	137.65	137.64	138.40	140.32	141.81	29
X2T5323	138.49	138.48	139.22	140.67	142.55	26
X2T402	138.35	138.34	139.09	141.00	142.48	22
X2T650	136.82	136.81	137.57	139.50	141.00	22
X2T152	139.84	139.83	140.60	142.10	144.04	19
X2T407	138.69	138.69	139.43	141.34	142.82	19
X2T141	142.58	142.57	143.32	144.89	146.90	18
X2T5285	142.92	142.91	143.66	145.22	146.94	16
X2T5270	142.80	142.79	143.55	145.40	146.98	14
X2T62	142.87	142.86	143.57	144.27	144.97	7
X2T71	142.80	142.79	143.53	144.25	144.98	7
X2T24	143.68	143.68	144.15	144.60	145.05	5

Tabla 3.14 Simulación en Bajo Voltaje.
Fuente: Autor.

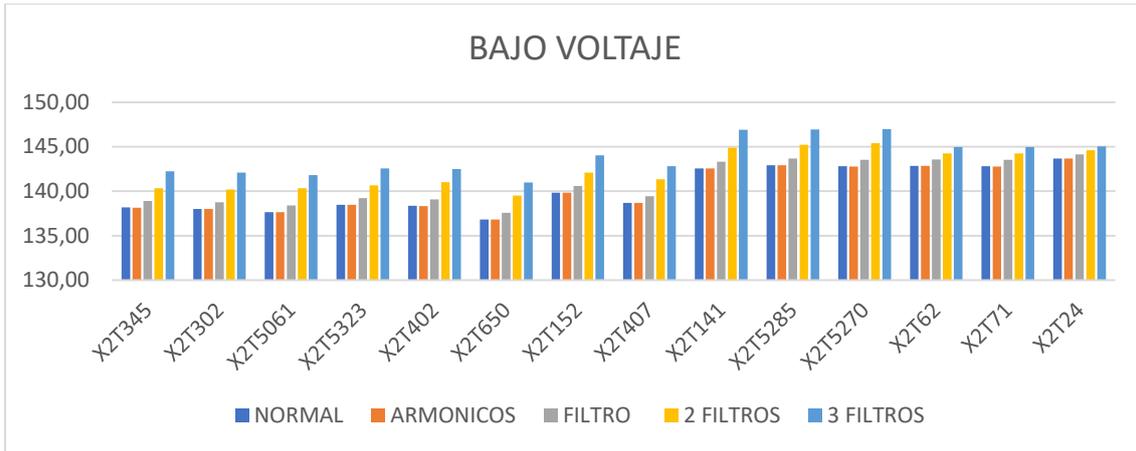


Figura 56 Bajos Voltajes nodales ilustrados.

Fuente: Autor.

LADO DE MEDIA	MEDIO VOLTAJE					DISTANCIA (Km)
	NORMAL (V)	ARMÓNICOS (V)	1 FILTRO (V)	2 FILTROS (V)	3 FILTROS (V)	
X2T345	7758.45	7757.99	7799.89	7880.87	7986.84	40
X2T302	7741.54	7741.09	7783.06	7864.20	7970.35	36
X2T5061	7721.99	7721.54	7763.66	7871.58	7955.12	29
X2T5323	7768.74	7768.28	7810.12	7890.98	7996.79	26
X2T402	7774.71	7774.26	7816.08	7923.26	8006.22	22
X2T650	7745.21	7744.75	7786.75	7894.35	7977.64	22
X2T152	7849.05	7848.60	7891.33	7975.44	8084.51	19
X2T407	7780.36	7779.90	7821.70	7928.80	8011.70	19
X2T141	8004.83	8004.40	8046.61	8134.16	8247.12	18
X2T5285	8017.32	8016.89	8059.03	8146.42	8243.12	16
X2T5270	8022.86	8022.43	8064.54	8168.62	8256.71	14
X2T62	8028.70	8028.43	8068.10	8106.50	8145.02	7
X2T71	8025.50	8025.22	8066.33	8106.13	8146.06	7
X2T24	8060.22	8060.04	8086.33	8111.75	8137.20	5

Tabla 3.15 Simulación en Medio Voltaje.

Fuente: Autor.

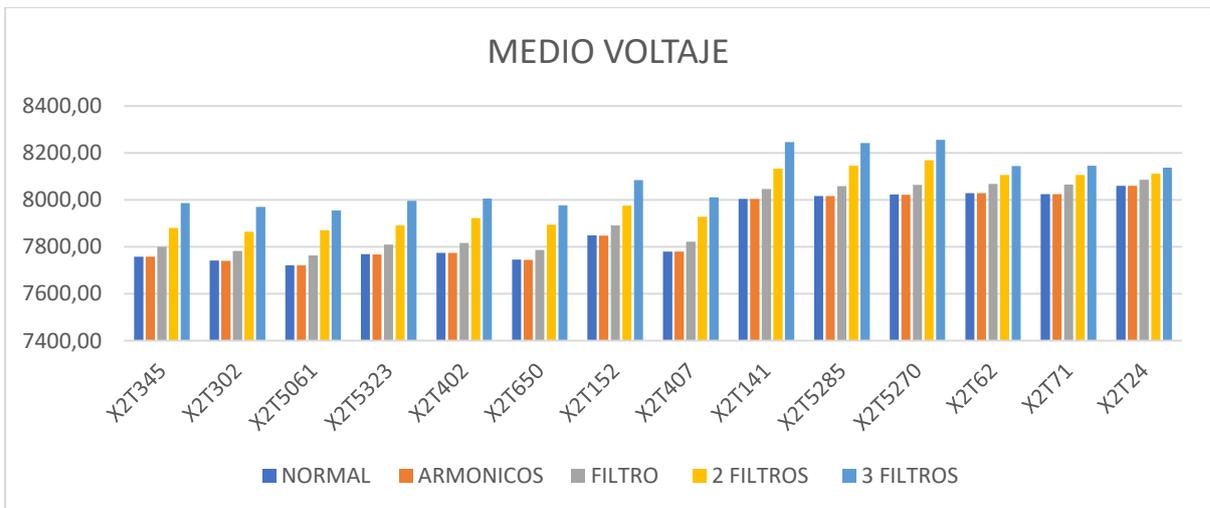


Figura 57 Bajos Voltajes nodales ilustrados.

Fuente: Autor.

3.2.5 Reporte de distorsión armónica.

En el presente reporte de distorsión armónica se indicará cuáles fueron los resultados de la simulación al tener conectada la fuente armónica, seguido de eso se obtendrá el reporte al conectarse el filtro pasivo y las diferentes comparaciones al tener dos o más filtros conectados a la red y en qué porcentaje se redujo la distorsión armónica.

La tabla 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19 muestra los diferentes porcentajes de distorsión armónica individual existente en el circuito simulado con un nivel de bajo voltaje, las tablas 3.20, 3.21, 3.22 y 3.23 muestran los porcentajes con un nivel de medio voltaje.

DISTORSION ARMÓNICA INDIVIDUAL Y TOTAL EN EL LADO DE BAJO VOLTAJE											
LADO DE BAJA	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	13avo. (%)	15avo. (%)	17avo. (%)	19avo. (%)	THD (%)	DISTANCIA (Km)
X2T345	12.38	4.12	1.35	2.33	0.73	0.22	0.21	0.18	0.09	13.35	40
X2T302	12.38	4.12	1.34	2.33	0.72	0.22	0.21	0.18	0.09	13.35	36
X2T5061	12.42	4.07	1.33	2.31	0.71	0.22	0.21	0.18	0.09	13.37	29
X2T5323	12.36	4.11	1.34	2.33	0.72	0.22	0.21	0.18	0.09	13.33	26
X2T402	12.40	4.06	1.33	2.32	0.71	0.22	0.21	0.18	0.09	13.35	22
X2T650	12.40	4.04	1.32	2.28	0.69	0.21	0.20	0.17	0.08	13.33	22
X2T407	12.40	4.06	1.33	2.33	0.71	0.22	0.21	0.18	0.09	13.35	19
X2T152	12.40	4.02	1.33	2.28	0.68	0.22	0.20	0.17	0.09	13.32	19
X2T141	12.33	4.02	1.33	2.36	0.70	0.23	0.22	0.18	0.09	13.27	18
X2T5285	12.34	4.02	1.33	2.37	0.70	0.23	0.22	0.18	0.09	13.28	16
X2T5270	12.33	4.03	1.33	2.37	0.71	0.23	0.22	0.18	0.09	13.28	14
X2T71	0.32	2.50	0.75	0.18	0.46	0.12	0.03	0.12	0.05	2.68	7
X2T62	0.31	2.42	0.73	0.17	0.44	0.12	0.03	0.12	0.04	2.59	7
X2T24	5.79	1.60	0.54	1.11	0.28	0.10	0.10	0.07	0.04	6.14	5

Tabla 3.16 Porcentajes Armónicos con una fuente armónica conectado.

Fuente: Autor.

DISTORSION ARMÓNICA INDIVIDUAL EN EL LADO DE BAJO VOLTAJE CON 1 FILTRO											
LADO DE BAJA	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	13avo. (%)	15avo. (%)	17avo. (%)	19avo. (%)	THD (%)	DISTANCIA
X2T345	8.95	3.34	0.79	1.40	0.54	0.30	0.16	0.09	0.09	9.71	40
X2T302	8.96	3.33	0.79	1.40	0.54	0.30	0.16	0.09	0.09	9.72	36
X2T5061	8.99	3.30	0.78	1.39	0.53	0.30	0.16	0.09	0.08	9.73	29
X2T5323	8.94	3.33	0.79	1.40	0.54	0.31	0.16	0.09	0.09	9.70	26
X2T650	8.97	3.27	0.78	1.37	0.52	0.29	0.15	0.08	0.08	9.70	22
X2T402	8.97	3.29	0.78	1.40	0.53	0.31	0.16	0.09	0.09	9.71	22
X2T407	8.97	3.29	0.78	1.40	0.53	0.31	0.16	0.09	0.09	9.71	19
X2T152	8.93	3.26	0.78	1.37	0.51	0.30	0.15	0.08	0.08	9.65	19
X2T141	8.86	3.26	0.78	1.42	0.52	0.32	0.16	0.09	0.09	9.60	18
X2T5285	8.87	3.26	0.78	1.42	0.53	0.32	0.16	0.09	0.09	9.61	16

X2T5270	8.86	3.26	0.78	1.42	0.53	0.32	0.17	0.09	0.09	9.60	14
X2T71	0.11	2.09	0.47	0.10	0.36	0.18	0.02	0.06	0.05	2.19	7
X2T62	0.11	2.02	0.45	0.10	0.35	0.18	0.02	0.06	0.05	2.12	7
X2T24	1.86	1.35	0.33	0.70	0.22	0.14	0.08	0.04	0.04	2.43	5

Tabla 3.17 Porcentajes Armónicos con fuente y filtro armónico conectado.
Fuente: Autor.

DISTORSION ARMÓNICA INDIVIDUAL EN EL LADO DE BAJO VOLTAJE CON 2 FILTROS											
LADO DE BAJA	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	13avo. (%)	15avo. (%)	17avo. (%)	19avo. (%)	THD (%)	DISTANCIA
X2T345	5.77	3.22	0.77	1.35	0.53	0.30	0.15	0.09	0.08	6.82	40
X2T302	5.77	3.21	0.76	1.35	0.53	0.30	0.15	0.09	0.08	6.81	36
X2T5061	1.56	2.96	0.72	1.27	0.49	0.28	0.14	0.08	0.08	3.70	29
X2T5323	5.76	3.21	0.76	1.35	0.53	0.30	0.15	0.09	0.08	6.80	26
X2T402	1.56	2.95	0.72	1.28	0.49	0.28	0.15	0.08	0.08	3.69	22
X2T650	1.56	2.94	0.71	1.26	0.48	0.27	0.14	0.08	0.07	3.67	22
X2T152	5.77	3.14	0.76	1.32	0.50	0.30	0.15	0.08	0.08	6.77	19
X2T407	1.56	2.95	0.72	1.28	0.49	0.29	0.15	0.08	0.08	3.69	19
X2T141	5.72	3.14	0.76	1.37	0.51	0.31	0.16	0.09	0.09	6.74	18
X2T5285	5.73	3.14	0.76	1.37	0.51	0.31	0.16	0.09	0.09	6.75	16
X2T5270	3.16	3.02	0.74	1.33	0.50	0.30	0.16	0.09	0.09	4.67	14
X2T71	0.11	2.11	0.47	0.11	0.36	0.19	0.02	0.06	0.05	2.21	7
X2T62	0.11	2.04	0.45	0.10	0.35	0.18	0.02	0.06	0.05	2.14	7
X2T24	1.87	1.36	0.34	0.70	0.22	0.14	0.08	0.04	0.04	2.45	5

Tabla 3.18 Porcentajes Armónicos con fuente y 2 filtros armónicos conectado.
Fuente: Autor.

DISTORSION ARMÓNICA INDIVIDUAL EN EL LADO DE BAJO VOLTAJE CON 3 FILTROS											
LADO DE BAJA	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	13avo. (%)	15avo. (%)	17avo. (%)	19avo. (%)	THD (%)	DISTANCIA (Km)
X2T345	1.35	2.92	0.72	1.25	0.50	0.28	0.14	0.08	0.08	3.58	40
X2T302	1.35	2.92	0.71	1.25	0.49	0.28	0.14	0.08	0.08	3.57	36
X2T5061	1.07	2.85	0.70	1.23	0.48	0.28	0.14	0.08	0.08	3.40	29
X2T5323	1.35	2.91	0.71	1.25	0.49	0.28	0.14	0.08	0.08	3.57	26
X2T402	1.07	2.84	0.70	1.23	0.48	0.28	0.14	0.08	0.08	3.40	22
X2T650	1.07	2.83	0.69	1.21	0.47	0.27	0.14	0.08	0.07	3.38	22
X2T152	1.33	2.86	0.70	1.22	0.47	0.28	0.14	0.08	0.08	3.50	19
X2T407	1.07	2.84	0.70	1.24	0.48	0.28	0.14	0.08	0.08	3.40	19
X2T141	1.33	2.85	0.70	1.26	0.48	0.29	0.15	0.08	0.08	3.51	18
X2T5285	2.74	2.95	0.72	1.30	0.49	0.30	0.15	0.09	0.09	4.34	16
X2T5270	2.17	2.90	0.71	1.28	0.49	0.30	0.15	0.08	0.08	3.96	14
X2T71	0.11	2.13	0.47	0.11	0.36	0.19	0.02	0.07	0.05	2.22	7
X2T62	0.11	2.06	0.46	0.10	0.35	0.18	0.02	0.06	0.05	2.15	7
X2T24	1.88	1.38	0.34	0.69	0.22	0.14	0.08	0.04	0.04	2.47	5

Tabla 3.19 Porcentajes Armónicos con fuente y 3 filtros armónicos conectados.
Fuente: Autor.

DISTORSION ARMÓNICA INDIVIDUAL EN EL LADO DE MEDIO VOLTAJE											
LADO DE MEDIA	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	13avo. (%)	15avo. (%)	17avo. (%)	19avo. (%)	THD (%)	DISTANCIA (Km)
X2T345	12.68	4.23	1.38	2.39	0.75	0.22	0.22	0.19	0.09	13.68	40
X2T302	12.69	4.22	1.37	2.39	0.74	0.23	0.22	0.19	0.09	13.68	36
X2T5061	12.73	4.17	1.37	2.37	0.73	0.22	0.21	0.18	0.09	13.70	29
X2T5061	12.63	4.10	1.37	2.36	0.71	0.23	0.21	0.18	0.09	13.58	29
X2T5323	12.67	4.21	1.37	2.39	0.74	0.23	0.22	0.19	0.09	13.66	26
X2T650	12.73	4.16	1.36	2.38	0.73	0.22	0.21	0.18	0.09	13.70	22
X2T402	12.72	4.16	1.36	2.38	0.73	0.23	0.22	0.18	0.09	13.68	22
X2T407	12.71	4.16	1.36	2.38	0.73	0.23	0.22	0.18	0.09	13.68	19
X2T152	12.71	4.12	1.36	2.34	0.70	0.23	0.21	0.17	0.09	13.66	19
X2T141	12.64	4.12	1.36	2.42	0.72	0.23	0.22	0.19	0.09	13.61	18
X2T5285	12.65	4.13	1.36	2.42	0.72	0.24	0.22	0.19	0.09	13.62	16
X2T5270	12.65	4.13	1.36	2.43	0.72	0.24	0.22	0.19	0.09	13.62	14
X2T71	8.15	2.47	0.82	1.57	0.44	0.14	0.14	0.11	0.06	8.71	7
X2T62	7.93	2.39	0.79	1.53	0.42	0.14	0.14	0.11	0.06	8.48	7
X2T24	5.93	1.64	0.56	1.14	0.29	0.10	0.11	0.07	0.04	6.29	5

Tabla 3.20 Porcentajes Armónicos con fuente armónica conectado.
Fuente: Autor.

DISTORSION ARMÓNICA INDIVIDUAL EN EL LADO DE MEDIO VOLTAJE CON 1 FILTRO											
LADO DE MEDIA	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	13avo. (%)	15avo. (%)	17avo. (%)	19avo. (%)	THD (%)	DISTANCIA
X2T345	9.18	3.43	0.81	1.44	0.56	0.31	0.16	0.09	0.09	9.96	40
X2T302	9.18	3.42	0.81	1.43	0.55	0.31	0.16	0.09	0.09	9.96	36
X2T5061	9.21	3.38	0.80	1.43	0.54	0.31	0.16	0.09	0.09	9.97	29
X2T5061	9.09	3.32	0.80	1.42	0.53	0.32	0.16	0.09	0.09	9.83	29
X2T5323	9.17	3.41	0.80	1.44	0.55	0.31	0.16	0.09	0.09	9.94	26
X2T650	9.21	3.37	0.80	1.43	0.54	0.31	0.16	0.09	0.09	9.97	22
X2T402	9.20	3.37	0.80	1.43	0.54	0.31	0.16	0.09	0.09	9.96	22
X2T407	9.19	3.37	0.80	1.43	0.54	0.31	0.16	0.09	0.09	9.95	19
X2T152	9.15	3.34	0.80	1.40	0.52	0.31	0.16	0.09	0.09	9.89	19
X2T141	9.08	3.34	0.80	1.46	0.54	0.33	0.17	0.09	0.09	9.84	18
X2T5285	9.09	3.34	0.80	1.46	0.54	0.33	0.17	0.09	0.09	9.85	16
X2T5270	9.09	3.35	0.80	1.46	0.54	0.33	0.17	0.09	0.09	9.85	14
X2T71	2.61	2.07	0.50	0.98	0.34	0.21	0.11	0.06	0.06	3.53	7
X2T62	2.54	2.00	0.49	0.95	0.33	0.21	0.11	0.06	0.06	3.43	7
X2T24	1.90	1.38	0.34	0.71	0.23	0.14	0.08	0.04	0.04	2.50	5

Tabla 3.21 Porcentajes Armónicos con fuente y filtro armónico conectado.
Fuente: Autor.

DISTORSION ARMÓNICA INDIVIDUAL EN EL LADO DE MEDIO VOLTAJE CON 2 FILTROS											
LADO DE MEDIA	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	13avo. (%)	15avo. (%)	17avo. (%)	19avo. (%)	THD (%)	DISTANCIA
X2T345	5.91	3.30	0.79	1.39	0.54	0.30	0.16	0.09	0.09	6.99	40
X2T302	5.91	3.29	0.78	1.38	0.54	0.30	0.16	0.09	0.09	6.98	36
X2T5061	1.60	3.03	0.74	1.31	0.50	0.29	0.15	0.08	0.08	3.79	29

X2T5061	1.57	2.98	0.74	1.29	0.49	0.29	0.15	0.08	0.08	3.73	29
X2T5323	5.91	3.29	0.78	1.38	0.54	0.31	0.16	0.09	0.09	6.98	26
X2T650	1.60	3.03	0.74	1.31	0.50	0.29	0.15	0.08	0.08	3.79	22
X2T402	1.60	3.03	0.74	1.31	0.50	0.29	0.15	0.08	0.08	3.79	22
X2T152	5.91	3.22	0.77	1.35	0.51	0.30	0.15	0.08	0.08	6.94	19
X2T407	1.60	3.03	0.74	1.31	0.50	0.29	0.15	0.08	0.08	3.79	19
X2T141	5.87	3.22	0.78	1.40	0.52	0.32	0.16	0.09	0.09	6.91	18
X2T5285	5.87	3.22	0.78	1.40	0.52	0.32	0.16	0.09	0.09	6.92	16
X2T5270	3.24	3.10	0.75	1.36	0.51	0.31	0.16	0.09	0.09	4.79	14
X2T71	2.62	2.09	0.51	0.97	0.34	0.21	0.11	0.06	0.06	3.56	7
X2T62	2.56	2.02	0.49	0.95	0.33	0.21	0.11	0.06	0.06	3.46	7
X2T24	1.92	1.39	0.35	0.71	0.23	0.15	0.08	0.04	0.04	2.52	5

Tabla 3.22 Porcentajes Armónicos con fuente y 2 filtros armónicos conectado.
Fuente: Autor.

DISTORSION ARMÓNICA INDIVIDUAL EN EL LADO DE MEDIO VOLTAJE CON 3 FILTROS											
LADO DE MEDIA	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	13avo. (%)	15avo. (%)	17avo. (%)	19avo. (%)	THD (%)	DISTANCIA (Km)
X2T345	1.38	3.00	0.73	1.28	0.51	0.29	0.15	0.09	0.08	3.67	40
X2T302	1.38	2.99	0.73	1.28	0.50	0.29	0.15	0.08	0.08	3.66	36
X2T5061	1.10	2.92	0.72	1.26	0.49	0.28	0.14	0.08	0.08	3.49	29
X2T5323	1.38	2.99	0.73	1.28	0.50	0.29	0.15	0.08	0.08	3.66	26
X2T650	1.10	2.91	0.72	1.26	0.49	0.28	0.14	0.08	0.08	3.48	22
X2T402	1.10	2.91	0.72	1.27	0.49	0.29	0.15	0.08	0.08	3.48	22
X2T152	1.36	2.93	0.72	1.25	0.48	0.29	0.14	0.08	0.08	3.59	19
X2T407	1.10	2.91	0.71	1.27	0.49	0.29	0.15	0.08	0.08	3.48	19
X2T141	1.36	2.92	0.72	1.29	0.49	0.30	0.15	0.08	0.08	3.60	18
X2T5285	2.81	3.0	0.74	1.33	0.50	0.31	0.16	0.09	0.09	4.45	16
X2T5270	2.23	2.98	0.73	1.31	0.50	0.30	0.15	0.09	0.09	4.06	14
X2T71	2.63	2.10	0.51	0.97	0.35	0.21	0.11	0.06	0.06	3.57	7
X2T62	2.57	2.04	0.50	0.95	0.34	0.21	0.11	0.06	0.06	3.47	7
X2T24	1.93	1.41	0.35	0.71	0.23	0.15	0.08	0.04	0.04	2.53	5

Tabla 3.23 Porcentajes Armónicos con fuente y 3 filtros armónicos conectado.
Fuente: Autor.

3.2.6 Comparación de resultados.

Con los resultados de la simulación, se determina que la implementación de los filtros sintonizados serie RLC reduce satisfactoriamente el valor del %THD. Obteniéndose las siguientes reducciones, en la tabla 3.24 el resultado en un nivel de bajo voltaje y en la tabla 3.25 en un nivel de medio voltaje:

DISTORSION ARMÓNICA TOTAL EN BAJO VOLTAJE						
LADO DE BAJA	ARMÓNICOS (%)	FILTRO (%)	2 FILTROS (%)	3 FILTROS (%)	LIMITE DE THDv (%)	DISTANCIA (Km)
X2T345	13.40	9.71	6.82	3.58	8.0	40
X2T302	13.41	9.72	6.81	3.57	8.0	36

X2T5061	13.43	9.73	3.70	3.40	8.0	29
X2T5323	13.39	9.70	6.80	3.57	8.0	26
X2T402	13.41	9.71	3.69	3.40	8.0	22
X2T650	13.39	9.70	3.67	3.38	8.0	22
X2T152	13.37	9.65	6.77	3.50	8.0	19
X2T407	13.41	9.71	3.69	3.40	8.0	19
X2T141	13.32	9.60	6.74	3.51	8.0	18
X2T5285	13.33	9.61	6.75	4.34	8.0	16
X2T5270	13.33	9.60	4.67	3.96	8.0	14
X2T62	2.78	2.12	2.14	2.15	8.0	7
X2T71	2.87	2.19	2.21	2.22	8.0	7
X2T24	6.59	2.43	2.45	2.47	8.0	5

Tabla 3.24 Distorsión armónica total en bajo voltaje resultados.
Fuente: Autor.

DISTORSION ARMÓNICA TOTAL EN MEDIO VOLTAJE						
LADO DE MEDIA	ARMÓNICOS (%)	FILTRO (%)	2 FILTROS (%)	3 FILTROS (%)	LIMITE DE THDv (%)	DISTANCIA (Km)
X2T345	13.74	9.96	6.99	3.67	5.0	40
X2T302	13.74	9.96	6.98	3.66	5.0	36
X2T5061	13.63	9.83	3.73	3.44	5.0	29
X2T5323	13.72	9.94	6.98	3.66	5.0	26
X2T402	13.75	9.96	3.79	3.48	5.0	22
X2T650	13.76	9.97	3.79	3.48	5.0	22
X2T152	13.70	9.89	6.94	3.59	5.0	19
X2T407	13.74	9.95	3.79	3.48	5.0	19
X2T141	13.65	9.84	6.91	3.60	5.0	18
X2T5285	13.67	9.85	6.92	4.45	5.0	16
X2T5270	13.66	9.85	4.79	4.06	5.0	14
X2T62	9.05	3.41	3.43	3.45	5.0	7
X2T71	9.29	3.51	3.53	3.55	5.0	7
X2T24	6.76	2.50	2.52	2.53	5.0	5

Tabla 3.25 Distorsión armónica total en Medio Voltaje resultados.
Fuente: Autor.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

La investigación bibliográfica realizada permitió conocer el tema a fondo, estar al tanto sobre las distorsiones armónicas, las soluciones aplicadas y la REGULACIÓN No. ARCERNNR 002/20 denominada "Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica" la cual se encuentra vigente.

La inserción de cargas no lineales produce corrientes y voltajes de frecuencia diferente a la del diseño del sistema eléctrico (60 Hz), los cuales fluyen a través de la red eléctrica afectando a dispositivos y equipo que no fueron diseñados para operar en condiciones diferentes a la del sistema.

Mediante el análisis de los diferentes parámetros eléctricos concedidos por la empresa EMELNORTE S.A. se pudo obtener los máximos y mínimos porcentajes de contaminación de la red eléctrica los cuales sobrepasaron los límites permitidos por la regulación en vigencia, esto permitió su posterior simulación.

Las sobretensiones o atenuaciones de voltaje producidas por la presencia de armónicas causan en muchas ocasiones daño a los equipos conectados al sistema, y mal funcionamiento de las protecciones. Por ello es necesario utilizar herramientas computacionales que ayuden a predecir el comportamiento del sistema eléctrico en presencia de armónicas y los efectos que se puedan producir en los dispositivos que se encuentren conectados al sistema.

El filtro de las señales armónicas es una solución viable para los problemas de distorsión armónica y el filtro de sintonía simple utilizado en este estudio fue la solución propuesta que llegó a ser confiable según lo mostraron los resultados, debido a que el arreglo conformado por la reactancia inductiva, capacitiva y la resistencia ofrecen un camino de baja impedancia a la frecuencia para la cual es sintonizado el filtro.

Recomendaciones

Para un posterior análisis, se podría ayudar con analizadores de red en medio voltaje para establecer el nivel de armónicos en alimentadores primarios más cercanos a la realidad y realizar el mismo análisis establecido en este estudio, es óptimo mantener un registro de mediciones en niveles de medio voltaje en lo que ha distorsión armónica se refiere para así tener una referencia con lo que ocurre en los diferentes niveles de voltaje.

La empresa de distribución EMELNORTE S.A. deberá tener en consideración este estudio realizado, debido a que la Subestación El Chota presenta este problema y podría representarle pérdidas económicas de suma importancia tanto como empresa distribuidora como para el consumidor final, ya que si el problema llegara a tener mayor impacto la pérdida de equipos sería muy elevada y los usuarios finales perderían el servicio temporalmente hasta realizar las reparaciones necesarias.

Buscar nuevas soluciones a la disminución de distorsiones armónicas en los circuitos de estudio, tal y como puede ser, la división del circuito X2 ya que es el que cuenta con una mayor extensión de red y con un mayor problema de contaminación armónica, el aumento de un nuevo alimentador que también sería para el circuito X2 y el redimensionamiento de conductores, etc.

REFERENCIAS

- Aranda Mendoza, J. R. (2015). "ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA AMORTIGUACIÓN Y ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA."
[http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/4545/Aranda M..pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/4545/ArandaM..pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Arcila, J. D. (2016). ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS. *Armónicos En Sistemas Eléctricos*, 1–26. <http://www.ieb.com.co>
- ARCONEL. (2018). ARCONEL 005/18: Calidad de energía de los consumidores. <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/01/Regulacion-de-Calidad-Suscrita.pdf>
- Atalaya Sánchez, J. C. (2016). Efectos De Los Armónicos En Transformadores De Distribución. *Universidad Nacional de Ingeniería, crecimiento economico en la region de puno*, 2071. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/9601>
- Caicedo, J. E., Romero, A. A., & Zini, H. C. (2017). Evaluación de la distorsión armónica en sistemas de distribución residencial: Revisión literaria. *Ingenieria e Investigacion*, 37(3), 72–84. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v37n3.64913>
- Canabal, E. (2013). *Los armónicos: causas, consecuencias y soluciones*. <https://gesternova.com/los-armonicos-causas-consecuencias-y-soluciones/>
- Carrión, J. E., Martínez, A., & del Castillo Serpa, A. (2019). TRABAJO TEÓRICO EXPERIMENTAL Efectos de los armónicos de corriente en las pérdidas de transformadores de distribución monofásicos transformers losses. 40, 112–127. <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>
- CENNELSA S.A. (2005). Regulación De Tensión En Instalaciones Eléctricas. *Boletín Técnico - marzo 2005, Ntc 2050*, 16.
- Chugá Ortiz, K. S. (2015). CARACTERIZACIÓN DE ARMÓNICOS EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO (SNI) A PARTIR DE INFORMACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO DE ÁREA EXTENDIDA (WAMS).
- Condori, F. P., & Ramos, F. J. (2016). *Armonicos en los sistemas eléctricos*. 10.

- esri. (2017). *¿Qué es ArcGIS? ¿Qué Es ArcGIS?*
<https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- FLUKE, C. (2015). *Estándares de armónicos: ¿Qué son y cómo se utilizan?*
https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9901240_ENG_A_W.PDF
- Kanjiya, P., Khadkikar, V., & Zeineldin, H. H. (2015). Optimal control of shunt active power filter to meet IEEE Std. 519 current harmonic constraints under nonideal supply condition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(2), 724–734.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2341559>
- Lastre, A., Torriente, I., Méndez, E. F., & Cordovés, A. (2017). Conceptual model of a logical system processor of selection to electrical filters for correction of harmonics in low voltage lines. *AIP Conference Proceedings*, 1836(June).
<https://doi.org/10.1063/1.4981945>
- Lenis Chambi, R. L., & Vasquez-Arnez, R. L. (2000). A study of the harmonic perturbation within the power quality in the Bolivian distribution system. *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, 3, 828–833. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2000.896836>
- Li, C. S., Bai, Z. X., Xiao, X. Y., Liu, Y. M., & Zhang, Y. (2016). Research of harmonic distortion power for harmonic source detection. *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, 2016-Decem*, 126–129.
<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2016.7783437>
- Montero-Robina, P., & Alvarez, F. G. (2019). *DETECCIÓN Y SUPRESIÓN DE ARMÓNICOS DE BAJO ORDEN EN LA CORRIENTE ELÉCTRICA*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497169.535>
- Mora Sanchez, J. D., & Cevallos Chavez, Y. J. (2014). “ESTUDIO Y ANALISIS DE CALIDAD DE ENERGIA ENFOCADO EN NIVEL DE ARMONICOS EN EL SISTEMA ELECTRICO DE LA SUBESTACION ENFRIADORA 1 DE HOLCIM ECUADOR PLANTA GUAYAQUIL.”
- Paredes de Vásquez, M. (2009). *ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS DE POTENCIA* (1). 1, 1–12.

- Sánchez Huerta, V. (2016). *No Title*. Perturbaciones En La Red Eléctrica. <http://www.afinidadelectrica.com/articulo.php?IdArticulo=165>
- Soluciones, C. (2018). *Análisis del sistema de distribución Modelado, análisis y planificación confiables para mejorar el desempeño del sistema de distribución Simulaciones*.
- Tejada, Alexis., & Llamas, Armando. (2002). *EFFECTOS DE LAS ARMÓNICAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS* A. Tejada, A. Llamas 1. 8.
- Téllez, E. (2015). Distorsión Armónica. In *Revista Programa de ahorro de energía* (Issue 222).
- Vinnal, T., Jarkovoi, M., & Kutt, L. (2018). Harmonic currents and voltages in lv networks of Estonia: Measurement results, case studies. *2018 IEEE 59th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2018 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2018.8659875>