

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



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

**PROPUESTA TÉCNICA PARA LA ATENUACIÓN DEL FENÓMENO DE
RESONANCIA DE LA SUBESTACIÓN DE DISTRIBUCIÓN LA ESPERANZA DE LA
EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL NORTE**

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

Autor:

Alejandro Javier Chiluisa Castro

Director:

Ing. Segundo Hernán Pérez Cruz, MBA.

Asesores:

Ing. Jhonny Javier Barzola Iza, MSc.

Ing. Franklin Ramiro Flores Haro, MBA.

Ibarra-Ecuador

2021



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:	1003848031		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Chiluisa Castro Alejandro Javier		
DIRECCIÓN:	Ibarra		
EMAIL:	javi941505@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	+593962747573	TELÉFONO MÓVIL:	+593993293578

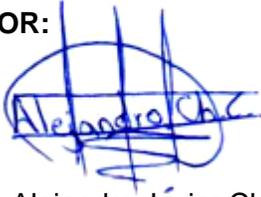
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	PROPUESTA TÉCNICA PARA LA ATENUACIÓN DEL FENÓMENO DE RESONANCIA DE LA SUBESTACIÓN DE DISTRIBUCIÓN LA ESPERANZA DE LA EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL NORTE
AUTOR (ES):	Alejandro Javier Chiluisa Castro
FECHA: DD/MM/AAAA	15/10/2021
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Segundo Hernán Pérez Cruz MBA.

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 15 días del mes de octubre de 2021

EL AUTOR:



(Firma)

Nombre: Alejandro Javier Chiluisa Castro



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

Ing. Hernán Pérez MSc.

CERTIFICACIÓN

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante: Chiluisa Castro Alejandro Javier, certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **“PROPUESTA TÉCNICA PARA LA ATENUACIÓN DEL FENÓMENO DE RESONANCIA DE LA SUBESTACIÓN DE DISTRIBUCIÓN LA ESPERANZA DE LA EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL NORTE”**. Para la obtención de título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico; aprobando la defensa, impresión y empastado.



Firmado electrónicamente por:

SEGUNDO
HERNAN PEREZ
CRUZ

.....

Ing. Hernán Pérez MSc

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

El presente proyecto de tesis se lo dedico a mis padres en especial a mi madre Amparo Castro (+) que desde el comienzo me apoyo para empezar con esta etapa y hasta hoy desde el cielo me guió para poder culminarla y Galo Chiluisa por todo su esfuerzo y apoyo invertido en cada etapa de mi vida además de sus grandes e importantes consejos que han marcado la persona que soy hoy.

A mi hermano Víctor Castro se lo dedico, por su tolerancia y apoyo en cada una de las etapas para culminar con una meta más en mi vida ya que desde pequeño él fue como otro padre con sus consejos y ejemplo de la gran persona que hoy en día muestra ser

A mi compañera de vida Gabriela Yambay y mis hijas Dayra y Rebeca Chiluisa por que fueron el motor que me permitió seguir con este sueño de obtener este título y seguirán siendo ese motor para día a día seguir culminando más metas tanto como profesional y como un buen padre de familia.

Dedicar este logro a todos los familiares y amigos que fueron de un gran apoyo incondicional para finalizar con este proceso, estando siempre presentes con sus consejos, enseñanzas y verdadera amistad que perdurara hasta el fin de los tiempos.

Alejandro J. Chiluisa C.

TABLA DE CONTENIDO

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	II
CONSTANCIAS	II
ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR	IV
DEDICATORIA	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
INTRUDUCCIÓN	XIV
A.1. Contextualización.....	XIV
A.2. Planteamiento del problema.....	XV
A.3. Justificación.	XV
A.4. Alcance.	XVI
A.5. Objetivo general.....	XVI
A.6. Objetivos específicos	XVI
CAPÍTULO 1	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Sistemas eléctricos.....	1
1.2.1 Generación	1
1.2.2 Transmisión	1
1.2.3 Distribución	2
1.3 Subestación eléctrica.....	2
1.3.1 Criterios para el diseño de subestaciones de distribución.	3
1.3.2 Tipos de subestaciones eléctricas.....	4
1.4 Componentes primarios de una subestación eléctrica	5
1.4.1 Barra.....	5
1.4.2 Transformador de potencia	6
1.4.3 Transformador de potencial	7
1.4.4 Transformador de corriente.....	8
1.4.5 Interruptor de potencia	8
1.4.6 Seccionador	9
1.4.7 Apartarrayos	10
1.4.8 Relés de protección	10
1.4.9 Puesta a tierra.....	10

1.4.10 Capacitores.....	11
1.5 Problemas por la presencia de capacitores	12
1.5.1 Sobretensiones en equipos	12
1.5.2 Armónicos.....	13
1.5.3 Origen de los armónicos	13
1.5.3.1 Cuantificación de la distorsión armónica	14
1.5.3.2 Efectos de los armónicos en capacitores.	14
1.5.3.3 Trayectoria de los armónicos en los sistemas de distribución	15
1.6 Resonancia eléctrica	16
1.6.1 Resonancia en paralelo.....	16
1.6.2 Resonancia en serie	18
1.6.3 Efectos de la resonancia eléctrica.....	20
1.7 Cymdist	22
CAPÍTULO 2.....	24
2.1 Introducción.....	24
2.2 Software y materiales	25
2.3 Descripción general de la subestación La Esperanza.....	25
2.4 Representación del sistema.....	26
2.5 Datos disponibles para el análisis.....	26
2.6 Aplicación matemática para el cálculo de la frecuencia de resonancia	27
2.7 Software CYMDIST para el análisis de armónicos.....	31
2.7.1 Configuración inicial para el análisis de frecuencia de resonancia	32
2.7.2 Carga en los alimentadores	32
2.7.3 Banco de Capacitores.....	34
2.7.5 Análisis de armónicos en CYMDIST.....	38
2.7.6 Filtro de sintonía simple	40
2.7.7 Filtro de sintonía doble.....	44
CAPÍTULO 3.....	49
3.1 Introducción.....	49
3.1.1 La subestación Esperanza	49
3.2 Análisis de resonancia	49
3.3 Análisis con filtro de simple sintonía.....	51
3.4 Análisis con filtro de doble sintonía	53
3.5 Comparación de resultados	55
CONCLUSIONES	57

RECOMENDACIONES	58
ANEXOS.....	62
Anexo 1: Valores en amperios de las corrientes armónicas presentes en la subestación.	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Sistema Eléctrico de potencia	2
Fig. 2 Barraje de una subestación Eléctrica	6
Fig. 3 Transformador de potencia	6
Fig. 5 Transformador de potencial capacitivo	8
Fig. 6 Transformador de corriente	8
Fig. 7 Interruptor de potencia	9
Fig. 8 Seccionador	9
Fig. 9 Apartarrayos	10
Fig. 10 Sistema de puesta a tierra.....	11
Fig. 11 Banco de Capacitores	12
Fig. 12 Trayectoria de corriente armónica en un sistema inductivo	15
Fig. 13 Trayectoria de corriente armónica en un sistema inductivo con capacitor	16
Fig. 14 Circuito Equivalente de resonancia en paralelo.....	17
Fig. 15 Gráfica de resonancia en paralelo.....	18
Fig. 16 Circuito equivalente de Resonancia serie.....	19
Fig. 17 Comportamiento de sistema de resonancia en serie de un circuito	20
Fig. 18 Diagrama unifilar subestación La Esperanza	26
Fig.19 Configuración de la impedancia equivalente	32
Fig. 20 Ventana explorador de Cymdist	33
Fig. 21 Configuración de la carga de cada alimentador.....	33
Fig. 22 Pestaña equipos Cymdist.....	34
Fig. 23 Parámetros del banco de condensadores	34
Fig. 24 Capacitor de la subestación La Esperanza modelado	35
Fig. 25 Modelación de fuente de frecuencias	36
Fig. 26 Parámetros de la fuente de frecuencias	36
Fig. 27 Fuente de Frecuencia implementada en la modelación.....	37
Fig. 28 Configuración de potencias de la fuente de frecuencias.....	38
Fig. 29 Análisis de armónicos	39
Fig. 30 Configuración de parámetros para el análisis de armónicos.....	39
Fig. 31 Implementación del filtro de simple sintonía	40
Fig.32 Parámetros del filtro de simple sintonía.....	43
Fig. 33 Impedancia equivalente del filtro de simple sintonía.....	43
Fig.34 Implementación del filtro de simple sintonía	44

Fig.35 impedancia equivalente del filtro de doble sintonía	48
Fig. 36 Gráfica del barrido de impedancia (posible resonancia en el 5to armónico)	50
Fig. 37 Ondas de tensión con distorsión armónica presente	50
Fig. 38 Gráfica del barrido de impedancia con respuesta del filtro de simple sintonía.....	52
Fig. 39 Ondas de tensión con distorsión armónica presente	52
Fig. 40 Barrido de impedancia con respuesta del filtro de doble sintonía	54
Fig. 41 ondas de tensión con la implementación del filtro de doble sintonía.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación de subestaciones	4
Tabla 1.2 Niveles de tensión armónicos permitidos según normar IEEE519/EN50160	14
Tabla 1.3 Niveles de corrientes armónicos permitidos según las normas IEEE519.....	14
Tabla 1.4 Índices de THD(I) según las normas IEC/EN 61000-2-2.....	21
Tabla 1.5 Índices de THD según las normas IEC/EN 61000-2-2	22
Tabla 2.1 Características eléctricas de los bancos de capacitores de la subestación La Esperanza	26
Tabla 2.2 Parámetros del filtro de simple sintonización.....	42
Tabla 2.3 Parámetros del filtro de doble sintonía	48
Tabla 3.1 Tensiones armónicas al momento de resonancia.....	51
Tabla 3.2 Distorsión armónica individual.....	51
Tabla 3.3 Distorsión de tensión armónica individual con el filtro de simple sintonía.....	53
Tabla 3.4 Tensiones armónicas con filtro de simple sintonía	53
Tabla 3.5 Distorsión de tensión armónica con filtro de doble sintonía.....	55
Tabla 3.6 Voltajes armónicos implementado el filtro de doble sintonía.....	55
Tabla 3.7 Comparación de resultados entre filtros pasivos.....	56

RESUMEN

El presente trabajo se lo plantea con el fin de reducir el riesgo del fenómeno de resonancia en una subestación, este fenómeno afecta a los equipos especialmente a los capacitores si estos son instalados en una subestación y como consecuencia representa pérdidas económicas considerables para la empresa distribuidora.

Los datos recolectados de la subestación La Esperanza de la empresa eléctrica de distribución EMELNORTE indica que presenta distorsiones armónicas por encima de lo establecido en el estándar IEEE 519-2014 lo que si no se implementa los correctivos necesarios la subestación llegaría a entrar en resonancia afectando a todos los equipos instalados, en especial los capacitores.

Mediante el uso del software CYMDIST se realizó el modelamiento de la subestación, este software realiza un análisis armónico que permite modelar el barrido de frecuencia y localizar condiciones de resonancia presente en la subestación. Se uso la implementación de filtros sintonizados como solución a este problema, los parámetros de cada filtro fueron calculados de forma que sean lo más eficaces posible.

Finamente, se presenta los valores obtenidos de distorsión armónica total e individual de cada orden armónico dentro de los valores aceptables en la norma de control de armónicos que representa una mejora en la calidad de energía y ondas de tensión en la barra de la subestación.

Palabras Claves: Calidad de energía, resonancia eléctrica, distorsión armónica, filtros pasivos sintonizados.

ABSTRACT

This work is proposed in order to reduce the risk of resonance phenomenon in a substation, this phenomenon affects the equipment especially capacitors if they are installed in a substation and as a result represents considerable economic losses for the distribution company.

The data collected from the substation La Esperanza of the electric distribution company EMELNORTE indicates that it presents harmonic distortions above those established in the IEEE 519-2014 standard, which if the necessary corrective measures are not implemented, the substation would enter into resonance affecting all the installed equipment, especially the capacitors.

The substation modeling was performed using CYMDIST software, this software performs a harmonic analysis that allows modeling the frequency sweep and locating resonance conditions present in the substation. The implementation of tuned filters was used as a solution to this problem, the parameters of each filter were calculated so that they are as efficient as possible.

Finally, the obtained values of total and individual harmonic distortion of each harmonic order are presented within the acceptable values in the harmonic control standard that represents an improvement in the power quality and voltage waves in the substation bus.

Keywords: Power quality, electrical resonance, harmonic distortion, tuned passive filters.

INTRUDUCCIÓN

A.1. Contextualización

Una gran contradicción consiste en que una gran parte de cargas no lineales, responsables de los grandes logros en la industria debido a la automatización, son cargas electrónicas altamente sensibles a las variaciones en el suministro eléctrico que están siendo perturbados por su propia presencia. (Holguin & Gómez Coello, 2010)

En las subestaciones el fenómeno de resonancia se presenta de forma general, ya que es un problema común, este fenómeno puede ser provocado por varios factores entre los principales se puede decir que son: la forma de construcción de la subestación, el tipo de conexión implementado en la subestación, la longitud de la acometida, mala operación de la subestación, las características del transformador de potencia a utilizar y en especial las maniobras que se realiza en la subestación eléctrica. (PIÑATE, 2015)

Debido a que el transformador presenta una impedancia no lineal, se puede decir que el sistema es más propenso a sufrir el fenómeno de resonancia mediante la combinación de las reactancias capacitivas que pueden ser generadas por un conductor de potencia, banco de capacitores o cualquier otro elemento que genere carga capacitiva. (Ordoñez & Nieto, 2010)

En una subestación eléctrica, el transformador es el elemento principal, por lo que es importante considerar su comportamiento, cuando la reactancia de magnetización del transformador puede desarrollar una topología de circuito serie con una capacitancia existente en el circuito, como ejemplo la capacitancia a tierra del cable de acometida, se obtiene un fenómeno de resonancia serie, esto sucede principalmente cuando los transformadores operan con muy poca carga o en vacío y la longitud a los dispositivos de desconexión monofásicos resulta ser grande.

Como afirma (Parada et al., 2015) “El fenómeno se genera cuando la impedancia de un transformador de una subestación eléctrica se sintoniza con la capacitancia producida por el punto de conexión entre la red y el transformador.” (pág. 18)

Según (Hasan, 2012) El método utilizado en el estudio de la resonancia llamado barrido en frecuencia, proporciona las herramientas necesarias para la interpretación de este fenómeno, esta estrategia es complementada con el análisis modal, ambos métodos han sido estudiados en conjunto”.

Debido al bajo nivel de voltaje de la subestación La Esperanza, se instaló un banco de capacitores a nivel de 13,8 KV; este banco consta de dos pasos: 1,2 MVAR y 2,4 MVAR en total 3,6 MVAR y se a presentado problemas de resonancia.

A.2. Planteamiento del problema.

Las señales eléctricas en los bornes de transformador de potencia, tiene una forma sinusoidal pura, ondas que representan la corriente y/o voltaje, pero en una subestación debido a la carga que maneja o alimenta la subestación que son cargas no lineales, se inyectan armónicos a la red que pueden en ocasiones generar una frecuencia de resonancia eléctrica en la subestación.

El fenómeno de resonancia en una subestación afecta a los equipos especialmente a los capacitores si estos son instalados en una subestación, esto puede representar pérdidas económicas para la empresa distribuidora debido a que puede ocasionar averías en los equipos de la subestación.

El problema

¿Como disminuir el riesgo que se presente un fenómeno de resonancia de la subestación de distribución La Esperanza de la Empresa Eléctrica Regional Norte?

A.3. Justificación.

La realización del estudio de resonancia en la subestación de distribución La Esperanza de la Empresa Pública Regional Norte, surgió de la necesidad de contar con una explicación a los acontecimientos de resonancia que se pueden suscitar en una subestación y terminar en un evento catastrófico que provocaría pérdidas materiales y económicas muy significativas para la empresa y para la población ya que la subestación es la fuente de energía eléctrica, puesto que su producción se vería afectada seriamente por la ausencia de energía eléctrica.

Por lo que es fundamental contar con los mecanismos necesarios para que no se dé la presencia de este fenómeno de resonancia en dicha subestación

A.4. Alcance.

Realizar un análisis de la frecuencia de resonancia eléctrica que pueda presentarse en la subestación con la finalidad evitarla y, establecer una metodología de dimensionamiento e implementación de capacitores que ayuden a mejorar la calidad de servicio eléctrico considerando este fenómeno y así evitar daños que puede provocar este fenómeno en la red eléctrica.

Para el análisis de implementación se cuenta con el software de modelación para sistemas eléctricos CYME, el módulo de armónicos que ayudara a definir el dimensionamiento de los capacitores evitando que estos equipos entren en resonancia con el sistema eléctrico.

A.5. Objetivo general

Elaborar una propuesta técnica para la atenuación del fenómeno de resonancia en la subestación de distribución La Esperanza de la Empresa Eléctrica Regional Norte, mediante el dimensionamiento correcto del banco de capacitores.

A.6. Objetivos específicos

- Describir la estructura de una subestación y los efectos de resonancia.
- Realizar el diagnóstico del estado de funcionamiento de la subestación de distribución La Esperanza.
- Elaborar la propuesta técnica.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

El capítulo 1 tiene como objetivo presentar los conceptos básicos referentes a subestaciones de distribución y posibles consecuencias por la presencia de capacitores. Se define los componentes que forman parte de la subestación de distribución, así como también los sistemas eléctricos principales hasta los sistemas de alimentadores finales.

1.2 Sistemas eléctricos

Un sistema eléctrico es el recorrido de la electricidad a través de conductores desde las fuentes de energía donde se lo genera hasta el consumidor final, para su correcta transportación pasa por diferentes etapas (generación, transmisión, subtransmisión y distribución) con el cual se busca entregarla al usuario energía eléctrica de forma segura y con los niveles de calidad exigidos.(Castaño, 2004)

Los principales parámetros que comprende un sistema eléctrico de potencia son: tensión, frecuencia, corrientes de línea, factor de potencia y su comportamiento de los flujos de carga y corrientes de cortocircuito.(Ordoñez & Nieto, 2010)

1.2.1 Generación

La generación eléctrica consiste principalmente de transformar algún tipo primaria de energía a energía eléctrica, estas fuentes de energías primarias pueden ser renovables (viento, radiación solar, mareas, entre otras) y no-renovables (carbón, gas natural, petróleo etc.).

1.2.2 Transmisión

El sistema de transmisión permite transportar la energía eléctrica generada en las centrales eléctricas, a través de grandes conductores a largas distancias para ello pasa por etapas de transformación con el fin de elevar la tensión y reducir la corriente disminuyendo así pérdidas de sobrecalentamiento, los niveles de voltaje transportados son 500, 230, 138 kV hacia los centros de consumo, , garantizando la entrega de energía cumpliendo los principios de eficiencia, accesibilidad, continuidad y calidad, con responsabilidad social y ambiental. (Vásquez, 2013)

1.2.3 Distribución

La red de distribución constituye una parte importante del sistema eléctrico de potencia debido a que toda la potencia generada, transportada debe ser distribuida hacia los usuarios de forma segura, eficiente y confiable; una red de distribución típica consta de un centro de conversión de alta a media tensión y posteriormente mediante transformadores de distribución son convertidos a baja tensión (monofásico, bifásico y trifásico) .(Della Giustina et al., 2014).

En la figura 1 se aprecia las etapas de un sistema eléctrico de potencia, desde su generación hasta el consumidor final.

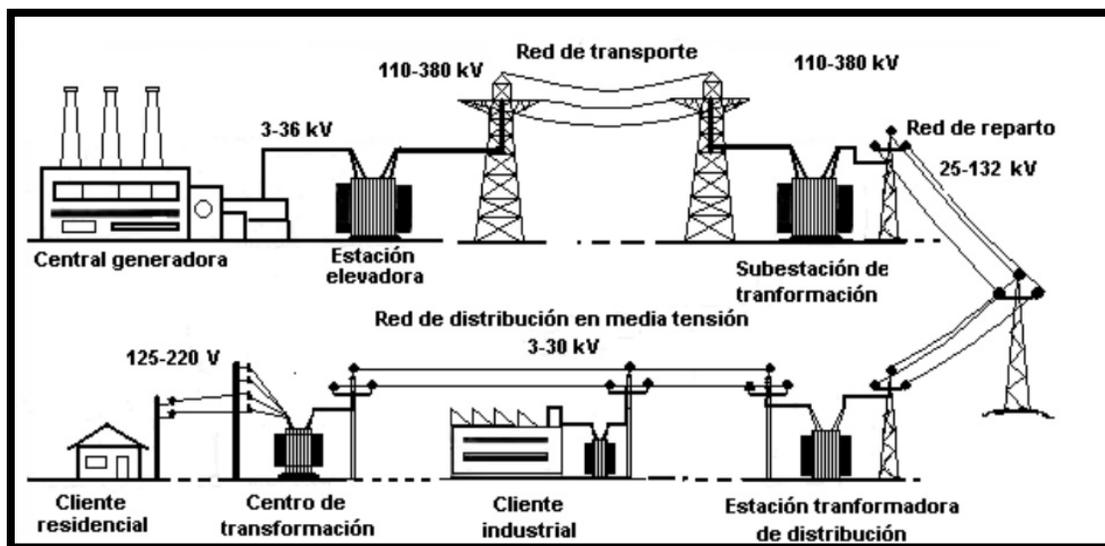


Fig. 1 Sistema Eléctrico de potencia
Fuente: (Aranea, 2015)

1.3 Subestación eléctrica

Una subestación eléctrica es una instalación destinada a establecer los niveles de tensión adecuados para la transmisión y distribución de la de energía eléctrica, consta de un conjunto de equipos necesarios situados en un mismo lugar para realizar funciones como transformación de tensión, de frecuencia, de número de fases, rectificación, compensación del factor de potencia y conexión de dos o más circuitos.(Moreno Alfonso, 2010).

Las subestaciones eléctricas son el componente clave en un sistema de energía porque son las responsables de la conversión de voltaje. Sin embargo, debido a la integración de la energía distribuida en la red, las subestaciones ahora deben proporcionar funciones adicionales de

gestión, monitorización y automatización para las grandes redes de baja tensión a las que alimentan.(Iglesias-Urkia et al., 2019)

1.3.1 Criterios para el diseño de subestaciones de distribución.

Las subestaciones de distribución por lo general presentan una problemática de pérdidas y regulación de voltaje, estos factores están relacionados en especial con la ubicación de la subestación eléctrica, ya que hay que tener muy en claro las líneas de subtransmisión o transmisión que alimentan el lado primario, y el lado secundario que es la red que alimentará la carga.

Los problemas más fundamentales que se presenta en el diseño de la subestación y los cuales provocan pérdidas de voltaje son:

- La localización de la subestación
- La capacidad de la subestación

1.3.1.1 La localización de la subestación

Para el análisis de la localización que tendrá la subestación eléctrica, se debe partir de un estudio de planeación, a partir del cual se localiza con la mayor aproximación el centro de la región que se necesita alimentar.

Una vez obtenido el centro de carga que será el lugar de localización de la subestación eléctrica, conociendo la capacidad actual de la subestación y previendo las ampliaciones futuras, se determina la superficie necesaria para la instalación de ésta.

Una vez localizado el terreno, se debe de efectuar un estudio para que no exista dificultad en la llegada de los circuitos de alimentación a la subestación. Los alimentadores pueden efectuarse por medio de líneas de transmisión, o bien, si no hay espacio disponible para su tendido, por medio de cables subterráneos.(GONZALEZ & MOLINA, 2013)

1.3.1.2 La capacidad de la subestación

La capacidad de una subestación se fija considerando la demanda actual en kV, más el incremento en el crecimiento obtenido por extrapolación previendo el espacio necesario para las futuras ampliaciones.

La capacidad de la subestación de distribución se determina considerando los siguientes factores:

- La necesidad de satisfacer la máxima demanda actual.
- Considerar el crecimiento futuro en un escenario al menos de unos 5 años.

La conveniencia de que el área servida para la subestación sea lo más compacta posible para dar un valor razonable de kVA/Km².

1.3.2 Tipos de subestaciones eléctricas

Las subestaciones eléctricas no tienen una clasificación precisa ya que existen varios criterios para clasificarlas, pero los tipos más utilizados a nivel global son los que se presentan a continuación en la Tabla 1.1

Tabla 1.1 Clasificación de subestaciones

SUBESTACIONES			
POR SU OPERACIÓN	De corriente alterna		
	De corriente continua		
POR SU SERVICIO	PRIMARIAS	Elevadoras	
		Receptoras y reductoras	
		De enlace o distribución	
		Switcheo y manobra	
		Convertidoras o rectificadoras	
	SECUNDARIAS	Receptoras	Reductoras
			Elevadoras
		Distribuidoras	
		De enlace	
		Convertidoras o rectificadoras	
POR SU CONSTRUCCIÓN	Tipo intemperie		
	Tipo interior		
	Tipo blindado		

Fuente:(Harper, 2006)
Editado por el autor

Cabe recalcar que en el sistema eléctrico ecuatoriano las subestaciones más implementadas son las siguientes.

➤ **Subestaciones de transformación**

Este tipo de subestación se encarga de convertir la energía eléctrica a través del transformadores, siendo estas subestaciones elevadoras o reductoras de tensión dependiendo el tipo de diseño.(Ardón Marroquín, 2018)

✓ **Subestaciones reductoras**

Las subestaciones reductoras tienen la función de reducir los niveles de tensión de alta o muy alta tensión y a su vez aumenta los niveles de corriente manteniendo constante su potencia aparente de generación, de esa manera permite disminuir grandes bloques de energía hacia los centros de consumo.(Carrasco Andrade, 2019)

Estas subestaciones están presentes en las redes de transmisión, subtransmisión o distribución y forman el mayor número de estaciones en el sistema eléctrico.(Harper, 2002)

✓ **Subestaciones elevadoras**

Las subestaciones elevadoras se encuentran ubicadas junto a los centros de generación siendo esta el punto de conexión entre la generación y la transmisión de energía, su función principal es elevar los niveles de tensión disminuyendo los niveles de corriente manteniendo la potencia aparente de generación, de esa manera permite transportar grandes bloques de energía eléctrica a largas distancias mediante conductores con la finalidad de evitar pérdidas económicas.(PLATA, 2010)

➤ **Subestaciones de maniobra**

Este tipo de subestación se caracteriza por operar a un voltaje único porque no cuenta con transformador. Son indispensables en el sistema de interconexión para brindar flexibilidad y confiabilidad en el servicio, permite realizar maniobras de conexión de múltiples circuitos o líneas (apertura o cierre) para orientar o distribuir el flujo de potencia a diferentes áreas del sistema.(Farinango Gramal, 2019)

1.4 Componentes primarios de una subestación eléctrica

1.4.1 Barra

Es un elemento físico conformado por conductores eléctricos diseñados de acuerdo con su corriente nominal y de cortocircuito diseñado, son utilizados como punto en común para la conexión de los circuitos que conforman la subestación, la cual distribuye o recibe la energía eléctrica. Las barras pueden ser de diferentes tipos de materiales y formas dependiendo del diseño que tenga la subestación.(Mendoza López, 2010)



Fig. 2 Barraje de una subestación Eléctrica
Fuente: (Erwin & Jorge, 2012)

1.4.2 Transformador de potencia

El transformador de potencia es un equipo estático la cual tiene la función de elevar o reducir los niveles de voltajes y corrientes, su importancia radica debido a que mediante ello depende la calidad y el servicio de energía eléctrica que será distribuida hacia el consumidor final. Este funciona mediante la transferencia de potencia del devanado primario al secundario bajo el principio de inducción electromagnética manteniendo constante su potencia y frecuencia.(FULGENCIO et al., 2012)



Fig. 3 Transformador de potencia
Fuente:(Bautista Tonato & Solís Mora, 2014)

1.4.3 Transformador de potencial

Los transformadores de potencial (TP) tienen la función de reducir los niveles altos de tensión que se obtiene en niveles de transmisión a niveles adecuados y seguros para los equipos de medición, protección y control. La conexión con el sistema a medir es en paralelo. (Luna Eras & Veintimilla Miranda, 2017)

Los transformadores de potencial se clasifican en dos grupos:

✓ **Transformadores de Potencial inductivos**

Este tipo de transformadores de potencial son más económicos y pueden ser implementados en un sistema eléctrico no superior a 145 kV. (RIVERA, 2014)



Fig. 4 Transformadores de potencial inductivos
Fuente: (RIVERA, 2014)

✓ **Transformadores de potencial capacitivos**

Los TP capacitivos son menos costosos para voltajes superiores a 145 kV. Hay dos grupos de TP capacitivos, los de gran capacitancia y de baja capacitancia. Los TP de gran capacitancia suelen ser la mejor opción en términos de especificaciones precisas y diversas condiciones de funcionamiento. (RIVERA, 2014)

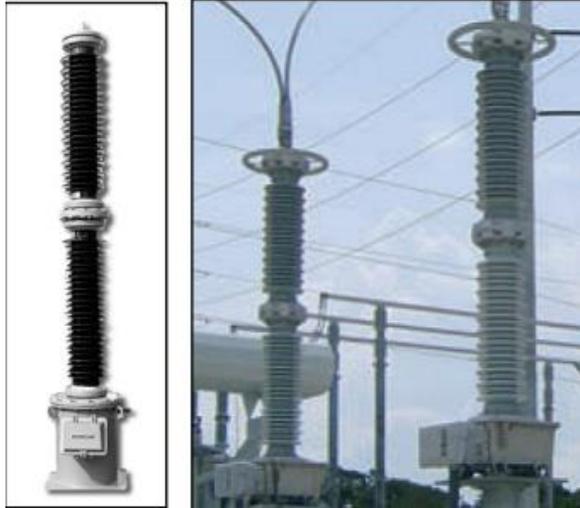


Fig. 5 Transformador de potencial capacitivo
Fuente: (RIVERA, 2014)

1.4.4 Transformador de corriente

los transformadores de corriente (TC) tiene la función de reducir los niveles altos de corriente que se obtiene a niveles de transmisión a niveles adecuados y seguros para los equipos de medición, protección y control. La conexión con el sistema a medir es en serie.(Luna Eras & Veintimilla Miranda, 2017)



Fig. 6 Transformador de corriente
Fuente: (Castro, 2015)

1.4.5 Interruptor de potencia

Los interruptores de potencia son dispositivos electromecánicos capaces de actuar cuando esta detecta una falla de cortocircuito en el sistema, se puede decir que su función principal es

de conectar y desconectar los equipos en caso de falla, estos dispositivos operan con o sin carga y su apertura o cierre no es visible. En las subestaciones podemos encontrar dos tipos de interruptores como: interruptor tanque vivo e interruptor de tanque muerto.(Luna Eras & Veintimilla Miranda, 2017)



Fig. 7 Interruptor de potencia
Fuente: (Carlos & Blanco, 2019)

1.4.6 Seccionador

Los seccionadores son dispositivos electromecánicos que une los diferentes circuitos del sistema eléctrico, su función principal es conectar y desconectar diferentes tramos de la subestación para su operación en vacío (sin carga) de forma visible.(Mendoza López, 2010)



Fig. 8 Seccionador
Fuente: (Bautista Tonato & Solís Mora, 2014)

1.4.7 Apartarrayos

Según (FULGENCIO et al., 2012) Los apartarrayos tienen la función principal de despejar las sobretensiones que se generan por las descargas atmosféricas por cualquier tipo de falla hacia tierra, con el fin de proteger los diferentes equipos que se encuentre en el sistema. Los apartarrayos deben actuar tan rápido de tal forma que los niveles de sobretensión no igualen a los niveles de tensión nominales de los equipos.(FULGENCIO et al., 2012; Luna Eras & Veintimilla Miranda, 2017)



Fig. 9 Apartarrayos
Fuente: (Bautista Tonato & Solís Mora, 2014)

1.4.8 Relés de protección

Un relé de protección como su nombre lo indica es un equipo de protección que capta señales de voltaje o corriente de los transformadores de potencial y de corriente respectivamente para así emitir una señal en caso de que se presente condiciones anormales de acuerdo con sus condiciones de ajuste permite la apertura o cierre a los interruptores automáticos de esa forma protegiendo al sistema eléctrico. (Castro Paspuel & Herrera Pozo, 2013)

1.4.9 Puesta a tierra

El sistema de puesta a tierra es una parte importante del sistema eléctrico, tiene como su función principal en condición normal y/o de falla disipar el flujo de corriente eléctrica hacia tierra, protegiendo los equipos y la seguridad de las personas que se encuentren dentro o cerca de la

subestación de riesgos de descargas eléctricas o voltajes peligrosos, como la tensión de contacto y de paso que son voltajes generadas por sobretensiones.(Flores et al., 2014)



Fig. 10 Sistema de puesta a tierra
Fuente: (Fierro Romero & Flores Hinostriza, 2010)

1.4.10 Capacitores

Un capacitor o condensador es un dispositivo que almacena energía a través de campos eléctricos (uno positivo y uno negativo). Este se clasifica dentro de los componentes pasivos ya que no tiene la capacidad de amplificar o cortar el flujo eléctrico. Los capacitores se utilizan principalmente como filtros de corriente continua, ya que evitan cambios bruscos y ruidos en las señales debido a su funcionamiento. Los capacitores son instalados en la red de distribución con el fin de reducir pérdidas de energía.(Morales et al., 2015)

1.4.10.1 Banco de capacitores.

Los bancos de capacitores son grupos de capacitores usados en subestaciones para proporcionar potencia reactiva al sistema eléctrico, la conexión del neutro en la subestación depende de la conexión del sistema a tierra, fusible de capacitores y los dispositivos de conexión.(Aguila Téllez, 2020; Xu et al., 2013)



Fig. 11 Banco de Capacitores
Fuente: (Bautista Tonato & Solís Mora, 2014)

Cada grupo capacitivo está conformado por unidades de capacitores conectados en paralelo y las unidades de capacitores depende de las condiciones definidas por las normas ANSI/IEEE Std 18-1980, los cuales determinan si las unidades de capacitores operan en condiciones normales si:

- El voltaje en los terminales de la unidad es menor o igual al 110% del voltaje nominal
- La corriente circulante por la unidad es menor o igual al 180% de la corriente nominal
- La potencia reactiva de la unidad del capacitor no excede el 135% de su capacidad nominal. ("IEEE Standard for Shunt Power Capacitors," 1980)

En forma general, un banco de capacitores puede ser conectada de las siguientes formas o esquemas:

- Conexión delta
- Conexión estrella (aterrada o flotante)
- Conexión doble estrella

1.5 Problemas por la presencia de capacitores

1.5.1 Sobretensiones en equipos

Las sobretensiones que se producen en los sistemas eléctricos se deben a diversos factores uno de ellos puede ser las descargas atmosféricas por el impacto que genera en las redes eléctricas producen oscilaciones forzadas, esto llegan a generar resonancias que resulta ser de gran riesgo en tramos de conductores de alta tensión.(Díaz & Albarracín, 2012)

Al variar la frecuencia de un circuito de tal manera que se iguale la reactancia capacitiva con la inductiva se llega a obtener la frecuencia de resonancia, valor que coincide con la frecuencia propia del circuito y con la que el capacitor se descargaría si no hubiera otra tensión que la del propio capacitor, es decir la frecuencia impuesta por el generador de corriente es igual a la frecuencia propia del circuito.(Díaz & Albarracín, 2012)

1.5.2 Armónicos

Los armónicos son distorsiones de la señal de la onda senoidal de la tensión y/o de corriente en los sistemas eléctricos, esto se genera por el uso de cargas con impedancias no lineales, materiales ferromagnéticos, y el más común es debido al uso de equipos que necesitan conmutaciones en su operación normal. Las corrientes y tensiones armónicas en los sistemas eléctricos generan problemas como: pérdida de potencia activa, sobretensiones en condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, daño en aislamientos, deterioro del dieléctrico, disminución de la vida útil de los equipos entre otros.(Arcila, 2010)

1.5.3 Origen de los armónicos

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión y frecuencia). Por lo cual, dichas cargas se consideran como fuentes de corriente que inyectan armónicos en la red eléctrica.(Carvajal, 2007)

Debido a que algunas de las cargas que se conecta en el sistema eléctrico público se comportan de forma no lineal, inyectan armónicos a la red que perjudican el funcionamiento de los equipos conectados en la misma. (Carvajal, 2007)

Existen dos elementos generadores de armónicos, los primeros son los que presentan cargas no lineales donde la corriente que fluye por estos es proporcional a la tensión y los otros elementos son los que poseen una impedancia dependiente de la frecuencia como condensadores, alumbrado público, generadores, motores, etc. (Carvajal, 2007)

1.5.3.1 Cuantificación de la distorsión armónica

La presencia de armónicos en el sistema eléctrico provoca daños sólo cuando estas generan un incremento de niveles de corriente como consecuencia se genera pérdidas por sobrecalentamiento y a su vez causa daño en los equipos acelerando la pérdida de su vida útil; los daños que se generan en los equipos no son reconocidos que se haya producido debido a la presencia de armónicos.

Las normas IEEE establecen los niveles aceptables de tensión y de corrientes armónicas en el sistema, si estas exceden el nivel permitido generan problemas. A continuación, se muestran los niveles permitidos en armónicos. (Arcila, 2010)

Tabla 1.2 Niveles de tensión armónicos permitidos según norma IEEE519/EN50160

PARÁMETRO	IEEE519	EN50160
Distorsión armónica total de la tensión	8%	8%
3° armónico de tensión	5%	5%
5° armónico de tensión	5%	6%
7° armónico de tensión	5%	5%
9° armónico de tensión	5%	1,5%
11° armónico de tensión	5%	3,5%

Fuente: (EMB, 2019)
Editado por el autor

Tabla 1.3 Niveles de corrientes armónicas permitidos según las normas IEEE519

Orden de armónicos individuales				
I_{sc}/I_L	$3 \leq a < 11$	$11 \leq a < 17$	$17 \leq a < 23$	$23 \leq a < 35$
20 < 50 A	4,0	2,0	1,5	0,6
50 < 100 A	10,0	4,5	4,0	1,5
100 < 1000 A	12,0	5,5	5,0	2,0

Fuente: (EMB, 2019)
Editado por el autor

1.5.3.2 Efectos de los armónicos en capacitores.

Los capacitores instalados en el sistema que alimenta cargas no lineales generan la posibilidad de resonancia entre estos, para que esto se genere las reactancias inductivas del sistema de distribución aumenta mientras que la reactancia capacitiva del banco de capacitor

disminuye llegando a un punto en el cual las frecuencias se igualan, provocando la resonancia. La resonancia que se da aumenta el esfuerzo dieléctrico y el calentamiento dentro del capacitor. Este efecto incrementa el esfuerzo dieléctrico y el calentamiento dentro del capacitor.(Mendoza López, 2010)

Los capacitores son diseñados para soportar los calentamientos que se genera debido a su diseño de láminas y películas que permite reducir las pérdidas, sin embargo, los altos voltajes generan desgaste dieléctrico del laminado produciendo así la disminución de la vida útil de los capacitores.

1.5.3.3 Trayectoria de los armónicos en los sistemas de distribución

Las cargas no lineales conectados al sistema producen distorsiones en las formas de onda de las corrientes y tensiones, estas distorsiones generadas dependen del grado de armónicos que se producen en la red, los generadas en la red pueden expandirse a otras partes del sistema, originando diferentes tipos de problemas como bajo factor de potencia, resonancia, sobrecalentamiento en los equipos de la subestación.(Mendoza López, 2010)

La corriente eléctrica fluye por el camino que presente menos impedancia en su paso por ellos es que las corrientes armónicas fluyen por diferentes trayectorias debido a que la impedancia del sistema varía según la frecuencia.(Mendoza López, 2010). Así se presenta la figura 12

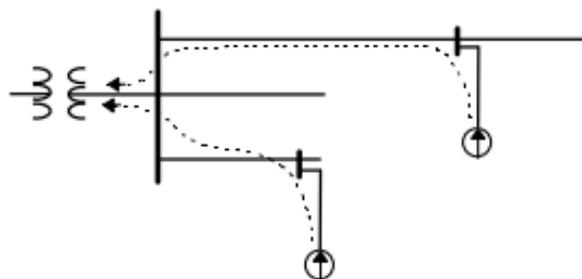


Fig. 12 Trayectoria de corriente armónica en un sistema inductivo
Fuente:(Mendoza López, 2010)

Sin embargo, si al sistema de la figura 12 se implementa un capacitor la trayectoria armónica es diferente como se muestra en la figura 13.

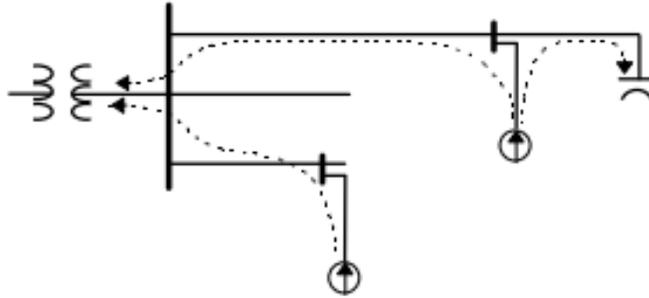


Fig. 13 Trayectoria de corriente armónica en un sistema inductivo con capacitor
Fuente:(Mendoza López, 2010)

La trayectoria que siguen las armónicas también depende del tipo de sistemas, ya sean monofásicos o trifásicos, así como las conexiones de los transformadores que se encuentran a su paso. Las armónicas que se presentan en los sistemas balanceados tienen una relación directa con las componentes de secuencias positiva, negativa y cero.

1.6 Resonancia eléctrica

El fenómeno de resonancia se produce cuando en los sistemas de distribución de energía eléctrica, las reactancias inductivas (equivalentes de cargas eléctrica) son iguales a las reactancias capacitivas (banco de condensadores), lo cual hace que se presente una amplificación en la respuesta del sistema a una excitación periódica cuando la frecuencia de la fuente de excitación es igual a la frecuencia natural del sistema.

Es decir, que las condiciones de resonancia implican que la reactancia de un banco de capacitores en alguna frecuencia es igual a la reactancia inductiva del sistema de distribución, y polaridad opuesta, la frecuencia donde se produce este fenómeno se lo conoce como frecuencia de resonancia. Estos elementos se combinan para producir la resonancia serie o paralelo.(Alcantara D.P. & Castellanos L., 2012).

Existen dos tipos de resonancia dependiendo de la conexión del capacitor hacia el sistema, estas son: resonancia en serie y resonancia en paralelo.

1.6.1 Resonancia en paralelo

La resonancia en paralelo conocida también como resonancia en corriente tiene en su circuito un nivel de admitancia baja mientras que su impedancia es la más alta posible y la corriente mínima, este tipo de resonancia provoca una sobretensión muy alta cuando existe una corriente

de dicha frecuencia de resonancia en paralelo. Existe casos que cuando la corriente de armónico es pequeña genera picos de tensión demasiados altos a la frecuencia de resonancia. Este tipo de resonancias son muy comunes cuando existen bancos de capacitores o líneas de AC largas conectadas con transformadores de potencia.(Martínez-Morales et al., 2019)

En la figura 14 se puede apreciar el circuito RLC equivalente en paralelo

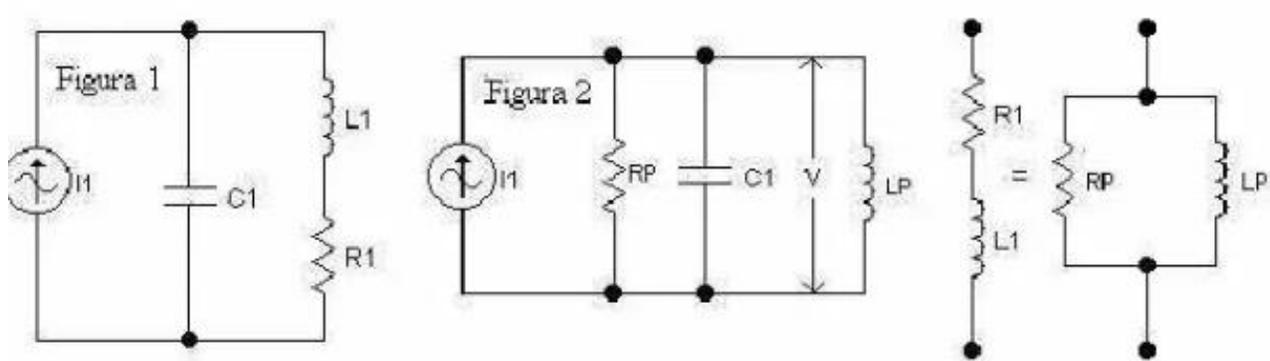


Fig. 14 Circuito Equivalente de resonancia en paralelo
Fuente:(PIÑATE, 2015)

Para el cálculo de la impedancia de la resonancia en paralelo se utiliza la siguiente ecuación:

$$Z_p = \frac{R \times j\omega L \times (-j\frac{1}{\omega C})}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$$

Donde:

Z_p = Impedancia en paralelo

R = Resistencia

j = Unidad imaginaria

ωL = Reactancia inductiva

ωC = Reactancia capacitiva

En la resonancia en paralelo se ignora la resistencia (R) se toma el denominador

$$j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = 0$$

Donde:

j = unidad imaginaria

ωL = Reactancia inductiva

ωC = reactancia capacitancia

La frecuencia de resonancia del circuito en paralelo se la obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Donde:

f_r = frecuencia de resonancia

L = valor de la inductancia

C = valor de capacitancia

La impedancia de la resonancia en paralelo (Z_p) es muy elevada, se considera la siguiente figura 15 como referencia para que se pueda apreciar cómo se comporta este tipo de resonancia.

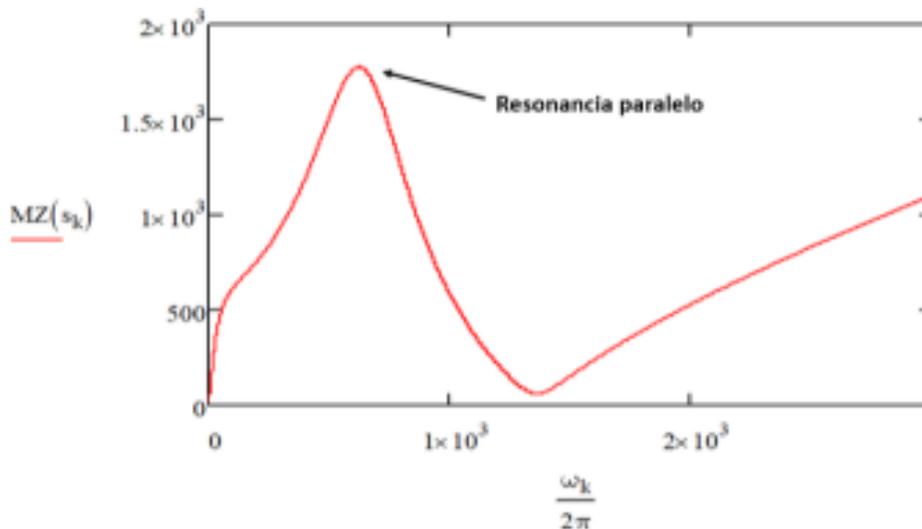


Fig. 15 Gráfica de resonancia en paralelo
Fuente: (Martínez-Morales et al., 2019)

1.6.2 Resonancia en serie

La resonancia en serie a diferencia de la resonancia en paralelo tiene una baja impedancia a la frecuencia de resonancia, en esta frecuencia la resonancia inductiva y la resonancia capacitiva se igualan por lo cual estas resonancias se anulan, por lo cual la impedancia en esa frecuencia consiste solo en una resistencia. Debido a que la resistencia de los conductores con

normalmente bajas, la reducción de las impedancias puede generar altos niveles de corrientes.(Martínez-Morales et al., 2019)

En la figura 16 se aprecia el circuito RLC equivalente en serie.

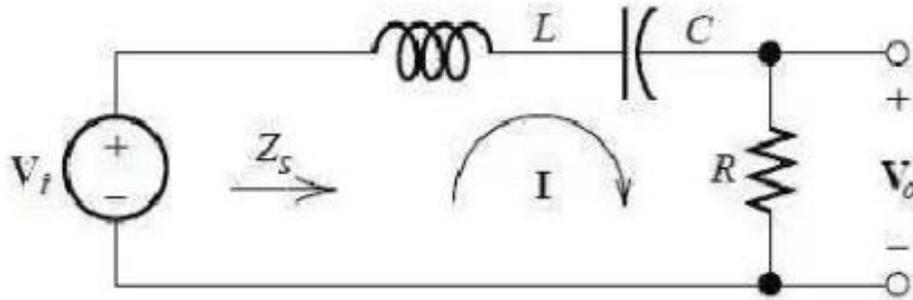


Fig. 16 Circuito equivalente de Resonancia serie
Fuente:(PIÑATE, 2015)

Para el cálculo de la impedancia de la resonancia en serie se utiliza la siguiente ecuación:

$$Z_s = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

Donde:

Z_s = Impedancia en serie

R = Resistencia

j = Unidad imaginaria

ωL = Reactancia inductiva

ωC = Reactancia capacitiva

En este tipo de resonancia la impedancia total de frecuencia de resonancia se reduce al componente de resistencia, así reduciendo la frecuencia de resonancia.

$$j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = 0$$

Donde:

j = unidad imaginaria

ωL = Reactancia inductiva

ωC = reactancia capacitancia

A continuación, se presenta la expresión de la frecuencia de resonancia, se reduce a la siguiente ecuación.

$$f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Donde:

Fr= frecuencia de resonancia

L= valor de la inductancia

C= valor de capacitancia

La impedancia de la resonancia en serie (Z_s) es semejante a la resistencia del circuito, se considera la siguiente figura 17 como referencia para que se pueda apreciar cómo se comporta este tipo de resonancia.

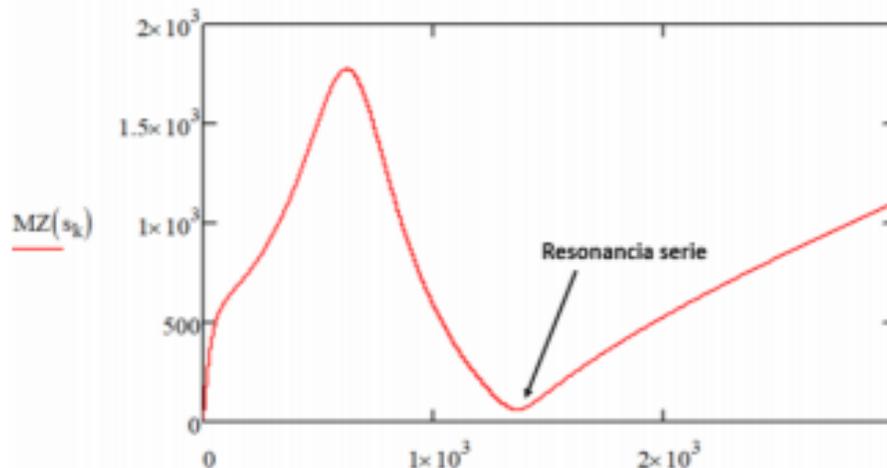


Fig. 17 Comportamiento de sistema de resonancia en serie de un circuito
Fuente: (Martínez-Morales et al., 2019)

Las figuras 15 y 17 representan la resonancia que se forma en un sistema cuando estas llegan a un valor de impedancia con respecto a las frecuencias que se generan.

1.6.3 Efectos de la resonancia eléctrica

La resonancia generada en el sistema es un tema amplio que se ha estudiado desde los años 70 con el fin de mitigar estos efectos para que los elementos que se encuentran involucrados en el sistema puedan operar de forma eficiente y de esa forma evitar su daño por estos efectos, esto efecto se produce mayormente por falla de línea a tierra debido a la ausencia de referencia a tierra. (Alcántara-Bonilla et al., 2010)

Los valores de resonancia son perjudiciales en el sistema eléctrico si esta sobrepasa los niveles normales que se ha mencionado anteriormente, este tipo de distorsiones que se generan pueden producir la falla de los equipos, sacando de operación a todo un sistema. (Carpio Becerra & Llivicura Zhingri, 2015)

1.6.3.1 Amplificación de la tensión

Al verse aumentada la impedancia en el sistema a una frecuencia de resonancia, la presencia de corriente armónica próxima a dicha frecuencia producirá una mayor caída de tensión armónica, y por tanto el porcentaje de la distorsión total armónica (THD) se incrementará, sobrepasando los porcentajes de armónicos permitidos en la norma IEC/EN 61000-2-2. (Electric, 2020)

El índice de la THD (Total Harmonic Distortion) se aplica tanto para corriente como para tensión, se define como la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz correspondiente a la componente fundamental. Este valor es usualmente expresado como un porcentaje de la onda fundamental. (Electric, 2020)

El THDI puede variar incluso superando el 100% como ocurre en las fuentes de potencias conmutadas. La distorsión armónica total THD(I) permite evaluar la deformación de la onda de corriente con un solo número.

En la tabla 1.4 se muestran los valores límite de THD de intensidad.

Tabla 1.4 Índices de THD(I) según las normas IEC/EN 61000-2-2

Valor THD(I)	Comentarios
THD(I) < 10 %	Corrientes armónicas débiles: poco riesgo de sufrir fallos de funcionamiento.
10 % < THD(I) < 50 %	Corrientes armónicas significativas: riesgo de calentamiento, sobredimensionado de las fuentes.
50 % < THD(I)	Corrientes armónicas muy importantes: riesgo casi seguro de sufrir fallos de funcionamiento, degradación y calentamientos peligrosos a menos que la instalación se haya calculado y dimensionado teniendo en cuenta este tipo de restricciones.

Fuente: (Electric, 2020)
Editado por el autor

Aunque los armónicos de corriente de frecuencia más elevada pueden tener valores pequeños, al ser las reactancias de la línea y de los transformadores proporcionales a la frecuencia, los armónicos de tensión pueden tomar valores significativos.(Martínez Sarmiento, 2001)

Este porcentaje puede teóricamente ser superior al 100 %, pero en la práctica raramente supera el 15 %. La distorsión armónica total THD(Larin et al.) permite evaluar la deformación de la onda de tensión con un solo número. Los valores límite siguientes son los que suelen evaluar los distribuidores de energía: En la tabla 1.5 se muestran los valores THD permitidos de tensión según las normas IEC/EN.

Tabla 1.5 Índices de THD según las normas IEC/EN 61000-2-2

Valor THD	Comentarios
THD < 5 %	Deformación insignificante de la onda de tensión: poco riesgo de sufrir fallos de funcionamiento.
5 % < THD < 8 %	Deformación significativa de la onda de tensión: riesgo de calentamiento y de sufrir fallos de funcionamiento.
8 % < THD	Deformación significativa de la onda de tensión: existe un riesgo elevado de sufrir fallos de funcionamiento a menos que la instalación ya se haya calculado y dimensionado teniendo en cuenta este nivel de deformación.

Fuente: (Electric, 2020)
Editado por el autor

1.7 Cymdist

El análisis del sistema de distribución del software CYME Power Engineering, conocido como CYMDIST, fue desarrollado por CYME International, que actualmente es una subsidiaria de Eaton. El paquete consta de un conjunto de módulos de análisis de red y un modelo personalizable por el usuario.

El programa está diseñado para simular el comportamiento de las redes de distribución eléctrica bajo diversas condiciones y escenarios operativos. Varias funciones integradas apoyan la red de distribución planificación y operación. El software cuenta con una interfaz de usuario flexible y un espacio de trabajo personalizable en el que grafica las representaciones de la red y los elementos de informes. Los usuarios pueden modelar el sistema de energía en función de la información geográfica de mapas en línea y agregar funciones de visualización adicionales.(Gao et al., 2017; Ramesh et al., 2007)

CYMDIST ofrece funciones para el cálculo del flujo de energía, análisis del sistema, planificación del sistema y simulación de fallas. Sin embargo, CYMDIST no puede simular un sistema de energía dinámicamente en el sentido que el software solo puede ejecutar una simulación con un conjunto de datos fijos de series de tiempo. Tiene la habilidad para simular la generación de variables y cargas tanto en análisis de estado estacionario como en análisis de series de tiempo, y por lo tanto se puede utilizar para estudiar el impacto de la energía renovable en los alimentadores de distribución.(Gao et al., 2017)

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA DE LA SUBESTACIÓN LA ESPERANZA DE EMELNORTE MEDIANTE CYMDIST

2.1 Introducción

La empresa eléctrica de distribución Emelnorte dispone de diferentes tipos de software entre ellos está Cymdist, software que les permite realizar estudios eléctricos de las subestaciones, líneas de transmisión, distribución, etc., que son parte de su sistema de distribución.

El software anteriormente mencionado permite obtener información de los parámetros en los que se encuentra el sistema de distribución, para analizar posibles fallas que se puedan presentar en el sistema y poder implementar las correcciones necesarias.

Una de las subestaciones que forma parte de la concesión de la empresa eléctrica Emelnorte es la subestación La Esperanza, donde se plantea el estudio a realizarse, para ello se utiliza el programa Cymdist empresa distribuidora el cual permite realizar los estudios eléctricos en niveles de media y alta potencia

Mediante el levantamiento de datos que son guardados en la base empresarial de Emelnorte se utiliza la información más relevante los cuales permitan analizar los equipos y elementos que sean necesarios para el respectivo estudio con el fin de realizar la modelación e implementar una propuesta alternativa que dé solución al problema encontrado en la subestación de estudio.

El software Cymdist posee un módulo de Análisis armónico, dicho módulo permite evaluar el impacto de las baterías de condensadores, de las cargas no lineales y de las diferentes fuentes armónicas presentes en la red eléctrica.

El módulo ofrece las siguientes opciones de análisis:

- Impedancia Thevenin como función de la frecuencia en una barra o nudo de la red.
- Tensiones armónicas en barras, corrientes de línea y flujos de potencia en líneas.
- Distorsión armónica (factor de distorsión armónica HDF o distorsión armónica total THD) y factores de interferencia telefónica (TIF).
- Cálculo del K-Factor o del Factor-K,

- Cálculos de la tensión y de la intensidad en condensadores para fines de capacidad del condensador.
- Modelación trifásica completa (por omisión) o modelación monofásica.

El módulo contiene una vasta biblioteca de modelos predefinidos de equipos de red y de fuentes de corriente armónica.

- Máquinas sincrónicas
- Líneas de transporte y cables
- Cargas (monofásicas y trifásicas)
- Filtros (varios tipos)
- Fuentes de corriente definidas por el usuario
- Empresas eléctricas
- Motores asíncronos (de inducción)
- Rectificadores (diodo y con tiristores)

2.2 Software y materiales

Es indispensable conocer el estado actual de los componentes de la subestación de distribución con el objetivo de mantener los niveles indicados en la regulación IEEE-519, la utilización del software Cymdist mediante el módulo de armónicos facilita la localización de problemas de distorsión armónica por su amplia gama de estudios que permite realizar, para este caso, se utilizará el barrido de frecuencia, esto permite detectar la frecuencia en la que se produce el fenómeno de resonancia mediante simulación para comprobar los problemas, cuando el problema es detectado se implementa los equipos y elementos que intervienen en la solución hasta conseguir valores ideales.

2.3 Descripción general de la subestación La Esperanza

La subestación La Esperanza es alimentada desde la línea de transmisión de proviene desde la Subestación Cayambe a un nivel de 69 kV, cuenta con un transformador de potencia de 69/13,8 kV con una configuración Delta- Estrella y para la distribución a los consumidores finales cuenta con 4 alimentadores.

2.4 Representación del sistema

Para la realización del análisis del problema, se parte desde la configuración física de la subestación, en la Figura 18 se muestra el diagrama unifilar de la subestación La Esperanza donde se presenta la barra y los alimentadores que posee la subestación.

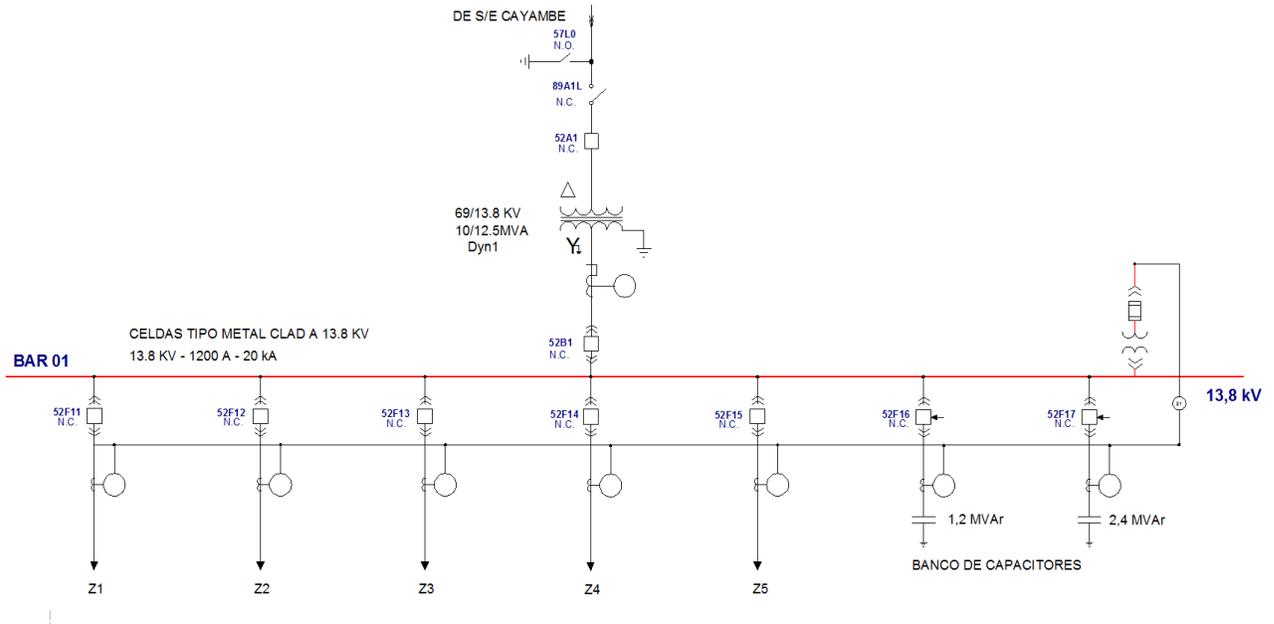


Fig. 18 Diagrama unifilar subestación La Esperanza
Fuente: Base de datos Cymdist Emelnorte

La subestación La Esperanza cuenta con dos bancos de capacitores, dichos banco cuentan con las siguientes características:

Tabla 2.1 Características eléctricas de los bancos de capacitores de la subestación La Esperanza

N°	Subestación	Voltaje (kV)	Fases circuito	Q (kVar)	Vn (kV)	Frecuencia (Hz)	BIL (Kv)	fase	Cantidad por fase	Cantidad total	Qn (MVar)
1	La Esperanza	13,8	3	200	7,96	60	38/95	1	2	6	1,2
2	La Esperanza	13,8	3	400	7,96	60	38/95	1	2	6	2,4

Fuente: Departamento de estudios eléctricos de Emelnorte

2.5 Datos disponibles para el análisis

Los datos disponibles recolectados por la empresa EMELNORTE para el análisis de armónicos son:

- Potencia activa de la carga de la subestación de estudio

- Potencia reactiva de la carga de la subestación de estudio
- THD de armónicos en porcentaje
- Impedancias equivalentes de la subestación

Estos datos serán utilizados para el cálculo de la frecuencia de resonancia presente en la subestación.

Para la atenuación del fenómeno de resonancia en la subestación de caso de estudio es la implementación de un filtro de sintonía simple, este equipo permite filtrar una o varias frecuencias que pueden presentarse en la subestación debido a la carga que alimenta.

2.6 Aplicación matemática para el cálculo de la frecuencia de resonancia

Para el cálculo de la frecuencia de resonancia presente en la subestación, se parte analizando la carga del sistema, se debe calcular la resistencia, reactancia y la intensidad que presenta la carga conectada, la fórmula para el cálculo de la resistencia que causa la carga es:

$$R_{CARGA} = \frac{(U_N)^2}{P_{CARGA}}$$

Donde:

- R_{CARGA} → Resistencia de la carga
- U_N → Tensión nominal del sistema
- P_{CARGA} → Potencia activa de la carga

La resistencia presentada por la carga es:

$$R_{CARGA} = \frac{(13,8kV)^2}{8,662 MW} = 21,99 \Omega$$

Se procede a calcular la reactancia que produce la carga en el sistema, la siguiente fórmula permite el cálculo de la reactancia de la carga:

$$X_{CARGA} = \frac{(U_N)^2}{Q_{CARGA}}$$

Donde:

- X_{CARGA} → Reactancia de la carga
- U_N → Tensión nominal del sistema
- Q_{CARGA} → Potencia reactiva de la carga

La reactancia presentada por la carga es:

$$X_{CARGA} = \frac{(13,8kV)^2}{3,66 MVA} = 52,03 \Omega$$

Para el cálculo de intensidad de corriente producida por la carga se utiliza la siguiente fórmula:

$$I_{CARGA} = \frac{\sqrt{(P_{CARGA})^2 + (Q_{CARGA})^2}}{\sqrt{3} * U_N}$$

Donde:

- I_{CARGA} → Corriente producida por la carga
- P_{CARGA} → Potencia activa de la carga
- Q_{CARGA} → Potencia reactiva de la carga
- U_N → Tensión nominal del sistema

La corriente producida por la carga en el sistema es:

$$I_{CARGA} = \frac{\sqrt{(8,66MW)^2 + (3,66MW)^2}}{\sqrt{3} * 13,8kV} = 393,34 A$$

La corriente armónica presente en el sistema de análisis se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_h = \frac{IHD\%}{100} * I_{CARGA}$$

Donde:

- I_h → Corriente armónica producida por la carga
- IHD → Distorsión armónica de corriente en porcentaje según la norma IEC/EN 61000
- I_{CARGA} → Corriente producida por la carga

La corriente armónica presente en el sistema es:

$$I_h = \frac{10\%}{100} * 393,34 = \mathbf{39,34 A}$$

Una vez culminado el análisis de los datos generados por la carga presente en la subestación, se debe analizar desde el lado del sistema la impedancia presente en sus componentes de reactancia y resistencia, para el cálculo de la magnitud de impedancia se debe utilizar la siguiente fórmula:

$$Z_{SIST} = \frac{U^2}{MVA_{CC}}$$

Donde:

- Z_{SIST} → Impedancia del sistema
- U^2 → Tensión del sistema
- MVA_{CC} → Potencia aparente del sistema

La impedancia del sistema es:

$$Z_{SIST} = \frac{13,8kV^2}{86,05MVA} = \mathbf{2,213 \Omega}$$

La constante X/R del sistema se calcula mediante los datos obtenidos de la base de datos de la empresa EMELNORTE, cabe mencionar que el resultado obtenido en esta ecuación debe ser redondeado, es así como esta constante para este estudio es:

$$Q_{CONST} = \frac{X_{SIST}}{R_{SIST}} = \frac{2,64}{1,32} = \mathbf{2}$$

La resistencia del sistema una vez obtenido Q_{CONST} se calcula usando la siguiente ecuación

$$R_{SIST} = Z_{SIST} \sqrt{\frac{1}{1 + Q_{CONST}^2}}$$

Donde:

- R_{SIST} → Resistencia presentada por el sistema eléctrico
- Z_{SIST} → Impedancia del sistema eléctrico
- Q_{CONST} → Constante X/R

Entonces la resistencia del sistema es:

$$R_{SIST} = 2,213 \sqrt{\frac{1}{1 + 2^2}} = \mathbf{0,99 \Omega}$$

La reactancia del sistema se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$X_{SIST} = R_{SIST} * Q_{CONST}$$

La reactancia del sistema eléctrico es:

$$X_{SIST} = 0,99 * 2 = \mathbf{21,979 \Omega}$$

El último dato que se necesita calcular es la reactancia del capacitor que se la calcula mediante la siguiente ecuación:

$$X_{CAP} = \frac{U^2}{MVAR_{CAP}}$$

Donde:

- X_{CAP} → Reactancia capacitiva
- U → Tensión del sistema eléctrico
- $MVAR_{CAP}$ → Potencia reactiva del capacitor

La reactancia del capacitor es:

$$X_{CAP} = \frac{13,8kV^2}{3,6 MVAR} = \mathbf{52,9 \Omega}$$

Para conocer la frecuencia de resonancia por la cual está afectado el sistema de la subestación, lo podemos calcular mediante la siguiente ecuación:

$$f_o = 60 \sqrt{\frac{X_C}{X_S}}$$

Donde:

- f_o → Frecuencia de resonancia
- X_C → Reactancia del capacitor
- X_S → Reactancia del sistema

La frecuencia de resonancia del sistema eléctrico del caso de estudio es:

$$f_o = 60 \sqrt{\frac{52,9}{1,979}} = 310,21 \text{ Hz}$$

Con la frecuencia de resonancia se debe calcular el armónico al cual el sistema se presenta el problema de resonancia, para el cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$h = \frac{f_o}{60 \text{ Hz}} = \frac{310,21}{60} = 5,17$$



RESONANCIA EN 5to
ARMÓNICO

Con los resultados obtenidos en los cálculos, se puede mencionar que la subestación presenta una condición de frecuencia de resonancia posible en el 5to armónico.

2.7 Software CYMDIST para el análisis de armónicos

El software CYMDIST facilita el cálculo y análisis de diferentes parámetros de un sistema eléctrico de potencia, en este caso se utiliza para evidenciar el posible armónico en el cual se puede presentar el fenómeno de resonancia y comparar los resultados obtenidos en el cálculo de frecuencia de resonancia.

2.7.1 Configuración inicial para el análisis de frecuencia de resonancia

Como paso inicial se configura la impedancia equivalente de la red para evidenciar el problema que presenta de frecuencia de resonancia en sus componentes de resistencia y reactancia, en la figura 19 se muestra la configuración de la impedancia de la red en su máxima y mínima generación.

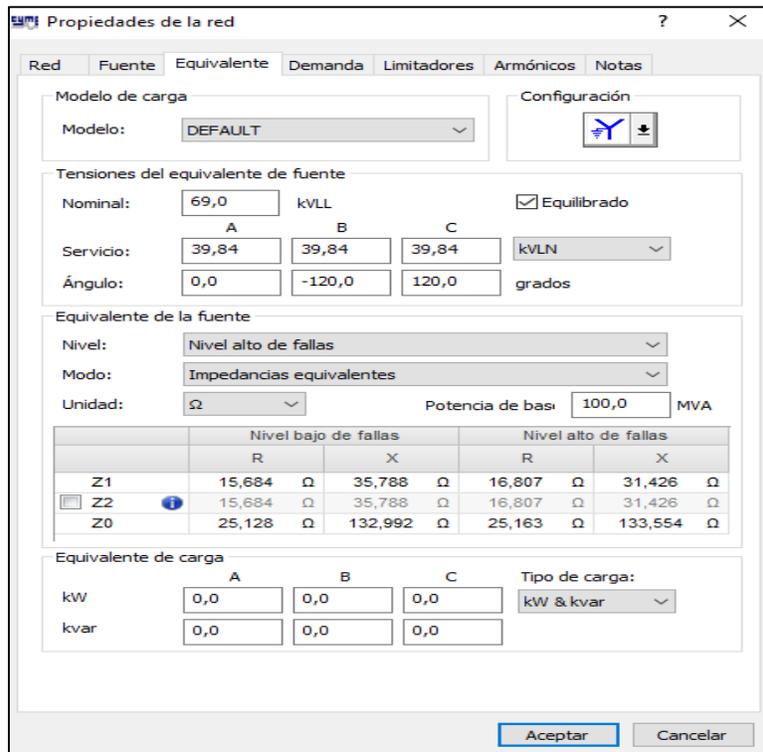


Fig.19 Configuración de la impedancia equivalente
Fuente: Autor

2.7.2 Carga en los alimentadores

Una vez se obtiene el modelamiento de la subestación, se empieza a configurar la carga de cada uno de los alimentadores de la subestación y para el análisis en este caso, se implementa un ramal con la carga total de la subestación.

Para configurar las fuentes de carga de cada alimentador, en el apartado **explorador** dirijase a la pestaña **>dispositivos** se despliega una lista en la cual se selecciona **>carga concentrada** y se coloca un ramal por cada alimentador del diagrama unifilar de la subestación como se aprecia en la figura 20.

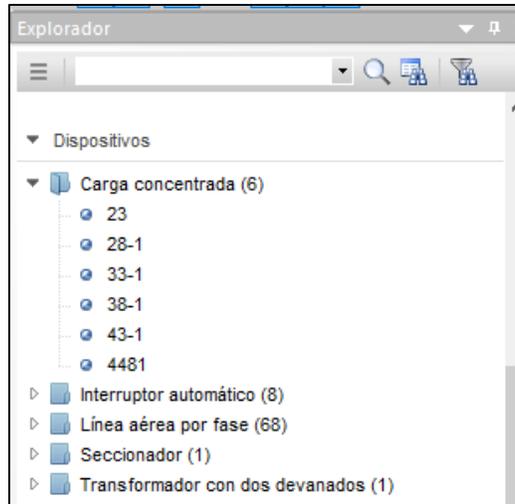


Fig. 20 Ventana explorador de Cymdist
Fuente: Autor

Al implementarse los tramos de carga de cada alimentador, se configura la potencia real y la potencia reactiva como se indica en la figura 21 para cada uno de los alimentadores y del tramo de toda la carga concentrada, que permita realizar el flujo de potencia de la subestación.

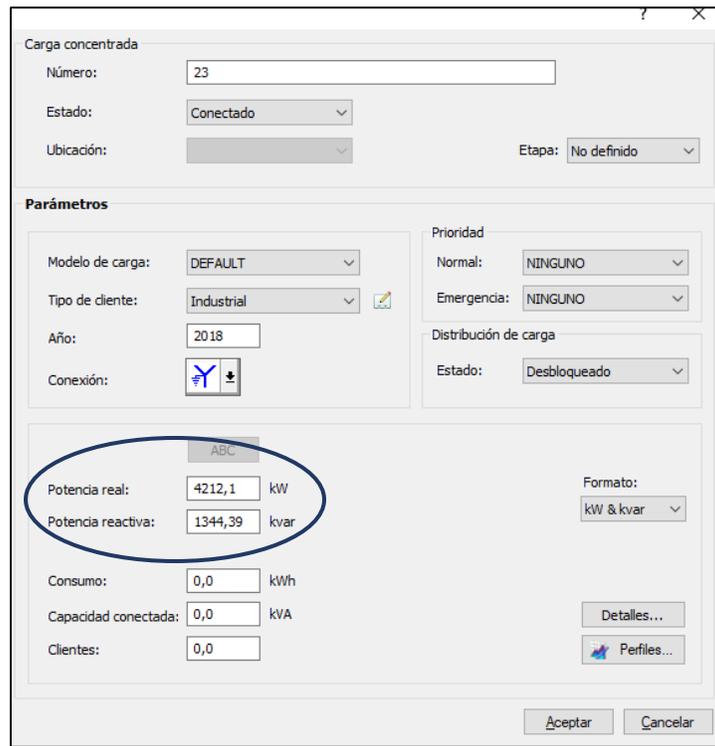


Fig. 21 Configuración de la carga de cada alimentador
Fuente: Autor

2.7.3 Banco de Capacitores

Para la implementación del banco de capacitores en el modelamiento, en la pestaña **>equipos** se configura un **condensador shunt** como se indica en la figura 22.

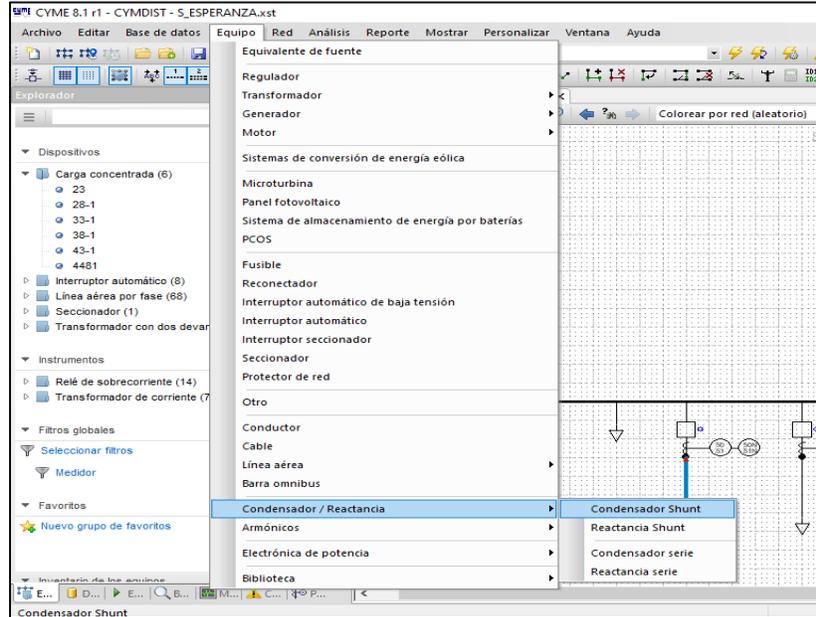


Fig. 22 Pestaña equipos Cymdist
Fuente: Autor

Al colocar el banco de capacitores, se configura los parámetros de potencia y tensión nominal del banco de capacitores, basándose en el catálogo digital de equipos que posee la empresa EMELNORTE como se indica en la figura 23.



Fig. 23 Parámetros del banco de condensadores
Fuente: Autor

Ya creado el equipo en la base de datos de CYMDIST, en el apartado **explorador**, en **condensador shunt** se selecciona el equipo que se acaba de crear con los parámetros del

catálogo de la empresa EMELNORTE y se lo implementa en el diagrama unifilar de modelación de la subestación. Evidenciar la figura 24

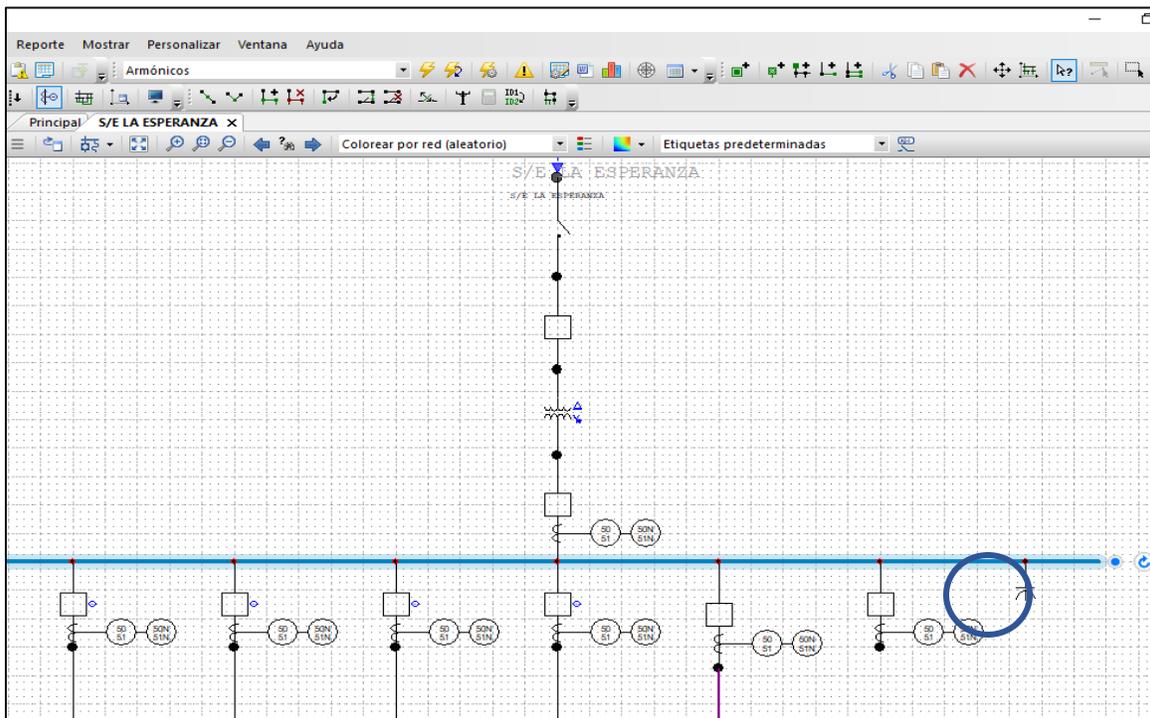


Fig. 24 Capacitor de la subestación La Esperanza modelado

Fuente: Autor

2.7.4 Fuente de armónicos

En la pestaña **Equipos** en el apartado **armónicos** se configura **la fuente de frecuencia**, como se observa en la figura 25, dicha fuente permitirá simular la inyección armónica que existe en la subestación debido a la carga que presente.

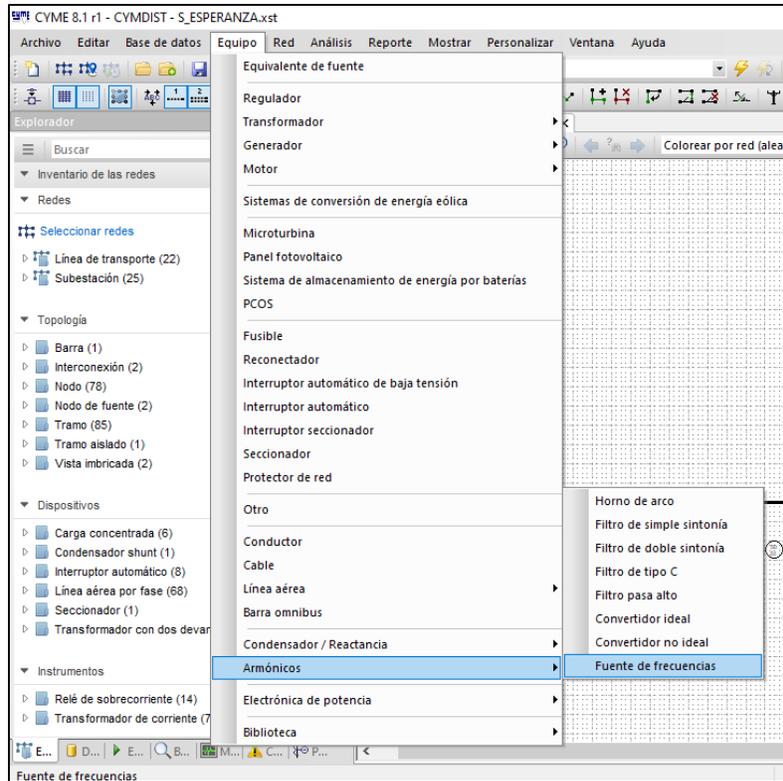


Fig. 25 Modelación de fuente de frecuencias
Fuente: Autor

Para configurar la fuente de armónicos es necesario contar con mediciones tomadas en la subestación, el anexo 1 presenta los valores de medición para este trabajo, se puede configurar ya sea con los voltajes de los armónicos o las corrientes armónicas, de cada orden de armónicos. Véase la figura 26

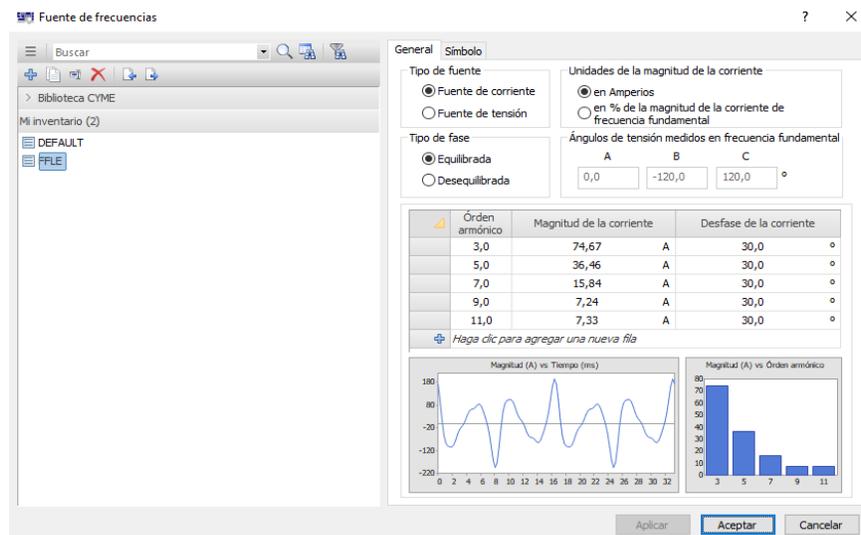


Fig. 26 Parámetros de la fuente de frecuencias
Fuente: Autor

Al igual que en el capacitor, esta fuente se debe seleccionarla desde el apartado **explorador** en la pestaña **>inventario de equipos** en la carpeta **fuentes de frecuencia** se selecciona la fuente que se termina de configurar y se la conecta a nuestra barra de la subestación.

La figura 27 muestra la fuente de frecuencias implementada para el análisis en CYMDIST, que permite inyectar las corrientes armónicas en el sistema.

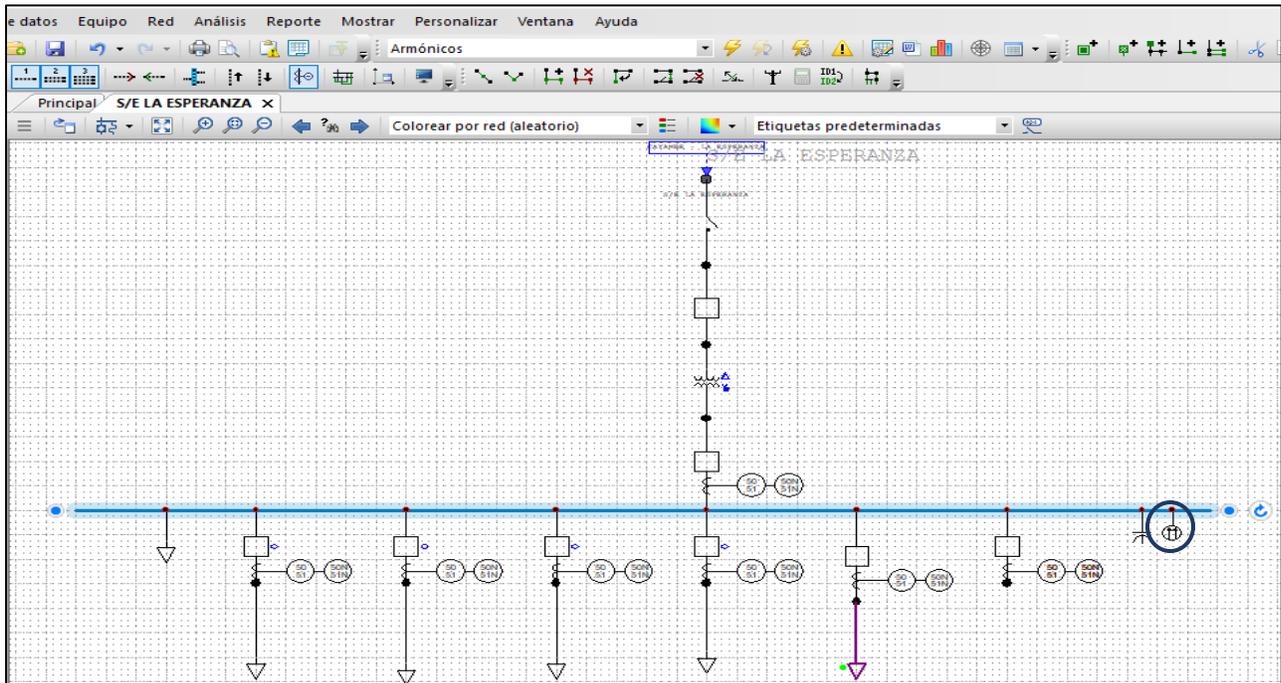


Fig. 27 Fuente de Frecuencia implementada en la modelación
Fuente: Autor

Al hacer doble clic sobre el símbolo de la **fuerza de frecuencia**, se configura en este la potencia real y la potencia reactiva total de la subestación como se observa en la figura 28, dichos datos son tomados del registro de mediciones que EMELNORTE brinda para el análisis ya que es lo que la fuente va a absorber del sistema de la subestación.

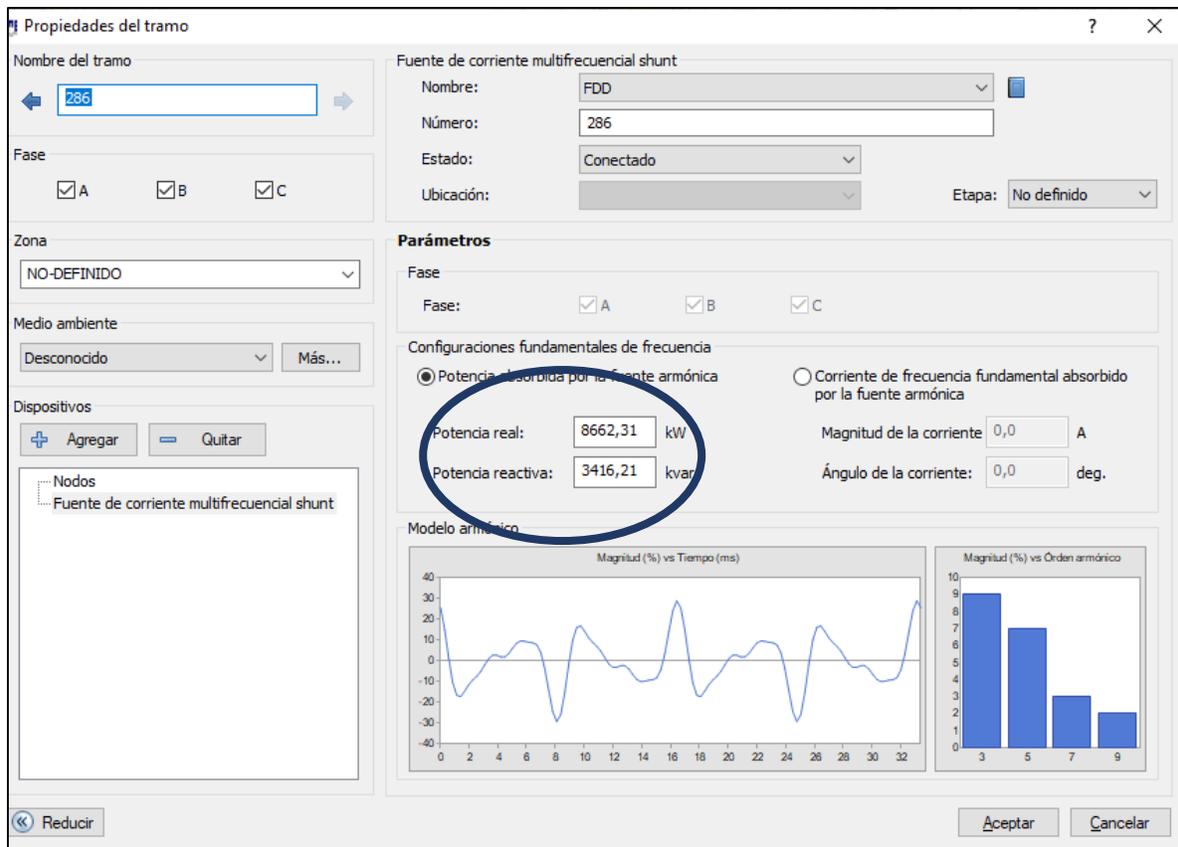


Fig. 28 Configuración de potencias de la fuente de frecuencias
Fuente: Autor

Estos datos fueron tomados de la información que brinda la empresa del historial que lleva en cada una de las subestaciones.

2.7.5 Análisis de armónicos en CYMDIST

Una vez implementados estos equipos, se procede a realizar la primera simulación, con esto se obtiene la información de cómo se encuentra la subestación con la presencia de las frecuencias de resonancia.

La figura 29 indica la pestaña **tipo de análisis**, donde se selecciona el análisis de **armónicos** para obtener las gráficas de la tensión y frecuencia de la subestación.

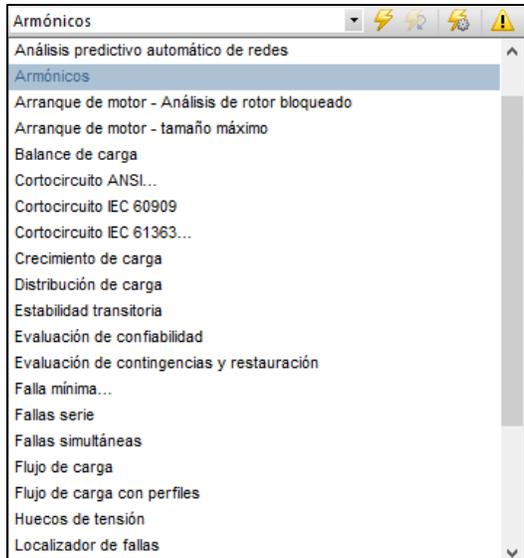


Fig. 29 Análisis de armónicos
Fuente: Autor

Para empezar la simulación, se debe configurar los parámetros necesarios, en la pestaña **>ajustes globales** se debe configurar las características de líneas, cables y cargas como se muestra en la figura 30.

Al tener configurado todos los parámetros  se pulsa el botón ejecutar para empezar la simulación.

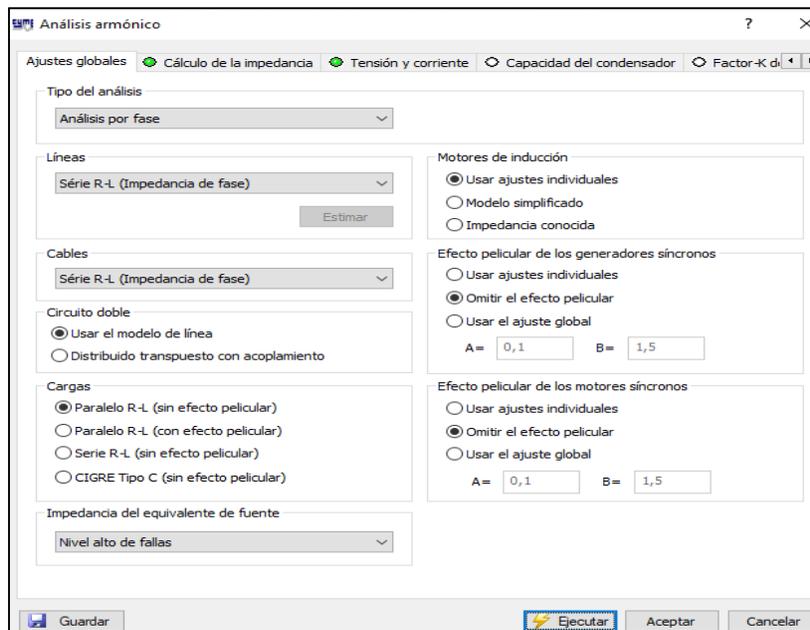


Fig. 30 Configuración de parámetros para el análisis de armónicos
Fuente: Autor

2.7.6 Filtro de sintonía simple

Una vez realizada la ejecución y obtenidos los datos, se procede a realizar la implementación de filtro de simple sintonía, este equipo es un circuito R-L-C el cual reemplazará al capacitor instalado, pero también actuando como un filtro para las frecuencias de resonancia.

Para configurar el filtro de sintonía simple lo realizamos en la pestaña **Equipos** en el apartado **armónicos** se debe configurar este filtro como muestra la figura 31.

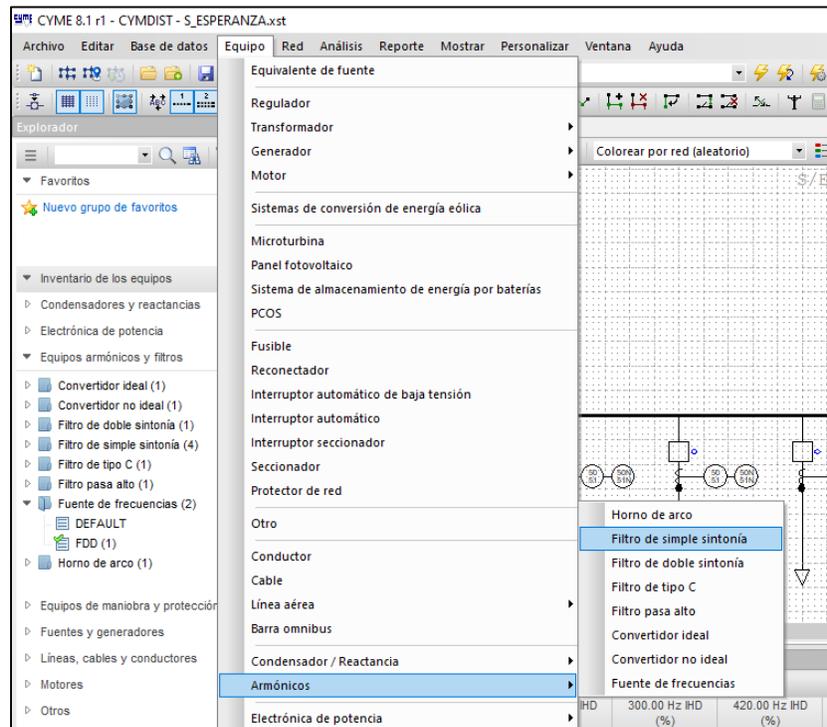


Fig. 31 Implementación del filtro de simple sintonía
Fuente: Autor

Para instalar el filtro de sintonía simple se debe calcular las impedancias equivalentes del filtro de sintonía, la figura 32 muestra la ventana de configuración de los parámetros del filtro de simple sintonía.

Los parámetros utilizados para el cálculo de las impedancias equivalentes del filtro de simple sintonía son:

- **La potencia reactiva del condensador.**- este valor es tomado de las características de los equipos de la subestación.

- **La frecuencia sintonizada.**- para la implementación de este dato, se analiza los armónicos presentes en el sistema, este valor se configura en un aproximado de 6% del valor del menor de los armónicos presentes.
- **El Factor de calidad.**- este valor por lo general se debe configurar entre 20 y 50, de este valor dependerá el pasar por alto la resistencia del filtro.

2.7.6.1 Cálculo de parámetros del filtro de simple sintonía

Para el cálculo de los parámetros del filtro de simple sintonía los datos principales que se debe conocer son la potencia reactiva nominal de capacitor (Q_c), la tensión nominal del sistema (V_n) y el orden de armónico (h) al cual se sintonizará.

Si se conoce la potencia nominal del capacitor se puede calcular la reactancia capacitiva (X_c) del filtro con la siguiente ecuación:

$$X_c = V_n^2 / Q_c$$

La reactancia capacitiva de este filtro sería:

$$X_c = 13,8 \text{ kV}^2 / 3,6 \text{ MVar} = 52,9 \Omega$$

Conociendo la reactancia capacitiva se puede calcular la reactancia inductiva (X_L) del filtro y la capacitancia (C) del mismo con las siguientes ecuaciones:

$$X_L = X_c / h^2 \quad \text{y} \quad C = 1 / 2\pi f X_c$$

Entonces la reactancia inductiva (X_L) y la capacitancia (C) son:

$$X_L = 52,9 / 3^2 = 5,87 \Omega \quad \text{y} \quad C = \frac{1}{2\pi * 60 * 52,9} = 50,14 \mu F$$

Con la reactancia inductiva (X_L) conocida, se procede a calcular la inductancia (L) del filtro con la ecuación:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

La inductancia del filtro será entonces:

$$L = \frac{5,87}{2\pi * 60} = \mathbf{15,57 \text{ mH}}$$

Para el cálculo de la resistencia (R) del filtro se debe conocer la reactancia inductiva (X_L) y el factor de calidad (Q) que va a tener el filtro a instalar, entonces se debe calcular el factor de calidad que se necesita mediante la siguiente ecuación:

$$Q = 3,07K^{0,377}$$

Donde:

$K \rightarrow$ es el valor de potencia reactiva del capacitor en $KVAr$

Entonces el factor de calidad (Q) es:

$$Q = 3,07(3600)^{0,377} = 67,66 \approx \mathbf{70}$$

El valor se redondea al inmediato superior ya que este factor debe ser un valor entero para la fabricación de ser el caso.

Por lo que la resistencia se debe calcular con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{X_L}{Q}$$

La resistencia del filtro será:

$$R = \frac{3 * 5,87}{70} = \mathbf{0,251 \Omega}$$

Tabla 2.2 Parámetros del filtro de simple sintonización

PARÁMETROS	VALOR
X_L	5,87 Ω
L	15,57 mH
X_C	52,9 Ω
C	50,14 μF
R	0,251 Ω

Fuente: Autor

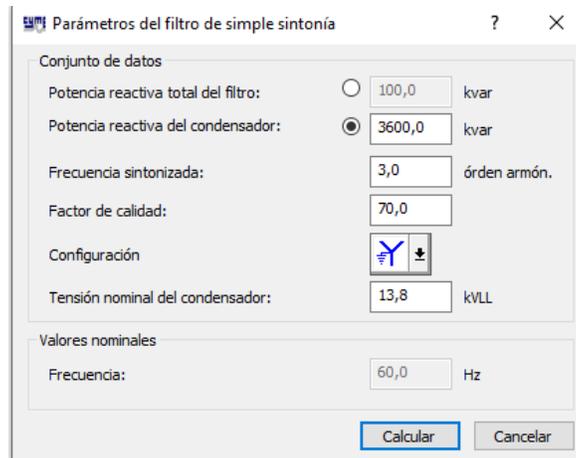


Fig.32 Parámetros del filtro de simple sintonía
Fuente: Autor

Se ingresa los valores de los parámetros calculados como se muestra en la figura 33, estos valores representan la impedancia equivalente del filtro que se va a implementar.

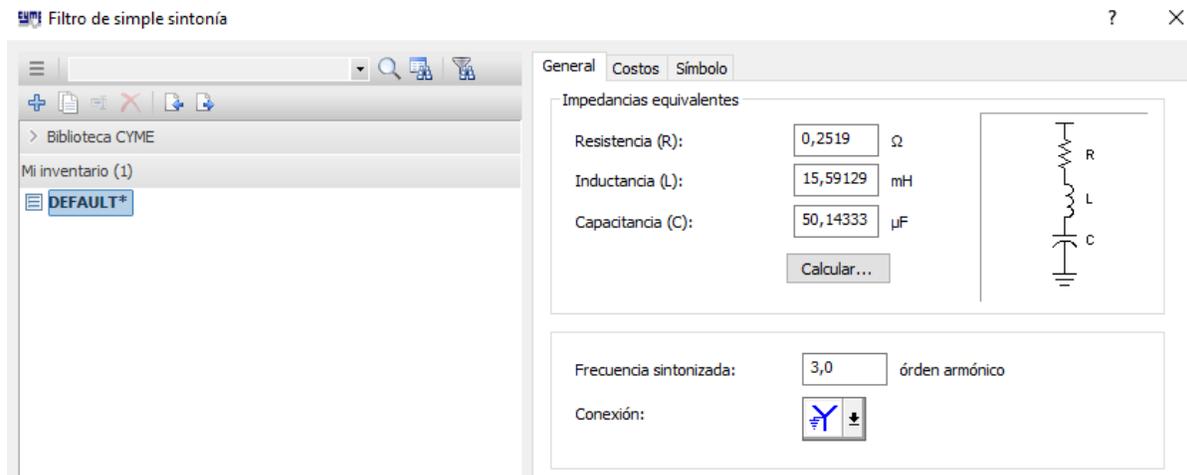


Fig. 33 Impedancia equivalente del filtro de simple sintonía
Fuente: Autor

Se implementa a la barra de subestación el filtro de sintonía simple configurado como se observa en la figura 34, posteriormente se realiza nuevamente el análisis de armónicos del apartado 2.7.5 para obtener las gráficas de impedancia y tensión con las frecuencias armónicas corregidas

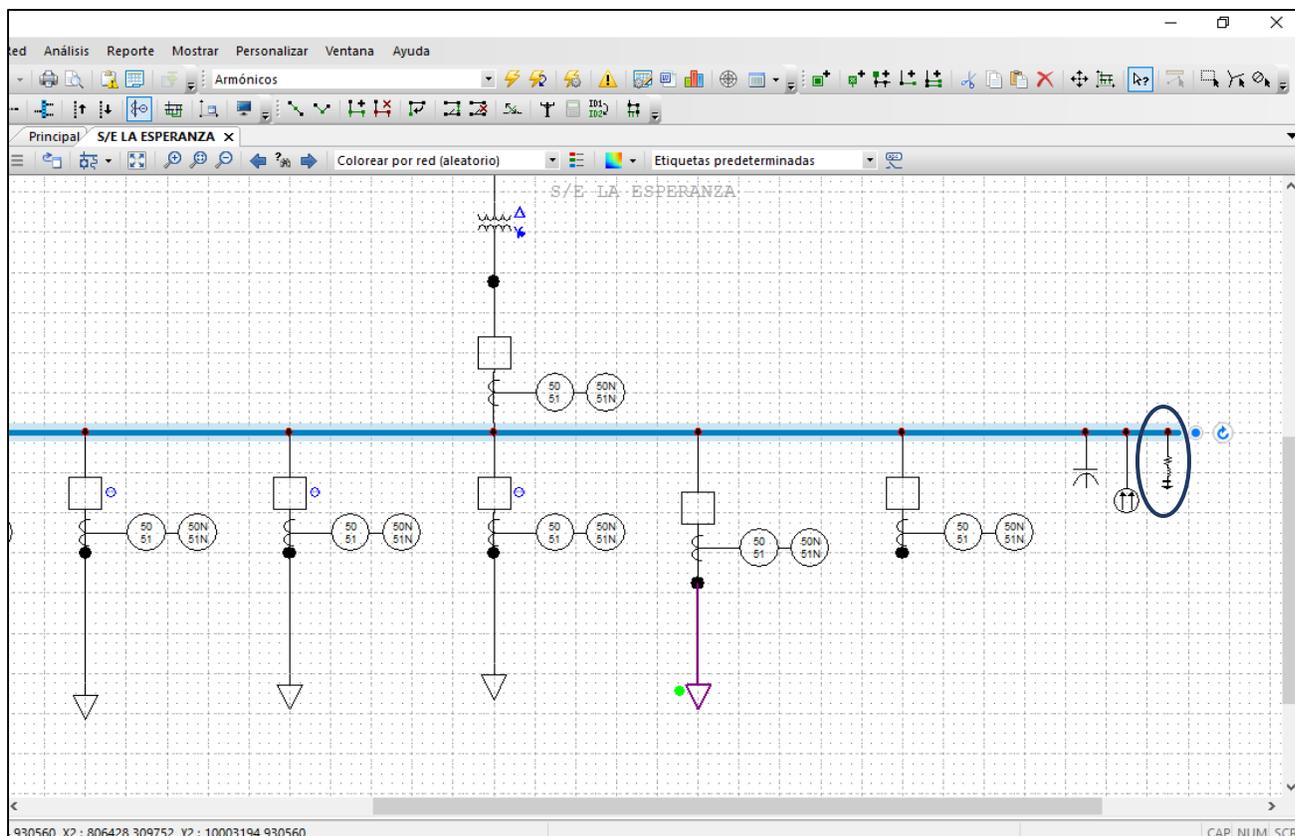


Fig.34 Implementación del filtro de simple sintonía

Fuente: Autor

Cabe señalar que para ejecutar el análisis con el filtro de sintonía simple se debe cambiar el estado del capacitor a desconexión.

Habiendo calculado los datos a través de las fórmulas matemáticas propuestas y habiendo modelado el sistema de la subestación en el software CYMDIST utilizando los mismos datos en los dos procesos, procedemos al análisis de los resultados obtenidos en los dos métodos anteriormente mencionados.

2.7.7 Filtro de sintonía doble

Este tipo de filtro se lo utiliza cuando en el sistema se presenta inconvenientes en dos diferentes frecuencias armónicas, ya que permite sintonizar a dos frecuencias diferentes para reducir la distorsión armónica estos filtros resultan más económicos que implementar dos filtros de sintonía simple.

2.7.7.1 Cálculo de parámetros del filtro de sintonía doble

Para el cálculo de los parámetros de este tipo de filtros, se comienza a partir del cálculo de los parámetros de dos filtros de simple sintonía, uno por cada orden armónico que presente distorsión.

Con el conocimiento de las potencias reactivas de los capacitores (Q_1 , Q_2) y la tensión nominal del sistema (V_n) se comienza a calcular la reactancia capacitiva de cada filtro con la siguiente ecuación:

$$X_C = \frac{h^2}{h^2 - 1} * \frac{V_n^2}{Q}$$

La reactancia capacitiva (X_C) de los capacitores a cada una de las frecuencias de sintonización es:

$$X_{Ca} = \frac{3^2}{3^2 - 1} * \frac{13,8^2 \text{ kV}}{2,4 \text{ MVA}_r} = 89,27 \Omega \quad y \quad X_{Cb} = \frac{5^2}{5^2 - 1} * \frac{13,8^2 \text{ kV}}{1,2 \text{ MVA}_r} = 165,31 \Omega$$

La capacitancia (C) de los filtros se la obtiene con la ecuación:

$$C = \frac{1}{2\pi * 60 * X_C}$$

Entonces la capacitancias de cada filtro (C_a y C_b) son:

$$C_a = \frac{1}{2\pi * 60 * 89,27} = 29,71 \mu F \quad y \quad C_b = \frac{1}{2\pi * 60 * 165,31} = 16,04 \mu F$$

La reactancia inductiva (X_L) es calculada mediante la siguiente ecuación:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2}$$

Las reactancias inductivas los filtros son:

$$X_{La} = \frac{89,27}{3^2} = 9,92 \Omega \quad y \quad X_{Lb} = \frac{165,31}{5^2} = 6,61 \Omega$$

Encontrado las reactancia inductivas de cada uno de los filtros se puede calcular la inductancia con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$

La inductancia de cada fitros (La y Lb) es:

$$L_a = \frac{9,92}{2\pi * 60} = \mathbf{26,31\ mH} \quad \text{y} \quad L_b = \frac{6,61}{2\pi * 60} = \mathbf{17,53\ mH}$$

Las resistencias de cada fitro se puede calcular mediante la ecuación:

$$R = \frac{hX_L}{Q}$$

Las resistencias de cada filtro (Ra y Rb) son:

$$R_a = \frac{3 * 9,92}{60} = \mathbf{0,496\ \Omega} \quad \text{y} \quad R_b = \frac{5 * 6,61}{50} = \mathbf{0,661\ \Omega}$$

Una vez obtenidos los parámetros de los dos filtros de simple sintonización, se procede a calcular los parámetros del filtro de doble sintonización a partir de los parámetros anteriormente calculados tanto para la tercera y quinta armónica.

La capacitancia serie (C1) de filtro se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$C1 = C_a + C_b$$

La capacitancia (C1) del filtro de doble sintonía es:

$$C1 = 29,71\mu F + 16,04\mu F = \mathbf{45,75\ \mu F}$$

Para el cálculo de la inductancia (L2) del filtro se utiliza la siguiente ecuación:

$$L2 = \frac{(L_a C_a - L_b C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)}$$

Entonces la inductancia (L2) del filtro doble es:

$$L2 = \frac{(26,31mH * 29,71\mu F - 17,53mH * 16,04\mu F)^2}{(29,71\mu F + 16,04\mu F)^2(26,31mH + 17,53mH)} = 2,73 mH$$

La inductancia (L1) del filtro doble se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$L1 = \frac{La * Lb}{La + Lb}$$

La inductancia (L1) es:

$$L1 = \frac{26,31mH * 17,53mH}{26,31mH + 17,53mH} = 10,52 mH$$

La capacitancia (C2) del filtro doble se calcula mediante la ecuación:

$$C2 = \frac{Ca Cb(Ca + Cb)(La + Lb)^2}{(La Ca - Lb Cb)^2}$$

La capacitancia (C2) del filtro doble es:

$$C2 = \frac{29,71\mu F * 16,04\mu F(29,71\mu F + 16,04\mu F)(26,31mH + 17,53mH)^2}{(26,31 * 29,71\mu F - 17,53mH * 16,04\mu F)^2} = 167,28 \mu F$$

Para calcular las resistencias del filtro doble, se debe calcular unos parámetros adicionales que se denominaran como (a) y (x) con las siguientes ecuaciones:

$$a = \frac{Ca}{Cb} \quad y \quad x = \sqrt{\frac{Lb Cb}{La Ca}}$$

Los valores de los parámetros a y x entonces son:

$$a = \frac{29,71 \mu F}{16,04 \mu F} = 1,85 \quad y \quad x = \sqrt{\frac{17,53mH * 16,04\mu F}{26,31mH * 29,71\mu F}} = 0,6$$

Con los parámetros anteriores se puede calcular las resistencias del filtro doble con las siguientes ecuaciones:

$$R1 = \frac{X_L h}{Q} \quad ; \quad R2 = Ra \left[\frac{a^2(1 - x^2)}{(1 + a)^2(1 + x^2)} \right] - Rb \left[\frac{1 - x^2}{(1 + a)^2(1 + x^2)} \right]$$

$$R3 = Ra \left[\frac{a^2 x^4 (1 - x^2)}{(1 + ax^2)^2 (1 + x^2)} \right] + Rb \left[\frac{1 - x^2}{(1 + ax^2)^2 (1 + x^2)} \right]$$

Las resistencias (R1, R2 y R3) del filtro de doble sintonía son:

$$R1 = \frac{9,92 * 3}{60} = \mathbf{0,496\Omega}$$

$$R2 = 0,496 \left[\frac{1,85^2 (1 - 0,6^2)}{(1 + 1,85)^2 (1 + 0,6^2)} \right] - 0,661 \left[\frac{1 - 0,6^2}{(1 + 1,85)^2 (1 + 0,6^2)} \right] = \mathbf{0,06\Omega}$$

$$R3 = 0,496 \left[\frac{1,85^2 0,6^4 (1 - 0,6^2)}{(1 + 1,85 * 0,6^2)^2 (1 + 0,6^2)} \right] + 0,661 \left[\frac{1 - 0,6^2}{(1 + 1,85 * 0,6^2)^2 (1 + 0,6^2)} \right] = \mathbf{0,146\Omega}$$

Tabla 2.3 Parámetros del filtro de doble sintonía

PARÁMETROS	VALOR
C1	45,75 μF
L1	10,53 mH
R1	0,496 Ω
C2	167,28 μF
L2	2,73 mH
R2	0,06 Ω
R3	0,146 Ω

Fuente: Autor

La tabla 8 muestra los valores de cada uno de los parámetros del filtro de doble sintonía a ser implementados para la simulación de la atenuación de la resonancia.

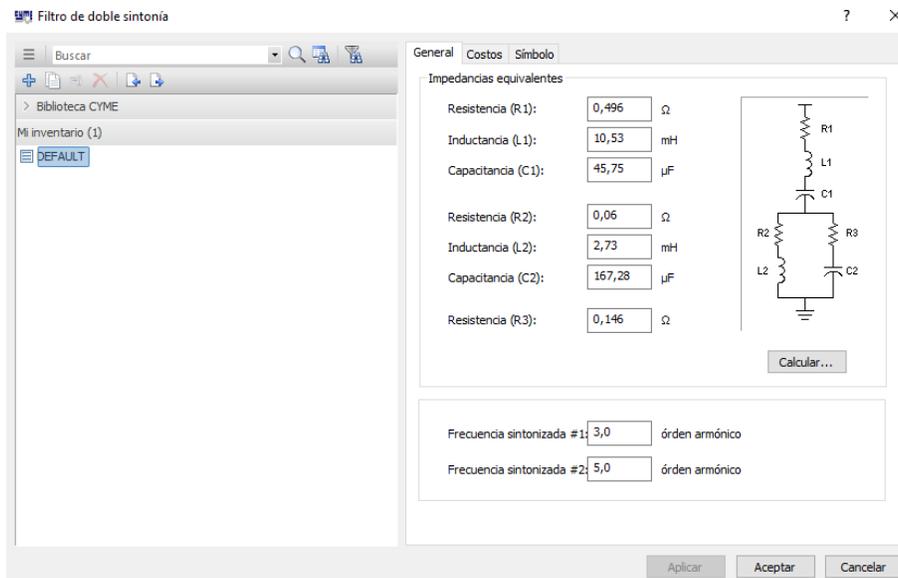


Fig.35 impedancia equivalente del filtro de doble sintonía

Fuente: Cyndist

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Introducción

En este capítulo se realiza el análisis de los resultados obtenidos en la implementación de las metodologías utilizadas, para la atenuación del fenómeno de resonancia presente en la subestación de distribución La Esperanza, la propuesta sugerida para realizar este estudio es la simulación de la implementación de filtros pasivos partiendo de los bancos de capacitores existentes en la subestación de estudio.

Para encontrar la mejor solución al problema presente se realizó el modelamiento de la subestación en el software CYMDIST implementando tanto un filtro de simple sintonía y un filtro de doble sintonía ya que la subestación La Esperanza, al contar con dos bancos de capacitores es posible analizar la utilización del filtro de doble sintonía.

3.1.1 La subestación Esperanza

La subestación La Esperanza cuenta con dos bancos de capacitores, los cuales, para este estudio fueron utilizados, para a partir de sus características implementar, ya sea un filtro de simple sintonía tomando en cuenta la potencia reactiva total de los bancos de capacitores o la implementación de un filtro de doble sintonía tomando en cuenta cada uno de los bancos de capacitores hacia cada frecuencia armónica.

3.2 Análisis de resonancia

El primer análisis realizado en este estudio fue la simulación de la subestación en el momento que se puede presentar el posible fenómeno de resonancia, para esto se simuló el banco de capacitores instalado en la subestación con una potencia activa de 8662,31 kW y una potencia reactiva de 3666,49 kVAr que se presenta debido a la carga que alimenta la subestación La Esperanza.

En la figura 35 se puede apreciar como la impedancia tiende a aumentar de forma precipitada hasta llegar a una frecuencia de 330 Hz, frecuencia que representa el 5to armónico, corroborando así los resultados obtenidos en los cálculos del apartado 2.6 del capítulo 2.

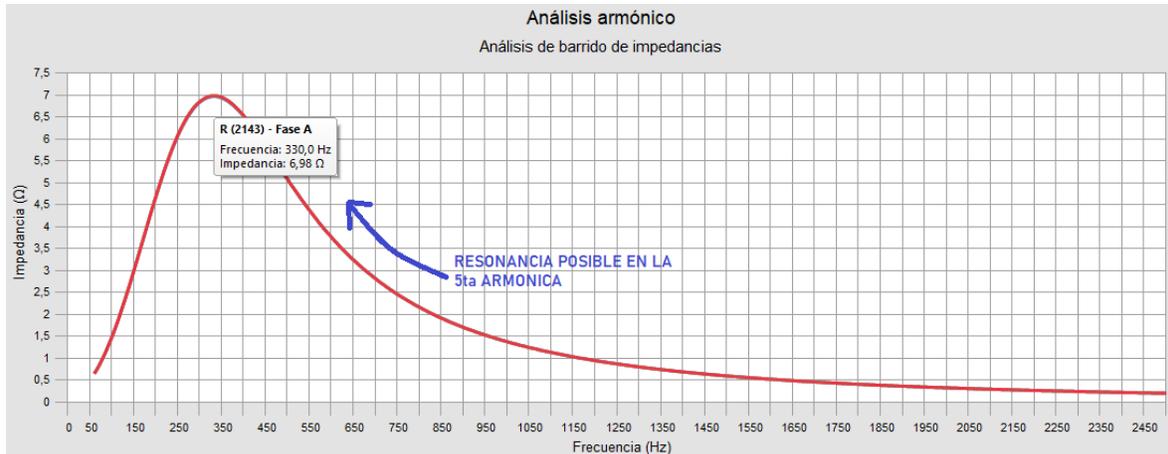


Fig. 36 Gráfica del barrido de impedancia (posible resonancia en el 5to armónico)
Fuente: Autor (Cymdist)

La figura 36 representa las ondas de tensión de las tres fases del sistema, se puede observar que, presenta distorsiones representando una distorsión armónica total (THD) de 6.20% que excede el máximo de 5% permisible en la barra que es lo permitido según la normativa IEEE 519-2014.

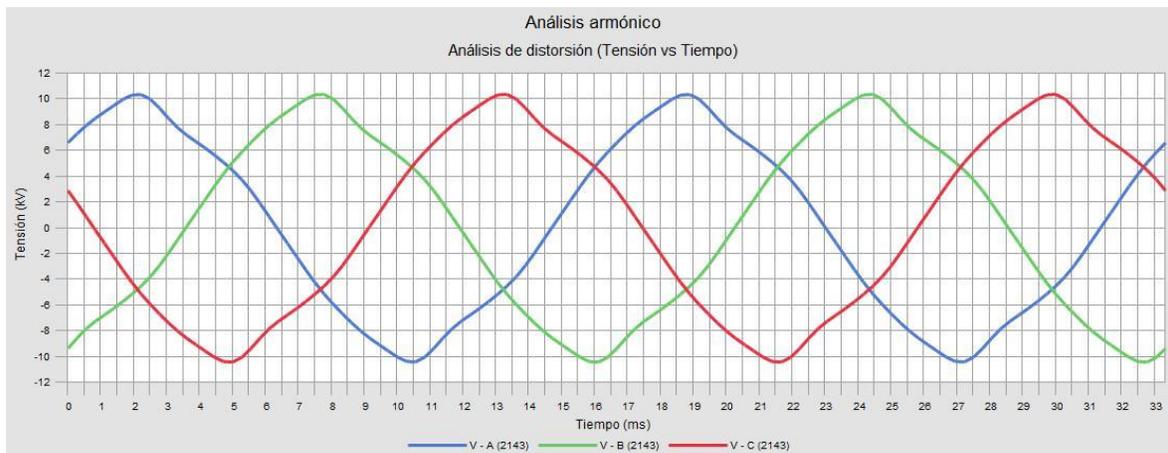


Fig. 37 Ondas de tensión con distorsión armónica presente
Fuente: autor (Cymdist)

En la tabla 9 se representa los módulos de voltaje armónicos individuales presentes en la subestación por cada fase individual de alimentación y los porcentajes individuales de distorsión en cada una de las frecuencias armónicas.

Tabla 3.1 Tensiones armónicas al momento de resonancia

Fase	A				B				C			
Frec. (Hz)	60	180	300	420	60	180	300	420	60	180	300	420
Módulo V (V)	6771,68	305,00	263,10	103,50	6781,00	306,10	263,40	103,60	6780,80	305,60	264,00	103,60
IHD (%)	0,00	4,50	3,89	1,53	0,00	4,51	3,88	1,53	0,00	4,51	3,89	1,53
THD (%)	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20

Fuente: Autor (Cymdist)

La tabla 10 indica los valores de distorsión de tensión armónica individual (**IHD**) y distorsión armónica total (**THD**) por cada una de las frecuencias armónicas individuales presentes en la subestación.

Según lo especificado por la norma IEEE 519-2014, establece que la distorsión armónica individual no debe superar el 3% y la distorsión armónica total (THD) no de ser mayor al 5%.

Tabla 3.2 Distorsión armónica individual

kV L-N	3er.(%)	5to. (%)	7mo.(%)	9no.(%)	11avo. (%)	THD (%)
6,77	4,50	3,89	1,53	0,66	0,50	6,20
6,78	4,51	3,88	1,53	0,66	0,50	6,20
6,78	4,51	3,89	1,53	0,66	0,50	6,20

Fuente: Autor (Cymdist)

Los valores de la tabla 10 informan que, la (IHD) en el caso del 3er armónico y 5to armónico superan el porcentaje establecido por la normativa haciendo que el (THD) sea de igual manera mayor al 5%, produciendo así una caída de voltaje de línea-neutro llegando a un valor de 6,78 kV lo que representa un 15% estimado de caída de tensión.

3.3 Análisis con filtro de simple sintonía

El primer método utilizado, fue la implementación de un filtro de simple sintonía, tomando en cuenta la totalidad de potencia reactiva de los bancos de capacitores y sintonizándolo a la frecuencia de 6% menos del 3er armónico.

La figura 38 presenta la gráfica de impedancias en respuesta al filtro de simple sintonía instalado y sintonizado al menor de los armónicos, se puede evidenciar que, el filtro desintoniza la tercera armónica en la barra y a la vez proporciona una atenuación considerable de la impedancia en la quinta armónica.

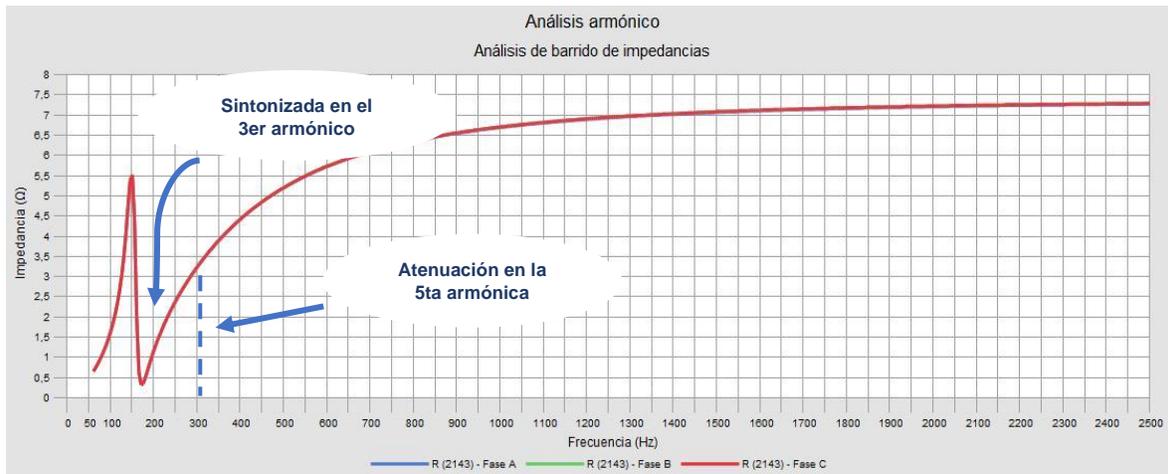


Fig. 38 Gráfica del barrido de impedancia con respuesta del filtro de simple sintonía
Fuente: Autor (Cymdist)

La figura 39 indica las ondas de la tensión de las tres fases, se observa que, tiene menos distorsión y el nivel de Distorsión armónica total (THD) es de alrededor 3,61%, menos que el THD máximo admisible de 5%.

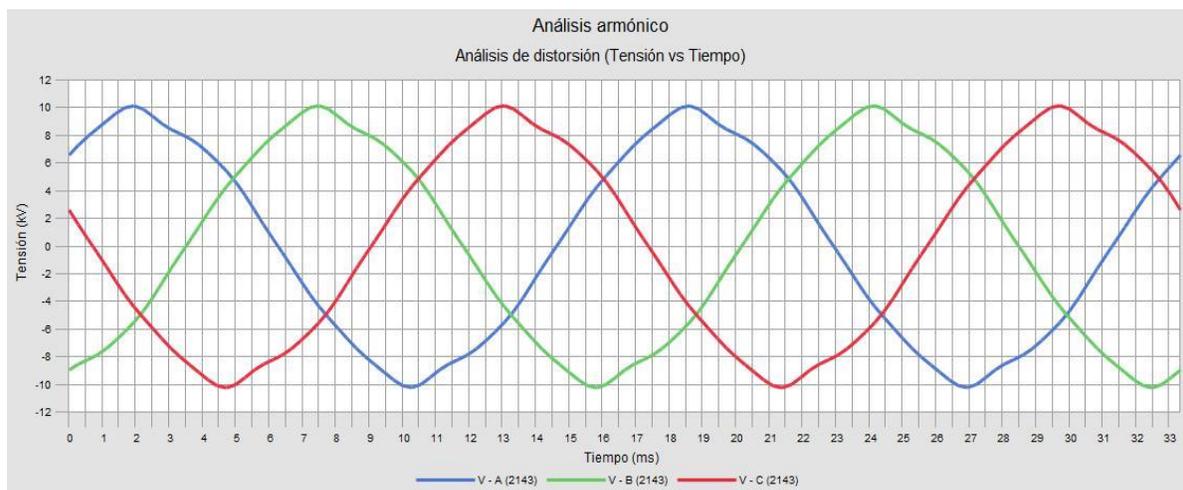


Fig. 39 Ondas de tensión con distorsión armónica presente
Fuente: Autor (Cymdist)

La tabla 11 indica los valores de distorsión de tensión armónica individual (**IHD**) y distorsión armónica total (**THD**) por cada una de las frecuencias armónicas individuales presentes en la subestación una vez instalado el filtro de simple sintonía.

Tabla 3.3 Distorsión de tensión armónica individual con el filtro de simple sintonía

ID de nodo	kV L-N	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	THD (%)
2143-A	6,81	1,55	2,78	1,42	0,62	0,73	3,61
2143-B	6,82	1,55	2,77	1,42	0,62	0,73	3,61
2143-C	6,82	1,55	2,77	1,42	0,62	0,74	3,61

Fuente: Autor (Cymdist)

Los resultados muestran que, tanto las distorsiones de tensión armónicas individuales (IHD) y la distorsión de tensión armónica total (THD) se encuentran dentro de los valores permisibles en la norma, sin embargo, los valores obtenidos a pesar de estar dentro de la norma solo representan una mejora del 0,6% en la caída de tensión, llegando a un valor de 6,82 kV.

Tabla 3.4 Tensiones armónicas con filtro de simple sintonía

Fase	A				B				C			
Frec. (Hz)	60	180	300	420	60	180	300	420	60	180	300	420
Módulo V (V)	6810,65	105,60	189,00	96,78	6819,83	105,60	189,20	96,96	6819,78	105,60	189,20	96,98
IHD (%)	0,00	1,55	2,78	1,42	0,00	1,55	2,77	1,42	0,00	1,55	2,77	1,42
THD (%)	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61	3,61

Fuente: Autor (Cymdist)

La tabla 12 presenta los módulos de tensión armónica que siguen presentes una vez instalado el filtro de simple sintonía y su respectivo porcentaje de distorsión armónica tanto de forma individual como de forma total.

3.4 Análisis con filtro de doble sintonía

Se realizó el análisis con la implementación de un filtro de doble sintonía, este método se pudo llevar a cabo debido a que la subestación cuenta con dos bancos de capacitores lo que permite poder dimensionar un filtro de doble sintonía puesto que, el nivel de distorsión armónica sobrepasa lo permitido en la normativa en la tercera y quinta armónica.

Al tener dos bancos de capacitores se puede realizar la implementación de un filtro de doble sintonía, esto se lleva a cabo sintonizando cada uno de los bancos de capacitores para cada una de las armónicas excedentes de distorsión en este caso la tercera y quinta armónica.

La figura 40 representa el barrido de impedancia de las fases del sistema, se observa que ocurre una doble de sintonización tanto en la tercera como en la quinta armónica para luego empezar a atenuarse en la 7ma armónica.

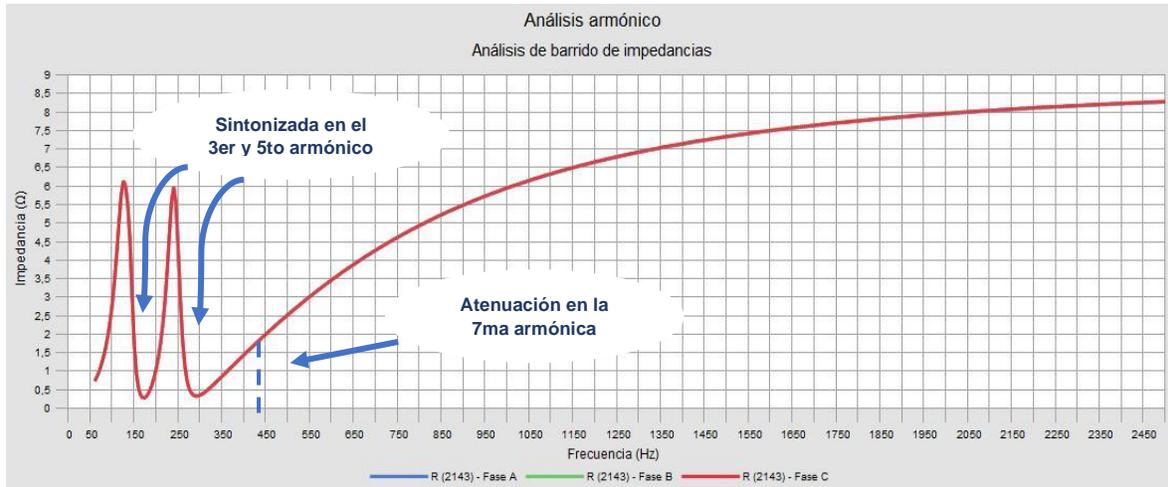


Fig. 40 Barrido de impedancia con respuesta del filtro de doble sintonía
Fuente: Autor (Cymdist)

La figura 41 indica las ondas de la tensión de las tres fases, se observa que, tiene una disminución significativa en distorsión y el nivel de Distorsión armónica total (THD) es de alrededor 1,59%, valor que se encuentra por muy debajo del THD máximo admisible de 5%.

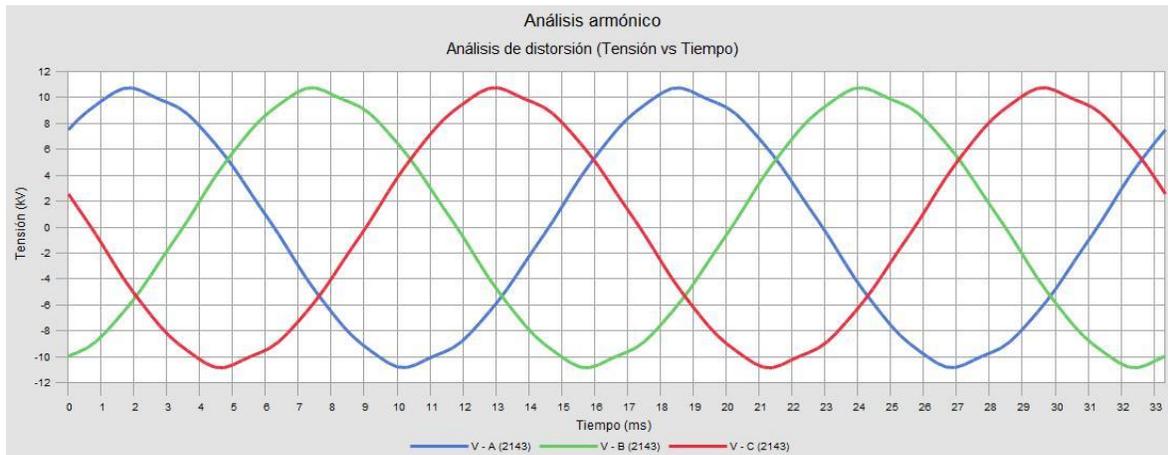


Fig. 41 ondas de tensión con la implementación del filtro de doble sintonía
Fuente: Autor (Cymdist)

La tabla 13 indica los valores de distorsión de tensión armónica individual (**IHD**) y distorsión armónica total (**THD**) por cada una de las frecuencias armónicas individuales presentes en la subestación una vez instalado el filtro de doble sintonía

Tabla 3.5 Distorsión de tensión armónica con filtro de doble sintonía

kV L-N	3er. (%)	5to. (%)	7mo. (%)	9no. (%)	11avo. (%)	THD (%)
7,47	0,98	0,55	0,84	0,44	0,60	1,59
7,48	0,98	0,55	0,84	0,44	0,60	1,59
7,48	0,98	0,55	0,84	0,44	0,60	1,59

Fuente: Autor (Cymdist)

Los resultados muestran que, tanto las distorsiones de tensión armónicas individuales (IHD) y la distorsión de tensión armónica total (THD) se encuentran muy por debajo de los valores permisibles en la normativa, los valores obtenidos en este caso representan una mejora del 9% en la caída de tensión, llegando a un valor de 7,48 kV.

Tabla 3.6 Voltajes armónicos implementado el filtro de doble sintonía

Fase	A				B				C			
	60	180	300	420	60	180	300	420	60	180	300	420
Frec. (Hz)												
Módulo V (V)	7469,54	73,10	40,81	62,58	7476,08	73,12	40,82	62,62	7478,74	73,12	40,81	62,64
IHD (%)	0,00	0,98	0,55	0,84	0,00	0,98	0,55	0,84	0,00	0,98	0,55	0,84
THD (%)	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59

Fuente: Autor (Cymdist)

La tabla 14 presenta los módulos de tensión armónica que siguen presentes una vez instalado el filtro de doble sintonía y su respectivo porcentaje de distorsión armónica tanto de forma individual como de forma total.

Se puede apreciar que los voltajes armónicos disminuyeron alrededor de un 75% en comparación a los voltajes armónicos que se presentan en el momento de la falla.

3.5 Comparación de resultados

En la tabla 15 se presenta la comparación de los resultados más relevantes en la implementación tanto del filtro de simple sintonía como el filtro de doble sintonía

Tabla 3.7 Comparación de resultados entre filtros pasivos

	RESONANCIA PRESENTE	SIMPLE SINTONÍA	DOBLE SINTONIA	TENSIÓN IDEAL
VOLTAJE (kV)	6,77	6,87	7,48	7,96
MEJORA (%)		1,26	8,92	
THD (%)	6,20	3,61	1,59	
TENSIÓN IDEAL (%)	85,05	86,31	93,97	100

Fuente: Autor

Con estos resultados se hace evidente que, para mitigar el problema de resonancia presente en la subestación La Esperanza la mejor solución es la implementación de un filtro de doble sintonía, ya que, se tiene dos frecuencias de resonancia que sobrepasan los límites permitidos por la norma IEEE 519-2014.

Con la implementación del filtro de doble sintonía la distorsión de tensión armónica total disminuye a un valor de 1,59%, la mejora que se presenta con este método es de aproximadamente 9% y permite que la tensión de línea-neutro en cada una de las fases llegue a un valor de 7,48 kV representando aproximadamente un 94% del valor de tensión ideal.

Con el resultado del 94% se cumple con lo establecido en la regulación del ARCONEL 053/10 que especifica que, el límite para el índice de nivel de tensión, cuando el nivel de tensión está en el rango de $> 0,6$ y ≤ 40 kV, es decir, medio voltaje es de $\pm 6\%$.

CONCLUSIONES

La investigación bibliográfica realizada permitió conocer como está estructurada una subestación para su funcionamiento y que efectos adversos conlleva en los equipos instalados cuando se presenta la resonancia.

Gracias al módulo de armónicos que contiene el software CYMDIST fue posible realizar el diagnóstico de funcionamiento de la subestación mediante el modelamiento de sus equipos e inyección de armónicos y analizar varios casos de solución como los dos utilizados en este estudio que son la implementación de filtros pasivos tanto de simple sintonía y doble sintonía.

El filtro de doble sintonía fue la solución más apropiada para este estudio debido a que se presentaban distorsiones armónicas sobre lo reglamentario tanto en el tercer armónico y quinto armónico, el filtro permitió poder sintonizar a las dos frecuencias de resonancia disminuyendo así considerablemente la distorsión de tensión armónica total (THD) y mejorando el nivel de tensión en un 9%.

Al momento de sintonizar los filtros pasivos se debe considerar hacerlo a un 6% menos de su frecuencia fundamental, es decir, orden armónico, ya que permitirá obtener una sintonía aceptable al final de su vida útil.

En el cálculo de los parámetros del filtro de doble sintonía se debe considerar utilizar el banco de capacitores con mayor potencia reactiva para sintonizar la frecuencia armónica de orden más bajo debido a que los armónicos de orden más bajo pueden llegar a inyectar mayor porcentaje de distorsión.

El factor de calidad es muy importante en el diseño de los filtros, ya que permite modificar la forma de la curva de impedancia contra frecuencia con la finalidad de ampliar un poco más el rango de frecuencias alrededor de la frecuencia principal sintonizada. No es conveniente tener un factor de calidad tan bajo porque las resistencias son altas en los filtros y generan pérdidas de potencia real en forma de calor y la eficiencia del filtro disminuye drásticamente mientras que un factor de calidad alto aumenta la eficiencia del filtro, pero también los costos debido al rediseño de los materiales utilizados para la fabricación del filtro, por lo que se debe buscar un equilibrio entre calidad del filtro y los costos.

RECOMENDACIONES

La empresa Emelnorte debe llevar un registro lo más actualizado posible de la información acerca de los armónicos presentes en los sistemas de distribución para así poder analizarlos en el tiempo que se requiera realizar este tipo de estudios y brindar una solución lo más pronto que sea posible.

Se debe tomar muy en cuenta en que orden de armónico o armónicos sobrepasan los límites de distorsión reglamentarios, puesto que dependerá de este parámetro la implementación del filtro adecuado que permita dar la solución más conveniente al problema.

La empresa de distribución Emelnorte deberá tener en consideración este estudio realizado debido a que la subestación 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.

- Aguila Téllez, A. (2020). Optimum location and sizing of capacitor banks using VOLT VAR compensation in micro-grids. *IEEE Latin America Transactions*, 18(3), 465-472.
- Alcantara D.P., & Castellanos L. (2012). *Análisis de Resonancia Armónica en una red de distribución* INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL]. MEXICO D.F.
- Alcántara-Bonilla, A., Reyes-Trujillo, E., & Galindo-Torres, J. (2010). Análisis del fenómeno de resonancia electromagnética en sistemas eléctricos industriales.
- Aranea, L. (2015). *ESTRUCTURA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL ECUADOR*.
- Arcila, J. D. (2010). Armónicos en sistemas eléctricos. *Ieb Sa*, 1-26.
- Ardón Marroquín, A. V. (2018). *Evaluación de la implementación de una subestación de transformación de 230/13, 8 kV contra una de 69/13, 8 kV en Escuintla, Guatemala* Universidad de San Carlos de Guatemala].
- Bautista Tonato, J. N., & Solís Mora, V. S. (2014). *Desarrollo del mantenimiento predictivo mediante la técnica de la termografía para evaluar el correcto funcionamiento de la subestación oriente y alimentador totoras de la empresa eléctrica Ambato SA*
- Carlos, C. C. A. C. J., & Blanco, M. (2019). Estrategia Para El Monitoreo De La Condición De Los Interruptores De Potencia Del Grupo Energía Bogotá.
- Carpio Becerra, B. B., & Llivicura Zhingri, E. F. (2015). *Análisis del efecto de resonancia en los transformadores de pedestal hasta 250 KVA trifásicos*
- Carrasco Andrade, A. R. (2019). Estrategia de Operacion de Subestaciones en la Corporación Nacional de Electricidad Empresa Pública Unidad de Negocios: Caso Subestación Marcelino Maridueña.
- Carvajal, C. (2007). *Análisis de Resonancia Armónica en sistemas Eléctricos* Universidad Tecnológica de Pereira].
- Castaño, S. R. (2004). *REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA* UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA]. Manizales.
- Castro, M. A. G. (2015). *Desarrollo de un módulo didáctico para la enseñanza de diseño de subestaciones eléctricas* Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Tecnología ...].
- Castro Paspuel, E. R., & Herrera Pozo, C. J. (2013). *Diseñar un manual Técnico para el manejo y operación de la nueva Subestación Alpachaca 69 kv. de la Empresa Eléctrica Regional Norte SA*
- Della Giustina, D., Pau, M., Pegoraro, P. A., Ponci, F., & Sulis, S. (2014). Electrical distribution system state estimation: measurement issues and challenges. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 17(6), 36-42.
- Díaz, G., & Albarracín, R. (2012). *Análisis de sobretensiones y huecos de tensión en generación fotovoltaica y diseño de un controlador difuso* Universidad Carlos III de Madrid]. Leganés.
- Electric, S. (2020). *Compact NSX Micrologic 5/6/7*. <https://bit.ly/3yBF4UD>
- EMB, P. (2019). Estándares de Armónicos *ELECTROINDUSTRIA*.
- Erwin, Z., & Jorge, H. (2012). BARRAJES Subestaciones de Potencia. <https://es.scribd.com/document/81388303/Barrajes>
- Farinango Gramal, A. B. (2019). *Estudio de confiabilidad de la subestación el chota en base a procesos estocásticos para la empresa eléctrica regional Norte SA*
- Fierro Romero, R., & Flores Hinostrero, M. (2010). *Diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación eléctrica del nuevo campus de la Universidad Politécnica Salesiana-sede Guayaquil*
- Flores, L. I. R., Guzmán, B., Perich, E., & Fernández, M. (2014, 25-27 Aug. 2014). El ABC de puestas a tierra de fuentes de generación EN refinerías DE México: parte 1: Estado del arte para integrar nuevos generadores en sistemas eléctricos actuales. 2014 IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference - Brasil (PCIC Brasil),

- FULGENCIO, A. A., BARANDA, M., & MEJÍA, G. (2012). *OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE EQUIPO PRIMARIO EN SUBESTACIONES ELECTRICAS CONVENCIONALES TIPO INDUSTRIALES* INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL MÉXICO]. MÉXICO.
- Gao, D. W., Muljadi, E., Tian, T., & Miller, M. (2017). *Software comparison for renewable energy deployment in a distribution network*.
- GONZALEZ, A., & MOLINA, E. (2013). *DISEÑO DE UNA SUBESTACION ELECTRICA PARA ALIMENTAR UN SISTEMA DE AGUA CONTRA INCENDIO EN UN COMPLEJO PROCESADOR DE GAS* UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO]. MÉXICO.
- Harper, G. E. (2002). *Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas*. Editorial Limusa.
- Harper, G. E. (2006). *Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión/Fundamentals of Electrical Installations of Medium and High Tension*. Editorial Limusa.
- Hasan, K. M. (2012). *Harmonic and Resonance issues in wind power plants*. International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Santiago de Compostela.
- Holguin, M., & Gómez Coello, D. (2010). *Análisis de calidad de energía eléctrica en el nuevo campus de la Universidad Politécnica Salesiana*
- IEEE Standard for Shunt Power Capacitors. (1980). *ANSI/IEEE Std 18-1980*, 1-23. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1980.79668>
- Iglesias-Urkiá, M., Casado-Mansilla, D., Mayer, S., Bilbao, J., & Urbieto, A. (2019). Integrating Electrical Substations Within the IoT using IEC 61850, CoAP, and CBOR. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(5), 7437-7449.
- Larin, V. S., Matveev, D. A., Zhuikov, A. V., Kubatkin, M. A., & Nikulov, I. I. (2018). Resonance Overvoltages in Primary Winding of a Station Service Voltage Transformer. *Russian Electrical Engineering*, 89(8), 490-495. <https://doi.org/10.3103/S1068371218080072>
- Luna Eras, E. E., & Veintimilla Miranda, F. J. (2017). *Implementación mediante programación en matlab de la operación del sistema de control automatizado del patio de 138 kV de la S/E Pascuales*
- Martínez Sarmiento, F. H. (2001). El fenómeno de distorsión armónica en redes eléctricas. *Tecnura*, 5(9), 46-54. <https://doi.org/10.14483/22487638.6117>
- Martínez-Morales, S., Sellschopp-Sánchez, F., Loera-Palomo, R., Rivero-Corona, M., & Vargas-Salas, R. (2019). Estudio de resonancias armónicas en red eléctrica ante variación de carga. *Revista Ciencia*, 1.
- Mendoza López, J. M. (2010). Análisis y solución del problema de Resonancia en Paralelo en el circuito CNU-5420 de la Subestación Contla.
- Morales, A. J., Torres, T. C., Reza, A. E., & Valenzuela, H. A. (2015). Ubicación de Bancos de Capacitores en redes de distribución radiales de media tensión.
- Moreno Alfonso, N. (2010). *RCE: reglamento sobre centrales eléctricas, subestaciones y centros de Transformación*. Editorial Tebar Flores.
- Ordoñez, J., & Nieto, L. (2010). *MANTENIMIENTO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN* FACULTAD DE INGENIERIAS, GUAYAQUIL.
- Parada, Barrietos, & Pasasin. (2015). *Estudio y Evaluación de Fenómeno de Ferresonancia en Subestaciones de Distribución*. El Salvador.
- PIÑATE, M. (2015). *CIRCUITOS RESONANTES* UNIVERSIDAD FERMÍN TORO]. CABUDARE -VENEZUELA.
- PLATA, A. D. J. H. (2010). *MANIOBRAS PARA LIBRAR EQUIPO EN SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN (230/23 Kv)* INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL].

- Ramesh, L., Ravindiran, S., Chowdhury, S. P., Chowdhury, S., Song, Y. H., & Goswami, P. K. (2007, 4-6 Sept. 2007). Distribution System Loss Minimization and Planning Using Cymdist. 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference,
- RIVERA, W. O. (2014). *Selección y Especificación de Transformadores de Corriente y Potencial en Instalaciones Eléctricas Industriales* Tesis de Programa Único de especialización de Ingeniería, Universidad ...].
- Vásquez, P. (2013). *Parametrización, control, determinación, y reducción de pérdidas de energía en base a la optimización en el montaje de estaciones de transformación en la provincia de Morona Santiago (Master's thesis)*. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/423>.
- Xu, Y., Dong, Z. Y., Wong, K. P., Liu, E., & Yue, B. (2013). Optimal capacitor placement to distribution transformers for power loss reduction in radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power systems*, 28(4), 4072-4079.

ANEXOS

Anexo 1: Valores en amperios de las corrientes armónicas presentes en la subestación.

ORDEN ARMÓNICO	MAGNITUD DE CORRIENTE (A)
3er	74,67
5to	36,46
7mo	15,84
9no	7,24
11avo	7,33