UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO

FACULTAD CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

Denominación De La Obtención Del Título De Ingeniero En Electricidad

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE ARMÓNICOS EN EL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE POTENCIA DE 20MVA – 69/13,8kV DE LA EMPRESA ELÉCTRICA DE AMBATO (E.E.A.S.A).

AUTOR:

PEÑAFIEL LOOR JEFF STEVEN

DIRECTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

ING. MSc. PEÑA BANEGAS DIEGO PATRICIO

QUEVEDO - LOS RÍOS - ECUADOR

2021

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

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

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

JEFF STEVEN PEÑAFIEL LOOR

Firmado digitalmente por JEFF STEVEN PEÑAFIEL LOOR
Fecha: 2021.09.06 12:54:18 -05'00'

f. _____

Jeff Steven Peñafiel Loor
C.C. # 1500631443

CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Ing. MSc. Peña Banegas Diego Patricio**, Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que el estudiante **Peñafiel Loor Jeff Steven**, realizo el Proyecto de Investigación de grado titulado "Análisis de la influencia de armónicos en el transformador trifásico de potencia de 20MVA–69/13,8kV de la Empresa Eléctrica de Ambato (E.E.A.S.A)", previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, bajo mi dirección, haciendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

Firmado electrónicamente por:
DIEGO PATRICIO PENA BANEGAS

f. _____

Ing. MSc. Peña Banegas Diego Patricio
DIRECTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

CERTIFICADO DEL REPORTE DE HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

Ing. MSc. Peña Banegas Diego Patricio, en calidad de Director de Proyecto de Investigación titulado "ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE ARMÓNICOS EN EL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE POTENCIA DE 20MVA–69/13,8Kv DE LA EMPRESA ELÉCTRICA DE AMBATO (E.E.A.S.A)", me permito manifestar a usted y por intermedio al Consejo Académico de Facultad lo siguiente:

Que, el estudiante PEÑAFIEL LOOR JEFF STEVEN, egresada de la Facultad Ciencias de la Ingeniería, ha cumplido con las correcciones pertinentes, e ingresado su Proyecto de Investigación al sistema URKUND, tengo a bien de certificar la siguiente información sobre el informe del sistema anti plagio con un porcentaje de 4%.

Por la aprobación que se sirva de dar a la presente, quedo ante usted muy agradecido.

URKUND

Documento	PROYECTO INVESTIGATIVO-ANALISIS DE LA INFLUENCIA DE ARMONICOS EN EL TRANSFORMADOR TRIFASICO DE POTENCIA - C.docx (D101782437)
Presentado	2021-04-15 19:22 (-05:00)
Presentado por	dpena@uteq.edu.ec
Recibido	dpena.uteq@analysis.urkund.com
Mensaje	Correccion de Tesis Mostrar el mensaje completo
	4% de estas 34 páginas, se componen de texto presente en 8 fuentes.

Firmado electrónicamente por:
DIEGO PATRICIO PENA BANEGAS

f. _____

Ing. MSc. Peña Banegas Diego Patricio
DIRECTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO

FACULTAD CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

PROYECTO DE INVESTIGACION

TEMA

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE ARMÓNICOS EN EL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE POTENCIA DE 20MVA–69/13,8kV DE LA EMPRESA ELÉCTRICA DE AMBATO (E.E.A.S.A)

Presentado al Consejo Directivo de la Facultad como requisito previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico.

Aprobado por:

YADYRA MONSERRATH ORTIZ GONZALEZ

Firmado digitalmente por YADYRA MONSERRATH ORTIZ GONZALEZ
Fecha: 2021.12.02 13:41:59 -05'00'

Ing. YADYRA ORTIZ GONZALES
PRESIDENTE DE TRIBUNAL

0502662455 CRISTIAN SAMUEL LAVERDE ALBARRACIN

Firmado digitalmente por 0502662455 CRISTIAN SAMUEL LAVERDE ALBARRACIN
Fecha: 2021.12.02 11:00:26 -05'00'

Ing. CRISTIAN LAVERDE ALBARRACIN
MIENBRO DE TRIBUNAL

HERNAN SANTIAGO ESPINOZA ORTEGA

Firmado digitalmente por HERNAN SANTIAGO ESPINOZA ORTEGA
Fecha: 2021.12.02 21:59:04 -05'00'

Ing. HERNÁN ESPINOZA ORTEGA
MIEMBRO DE TRIBUNAL

QUEVEDO – LOS RIOS – ECUADOR
2021

AGRADECIMIENTO

Es el momento oportuno y adecuado para agradecer el apoyo que me otorgaron los diferentes actores muy importantes que de forma directa e indirecta supieron encaminar mi carrera profesional, que es el punto de lanza que me permitirá desarrollarme profesionalmente.

El pilar fundamental son mis padres quienes están siempre firmes e inculcaron con pie firme e impulsaron la culminación de una meta más de mi carrera, a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo quien me acogió como estudiante y me permitió escalar cada peldaño hasta llegar a la cúspide donde me permitieron enriquecer mis conocimientos para formarme como profesional.

Quiero hacer el respectivo reconocimiento al Ing. MSc. Peña Banegas Diego, al Ing. Nelson Muzo Director Zonal a la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A. (EEASA) sucursal Napo, al Ing. Víctor Uyaguari jefe de área eléctrica de la misma empresa, quienes durante este proceso otorgaron todo su contingente en la elaboración de mi proyecto de tesis.

DEDICATORIA

En el transcurso del proceso aparecieron personas que aportaron con lecciones que me ayudaron a perseverar y no darme por vencido hasta lograr cumplir el objetivo, amistades que se convirtieron en mi apoyo en los momentos más difíciles que no podía continuar y estuvieron para ayudarme a levantar mi ego.

Gracias al ánimo y motivación del entorno en el que estuvimos rodeados descubrimos capacidades y habilidades que nos permitieron desarrollar y culminar este trabajo.

Por tal razón me permito DEDICAR este esfuerzo personal a mis padres que fueron el pilar fundamental, que con seguridad seré un apoyo más en el emprendimiento familiar que ha estado presente en el mercado por varios años, donde incursione con mis primeros pasos en el área eléctrica.

RESUMEN EJECUTIVO

Este proyecto presenta el análisis de distorsión armónica en el transformador trifásico de potencia de 20MVA – 69/13,8kV ubicado en el cantón Tena, provincia de Napo, perteneciente a la prestigiosa Empresa Eléctrica de Ambato S.A. Este transformador abastece suministro eléctrico a los cantones Tena, Archidona y las parroquias de Muyuna, San Pablo de Ushpayacu, Cotundo y Hatun Sumaco. En la actualidad el uso constante de equipos electrónicos como variadores de frecuencia, hornos de inducción, cargadores, microondas, entre otros. Estos equipos inyectan armónicos ocasionando efectos negativos, llegando a deformar la onda sinusoidal de corriente y voltaje en el transformador que los alimenta.

Por esta razón, se obtiene los datos del transformador mediante la medición de calidad de energía realizados por el personal de la empresa antes mencionada, se analiza de forma experimental el comportamiento que tiene los armónicos en el transformador de potencia empleando el software DIgSILENT. La información adquirida en la simulación será utilizada para la corrección al problema de armónicos cuyo objetivo principal es poder disminuir los niveles de distorsión armónica que contiene la red.

Finalmente, se diseña un filtro pasivo, el mismo que es conectado en la barra de baja tensión (13,8kV); Aquí se puede apreciar una onda sinusoidal de corriente con niveles reducidos de armónicos la disminución de pérdidas de energía, prolongando así la vida útil del transformador.

Palabras Clave: Distorsión armónica, carga lineal, carga no lineal, transformador, calidad de energía.

ABSTRACT

This project presents the harmonic distortion analysis in the 20MVA - 69/13.8 kV three-phase power transformers located in the Tena canton, Napo province, belonging to the prestigious Empresa Eléctrica de Ambato S.A. This transformer supplies electricity to the cantons of Tena, Archidona and the parishes of Muyuna, San Pablo de Ushpayacu, Cotundo and Hatun Sumaco. Currently the constant use of electronic equipment such as frequency inverters, induction ovens, chargers, microwaves, among others. These equipments inject harmonics causing negative effects, deforming the sinusoidal wave of current and voltage in the transformer that feeds them.

For this reason, the transformer data is obtained by measuring the power quality carried out by the personnel of the aforementioned company, the behavior of the harmonics in the power transformer is experimentally analyzed using the DIgSILENT software. The information acquired in the simulation will be used to correct the harmonics problem, the main objective of which is to reduce the levels of harmonic distortion contained in the network.

Finally, a passive filter is designed, the same one that is connected to the low voltage bus (13.8kV); Here you can see a current sine wave with reduced levels of harmonics reducing energy losses, thus prolonging the useful life of the transformer.

Keywords: Harmonic distortion, linear load, non-linear load, transformer, power quality.

INDICE

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS ii

CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DE PROYECTO DE iii

INVESTIGACIÓN iii

CERTIFICADO DEL REPORTE DE HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO..... iv

AGRADECIMIENTO vi

DEDICATORIA vii

RESUMEN EJECUTIVO..... viii

ABSTRACT ix

CÓDIGO DUBLÍN..... xviii

INTRODUCCIÓN..... 1

CAPÍTULO I 2

CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 2

1.1. Problema de investigación..... 3

1.1.1. Planteamiento del problema. 3

1.1.2. Formulación del problema..... 3

1.1.3. Sistematización del problema..... 3

1.2 Objetivos..... 4

1.2.1. Objetivo general. 4

1.2.2. Objetivo Específico. 4

1.3. Justificación..... 5

1.4. Hipótesis. 6

CAPÍTULO II..... 7

FUNDAMENTACÍON TEÓRICA DE LA 7

INVETIGACIÓN 7

2.1. Marco conceptual. 8

2.1.1. Armónicos. 8
2.1.2. Origen de los armónicos. 8
2.1.3. Indicadores esenciales de distorsión armónica 9
2.1.4. Distorsión armónica. 11
2.1.5. Características de la distorsión armónica. 14
2.1.6. Efectos que producen los armónicos. 15
..... 16
2.1.7. Efectos de los armónicos en los transformadores de potencia. 16
2.1.8. Pérdidas en el transformador. 16
2.1.9. Medidas para reducción o eliminación de los armónicos. 22
2.1.10. Normativa INEN-IEC 61000 Niveles de compatibilidad de baja frecuencia perturbaciones conducidas y señalización en los sistemas de alimentación de baja tensión. 23
2.2. Marco referencial. 25
CAPÍTULO III 28
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 28
3.1. Localización. 29
3.2. Tipo de investigación. 29
3.3. Métodos de investigación. 29
3.3.1. Método deductivo. 29
3.3.2. Método experimental. 30
3.3.3. Método analítico. 30
3.4. Fuentes de recopilación de información. 30
3.5. Instrumentos de investigación. 30
3.6. Tratamiento de datos. 31
3.7. Talentos humanos y materiales. 32
CAPÍTULO IV 33

RESULTADOS Y DISCUCIONES 33
4.1. Resultados. 34
4.1.1. Aplicación de la metodología para el análisis de armónicos en el transformador de potencia. 34
4.1.2. Característica y datos del transformador de potencia. 34
4.1.3. Análisis de distorsión armónica. 35
4.1.4. Cálculos de pérdidas de carga totales en el transformador. 40
4.1.5. Reducción de la distorsión armónica en el transformador. 44
4.2. Discusiones. 51
4.2.1. Efecto de la distorsión armónica en el transformador de potencia trifásico de la “E.E.A.S.A.” 51
4.2.2. Resultados de la reducción de distorsión armónica en el transformador trifásico de potencia. 54
4.2.3. Resultados de pérdidas en el transformador con influencia de armónicos... 56
4.2.4. Beneficios de reducir los niveles de armónicos en el transformador de potencia. 58
CAPÍTULO V 59
CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIÓN 59
5.1. Conclusión. 60
5.2. Recomendación. 61
CAPÍTULO VI 62
BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS 62
6.1. Bibliografía. 63
6.2. Anexos. 65

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Efectos que producen los armónicos. 15
Tabla 2 Frecuencia y secuencia de los niveles de armónicos. 25
Tabla 3 Límites permitidos de corriente de distorsión armónica por la norma IEC 61000. 26
Tabla 4 Límites permitidos de corriente de distorsión armónica por la norma IEEE 519-1992. 27
Tabla 5 Límites permitidos de voltajes de distorsión armónica por la norma IEEE 519-1992. 27
Tabla 6 Características del transformador trifásico de potencia. 34
Tabla 7 Taps de conmutaciones del transformador trifásico de potencia. 35
Tabla 8 Factor de cresta de voltaje y corriente. 35
Tabla 9 Contenido de distorsión armónica de corriente las fases A-B-C. 36
Tabla 10 Valores de distorsión armónica y distorsión armónica total de corriente. 40
Tabla 11 Valores de distorsión armónica de corriente del transformador y fase A-B-C. 40
Tabla 12 Cálculos de las pérdidas adicionales en el transformador de potencia con armónicos. 41
Tabla 13 Pérdidas nominales del transformador de potencia. 43
Tabla 14 Cálculos de las pérdidas adicionales en el transformador de potencia con la reducción de armónicos. 48
Tabla 15 Datos medidos de niveles de distorsión armónica de corriente. 51
Tabla 16 Valores de nivel de distorsión armónica resultantes por la implementación del filtro pasivo. 54
Tabla 17 Pérdidas adicionales de potencia en el trasformador. 57

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Factor de cresta 9
Ecuación 2 Potencia de distorsión 9
Ecuación 3 Distorsión armónica de tensión 10
Ecuación 4 Distorsión armónica de corriente 11
Ecuación 5 Tasa de distorsión individual de tensión 11
Ecuación 6 Tasa de distorsión individual de corriente 12
Ecuación 7 Valor eficaz de tensión. 12
Ecuación 8 Valor eficaz de corriente 12
Ecuación 9 Distorsión de demanda total. 13
Ecuación 10 Pérdidas totales de carga en el transformador. 16
Ecuación 11 Perdidas Óhmicas 16
Ecuación 12 Perdidas por corrientes de Eddy. 17
Ecuación 13 Perdidas por corrientes parasitas en los devanados a corriente y frecuencia nominal. 17
Ecuación 14 Perdidas parasitas por unidad en devanados de bajo voltaje y alto voltaje 17
Ecuación 15 Pérdidas parasitas totales 18
Ecuación 16 Pérdidas adicionales 18
Ecuación 17 Pérdidas por flujo de dispersión. 18
Ecuación 18 Factor de armónicos para las pérdidas por corrientes de Eddy.. 19
Ecuación 19 Factor de pérdidas armónicas en otras partes del transformador 19
Ecuación 20 Perdidas con cargas en condiciones nominales 19
Ecuación 21 Perdidas en un transformador que suministra una carga distorsionada.... 20
Ecuación 22 Corriente máxima por unidad en presencia de armónicos 20
Ecuación 23 Perdidas totales 40
Ecuación 24 Perdidas en el cobre. 40
Ecuación 25 compensación de reactivos 42
Ecuación 26 Efectividad de impedancia 43
Ecuación 27 Reactancia capacitiva del filtro 43
Ecuación 28 Capacitancia 44
Ecuación 29 Reactancia inductiva del filtro 44

Ecuación 30 Inductancia..... 44
Ecuación 31 Resistencia. 44

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de Subestación Tena Norte de la E.E.A.S.A. 29
Figura 2 Modelamiento del sistema en Digsilents. 37
Figura 3 Espectro armónico de corriente en las fases A-B-C. 38
Figura 4 Onda sinusoidal de corriente a) Faces A b) Faces B c) Faces C. 38
Figura 5 Onda sinusoidales de corriente del transformador de potencia. 39
Figura 6 Espectro armónico de corriente del transformador de potencia. 39
Figura 7 Estructura constructiva del filtro pasivo. 47
Figura 8 Modelamiento del sistema con implementación del filtro pasivo en Digsilents 47
Figura 9 Onda sinusoidal de corriente del transformador con la implementación del filtro pasivo. 48
Figura 10 Espectro armónica de corriente con la implementación del filtro pasivo, a) transformador, b) fase A-B-C. 49
Figura 11 Espectro armónica de corriente aplicando la norma IEEE 519-1992, a) transformador, b) fases A-B-C. 52
Figura 12 a) Corriente del transformador sin reducción de armónicos, b,c,d) Corriente de las fases A-B-C sin reducción de armónicos. 53
Figura 13 Espectro armónica de corriente aplicando la norma IEEE 519-1992, a) transformador, b) fases A-B-C. 55
Figura 14 a) Corriente del transformador sin reducción de armónicos, b,c,d) Corriente de la fase A-B-C con reducción de armónicos. 56
Figura 15 Pérdidas de potencia en carga. 57

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Trasformador trifásico de potencia 20MVA 69kV/13.8KV. 65
Anexo 2 Placa constructiva del trasformador trifásico de potencia 20MVA 69kV/13,8kV. 65
Anexo 3 Estándares y recomendaciones para el análisis de distorsión armónica en sistemas eléctricos. 66
Anexo 4 Necesidad de mejorar la interfaz de la red. 67
Anexo 5 Normativa Técnica Ecuatoriana INEN-IEC 61000-2-2 68
Anexo 6 Normativa ANSI/IEEEC57.91-1995 Estudio de Sobrecarga. 69
Anexo 7 Normativa IEEE Stad. 18-2002 Compensación reactivo en paralelo. 70
Anexo 8 Anexo 7 Sonel Analysis 4.4.9 - Medidor de calidad de energía. 71
Anexo 9 Fluke Power log classic 4.6 71
Anexo 10 Costo de implementación de filtro pasivo. 72

CÓDIGO DUBLÍN

Título:	Análisis de la influencia de armónicos en el transformador trifásico de potencia de 20MVA–69/13,8kV de la Empresa Eléctrica de Ambato (E.E.A.S.A)				
Autor:	Peñafiel Loor Jeff Steven				
Palabras clave:	Distorsión armónica	Carga lineal	Carga no lineal	Transformador de potencia	Calidad de energía
Fecha de publicación:	8-diciembre-2021				
Editorial:	Quevedo: UTEQ, 2021.				
Resumen:	El siguiente proyecto presenta el análisis de distorsión armónica en el transformador trifásico de potencia de 20MVA – 69/13,8kV instalado en la subestación Tena Norte ubicado en el cantón Tena, provincia de Napo, perteneciente a la prestigiosa Empresa Eléctrica de Ambato S.A el cual, se benefician los cantones Tena, Archidona y las parroquias de Muyuna, San Pablo de Ushpayacu, Cotundo y Hatun Sumaco. En la actualidad se utiliza a diario equipos construidos con elementos semiconductores para la facilitar el trabajo en nuestros hogares, industrias y centros comerciales, estos equipos inyectan armónicos ocasionando efectos negativos en la red, llegando a deformar la onda sinusoidal de corriente y voltaje en el transformador que los alimenta, el objetivo principal es poder disminuir los niveles de distorsión armónica y las pérdidas de energía que ocasionan tenerlos. **Abstract: The following project presents the harmonic distortion analysis in the 20MVA - 69 / 13.8kV three-phase power transformer installed in the Tena Norte substation located in the Tena canton, Napo province, belonging to the prestigious Empresa Eléctrica de Ambato SA which , the cantons Tena, Archidona and the parishes of Muyuna, San Pablo de Ushpayacu, Cotundo and Hatun Sumaco benefit. At present, equipment built with semiconductor elements is used daily to facilitate work in our homes, industries and shopping centers, these equipment inject harmonics causing negative effects on the network, deforming the sinusoidal wave of current and voltage in the transformer that feeds them, the main objective is to be able to reduce the levels of harmonic distortion and the energy losses that they cause.**				
Descripción:	90 hojas : dimensiones, 29 x 21 cm + CD-ROM 6162				
URI:					

INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico ha permitido que en la actualidad se añada la electrónica de potencia en hogares, industrias y centro comerciales con el fin de producir equipos más eficientes con menor consumo de energía donde se busca mejorar la productividad a bajo costo, ofreciendo así un servicio de calidad.

La conexión de cargas no lineales y cargas lineales en el sistema eléctrico generan efectos de distorsión armónica, el cual llega afectar principalmente a los transformadores, siendo uno de los elementos de mayor costo e importante en el sistema eléctrico.

Tener efectos de distorsión armónica provocan corriente elevadas convirtiéndose en pérdidas que se disipan en forma de calor, deteriorando prematuramente los componentes como papel aislante, aceite y daños en los devanados, provocando haciendo de esa manera disminuya la vida útil del transformador.

Por lo tanto, la finalidad de esta investigación es analizar las causas y efectos que llega a obtener el transformador conectado a la red con cargas no lineales. Además, se planteará el método de reducción de armónicos que consiste en conectar un filtro pasivo en la barra de salida para filtrar armónicos de mayor magnitud a una frecuencia resonante predeterminada. Este estudio, se realizará para la Empresa Eléctrica de Ambato con el fin de dar a conocer el estado actual del transformador de potencia.

La investigación cuenta con cinco capítulos los cuales, en el Capítulo I abarca el contexto de la investigación, el planteamiento del problema, objetivos, justificación e hipótesis. El Capítulo II se hablará de la teoría que sustenta en la investigación de distorsión armónica en el transformador de potencia y los factores que generan la inyección de armónicos en la red y la manera de reducirlos. El Capítulo III se detallará la metodología utilizada en la investigación, así como también el talento humano, la localización, materiales e instrumentos necesarios que se utilizaran en la investigación. En el Capítulo IV se muestran los resultados y discusiones de la investigación. Finalmente el Capítulo V se redactara las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO I

CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problema de investigación.

1.1.1. Planteamiento del problema.

La implementación de la electrónica de potencia en nuestra vida cotidiana y la necesidad del uso de estos equipos por su eficacia, ha acarreado un grave problema para el consumo y la distribución de energía eléctrica en residencias, centros comerciales e industrias.

Estos equipos a lo largo de su funcionamiento tienden a ocasionar problemas de distorsión de armónicos en voltaje y corriente, consumiendo energía eléctrica de forma no lineal, es decir, de una manera no continua en el tiempo, los armónicos se pueden ver reflejados como sobrecalentamiento en los conductores, disminución del factor de potencia, vibraciones en cuadros eléctricos, degradación en el aislamiento, afectando así principalmente la vida útil del transformador de potencia y por ende la calidad de energía disminuye.

1.1.2. Formulación del problema.

¿Los armónicos inciden en el rendimiento operacional del transformador de potencia y que método se podrían utilizar para lograr corregir o reducir los mismos?

1.1.3. Sistematización del problema.

- ¿Por qué se producen los armónicos?
- ¿Cuáles son las consecuencias de tener armónicos en el transformador de potencia?
- ¿Qué técnicas se pueden utilizar para la disminución de armónicos en el transformador de potencia?
- ¿Cuál es el resultado de disminuir los armónicos en el transformador de potencia?

1.2 Objetivos.

1.2.1. Objetivo general.

- Analizar la influencia de armónicos en el transformador de trifásico de potencia de 20MVA – 69/13kV de la Empresa Eléctrica de Ambato.

1.2.2. Objetivo Específico.

- Determinar los efectos que causan los armónicos sobre el transformador de potencia.
- Simular el estado de funcionamiento del transformador con armónicos mediante el software DIgSILENT.
- Proponer y diseñar el modelamiento de un filtro pasivo para la reducción de armónicos del transformador de potencia de la Empresa Eléctrica de Ambato (E.E.A.S.A) en el software DIgSILENT.
- Comparar la respuesta del transformador con armónicos vs el efecto causado por el filtro pasivo conectado.
- Indicar los beneficios de reducir los armónicos del transformador de potencia de la Empresa Eléctrica de Ambato (E.E.A.S.A).

1.3. Justificación.

La Empresa Eléctrica de Ambato (E.E.A.S.A.) siendo una empresa proveedora de energía del país y con el objetivo de entregar energía de calidad a sus clientes ve la necesidad de realizar un análisis de distorsión armónica en el transformador de potencia para tener un conocimiento del nivel de pérdidas que ha tiendo en el transcurso de su operación.

En la actualidad la eficiencia energética es el punto clave para entregar energía de calidad a los usuarios, para ello se debe tener en cuenta que las pérdidas técnicas y no técnicas sean las mínimas posibles en el sistema de distribución.

La investigación planteada trata de demostrar el impacto perjudicial que pueden llegar a tener los armónicos en el transformador de potencia.

El poder simplificar los armónicos en el transformador ayudara a obtener pocas pérdidas y mayor eficiencia, garantizando un alto rendimiento de operación del transformador.

Este estudio, está basado en información brindada por la empresa como son las mediciones de campo de distorsión armónica del transformador, carga instalada en la barra conectada, características del transformador, niveles de voltajes y corrientes.

1.4. Hipótesis.

La inyección de armónicos por causa de cargas no lineales podría aumentar las pérdidas de energía en el trasformador de potencia.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACÍON TEÓRICA DE LA INVETIGACIÓN

2.1. Marco conceptual.

2.1.1. Armónicos.

Los armónicos son señales sinusoidales que operan a una frecuencia distinta a la señal de la frecuencia fundamenta, este efecto es causado por diversos equipos y demás fuentes armónicas que producen ondas sinusoidales de distintas frecuencias (múltiplos de la fundamental) donde son sumadas con la fundamental dando como resultado la forma de onda distorsionada.[1]

Los armónicos según su amplitud nos indican el porcentaje de ciclos de armónicos con respectos a la fundamental, mientras según su paridad nos muestra si es par o impar, los cuales, el rangos de armónicos par (2, 4, 6, 8,..n) no se consideran para él estudia ya que se logran anular debido a la simetría de la señal alterna. Los rango de armónico impar (3, 5, 7, 9,…n) son causado por las cargas no lineales monofásicas donde tienen como resultado este tipo de espectro.[2]

El modelo matemático que se aplica para el análisis de los armónicos es la Serie de Fourier, esta teoría matemática fue desarrollada por el francés matemático Jean-Baptiste Joseph Fourier de ahí su nombre.[2]

2.1.2. Origen de los armónicos.

Convencionalmente los condensadores y transformadores en condiciones de saturación son una fuente que genera distorsión armónica, en la actualidad existe una gran contribución por parte de los modernos dispositivos electrónicos que son conectados al sistema de potencia.[3]

La electrónica de potencia ha llegado ser indispensables para mejorar el trabajo diario tales como: circuitos rectificadores, variadores de velocidad, computadoras, inversores, televisores Led, PLC y más elementos que se encuentran en mayor número en los centros de consumos. Estos dispositivos tienden a tener una curva no sinusoidal haciendo que en el sistema eléctrico aparezcan deformaciones en la onda alterna y provocando una distorsión en el sistema.[4]

2.1.2.1. Cargas lineales y cargas no lineales.

- Carga lineal.- Al aplicar una diferencia de potencial sinusoidal directamente a una carga resistiva, inductiva, capacitiva o la combinación de ellos, se produce una corriente proporcional que también es sinusoidal, esta honda no presentara deformaciones de armónicas. [2]

- Carga no lineal.- Al aplicar una diferencia de potencial sinusoidal directamente a una carga resistiva, inductiva, capacitiva o la combinación de ellos, se produce una corriente no proporcional dando como resultado una salida distorsionada con respecto a la sinusoidal. Los equipos que originan armónicos pueden ser la electrónica de potencia, aparatos ferromagnéticos y los aparatos de arco.[2]

2.1.2.2. Fuentes de los armónicos.

Las cargas no lineales pueden clasificarse básicamente en tres categorías que son los siguientes[5], **Basadas en arcos y descargas eléctricas:** Lámparas de descargas (fluorescentes, ahorradores de energía, neón, vapores de sodio, mercurio y etc.) Soldadores de arco, Hornos de arco eléctrico. **Basadas en inductancia saturables:** Transformadores, Motores, Reactancias para limitar los arcos de descarga. **Electrónicas:** Rectificadores de cargas resistivas o inductivas, Fuentes de alimentación, Reguladores y recortadores, Cargadores de baterías, Convertidores de voltaje de corriente continua a corriente alterna.

2.1.3. Indicadores esenciales de distorsión armónica

Existen indicadores que nos permite evaluar y cuantificar la distorsión armónica en los sistemas eléctricos en las magnitudes de voltaje y corriente. Estos indicadores son indispensables para la determinación de las acciones correctivas requeridas, las cuales, son las siguientes:[6]

- Factor de potencia.
- Factor de cresta.
- Potencia de distorsión.
- Espectro en frecuencia.
- Tasa de distorsión armónica.

2.1.3.1. Factor de cresta.

Bruel y Hjaer definen que el factor de cresta 'FC' de una señal de voltaje o corriente repetitiva como el cociente entre el nivel del pico máximo y su valor eficaz durante un predeterminado tiempo.[7]

Este factor es especialmente utilizado para detectar la presencia de valores cresta o picos excepcionales con respecto al valor eficaz. El factor de cresta para una señal sinusoidal es igual a la raíz de dos, para una señal no sinusoidal puede tener una valor superior o inferior a raíz de dos.[8]

Para interpretar este factor ya que es típico de corrientes absorbidas por cargas no lineales es mucho mayor que la raíz de 2, puede tomar valores iguales a 1,5 o 2 llegando incluso a 5 en casos críticos, un factor de cresta muy elevado implica sobreintencidades puntuales importantes, llegado a ser detectadas por los equipos de protección ocasionando el origen de desconexiones indeseadas.[8]

El factor de cresta está representado por la siguiente ecuación 1:

Ecuación (1)

$$\boldsymbol{F_C = \frac{I_{cresta}}{I_{RMS}} \quad O \quad F_C = \frac{V_{cresta}}{V_{RMS}}}$$

Dónde:

F_C = Factor de cresta.

I_{cresta}, V_{cresta} = Corriente pico, Voltaje pico.

Irms, Vrms = Corriente nominal, Voltaje nominal.

2.1.3.2. Potencia de distorsión.

Se define como la potencia de distorsión (D) a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la potencia activa, la potencia reactiva y la potencia aparente, la cual, está representada por la siguiente ecuación 2[8]:

Ecuación (2)

$$\boldsymbol{D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad O \quad D = \sqrt{(V_{RMS} I_{RMS})^2 - S^2}}$$

Dónde:

D = Potencia de distorsión.

S= Potencia aparente.

P = Potencia activa.

Q = Potencia reactiva.

2.1.3.3. Espectro de frecuencia.

El espectro de frecuencia nos permite conocer las amplitudes y ángulos de desfases relativos de cada componente sinusoidal que integra a la señal distorsionada, se obtiene mediante la transformada rápida de Fourier y se puede asimilar que de forma muy simplificada a una proyección sobre un plano amplitud vs frecuencia de los distintos componentes que integran la señal distorsionada.[9]

2.1.4. Distorsión armónica.

La distorsión armónica se caracteriza por la deformación de la onda sinusoidal de la corriente eléctrica por causas de los equipos electrónicos que consumen energía eléctrica de manera no lineal que es de manera no continua en el tiempo, provocando que la onda de corriente se distorsione formando la descomposición de diferentes componentes también conocidos como armónicos. La presencia de armónicos se puede medir con la magnitud conocida como Tasa de Distorsión Armónica (THD).[6]

2.1.4.1. Tasa de distorsión armónica (THD).

La tasa de distorsión armónica (THD) es utilizada frecuentemente para especificar la importancia del componente armónico de una señal alternativa, la cual, está definido como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las magnitudes de la componente fundamental, donde la componente fundamental es la frecuencia del sistema de potencia de valor de 50 o 60Hz.[10]

La tasa de distorsión armónica esta expresada por la siguiente:

- Distorsión armónica de tensión como indica la ecuación 3:

Ecuación (3)

$$\boldsymbol{THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{k} V_h^2}}{V_1} * 100\%}$$

Dónde:

THDv = Distorsión total de armónicos de tensión.

V_h = Valor individual de tensión de cada componente.

V_1 = Valor de tensión fundamental.

h = Numero de armónicos.

k = Numero del armónico máximo.

- Distorsión armónica de corriente como indica la ecuación 4:

Ecuación (4)

$$\boldsymbol{THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{k} I_h^2}}{I_1} * 100\%}$$

Dónde:

THD_i = Distorsión total de armónicos de corriente.

I_h = Valor individual de corriente de cada componente.

I_1 = Valor de corriente fundamental.

h = Numero de armónicos.

k = Numero del armónico máximo.

2.1.4.2. Tasa de distorsión individual.

La tasa de distorsión individual ya sea para voltaje o corriente es la relación del porcentaje entre el valor eficaz de las magnitudes armónicas y el valor eficaz de la componente fundamental.[10]

- Tasa de distorsión individual de tensión como indica la ecuación 5:

Ecuación (5)

$$\boldsymbol{V_h\% = \frac{V_h}{V_1} * 100}$$

Dónde:

V_h% = Tasa de distorsión individual de voltaje.

V_1 = Voltaje fundamental.

V_h = Voltaje eficaz.

- Tasa de distorsión individual de corriente como indica la ecuación 6:

`

Ecuación (6)

$$\boldsymbol{I_h\% = \frac{I_h}{I_1} * 100}$$

Dónde:

I_h% = Tasa de distorsión individual de corriente.

I^1 = Corriente fundamental.

I_h = Corriente eficaz.

2.1.4.3. Valor eficaz total (TRMS).

El valor eficaz es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de todos los componentes que forman la onda sinusoidal.[8]

- Valor eficaz de tensión como indica la ecuación 7:

Ecuación (7)

$$\boldsymbol{TRMS_V = \sqrt{V_1{}^2 + V_2{}^2 + V_3{}^2 + \ldots\ldots + V_n{}^2}}$$

Dónde:

T_{MRSv} = Valor eficaz de tensión.

V_1, V_2, V_3,…, V_n = Voltajes de los componentes.

- Valor eficaz de corriente como indica la ecuación 8:

Ecuación (8)

$$\boldsymbol{TRMS_I = \sqrt{I_1{}^2 + I_2{}^2 + I_3{}^2 + \ldots\ldots + I_n{}^2}}$$

Dónde:

T_{MRSv} = Valor eficaz de corriente.

I_1, I_2, I_3,…, I_n = Corrientes de los componentes.

2.1.4.4. Distorsión de demanda total (TDD).

La distorsión de la demanda total (TDD) es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga, el TDD estima las intensidades armónicas que se producen entre la fuente de alimentación y el usuario, el cual, nos brinda una mejor visión sobre de la cantidad de impacto de distorsión armónica se encuentra en el sistema.[11]

Al efectuar las debidas mediciones de armónicos en los sistemas eléctricos, es habitual encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos, por el motivo, que la energía distorsionante que fluye tiende a ser baja. Para evaluar adecuadamente las condiciones del TDD se establecen los límites aceptables de la distorsión en corriente bajo la norma IEEE 519. Con la siguiente ecuación 9 se calcula la distorsión de demanda total TDD[8] :

Ecuación (9)

$$\boldsymbol{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} * \mathbf{100\%}$$

Dónde:

TDD = Distorsión de demanda total.

I_h = Valor individual de corriente de cada componente.

I_L = Valor de corriente fundamental.

h = Orden armónicos.

2.1.5. Características de la distorsión armónica.

Al obtener la onda medida ya sea de tensión o de corriente de un sistema eléctrico, si se nota que en cualquier punto de la onda se encuentra distorsionad con relación a la onda ideal resultante que se debería tener, decimos que la onda sinusoidal está contaminada con componentes armónicas. Para considerar como distorsión armónica en una señal sinusoidal, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- La señal debe tener valores definidos dentro del intervalo, lo que implica que la energía contenida es finita.
- La señal debe ser periódica, teniendo la misma forma de onda en cada ciclo de la señal de voltaje o corriente.
- La señal debe ser permanente en cualquier instante de tiempo, no debe ser pasajera.

2.1.6. Efectos que producen los armónicos.

Los armónicos existentes en la red producen en los componentes o elementos los siguientes efectos[9]:

Tabla 1 Efectos que producen los armónicos.

COMPONENTES	PROBLEMAS	EFECTO
Conductor	- Aumento de la corriente. -Aumento de la resistencia. -Aumento de pérdidas térmicas. - Efecto Skin.	-Calentamiento de cables -Disparo de protecciones
Conductor de neutro	-Circulación de armónicos múltiplos de 3. -Retorno por el conductor neutro.	-Sobreintensidad circulando por el neutro. -Calentamiento en el neutro. -Degradación prematura del conductor neutro. -Tensión neutro-tierra. -Disparo de protecciones.
Condensadores	-Resonancia paralelo con el sistema. -Amplificación de los armónicos.	-Calentamiento. -Envejecimiento prematuro de condensadores. Destrucción de condensadores.
Motores	-Circulación de corriente armónicas por los devanados.	-Sobrecalentamiento de los devanados. -Pérdida de aislamiento térmico por calentamiento. -Perdidas en el cobre y en el hierro -Disminución del rendimiento. -Vibraciones en el eje, desgaste mecánico en rodamientos y excentricidad. -Reducción al par.
Grupos electrógeno	-Sistema blando, con mayor impedancia que la red. -Tensión distorsionada	-Dificultad de sincronización automática y posterior conmutación.

Equipos de medida y control	-Medidas no válidas. -Error en procesos de control	-Error en equipos que tomas como referencia el paso por cero de la onda. -Saturación de transformadores de medida o protección.

Fuente: Procedimiento para el estudio y análisis de perturbaciones armónicas

2.1.7. Efectos de los armónicos en los transformadores de potencia.

Los transformadores en general son diseñados para manejar corrientes lineales o corrientes sinusoidales de voltajes balanceadas con una frecuencia dimensionada para operar de 50 o 60 Hz. El momento que el transformador alimenta cargas no líneas pierde eficiencia, ya que, sufre pérdidas adicionales ocasionadas por los componentes armónicos como consecuencia se reduce la capacidad máxima de operación al menos del 50% de su potencia nominal.[2]

Durante la operación los transformadores están sujetos a esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos lo que causa degradación en sus componentes de aislamiento aceite/ papel, el aumento excesivo de temperatura, la presencia de oxígeno y humedad al combinarlas con el esfuerzo eléctrico estos factores aceleran la degradación del equipo. Como consecuencia secundaria los esfuerzos mecánicos originados por la excitación del núcleo y corto circuito descompone el aceite convirtiendo en ácidos y lodo.[12]

Las corrientes armónicas de frecuencia más alta están asociadas a las corrientes parasitas e histéresis en el núcleo incrementando proporcionalmente al cuadrado de la corriente de carga RMS, además de las pérdidas por efecto Skin en los devanados. Las pérdidas por estas corrientes también se ven reflejadas en el cobre por la circulación de corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa transportadas por los conductores de fase derivadas de las cargas generados de armónicos monofásicas y trifásicas.[3]

2.1.8. Pérdidas en el transformador.

Las pérdidas en el transformador se clasifican en las siguientes:

- Pérdidas de vacío.
- Pérdidas de carga.
- Pérdidas en los devanados
- Pérdidas adicionales.

La clasificación anterior mostrada son exclusivamente de un transformador sin la presencia de armónicos, las pérdidas que se presentan en los transformadores al tener conectadas cargas no lineales y llegan a causar distorsión en la señal son las siguientes.[2]

- Pérdidas por efecto Joule (I^2R) o pérdidas Óhmicas.
- Pérdidas por corrientes de Eddy o Parasitas (P_{EC}).
- Perdidas adicionales (P_{OSL}).

Como consecuencia del cálculo de las pérdidas mencionadas anteriormente y sumadas se obtiene las pérdidas totales de carga en el transformador (P_{LL}), se observa en la siguiente ecuación 0.[2]

Ecuación (10)

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} + P_{OSL} \quad (W)$$

2.1.8.1. Pérdidas por efecto Joule o pérdidas Óhmicas.

El efecto Joule se produce cuando circula una corriente eléctrica a través de un conductor y parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor produciendo un aumento del mismo. A medida que aumenta la frecuencia de la corriente que transporta el cable disminuye el área efectiva por donde está circula como se indica la ecuación 11. [2]

Ecuación (11)

$$P_{\Omega} = I^2R = R \sum_{h=1}^{hmax} I_h^2 \quad (W)$$

Dónde:

P_{Ω} = Perdidas Óhmicas.

R = Resistencia del devanado.

I^2 = Corriente de orden armónico (1, 2, 3,…, n).

2.1.8.2. Perdidas por corrientes de Eddy o Parasitas.

Estas pérdidas a frecuencia fundamental son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, razón por la cual se puede tener un

aumento excesivo de estas en los devanados que conducen corrientes de carga no sinodal. Las pérdidas de Eddy se expresan con la siguiente ecuación 12 [12]:

Ecuación (12)

$$P_{EC} = P_{EC-R} * (1 + \sum_{h=1}^{h=hmax} h^2 \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2) \quad (W)$$

Dónde:

P_{EC} = Perdidas por corrientes de Eddy.

P_{EC-R} = Perdidas por corrientes parasitas en los devanados a corriente y frecuencia nominal.

I_h = Corriente del h-ésimo armónico.

I_R = Corriente nominal.

Para el cálculo de las corrientes parasitas en los devanados se aplica la siguiente ecuación 13 y 14.

Ecuación (13)

$$P_{EC-R} = P_{TSL-R} * 0{,}33 \quad (W)$$

Ecuación (14)

$$P_{EC-RL}(pu) = \frac{2.4 * P_{EC-R}}{K * (I_{2-R})^2 * R_2} \;\; O \;\; P_{EC-RH}(pu) = \frac{2.8 * P_{EC-R}}{K * (I_{2-R})^2 * R_2} \qquad (W)$$

Dónde:

P_{EC-R} = Perdidas por corrientes parasitas en los devanados a corriente y frecuencia nominal.

P_{TSL} = Perdidas parasitas totales

P_{EC-RL} = Perdidas parasitas por unidad en devanados de bajo voltaje.

P_{EC-RH} = Perdidas parasitas por unidad en devanados de alto voltaje.

Las pérdidas parasitas totales tal como se establece en el código de pruebas del IEEE Std. C57.12.90 la dispersión de las pérdidas de carga son calculadas por la sustracción

de las pérdidas del efecto Joule del transformador de las perdidas medidas con la siguiente ecuación 15.[12]

Ecuación (15)

$$P_{TSL-R} = P_{LL-R} - K * [(I_{1-R1})^2 * R_1 + (I_{2-R2})^2 * R_2] \quad (W)$$

Dónde:

K=1; Para transformadores monofásicos.

K=1,5; Para transformadores trifásicos.

Muchos reportes de prueba para transformadores trifásicos muestran la resistencia de las 3 fases en serie. En este caso el valor para R_1 Y R_2 será calculado así:

- Devanados en Delta (Δ): R_1 o R_2 = 2/9*(R) de la resistencia trifásica.
- Devanados en Estrella (Y): R_1 o R_2 = 2/3*(R) de la resistencia trifásica.

2.1.8.3. Pérdidas adicionales.

Estas pérdidas aumentan la temperatura en las partes estructurales del transformador y dependiendo del tipo de transformador contribuirán o no en la temperatura del devanado. Se considera que varían con el cuadrado de la corriente y la frecuencia.

Las pérdidas por corrientes parasitas y pérdidas adicionales tienen un factor de crecimiento en presencia de los armónicos como se indica la ecuación 16.[12]

Ecuación (16)

$$P_{OSL-R} = P_{TSL-R} - P_{EC-R} \quad (W)$$

2.1.8.3.1. Pérdidas por flujo de dispersión.

Las pérdidas parasitas son asumidas que varían con el cuadrado de la corriente MRS y la frecuencia armónica a un factor de 0,8 como se indica a continuación 17 [12]:

Ecuación (17)

$$P_{osl} = P_{osl-R} * (1 + \sum_{h=1}^{h=hmax} h^{0,8} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2) \quad (W)$$

Dónde:

P_{OSL-R} = Perdidas parasitas bajo corrientes nominales.

2.1.8.3.2. Factor de armónicos para las pérdidas por corrientes de Eddy.

El resultado de las corrientes armónicas de carga RMS, existe un factor aplicado que es proporcional a las pérdidas por corrientes de Eddy, el cual, se define como la relación entre las pérdidas de corriente de Eddy debida a los armónicos y las pérdidas por corrientes de Eddy a frecuencia del sistema cuando no existen corrientes armónicas, se expresa la siguiente ecuación 18.[12]

Ecuación (18)

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-R}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=hmax} Ih^2 \left(\frac{I_h}{I}\right)^2}{\sum_{h=1}^{h=hmax} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2}$$

Dónde:

F_{HL} = Factor de pérdidas armónicas parasitas en los enrollados.

P_{EC} = Perdidas por corriente de Eddy.

P_{EC-R} = Perdidas por corriente parasitas en los devanados por unidad.

De la misma manera se define el factor de pérdidas armónicas en otras partes del transformador como la relación entre las pérdidas por corriente de Eddy con armónicos y sin armónicos en condiciones nominales, se expresa en la siguiente ecuación 19.[12]

Ecuación (19)

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=hmax} h^{0,8} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2}{\sum_{h=1}^{h=hmax} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2}$$

Dónde:

F_{HL-STR} = Factor de pérdidas armónicas en otras partes del transformador.

2.1.8.4. Evaluación de pérdidas y capacidad del transformador bajo cargas nominales.

Las pérdidas totales en por unidad en condiciones de cargas lineales tomando en base las pérdidas P_{DC} en el transformador con carga se puede calcular con la siguiente ecuación 20.[12]

Ecuación (20)

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad (pu)$$

Dónde:

P_{LL-R} (pu) = Perdidas con cargas en condiciones nominales.

P_{EC-R} (pu) = Perdidas por corriente parasitas en los devanados en condiciones nominales.

P_{OSL-R} = Perdidas parasitas bajo corrientes nominales.

Para el cálculo de las pérdidas en un transformador que suministra una carga distorsionada se expresa con la siguiente ecuación 21. [12]

Ecuación (21)

$$P_{LL}(pu) = I^2(pu).\left[1 + F_{HL}.P_{EC-R(pu)}\right] \quad (pu)$$

Dónde:

P_{LL} (pu) = Perdidas en un transformador que suministra una carga distorsionada.

F_{HL-STR} = Factor de pérdidas armónicas en otras partes del transformador.

En el transformador la corriente máxima en por unidad que en presencia de armónicos puede circular sin sobrepasar su capacidad nominal se calcula con la siguiente ecuación 22.[12]

Ecuación (22)

$$I_{max}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + [H_{HL}.P_{EC-R}(pu)] + [F_{HL-STR}.P_{OSL-R}(pu)]}} \quad (A)$$

Dónde:

I_{max} (pu) = Corriente máxima por unidad en presencia de armónicos.

2.1.9. Medidas para reducción o eliminación de los armónicos.

Como hemos mencionado en secciones anteriores, las causas principales que generan armónicos en general son las cargas no lineales y entre ellas están incluidas las cargas monofásicas y las cargas trifásicas.[13]

Las corrientes armónicas ocasionan problemas tanto en el sistema de alimentación de energía como en las instalaciones eléctricas. Las soluciones a estos problemas son distintos en cada caso por ello se debe realizar un estudio por separado, ya que, las posibles medidas que se adopten para el control de los efectos de distorsión armónica dentro de las instalaciones no se reduzcan necesariamente en el suministro e inversamente.[13]

Para ello se han desarrollado filtros de armónicos que permiten mitigar o reducir los niveles de armónicos en un sistema eléctrico, de acuerdo a las especificaciones de los parámetros del inductor (L) y el capacitor (C) y la frecuencia de sintonía del filtro son los que determinaran el comportamiento final del distorsionamiento armónico de voltaje y corriente[14], existen diferentes técnicas para la reducción de armónicos y las más habituales son los siguientes:

- Filtro Pasivo.
- Filtro Activo.

2.1.9.1. Filtro Pasivo.

Los filtros pasivos se emplean para establecer un vía de baja impedancia para las corrientes armónicas de tal forma circulen por el filtro y no por la fuente de alimentación, el filtro puede estar diseñado para un orden de armónicos determinado o para una banda ancha de armónicos, dependiendo de las exigencias de la red.[13]

Estos filtros son combinaciones de bobinas y condensadores adaptados para cancelar individualmente los armónicos, lo cual, ofrece una solución práctica para un sistema de alimentación con una gran concentración de cargas no lineales conectadas al mismo transformador de distribución colocándolo en serie para impedir el paso de las corrientes armónicas en lugar de establecer un camino arreglado para ellas.[13]

2.1.9.2. Filtro Activo.

El filtro activo es un dispositivo conectado en paralelo en donde un transformador de intensidad mide el contenido de armónicos de la corriente de carga y controla un generador de corrientes que produce una réplica exacta de los mismos armónicos pero de signos opuesto, la cual, es enviada a la fuente de alimentación en el ciclo siguiente, como la corriente armónica es compensada por el filtro, solo la corriente fundamental procede de la fuente de alimentación.[13]

Los filtros activos en la práctica reducen hasta un 90% de distorsión, son muy efectivos para reducir oscilaciones armónicas hasta de 2kHz.[13]

2.1.10. Normativa INEN-IEC 61000 Niveles de compatibilidad de baja frecuencia perturbaciones conducidas y señalización en los sistemas de alimentación de baja tensión.

La normativa IEC 61000 norma aplicada por las empresas distribuidoras de energía eléctrica en Ecuador, refiere a las perturbaciones conducidas en el rango de 0 kHz a 9 kHz, con una extensión hasta 148.5 kHz para los sistemas de transmisión de señales en la red. Se dan los valores de numéricos de los niveles de compatibilidad para las redes de distribución pública de corriente alterna en baja tensión con una tensión nominal de 420 V monofásicos o 690 V trifásico a una frecuencia nominal de 50 Hz o 60 Hz[15].

Los fenómenos de las perturbaciones consideradas son:

- Las fluctuaciones de tensión y el flicker.
- Los armónicos hasta el de orden 50.
- Las distorsiones de tensión a frecuencias superiores (por encimas de orden 50).
- Los huecos de tensión y las interrupciones breves.
- El desequilibrio de tensión.
- Las sobretensiones transitorias.
- Las variaciones de la frecuencia fundamental.
- Las componentes continuas.
- Los sistemas de transmisión de señales en la red.

La IEC exige en su estándar IEC 61000-3-2 que los fabricantes limiten el consumo de armónicos de corriente de sus productos. Este estándar se aplica a todas las cargas monofásicas y trifásicas de menos de 16 A por fase. Los productos deben certificarse en laboratorios autorizados para asegurar que cumplen el IEC 61000-3-2, efectivo desde el 1 de enero del 2001.[11]

2.2. Marco referencial.

Los armónicos se da por consecuencia de la conexión de cargas no lineal en el sistema eléctrico, lo cual significa que la impedancia no es constante, estas cargar no lineales a pesar que son alimentadas por señales puras sinusoidales llegan a causar una deformación de la onda por los componentes semiconductores que los compone inyectando armónicos en la red. Estos armónicos tienen componentes pares como impares que normalmente se están representados por un orden armónico (1, 2, 3, 4,…, n).

Tabla 2 Frecuencia y secuencia de los niveles de armónicos.

Orden	**Fundamental (1°)**	**2°**	**3°**	**4°**	**5°**	**6°**	**7°**
Frecuencia	60	120	180	240	300	360	420
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+
Orden	**8°**	**9°**	**10°**	**11°**	**12°**	**13°**	**14°**
Frecuencia	480	540	600	660	720	780	840
Secuencia	-	0	+	-	0	+	-
Orden	**15°**	**16°**	**17°**	**18°**	**19°**	**20°**	**21°**
Frecuencia	900	960	1020	1080	1140	1200	1260
Secuencia	0	+	-	0	+	-	0

Fuente: Componentes Armónicas en Redes de Distribución Eléctricas

La secuencia se refiere al sentido de giro de los fasores con respecto a la fundamental, expresado en otras palabras indica el sentido en que giraría el rotor de un motor, al ser excitado por esa señal. Secuencia directa (+) indica que el sentido de giro es el horario. Secuencia inversa (-) indica un sentido de giro antihorario. Secuencia cero (0) indica que no gira.[16]

Dependiendo de su secuencia y rotación, los armónicos presentan diferentes efectos:

- Secuencia (+): Rotación Directa, puede producir calentamiento de conductores, rotura de circuitos, etc.
- Secuencia (-): Rotación Inversa, produce un freno en el motor, además calentamiento de conductores y pueden quemar los motores de inducción trifásicos.

- Secuencia (0): Los armónicos de secuencia cero (llamados normalmente triplens) se suman al neutro de la red (si ésta es de cuatro hilos) y son los causantes de sobrecalentamientos.[16]

Este estandar europeo, tiene como propósito establecer métodos uniformes para determinar la capacidad de los transformadores para suministrar corrientes de carga no sinusoidal ya sean del tipo seco o sumergido[17], limitando la cantidad de corriente de armónica inyectada a la red y responsabiliza al cliente por la misma.

Tabla 3 Límites permitidos de corriente de distorsión armónica por la norma IEC 61000.

Orden Armónico (h)	Corriente Armónica Max. Permitida (A)
Armónicos Impares	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
15<=h<=39	2.25/h
Armónicos Pares	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
8<=h<=40	1.84/h

Fuente: Normativa y legislación de armonios.

la normativa IEEE 519-1992 controla el nivel de armónicos aceptable tanto a de los usuarios como en los distribuidores limitando la cantidad de corriente de armónica inyectada a la red y responsabiliza al cliente por la misma.[11]

Tabla 4 Límites permitidos de corriente de distorsión armónica por la norma IEEE 519-1992.

CORRIENTE DE ARMONICOS INDIVIDUALES (IMPARES)						
ISC/IL	h<11	11<=h<17	17<=h<23	23<=h<35	35<=h	THD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5,0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fuente: Normativa y legislación de armonios.

Una red debe ser capaz de suministrar una tensión con una THD dentro de los límites establecidos, siempre que la corriente armónica inyectada por los usuarios en la red se ajuste a los límites.

Tabla 5 Límites permitidos de voltajes de distorsión armónica por la norma IEEE 519-1992.

VOLTAJE DE ARMONICOS			
	2.3 – 69 kV	69 – 138 Kv	>138 kV
$(V_h/V_1)(\%)$	3.0	1.5	1.0
THD (%)	5.0	2.5	1.5

Fuente: Normativa y legislación de armonios.

La bibliografía analizada en el desarrollo de la investigación fue obtenida para el caso de tener presencia de corrientes y voltajes armónicos por las cargas conectadas en los sistemas eléctricos, este problema es visto con mayor frecuencia en cargas industriales ya que constan de electrónica de potencia para el uso de las maquinas.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Localización.

La investigación planteada se realizó para el transformador trifásico de potencia de 20MVA–69/13,8kV perteneciente a la Empresa Eléctrica de Ambato (EEA S.A), está ubicada en la Provincia de Napo, Cantón Tena en el kilómetro E45 calle Teniente Hugo Ortiz con las coordenadas geográficas siguientes: 0°56'26.6"S 77°49'06.7"W

Figura 1 Ubicación de Subestación Tena Norte de la E.E.A.S.A.

Fuente: Googlemaps, E.E.A.S.A

3.2. Tipo de investigación.

Las consecuencias de tener una señal distorsionada o la presencia de armónicos ya sea de voltaje o corriente llegan a tener diversos efectos negativos como el mal funcionamiento de los equipos, pérdidas de energía por calentamiento, sobretensiones e interferencias con las señales de comunicación y control.

La investigación de campo planteada será aplicada para el estudio y análisis de los armónicos en el transformador de potencia y las posibilidades de reducirlas o el mejor de los casos eliminarla en la subestación Tena Norte de la Empresa Eléctrica de Ambato (E.E.A.S.A) en la ciudad del Tena.

3.3. Métodos de investigación.

El análisis deductivo, analítico y experimental, fueron los métodos aplicado para la investigación de las causas y efectos colaterales de tener presente señales de voltajes y corrientes de distorsión armónica tanto en el transformador de potencia como en las redes eléctricas.

3.3.1. Método deductivo.

El método deductivo realiza una investigación general del origen proveniente de los armónicos y la forma que influyen en el transformador trifásico de potencia de 20 MVA

de la Empresa Eléctrica de Ambato (EEA S.A), teniendo una vista general de las causas, efectos y realizar las respectivas mediciones de calidad de energía.

3.3.2. Método experimental.

El método experimental cosiste en simular las variables medidas del transformador de potencia utilizando el software DIGSILENTS y obtener los resultados de los efectos que tiene la señal armónica sobre el transformador, después se corrigiera los armónicos por medio de un filtro pasivo.

3.3.3. Método analítico.

El método analítico realiza un análisis de las curvas sinusoidales de corriente con distorsión armónica y con la reducción de armónico del transformador de potencia, valorando los datos recolectados de la simulación para comprobar la hipótesis planteada por medio de cálculos y llegar a la conclusión de la investigación.

3.4. Fuentes de recopilación de información.

- Libros.
- Textos referentes al tema.
- Papers
- Revistas de investigación.

3.5. Instrumentos de investigación.

- Navegador Web.
- Análisis de documentos.
- Software Digsilent PowerFactory.
- Medición de calidad Sonel PQM-702 y Fluke PQ 435

3.6. Tratamiento de datos.

MES	Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre			
	SEMANAS	S 1	S 2	S 3	S 4	S 1	S 2	S 3	S 4	S 1	S 2	S 3	S 4	S 1	S 2	S 3	S 4	S 1	S 2	S 3	S 4
ACTIVIDADES																					
Entrega del cronograma al tutor				■																	
Corregir las introducción y objetivos					■																
Corrección del problema de investigación y justificación.						■															
Marco conceptual y referencial							■														
Marco referencial								■													
Corrección del marco referencial y Metodología de la Investigación									■												
Realizar el estudio sobre el estado de arte de la distorsión armónica en el marco internacional										■											
Realizar el estudio sobre los efectos de los armónicos en los transformadores											■										
Realizar el estudio sobre la vida útil del transformador de potencia.												■									
Realizar el estudio sobre los efectos que causa la distorsión armónica sobre una red de distribución.													■								
Realizar un estudio sobre el crecimiento de armónicos en el trasformador trifásico de la subestación Tena Norte.														■							
Análisis de datos entregados por le empresa eléctrica Ambato (E.E.A.S.A)															■						
Obtención de los datos sobre la red de distribución particular a estudiar																■					
.Recopilación de la información obtenida en los resultados de la investigación																	■				
																		■			
Realizar los resultados y discusiones del proyecto de investigación.																			■		
Conclusiones y recomendaciones																				■	
Culminación y verificación del proyecto de investigación.																					■

3.7. Talentos humanos y materiales.

TALENTOS HUMANOS

Ítem	Cantidad	Detalle	Descripción	C/U	Total
1	1		Jeff Steven Peñafiel Loor	-	-
2	1		Ing. MSc. Peña Banegas Diego Patricio	-	-

MATERIALES					
Ítem	**Cantidad**	**Detalle**	**Descripción**	**C/U**	**Total**
3	1	U	Portátil HP EliteBook 8470	1400	1400
4	1	U	Cuaderno y esfero	2,75	2,75
5	1	U	Calculadora	87,90	87,90
6	1	U	Impresiones	25,00	25,00
				TOTAL $	1 515,65

Autor: Jeff S. Peñafiel.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUCIONES

4.1. Resultados.

4.1.1. Aplicación de la metodología para el análisis de armónicos en el transformador de potencia.

Los datos proporcionados para el análisis de los armónicos del transformador corresponden a la Empresa Eléctrica Ambato S.A, este transformador es trifásico, está colocado en la subestación denominada con el nombre "Tena Norte". Fue diseñada para perfeccionar los niveles de confiabilidad, abastecimiento de energía y calidad del servicio eléctrico en beneficio de los más de 50.000 habitantes de los cantones: Tena, Archidona y las parroquias de Muyuna, San Pablo de Ushpayacu, Cotundo y Hatun Sumaco, ubicada en la Vía Archidona Km 8 [18], Tena-Napo-Ecuador. La relación de transformación es de 69 kV / 13.8 kV de conexión Delta (Δ) en tensión alta y Estrella (Yn) en tensión media con una potencia 16/20 MVA.

4.1.2. Característica y datos del transformador de potencia.

A continuación se presenta la placa característica del transformador de potencia de la "Empresa Eléctrica Ambato S.A" como se muestra en el anexo 2.

Tabla 6 Características del transformador trifásico de potencia.

TRANSFORMADOR TRIFASICO DE POTENCIA	
Voltaje de alta	69 kV (Δ)
Voltaje de media	13,8 kV (Yn)
Frecuencia	60 Hz
Potencia	20 MVA
Pérdidas en vacío	13 355 (kW)
Pérdidas en carga	58 730 (kW)
Incremento de temperatura	55°C / 85°C
Peso total	33 300 (kg)
Corriente nominal en alta	167,3 (Amp)
Corriente nominal en media	836,7 (Amp)
Impedancia de devanado	7,89 (%)

Fuente: Placa constructiva del transformado de potencia, E.E.A.S.A

Las elevaciones de temperatura del transformador están de acuerdo a la placa del fabricante:

- Temperatura superior del aceite = 55°C
- Temperatura media en los devanados = 55°C
- Temperatura a la elevación del punto más caliente = 85°C

El enfriamiento del transformador de potencia es de tipo ONAN (aceite y aire circulando por convección natural)/ONAF (aceite circulando por convección natural y aire forzado con moto ventilador)[19], el cual, también consta de una conmutación de 16/20MVA. En la tabla 7 se muestra los taps de conmutaciones de en la potencia de 20MVA del transformador.

Tabla 7 Taps de conmutaciones del transformador trifásico de potencia.

CONMUTACIONES DE TAPS 20MVA				
DEVANADOS	VOLTAJE (V)	AMPERIOS (A)	COMBIADOR DE DERIVACIONES	
			POSICIÓN	CONEXIÓN
ALTA TENSIÓN	72 450	159,4	1	2-3
	70 725	163,3	2	3-4
	69 000	167,3	3	4-5
	67 275	171,6	4	5-6
	65 550	176,2	5	6-7
MEDIA TENSIÓN	13 800	836,7	--------	--------

Autor: Jeff S. Peñafiel.

4.1.3. Análisis de distorsión armónica.

Determinando el factor de cresta se obtiene un análisis empírico de voltaje y corriente si en las líneas A-B-C tienen presencia de armónicos, considerando la definición del mismo, a continuación en la tabla 8 se muestran los valores obtenidos.

Tabla 8 Factor de cresta de voltaje y corriente.

	LA	LB	LC
VOLTAJE	1.41	1.40	1.41
CORRIENTE	1.70	1.47	1.36

Autor: Jeff S. Peñafiel.

El factor de cresta considera que los valores de voltaje y corriente de manera individual en las líneas A-B-C deben ser igual al cuadrado de dos (1.4142) para concluir que no hay presencia de deformación en la onda sinusoidal, caso contrario si son mayores o menores se dice que hay deformación en la onda sinusoidal.

Con el análisis empírico del factor de cresta, se procede a medir los niveles de armónicos de corriente (Ih) obtenidos mediante el equipo de medición de calidad Sonel PQM-702 y Fluke PQ 435 conectado en la salida del trasformador trifásico de potencia de 20MVA de la Empresa Eléctrica de Ambato, con base a la normativa de calidad de energía se toma mediciones de armónicos en orden 1 hasta 50, en este caso se analiza del orden armónico1 hasta el 19, ya que en esos niveles se tubo presencia de armónico, como se muestra a continuación en la tabla 9.

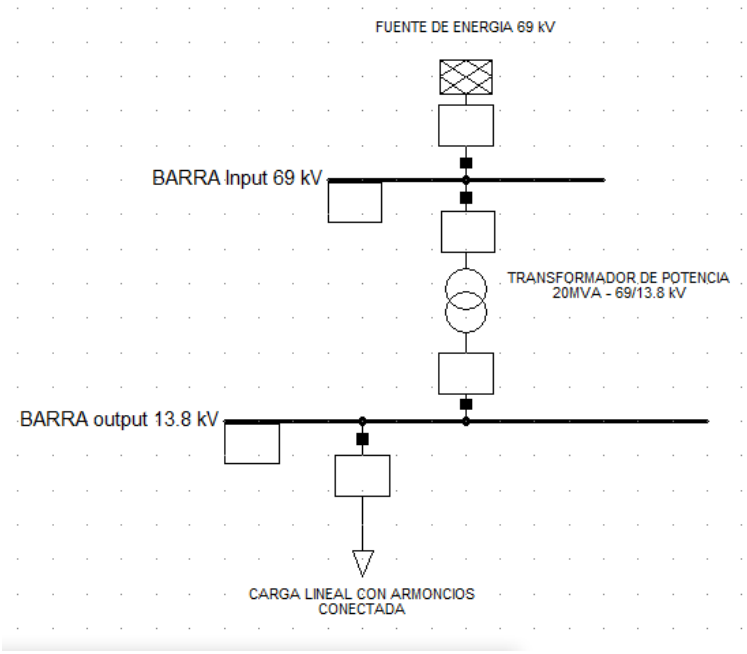
Tabla 9 Contenido de distorsión armónica de corriente las fases A-B-C.

	IhA (%)	IhB (%)	IhC (%)
Ih1	100.82	126.55	116.42
Ih2	0.12	0.20	0.12
Ih3	9.67	9.71	9.02
Ih4	0.05	0.10	0.03
Ih5	2.82	3.38	2.35
Ih6	0.02	0.04	0.03
Ih7	0.91	0.86	0.59
Ih8	0.00	0.01	0.01
Ih9	0.91	1.01	1.00
Ih10	0.00	0.01	0.00
Ih11	0.51	0.51	0.56
Ih12	0.00	0.00	0.00
Ih13	0.24	0.30	0.25
Ih14	0.00	0.00	0.00
Ih15	0.13	0.13	0.13
Ih16	0.00	0.00	0.00
Ih17	0.09	0.07	0.07
Ih18	0.00	0.00	0.00
Ih19	0.08	0.08	0.08

Fuente: Equipo de medición de calidad Sonel, E.E.A.S.A
Autor: Jeff S. Peñafiel.

El modelamiento del sistema consta de una fuente de voltaje en Delta de 69kV conectado a la barra 1 (alto voltaje), una barra 2 de 13.8kV (bajo voltaje) donde están conectadas las carga lineal y no lineal, un transformador trifásico de 20 MVA con la relación de transformación de conexión Delta (Δ) 69 kV en el lado de alta tensión y Estrella (Yn) 13.8 kV conectado a la barra 1-2 como se muestra en la figura 2.

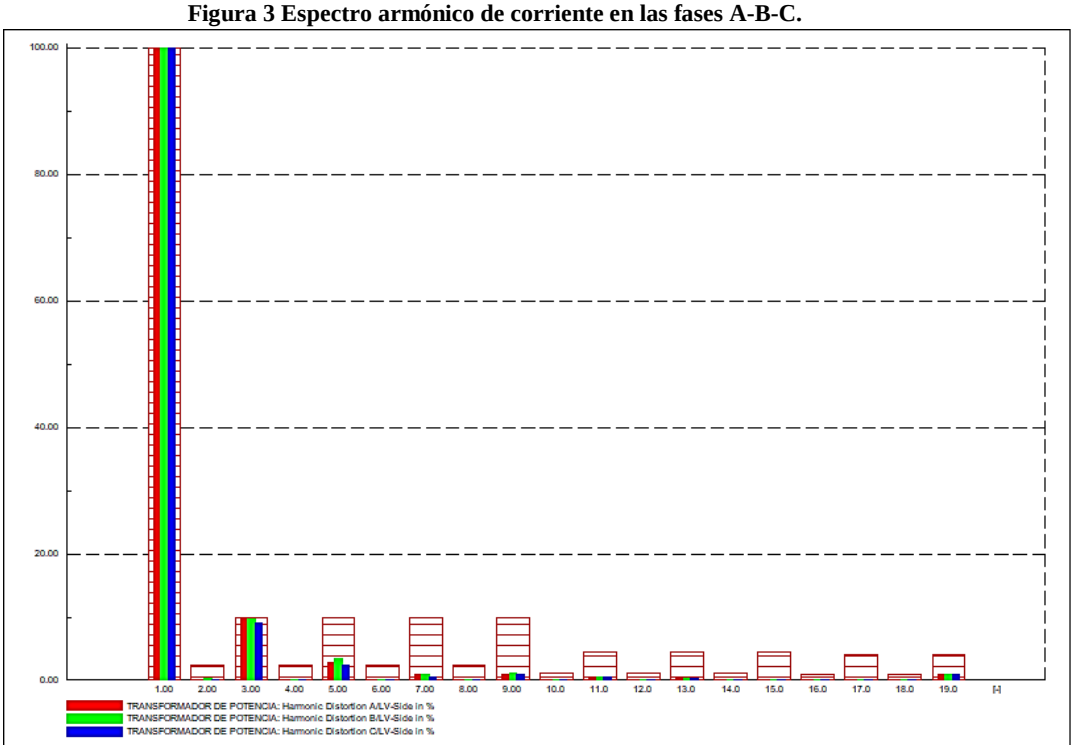
Figura 2 Modelamiento del sistema en Digsilents.



Fuente: DigSilents PowerFactory
Autor: Jeff S. Peñafiel.

El análisis se desarrolló con una carga conectada aproximada de 12,18MW (P), estas cargas está conectada en la barra de baja tensión (13,8kV), siendo el voltaje de salida de la barra primaria de la subestación que alimenta las ciudades de Tena, Archidona y las parroquias de Muyuna, San Pablo de Ushpayacu, Cotundo y Hatun Sumaco, luego, ingresando los datos de potencias y niveles de distorsión armónicas en DigSilent se obtuvo el siguiente espectro armónico como se muestra en la figura 3.

Figura 3 Espectro armónico de corriente en las fases A-B-C.



Fuente: DigSilents PowerFactory
Autor: Jeff S. Peñafiel.

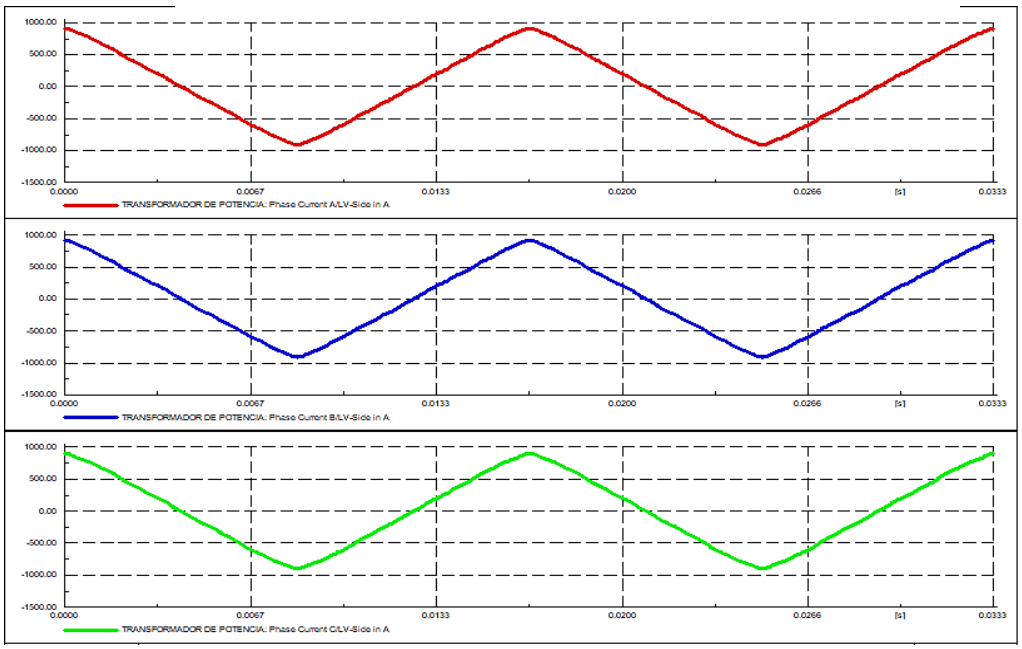
El espectro armónico nos indica que los armónicos 3, 5, 7 y 9 son superiores a comparación de los demás niveles 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 13, …., 19 estos niveles de armónicos se pueden ver reflejados en la curva de corriente como se muestra en la figura 4.

Figura 4 Onda sinusoidal de corriente a) Faces A b) Faces B c) Faces C.

(a)

(b)

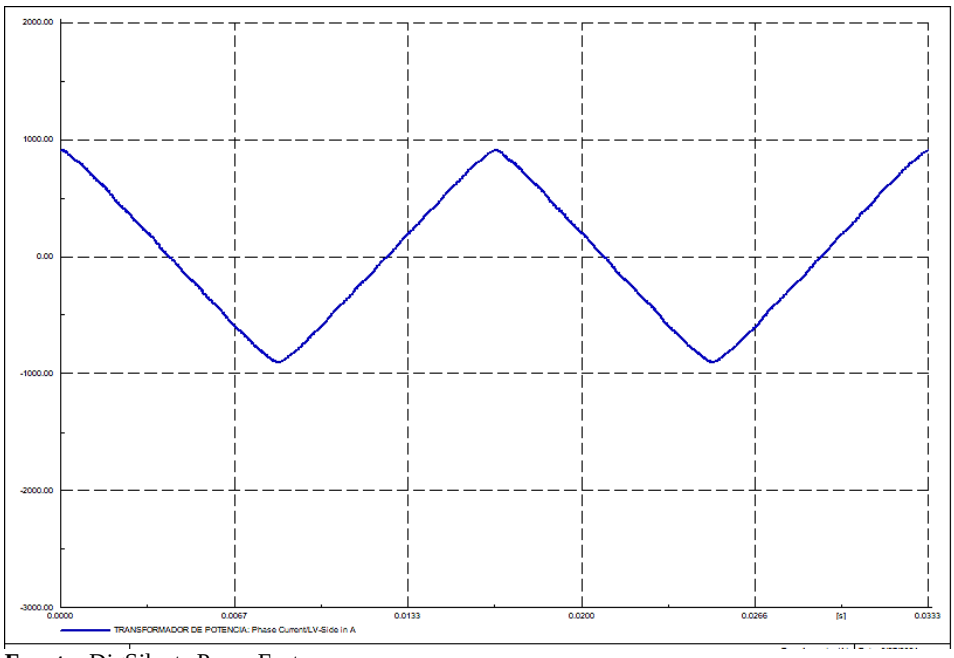
(c)



Fuente: DigSilents PowerFactory
Autor: Jeff S. Peñafiel.

La presencia de armónicos también se puede ver reflejada en la corriente de operación del transformador, como se muestra en la figura 5.

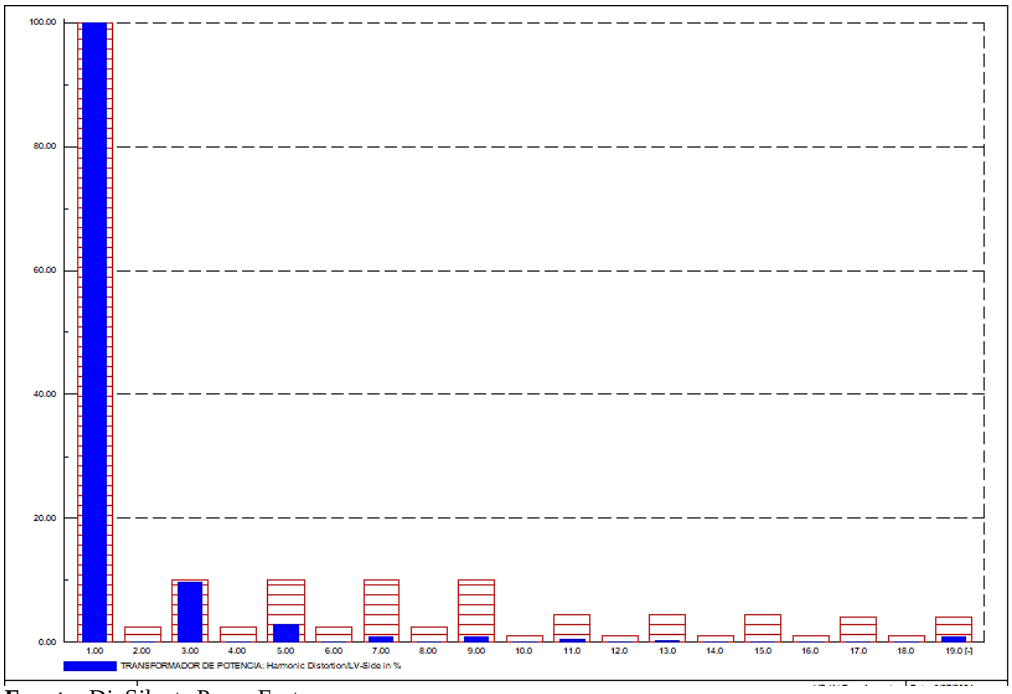
Figura 5 Onda sinusoidales de corriente del transformador de potencia.



Fuente: DigSilents PowerFactory
Autor: Jeff S. Peñafiel.

La curva de corriente de transformador muestra el pico al igual que las curvas de las líneas A-B-C en el lado de baja tensión. La distorsión de onda sinusoidal de corriente en el transformador presenta el siguiente espectro armónico como se muestra en la figura 6.

Figura 6 Espectro armónico de corriente del transformador de potencia.



Fuente: DigSilents PowerFactory
Autor: Jeff S. Peñafiel.

La simulación del sistema modelado a una frecuencia fundamental de 60Hz analizando los 19 niveles de distorsión armónica de los datos recolectados, dio los siguientes resultados de distorsión armónica como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10 Valores de distorsión armónica y distorsión armónica total de corriente.

	LA	LB	LC	TRANSFORMADOR
HD (%)	0,323	0,326	0,326	0,794
THD (%)	0,793	0,866	0,795	2,824

Autor: Jeff S. Peñafiel.

4.1.4. Cálculos de pérdidas de carga totales en el transformador.

El cálculo de las pérdidas del transformador se obtiene mediante la medición del contenido armónico existente en el sistema eléctrico a analizar como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11 Valores de distorsión armónica de corriente del transformador y fase A-B-C.

Orden Armónico	I_hA/IA	I_hB/IB	I_hC/IC	I_hT/IT
1	100.82	126.55	116.42	100
2	0.12	0.20	0.12	0.12
3	9.67	9.71	9.02	9.67
4	0.05	0.10	0.03	0.050
5	2.82	3.38	2.35	2.82
6	0.02	0.04	0.03	0.020
7	0.91	0.86	0.59	0.91
8	0.00	0.01	0.01	0.00
9	0.91	1.01	1.00	0.91
10	0.00	0.01	0.00	0.00
11	0.51	0.51	0.56	0.51
12	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.24	0.30	0.25	0.24
14	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.13	0.13	0.13	0.13
16	0.00	0.00	0.00	0.00

17	0.09	0.07	0.07	0.09
18	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.80	0.80	0.80	0.80

Autor: Jeff S. Peñafiel.

El contenido armónico de corriente con respecto a la fundamental del transformador de potencia será el dato de referencia para determinar las pérdidas adicionales por causa de distorsión armónica mediante métodos estadísticos se llega a obtener la siguiente tabla 12.

Tabla 12 Cálculos de las pérdidas adicionales en el transformador de potencia con armónicos.

Orden Armónico (h)	I_hT/IT	$(I_hT/IT)^2$	h^2	$(I_hT/IT)^2 * h^2$	$h^{0.8}$	$(I_hT/IT)^2 * h^{0.8}$
1	1	1	1	1	1	1
2	0.0012	1.440E-06	4	5.760E-06	1.741101127	2.507E-06
3	0.0967	9.351E-03	9	8.416E-02	2.408224685	2.252E-02
4	0.0005	2.500E-07	16	4.000E-06	3.031433133	7.579E-07
5	0.0282	7.952E-04	25	1.988E-02	3.623898318	2.882E-03
6	0.0002	4.000E-08	36	1.440E-06	4.192962713	1.677E-07
7	0.0091	8.281E-05	49	4.058E-03	4.743276394	3.928E-04
8	0	0.000E+00	64	0.000E+00	5.278031643	0.000E+00
9	0.0091	8.281E-05	81	6.708E-03	5.799546135	4.803E-04
10	0	0.000E+00	100	0.000E+00	6.309573445	0.000E+00
11	0.0051	2.601E-05	121	3.147E-03	6.809483128	1.771E-04
12	0	0.000E+00	144	0.000E+00	7.300372103	0.000E+00
13	0.0024	5.760E-06	169	9.734E-04	7.783137122	4.483E-05
14	0	0.000E+00	196	0.000E+00	8.258523873	0.000E+00
15	0.0013	1.690E-06	225	3.803E-04	8.727161387	1.475E-05
16	0	0.000E+00	256	0.000E+00	9.18958684	0.000E+00
17	0.0009	8.100E-07	289	2.341E-04	9.646263856	7.813E-06
18	0	0.000E+00	324	0.000E+00	10.09759631	0.000E+00
19	0.008	6.400E-05	361	2.310E-02	10.5439389	6.748E-04

SUMA (Σ)	1.01041175		1.1426545		1.027196717

Autor: Jeff S. Peñafiel.

Con los datos obtenidos en la tabla 12 aplicamos la ecuación 18 para realizar el cálculo del Factor de armónicos para las pérdidas por corrientes de Eddy.

$$F_{HL} = \frac{1.1426545}{1.01041175}$$

$$F_{HL} = 1.13088006$$

De la misma manera se puede calcular el factor armónico de las pérdidas de disipación en diferentes partes del transformador aplicando la ecuación 19.

$$F_{HL-STR} = \frac{1.027196717}{1.01041175}$$

$$F_{HL-STR} = 1.016612007$$

Las pérdidas totales de dispersión y las pérdidas por corriente de Eddy varían en un rango de 5% al 15%, el cual, se toma el 10% como un valor medio para el cómputo del cálculo de las pedidas totales.

Ecuación (23)

$$P_{TSL-R} = P_{LL} * 10\%$$

$$P_{TSL-R} = 58\,730 * 10\%$$

$$P_{TSL-R} = 5\,873\ [kW]$$

Por lo tanto las pérdidas en el cobre se pueden calcular de manera indirecta de la siguiente manera:

Ecuación (24)

$$P_{I^2R} = P_{LL} - P_{TSL-R}$$

$$P_{I^2R} = 58\,730 - 5\,873$$

$$P_{I^2R} = 52\,857\ [kW]$$

Las pérdidas de Eddy en condiciones nominales se calculan utilizando la ecuación 14 como se muestra a continuación:

$$P_{EC-R} = 5\,873 * 0{,}33$$

$$P_{EC-R} = 19\,38{,}09 \quad [kW]$$

Usando la ecuación 16 se procede a calcular las pérdidas de dispersión total:

$$P_{OSL-R} = 5\,873 - 19\,38{,}09$$

$$P_{OSL-R} = 3\,934{,}91 \quad [kW]$$

Como resultado de los cálculos de pérdidas nominales obtenidas mediante las ecuaciones mencionadas se puede resumir en la siguiente tabla 13:

Tabla 13 Pérdidas nominales del transformador de potencia.

TIPO DE PERDIDA	VALOR [kW]
Pérdida en Vacío	13 355
Pérdida en el Cobre	52 857
Pérdidas por corrientes de Eddy	1 938,09
Pérdidas de adicionales	3 934,91

Autor: Jeff S. Peñafiel.

Teniendo el resultado de los tipos de pérdidas del trasformador, se procede a realizar el cálculo de las pérdidas totales, se aplica las ecuaciones [10], se debe calcular las pérdidas por corrientes de Eddy y adicionales por causa de presencia de armónicos aplicando las ecuaciones 12 y 17.

- Pérdidas por corriente de Eddy más la influencia de armónicos.

$$P_{EC} = P_{EC-R} * \left(1 + \sum_{h=1}^{h=hmax} h^2 \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2\right)$$

$$P_{EC} = 1\,938.09 * (1 + 1.1426545)$$

$$P_{EC} = 4\,152{,}657\ (kW)$$

- Pérdidas adicionales más la influencia de armónicos.

$$P_{osl} = P_{osl-R} * (1 + \sum_{h=1}^{h=hmax} h^{0,8} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2)$$

$$P_{osl} = 3\,934.91 \ * \ (1 + 1.027196717)$$

$$P_{osl} = 7\,976{,}836 \ (kW)$$

- Pérdidas totales de carga más la influencia de armónicos.

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} + P_{OSL}$$

$$P_{LL} = 55\,717.028 + 4\,152{,}657 + 7\,976{,}836 \quad (kW)$$

$$P_{LL} = 67\,846.521 \quad (kW)$$

4.1.5. Reducción de la distorsión armónica en el transformador.

Existen varios criterios en la hora de reducir los niveles de armónicos en una sistema eléctrico, tomando en consideración que los armónicos se pueden presentar de diferentes niveles según el tipo de usuario, en este caso el análisis será realizado para el transformador trifásico de potencia de la E.E.A.S.A, el cual, se tubo presencia de armónico altos en los niveles 3 y 5.

4.1.5.1. Cálculo de compensación de reactivos y diseño de filtro pasivo.

La disminución de los niveles de armónicos que son inyectados a la red dependerá de la corrección del factor de potencia (FP) el cual, está trabajando actualmente la red que corresponde a 0,93, se mejora a un FP de 0,95 para su mayor eficacia de uso de electricidad.

Se toma la ecuación 25 para el cálculo de compensación de reactivos.

Ecuación (25)

$$Q_C = P\left(tg\left(cos^{-1}FP_{VIEJO}\right) - tg\left(cos^{-1}FP_{nuevo}\right)\right) \ (MVAr)$$

$$Q_C = 12{,}18(tg\left(cos^{-1}0{,}93\right) - tg\left(cos^{-1}0{,}95\right))$$

$$Q_C = 4{,}185(MVAr)$$

Teniendo el valor de compensación de reactivos, se procede a realizar el cálculo del inductor (L) y capacitor (C) para el diseño del filtro pasivo donde ira conectada a la barra de salida de 13,8kW.

Utilizando el criterio de aproximación del mayor armónico que se presenta en el sistema con distorsión armónica, en este caso la frecuencia que presenta mayor amplitud es de orden 3 (180 Hz), esta será la sintonización del filtro, de acuerdo con la normativa

IEEE 1531 el filtro debe sintonizarse a una frecuencia entre un 3% hasta un 15% por debajo de la frecuencia que inicia la sintonización, se escogió el valor de 6% siendo un valor medio en que debe sintonizarse el filtro, equivalente a 169,2Hz.

En base al concepto explicado anteriormente se procede al cálculo de la efectividad de la impedancia del filtro utilizando el valor de 10(MVAr) para mayor efectividad y valor comercial establecido en la norma IEEE 18-2002, se calcula mediante la ecuación 26.

Ecuación (26)

$$X_{eff} = \frac{V_{LL}^2}{Q_C} \ (\Omega)$$

Dónde:

X_{eff} = Efectividad de impedancia.

V_{LL} = Voltaje de línea

Q_C = Compensación de reactivo.

$$X_{eff} = \frac{13.8^2}{10}$$

$$X_{eff} = 19.044 \ (\Omega)$$

Teniendo la efectividad de la impedancia se realiza el cálculo de la reactancia capacitiva del filtro mediante la ecuación 27.

Ecuación (27)

$$X_c = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1}\right) * X_{eff} \ (\Omega)$$

Dónde:

h = Frecuencia de sintonización.

$$X_c = \left(\frac{2.82^2}{2.82^2 - 1}\right) * 19.044$$

$$X_c = 21.783 \ (\Omega)$$

Teniendo la reactancia capacitiva se procede a calcular de la Inductancia y Capacitancia.

- Capacitancia:

Ecuación (28)

$$C = \frac{1}{\omega * X_C}$$

$$C = \frac{1}{2(60)(\pi)(21.783)}$$

$$C = 121.773\ (\mu F)$$

- Inductancia:

Ecuación (29)

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

$$X_L = \frac{21.783}{2.82^2}$$

$$X_L = 2.74(\Omega)$$

Ecuación (30)

$$L = \frac{X_L}{\omega}$$

$$L = \frac{2.74}{2(60)(\pi)};\ L = 7.268\ (mH)$$

- Resistencia:

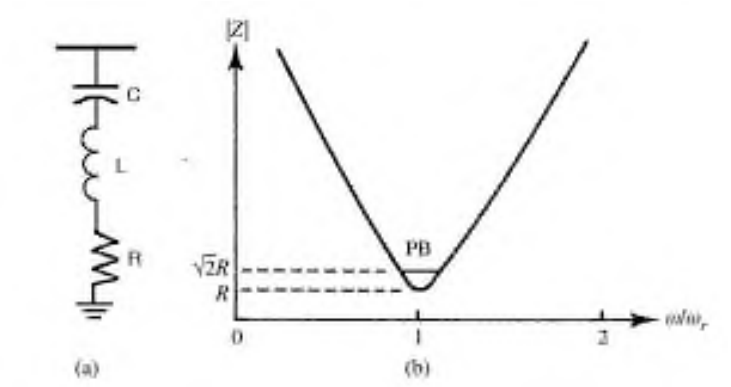
Ecuación (31)

$$R = \frac{X_l(f_{res})}{Q_f}$$

$$R = \frac{2.74(2.82)}{20}$$

$$R = 0.386\ (\Omega)$$

Figura 7 Estructura constructiva del filtro pasivo.



Fuente: análisis y diseño de filtros pasivos de doble sintonización

El filtro debe presentar un camino de baja impedancia por lo cual debe cumplir que la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva sean iguales para que le filtro no sufra daños por consecuencia de sobrecorrientes.

$$X_L = X_c$$

$$\frac{X_c}{h} = X_L h$$

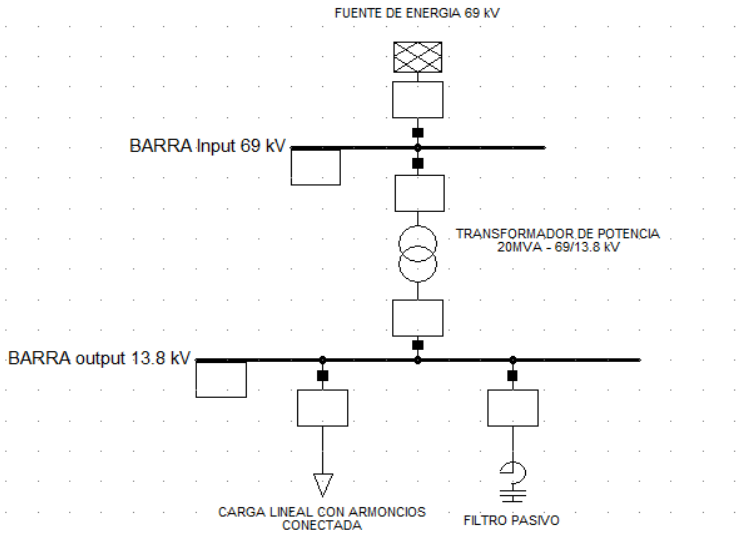
$$\frac{21.783}{2.82} = (2.74)(2.82)$$

$$7.72 = 7.72$$

4.1.5.2. Implementación del filtro pasivo.

La reducción de los armónicos se realizó mediante un filtro pasivo con los parámetros de resistencia, inductancia y capacitancia calculados anteriormente el cual, se conectará en la barra de 13.8kW como se muestra en la figura 8.

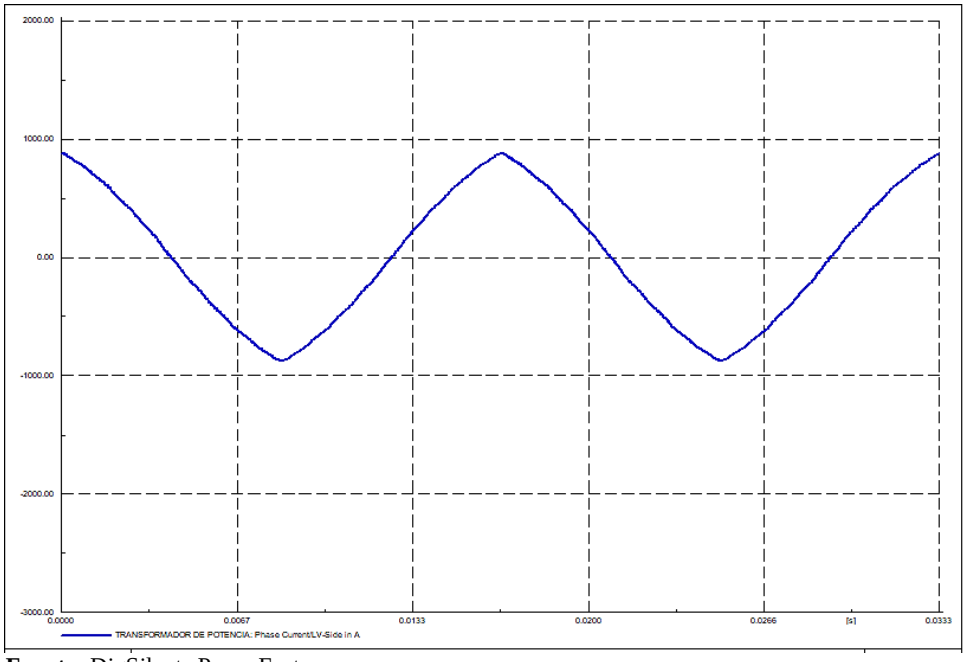
Figura 8 Modelamiento del sistema con implementación del filtro pasivo en Digsilents



Fuente: DigSilents PowerFactory
Autor: Jeff S. Peñafiel.

La influencia que tuvo el filtro de pasivo 10MVAr en el transformador de potencia de 20MVA dio el siguiente resultado.

Figura 9 Onda sinusoidal de corriente del transformador con la implementación del filtro pasivo.



Fuente: DigSilents PowerFactory
Autor: Jeff S. Peñafiel.

La figura 9 muestra una curva de corriente más acentuada, asemejando a una curva sinusoidal, dando a notar la reducción del pico antes existente, obteniendo los siguientes valores de armónicos como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14 Cálculos de las pérdidas adicionales en el transformador de potencia con la reducción de armónicos.

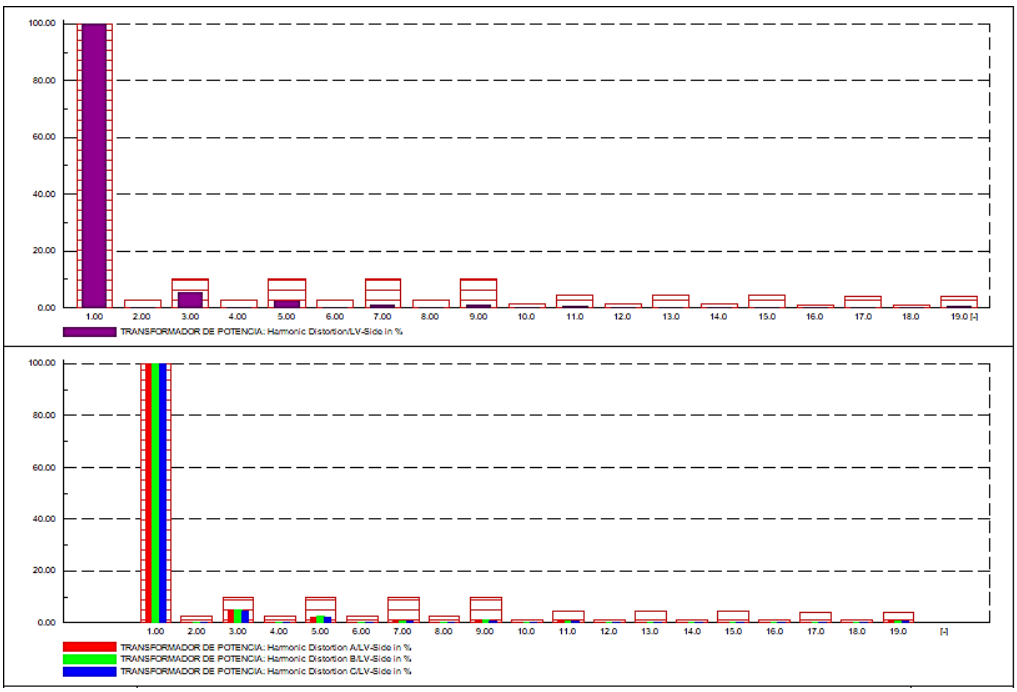
Orden Armónico (h)	I_hT/IT	$(I_hT/IT)^2$	h^2	$(I_hT/IT)^2 * h^2$	$h^{0.8}$	$(I_hT/IT)^2 * h^{0.8}$
1	1	1	1	1	1	1
2	0.0013	1.69E-06	4	0.00000676	1.741101	2.94246E-06
3	0.05111	0.0026122	9	0.023510089	2.408225	0.006290842
4	0.0004	1.6E-07	16	0.00000256	3.031433	4.85029E-07
5	0.0236	0.000557	25	0.013924	3.623898	0.002018366
6	0	0	36	0	4.192963	0
7	0.00783	6.131E-05	49	0.003004136	4.743276	0.000290805
8	0	0	64	0	5.278032	0
9	0.00784	6.147E-05	81	0.004978714	5.799546	0.000356473
10	0	0	100	0	6.309573	0
11	0.00445	1.98E-05	121	0.002396103	6.809483	0.000134845
12	0	0	144	0	7.300372	0

13	0.00209	4.368E-06	169	0.000738209	7.783137	3.39975E-05
14	0	0	196	0	8.258524	0
15	0.00113	1.277E-06	225	0.000287303	8.727161	1.11437E-05
16	0	0	256	0	9.189587	0
17	0.00078	6.084E-07	289	0.000175828	9.646264	5.86879E-06
18	0	0	324	0	10.0976	0
19	0.00698	4.872E-05	361	0.017588064	10.54394	0.000513705
SUMA (Σ)		1.0033686		1.066611765		1.009659473

Autor: Jeff S. Peñafiel.

Este nivel armónico se verá reflejado en el espectro armónico como se muestra en la figura 10.

Figura 10 Espectro armónica de corriente con la implementación del filtro pasivo, a) transformador, b) fase A-B-C.



Fuente: DigSilents PowerFactory
Autor: Jeff S. Peñafiel.

Se procede a realizar el cálculo de la nueva pérdida total con los valore de armónicos reducidos del transformador, aplicamos las ecuaciones 11, así como también calcular las pérdidas por corrientes de Eddy y adicionales por causa de presencia de armónicos aplicando las ecuaciones 13 y 18.

- Pérdidas por corriente de Eddy más la influencia de armónicos.

$$P_{EC} = P_{EC-R} * \left(1 + \sum_{h=1}^{h=hmax} h^2 \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2\right)$$

$$P_{EC} = 1\,938.09 * (1 + 1.066611869)$$

$$P_{EC} = 4\,005.28\ (kW)$$

- Pérdidas adicionales más la influencia de armónicos.

$$P_{osl} = P_{osl-R} * (1 + \sum_{h=1}^{h=hmax} h^{0,8} \left(\frac{I_h}{I_R}\right)^2)$$

$$P_{osl} = 3\,934.91 * (1 + 1.009659519)$$

$$P_{osl} = 7\,907.83\ (kW)$$

- Pérdidas totales de carga más la influencia de armónicos.

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} + P_{OSL}$$

$$P_{LL} = 55\,328.650 + 4\,005.28 + 7\,907.83 \quad (kW)$$

$$P_{LL} = 67\,241.76\ (kW)$$

4.2. Discusiones.

4.2.1. Efecto de la distorsión armónica en el transformador de potencia trifásico de la "E.E.A.S.A."

La subestación Tena Norte ubicado en el canto Tena provincia de Napo consta de un transformador trifásico de potencia de una capacidad de 20 MVA con relación de transformación de delta 69kV y estrella con neutro 13,8kV el cual, alimenta a los cantones: Tena, Archidona y las parroquias de Muyuna, San Pablo de Ushpayacu, Cotundo y Hatun Sumaco, tiene una carga conectada aproximada de 12,18MW y una potencia de distorsión 158,75kW. Las mediciones de calidad de energía de potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, distorsión armónica de voltaje, distorsión armónica de corriente, desbalance de líneas, etc. Estas mediciones son realizadas por el mismo departamento técnico de la empresa alrededor de 15 días de cada mes a un intervalo de 10 min como recomienda la normativa de calidad IEC 61000.

Los datos obtenidos de la medición de calidad de energía de distorsión armónica de corriente dieron los siguientes valores como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15 Datos medidos de niveles de distorsión armónica de corriente.

Orden Armónico	I_hA/IA	I_hB/IB	I_hC/IC	I_hT/IT
1	100.82	126.55	116.42	100
2	0.12	0.20	0.12	0.12
3	9.67	9.71	9.02	9.67
4	0.05	0.10	0.03	0.050
5	2.82	3.38	2.35	2.82
6	0.02	0.04	0.03	0.020
7	0.91	0.86	0.59	0.91
8	0.00	0.01	0.01	0.00
9	0.91	1.01	1.00	0.91
10	0.00	0.01	0.00	0.00
11	0.51	0.51	0.56	0.51
12	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.24	0.30	0.25	0.24

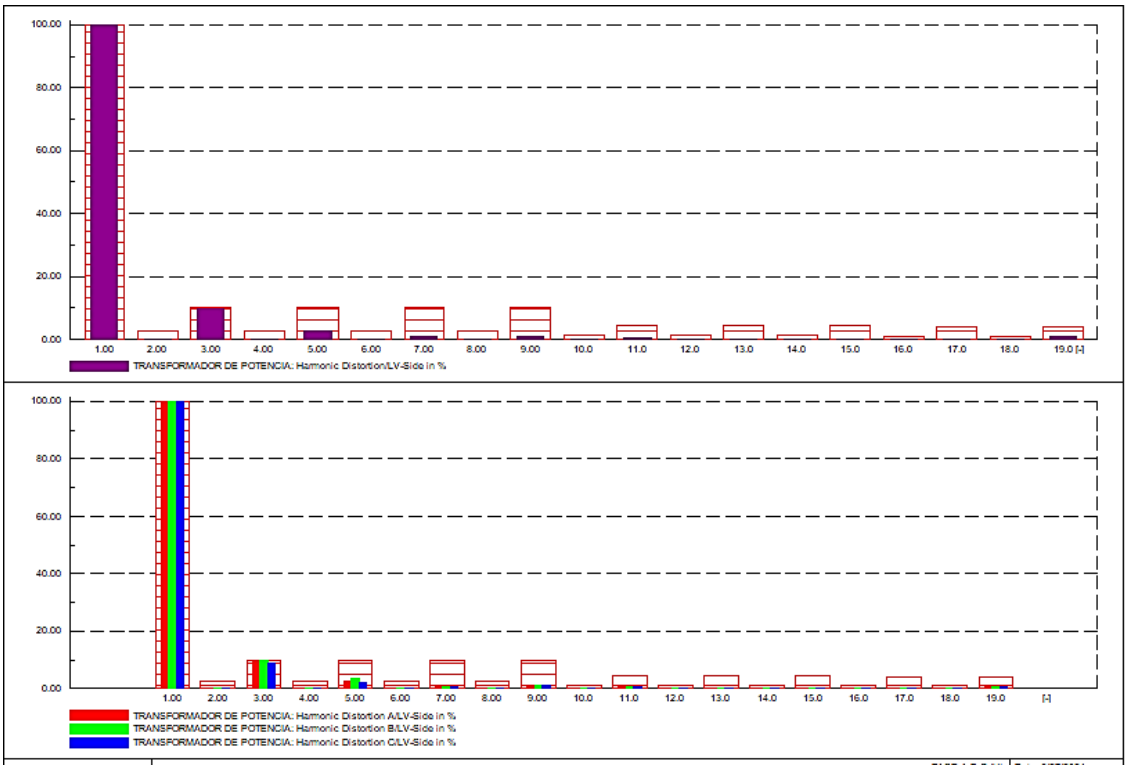
14	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.13	0.13	0.13	0.13
16	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.09	0.07	0.07	0.09
18	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.80	0.80	0.80	0.80

Autor: Jeff S. Peñafiel.

La tabla de distorsión de corriente muestra que los valores están dentro del rango establecidos por la normativa IEEE 519-1992, para los niveles de voltaje de 69kV hasta 120V, el orden de armónicos menores deben de estar por debajo del 10%, 11<=h<17 el 4.5%, 17<=h<23 el 4%, 23<=h<35 el 1.5% y los niveles de orden mayores de 35 el 0.7%, la distorsión armónica total del 12%.

Como se nota los porcentajes de niveles de armónicos están dentro del rango permitido, con una observación, el nivel de armónico de orden 3 es el de mayor magnitud el cual, se muestra en el espectro de armónicos a continuación en la figura 11.

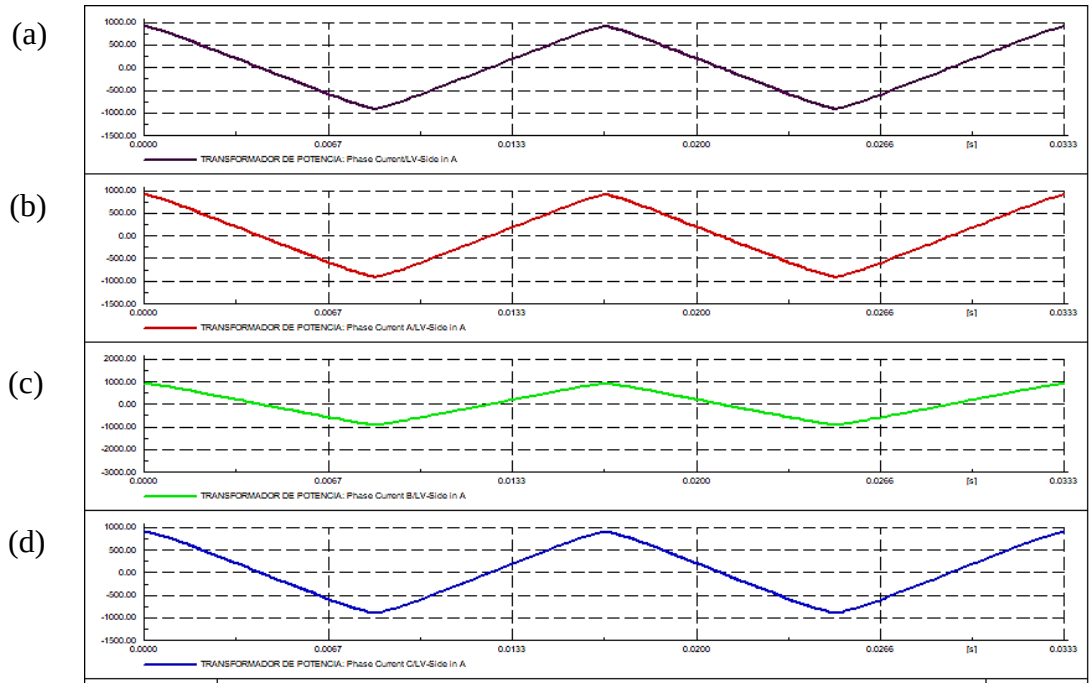
Figura 11 Espectro armónica de corriente aplicando la norma IEEE 519-1992, a) transformador, b) fases A-B-C.



Fuente: DigSilents PowerFactory
Autor: Jeff S. Peñafiel.

El nivel de armónico de orden 3 llega a tener el valor de 9.980% llegando casi al límite permitido y esto se ve reflejado en la onda sinusoidal de la corriente como se mira en la figura 12.

Figura 12 a) Corriente del transformador sin reducción de armónicos, b,c,d) Corriente de las fases A-B-C sin reducción de armónicos.



Fuente: DigSilents PowerFactory
Autor: Jeff S. Peñafiel.

La onda sinusoidal de corriente en el transformador y en las fases A-B-C se ve afectada por el nivel armónico de orden 3 llegando a tener una deformación de onda tipo triangular, este tipo de onda puede llegar a causar sobrecalentamiento en los conductores afectando así el desgaste del aislamiento y el aumento de pérdidas de potencia óhmicas.

El valor de distorsión armónica de corriente (HD) obtenido en el transformador es 0.794% llegando a tener por fase A-B-C un porcentaje de 0.323%, 0.326% y 0.326%. En distorsión armónica total de corriente (THD) del transformador se obtuvo 2.824% y de cada una de las fases A (0.793%), B (0.866%) y C (0.795%) respectivamente a una frecuencia fundamental de 60Hz con una corriente fundamental de 836.7Amp, cabe mencionar que los valores antes mencionados entran en el rango permitido según las normas IEC 61000 y IEEE 519-1992.

4.2.2. Resultados de la reducción de distorsión armónica en el transformador trifásico de potencia.

La reducción de armónicos de corriente se planteó la utilización de un filtro pasivo que será conectado en la barra secundaria de 13,8kV deberá establecer una vía de baja impedancia para la corriente de armónicas de tal forma que circulen por el filtro y no directo al alimentador, este tipo de filtro es el más utilizado para la reducción de armónicos de orden 3, 5,7 y 9, además por bajo costo de fabricación y fácil instalación.

Con el concepto antes mencionado se realizó el diseño para la disminución del nivel de armónico de orden 3 (180Hz) ya que es donde se nota la mayor magnitud a comparación de los niveles restante. El filtro debe tener las siguientes características una compensación reactiva de 10MVAr a un factor de calidad de 20, la construcción debe constar de una capacitancia de 121.771µF, una inductancia de 7.265mH y una resistencia de 0.386Ω el cual, se sintonizará a una frecuencia resonante de 169.2Hz. La implementación de este filtro dio los siguientes resultados como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16 Valores de nivel de distorsión armónica resultantes por la implementación del filtro pasivo.

Orden Armónico	I_hA/IA	I_hB/IB	I_hC/IC	I_hT/IT
1	100.82	126.55	116.42	100
2	0.13	0.281	0.131	0.13
3	5.111	5.107	4.685	5.111
4	0.04	0.80	0.024	0.040
5	2.36	2.836	1.974	2.36
6	0.017	0.034	0.025	0.000
7	0.783	0.740	0.505	0.783
8	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.784	0.952	0.865	0.784
10	0.00	0.087	0.00	0.00
11	0.445	0.445	0.448	0.445
12	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.209	0.261	0.218	0.209

14	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.113	0.114	0.113	0.113
16	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.078	0.078	0.078	0.078
18	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.698	0.698	0.698	0.698

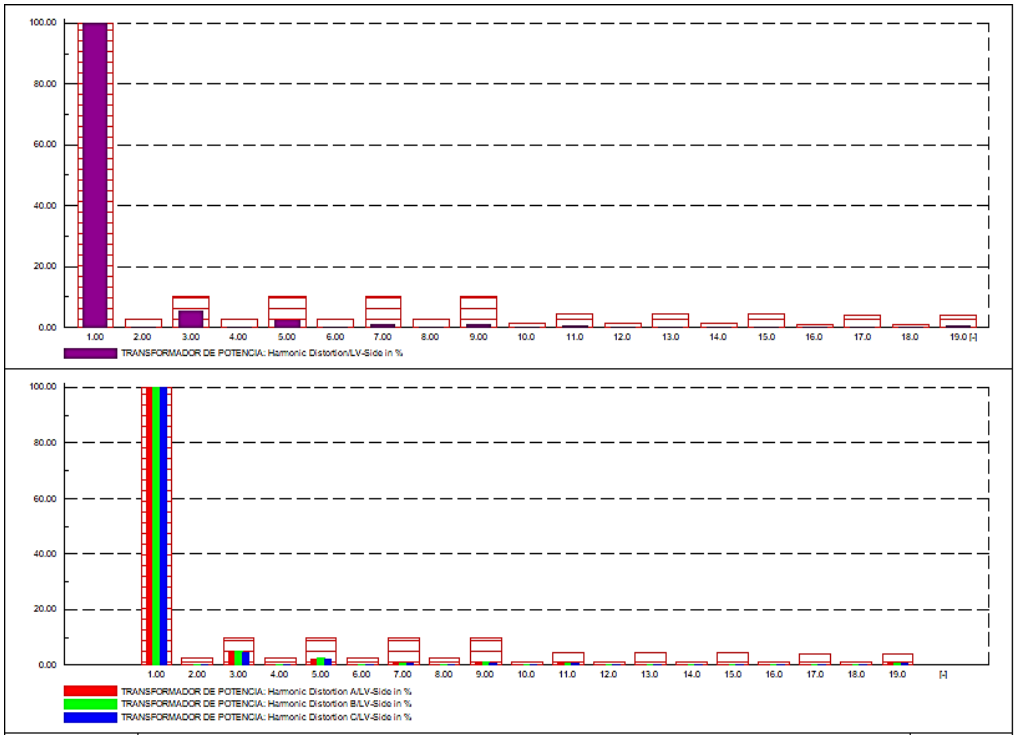
Autor: Jeff S. Peñafiel.

Como se nota, los porcentajes de niveles de armónicos bajaron un 40% del valor que antes existía sin la implementación del filtro, con la implementación del filtro para el nivel amónico de ordeno 3 de mayor magnitud se redujo de 9.67% a 5.111%, con estos nuevos valores obtiene un nuevo espectro armónico, se muestra en la figura 13.

Figura 13 Espectro armónica de corriente aplicando la norma IEEE 519-1992, a) transformador, b) fases A-B-C.

(a)

(b)



Fuente: DigSilents PowerFactory
Autor: Jeff S. Peñafiel.

La reducción de armónicos también se puede ver refleja en la onda sinusoidal de corriente como se muestra en la figura 14.

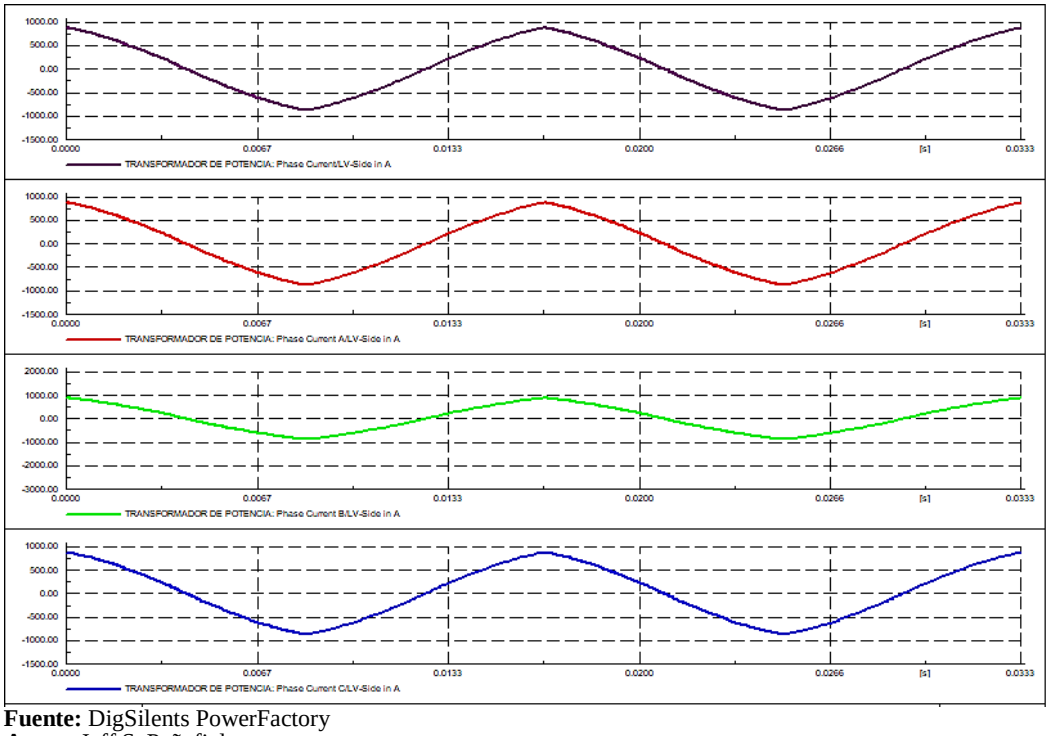
Figura 14 a) Corriente del transformador sin reducción de armónicos, b,c,d) Corriente de la fase A-B-C con reducción de armónicos.

(a)

(b)

(c)

(d)



Fuente: DigSilents PowerFactory
Autor: Jeff S. Peñafiel.

En la onda sinusoidal de corriente en el transformador y en las fases A-B-C se puede apreciar una mejora. Este resultado se llega a tener por la implementación del filtro pasivo diseñado, disminuyendo los valores de distorsión armónica corriente (HD) obteniendo lo siguiente: en el transformador del 0.692%, llegando a tener por fase A-B-C un porcentaje de 0.282%, 0.283% y 0.284%. En distorsión armónica total de corriente (THD) del transformador se obtuvo 1.706% y de cada una de las fases A (0.543%), B (0.576%) y C (0.513%) respectivamente.

4.2.3. Resultados de pérdidas en el transformador con influencia de armónicos.

La presencia de armónicos en la onda sinusoidal de corriente ocasiona pérdidas adicionales en el transformador por causa de la elevación de temperatura que es disipada en forma de calor, llegando a causar el desgaste de los aisladores en los conductores y principalmente en el mismo transformador y por ende una reducción prematura de la vida útil de operación.

Para el cálculo de las pérdidas adicionales en carga en el trasformador se debe realizar el cálculo de las pérdidas por corriente de Eddy o también conocidas como pérdidas por corrientes parasitas (P_{EC}), las pérdidas por flujo de dispersión o pérdidas

adicionales (P_{OSL}) y las pérdidas por efecto Joule (P_{Ih2R}), con estos datos calculados tenemos los siguientes resultados como se muestra en la tabla 17.

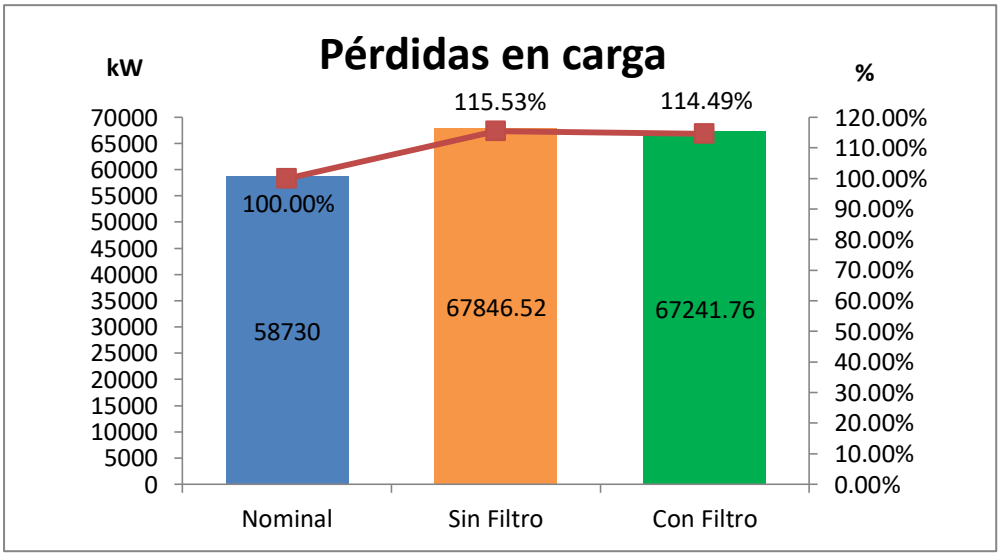
Tabla 17 Pérdidas adicionales de potencia en el trasformador.

	P_{Ih2R}	P_{EC}	P_{OSL}	P_{LL}	%
Sin Filtro	55 717.03	4 152.66	7 976.84	67 846.52	15.53%
Con Filtro	55 328.65	4 005.28	7 907.83	67 241.76	14.49%

Autor: Jeff S. Peñafiel.

Es notable la disminución de pérdidas de potencia que se obtiene al reducir los niveles de distorsión armónica en el transformador, teniendo una pérdida de carga sin la implementación del filtro de 67 846.52 (kW) llegando a tener 15.53% más de perdida de potencia sobre la nominal, a comparación de la implementación del filtro pasivo se obtiene 67 241.76 (kW), teniendo un ahorro del 1.04% de pérdidas, dando un valor equivalente de 604.76 (kW) de potencia de ahorro como se muestra en la figura 15.

Figura 15 Pérdidas de potencia en carga.



Autor: Jeff S. Peñafiel.

4.2.4. Beneficios de reducir los niveles de armónicos en el transformador de potencia.

En todo sistema eléctrico se tiene presente las pérdidas de energía y el costo que afectaría para el mantenimiento de equipos, sistemas y elementos conductores, al tener armónicos inyectados en la red las pérdidas nominales establecidas por los fabricantes llegan aumentar y en algunos casos a empeorar la calidad de energía.

Los datos de medición de calidad de energía proporcionados por la Empresa Eléctrica de Ambato S.A. fueron analizados con la finalidad de llegar a establecer una reducción de pérdidas de energía en el trasformador de potencia de 20MVA de la subestación Tena Norte ya que contiene distorsión de armónicos, cabe recalcar que los niveles de armónicos están dentro de los parámetros permitidos según la norma IEC 61000. Teniendo en cuenta lo anterior mencionado y realizando el cálculo correspondiente se llegó a lo siguiente:

- La pérdida de energía nominal del transformador es de 1 409 520 (kWh).
- La pérdida de energía del transformador sin reducción de armónicos es de 1 628 316.48 (kWh).
- La pérdida de energía del transformador con la reducción de armónicos es de 1 613 802.24 (kWh).

Las pérdidas de energía sin la reducción de armónicos son elevada a comparación de la perdida nominal de energía la cual fue diseñada, al reducir los niveles de armónicos se tiene un beneficio de 14 514.24 (kWh), esta energía ya no afectaría al transformador en forma de pérdidas de calor ni se llegaría a tener un acelerado degaste del aislamiento en el devanado y en los elementos conductores aumentando la vida útil del transformador.

La implementación del filtro pasivo propuesto tiene un costo aproximado de $34 160 como se indica en el anexo 10, de compensación reactiva 10MVAr a un factor de calidad de 20, una capacitancia de 121.771μF, inductancia de 7.265mH y resistencia de 0.386Ω. Este filtro garantiza una reducción de armónicos del 40% acentuando la señal sinusoidal de corriente y mejorando la eficiencia de rendimiento de operación del transformador de potencia.

CAPÍTULO V

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIÓN

5.1. Conclusión.

- En la actualidad en la mayoría de nuestros hogares contamos con cargadores para cualquier equipo eléctrico ya sea, televisores led de pantalla plana, consolas de videojuegos, lámparas led, etc. En caso de centros comerciales e industrias que constan de motores de inducción que son controlados con variadores de frecuencia, soldadoras eléctricas, hornos eléctricos, aires acondicionados, etc. Estos equipos llegan a inyectar corrientes de armónicos a la red llegando a ser la principal causa de la deformación de las ondas sinusoidales de corriente y voltaje.
- Las mediciones de distorsión armónica proporcionadas por "E.E.A.S.A." del transformador de potencia de 20MVA, los cuales, se ingresaron en el software Digsilent PowerFactory, facilitando el análisis del comportamiento de la red con la influencia armónicos que son inyectados, dando como resultado el espectro armónico y las gráficas de onda sinusoidal de corriente y voltaje del sistema eléctrico.
- El diseño del filtro pasivo propuesto para la reducción del nivel armónico de mayor magnitud en este caso de orden 3 el cual, será necesario de una compensación reactiva de 10 MVAr a un factor de calidad de 20, la construcción debe constar de una capacitancia de 121.771μF, una inductancia de 7.265mH y una resistencia de 0.386Ω a una frecuencia resonante de 169.2Hz.
- El diseño del filtro pasivo cumplió con el objetivo de reducir la distorsión armónica que contenía el transformador de potencia reduciendo el contenido armónico de 2.824% de THD existente a un 1.706% de THD.
- La disminución de las pérdidas de energía en el trasformador de potencia a causa del contenido armónica de corriente se redujo a 1 613 802.2448 (kWh) al implementar el filtro pasivo, en este caso la perdida de energía nominal del transformador es de 1 409 520 (kWh) y al obtener distorsión armónica se tiene 1 628 316.48 (kWh), teniendo un beneficio en energía de 14 514.24 (kWh) el cual, esta energía ya no afectará directamente al transformador y a los elementos propios del mismo.

5.2. Recomendación.

- La distorsión armónica actúa en diferentes niveles de frecuencia dependiendo del orden armónico que tenga y a diferente secuencia ya sea positiva (+), negativa (-) o cero (0) las cuales pueden llegar a sobrecalentar los conductores hasta la rotura y daños de circuitos y motores trifásicos.
- Las normas pueden prestarse para diferentes interpretaciones y de no tener seguridad en su manera de aplicación, es conveniente consultar con un profesional con experiencia en el tema.
- La simulación en el software Digsilent PowerFactory puede llegar a tener complicaciones al instante de obtener los gráficos y resultados de análisis dependiendo al caso de estudio que se está realizando.
- Tratar de reducir el 100% de contenido armónico en un sistema eléctrico conectando cualquier filtro no se podría, porque causaría una sobrecarga al transformador el cual, se llegaría a empeorar la corrección.
- La manera más óptima para dimensionar el filtro pasivo para la reducción de armónicos es tener en claro las condiciones necesarias para la corrección del nivel armónico, se debe tener conocimientos de normativas establecidas para el diseño.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS

6.1. Bibliografía.

[1] U. Ezomar, “Estudio de los fenómenos armónicos en la Subestación Melones Oeste de PDVSA en distrito de San Tóme,” *Petróleos Venez. S.A.*, pp. 1–7, 2015.

[2] L. G. MARULANDA GONZALEZ, “Efectos de los armónicos sobre los transformadores de distribución,” *Univ. del Val.*, pp. 1–10.

[3] J. M. RUIZ VALLEJO and Q. F. HERNANDO ORTÍZ, “Metodología para identificar fuentes armónicas en sistemas eléctricos,” pp. 1–259, 2007.

[4] Anónimo, “Armónicos: Origen y Solución,” pp. 294–308.

[5] E. Rojas Girett, “Generalidades sobre los armónicos y su influencia en los sitemas de distribución de energía,” pp. 1–33, 2011.

[6] P. Electronics, “Armónicos en Sectores Industriales,” pp. 1–10, 2019.

[7] N.-P. Ricardo Francisco, “La tendencia del factor de cresta ayuda a detectar eventos nacientes; circuito electrónico, programas y aplicaciones a señales de diversos campos,” *Ing. Investig. y Tecnol.*, pp. 1–19, 2013, doi: 10.1016/s1405-7743(15)30007-x.

[8] Universidad Politecnica Salesiana, “Armonicos en las Redes Eléctricas,” pp. 1–33, 2013.

[9] Circutor, “Procedimientos para el Estudio y Análisis de Perturbaciones Armónicas -,” *Div. PFC*, pp. 1–20, 2014.

[10] Anónimo, “Los Armónicos y la Calidad de la Energía Eléctrica,” *RTR-energía*, pp. 42–52.

[11] “Normativa y legislación de armónicos.” pp. 33–42.

[12] J. Gómez-Sarduy, E. Quispe, R. Reyes-Calvo, V. Sousa-Santos, and P. Viego-Felipe, “Influencia de los armónicos de corriente sobre las pérdidas en los transformadores de distribución monofásicos con derivación central,” *El Hombre y la Máquina*, pp. 1–12, 2014.

[13] Olfer, “Medidas Para Reducir Los Armónicos,” *power supply Co.*, pp. 1–2.

[14] D. F. MONTOYA CÉSPEDES, “Mitigación del nivel de armónicos en un sistema eléctrico industrial mediante un filtro de armónicos pasivo,” *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.*, pp. 1–8, 2016.

[15] P. Castillo, “COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA (EMC) - PARTE 2-2: MEDIO AMBIENTE - LOS NIVELES DE COMPATIBILIDAD DE BAJA FRECUENCIA PERTURBACIONES CONDUCIDAS Y SEÑALIZACIÓN EN LOS SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DE BAJA TENSIÓN (IEC 61000-2-2:2002, IDT),” *INEN*, vol. 2, no. 1, p. 10, 2014.

[16] F. A. Donoso, “Componentes Armónicas en Redes de Distribución Eléctricas,” *Santiago Chile Ed. Univ. Santiago*, vol. 0, no. 0, 2002.

[17] CONELEC, “Regulación 004/01-Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución.” pp. 1–25, 2001.

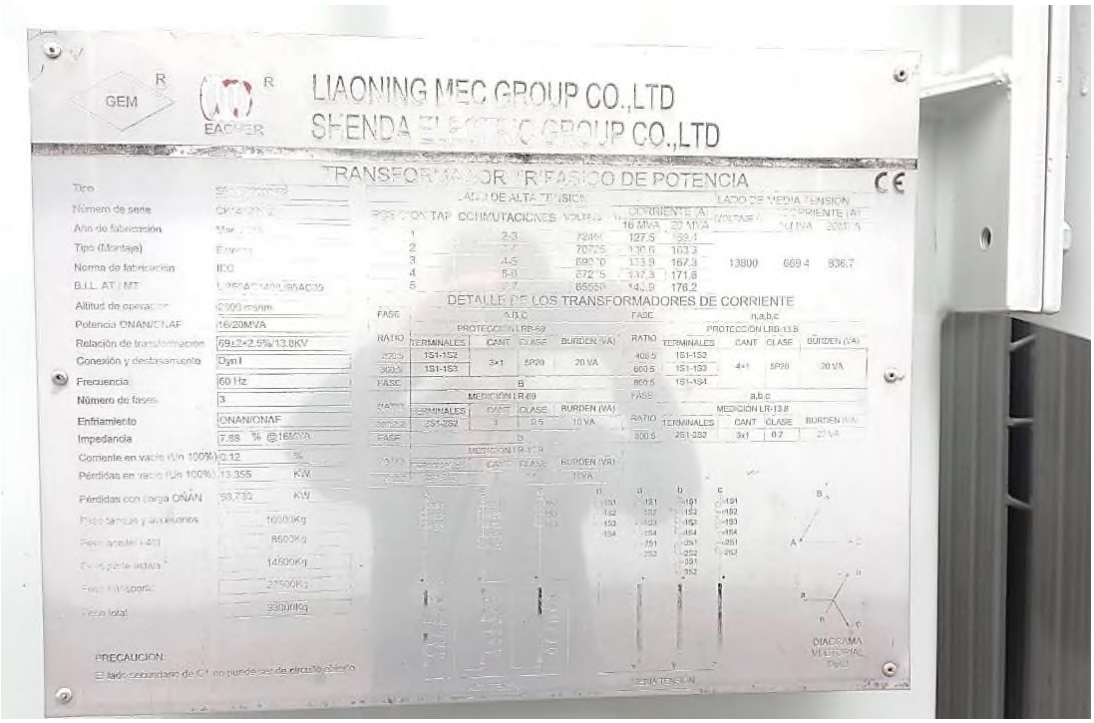
[18] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, “Subestación Tena Norte,” *noviembre*, 2007. .

[19] M. Márquez and G. Molina, “Evaluación de la vida útil del aislamiento en transformadores de potencia a partir del ciclo térmico,” p. 119, 2016.

6.2. Anexos.

Anexo 1. Trasformador trifásico de potencia 20MVA 69kV/13.8KV.

Anexo 2 Placa constructiva del trasformador trifásico de potencia 20MVA 69kV/13,8kV.



Anexo 3. Estándares y recomendaciones para el análisis de distorsión armónica en sistemas eléctricos.

C.2.3. Estándares y recomendaciones

La proliferación de sistemas electrónicos de potencia ha tenido, a nivel de distorsión armónica, un impacto sensiblemente negativo tanto en redes como en usuarios. Como consecuencia, diversas agencias nacionales e internacionales han estado considerando establecer límites a la inyección de armónicos que permitan mantener una buena calidad en la potencia suministrada. Varios estándares y recomendaciones han surgido para establecer límites de distorsión armónica en corriente y tensión:

- Norma IEC 61000
- EN 50006, "Limitación de perturbaciones en redes de alimentación eléctrica causadas por aparatos domésticos y similares, equipados con dispositivos electrónicos", Estandard Europeo preparado por el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica, CENELEC.
- Standard VDE 0160 para convertidores.
- Standard ANSI/IEEE 519-1992: IEEE Guía para control armónico y compensación de reactiva en convertidores de potencia estáticos.

En el caso de convertidores con conexión directa a la red eléctrica, los estándares más extendidos a son el IEC 61000 en Europa (aplicado en España), y el IEEE 519-1992, en Estados Unidos.

Estándares Europeos

La IEC (International Electrotechnical Comission) y el CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica) han establecido normas que limitan perturbaciones de baja frecuencia en redes industriales y domésticas, como las normas IEC 61000 y EN 61000.

La IEC exige en su estándar IEC 61000-3-2 que los fabricantes limiten el consumo de armónicos de corriente de sus productos. Este estándar se aplica a todas las cargas monofásicas y trifásicas de menos de 16 A por fase. Los productos deben certificarse en laboratorios autorizados para asegurar que cumplen el IEC 61000-3-2, efectivo desde el 1 de enero del 2001.

Anexo 4. Necesidad de mejorar la interfaz de la red.

C.2.4. Necesidad de mejorar la interfaz de la red

Debido al gran contenido en armónicos que puede presentar la corriente de salida de un inversor, se pueden exceder los límites establecidos en las tablas anteriores, produciendo, además una disminución de la calidad potencia suministrada a la red, un efecto negativo sobre los equipos de potencia de las siguientes maneras:

- La potencia disponible puede reducirse hasta dos terceras partes
- Los condensadores del bus de continua soporta una gran presión debido a grandes picos de corriente
- Las pérdidas del inversor aumentan como consecuencia de la caída de tensión en los diodos, debido a la dependencia de esta tensión con la corriente que los atraviesa.
- En el caso de incorporar un transformador, éste debería estar muy sobredimensionado.

Con el fin de disminuir la distorsión armónica que el inversor inyecta en la red, de modo que se cumpla la normativa, pueden incorporarse filtros y demás elementos pasivos a la salida del convertidor.

Bobinas y condensadores pueden ser empleados como filtros para mejorar la forma de onda entregada por el equipo a la red. El filtro más simple consiste en añadir una bobina a la salida del inversor, de manera que la forma de onda de la corriente de salida adquiera un aspecto más senoidal, reduciéndose así el número de armónicos y mejorando el factor de potencia. Este tipo de filtro será el empleado en el sistema a simular.

Anexo 5. Normativa Técnica Ecuatoriana INEN-IEC 61000-2-2

COPYRIGHT © IEC. NOT FOR COMMERCIAL USE OR REPRODUCTION

Compatibilidad electromagnética (CEM)

Parte 2-2: Entorno
Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma se refiere a las perturbaciones conducidas en el rango de frecuencias de 0 kHz a 9 kHz, con una extensión hasta 148,5 kHz para los sistemas de transmisión de señales en la red. Se dan los valores numéricos de los niveles de compatibilidad para las redes de distribución pública de corriente alterna en baja tensión, con una tensión nominal máxima de 420 V monofásica, o 690 V trifásica, y una frecuencia nominal de 50 Hz o 60 Hz.

Los niveles de compatibilidad especificados en esta norma se aplican en el punto de conexión común. En los terminales de un equipo alimentado por las redes descritas anteriormente, el nivel de severidad de las perturbaciones puede, en la mayor parte de los casos, considerarse igual a la del punto de conexión común. En algunas situaciones esto no es así, particularmente en el caso de una línea larga dedicada al suministro de una instalación particular, o en el caso de una perturbación generada o amplificada dentro de la instalación de la que forma parte el equipo.

Los niveles de compatibilidad se especifican para las perturbaciones electromagnéticas que se pueden esperar en las redes de distribución pública en baja tensión, con el objeto de ayudar a definir:

- los límites que se deben establecer para las emisiones de perturbaciones en las redes de distribución pública de energía (incluyendo los niveles de planificación tal como se definen en el apartado 3.1.5);
- los límites de inmunidad que se deben establecer por los comités de productos u otros relacionados con los equipos sometidos a las perturbaciones conducidas por las redes de distribución pública de energía.

Los fenómenos de las perturbaciones consideradas son:

- las fluctuaciones de tensión y el flicker;
- los armónicos hasta el de orden 50 incluido;
- los interarmónicos hasta el armónico de orden 50;
- las distorsiones de tensión a frecuencias superiores (por encima del armónico de orden 50);
- los huecos de tensión y las interrupciones breves;
- el desequilibrio de tensión;
- las sobretensiones transitorias;
- las variaciones de la frecuencia fundamental;
- las componentes continuas;
- los sistemas de transmisión de señales en la red.

La mayor parte de estos fenómenos se describen en la Norma CEI 61000-2-1. En los casos en que todavía no es posible establecer niveles de compatibilidad, se dan algunas informaciones.

EXTRACTO

Anexo 6. Normativa ANSI/IEEEC57.91-1995 Estudio de Sobrecarga.

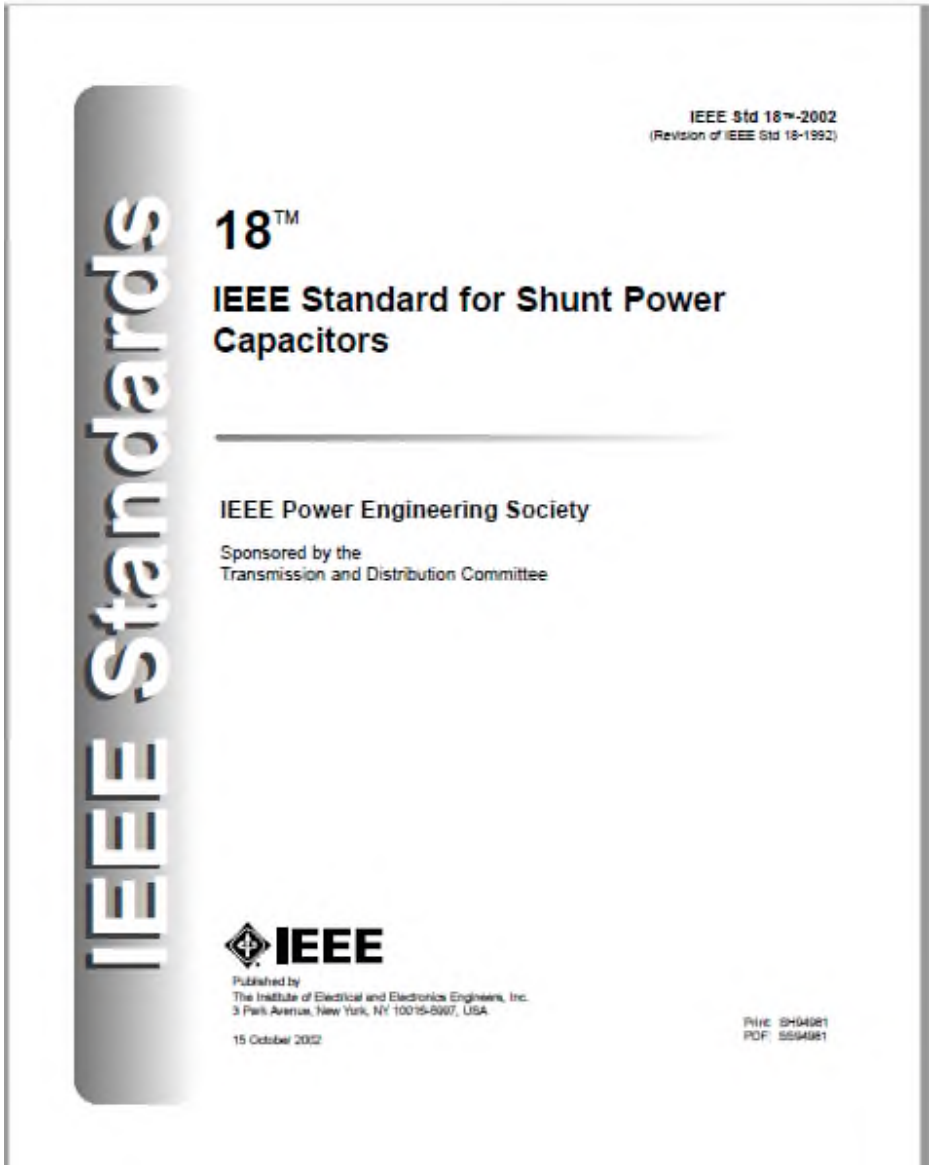
1. Introducción.

La capacidad de sobrecarga en transformadores, especialmente en transformadores de potencia y bajo condiciones de emergencia del sistema eléctrico donde estos se hallan instalados, ha sido ampliamente estudiada con procedimientos de cálculo muy precisos, aún cuando los valores de temperatura alcanzados en el transformador son los únicos parámetros considerados.

Nunca debemos perder de vista, especialmente cuando las especificaciones de compra no han especificado un estado de sobrecarga deseado, elementos auxiliares como los Bushings, conmutadores sin tensión o bajo carga, Transformadores de Corriente (TCs) instalados en Bushings, o algunos componentes internos como el circuito magnético y los apantallamientos magnéticos entre otros, son quienes realmente pueden llegar a definir el estado de sobrecarga máximo de un transformador de potencia.

Finalmente, la aplicación de sobrecargas que exceden los niveles indicados por el fabricante, presentan cierto grado de riesgo para los equipos si no son previamente evaluadas y limitadas a niveles aceptables para la seguridad de dichos equipos.

Anexo 7. Normativa IEEE Stad. 18-2002 Compensación reactivo en paralelo.



IEEE Standards

IEEE Std 18™-2002
(Revision of IEEE Std 18-1992)

18™

IEEE Standard for Shunt Power Capacitors

IEEE Power Engineering Society

Sponsored by the
Transmission and Distribution Committee

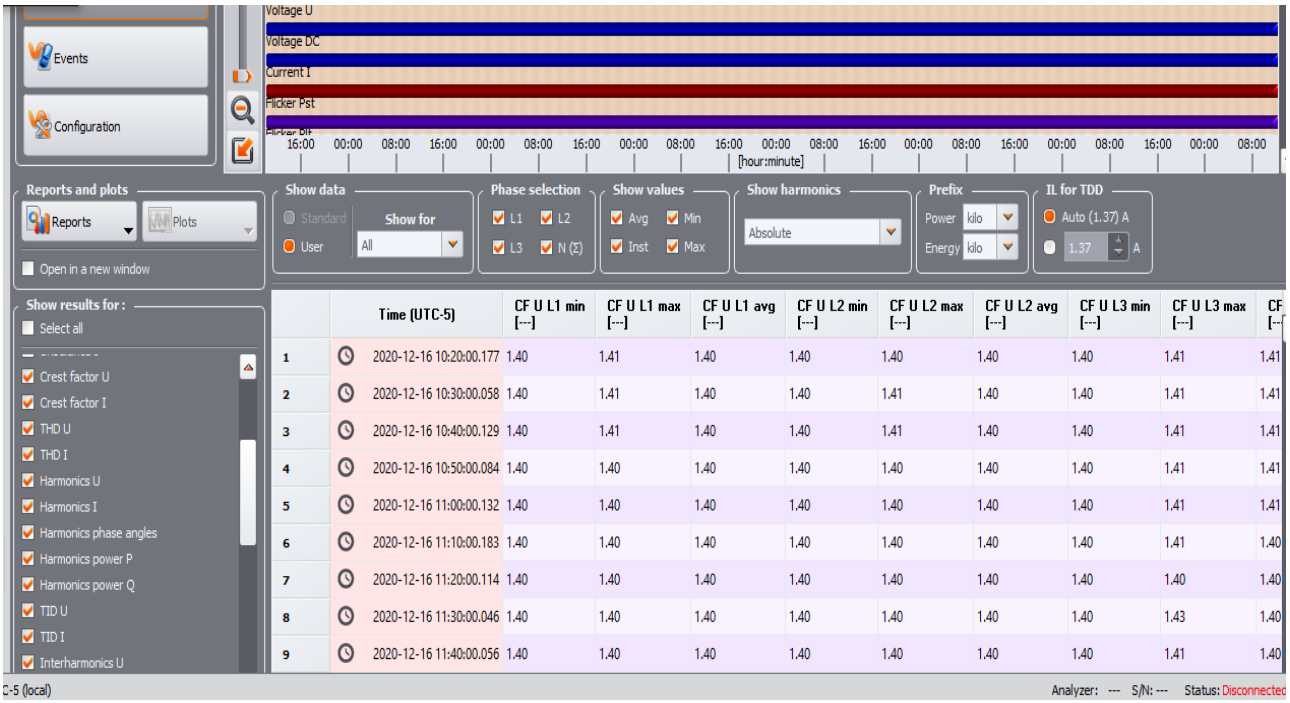
IEEE

Published by
The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA

15 October 2002

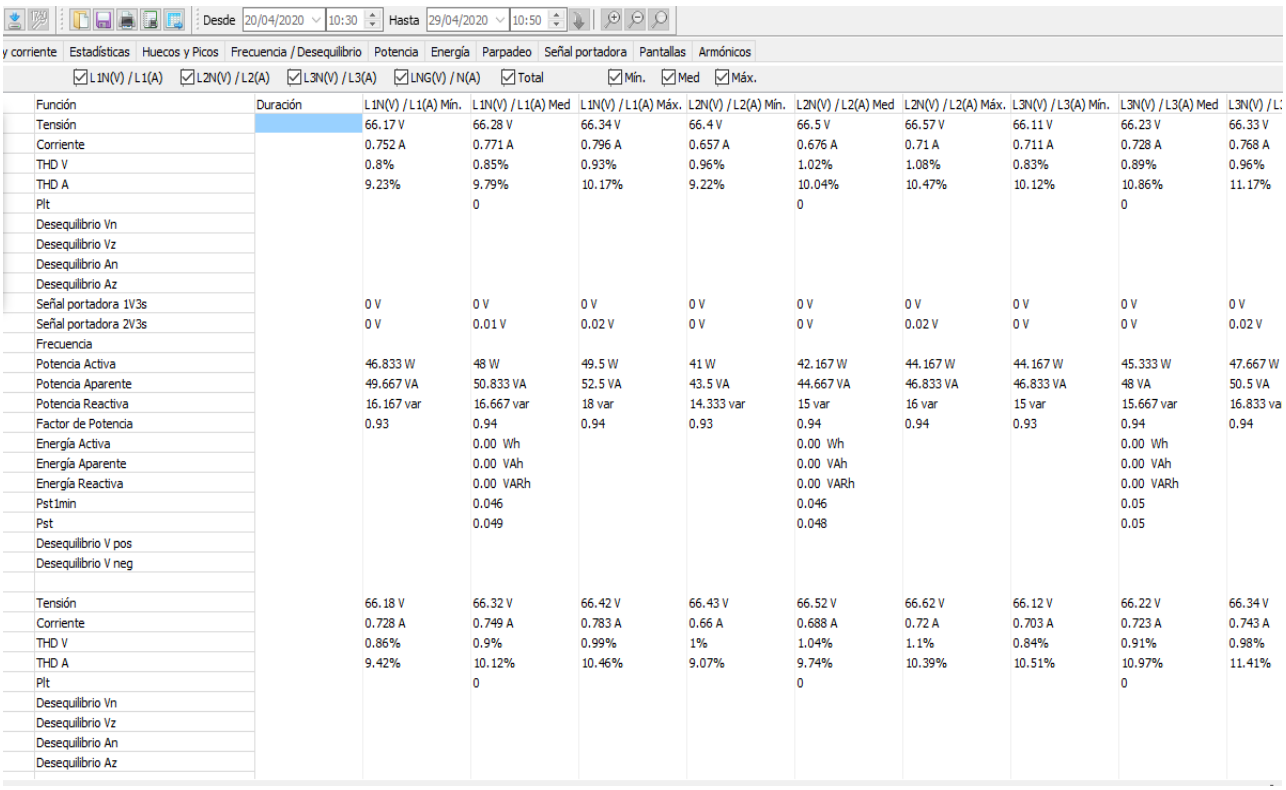
Print: SH94981
PDF: SS94981

Anexo 8. Anexo 7 Sonel Analysis 4.4.9 - Medidor de calidad de energía.



	Time (UTC-5)	CF U L1 min [---]	CF U L1 max [---]	CF U L1 avg [---]	CF U L2 min [---]	CF U L2 max [---]	CF U L2 avg [---]	CF U L3 min [---]	CF U L3 max [---]	CF [---
1	2020-12-16 10:20:00.177	1.40	1.41	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.41	1.41
2	2020-12-16 10:30:00.058	1.40	1.41	1.40	1.40	1.41	1.40	1.40	1.41	1.41
3	2020-12-16 10:40:00.129	1.40	1.41	1.40	1.40	1.41	1.40	1.40	1.41	1.41
4	2020-12-16 10:50:00.084	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.41	1.41
5	2020-12-16 11:00:00.132	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.41	1.41
6	2020-12-16 11:10:00.183	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.41	1.40
7	2020-12-16 11:20:00.114	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
8	2020-12-16 11:30:00.046	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.43	1.40
9	2020-12-16 11:40:00.056	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.41	1.40

Anexo 9. Fluke Power log classic 4.6



Función	Duración	L1N(V) / L1(A) Mín.	L1N(V) / L1(A) Med	L1N(V) / L1(A) Máx.	L2N(V) / L2(A) Mín.	L2N(V) / L2(A) Med	L2N(V) / L2(A) Máx.	L3N(V) / L3(A) Mín.	L3N(V) / L3(A) Med	L3N(V) / L
Tensión		66.17 V	66.28 V	66.34 V	66.4 V	66.5 V	66.57 V	66.11 V	66.23 V	66.33 V
Corriente		0.752 A	0.771 A	0.796 A	0.657 A	0.676 A	0.71 A	0.711 A	0.728 A	0.768 A
THD V		0.8%	0.85%	0.93%	0.96%	1.02%	1.08%	0.83%	0.89%	0.96%
THD A		9.23%	9.79%	10.17%	9.22%	10.04%	10.47%	10.12%	10.86%	11.17%
Plt			0			0			0	
Desequilibrio Vn										
Desequilibrio Vz										
Desequilibrio An										
Desequilibrio Az										
Señal portadora 1V3s		0 V	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V	0 V
Señal portadora 2V3s		0 V	0.01 V	0.02 V	0 V	0 V	0.02 V	0 V	0 V	0.02 V
Frecuencia										
Potencia Activa		46.833 W	48 W	49.5 W	41 W	42.167 W	44.167 W	44.167 W	45.333 W	47.667 W
Potencia Aparente		49.667 VA	50.833 VA	52.5 VA	43.5 VA	44.667 VA	46.833 VA	46.833 VA	48 VA	50.5 VA
Potencia Reactiva		16.167 var	16.667 var	18 var	14.333 var	15 var	16 var	15 var	15.667 var	16.833 va
Factor de Potencia		0.93	0.94	0.94	0.93	0.94	0.94	0.93	0.94	0.94
Energía Activa			0.00 Wh			0.00 Wh			0.00 Wh	
Energía Aparente			0.00 VAh			0.00 VAh			0.00 VAh	
Energía Reactiva			0.00 VARh			0.00 VARh			0.00 VARh	
Pst1min			0.046			0.046			0.05	
Pst			0.049			0.048			0.05	
Desequilibrio V pos										
Desequilibrio V neg										
Tensión		66.18 V	66.32 V	66.42 V	66.43 V	66.52 V	66.62 V	66.12 V	66.22 V	66.34 V
Corriente		0.728 A	0.749 A	0.783 A	0.66 A	0.688 A	0.72 A	0.703 A	0.723 A	0.743 A
THD V		0.86%	0.9%	0.99%	1%	1.04%	1.1%	0.84%	0.91%	0.98%
THD A		9.42%	10.12%	10.46%	9.07%	9.74%	10.39%	10.51%	10.97%	11.41%
Plt			0			0			0	
Desequilibrio Vn										
Desequilibrio Vz										
Desequilibrio An										
Desequilibrio Az										

Anexo 10. Costo de implementación de filtro pasivo.

CANT	DETALLE	P. UNIT	P. TOTAL
1	Filtro Pasivo para reducción de armónicos de características de capacitancia 121.771µF, inductancia 7.265mH, resistencia de 0.386Ω a un factor de calidad de 20 y compensación reactiva de 10MVAr	27 500	27 500.00
1	Estudio e instalación de filtro pasivo para reducción de armónicos.	3 000	3 000.00
		Subtotal	30 500.00
		I.V.A 12%	3 660.00
		Total	34 160.00