UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA: ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS

INFLUENCIA DE UN FILTRO EFICIENTE PARA MITIGAR LAS CORRIENTES ARMÓNICAS EN BAJA TENSIÓN DEL SED 598 DEL CENTRO COMERCIAL "EL MOLINO I" – CUSCO

Tesis Presentado por:
Br. OMAR QUISPE MOLINA

Para Optar al Título Profesional de Ingeniero Electricista

Asesor:
Dr. Willy Morales Alarcon

CUSCO – PERÚ

2020

PRESENTACIÓN.

El presente trabajo de investigación intitulada: INFLUENCIA DE UN FILTRO EFICIENTE PARA MITIGAR LAS CORRIENTES ARMÓNICAS EN BAJA TENSIÓN DEL SED 598 DEL CENTRO COMERCIAL "EL MOLINO I" – CUSCO, se pone a consideración de los señores miembros del Jurado Calificador en concordancia y estricto cumplimiento con los preceptos que establece el Reglamento de Grados y Títulos vigentes de nuestra Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería: Eléctrica, Electrónica, Informática y Mecánica. El objetivo del trabajo de investigación es con el propósito de poder Optar al Título Profesional de Ingeniero Electricista.

Este trabajo de investigación tiene por finalidad encontrar alternativas de mitigación a los problemas de las corrientes armónicas en baja tensión del SED 598; en el cual se utilizará el software computacional DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 para las simulaciones.

Por todo esto, espero que este trabajo de investigación que fue elaborado con esfuerzo y sacrificio tenga la acogida deseada y sirva de consulta para los estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica, especialmente a aquellos que tienen interés por el tema.

El Autor

DEDICATORIAS.

El presente trabajo de investigación lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme la fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de mis anhelos más deseados.

A mi padre Avelino Quispe Huamanrimachi quien con su amor, paciencia y esfuerzo me ha permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, además, por ser el pilar fundamental quien me inculco en la electrónica antigua, por ser él, uno de los primeros electrónicos que trabajaba arreglando radios y radiolas de circuitos de tubo al vacío.

A mis hermanos Ambrocio, Andres y Hector; por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento; especialmente por su amor al trabajo y ser unos excelentes técnicos electricistas.

A mi pareja, mis cuñadas y sobrinos porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

A mis compañeros y amigos por su motivación para la culminación de mis estudios profesionales y para la elaboración de la tesis. A todos ellos les dedico esta tesis.

Omar Quispe Molina

AGRADECIMIENTOS.

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y a toda mi familia por estar siempre presentes.

Al Ing. Wilbert Licona Segovia, que forma parte de la empresa Electro Sur Este S.A.A., mi profundo agradecimiento por su respaldo y su constante apoyo y preocupación para que toda la información sea facilitado para el desarrollo de esta tesis.

A todos los Docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica de la UNSAAC por haberme transmitido sus conocimientos y experiencias profesionales; que me servirá para fortalecer mi formación académica y científica. En especial al Dr. Ing. Willy Morales Alarcon, principal colaborador como asesor de tesis durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de esta tesis.

El Autor

INTRODUCCIÓN.

Los armónicos, es un tema de interés debido a la gran cantidad de efectos que causan en las redes de distribución eléctrica; como también producen interferencias con los equipos de medición, protección, control y comunicación. Respecto a este problema, se han pronunciado varias instituciones, como: IEEE, ANSI, IEC, EN y otras que recomiendan los límites permisibles en el PCC.

El presente trabajo de investigación busca encontrar alternativas de mitigación a las corrientes armónicas en baja tensión del SED 598 del Centro Comercial "El Molino I". Para tener una mejor comprensión sistemática de lo que se quiere dar a conocer, se presenta en 5 capítulos descritos de la siguiente manera:

Capítulo I – Generalidades: En este capítulo se da a conocer los aspectos generales del presente trabajo de tesis, como: ámbito de estudio, planteamiento del problema, objetivos, hipótesis, justificación del problema, variables y metodología empleada.

Capítulo II – Marco teórico y normativo: En este capítulo se presenta todo el marco teórico referido al tema de armónicos, THDv, THDi, TDD, fuentes de distorsión, efectos de los armónicos, tipos y características de filtros. En el ámbito normativo se habla de la norma nacional NTCSE y la noma internacional IEEE Std 519-2014.

Capítulo III – Situación actual de las corrientes armónicas en el SED 598: En este capítulo se realiza un diagnostico actual de las corrientes armónicas, como también del armónico de tensión en el lado de baja tensión del SED 598 del Centro Comercial "El Molino I". Para un mejor análisis se verifica en espectros el THDi, THDv y TDD y se realizará una comparación con los límites recomendados que establecen las normas NTCSE e IEEE Std 519-2014.

Capítulo IV – Modelamiento y simulación en el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7: En este capítulo se modela el circuito del SED 598 con el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7; donde se implementa la red equivalente, las barras de 10.6/0.23kV, el transformador de 250kVA, las cargas y las corrientes armónicas; para luego realizar la simulación del barrido de frecuencia, la resonancia, espectro armónico y forma de onda; aplicando las normas NTCSE e IEEE Std 519-2014.

Capítulo V – Propuesta de mitigación al problema: En este capítulo se realiza los cálculos para un filtro (pasivo) eficiente según la carga, y se realiza las simulaciones con los diferentes tipos de filtros; de esa manera se encuentra alternativas de mitigación. Además, se propone otra alternativa de solución como los filtros activos de parte de la empresa ABB. Se finaliza haciendo un listado de conclusiones y sugerencias.

RESUMEN.

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad determinar la medida de mitigación de las corrientes armónicas con el filtro eficiente en baja tensión en el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I" – Cusco. El objetivo es explicar que las corrientes armónicas son las principales causantes de estos problemas.

El Centro Comercial "El Molino I" se dedica a la venta de aparatos eléctricos y electrónicos (cargas no lineales); ya que estas cargas modifican la naturaleza de la onda senoidal original y la convierten en señales deformadas no senoidales y cuyas características no son fáciles de comprender. Este Centro Comercial produce distorsiones de corrientes armónicas de orden 3ro, 5to, 7mo, 11avo y THDi las cuales estas no se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma internacional IEEE Std 519-2014.

Para encontrar alternativas de mitigación al problema se utiliza el software de especialidad en Ingeniería Eléctrica DIgSILENT PowerFactory 15.1.7; Se modela el circuito del SED 598 en toda su dimensión, luego se realiza los cálculos para el filtro eficiente según su potencia reactiva (Q) de la carga del Centro Comercial "El Molino I". Una vez simulado el circuito, se procede a introducir al área de trabajo el símbolo del filtro y se coloca los valores calculados. Se realiza varias simulaciones con los diferentes tipos y configuraciones de filtros, llegando a determinar la mejor opción para la mitigación de las corrientes armónicas.

Los resultados de la simulación fueron favorables; de las tantas simulaciones se observa que la distorsión de las corrientes armónicas del orden 3ro, 5to, 7mo, 11avo y THDi se reduce a límites permisibles y la forma de onda de la corriente tiene una mejora considerable.

ABSTRACT.

The purpose of this research work is to determine the mitigation measure of harmonic currents with the efficient low voltage filter at SED 598 of the “El Molino I” Shopping Center - Cusco. The objective is to explain that harmonic currents are the main causes of these problems.

The “El Molino I” Shopping Center is dedicated to the sale of electrical and electronic equipment (non-linear loads); since these charges modify the nature of the original sine wave and convert it into deformed non-sinusoidal signals and whose characteristics are not easy to understand. This Shopping Center produces distortions of harmonic currents of order 3rd, 5th, 7th, 11th and THDi which are not within the limits established by the international standard IEEE Std 519-2014.

To find mitigation alternatives to the problem, the specialized software in Electrical Engineering DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 is used; The circuit of the SED 598 is modeled in all its dimension, then the calculations for the efficient filter are made according to its reactive power (Q) of the load of the “El Molino I” Shopping Center. Once the circuit is simulated, the filter symbol is introduced to the work area and the calculated values are placed. Several simulations are carried out with the different types and configurations of filters, determining the best option for the mitigation of harmonic currents.

The simulation results were favorable; from the many simulations it is observed that the distortion of the harmonic currents of the order 3rd, 5th, 7th, 11th and THDi is reduced to permissible limits and the current waveform has a considerable improvement.

ÍNDICE GENERAL.

CARÁTULA……..i

PRESENTACIÓN……ii

DEDICATORIAS……iii

AGRADECIMIENTOS……...iv

INTRODUCCIÓN……v

RESUMEN…….……vii

ABSTRAC…….viii

ÍNDICE GENERAL……ix

ÍNDICE DE FIGURAS……...xv

ÍNDICE DE TABLAS…….…xx

ÍNDICE DE ABREVIATURAS……...……xxii

ÍNDICE DE SIMBOLOGÍA……xxiii

ÍNDICE DE ANEXOS…….…….xxv

CONTENIDO DE LA TESIS

CAPÍTULO I

1 GENERALIDADES……...……..…1

1.1 Introducción……...…….……..2

1.2 Ámbito de estudio……...……..…….3

1.3 Planteamiento del problema…….……...…….....3

1.4 Formulación del problema……..…...……6

1.4.1 Problemas específicos…….…...……...7

1.5 Objetivos……...7

1.5.1 Objetivo general……...…….……7

1.5.2 Objetivos específicos…….……7

1.6 Hipótesis……..……..……8

1.6.1 Hipótesis general……...…….……...8

1.6.2 Hipótesis especificas...…….……...……..8

1.7 Justificación del problema……..……...……8

1.8 Variables e indicadores……...…..……9

1.9 Alcances y limitaciones……..……...……9

1.9.1 Alcances……...……9

1.9.2 Limitaciones……...…….……10

1.10 Metodología……10

1.10.1 Tipo de investigación……...…….……...10

1.10.2 Nivel de investigación……...…….…….…11

1.10.3 Diseño de la investigación…….……...……...11

1.10.4 Procesamiento y presentación de la información…….……...….11

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO…..……...……...……..13

2.1 Antecedentes del estudio…….…….....……14

2.2 Marco conceptual……...……15

2.2.1 Calidad de la energía eléctrica…...……15

2.2.2 Tipos de carga……...…..……...……..16

2.2.2.1 Carga lineal…….…….....……16

2.2.2.2 Carga no lineal…...……...…….……17

2.2.3 Diferencia entre Cosφ y factor de potencia……..……..17

2.2.4 Análisis del barrido de frecuencia…….…...……..……20

2.2.5 Amónicos……...……21

2.2.6 Distorsión armónica…...…….…...……24

2.2.6.1 Descomposición de una onda distorsionada en sus armónicos……....25

2.2.6.2 Índices de distorsión armónica…...……..…...……26

2.2.6.2.1 Distorsión armónica individual (HD)……..……..……26

2.2.6.2.2 Distorsión armónica total (THD)……...……26

2.2.7 Medidas de la distorsión armónica……..…...……28

2.2.7.1 Valor eficaz (rms), valor eficaz residual….……..……28

2.2.7.2 Factor de cresta (FC)……..……29

2.2.7.3 Incremento de corriente (ΔI) ……...……...……...….29

2.2.7.4 Perdidas por efecto Joule (ΔPérdidas)……....…….……...29

2.2.7.5 Cofactor de distorsión (Cd)…...…….……..30

2.2.8 Componentes simétricas y secuencia armónica…..……...30

2.2.9 Fuentes de distorsión armónica……..……32

2.2.9.1 Convertidores estáticos de potencia……..……32

2.2.9.2 Rectificadores monofásicos…...……34

2.2.9.3 Rectificadores polifásicos……..……34

2.2.9.4 Convertidores alterna-continua……...……...35

2.2.9.5 Hornos de arco……..……35

2.2.9.6 Foco ahorrador…...….……...36

2.2.9.7 Aparatos electrónicos en general……...…...……..37

2.2.9.8 Futuras fuentes armónicas……...……...38

2.2.10 Efectos de los armónicos…...……38

2.2.11 Efectos de la distorsión armónica……...……39

2.2.11.1 Resonancias…...……39

2.2.11.1.1 Resonancia en paralelo……...……41

2.2.11.1.2 Resonancia en serie……..……..42

2.2.12 Soluciones a los problemas causados por los armónicos……..……..42

2.2.12.1 Filtros……...…….……..43

2.2.12.1.1 Filtro pasivo...……...……..44

2.2.12.1.2 Filtro activo...……...……..51

2.2.12.1.3 Filtro híbrido……..……56

2.3 Aspecto normativo……...……..58

2.3.1 Normatividad nacional……...……58

2.3.1.1 Ley de concesiones eléctricas……..…..58

2.3.1.2 NTCSE……...……58

2.3.1.3 Base metodológica para la aplicación de la "norma técnica de calidad de los servicios eléctricos"……62

2.3.2 Normatividad internacional….…….…..……64

2.3.2.1 IEEE Std 519-2014……...……..64

2.3.2.1.1 Límites de distorsión de tensión…...……..……65

2.3.2.1.2 Límites de distorsión de corriente……..……65

2.4 Definición de términos……...66

CAPÍTULO III

3 SITUACIÓN ACTUAL DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS EN EL SED 598……..…70

3.1 Subestación Dolorespata……71

3.2 Datos técnicos del SED 598……72

3.2.1 Transformador de 250kVA……...……...72

3.3 Descripción del equipo de medición……73

3.3.1 Características del Analizador de redes……...73

3.3.2 Registro de la medición……...75

3.4 Carga existente en el SED 598……75

3.4.1 Análisis de resultados de la medición de las corrientes armónicas……...77

3.4.2 Análisis de resultados de la medición de las tensiones armónicas……81

3.5 Conclusiones de los resultados obtenidos durante la medición de las corrientes armónicas y tensiones armónicas en el SED 598……..……...85

CAPÍTULO IV

4 MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE DIGSILENT POWERFACTORY 15.1.7…….....87

4.1 Aspectos generales y entorno del software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7…88

4.1.1 Descripción de la interfaz……89

4.2 Modelamiento digital del SED 598 con el Software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7……..90

4.2.1 Modelamiento de las barras……91

4.2.2 Modelamiento del transformador de distribución……93

4.2.3 Modelamiento de la red equivalente……95

4.2.4 Modelamiento del flujo de carga con presencia de corrientes armónicas……96

4.2.5 Modelamiento del circuito completo……...98

4.3 Simulación del barrido de frecuencia……...99

4.4 Simulación y análisis de las corrientes armónicas en el SED 598……99

4.4.1 Resultados de las simulaciones……..104

4.5 Conclusiones de la simulación y análisis de corrientes armónicas en el SED 598……104

CAPÍTULO V

5 PROPUESTA DE MITIGACIÓN AL PROBLEMA……..……106

5.1 Cálculo de la corriente residual ($I_{rms}R$) del filtro pasivo……..…...107

5.2 Cálculo de los parámetros para un filtro pasivo……..……107

5.2.1 Determinación de la potencia reactiva……..……...107

5.2.2 Cálculo del Capacitor……..……108

5.2.3 Cálculo del inductor……...109

5.2.4 Cálculo de la resistencia……110

5.3 Modelamiento digital del filtro pasivo en el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7……111

5.4 Simulación y análisis de los filtros pasivos eficientes en el SED 598……111

5.4.1 Casos de estudio……..……111

5.4.1.1 Caso R-L-C en delta: barrido de frecuencia y flujo de armónicos…..…….112

5.4.1.2 Caso R-L-C en estrella: barrido de frecuencia y flujo de armónicos…..……..115

5.4.2 Resultados de las simulaciones……117

5.5 Filtro activo…….119

5.5.1 Cálculo de la corriente nominal……...120

CONCLUSIONES……123

RECOMENDACIONES……...124

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS……..125

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura N° 1.1 – Ubicación geográfica del Centro comercial "El Molino I" – Cusco.…….3

Figura N° 1.2 – Flujo de las intensidades armónicas en una instalación……4

Figura N° 2.1 – Relación corriente vs tensión de una carga lineal……17

Figura N° 2.2 – Relación corriente vs tensión de una carga no lineal……...17

Figura N° 2.3 – Triangulo de potencias……...18

Figura N° 2.4 – Esquema para representar el factor de potencia (FP) con la tercera componente.....19

Figura 2.5 – Impedancia vs frecuencia, grafica DIgSILENT Power Factory 13.2……...20

Figura N° 2.6 – Onda senoidal y sus armónicas……...21

Figura N° 2.7 – Esquema unifilar que muestra la impedancia del circuito de alimentación para el armónico de rango h……22

Figura N° 2.8 – (a) Circuito. (b) Onda distorsionada……...24

Figura N° 2.9 – (a) Onda distorsionada. (b) Fundamental y sus componentes armónicas……...….25

Figura N° 2.10 – Onda distorsionada y sus componentes armónicas……...25

Figura N° 2.11 – Corriente alterna aguas arriba de un rectificador en puente de Graetz que produce una corriente continua perfecta sobre una carga muy inductiva……...33

Figura N° 2.12 – Corriente alterna aguas arriba de un rectificador en puente de Graetz seguido de un condensador……..33

Figura N° 2.13 – (a) Esquema rectificador monofásico. (b) Forma de onda de corriente para un rectificador monofásico……..34

Figura N° 2.14 – a) Circuito rectificador con carga inductiva. b) Circuito rectificador con carga capacitiva……...……35

Figura N° 2.15 – Hornos de arco eléctrico……...36

Figura N° 2.16 – Espectro de corriente armónica de un foco ahorrador……..36

Figura N° 2.17 – Espectro de corriente armónica de una computadora……37

Figura N° 2.18 – Espectro de corriente armónica de un televisor…….37

Figura N° 2.19 – Espectro de corriente armónica de un cargador de batería de marca Nextel……..38

Figura N° 2.20 – Señal resonante a 60Hz…….……40

Figura N° 2.21 – Circuito que ejemplifican (a) resonancia paralela (b) resonancia serie…….40

Figura N° 2.22 – Circuito equivalente para el análisis del sistema a frecuencias armónicas……41

Figura N° 2.23 – Principio de funcionamiento de un filtro pasivo……...44

Figura N° 2.24 – Circuito monofásico con la implementación de un filtro pasivo de potencia paralelo…….45

Figura N° 2.25 – Circuito monofásico de un filtro pasivo sintonizado……46

Figura N° 2.26 – Característica de frecuencia del filtro sintonizado……46

Figura N° 2.27 – Circuito monofásico con la implementación de un filtro pasivo de potencia serie……...47

Figura N° 2.28 – Principio de funcionamiento de un filtro activo……52

Figura N° 2.29 – Principio de funcionamiento de la configuración de un filtro activo paralelo……52

Figura N° 2.30 – Principio de funcionamiento de la configuración de un filtro activo serie…….53

Figura N° 2.31 – Plano cartesiano para hallar la corriente de cortocircuito……55

Figura N° 2.32 – Plano cartesiano para hallar el factor de seguridad……..55

Figura N° 2.33 – Principio de funcionamiento de un filtro hibrido……56

Figura N° 3.1 – Diagrama unifilar de los nueve alimentadores de la S.E. Dolorespata…71

Figura N° 3.2 – Equipo de medición “A-Eberle” modelo PQ-Box 100 Expert……73

Figura N° 3.3 – Equipo analizador de redes “A-Eberle” y sus terminales para medir tensión y corriente……...75

Figura N° 3.4 – Niveles de demanda máxima y mínima en el lado de baja tensión del SED 598 de fecha 20/06/2019 al 27/06/2019……...76

Figura N° 3.5 – Espectro de las corrientes armónicas individuales y total según la IEEE Std 519-2014……...80

Figura N° 3.6 – Espectro de las tensiones armónicas individuales y total según la NTCSE……84

Figura N° 3.7 – Espectro de las tensiones armónicos individuales y total según la IEEE Std 519-2014……...……84

Figura N° 4.1 – Zona de trabajo del DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 y partes que la forman…….89

Figura N° 4.2 - Diagrama unifilar del SED 598 en baja tensión……90

Figura N° 4.3 – Modelamiento en DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 de una barra de 10.6kV…….91

Figura N° 4.4 – Ventana para introducir los parámetros eléctricos de la barra 10.6kV……..…92

Figura N° 4.5 – Modelamiento en DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 de una barra de 0.23kV…….92

Figura N° 4.6 – Ventana para introducir los parámetros eléctricos de la barra 0.23kV…….93

Figura N° 4.7 – Modelamiento en DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 del transformador de distribución……...……..94

Figura N° 4.8 – Ventanas para introducir los parámetros eléctricos del transformador de distribución…….94

Figura N° 4.9 – Modelamiento en DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 la red equivalente - SEIN……95

Figura N° 4.10 – Ventana para introducir los parámetros eléctricos de la red equivalente……..95

Figura N° 4.11 – Modelamiento en DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 de la carga correspondiente al Centro Comercial “El Molino I”……96

Figura N° 4.12 – Ventana para introducir los parámetros eléctricos de la carga desbalanceada…….97

Figura N° 4.13 – Modelamiento en DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 de la fuente externa…….97

Figura N° 4.14 – Ventanas para introducir las corrientes armónicas de la fuente externa…….…98

Figura N° 4.15 – Modelamiento en DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 el circuito completo del SED 598…….…98

Figura N° 4.16 – Impedancia vs frecuencia en la barra de 0.23kV (sistema sin filtro)……...……99

Figura N° 4.17 - Espectro armónico de las corrientes armónicas individuales del SED 598……101

Figura N° 4.18 – Forma de la onda distorsionada en el SED 598 por causa de las corrientes armónicas……..102

Figura N° 4.19 - Espectro armónico según NTCSE y forma de onda de la tensión armónica del SED 598……...102

Figura N° 4.20 - Espectro armónico según IEEE Std 519-1992 y forma de onda de la tensión armónica del SED 598……...103

Figura N° 4.21 - Espectro armónico según IEEE Std 519-2014 y forma de onda de la tensión armónica del SED 598……...103

Figura N° 5.1 – Modelamiento del filtro pasivo eficiente…….……111

Figura N° 5.2 – Impedancia vs frecuencia en la barra 0.23kV (sistema con filtro pasivo R-L-C en delta)……..112

Figura N° 5.3 – Mitigación de corrientes armónicas con la instalación de un filtro pasivo R-L-C en delta…….……..113

Figura N° 5.4 – Corrección de la onda distorsionada del SED 598 con la instalación de un filtro pasivo R-L-C en delta…….……114

Figura N° 5.5 – Instalación del filtro pasivo R-L-C en configuración delta para la carga del Centro Comercial “El Molino I”……..……114

Figura N° 5.6 – Impedancia vs frecuencia en la barra 0.23kV (sistema con filtro pasivo R-L-C en estrella)……..……..……...115

Figura N° 5.7 – Mitigación de corrientes armónicas con la instalación de un filtro pasivo R-L-C en estrella……..……..116

Figura N° 5.8 – Corrección de la onda distorsionada del SED 598 con la instalación de un filtro pasivo R-L-C en estrella……..……..116

Figura N° 5.9 – Instalación del filtro pasivo R-L-C en configuración estrella para la carga del Centro Comercial "El Molino I"……..……117

Figura N° 5.10 – Principio de funcionamiento del filtro activo……..119

Figura N° 5.11 – Intensidad nominal del filtro activo……121

Figura N° 5.12 – Resultado típico de un filtro activo PQFI……122

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla N° 1.1 – Consecuencias de las corrientes armónicas……5

Tabla N° 1.2 – Valores de distorsiones de las corrientes armónicas individuales en el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I" – Cusco……6

Tabla N° 1.3 – Variables e Indicadores……..9

Tabla N° 2.1 – Parámetros de la calidad de energía eléctrica según la NTCSE……16

Tabla N° 2.2 – Secuencias dominantes……31

Tabla N° 2.3 – Frecuencia de los armónicos en las redes eléctricas…….31

Tabla N° 2.4 – Secuencia de los armónicos en las redes eléctricas……...32

Tabla N° 2.5 – Tipos de filtro y su aplicación……..43

Tabla N° 2.6 – Tabla de resumen de las posibles estrategias frente a los armónicos……56

Tabla N° 2.7 – Resumen de las principales características de la gama AccuSine…….58

Tabla N° 2.8 – Tolerancias de los armónicos de tensión establecidos por la NTCSE…61

Tabla N° 2.9 – Límites de distorsión de tensión……...65

Tabla N° 2.10 – Limites de máxima distorsión de corriente……66

Tabla N° 3.1 – Los nueve alimentadores de la S.E. Dolorespata que abastece a los diferentes lugares de la zona norte de la ciudad del Cusco……...72

Tabla N° 3.2 – Características técnicas y de operación del transformador……..72

Tabla N° 3.3 – Datos generales del analizador de redes PQ-Box 100 Expert……73

Tabla N° 3.4 – Datos complementarios del analizador de redes PQ-Box 100 Expert….74

Tabla N° 3.5 – Valores de máxima demanda ocurridas entre el 20/06/2019 y el 26/06/2019……..76

Tabla N° 3.6 – Resultados de las distorsiones armónicos individuales de corriente (2° - 20°) en el SED 598……..78

Tabla N° 3.7 – Resultados de las distorsiones armónicos individuales y total de corriente (21° - 40°) en el SED 598……...……..79

Tabla N° 3.8 – Resultados de las distorsiones armónicas individuales de corriente que prevalecen en el SED 598……..……..80

Tabla N° 3.9 – Resultados de las distorsiones armónicas individuales de tensión (2° - 20°) en el SED 598……..…82

Tabla N° 3.10 – Resultados de las distorsiones armónicas individuales y total de tensión (21° - 40°) en el SED 598…..……..83

Tabla N° 4.1 – Datos de cortocircuito trifásico en la barra de 0.23kV……..100

Tabla N° 4.2 – Límites que se aplicarán para la distorsión armónica individual y total de corriente en nuestro caso……...100

Tabla N° 5.1 – Potencias registradas en el Centro Comercial "El Molino I"……108

Tabla N° 5.2 – Valores de los parámetros eléctricos del filtro pasivo para la 5ta armónica……110

Tabla N° 5.3 – Casos de estudio para el análisis de las corrientes armónicas……111

Tabla N° 5.4 – Resumen de mitigación de los casos de estudio de las corrientes armónicas……..118

ABREVIATURAS.

AC	: Corriente alterna
ABB	: Asea Brown Boveri
$Cos\varphi$	: Coseno de fi (entre la potencia activa y potencia aparente)
DC	: Corriente directa o corriente continua
DIgSILENT	: Digital simulation and electrical network calculation program – programa de cálculo de simulación digital en la red eléctrica
EGEMSA	: Empresa de Generación Eléctrica Machupicchu S.A.
HD_i	: Distorsión armónica individual de corriente
HD_v	: Distorsión armónica individual de tensión
IEC	: *International Electrotechnical Commission* – comisión electrotécnica internacional
IEEE	: *Institute of Electrical and Electronic Engineers* – instituto de ingenieros electricistas y electrónicos)
I_L	: Corriente de máxima demanda de la carga
I_{sc}	: Corriente de cortocircuito del sistema
NTCSE	: Norma Técnica de Calidad de Servicios Eléctricos
OSINERGMIN	: Organismo supervisor de la inversión en energía y minería
PCC	: Punto de Conexión Común
SED	: Subestación de Distribución
SEIN	: Sistema Eléctrico interconectado Nacional
SCADA	: *Supervisory Control And Data Acquisition* – Sistema de supervisión, control y adquisición de datos
SCR	: Relación de Cortocircuito
S.E.	: Subestación Eléctrica
THD_v	: *Total Harmonic Distortion Voltage* – Distorsión armónica total de tensión
THD_i	: *Total Harmonic Distortion Current* – Distorsión Armónica Total de Corriente
TDD	: Distorsión de Demanda Total

SIMBOLOGÍA.

A : Amperio, es la unidad de la intensidad de corriente

C : Capacitancia

f : Frecuencia

FP : Factor de Potencia

Hz : Hertz, unidad de la frecuencia en ciclos por segundo

I : Intensidad de corriente

kV : Kilovoltios

kVA : Kilovoltio-amperios

kVAR : Kilovoltio-amperios reactivos

kW : Kilowatt

L : Inductancia

P : Potencia activa o real

Q : Potencia reactiva

R : Resistencia

rms : (Root Mean Square) Raíz media cuadrática, Valor eficaz

S : Potencia aparente

V : Tensión o diferencia de potencial

ω : Frecuencia angular

X_C : Reactancia capacitiva

X_L : Reactancia inductiva

Z : Impedancia

CAPÍTULO I

1 GENERALIDADES

1.1 Introducción

Las redes de distribución eléctrica han crecido progresivamente prácticamente desde que se comenzaron a utilizarse. Han pasado de ser formados simplemente por conductores (cobre, aluminio) hasta llegar a tener varios dispositivos (semiconductores). Este incremento no solo trajo consigo el desarrollo relacionado a los sistemas de distribución eléctrica, sino que incluyó problemas como los armónicos, que no es nuevo, pero ha cobrado mayor importancia.

Los armónicos son las distorsiones o deformaciones de las formas de ondas de corriente y tensión en las redes de distribución eléctrica debido a la proliferación de cargas no lineales (electrónica de potencia) que ocasionan mareas de frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (60 Hz).

El Centro Comercial "El Molino I" se dedica a la venta de aparatos eléctricos y electrónicos (cargas no lineales), lo que hace, que esta carga se convierta en una fuente de corrientes armónicas. Las corrientes armónicas en las redes de distribución eléctrica crean problemas tales como: aumentos de corriente en el neutro, perdidas por efecto Joule, resonancias, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, controles, telecomunicaciones y otros.

Es de suma importancia dar solución a las corrientes armónicas, porque, sino los efectos serán catastróficos, e incluso hasta el sistema de distribución eléctrica pueda ser que se paralice. Los valores de estas corrientes armónicas no se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1].

Además, beneficiará a las empresas de Electro Sur Este S.A.A. Y EGEMSA, ya que estas corrientes armónicas tienden a ir en dirección de aguas arriba.

1.2 Ámbito de estudio

El presente trabajo de tesis, se realizó en el Centro Comercial "El Molino I", la misma que se encuentra localizada en la Mza. D Lote 1-A, del distrito de Santiago, provincia y departamento de Cusco a 3320 msnm.

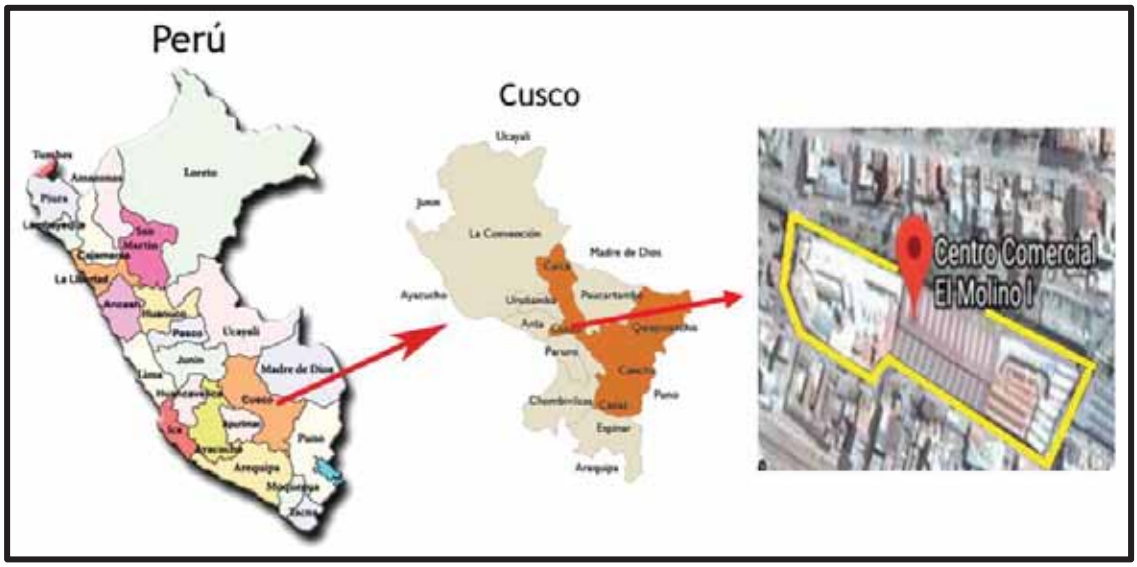


Figura N° 1.1 - Ubicación geográfica del Centro Comercial "El Molino I" - Cusco.

***Fuentes**: Google Maps y Elaboración propia.*

1.3 Planteamiento del problema

El presente trabajo de tesis desarrollado en el Centro Comercial "El Molino I", nace a raíz de qué, este Centro Comercial se dedica a la venta de aparatos eléctricos y electrónicos (televisores, cargadores AC/DC, celulares, equipos de sonido, radios, blu-ray, lámparas fluorescentes, luminarias tipo LED, focos electrónicos, balastos magnéticos-electrónicos y entre otros) que basan su funcionamiento en dispositivos tales como diodos, transistores, tiristores, diac y triac. Estos dispositivos son los causantes principales de las distorsiones eléctricas. Asimismo, estos aparatos son los que producen las corrientes armónicas; son las famosas cargas no lineales.

Respecto al tema de las distorsiones armónicos en focos ahorradores:

> Las cargas no lineales como los focos ahorradores cambian la naturaleza de la onda senoidal de la corriente de alimentación AC, esto produce un flujo de corrientes armónicas que son introducidas al sistema de distribución, lo que puede causar interferencia con circuitos de comunicación y con otros equipos principalmente electrónicos, esta interferencia también se puede producir en las residencias. (IEEE 519-1992, p. 1) [2]

El avance de la tecnología electrónica cada día va en incremento; las cargas no lineales tienen su aplicación en residencias, comercios e industrias; todas las redes de distribución eléctrica tienen una contaminación armónica generalizada. La mayor parte de los aparatos electrónicos tienen un comportamiento no lineal, el cual causa distorsión en las corrientes como también en las tensiones.

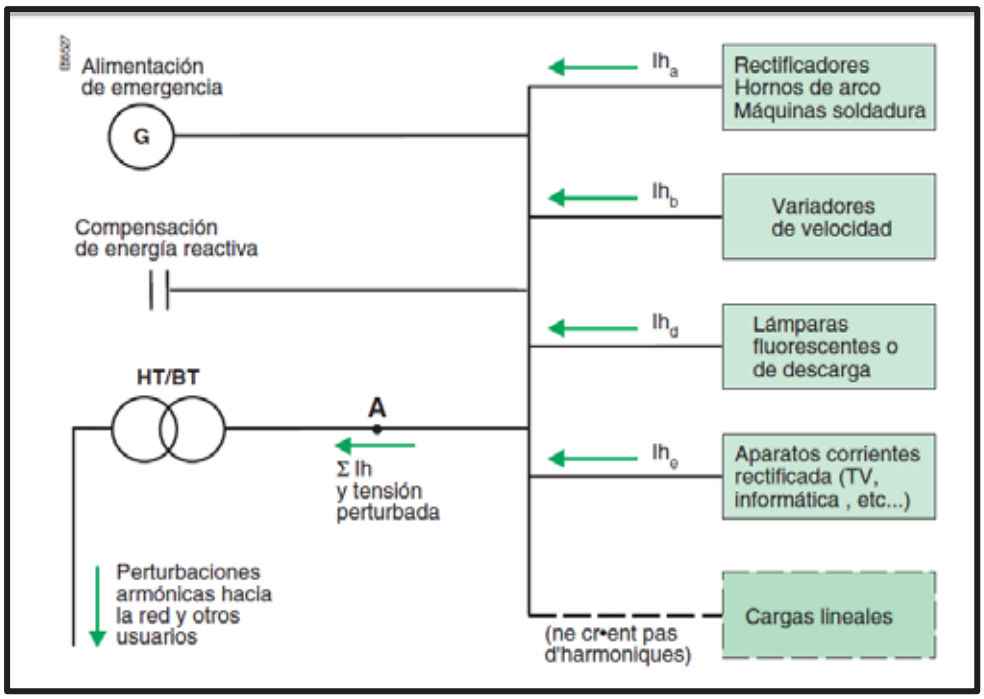


Figura N° 1.2 – Flujo de las intensidades armónicas en una instalación.

Fuente: *Fig. 5 (Schneider Electric, s.f., p. 5/8)* [3]

El Centro Comercial "El Molino I", es una carga que consume del SED 598 una potencia instalada de 200kW, convirtiéndose como una fuente de generación de

corrientes armónicas. Por ende, este Centro Comercial inyecta corrientes armónicas a la red de distribución eléctrica en dirección de aguas arriba, es posible representar la circulación de las corrientes armónicas en una instalación, ver la figura N° 1.2.

Tabla N° 1.1 – Consecuencias de las corrientes armónicas.

Elemento	Problema	Efecto
Conductor	• Aumento de la corriente. • Aumento de perdidas térmicas (efecto Joule).	• Calentamiento de cables. • Disparo de protecciones.
Conductor Neutro	• Circulación de armónicos múltiplos de 3 (armónicos triplens). • Retorno por el conductor neutro.	• Sobreintensidad sobre el neutro. • Calentamiento del neutro. • Degradación prematura. • Disparo de protecciones.
Condensador	• Resonancia paralela con el sistema. • Amplificación de los armónicos.	• Calentamiento de condensadores. • Envejecimiento prematuro de condensadores. • Destrucción de condensadores.
Maquinas Eléctricas	• Circulación de corrientes armónicas por los devanados y tensiones armónicas en los bornes.	• Sobrecalentamiento y perdida de aislamiento térmico (efecto Joule). • Aumento de perdidas magnéticas (por histéresis y Foucault). • Desclasificación (Transformador). • Vibraciones en el eje, desgaste mecánico en rodamientos y excentricidades (motores).
Equipos de medida y control	• Medidas no válidas. • Errores en procesos de control.	• Valores de magnitudes incorrectas. • Interferencias con sistemas de comunicación y control. • Error en los instantes de disparo de tiristores.

Fuente: *Elaboración propia.*

Las corrientes armónicas que produce el Centro Comercial "El Molino I" son HD_i de orden 3er, 5to, 7mo y 11avo, cuyos valores logran alcanzar 7.055%, 12.641%, 7.121% y

3.542% de la corriente fundamental y THD_i con valor de 16.816% que corresponde a la línea "R", mientras en las demás líneas sucede el mismo problema; la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1] recomienda que este valor no debe exceder (HD_i 7%-3.5% y THD_i 8%) en el SED 598 de baja tensión. En la siguiente tabla N° 1.2 se muestran los valores de las líneas:

Tabla N° 1.2 – Valores de distorsiones de las corrientes armónicas individuales en el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I" – Cusco.

Orden armónico	Registro máx. Línea "R" (%)	Registro máx. Línea "S" (%)	Registro máx. Línea "T" (%)	Límite IEEE Std 519-2014 (%)
2°	0.526	0.627	0.551	1.750
3°	**7.055**	**7.041**	**7.017**	**7.000**
4°	0.234	0.277	0.309	1.750
5°	**12.641**	**12.925**	**12.791**	**7.000**
6°	0.131	0.162	0.127	1.750
7°	**7.121**	**7.235**	**7.333**	**7.000**
8°	0.073	0.076	0.074	1.750
9°	2.807	2.923	2.721	7.000
10°	0.038	0.045	0.041	0.875
11°	**3.542**	**3.549**	**3.521**	**3.500**
12°	0.011	0.011	0.013	0.875

Fuente: *Elaboración propia.*

En ese entender, se tiene la obligación de realizar el diagnóstico de las corrientes armónicas en el Centro Comercial "El Molino I", con el propósito de evaluar mediante simulaciones, y a partir de esos resultados, establecer una adecuada alternativa de solución que permita mitigar esas corrientes.

1.4 Formulación del problema

A lo expuesto en el planteamiento del problema se establece la siguiente interrogante:

¿En qué medida el filtro eficiente mitigará las corrientes armónicas en baja tensión en el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I" - Cusco?

1.4.1 Problemas específicos

a) ¿De qué orden de distorsión serán las corrientes armónicas que prevalecen en el lado de baja tensión del SED 598?

b) ¿Será posible ser analizado y seleccionado el filtro eficiente en el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7?

c) ¿De qué manera influenciará el filtro eficiente sobre las corrientes armónicas que prevalecen en el lado de baja tensión del SED 598?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Determinar la medida de mitigación de las corrientes armónicas con el filtro eficiente en baja tensión en el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I" – Cusco.

1.5.2 Objetivos específicos

a) Diagnosticar el orden de distorsión de las corrientes armónicas que prevalecen en el lado de baja tensión del SED 598.

b) Analizar y seleccionar el filtro eficiente utilizando el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7.

c) Simular en el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 la influencia del filtro eficiente sobre las corrientes armónicas que prevalecen en el lado de baja tensión del SED 598.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

Determinando adecuadamente el filtro eficiente se logrará mitigar las corrientes armónicas en baja tensión en el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I" – Cusco.

1.6.2 Hipótesis específicas

a) Conociendo el orden de distorsión de las corrientes armónicas que prevalecen en el lado de baja tensión del SED 598, se podrá diagnosticar y plantear alternativas de mitigación.
b) Analizando en el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7, se podrá seleccionar un filtro eficiente para mitigar las corrientes armónicas.
c) Simulando en el DIgSILENT PowerFactory 15.1.7, se podrá determinar las influencias del filtro eficiente en el lado de baja tensión del SED 598.

1.7 Justificación del problema

La presencia excesiva, permanente y crecimiento masivo de las corrientes armónicas distorsionan las señales eléctricas, y dichas distorsiones van en dirección de aguas arriba. Estas distorsiones tienen que ser minimizadas o atenuadas mediante la instalación de un filtro eficiente. En ese entender, el presente trabajo de tesis desarrolla la evaluación de las corrientes armónicas; primero con el diagnóstico y análisis de las corrientes armónicas; segundo en realizar simulaciones y formular alternativas de solución que permitan mitigar las corrientes armónicas.

Este trabajo de tesis es de suma importancia porque si no damos una solución lo antes posible, afectará severamente a la red de distribución eléctrica (tiempo de vida útil y

otros), además, ocasionaría que el sistema se paralice por el exceso de corrientes armónicas.

Beneficiará a las empresas de Electro Sur Este S.A.A. (propietario de las redes de baja y media tensión) y EGEMSA (propietario del sistema de generación y líneas de transmisión) de qué los armónicos no se prolonguen hasta la planta de generación eléctrica; optimizando así su tiempo de vida útil e invirtiendo menos en gastos de mantenimiento y operación.

Al concluir esta investigación será de interés para los nuevos tesistas y servirá como base para los problemas de las corrientes armónicas (calidad de producto).

1.8 Variables e indicadores

Tabla N° 1.3 – Variables e Indicadores.

	Variables	Indicadores
Variable independiente	Filtro eficiente	R (Ω), L (mH), C (μF)
Variable dependiente	Corrientes armónicas	HDi (3, 5, 7, 11 - %), THDi (%)
Variable interviniente	SED 598	P (kW), Q (kVar), S (kVA)

Nota: R, L, C: *Valores de resistencia, inductancia y capacitancia de un filtro eficiente.* ***HDi:*** *Distorsión armónica individual de corriente del orden 3, 5, 7 y 11 medidos en porcentaje (%).* ***THDi:*** *Distorsión armónica total de corriente medido en porcentaje (%).* ***P, Q, S:*** *Las potencias del SED 598 como activa, reactiva y aparente.*

Fuente: *Elaboración propia.*

1.9 Alcances y limitaciones

1.9.1 Alcances

- El presente estudio demostrará que las corrientes armónicas son perjudiciales, y a su vez, se simulará en el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7, y gracias a ésta se propondrá alternativas de mitigación.

- La investigación abarca únicamente al SED 598 en baja tensión. Esto con el objetivo de determinar, evaluar y diagnosticar el orden de las corrientes armónicas.
- Con la simulación y obtención de los resultados, se busca establecer una adecuada alternativa de mitigación a las corrientes armónicas.

1.9.2 Limitaciones

- Los reportes de los datos de las corrientes armónicas son proporcionados por la Oficina de Control de Calidad de la empresa Electro Sur Este S.A.A.
- La presente investigación solo comprende las corrientes armónicas en baja tensión del SED 598, mas no armónicos de voltaje.
- Para la determinación de las propuestas de mitigación se hará uso del software especializado DIgSILENT PowerFactory 15.1.7.
- Para la determinación de los límites de distorsión se tomarán las consideraciones establecidas por la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1].
- Las alternativas de mitigación, serán mencionadas en las recomendaciones, mas, no se desarrollará el diseño de los mismos.
- Este trabajo de tesis es netamente académico, ya que se emplea el Software especializado DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 para la simulación y posteriormente con los resultados obtenidos se plantean alternativas de mitigación.

1.10 Metodología

1.10.1 Tipo de investigación

Esta investigación desde el punto de vista de la aplicación es ***computacional***, ya que se utiliza el software especializado DIgSILENT PowerFactory 15.1.7, el cual permite realizar simulaciones de distinta índole; el circuito se modela con todos sus parámetros

eléctricos. Así mismo, esta investigación utiliza como enfoque el ***cuantitativo,*** puesto que se mide la variable dependiente y se simula la variable independiente.

1.10.2 Nivel de investigación

En cuanto al nivel, esta investigación es ***descriptivo – explicativo,*** ya que se describe los conceptos o fenómenos que ocurren en el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I" sobre las corrientes armónicas; luego se establece las causas - efectos de los eventos, para que de esa forma se proponga alternativas más favorables de solución que nos permitan mitigar las corrientes armónicas.

1.10.3 Diseño de la investigación

De acuerdo al diseño, se considera ***experimental en simulación***, es decir que la investigación manipula la variable independiente. Es ***transversal***, porque se recoge la muestra en un solo momento (tiempo único).

Los reportes de estos datos de estudio son proporcionados por la Oficina de Control de Calidad de la empresa Electro Sur Este S.A.A., entre ellos: armónicos de corriente y tensión, máxima y mínima demanda de potencia activa, reactiva y aparente, registros de calidad de energía, planos de ubicación del SED 598, datos del analizador de redes y entre otros.

1.10.4 Procesamiento y presentación de la información

El modelamiento del circuito para el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I" se detalla con todos sus parámetros eléctricos, cabe precisar que para el análisis de las distorsiones armónicas se introducirá una corriente distorsionada al modelo, la cual contendrá los datos de las corrientes armónicas que fueron obtenidas en las mediciones.

Según Ligas (2016) [4] menciona que "se utilizarán técnicas tales como: normativa especializada, consultas bibliográficas, datos de equipos, datos experimentales, métodos

empíricos, investigación documental de eventos y normatividad aplicable a nuestro país" (p. 11), en ese entender nos explica la necesidad de aplicar diferentes tipos de técnicas para la recopilación de datos.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO

2.1 Antecedentes del estudio

Para la elaboración del presente trabajo de tesis se tomó en consideración como antecedentes los siguientes trabajos de investigación.

- Tesis de grado – Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco – "Filtro pasivo y armónicos de corriente en las instalaciones eléctricas del Hospital Regional, Clínica San Juan de Dios y UNSAAC" – Elaborado por: Mario Corimanya Leon y Fredy Omar Arphi Huamani – 2018. Esta tesis, aporta de forma muy importante que el filtro pasivo sintonizado es quien reduce el quinto armónico de corriente en estas cargas como: Hospital Regional, Clínica San juan de Dios y el pabellón de Ingeniería Eléctrica de la UNSAAC. Al realizar las simulaciones demostraron la minimización del quinto armónico, donde los valores ahora sí, se encuentran dentro de los límites que exige la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1].
- Tesis de grado – Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco – "Evaluación de armónicos en los bancos de capacitores de la subestación eléctrica de Dolorespata" – Elaborado por: Williams Ezequiel Ligas Nina – 2017. En este trabajo de tesis, se desarrolló el diagnostico de armónicos en la subestación eléctrica de Dolorespata 10.6kV, el cual, se efectuó numerosas simulaciones de barrido de frecuencia y flujo de potencia armónica a través del software DIgSILENT Power Factory, donde se pudo analizar y evaluar la incidencia negativa que tienen los armónicos sobre los bancos de capacitores instalados. Las soluciones planteadas son reemplazar las bobinas de choque por reactores desintonizados, para así, reducir significativamente la magnitud de los armónicos y sobre todo ayudando a proteger a los bancos de capacitores frente a la distorsión armónica.

- Tesis de grado – Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco – "Estudio de la generación de armónicos en el sistema eléctrico de la ciudad universitaria de Perayoc - UNSAAC" – Elaborado por: José Carlos Callañaupa Mansilla – 2013. En este trabajo de tesis, el objetivo fue analizar la generación de armónicos en el sistema eléctrico de la ciudad universitaria de Perayoc, para plantear alternativas de solución a los efectos de los armónicos. Como conclusión de su investigación fue la eliminación de la armónica de corriente, indicando que este problema existe más en el sistema eléctrico. Asimismo, el SED 0010019 presenta valores superiores al 20%, los cuales no se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma internacional IEEE Std 519-1992 [2].
- Tesis de grado – Universidad Nacional Autónoma de México – "Solución a los problemas de corrientes y voltajes armónicos en los sistemas industriales" – Elaborado por: Enrique Olaf Morales García y Jorge Luis Rodríguez González – 2012 – México. Esta tesis, aporta de forma muy importante al estudio de armónicos en sistemas de potencia, en ella da conocer el método de cómo proceder a realizar un estudio de armónicos a nivel de sistemas de potencia; asimismo formula soluciones a los problemas de los armónicos en las corrientes y voltajes de los sistemas industriales expuestos como estudios de caso.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Calidad de la energía eléctrica

Al respecto de la calidad de energía Altamirano & Soto (2017) [5] menciona que:

> La energía eléctrica es un producto que se genera, transporta y finalmente se distribuye, así la empresa generadora-distribuidora de energía eléctrica entrega una onda de tensión constante y el consumidor impone una onda de corriente. La energía eléctrica desde su generación tiene cuatro parámetros que caracterizan la

onda de tensión sinusoidal las que permiten medir su grado de pureza: como son la frecuencia, amplitud, forma y simetría. (p. 12).

Dado que muchas de las causas de las distorsiones armónicas están más allá del control de las compañías eléctricas, a menudo éstas no pueden hacer mucho para protegerse contra ellas. Las compañías eléctricas se ven obligadas a aceptar cierto grado de distorsión en la calidad de producto que ofrecen, concentrándose principalmente que se encuentren dentro de los límites permisibles. (Ver tabla N° 2.1)

Tabla N° 2.1 – Parámetros de la calidad de energía eléctrica según la NTCSE.

Como producto	Como suministro	Como servicio comercial
Magnitud de voltaje constante	Frecuencia de interrupciones	Tarifas claras y sin errores
Desviación de frecuencia (problema de generación)	Duración de interrupciones	Minimizar e informar cortes de energía eléctrica
Deformación de onda (perturbaciones por armónicos y flicker)	Numero de interrupciones	Reposición oportuna de la energía

Fuente: *NTCSE.*

2.2.2 Tipos de cargas

2.2.2.1 2.2.2.1 Carga lineal

Esta carga es la que no genera distorsiones en la onda senoidal; cuando está es alimentada por una fuente de tensión senoidal. El circuito de esta carga son resistencias, inductancias y capacitancias puras. Como podemos apreciar en la figura N° 2.1.

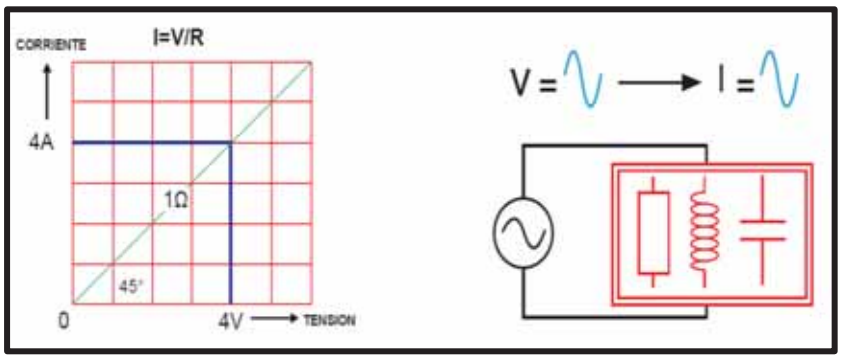


Figura N° 2.1 – Relación corriente vs tensión de una carga lineal.

Fuente: *Figura N° 2.17 (Ligas, 2016, p. 30)* [4]

2.2.2.2 2.2.2.2 Carga no lineal

Estas cargas son fuentes que originan distorsiones o perturbaciones armónicas sobre todo al sistema de distribución eléctrica. Este tipo de carga produce una corriente no senoidal cuando es alimentada por una fuente de tensión senoidal, además, dichas cargas están compuestas por dispositivos electrónicos de potencia, llamadas también cargas con impedancia no lineal, podemos apreciar en la figura N° 2.2.

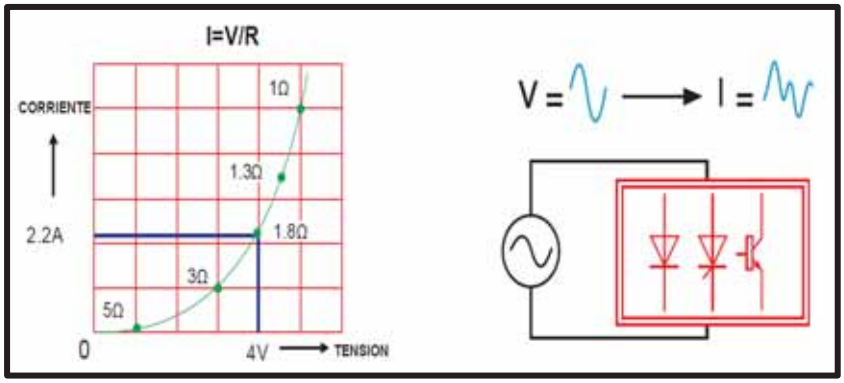


Figura N° 2.2 – Relación corriente vs tensión de una carga no lineal.

Fuente: *Figura N° 2.18 (Ligas, 2016, p. 31)* [4]

2.2.3 Diferencia entre Cosφ y factor de potencia

El $Cos\varphi$ (Coseno de fi) se define como el ángulo (temporal) de desplazamiento entre la onda de corriente y su onda de tensión de una carga. En un sistema eléctrico de AC

con señales senoidales perfectas se tiene el triangulo de potencias, es decir, la relación de P y S, como se muestra en la siguiente figura:

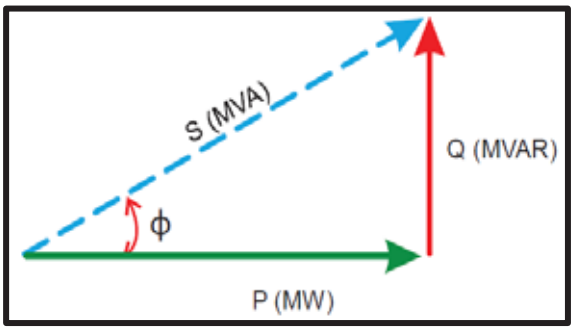


Figura N° 2.3 – Triangulo de potencias.

Fuente: *Figura N° 2.20 (Ligas, 2016, p. 34)* [4]

Como se podrá observar en el triángulo de la ilustración, el FP o $Cos\varphi$ representa el valor del ángulo que se forma al representar gráficamente la P y S, es decir, la relación existente entre la potencia real de trabajo y la potencia total consumida por la carga. Esta relación se puede representar también, de forma matemática, por medio de la siguiente fórmula:

$$Cos\varphi = FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \qquad \text{(Ecuación 2.1)}$$

Donde:

$Cos\varphi$: Ángulo entre P y S

P : Potencia activa

S : Potencia aparente

Tanto conceptualmente como matemáticamente se desprende que el $Cos\varphi$ posee el mismo valor que el FP, según se ha visto en el apartado anterior.

Cuando se trabaja con cargas no lineales (electrónica de potencia) aparece una componente de corrientes no senoidales (armónicas) que provocan que no exista una relación matemática lineal entre la corriente y la tensión.

Estos componentes armónicos inciden directamente en la S de la carga y por tanto deben tenerse en cuenta a la hora de calcularla. A nivel fasorial obtendríamos un gráfico de este estilo:

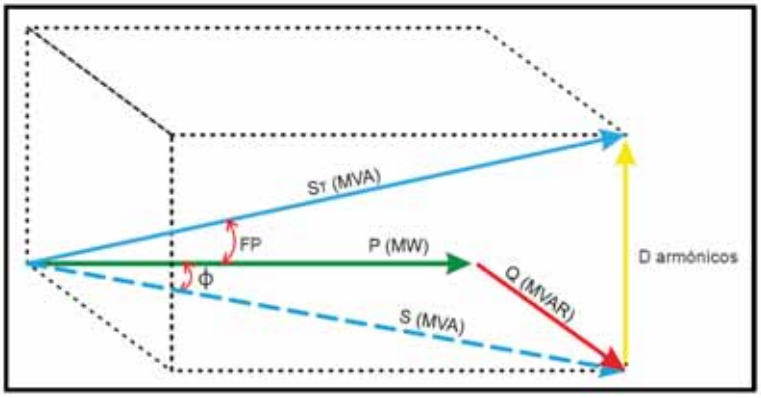


Figura N° 2.4 – Esquema para representar el factor de potencia (FP) con la tercera componente.

Fuente: *Figura N° 2.20 (Ligas, 2016, p. 35)* [4]

En la ilustración de la figura N° 2.4, se observa dos ángulos φ y FP. Al ángulo φ no se considera por no tener en cuenta a D. Definiendo el FP, como la relación entre P y S_T; se obtiene la siguiente expresión:

$$FP = \frac{P}{S_T} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}} \qquad \text{(Ecuación 2.2)}$$

$$FP = \frac{P}{\sqrt{1+THD_i^2}} \cdot Cos\varphi \qquad \text{(Ecuación 2.3)}$$

Se pudo evidenciar que el FP y $Cos\varphi$ son dos términos distintos cuando existe la presencia de armónicos:

- $Cos\varphi$: Sólo depende de P y Q.
- FP: Depende de P, Q y D.

2.2.4 Análisis del barrido de frecuencia

El punto de partida para el estudio de armónicos es utilizar el método de barrido de frecuencia o cálculo de la impedancia en función de la frecuencia, según Noroña (2011) [9] menciona que:

> La determinación del lugar geométrico de la impedancia consiste en calcular la impedancia Thévenin en una barra del sistema para diferentes niveles de frecuencia.
>
> El sistema es modelado para cada frecuencia armónica y el cálculo de la impedancia de Thévenin puede darse inyectando una fuente de uno por unidad con una frecuencia apropiada en la barra de interés. (p. 54)

Según Noroña (2011) [9] indica que "El lugar geométrico de la impedancia en función de la frecuencia es una herramienta muy efectiva para determinar resonancias, las cuales aparecen en la gráfica como picos (resonancias paralelas) o como valles (resonancias serie)". (p. 55)

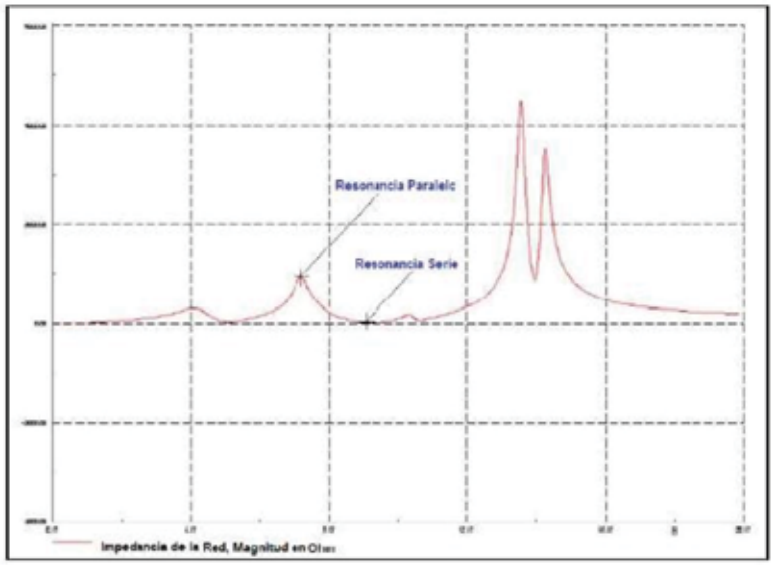


Figura 2.5 – Impedancia vs frecuencia, grafica DIgSILENT Power Factory 13.2.

Fuente: *Figura 3.5 (Noroña, 2011, p. 55)* [9]

2.2.5 Armónicos

Según ABB (s.f.) define "las armónicas son señales cuya frecuencia es un entero múltiplo de la frecuencia principal o fundamental." (p. 20)

La fundamental es 60Hz y los armónicos se formulan en términos de su orden, es decir, los armónicos son del orden segundo, tercero, cuarto y quinto, tienen frecuencias de 120, 180, 240 y 300Hz respectivamente. Ver la Figura N° 2.6.

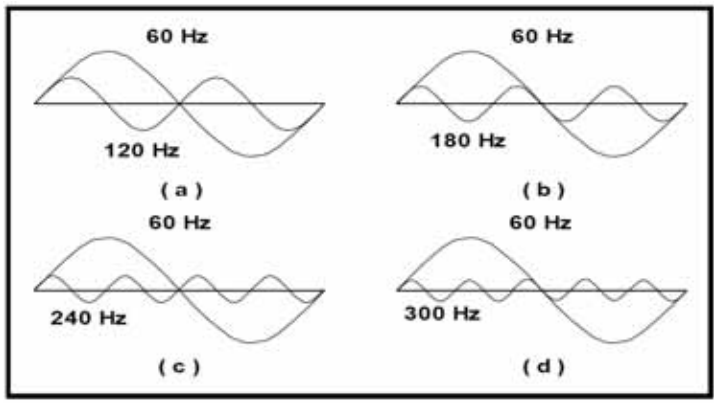


Figura N° 2.6 – Onda senoidal y sus armónicas.

Fuente: *Fig. 2.1 (Morales & Rodriguez, 2012, p. 27)* [6]

La frecuencia en nuestro país es de 60 Hz; para tener ondas armónicas se aplica la siguiente ecuación 2.1:

$$F_h = h \times 60[Hz] \qquad \text{(Ecuación 2.4)}$$

Donde:

F_h: Factor armónico.

h: es un número entero y representa el orden del armónico.

A medida que se incrementa el orden de la armónica, su magnitud y frecuencia disminuye; por ello, los armónicos de orden menor tienen mayor desenlace en el sistema eléctrico, como por ejemplo la 3ra, 5ta, 7ma y 11ava en nuestro caso de estudio.

Generalmente, la medición de las corrientes armónicas se realiza en el PCC, tanto para la empresa suministradora y el consumidor.

La onda senoidal distorsionada de la corriente en el lado de la carga origina una caída de tensión con la impedancia de la red de distribución eléctrica, de manera que también se distorsiona la onda senoidal de tensión. Por lo tanto, el problema de los armónicos debe controlarse en el punto donde se genera, de lo contrario se puede transmitir a otros usuarios conectados a la misma red. Ver la figura N° 2.7.

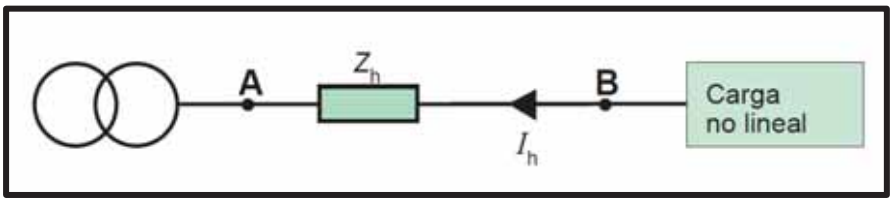


Figura N° 2.7 – Esquema unifilar que muestra la impedancia del circuito de alimentación para el armónico de rango h.

Fuente: *Figura 3 (Schneider Electric, s.f., p. 5/7)* [3]

La presencia de armónicos en el sistema eléctrico se puede detectar a través de los efectos que producen, por ejemplo:

- Disparo repentino de sistemas de protección.
- Calentamiento de los conductores.
- Vibraciones en los tableros de distribución de los SED.
- Transformadores y motores eléctricos que se sobrecalientan sin razón aparente.

Algunas definiciones de armónicos, por personas que trabajan en el área de ingeniería eléctrica:

Rodrigo Santibáñez, representante de ABB en Chile; dice: “las principales causas de distorsión armónica en sistemas de Baja Tensión, provienen generalmente de cargas no lineales y dispositivos electrónicos, los cuales absorben corrientes no senoidales

provocando la deformación de la onda senoidal de tensión, ocasionando la llamada perturbación armónica."

Carlos Aninat, Gerente General de CLAS; dice: "equipos electrónicos monofásicos, que internamente trabajan con corriente continua y que disponen de un rectificador a la entrada (computadores, impresoras, equipos electrónicos programables), instalaciones de iluminación con lámparas de descarga, hornos de arco, equipos de soldadura, transformadores, reactancias con núcleo de hierro, producen distorsión armónica."

Rubén Gutiérrez, Supervisor de NDU Ingeniería Ltda.; dice: "que las corrientes armónicas, pueden generar sobrecarga de los conductores neutros, sobrecalentamiento de los transformadores, disparos intempestivos de los interruptores automáticos, sobrecarga de los condensadores de corrección del factor de potencia y efecto superficial. Por su parte, las tensiones armónicas pueden producir distorsión de la tensión, fallos en motores de inducción y ruido de paso por cero."

Manuel Morales, representante de Siemens Chile; dice: "que uno de los efectos más graves de los armónicos puede ser el aumento de la corriente total, ya que las corrientes armónicas pueden provocar que los cables queden subdimensionados. Además, dependiendo del orden de los armónicos generados, se puede tener también dificultades o bajas de torque en los motores conectados a un punto común de conexión con presencia de armónicos. De igual modo, los armónicos pueden generar fallas en la operación de los sistemas, por ejemplo, al tener elevaciones de corriente, las protecciones operan, provocando detenciones en los procesos."

Alfonso Arancibia, Jefe de Ingeniería y Proyectos de Rexel; dice: "que la presencia de armónicos de corriente también puede provocar la circulación de corriente por el

neutro, principalmente de los armónicos impares múltiplos de 3, lo que aumentará el voltaje entre tierra-neutro y como consecuencia afectar equipamiento sensible, y la quema de bancos de condensadores, que pudiesen entrar en resonancia con alguna frecuencia de algún armónico."

2.2.6 Distorsión armónica

Según Toledo & Jiménez (2010) [7] manifiesta "Es la distorsión periódica de la forma de onda senoidal del voltaje o corriente. Esta es causada por la operación de equipos no lineales como lo son rectificadores y hornos de arco eléctrico. Este es un fenómeno en estado estable" (p. 19), esto quiere decir, que la distorsión armónica viene a ser la onda distorsionada.

Además, la distorsiona armónica como su nombre mismo indica son distorsiones de las ondas senoidales de tensión y corriente en los sistemas de distribución eléctrica. Cuando los armónicos se combinan con la frecuencia fundamental, ocurre la distorsión de la forma de onda. La distorsión armónica es causada por dispositivos no lineales conectados al sistema de distribución eléctrica, en los cuales la corriente no es proporcional al voltaje aplicado.

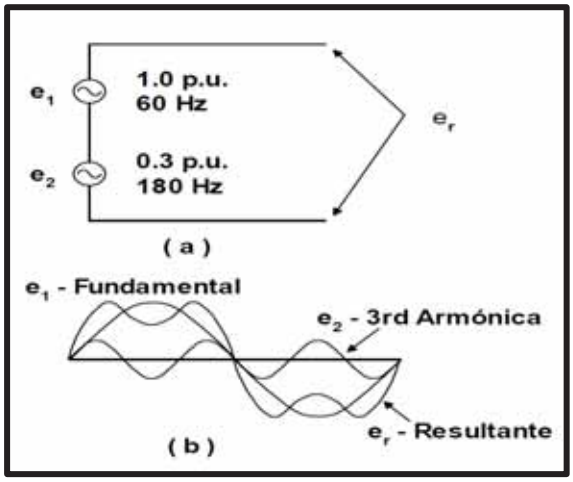


Figura N° 2.8 – (a) Circuito. (b) Onda distorsionada.

Fuente: *Fig. 2.3 (Morales & Rodriguez, 2012, p. 29)* [6]

2.2.6.1 Descomposición de una onda distorsionada en sus armónicos

Cuando la forma de onda es idéntica de un ciclo a otro (onda periódica), ésta puede ser representada como una suma de ondas senoidales puras en la cual la frecuencia de cada senoide es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la onda distorsionada. La descomposición una onda periódica en su fundamental y componentes armónicos se fundamenta en el análisis de Fourier, como se puede ver en la figura 2.9.

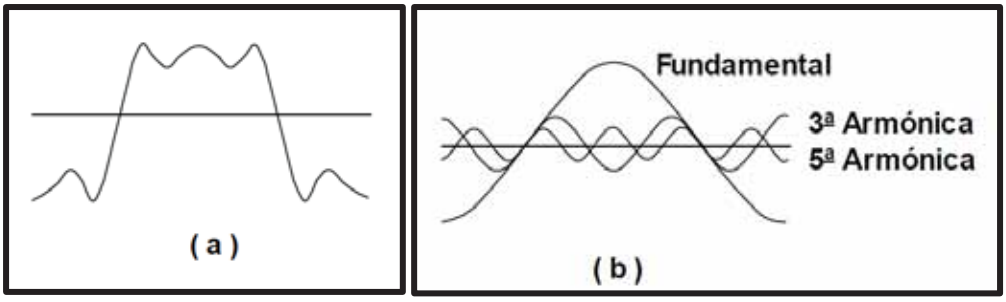


Figura N° 2.9 – (a) Onda distorsionada. (b) Fundamental y sus componentes armónicas.

Fuente: *Fig. 2.4 (Morales & Rodriguez, 2012, p. 29)* [6]

Esta propiedad es de gran utilidad en el análisis de sistemas eléctricos, ya que se puede analizar por separado cada componente senoidal de la onda distorsionada, usando métodos de solución de circuitos y después aplicar superposición.

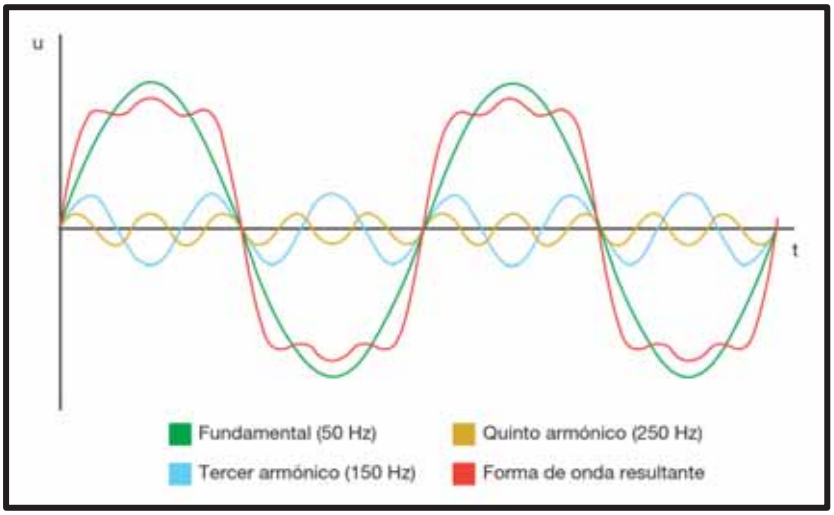


Figura N° 2.10 – Onda distorsionada y sus componentes armónicas.

Fuente: *Figura 8.1 (Cuaderno de aplicaciones técnicas N° 8, s.f. p. 20)* [10]

2.2.6.2 Índices de distorsión armónica

Los límites permitidos dependen del nivel de voltaje al cual esté conectado el usuario o cliente, todo dependerá del tamaño relativo de la carga respecto al sistema, y del orden de los armónicos. La distorsión armónica se mide con los siguientes índices:

1.1.1.1.1 Distorsión armónica individual (HD)

Es el parámetro de medición de distorsión más conocido, por lo que es recomendable para medir la distorsión en parámetros individuales de tensión y corriente. Es útil este parámetro para determinar a qué orden de distorsión corresponde.

Distorsión armónica individual de tensión (HD_v)

$$HD_v = \frac{V_h}{V_1} \times 100\% \qquad \text{(Ecuación 2.5)}$$

Donde:

h : Orden armónico (2 hasta $+\infty$)

V_h : Magnitud de la tensión armónica individual

V_1 : Magnitud de la tensión fundamental

Distorsión armónica individual de corriente (HD_i)

$$HD_i = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \qquad \text{(Ecuación 2.6)}$$

Donde:

I_h : Magnitud de la corriente armónica individual

I_1 : Magnitud de la corriente fundamental

2.2.6.2.1 Distorsión armónica total (THD):

Es la relación entre el contenido de distorsión armónica (tensión o corriente residual) de la señal y la primera armónica fundamental. Su valor varía entre 0% y 100%.

El THD es una medida de cuánto se distorsiona o cambia la forma de onda de la tensión o corriente; de su forma de onda sinusoidal convencional (60Hz).

Distorsión Armónica Total de Tensión (THD_v)

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \qquad \text{(Ecuación 2.7)}$$

Donde:

V_h : Magnitud de la tensión armónica individual

V_1 : Magnitud de la tensión fundamental

Distorsión Armónica Total de Corriente (THD_I)

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \qquad \text{(Ecuación 2.8)}$$

Donde:

I_h : Magnitud de la corriente fundamental individual

I_1 : Magnitud de la corriente fundamental

Distorsión de Demanda Total (TDD)

Es la relación entre la corriente armónica (corriente residual) y la demanda máxima de la corriente de carga.

Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas de distribución eléctrica, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye es también baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD; parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1].

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \qquad \text{(Ecuación 2.9)}$$

Donde:

I_h : Magnitud de la corriente armónica individual

I_L : Demanda máxima de la corriente fundamental de carga, que se calcula como el promedio máximo mensual de demanda de corriente de los 12 últimos meses o puede estimarse.

2.2.7 Medidas de la distorsión armónica

Para cuantificar la distorsión existente en una señal, es preciso definir parámetros que determinen su magnitud y contar con equipos de medición adecuados. A continuación, se presentan las expresiones necesarias para efectuar los cálculos relacionados con la distorsión armónica.

2.2.7.1 Valor eficaz (rms), valor eficaz residual

Cuando se suman señales de voltaje o corriente de diferentes frecuencias para obtener su resultante.

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \qquad \text{(Ecuación 2.10)}$$

$$V_{rms}R = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} \qquad \text{(Ecuación 2.11)}$$

Donde:

V_{rms} : Magnitud de la tensión eficaz

h : Orden armónico (1 hasta $+\infty$)

V_h : Magnitud de la tensión armónica individual

$V_{rms}R$: Magnitud de la tensión residual

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \qquad \text{(Ecuación 2.12)}$$

$$I_{rms}R = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \qquad \text{(Ecuación 2.13)}$$

Donde:

I_{rms} : Magnitud de la corriente eficaz

I_h : Magnitud de la corriente armónica individual

$I_{rms}R$: Magnitud de la corriente residual

$$I_{rms}R = \sqrt{(I_{rms})^2 - (I_1)^2} \qquad \text{(Ecuación 2.14)}$$

Donde:

I_1 : Magnitud de la corriente fundamental

2.2.7.2 Factor de cresta (FC)

$$FC = \frac{I_{pico}}{I_{rms}} \qquad \text{(Ecuación 2.15)}$$

2.2.7.3 Incremento de corriente (ΔI)

$$\Delta I = \frac{I_{rms} - I_1}{I_1} \qquad \text{(Ecuación 2.16)}$$

2.2.7.4 Pérdidas por efecto Joule (ΔPérdidas)

$$\Delta Perdidas = \left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1 \qquad \text{(Ecuación 2.17)}$$

2.2.7.5 Cofactor de distorsión (C_d)

Es la relación entre el contenido armónico de la señal y su valor eficaz (rms). Su valor se encuentra entre 0% y 100%. También, se conoce como THD y es el índice más ampliamente usado en Europa.

Con una distorsión baja, C_d cambia notoriamente, por eso se recomienda su uso cuando se desea conocer el contenido armónico de una señal.

$$C_d = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{rms}} \times 100\% \qquad \text{(Ecuación 2.18)}$$

2.2.8 Componentes simétricas y secuencia armónica

Los sistemas trifásicos normalmente son desarrollados utilizando el método de componentes simétricas para simplificar su análisis; dicho sistema es representado por tres fasores, se sustituye por la suma de tres sistemas de fasores simétricos:

- El sistema de secuencia positiva o secuencia directa es un sistema trifásico equilibrado simbolizado por tres fasores de igual módulo, con un ángulo de desfasamiento de 120° entre ellos y con una secuencia de fase ABC (0°, -120°, 120°).
- El sistema de secuencia negativa o secuencia inversa tiene las mismas características que el anterior, pero con una fase de rotación inversa ACB (0°, 120°, -120°).
- El sistema de secuencia cero o secuencia homopolar se representa por tres fasores de igual módulo y fase (0°, 0°, 0°).

En un sistema trifásico balanceado, la componente de secuencia armónica puede determinarse multiplicando el orden de la armónica por la secuencia de fase positiva. Por ejemplo, para la tercera armónica, $h = 3$ se tiene 3 x (0°, -120°, 120°), resultando una armónica de secuencia cero (0°, 0°, 0°), conocida también como armónica triple.

Existe un patrón que relaciona las armónicas con su respectiva secuencia, donde únicamente se presentan armónicas impares, ya que en un sistema eléctrico no se generan armónicas de números pares. La tabla N° 2.2 muestra la secuencia dominante correspondiente a cada armónica.

Tabla N° 2.2 – Secuencias dominantes.

Secuencia de fase	Positiva	Negativa	Cero
Orden de la armónica	1	5	3
	7	11	9
	13	17	15

Fuente: *Elaboración propia.*

La normatividad peruana menciona que los armónicos deben ser evaluados del orden 2° hasta el orden 40°, además, estos presentan ciertas características eléctricas como:

- Los armónicos se caracterizan por tener una frecuencia múltiplo de la fundamental.

Tabla N° 2.3 – Frecuencia de los armónicos en las redes eléctricas.

N° Armónico	1°	2°	3°	4°	5°	6°	…	40°
Frecuencia (Hz)	60	120	180	240	300	360	…	2400

Fuente: *Tabla 2.2 (Altamirano & Soto, 2017, p. 14)* [5]

En el artículo titulado “armónicos en sistemas eléctricos”, elaborado por José Dariel Arcila demuestra que los armónicos del orden “3n” son de secuencia cero mientras que los de orden “3n+1” son de secuencia positiva y que los armónicos del orden “3n-1” son de secuencia negativa, de este análisis mencionado se puede resumir en la siguiente tabla.

Tabla N° 2.4 – Secuencia de los armónicos en las redes eléctricas.

N° Armónico	1°	2°	3°	4°	5°	6°	…	40°
Secuencia	(+)	(-)	(0)	(+)	(-)	(0)		(+)

Fuente: *Tabla 2.3 (Altamirano & Soto, 2017, p. 14)* [5]

2.2.9 Fuentes de distorsión armónica

La importancia de las fuentes de generación de armónicos, Noroña Lucero, N. (2011) nos dice:

> Las cargas no lineales son las principales fuentes de emisión de distorsiones armónicas. En las cargas residenciales y comerciales se encuentran instaladas una gran variedad de cargas no lineales que generan corrientes armónicas que por lo general son pequeñas pero muy numerosas. Ejemplos: computadores, aparatos de TV con fuentes conmutadas, lámparas de descarga gaseosa, motores, etc. (p. 17)

En el área industrial existe una infinidad de dispositivos electrónicos que distorsionan la operación de las redes eléctricas.

2.2.9.1 Convertidores estáticos de potencia

Al respecto de los convertidores Reyes (1990) menciona que:

> La fuente principal de armónicas en las plantas industriales son los convertidores estáticos de potencia (…). Los convertidores estáticos de potencia se pueden agrupar en 3 grandes áreas de diferente comportamiento armónico: 1) grandes convertidores de potencia como los utilizados en la industria de reducción de metales y transmisión CD en alto voltaje; 2) Convertidores de tamaño mediano utilizados en la industria de manufactura para control de motores y también en

aplicaciones en ferrocarril; 3) convertidores de baja potencia para fuentes de energía monofásicas y trifásicas. (p. 13)

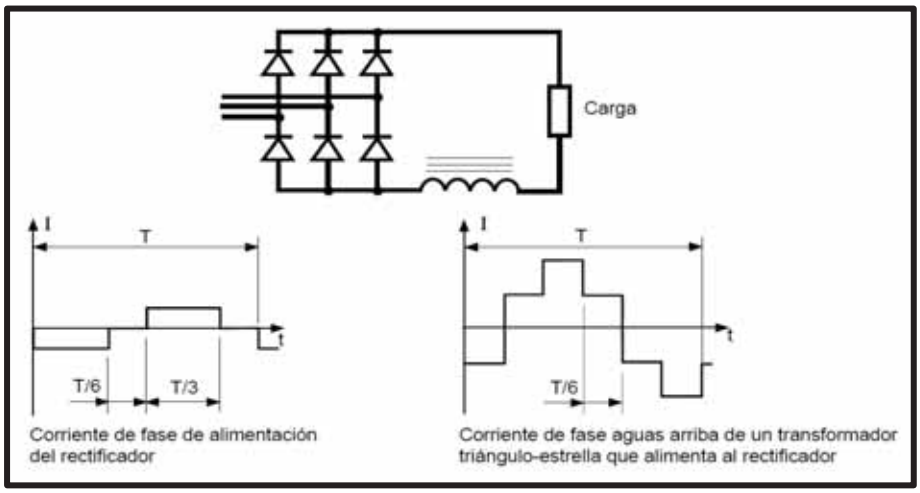


Figura N° 2.11 – Corriente alterna aguas arriba de un rectificador en puente de Graetz que produce una corriente continua perfecta sobre una carga muy inductiva.

Fuente: *Fig. 5 (Cuaderno técnico N° 152, s.f., p.11)* [12]

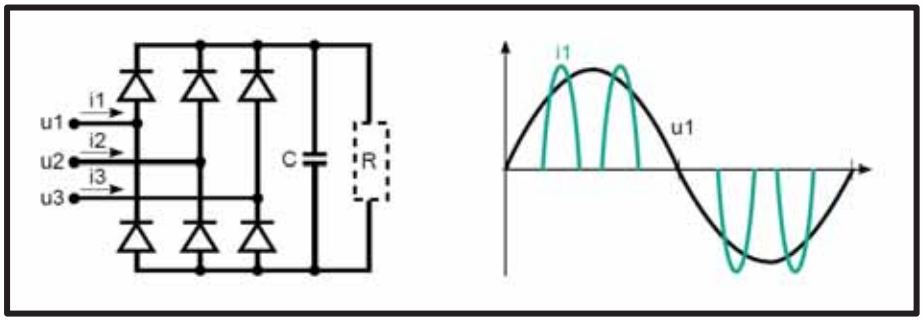


Figura N° 2.12 – Corriente alterna aguas arriba de un rectificador en puente de Graetz seguido de un condensador.

Fuente: *Fig. 6 (Cuaderno técnico N° 152, s.f., p.11)* [12]

A pesar de tener forma diferente, las dos corrientes tienen las mismas componentes armónicas características.

2.2.9.2 Rectificadores monofásicos

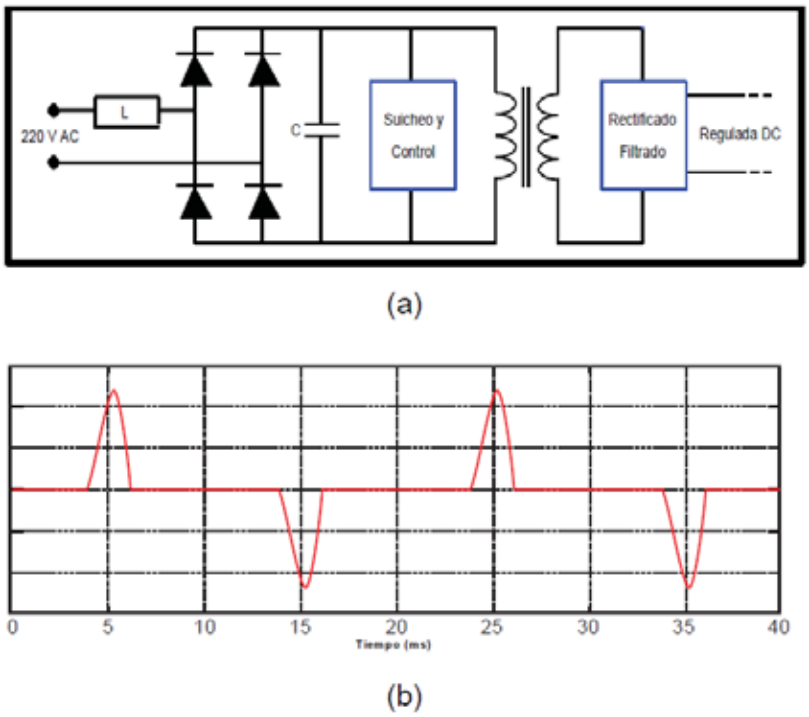


Figura N° 2.13 – (a) Esquema rectificador monofásico. (b) Forma de onda de corriente para un rectificador monofásico.

Fuente: *Figura N° 2.19 (Ligas, 2016, p. 32)* [4]

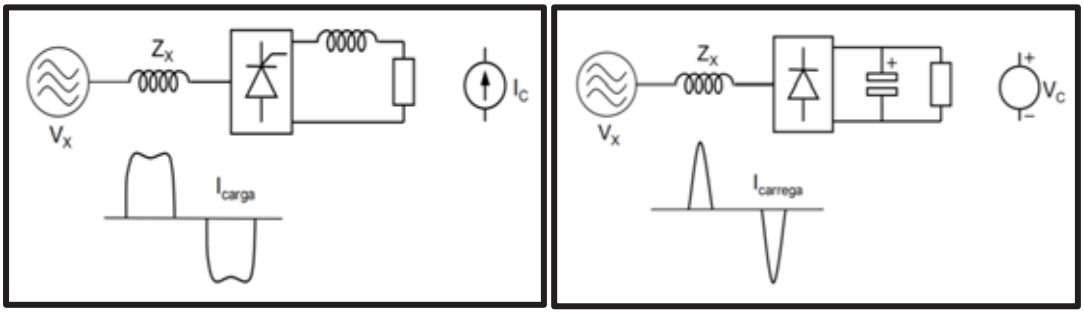
Sobre los rectificadores Noroña (2011) [9] menciona:

> La principal fuente de distorsión de onda en los consumos domésticos, principalmente se encuentran a la entrada de los equipos electrónicos domésticos, equipos tales como: fuentes de alimentación conmutada en las computadoras, las reactancias electrónicas para alumbrado con lámparas fluorescentes, las cocinas de inducción y los reguladores de velocidad son fuentes que producen formas de onda de corriente severamente distorsionadas. (p. 17)

2.2.9.3 Rectificadores polifásicos

Al respecto de los rectificadores Noroña (2011) [9] menciona que:

También son causantes de distorsiones armónicas dentro del área industrial, el principal elemento son los variadores de velocidad de los motores, (…) y la amplitud de los armónicos que inyectan en la red dependen de la impedancia del lado de alterna y del tipo de filtrado utilizado en el lado de continua (capacitivo, inductivo o ambos). (p. 18)



a) b)

Figura N° 2.14 – a) Circuito rectificador con carga inductiva. b) Circuito rectificador con carga capacitiva.

Fuente: *Fig. 2 y Fig. 3 (Lamich, s.f., p. 38)* [13]

2.2.9.4 Convertidores alterna-continua

Según Noroña (2011) [9] menciona que "basados en el recorte de la onda de voltaje mediante tiristores o triac se utilizan de forma extensiva en los compensadores estáticos de reactiva, en los arrancadores suaves de motores de inducción y en los reguladores de lámparas incandescentes". (p. 18)

2.2.9.5 Hornos de arco

Según Noroña (2011) [9] menciona que "tienen la característica de tener voltaje – corriente severamente no lineal y variable en el tiempo, en función del estado de fusión del material, del refinado y de la longitud del arco eléctrico dentro del horno". (p. 18)

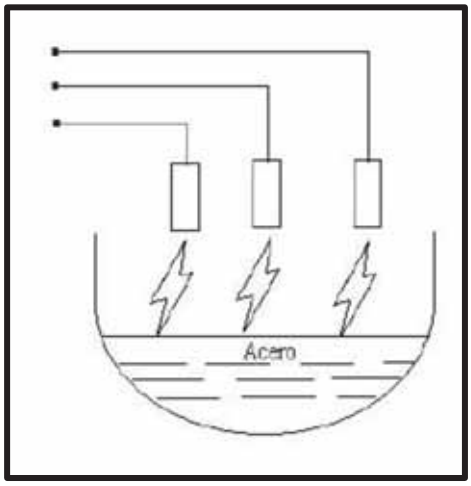


Figura N° 2.15 – Hornos de arco eléctrico.

Fuente: *Figura N° 2.10 (Noroña, 2011, p. 18)* [9]

2.2.9.6 Foco ahorrador

Según Reyes (1996) [11] menciona que:

> Las lámparas de descarga gaseosa (fluorescente, arco de mercurio y sodio de alta presión) son una fuente considerable de armónicas, debido a su característica de carga no lineal. (…). La componente de corriente armónica más característica aparte de la fundamental es la tercera armónica la cual, en circuitos trifásicos balanceados, es de secuencia cero y fluye por los cables del neutro y tierra". (p. 21)

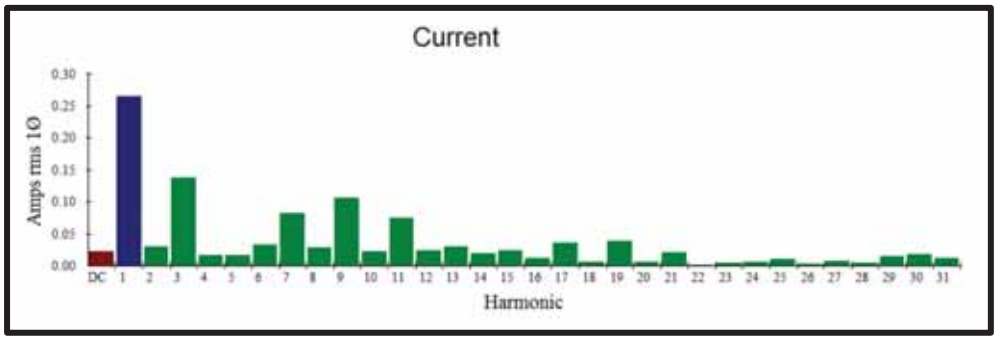


Figura N° 2.16 – Espectro de corriente armónica de un foco ahorrador.

Fuente: *Figura N° 5.13 (UDLAP, s.f., p. 85)* [21]

2.2.9.7 Aparatos electrónicos en general

La fuente de energía, constituida por un rectificador monofásico y un condensador; utilizada en electrodomésticos y PCs, son los causantes de corrientes armónicas; una gran parte de los aparatos electrónicos modernos utilizan inversores cuya fuente de energía es el rectificador en puente, además, esta configuración se emplea en los aparatos de televisión y en las laptops personales.

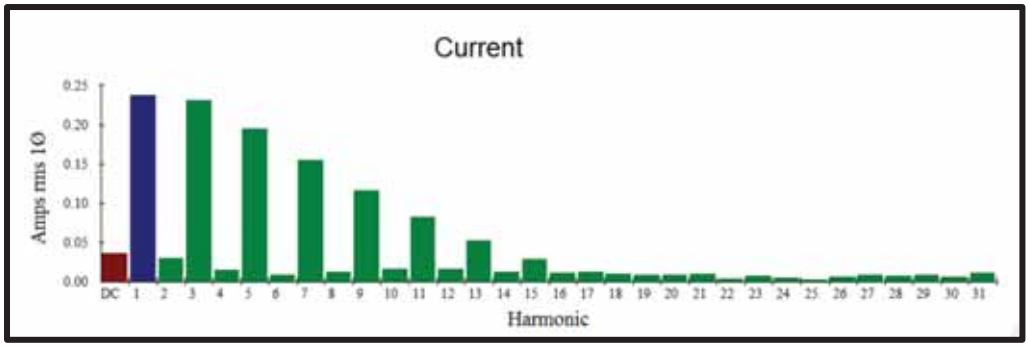


Figura N° 2.17 – Espectro de corriente armónica de una computadora.

Fuente: *Figura N° 5.9 (UDLAP, s.f., p. 79)* [21]

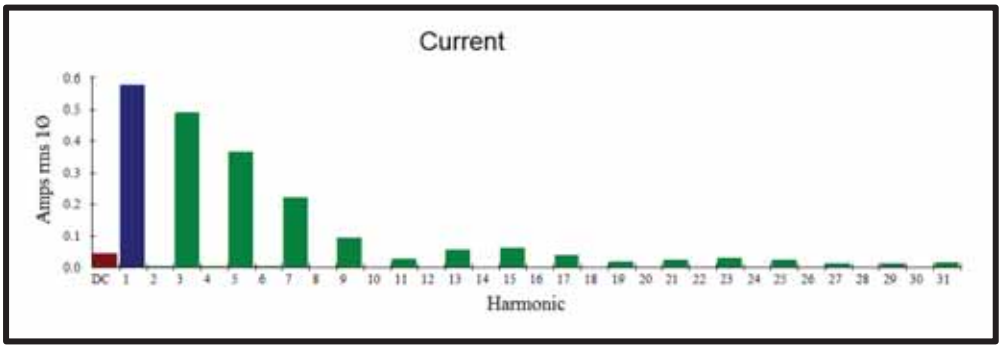


Figura N° 2.18 – Espectro de corriente armónica de un televisor.

Fuente: *Figura N° 5.25 (UDLAP, s.f., p. 103)* [21]

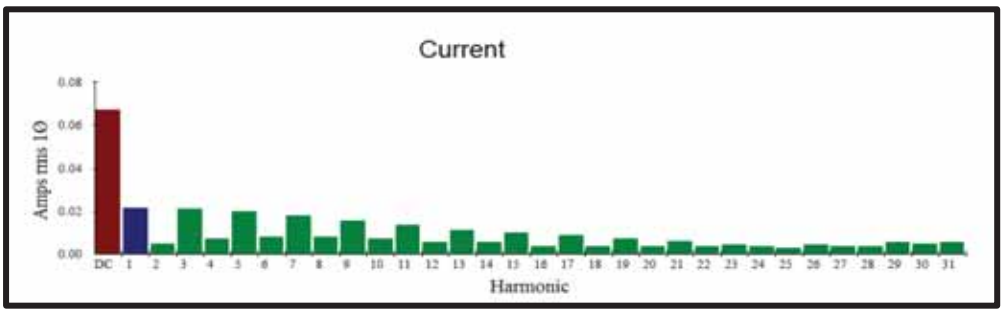


Figura N° 2.19 – Espectro de corriente armónica de un cargador de batería de marca Nextel.

Fuente: *Figura N° 5.7 (UDLAP, s.f., p. 76)* [21]

2.2.9.8 Futuras fuentes de armónicas

En el futuro, se prevé un aumento importante en el contenido de corrientes armónicas en las redes de distribución eléctrica, debido al uso en gran escala de aparatos y equipos electrónicos; además, se prevé el uso de autos eléctricos que requerirán recargar sus baterías en grandes bancos de rectificación.

2.2.10 Efectos de los armónicos

Los armónicos de tensión y corriente superpuestos a la onda fundamental tienen efectos combinados sobre los equipos y dispositivos conectados a las redes de distribución eléctricas.

Las corrientes armónicas son los causantes principales de las distorsiones; estas son producidas por la circulación de corrientes armónicas a través de las líneas, además, de eso provoca caídas de tensión deformadas que hacen que a los nodos del sistema no lleguen tensiones perfectamente senoidales.

Mientras mayores sean las corrientes armónicas circulantes a través de los alimentadores de un sistema eléctrico, más distorsionados serán las tensiones en los nodos del circuito. Las tensiones no senoidales son causantes de numerosos efectos que perjudican a los equipos que están conectados a la red de distribución eléctrica.

La distorsión armónica en la red de distribución eléctrica presenta los siguientes inconvenientes tales como:

- Disparo intempestivo de interruptores y otros equipos de protección.
- Aumento de las pérdidas y mal aprovechamiento de la instalación.
- Actuación indebida de fusibles.
- Exceso de corriente en capacitores y bancos de capacitores, con el consiguiente acortamiento de su vida útil.
- Sobrecalentamiento de motores, trasformadores y componentes del circuito en general.
- Mal funcionamiento de computadoras y otros equipos electrónicos de control y cargas sensibles.
- Interferencia con circuitos de iluminación y telefónicos.
- Resonancia con otros componentes del sistema.
- Oscilación mecánica en máquinas.
- Errores en equipos de medición, especialmente los de estado sólido.
- Operación inestable en el disparo de circuitos que trabajan por cruce por cero de tensión.
- Fallas en el aislamiento.

2.2.11 Efectos de la distorsión armónica

2.2.11.1 Resonancias

El primer problema que producen los armónicos son las resonancias. Según Abundis (2016) [8] indica que:

La resonancia es un fenómeno que se presenta cuando un sistema, en este caso eléctrico, trabaja a una frecuencia que coincide con la frecuencia natural del propio sistema, dada por la combinación de los componentes que lo forma; se debe, en gran medida a los capacitores de los CEV's y causa en este caso de estudio, picos de corriente que paulatinamente dañan los componentes y en especial los mismos capacitores. (p. 24)

La siguiente figura, muestra la señal de resonancia:

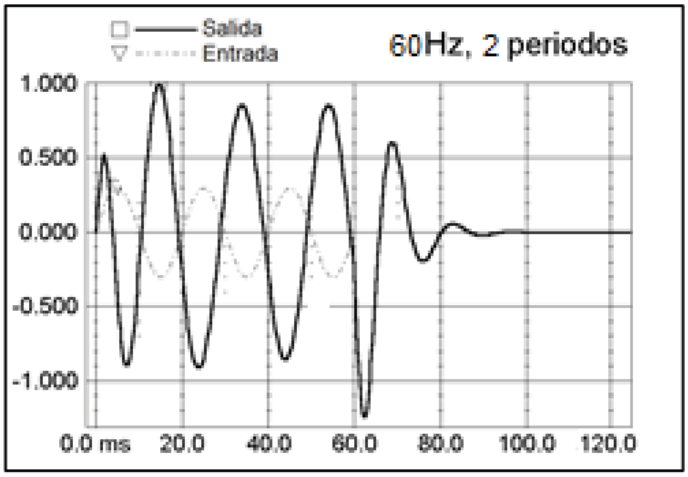


Figura N° 2.20 – Señal resonante a 60Hz.

Fuente: *Figura 4.1 (Abundis, 2016, p. 24)* [8]

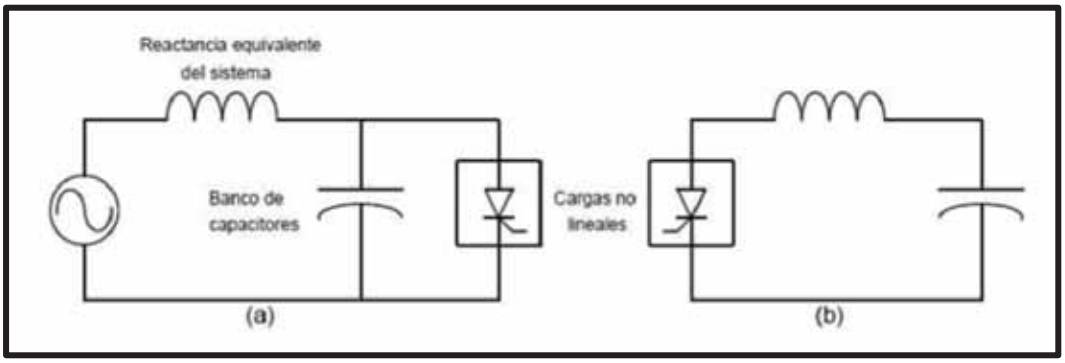


Figura N° 2.21 – Circuito que ejemplifican (a) resonancia paralela (b) resonancia serie.

Fuente: *Figura 2.8 (Noroña, 2011, p. 14)* [9]

2.2.11.1.1 Resonancia en paralelo

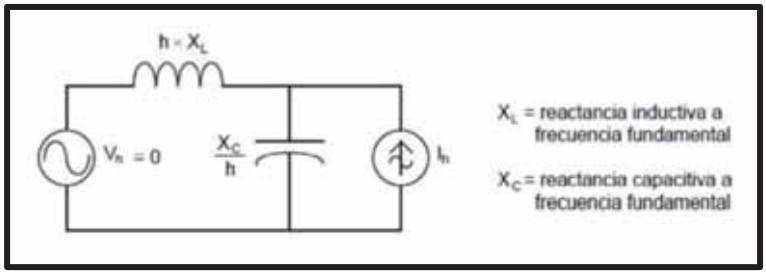


Figura N° 2.22 – Circuito equivalente para el análisis del sistema a frecuencias armónicas.

Fuente: *Figura 2.9 (Noroña, 2011, p. 14)* [9]

La figura 2.18 (a) es la representación del circuito donde las corrientes armónicas son inyectadas por la carga no lineal. Este circuito puede ser analizado por el teorema de superposición a diferentes frecuencias.

Según Noroña (2011) [9] menciona que "La fuente de voltaje será diferente de cero cuando el circuito trabaje a frecuencia fundamental" (p. 14), tal como se puede apreciar en la figura N° 2.18, asimismo Noroña (2011) [9] indica "El Vh=0 (cortocircuito), entonces a frecuencias armónicas el circuito equivalente visto por la carga es una inductancia y una capacitancia en paralelo lo cual puede significar una resonancia paralela." (p. 15)

La ecuación matemática es la siguiente:

$$f_r = f_1\sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \qquad \text{(Ecuación 2.19)}$$

Donde:

f_r : Frecuencia de resonancia

f_1 : Frecuencia fundamental

X_C : Reactancia capacitiva

X_L : Reactancia inductiva

Al respecto del circuito equivalente Noroña (2011) [9] menciona que “si la carga inyecta una corriente armónica de una frecuencia igual o cercana a la frecuencia de resonancia paralela del sistema, entonces el voltaje experimenta una amplificación debido a que la admitancia equivalente se aproxima a cero (impedancia muy alta)” (p. 15), en ese entender se producen problemas de calentamiento por la presencia de las corrientes armónicas (en transformador, conductor, interruptor), activación de fusibles y el envejecimiento prematuro de los equipos de la instalación.

2.2.11.1.2 Resonancia en serie

La figura 2.18 (b) representa al circuito, Noroña (2011) [9] menciona que:

> La expresión matemática que representa a la frecuencia de resonancia será la misma que se tiene para la resonancia en paralelo con la diferencia que en este caso se tendrá una trayectoria de impedancia muy baja a las corrientes armónicas (casi cortocircuito). (p. 15)

Este tipo de resonancia produce casi los mismos problemas que la resonancia paralela.

2.2.12 Soluciones a los problemas causados por los armónicos

La mejor solución a este tipo de problema es la instalación de un filtro, el cual debe ser capaz de reducir las corrientes armónicas a límites permisibles, según lo establece la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1], para evitar su propagación hacia aguas arriba del sistema eléctrico. Para esta solución es necesario realizar un estudio detallado del tipo de orden que tiene dicha armónica, ya que los elementos del filtro deben ser adecuadamente dimensionados para la interacción con la red de distribución eléctrica.

2.2.12.1 Filtros

La conexión de cargas no lineales a la red de distribución eléctrica es cada vez mayor, a pesar de ser útiles y necesarios para la vida cotidiana; los principales causantes de distorsiones armónicas tales como: computadoras, TVs, microondas, celulares, radios, etc.

Según (Altamirano & Soto) [5] indican que:

> Las cargas no lineales cambian la naturaleza de una onda, esta lleva en consecuencia a una caída de voltaje AC, resultando en un flujo de corriente armónica que conlleva la interferencia de sistemas eléctricos. Para amortiguar este efecto producido por las cargas no lineales, se utiliza un filtro adecuado con el fin de reducir el flujo de corriente o voltaje aplicado a las partes específicas de un sistema eléctrico de potencia. (p. 26)

La mayor parte de los problemas ocasionados por las distorsiones armónicos pueden ser corregidos mediante el uso de filtros. Evidentemente, que cada tipo de problema requiere de un estudio de las cargas que pueden ser quienes ocasionan las distorsiones.

Tabla N° 2.5 – Tipos de filtro y su aplicación.

Problema	Tipo de filtro
Corrección de problemas de resonancia en equipos de corrección de factor de potencia.	Filtro desintonizado o antiresonante.
Absorción de armónicos para reducir el THD de la instalación.	***Filtros de absorción o sintonizados.***
Corriente de línea de convertidores con alto contenido de armónicos.	Reactancias en serie con entrada de red. Reactancias en el lado de continua.
Rechazo de frecuencia de telecontrol.	Filtros de rechazo de banda.

Fuente: *Tabla N° 2.3 (Ligas, 2016, p. 39)* [4]

2.2.12.1.1 Filtro pasivo

Según (Altamirano & Soto) [5] indican que:

> Se componen de capacitancias e inductancias, conectadas en una configuración del circuito resonante en el orden de las frecuencias armónicas a ser eliminadas. Estos dispositivos se conectan en paralelo o serie con el generador armónico, con la finalidad de absorber los armónicos, de esta manera evitar la circulación de estas. (p. 27)

La aplicación de este tipo de filtro es para la mitigación de las armónicas de un orden especifico; algunas características de este tipo de filtros son:

- Según Arrieta & Sanchez (2006) [14] indica que "los filtros pasivos proporcionan una máxima atenuación para una armónica individual". (p. 57)
- Según Morales & Rodriguez (2012) [6] indica que "los filtros pasivos son los más simples y económicos". (p. 112).
- El precio de la ejecución de un filtro pasivo resulta de 8 a 12 veces menor que la ejecución de un filtro activo.

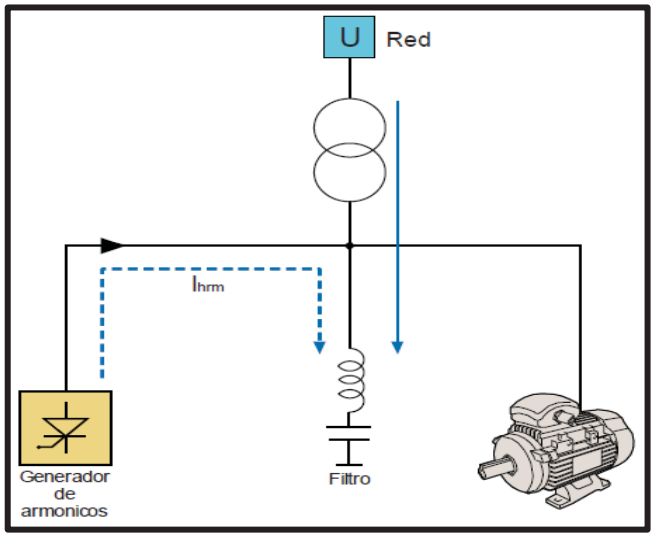


Figura N° 2.23 – Principio de funcionamiento de un filtro pasivo.

Fuente: *Figura 8.4 (Cuaderno de aplicaciones técnicas N° 8, s.f., p. 23)* [10]

Los filtros pasivos, pueden poseer más de una rama de elementos pasivos, ya que cada rama es sintonizada para suprimir la distorsión que ocasiona un armónico.

Filtro pasivo en paralelo

Según Mora & Cevallos (2014) [15] menciona que "se le denomina paralelo porque el filtro va en paralelo con la carga no lineal". (p. 95) Ver la siguiente figura.

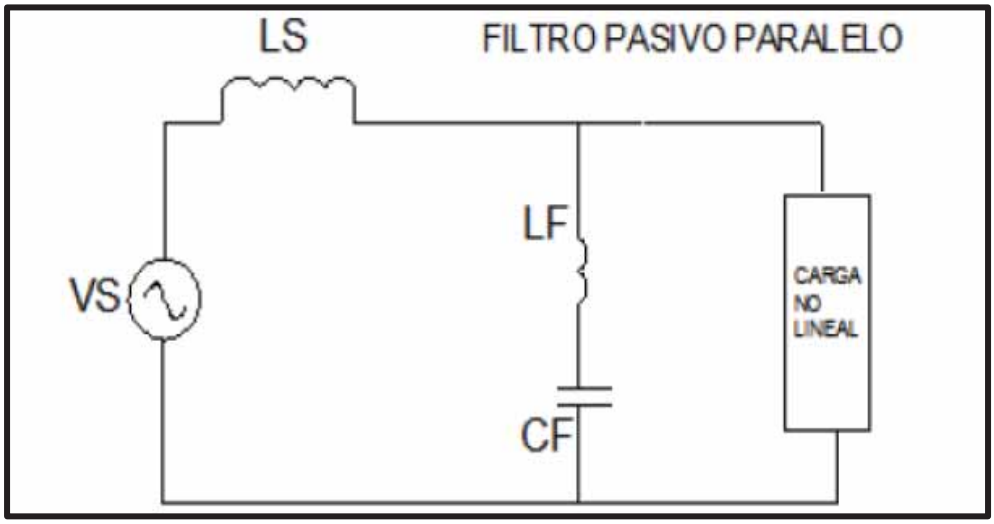


Figura N° 2.24 – Circuito monofásico con la implementación de un filtro pasivo de potencia paralelo.

Fuente: *(Mora & Cevallos, 2014, pág. 94)* [15]

Este tipo de filtro pasivo paralelo es recomendable para mitigar un armónico individual de corriente.

Además, el diseño básico de un filtro pasivo sintonizado es la siguiente figura:

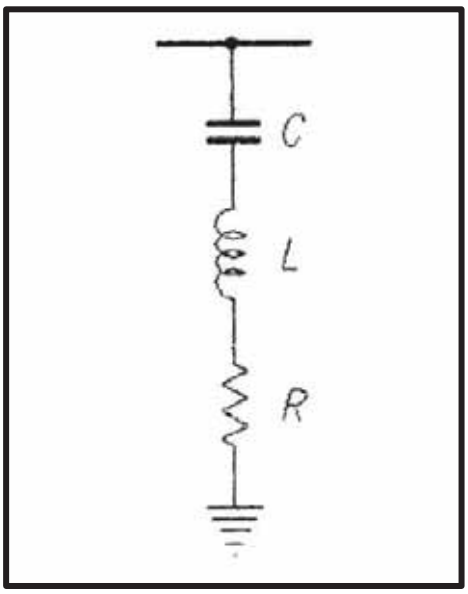


Figura N° 2.25 – Circuito monofásico de un filtro pasivo sintonizado.

Fuente: *(Gers, 2008, p. 21)* [16]

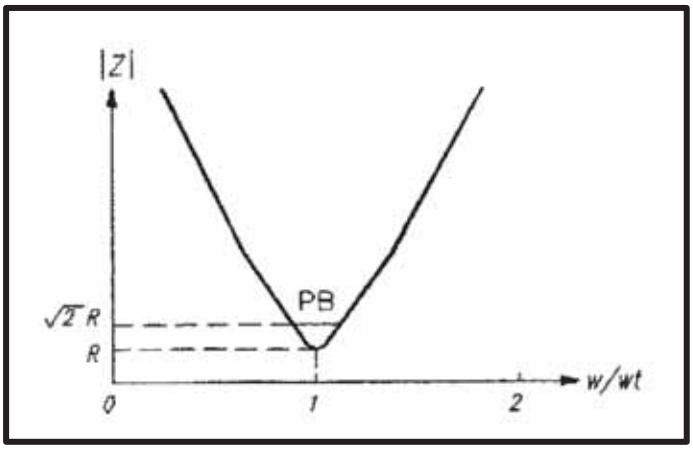


Figura N° 2.26 – Característica de frecuencia del filtro sintonizado.

Fuente: *(Gers, 2008, p. 21)* [16]

Filtro pasivo en serie

Según Mora & Cevallos (2014) [15] menciona que "se le denomina serie, ya que la implementación en el circuito se la realiza en serie a la carga no lineal". (p. 94) Ver la siguiente figura.

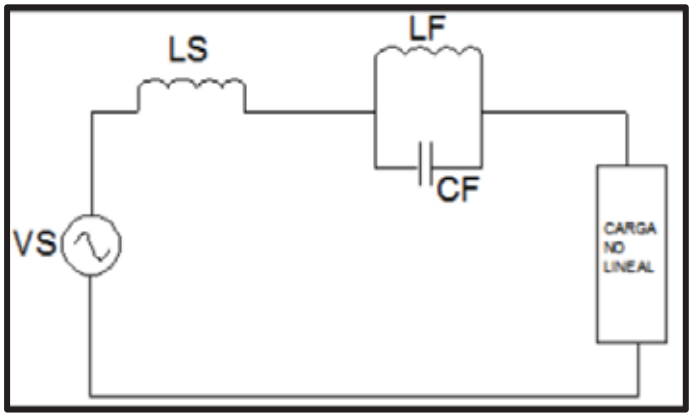


Figura N° 2.27 – Circuito monofásico con la implementación de un filtro pasivo de potencia serie.

Fuente: *(Mora & Cevallos, 2014, p. 94)* [15]

En la figura N° 2.16 se puede apreciar que este filtro se encuentra instalado en serie con la carga no lineal, teniendo el filtro en su estructura una conexión paralela de un elemento inductivo y capacitivo.

Este tipo de filtro pasivo serie es recomendable para mitigar un armónico individual de tensión.

2.2.12.2 Cálculo del filtro pasivo

<u>Cálculo del valor de la capacitancia</u>

Para el cálculo del valor de la capacitancia del filtro se tiene la siguiente ecuación:

$$Q_C = \frac{(V_{nom})^2}{X_C} \qquad \text{(Ecuación 2.20)}$$

Dónde:

Q_C : Potencia reactiva del capacitor (kVAR)

V_{nom} : Tensión nominal entre líneas (V)

X_C : Reactancia capacitiva del filtro (Ω)

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \qquad \text{(Ecuación 2.21)}$$

Dónde:

C : Capacitancia del filtro (F)

f : Frecuencia de la red (Hz)

<u>Cálculo del valor de la inductancia</u>

Para el cálculo del valor de la inductancia del filtro se tiene la siguiente ecuación:

$$\omega_n = 2\pi f n \qquad \text{(Ecuación 2.22)}$$

Dónde:

ω_n : Frecuencia angular de resonancia (Hz)

n : Orden del armónico que se desea filtrar

Para evitar el problema de resonancia, éste se debe reducirse en un 6% de acuerdo a la norma internacional IEEE Std 1531-2003 [17], por lo que para el quinto armónicos el valor de "n" será: (n=4.7).

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 \cdot C} \qquad \text{(Ecuación 2.23)}$$

Dónde:

L : Valor de la inductancia del filtro (H)

<u>Cálculo del valor de la resistencia</u>

Para determinar la resistencia del filtro pasivo se debe de precisar el valor del factor de calidad "Q"; para definir su valor tomaremos en cuenta las opiniones de dos autores:

- Q = Entre 30 y 60. (Gers, 2008, p. 21) [16]
- Q = Entre 20 y 30. (Mora & Cevallos, 2014, p. 131) [15]

Se le asignará el valor promedio de los dos autores ($Q = 30$).

La ecuación que relaciona la resistencia con el factor de calidad es la siguiente:

$$R = \frac{\omega_n \cdot L}{Q} \qquad \text{(Ecuación 2.24)}$$

Dónde:

R : Valor de la resistencia del filtro (Ω)

Filtro sintonizado

Son filtros pasivos que se conectan en paralelo a la red de distribución eléctrica o cargas individuales significativas; con la finalidad de reducir el nivel de armónicos generados por las cargas no lineales.

Según Altamirano & Soto (2017) [5] menciona que:

> Se refiere sintonía o frecuencias de resonancia serie, aquella en la que la impedancia del filtro se hace cero, permitiendo que las corrientes de esa frecuencia fluyan en su totalidad por él, generalmente se elige un valor de frecuencia de sintonía que sea ligeramente inferior a la menor armónica dominante para que atenué esta y las del orden superior, generando un comportamiento inductivo a partir de ese punto, por tanto las armónicas de mayor orden ya no estarán expuestas a condiciones de resonancia, con la consecuente reducción de la potencia distorsionante del sistema. (p. 31)

Las ventajas que produce los filtros sintonizados son los siguientes:

- Proporciona una máxima atenuación para una armónica individual.
- Compensa el factor de potencia a frecuencia fundamental.

Filtro desintonizado

Según Altamirano & Soto (2017) [5] menciona que:

> Los filtros desintonizados en esencia son el arreglo y conexión a la red que los sintoniza, las mismas se sintonizan a una frecuencia que no se espera que exista en el sistema, y muy por debajo de la armónica característica de menor orden, típicamente 3 y 4 armónica. Cuya aplicación principal, es para compensar el factor de potencia de desplazamiento, en un sistema donde la proporción de carga no lineal con relación a la total es inferior a 40%, con el fin de proteger los capacitores contra sobrecargas armónicas. (p. 32)

El objetivo de los filtros desintonizados es evitar la amplificación del armónico preponderante de la instalación, e impedir la resonancia paralelo entre las cargas inductivas (transformadores, motores, arrancadores y otros).

Son más económicos ya que sus componentes están expuestos a corrientes armónicas menores y pueden funcionar adecuadamente ante ciertos incrementos de cargas no lineales.

Según Ligas (2016) [4] menciona que:

> Un filtro sintonizado tiene una sintonía ligeramente por debajo de la armónica que se desea filtrar, mientras que un filtro desintonizado tiene una sintonía bastante más por debajo de esa armónica. Utilizando la 5ta armónica como ejemplo, tendríamos las siguientes armónicas de sintonía: (p. 44)

Sintonizado: $h_f = 4.7$ - Desintonizado: $h_f = 3.8$

Donde:

h_f : Armónica de sintonía

2.2.12.2.1 Filtro activo

Están compuestos por un generador de señales (Inversor), la cual forma parte de un sistema electrónico de control, donde indica que tipo de onda debe generar, la función del filtro activo es la de mitigar las perturbaciones en la onda sinusoidal que circule por la red de distribución eléctrica.

Según Ligas (2016) [4] menciona que:

> Son elementos de electrónica de potencia, los cuales trabajan usando un convertidor de potencia conectado en paralelo para producir corrientes armónicas iguales a las que se encuentran en la corriente de carga, asegurando que su trayectoria sea la de sacar las corrientes armónicas fuera de la trayectoria del sistema de potencia. La reducción de las armónicas depende sólo de la medición armónica correcta que se está generando en la carga. (p. 42)

Los filtros activos son idóneos para eliminar de forma automática las corrientes armónicas que se encuentran presentes en la red de distribución eléctrica con una amplia gama de frecuencias; además, su tecnología electrónica le permite generar un sistema de armónicos capaz de anular los armónicos presentes en la red.

Para la compensación armónica se aplica en rangos de 2 al orden 25 o del 2 al orden 50 dependiendo del compensador usado, además es preciso detallar que este filtro es aplicable a cualquier tipo de carga ya sea monofásico o trifásico (con neutro o sin neutro). Veremos la configuración básica del filtro activo en la siguiente figura.

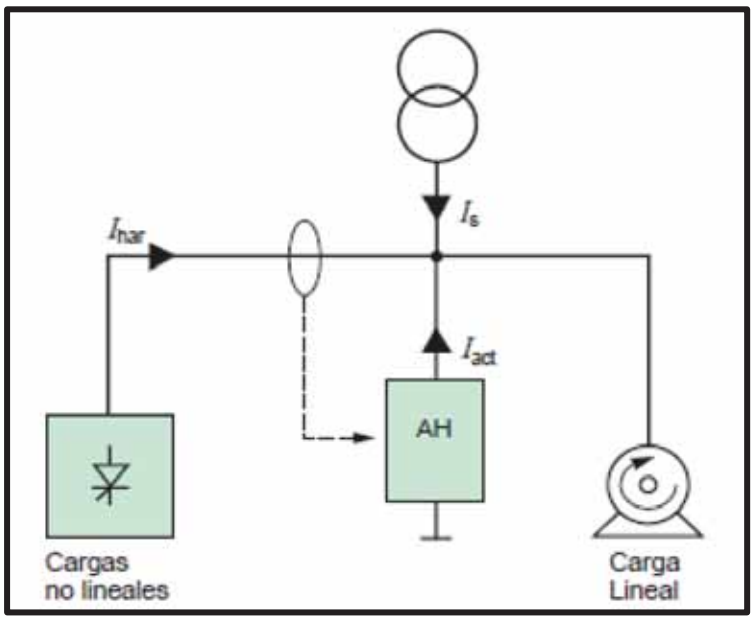


Figura N° 2.28 – Principio de funcionamiento de un filtro activo.

Fuente: *Figura N° 2.19 (Altamirano & Soto, 2017, p. 33)* [5]

Estos filtros han tenido una mayor aplicación, teniendo la desventaja de ser muy costosos y además que consumen potencias en cantidades significativas, creando niveles altos de interferencia electromagnética.

Filtro activo en paralelo

Este filtro es utilizado cuando se tiene una carga no lineal que produce distorsión armónica; está constituido por 5 bloques bien definidos; se muestra en la siguiente figura:

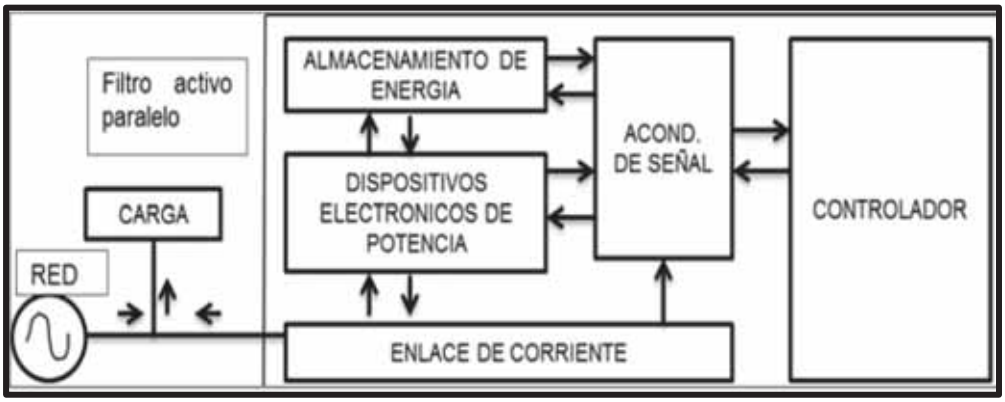


Figura N° 2.29 – Principio de funcionamiento de la configuración de un filtro activo paralelo.

Fuente: *(Mora & Cevallos, 2014, p. 100)* [15]

Este tipo de filtro activo paralelo tiene como misión contrarrestar los armónicos de corriente.

Filtro activo en serie

Según Altamirano & Soto (2017) [5] menciona que "la aplicación de este tipo de filtro está basada cuando el voltaje de la red de distribución eléctrica se encuentra distorsionado por las corrientes armónicas". (p. 34)

El principio de funcionamiento de dicho filtro activo serie lo podemos apreciar en la siguiente figura:

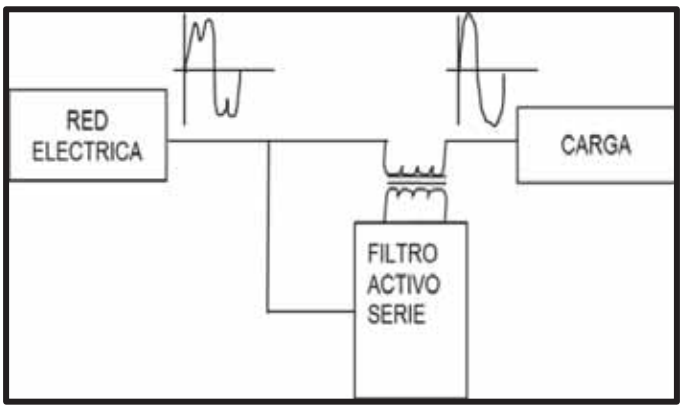


Figura N° 2.30 – Principio de funcionamiento de la configuración de un filtro activo serie.

Fuente: *(Mora & Cevallos, 2014, p. 99)* [15]

Este tipo de filtro activo serie tiene como misión contrarrestar los armónicos de tensión.

2.2.12.3 Cálculo del filtro activo

Siguiendo la formula indicada en los manuales de filtros activos de CIRCUTOR para calcular la corriente nominal:

$$I_{AFQ} = SF_h \times I_{carga} \times THD_i \qquad \text{(Ecuación 2.25)}$$

Donde:

I_{AFQ} : Corriente nominal del filtro

SF_h : Factor de sobrecarga del filtro

I_{carga} : Corriente nominal de la carga

THD_i : Distorsión armónica total de corriente

Siendo SF_h el factor de sobrecarga del filtro que es un valor teórico; es adecuado incrementar a la corriente nominal de los filtros por seguridad, pero los filtros se encarecen mucho al aumentar este concepto, por ello es conveniente ajustar en lo posible el factor de sobrecarga del filtro.

Si un transformador con una baja potencia de cortocircuito, la impedancia del sistema es mayor. Por lo que se está incrementando el valor del voltaje del secundario cuándo se inyecta potencia. Por tanto, la diferencia de potencial entre la tensión de red por √2 y el voltaje en el bus es mayor, por lo que se necesitan también más amperios para inyectar la potencia adecuada y obtener los mismos resultados.

Un criterio práctico basado en la experiencia para tener el factor de sobrecarga SF_h es el siguiente:

- Si $THD_V = 3\%$ se tiene que aplicar un factor de seguridad de 1,2
- Si $THD_V = 5\%$ se aplica un factor de seguridad de 1,5
- Si $THD_V > 5$ se aplica de 1,8 a 2

Para ello debemos conocer previamente el parámetro llamado relación de cortocircuito (R_{SC}) en el PCC. La R_{SC} se define como la relación entre la corriente de cortocircuito de una red (I_{SC}) y la corriente nominal del conjunto de convertidores no lineales (I_{CNL}) que generan los armónicos que se pretenden filtrar.

$$R_{SC} = \frac{I_{SC}}{I_{CNL}} \qquad \text{(Ecuación 2.26)}$$

En una instalación real, se puede valorar la I_{SC} en el PCC teniendo la tensión en dicho punto para dos corrientes de carga distintas. Por ejemplo, a plena carga (I_A) y 10% de carga (I_B). Si V_{OC} es la tensión nominal en vacío, la I_{SC} se puede calcular mediante la fórmula:

$$I_{SC} = V_{OC} \times \frac{I_B - I_A}{V_A - V_B} \qquad \text{(Ecuación 2.27)}$$

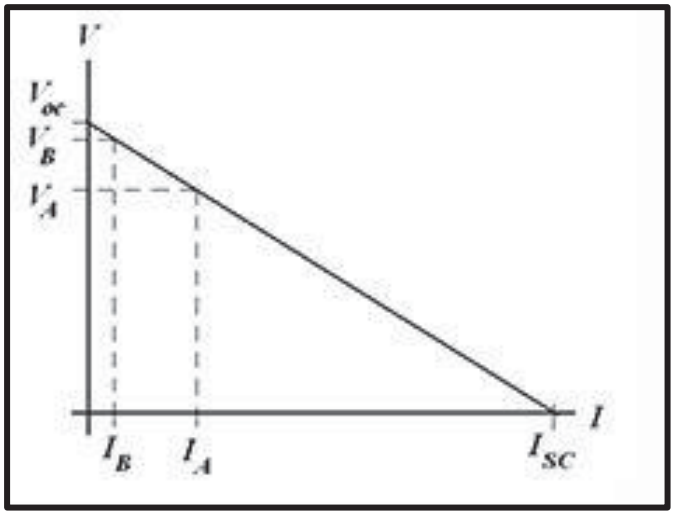


Figura N° 2.31 – Plano cartesiano para hallar la corriente de cortocircuito.

Fuente: *(CIRCUTOR)* [19]

El Factor de seguridad (SF_h) lo podemos obtener a partir de la gráfica siguiente:

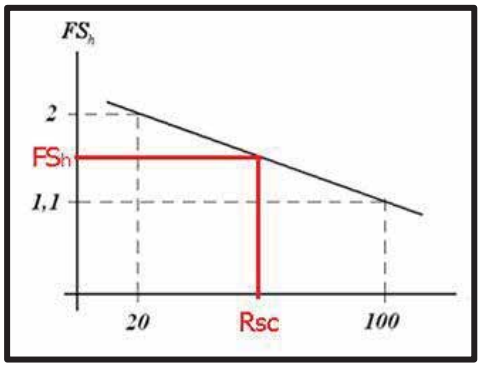


Figura N° 2.32 – Plano cartesiano para hallar el factor de seguridad.

Fuente: *(CIRCUTOR)* [19]

$$SF_h = 1.1 + \left[\frac{2-1.1}{100-20} \times (100 - R_{SC})\right] \qquad \text{(Ecuación 2.28)}$$

2.2.12.3.1 Filtro híbrido

Tienen una caracteriza especial por tener una configuración de ambos tipos de filtros que son los activos y pasivos, estas combinaciones se realizan con la finalidad de reducir los elevados costos del filtro Activo.

Según Altamirano & Soto (2017) [5] menciona que "estos filtros abarcan las ventajas de ambos tipos, logrando así una amplia gama de niveles de potencia y rendimiento" (pp. 35-36); en la siguiente figura se muestra su configuración básica.

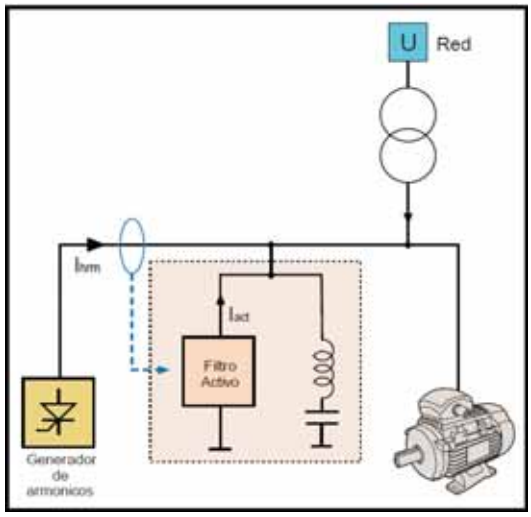


Figura N° 2.33 – Principio de funcionamiento de un filtro hibrido.

Fuente: *Figura 8.6 (Cuaderno de aplicaciones técnicas N° 8, s.f., p. 24)* [10]

Tabla N° 2.6 – Tabla de resumen de las posibles estrategias frente a los armónicos.

Estrategia	Ventajas	Inconvenientes	Soluciones de Schneider Electric
Aceptación de los armónicos			
Aumento de los valores nominales de las de las fuentes o las secciones transversales de los cables	Reducción del valor THD_V de la alimentación mediante la reducción de la impedancia de la fuente. Reducción de las perdidas Joule.	Difícil en las soluciones existentes. Solución costosa que se limita a reducir el componente resistivo de las secciones transversales pequeñas (la inductancia permanece constante). Requiere cables paralelos para las secciones transversales grandes. No evita las	

		perturbaciones aguas arriba de la instalación. No cumple las normas.	
Alimentación especial para cargas no lineales	Limita las perturbaciones en cargas colindantes mediante el desacoplamiento.	Igual que el punto anterior.	
Armónicos eliminados parcialmente			
Filtros pasivos ajustados.	Solución sencilla.	Solo para una o dos órdenes de armónicos. Los filtros de banda ancha no son muy eficaces. Posibilidad de resonancia. Se necesita un trabajo de diseño costoso.	**Gama de filtros pasivos.** Incluye soluciones de doble puente y cambio de fase.
Inductores aguas arriba de las cargas no lineales	Reducción de las corrientes armónicas. Limita los efectos de las sobretensiones transitorias.	Aumento del valor THD_V en los terminales de la carga.	
Transformadores especiales		Eliminación solo de ciertos ordenes de armónicos. Construcción no estándar.	
Armónicos eliminados completamente			
Acondicionadores de armónicos activos	Solución sencilla y flexible.	Es posible eliminar los armónicos totalmente (hasta el orden 25°), sistema adaptable (configuración de la acción) y reutilizable.	**Acondicionadores activos AccuSine**

Fuente: *Tabla de resumen (Schneider Electric, 2015, p.13)* [20]

Los filtros híbridos pueden tener un conexionado tanto en serie como en paralelo; desempeñan su función de acuerdo al trabajo que van a realizar (como mitigar los armónicos) en una red de distribución eléctrica.

Tabla N° 2.7 – Resumen de las principales características de la gama AccuSine.

Gama	Nivel de Potencia	Sistemas de 50/60Hz	Características principales	Aplicaciones
AccuSine	De 20 a 480A	De 380V a 415V (3 Ph + N y 3 Ph)	• Filtrado hasta 25°. • Acondicionamiento activo digital con: ▪ Análisis y acondicionamiento de ordenes individuales. ▪ Tiempo de respuesta de 40ms para fluctuaciones de carga.	Filtrado de sistemas industriales, comerciales y de infraestructuras de mediana potencia, 3 Ph + N y 3Ph, cargas monofásicas.

Fuente: *Tabla de resumen (Schneider Electric, 2015, p.14)* [20]

2.3 Aspecto normativo

Actualmente en el Perú contamos con los marcos normativos nacionales como la NTCSE [18] que establece los límites de distorsión armónica en tensión; además de ello también contamos con el estándar internacional IEEE 519-2014 [1] que establece las tolerancias de las distorsiones armónicas en tensión y corriente.

2.3.1 Normatividad nacional

2.3.1.1 Ley de concesiones eléctricas

Esta Ley fue publicada en el Diario Oficial El Peruano el 19 de noviembre de 1992, llamada también Ley Nº 25844; esta ley fue modificada varias veces. Esta Ley nos indica en su Artículo 34° literal d) Los concesionarios de distribución están obligados a garantizar la calidad del servicio que fije su contrato de Concesión y las normas aplicables.

2.3.1.2 NTCSE [18]

Esta norma fue publicada el 11 de octubre de 1997 según el Decreto Supremo N° 020-97-EM, que regula los aspectos de calidad en el servicio eléctrico; esta norma ha sufrido

una serie de modificaciones, tal es así, que fue modificado por el Decreto Supremo N° 026-2006-EM, Decreto de Urgencia N° 046-2007, Decreto Supremo N° 001-2008-EM y el Decreto Supremo N° 002-2008-EM.

La NTCSE [18] es de aplicación imperativa para el suministro de servicios relacionados con la generación, transmisión y distribución de la electricidad sujetos a regulación de precios y aplicable a suministros sujetos al régimen de libertad de precios, en todo aquello que las partes no hayan acordado o no hayan pactado en contrario. (Decreto Supremo N° 020-97-EM, 1997, pág. 4)

Hace referencia al control de la calidad de los servicios eléctricos; en el ítem a) se menciona la Calidad de Producto con sus parámetros de Tensión, Frecuencia y Perturbaciones (Flicker y Tensiones Armónicas) de un sistema eléctrico, e indica de la siguiente manera:

En el *TÍTULO QUINTO*, hace referencia a la *CALIDAD DE PRODUCTO*, que, literalmente manifiesta de la siguiente forma:

*"**5.0.1** La Calidad de Producto suministrado al Cliente se evalúa por las transgresiones de las tolerancias en los niveles de tensión, frecuencia y perturbaciones en los puntos de entrega. (…).*

***5.0.2** De acuerdo a lo especificado en cada caso, con equipos de uso múltiple o individuales se llevan a cabo mediciones independientes de cada parámetro de la Calidad de Producto. El lapso mínimo de medición de un parámetro es de siete (7) días calendario continuos, (…).*

***5.0.3** En cada Período de Medición, los valores instantáneos de los parámetros de la Calidad de Producto son medidos y promediados por intervalos de (…) diez (10) minutos para las perturbaciones. Estos períodos se denominan "Intervalos de Medición". (…).*

(…)

5.3 Perturbaciones

5.3.1 La Autoridad propicia el control de todo tipo de perturbaciones. Inicialmente, sin embargo, sólo se controla el Flícker y las Tensiones Armónicas.

El Flicker y las Armónicas se miden en el voltaje de Puntos de Acoplamiento Común (PAC) del sistema, de puntos indicados explícitamente en la Norma o de otros que especifique la Autoridad en su oportunidad.

5.3.2 Indicadores de Calidad. - *Se consideran los siguientes indicadores de calidad:*

a) (…)

b) Para ARMONICAS: Las Tensiones Armónicas Individuales (Vi) y el Factor de Distorsión Total por Armónicas (THD).

Estos indicadores (Pst, Vi, THD) se evalúan separadamente para cada Intervalo de Medición de diez (10) minutos durante el Período de Medición de perturbaciones, que como mínimo será de siete (7) días calendario continuos.

5.3.3 Tolerancias:

a) (…)

b) Tensiones Armónicas. - *Los valores eficaces (RMS) de las Tensiones Armónicas Individuales (Vi) y los THD, expresado como porcentaje de la tensión nominal del punto de medición respectivo, no deben superar los valores límite (Vi' y THD') indicados en la siguiente tabla. Para efectos de esta Norma, se consideran las armónicas comprendidas entre la dos (2) y la cuarenta (40), ambas inclusive.”*

La normatividad peruana establece los límites de tolerancias de armónicos de tensión; se muestra el detalle de cada armónico respecto de las tolerancias establecidos en rangos de muy alta, alta, media y baja tensión. Podemos apreciar en la Tabla Nº 2.8.

Tabla N° 2.8 – Tolerancias de los armónicos de tensión establecidos por la NTCSE.

Orden (n) de la armónica o THD	**TOLERANCIA |Vi'| o |THD'| (% con respecto a la Tensión Nominal del punto de medición)**	
	Alta y muy Alta Tensión	**Media y Baja Tensión**
(Armónicos impares no múltiplos de 3)		
5	2	6
7	2	5
11	1.5	3.5
13	1.5	3
17	1	2
19	1	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
mayores de 25	0.1+2.5/n	0.2+12.5/n
(Armónicos impares múltiplos de 3)		
3	1.5	5
9	1	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
mayores de 21	0.2	0.2
Pares		
2	1.5	2
4	1	1
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
mayores de 12	0.2	0.2
THD	**3**	**8**

Fuente: *Tabla N° 5 establecido por la NTCSE.*

Se considera que la energía eléctrica es de mala calidad, si los indicadores de las perturbaciones medidas se encuentran fuera del rango de las tolerancias establecidas en este numeral, por un tiempo superior al 5% del Período de Medición. Cada tipo de perturbación se considera por separado.

Compensación por Armónicas (CA)

$$CA = \sum_s d \cdot D_s \cdot E(s) \qquad \text{(Ecuación 2.29)}$$

Dónde:

s : Intervalo de medición en el que se violan las tolerancias por armónicas.

d : Compensación unitaria por armónicas: $

Primera etapa : $d = 0.00$

Segunda etapa: $d = 0.10\ US\$/kWh$

Tercera etapa : $d = 1.10\ US\$/kWh$

D_s : Factor de proporcionalidad que está definido en función de la magnitud de la Distorsión Penalizable por Armónicos $DPA(s)$ calculado por el intervalo de medición "s" como:

$$DPA(s) = \frac{THD(s) - THD'}{THD'} + \frac{1}{3}\sum_{i=2}^{40}\left(\frac{Vi(s) - Vi'}{Vi'}\right) \qquad \text{(Ecuación 2.30)}$$

(Sólo se consideran los términos positivos de esta expresión).

Si: $DPA(s) \geq 1;\ D_s = 1$

Si: $DPA(s) < 1;\ D_s = DPA(s) \cdot DPA(s)$

$E(s)$: Energía en kWh suministrada durante el intervalo de medición "s".

Cabe mencionar que lo anteriormente descrito pertenece íntegramente a la NTCSE [18] y que las compensaciones por perturbaciones armónicas actualmente se encuentran suspendidas.

2.3.1.3 Base metodológica para la aplicación de la "norma técnica de calidad de los servicios eléctricos"

Esta resolución fue publicada el 18 de diciembre del 2008 según la Resolución Ministerial N° 616-2008-OS/CD del consejo directivo del OSINERGMIN para el procedimiento de la supervisión del NTCSE [18].

La NTCSE [18], aprobada por Decreto Supremo N° 020-97-EM, que regula los aspectos de calidad en el servicio eléctrico, esté Decreto Supremo fue modificado varias veces; es por estas razones que en la Primera Disposición Transitoria de este último Decreto Supremo se dispuso que OSINERGMIN actualice la Base Metodológica a los referidos cambios de la Norma Técnica.

Cabe señalar que dichos decretos modificaron aspectos de la NTCSE [18] referidos a la calidad de precisión de la medida, inclusión de nuevas exoneraciones para las interrupciones y una aclaración respecto al rechazo de carga, razón por la que se requería que la Base Metodológica sea actualizada. Asimismo, era necesario revisar y mejorar de manera integral la Base Metodológica, considerando el tiempo transcurrido desde su última modificación, esto es desde el 2002.

Ante esto, OSINERGMIN en aplicación de la facultad normativa que le otorga el inciso c) del artículo 3° de la Ley N° 27332 – Ley Marco de los Organismos Reguladores de la Inversión Privada en los Servicios Publicas, así como el artículo 3° de la Ley N° 27699 – Ley complementaria de Fortalecimiento Institucional de OSINERGMIN, elaboro el Proyecto de "Base Metodológica para la Aplicación de la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos".

En su contenido hace referencia a los siguientes procedimientos que deben cumplir las empresas de distribución:

- Precisión de la medida.
- Definición de rechazo de carga.
- Ponderación especial que tendría las interrupciones por hurto de conductores.
- Cadena de pagos de manera que sea efectiva su aplicación.
- Comunicación al usuario de las interrupciones programadas.

- El usuario puede efectuar consultas vía Web.
- Atender las llamadas de los usuarios ante la falta de suministro.

2.3.2 Normatividad internacional

2.3.2.1 IEEE Std 519-2014 [1]

El instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos (IEEE), mediante el grupo de trabajo "IEEE-PES Power System Harmonics" y en base a estudios de armónicos ha publicado el documento IEEE-519 (Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems), el cual establece límites para la distorsiona armónica.

Según Reyes (1996) [11] menciona que "normalmente las armónicas no se eliminan completamente, sino que se reducen solo a niveles permisibles y seguros, normalizados por estándares, como los límites establecidos por el estándar 519 de la IEEE". (p. I)

La norma internacional IEEE Std 519-2014 [1] es una norma que establece límites para el control de los problemas ocasionados por los armónicos, dicha norma es aplicable para límites de distorsión de tensión y corriente. La filosofía de la norma implica dos puntos importantes:

- Las compañías suministradoras deben limitar la distorsión de tensión y suministrar una tensión de calidad al usuario.
- Los usuarios deben responsabilizarse para limitar la cantidad de corrientes armónicas inyectadas al sistema de la red de distribución eléctrica.

Los límites recomendables se refieren a las condiciones más desfavorables en régimen permanente de funcionamiento; por tanto, estos límites pueden, ser sobrepasados.

Es importante mencionar que la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1], define solo recomendaciones prácticas de amplio uso en la industria eléctrica y no es una norma legal.

2.3.2.1.1 Límites de distorsión de tensión

En esta recomendación no diferencia los valores entre los distintos armónicos, pero si especifican los valores máximos para la Distorsión Armónica Individual y Distorsión Armónica Total (THD) en función a la tensión con frecuencia fundamental. Los límites especificados se muestran en la Tabla N° 2.9.

Tabla N° 2.9 – Límites de distorsión de tensión.

Tensión en el punto de conexión común (PCC)	Distorsión armónica individual (%)	Distorsión armónica total (%)
V ≤ 1.0 kV	5.0	8.0
1 kV < V ≤ 69 kV	3.0	5.0
69 kV < V ≤ 161 kV	1.5	2.5
161 kV < V	1.0	1.5

Fuente: *Tabla 1 (IEEE Std 519-2014, 2014, p. 19)* [1]

2.3.2.1.2 Límites de distorsión de corriente

Los límites establecidos a los clientes individuales conectados al mismo PCC se calculan en proporción a sus respectivas potencias instaladas. Los límites de corriente recomendados en los cuadros deben ser interpretados como "caso más desfavorable" en condiciones normales de funcionamiento de duración superior a una hora. Para períodos más breves, los valores de los cuadros pueden ser incrementados en un 50%.

El tamaño relativo de la carga con respecto a la fuente se define como SCR; el PCC es donde la carga del consumidor se conecta con otras cargas de la red de distribución eléctrica. El tamaño de la red de distribución eléctrica es definido por el nivel de la I_{SC}

en el PCC. El tamaño del consumidor es definido por la I_L, que incluye todas las cargas lineales y no lineales. Estas dos corrientes definen el SCR:

$$SCR = \frac{I_{SC}}{I_L} \qquad \text{(Ecuación 2.31)}$$

Donde:

SCR : Relación de cortocircuito.

I_{SC} : Máxima corriente de cortocircuito en el PCC.

I_L : Máxima corriente de carga demandada (frecuencia fundamental) en el PCC.

Tabla N° 2.10 – Limites de máxima distorsión de corriente.

Máxima distorsión de corriente armónica en por ciento de I_L						
I_{SC}/I_L	**3≤h<11**	**11≤h<17**	**17≤h<23**	**23≤h<35**	**35≤h≤50**	**TDD**
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8
50-100	10	4.5	4.0	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5.0	2.0	1.0	15
>1000	15	7.0	6.0	2.5	1.4	20

Fuente: *Tabla 2 (IEEE Std 519-2014, 2014, p. 20)* [1]

- Los armónicos pares están limitados al 25% de los límites de los armónicos impares.
- Las distorsiones de corriente que impliquen de una corriente directa, como los convertidores de media onda, no son permitidas.

2.4 Definición de términos

Acometida: Conductor eléctrico entre el empalme de la red en BT de la concesionaria y los bornes de entrada del medidor de energía. Son parte de la conexión eléctrica.

Armónico: Una componente sinusoidal de una onda periódica o cantidad que posee una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental.

Barrido de Frecuencia: Cálculo de la impedancia equivalente en una barra del sistema, para diferentes niveles de frecuencia.

Capacitor: Un dispositivo eléctrico que consiste de dos conductores, cada uno con una superficie expuesta al lado del otro, pero separados por una lámina de material aislante llamado dieléctrico.

Calidad de Energía Eléctrica: Energía dentro de parámetros normalizados como tensión, frecuencia y forma de onda.

Concesionaria: Persona natural o jurídica que cuenta con contrato de concesión de distribución eléctrica suscrito con el Ministerio de Energía y Minas, para brindar el servicio público de electricidad dentro de un área determinada.

Conexión Eléctrica (CE): Conjunto de componentes requeridos para el suministro de electricidad a los usuarios del servicio público de electricidad desde las instalaciones de la concesionaria. Comprende la acometida, caja de medición, protección eléctrica y equipo de medición.

Deficiencia: Estado de un componente del punto de inspección que incumple con las especificaciones de las normas y reglamentos vigentes.

DIgSILENT PowerFactory: Programa de cálculo de redes eléctricas y simulación digital. En tanto, DIgSILENT establece normas y tendencias en el modelado de sistemas de potencia, análisis y simulación. PowerFactory se utiliza ampliamente en estudios de generación, transmisión, distribución y redes industriales.

Distorsión Armónica: Flujo eléctrico sinusoidal compuesto de distintas frecuencias, múltiplos mayores de la frecuencia fundamental que aparece sobre algunas partes del sistema eléctrico.

Distorsión Armónica Total (THD): Este término ha entrado en el uso común para definir el factor de distorsión de tensión o corriente.

Energía Reactiva (Q): El producto de la tensión, la corriente, y el seno del ángulo entre ellos. En redes pasivas, la energía reactiva representa el intercambio alterno de la energía almacenada (inductiva o capacitiva) entre dos áreas.

Espectro Armónico: Es una representación que permite conocer las amplitudes y ángulos de desfases relativos de cada una de las componentes senoidales que integran a la señal distorsionada.

Frecuencia: Número de ondulaciones de un movimiento vibratorio en la unidad de tiempo.

Impedancia: Se define como la razón del voltaje fasorial a la corriente fasorial y se simboliza con la letra Z. Es una cantidad compleja cuya unidad es ohm.

Inductor: Es un elemento pasivo capaz de mantener y entregar cantidades finitas de energía, se simboliza con la letra L y su unidad es el Henrio.

Instalación de Baja Tensión: Comprende la línea y equipos de baja tensión (igual o inferior a 1 kV); está incluido el subsistema de distribución secundaria y las instalaciones de alumbrado público.

Modulación por ancho de pulsos (PWM): Es una señal o fuente de energía; es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una senoidal o una cuadrada), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

Nodo de Enlace: Punto de vinculación o conexión entre un tramo de media tensión y la subestación de distribución. Se utiliza para determinar la topología y conectividad de las instalaciones de distribución eléctrica.

Potencia activa (P): Es la que se aprovecha como potencia útil, también se llama potencia media, real o verdadera y es debida a los dispositivos resistivos.

Potencia aparente (S): Es la potencia total consumida por la carga y es el producto de los valores eficaces de tensión e intensidad. Se obtiene como la suma vectorial de las potencias activa y reactiva y representa la ocupación total de las instalaciones debida a la conexión del receptor.

Potencia reactiva (Q): Es la potencia que necesitan las bobinas (inductor) y los condensadores (capacitor) para generar campos magnéticos o eléctricos, pero que no se transforma en trabajo efectivo, sino que fluctúa por la red entre el generador y los receptores.

Red de Distribución Eléctrica: Es un conjunto de elementos interconectados para suministrar energía eléctrica desde las centrales de generación a los puntos de consumo.

Subestación de Distribución (SED): Conjunto de instalaciones para la transformación de tensión que recibe de una red de distribución primaria y la entrega a una red de distribución secundaria, instalaciones de alumbrado público o a usuarios. Comprende el transformador y los equipos de maniobra, protección, medición y control, tanto en el lado primario como en el secundario, y eventualmente edificaciones para albergarlos.

Suministrador: Es el propietario del sistema de distribución eléctrica y es responsable de entregar una calidad de energía sin distorsión armónica de tensión.

Usuario: Es el responsable de no contaminar al sistema de distribución eléctrica con distorsiones de corriente armónica.

CAPÍTULO III

3 SITUACIÓN ACTUAL DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS EN EL SED 598

3.1 Subestación Dolorespata

En la barra de 10.6kV de la S.E Dolorespata se encuentran los 9 alimentadores que distribuyen la energía eléctrica a la zona norte de la ciudad del Cusco a través de las redes de Electro Sur Este S.A.A. En el diagrama unifilar del Sistema SCADA del Sistema de Control de la figura N° 3.1 se puede apreciar todos los parámetros eléctricos.

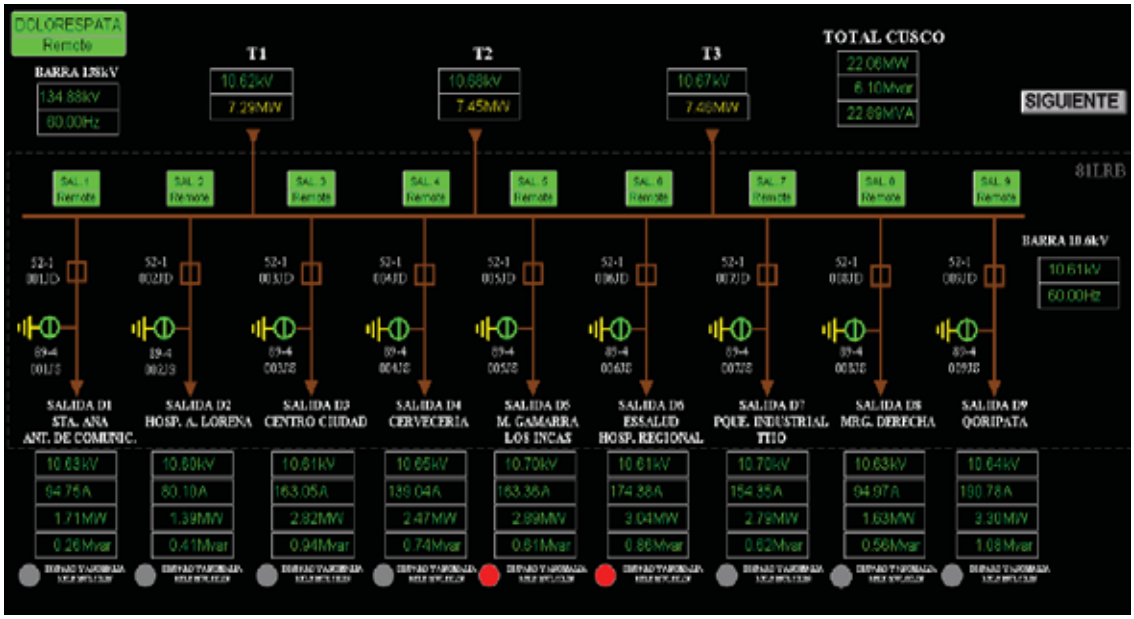


Figura N° 3.1 – Diagrama unifilar de los nueve alimentadores de la S.E. Dolorespata.

Fuente: *Sistema SCADA, Centro de Control S.E. Dolorespata, (EGEMSA).*

Los alimentadores que se muestra en la figura N° 3.1, son los que abastecen a los diferentes lugares de la zona norte de la ciudad del Cusco. El alimentador DO08 que tiene una tensión de 10.6kV es quien abastece al SED 598, a continuación, se muestra la Tabla N° 3.1:

Tabla N° 3.1 – Los nueve alimentadores de la S.E. Dolorespata que abastece a los diferentes lugares de la zona norte de la ciudad del Cusco.

Alimentador	kV	Zonas importantes
DO01	10.6	Av. Antonio Lorena, Almudena, independencia, Picchu Alto, Ccorca, Ticatica, Llaullipata.
DO02	10.6	Huancaro, Zarzuela, Manahuañunca, Estrella, Chocco, Herapata, Huamancharpa, Cachona.
DO03	10.6	Av. Sol, Palacio de Justicia, Banco de la Nación, Plaza de Armas, Saphy, Arcopata, Av. Apurímac, Huaynapata.
DO04	10.6	Av. Huáscar, Mercado Wánchaq, San Agustín, San Blas, Sapantiana, Sacsayhuamán, Tambomachay.
DO05	10.6	Infancia, Estadio Garcilaso, Ucchullo, Tahuantinsuyo, Balconsillo, Alto los Incas, huayracpunku.
DO06	10.6	Av. los Incas, Mariscal Gamarra, Av. Collasuyo, Unsaac, Hospital Regional, Magisterio, Marcavalle, Santa Mónica.
DO07	10.6	Progreso, Huayruropata, Hospital Seguro Social, Vía Expresa, Parque Industrial, Santa Úrsula.
DO08	**10.6**	**Ttio, Arahuay, Viva el Perú, Primero de Enero, Terminal Terrestre, El Molino, Margen derecha, Molleray.**
DO09	10.6	Av. Ejército, Coripata, Santiago, Calle Ayacucho, Plaza San Francisco, Calle Pera.

Fuente: *Datos del Centro de Control S.E. Dolorespata, (EGEMSA).*

3.2 Datos técnicos del SED 598

3.2.1 Transformador de 250kVA

Tabla N° 3.2 – Características técnicas y de operación del transformador.

Características técnicas		Datos de operación	
Número de serie	493646	Refrigeración	ONAN
Marca	ALSTHOM ATLANTIQUE	Frecuencia (Hz)	60
Potencia (kVA)	250	Posición del conmutador	263
Tensión nominal (kV)	10.5±2x2.5%/0.23	Tensión A.T. (kV)	10.5
Zcc (%), según placa	4	Tensión B.T. (kV)	0.23
Grupo de conexión	Dyn11		

Fuente: *Elaboración propia.*

3.3 Descripción del equipo de medición

3.3.1 Características del Analizador de redes

El A-BERLE GLOBAL NET QUALITY es un equipo diseñado para realizar mediciones de calidad de energía en un punto determinado de una red. Este quipo consta de 9 canales, lo cual hace posible medir tensiones y corrientes en las tres fases y el neutro, a su vez, este equipo permite una diversidad de mediciones y se ajusta a lo establecido por la norma nacional NTCSE [18] y éste se encuentra en la relación de equipos cuyas características técnicas están aprobadas por OSINERGMIN para la medición de la calidad de energía. Dicho analizador de redes se puede observar en el Anexo N° 7.

Figura N° 3.2 – Equipo de medición "A-Eberle" modelo PQ-Box 100 Expert.

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla N° 3.3 – Datos generales del analizador de redes PQ-Box 100 Expert.

Datos generales			
Marca	A-EBERLE	Año	2015
Modelo	PQ-BOX 100 Expert	Alimentación	220V
Serie	M1211-105	Frecuencia	60Hz
Tipo	4U/4I	Software	WinPQ movil

Fuente: *Placa de características del analizador de redes M1211-105.*

Tabla N° 3.4 – Datos complementarios del analizador de redes PQ-BOX 100 Expert.

Tensión	
Entrada	230mV hasta 690Vrms
Precisión	< 0.1% desde 10% al 150% de la Vn
Impedancia	2MΩ a tierra
Capacitancia	< 30pf
Frecuencia	50/60Hz
Corriente	
Entrada	0 hasta 3000Arms
Precisión	±0.5
Impedancia	2MΩ a tierra
Capacitancia	< 30pf
Datos complementarios	
Número de canales	9 (4 tensión, 4 corriente, 1 tierra)
Velocidad de muestreo	10.24kHz a 50Hz
Onda base	45Hz a 65Hz
Intervalos de medida	ajustable en un rango de 1s hasta 30 min
Memoria de datos	2GB
Interfaces	USB 2.0
Sincronización del tiempo	DCF77 o radiorreloj GPS
Dimensiones	220x146x57mm
Tipo de protección	IP 65
IEC 61000-4-30	Clase A
Precisión	< 0.1%
Clase de aislamiento	Cat IV
Convertidor A/D	24 Bits
Display	con iluminación de fondo
Memoria de eventos	1600 eventos simultáneos de V y I
Medición de armónicos	hasta la 40 armónica (ángulo de fase y magnitud)

Fuente: *Datos del folleto del analizador de redes.*

Este analizador de redes, registra valores instantáneos de armónicas de tensión y corriente; además, realiza mediciones de: Potencia Activa, Potencia Reactiva, Potencia Aparente, Factor de Potencia, CosØ, Potencia de Distorsión, Frecuencia, Flicker y otros.

Figura N° 3.3 – Equipo analizador de redes "A-Berle" y sus terminales para medir tensión y corriente.

Fuente: *Elaboración propia.*

3.3.2 Registro de la medición

Los reportes de los datos de las mediciones fueron obtenidos de la Oficina de Control de Calidad de la empresa Electro Sur Este S.A.A. Los documentos enviados a la empresa se pueden observar en el Anexo N° 3.

3.4 Carga existente en el SED 598

La carga en el SED 598 es netamente comercial, en donde presenta un comportamiento constante, presentándose un consumo máximo entre las 18:00 a 19:00 horas y un mínimo consumo entre las 5:00 a 6:00 horas, donde se puede apreciar que los mayores picos de demanda están comprendidos de miércoles a domingo por ser esos días de mayor actividad comercial y los días de menor demanda son los días lunes y martes. Tal como se puede apreciar en la Figura N° 3.5.

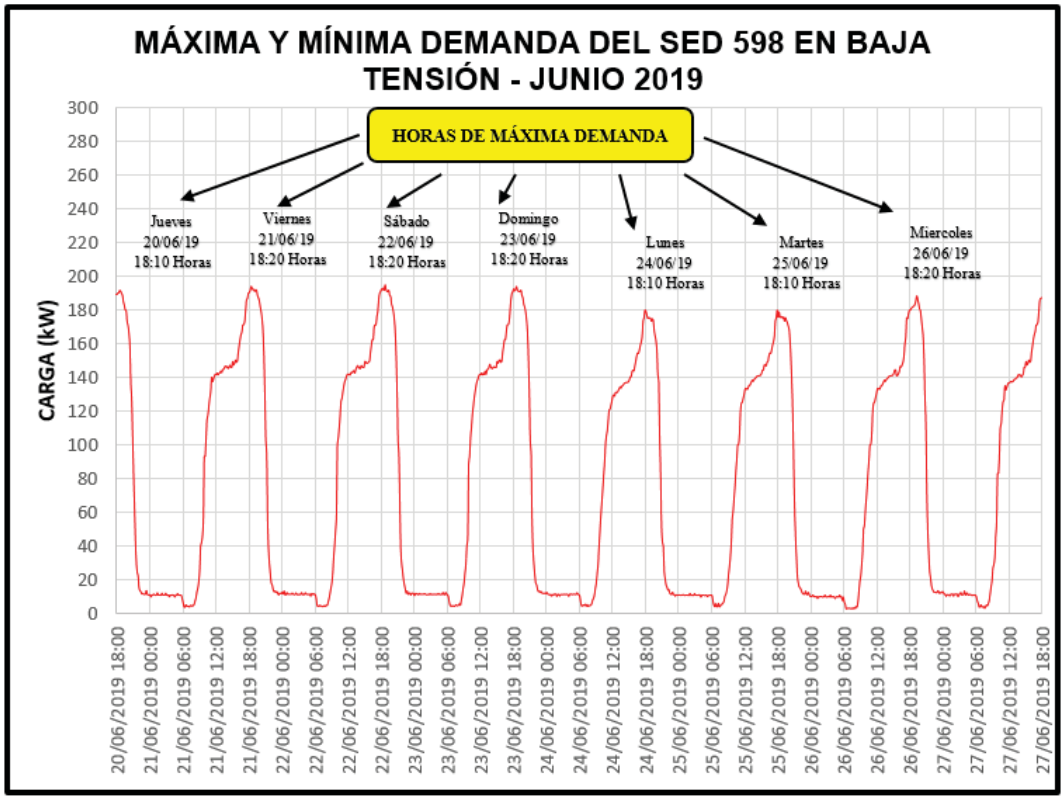


Figura N° 3.4 – Niveles de demanda máxima y mínima en el lado de baja tensión del SED 598 de fecha 20/06/2019 al 27/06/2019.

Fuente: *Elaboración propia.*

En la siguiente tabla, se muestra el registro de máximas demandas ocurridas entre el 20/06/2019 y el 27/06/2019, periodo en el cual se realizó la medición en el SED 598.

Tabla N° 3.5 – Valores de máxima demanda ocurridas entre el 20/06/2019 y el 26/06/2019.

Máxima demanda (kW)		
Día	**Fecha y hora**	**Valor máximo**
Jueves	20/06/2019 - 18:10:00h	191.73
Viernes	21/06/2019 - 18:20:00h	193.16
Sábado	22/06/2019 - 18:20:00h	194.82
Domingo	23/06/2019 - 19:20:00h	192.38
Lunes	24/06/2019 - 18:10:00h	178.75
Martes	25/06/2019 - 18:10:00h	186.44
Miércoles	26/06/2019 - 18:20:00h	188.21

Fuente: *Elaboración propia.*

3.4.1 Análisis de resultados de la medición de las corrientes armónicas

Comenzamos con los resultados de las corrientes armónicas, ya que éste, es el punto de partida del problema de las distorsiones.

La norma internacional IEEE Std 519-2014 [1] estipula los límites de la distorsión armónica individual y total de corriente, la cual se muestra en la Tabla N° 2.10 del Capítulo II. Para el análisis de los resultados, se evalúa el comportamiento de la corriente armónica bajo la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1], la cual considera la corriente de cortocircuito (I_{SC}) del tamaño relativo del SED 598 y la corriente de máxima demanda (I_L).

Con los resultados obtenidos, es necesario precisar la relación de cortocircuito (SCR) en el punto de conexión común (PCC), para este caso, el PCC se encuentra en el lado de baja tensión del SED 598, donde se conecta la carga del Centro Comercial "El Molino I".

Cabe precisar que el cálculo de la corriente de cortocircuito fue a través del software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7, cuyo resultado fue 16.736kA (Anexo N° 5) y una corriente de carga máxima de 0.469kA registrado el día 22/06/2019 a las 18:20h.

La tabla 3.6, nos muestra el registro de las distorsiones armónicas individuales de corriente que se extrajeron del analizador de redes PQ-Box 100 Expert, serie M1211-105; del orden 2 hasta el orden 20, estas mediciones fueron hechas del 20/06/2019 - 18:00:00h hasta el 27/06/2019 - 18:00:00h; cabe mencionar que los datos mostrados son los valores máximos que se registraron por cada línea, en valores porcentuales de la onda fundamental.

Tabla N° 3.6 – Resultados de las distorsiones armónicos individuales de corriente (2° - 20°) *en el SED 598.*

Resultados de medición (2° - 20°) evaluados del 20/06/2019 al 27/06/2019				
Orden armónico	**Registro máx. Línea "R" (%)**	**Registro máx. Línea "S" (%)**	**Registro máx. Línea "T" (%)**	**Límite IEEE Std 519-2014 (%)**
2°	0.526	0.627	0.551	1.750
3°	**7.055**	**7.041**	**7.017**	**7.000**
4°	0.234	0.277	0.309	1.750
5°	**12.641**	**12.925**	**12.791**	**7.000**
6°	0.131	0.162	0.127	1.750
7°	**7.121**	**7.235**	**7.333**	**7.000**
8°	0.073	0.076	0.074	1.750
9°	2.807	2.923	2.721	7.000
10°	0.038	0.045	0.041	0.875
11°	**3.542**	**3.549**	**3.521**	**3.500**
12°	0.011	0.011	0.013	0.875
13°	1.250	1.178	1.057	3.500
14°	0.000	0.000	0.000	0.875
15°	0.000	0.000	0.000	3.500
16°	0.000	0.000	0.000	0.625
17°	0.346	0.360	0.335	2.500
18°	0.000	0.000	0.000	0.625
19°	0.201	0.209	0.195	2.500
20°	0.000	0.000	0.000	0.625

Fuente: *Electro Sur Este S.A.A. – Oficina de Control de Calidad - Analizador de redes PQ-Box 100 Expert.*

La tabla 3.7, nos muestra el registro del HD_i y TDD que se extrajeron del analizador de redes PQ-Box 100 Expert, serie M1211-105; del orden 21 hasta el orden 40, estas mediciones fueron hechas del 20/06/2019 - 18:00:00h hasta el 27/06/2019 - 18:00:00h.

Tabla N° 3.7 – Resultados de las distorsiones armónicos individuales y total de corriente (21° - 40°) en el SED 598.

Resultados de medición (21° - 40°) evaluados del 20/06/2019 al 27/06/2019

Orden armónico	Registro máx. Línea "R" (%)	Registro máx. Línea "S" (%)	Registro máx. Línea "T" (%)	Límite IEEE Std 519-2014 (%)
21°	0.000	0.000	0.000	2.500
22°	0.000	0.000	0.000	0.625
23°	0.055	0.055	0.055	2.500
24°	0.000	0.000	0.000	0.250
25°	0.017	0.017	0.017	1.000
26°	0.000	0.000	0.000	0.250
27°	0.000	0.000	0.000	1.000
28°	0.000	0.000	0.000	0.250
29°	0.000	0.000	0.000	1.000
30°	0.000	0.000	0.000	0.250
31°	0.000	0.000	0.000	1.000
32°	0.000	0.000	0.000	0.250
33°	0.000	0.000	0.000	1.000
34°	0.000	0.000	0.000	0.125
35°	0.000	0.000	0.000	0.500
36°	0.000	0.000	0.000	0.125
37°	0.000	0.000	0.000	0.500
38°	0.000	0.000	0.000	0.125
39°	0.000	0.000	0.000	0.500
40°	0.000	0.000	0.000	0.125
TDD	**16.816**	**17.094**	**16.974**	**8.000**

Fuente: *Electro Sur Este S.A.A. – Oficina de Control de Calidad – Analizador de redes PQ-Box 100 Expert.*

Ahora con los datos obtenidos, se procederá a graficar los resultados de las corrientes armónicas para su diagnóstico correspondiente.

En la Figura N° 3.5, se muestra el espectro de las distorsiones armónicas individuales y la distorsión armónica total de corriente, las cuales son contrastados con la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1].

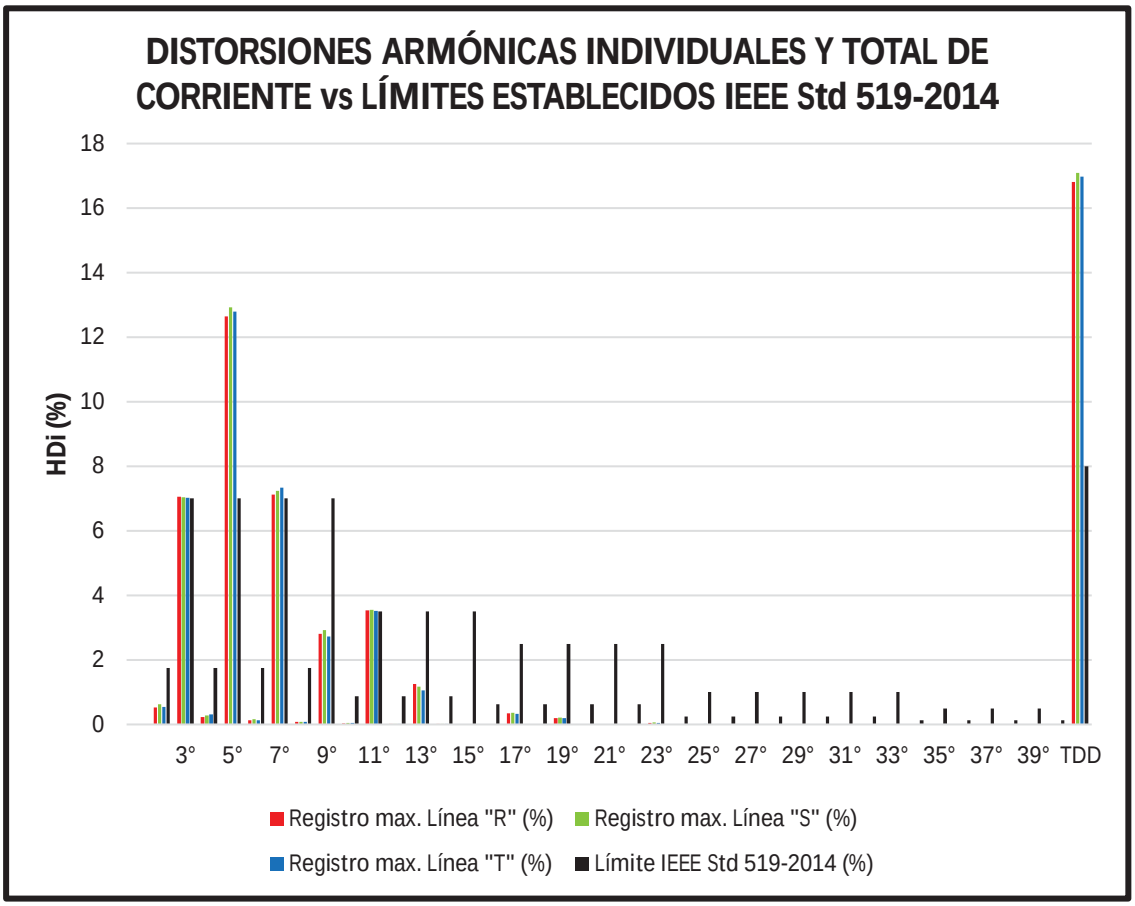


Figura N° 3.5 – Espectro de las corrientes armónicas individuales y total según la IEEE Std 519-2014.

Fuente: *Elaboración propia.*

Según la figura N° 3.5, se observa que el HD_i y TDD, no se encuentran dentro de los límites establecido por la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1].

De la gráfica anterior, se obtienen los siguientes resultados.

Tabla N° 3.8 – Resultados de las distorsiones armónicas individuales de corriente que prevalecen en el SED 598.

Indicador	3er armónico	5to armónico	7mo armónico	11avo armónico
Línea "R" (%)	7.055	12.641	7.121	3.542
Línea "S" (%)	7.041	12.925	7.235	3.549
Línea "T" (%)	7.017	12.791	7.333	3.521
IEEE 519-2014 TDD (%)	**7.000**	**7.000**	**7.000**	**3.500**

Fuente: *Elaboración propia.*

Como se puede apreciar en la tabla N° 3.8; estas corrientes armónicas se encuentran presentes en el SED 598 y además se encuentran fuera de los límites permisibles.

Cabe recordar que el estudio de la normatividad se hizo para las líneas (R, S, T) y además la carga de la red de distribución eléctrica no es balanceada.

3.4.2 Análisis de resultados de la medición de las tensiones armónicas

Para el análisis de los resultados obtenidos, se evalúa el comportamiento de la tensión; bajo las tolerancias establecidas por la norma nacional NTCSE [18]. Esta norma establece los aspectos, parámetros e indicadores sobre los que se evalúa la calidad de servicio de electricidad en el Perú. Los indicadores de calidad miden exclusivamente la calidad de producto, suministro, servicio comercial y alumbrado público; que entrega el suministrador a sus clientes. Nosotros nos avocaremos exclusivamente a la calidad de producto, dentro de ello esta las perturbaciones. La NTCSE [18] estipula los límites que se muestran en la Tabla N° 2.8 del Capítulo II. Así mismo, también, se evaluarán los resultados con la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1], que se muestran en la Tabla N° 2.9 del Capítulo II.

La tabla 3.9, nos muestra el registro de las distorsiones armónicas individuales de tensión que se extrajeron del analizador de redes PQ-Box 100 Expert, serie M1211-105; del orden 2 hasta el orden 20, estas mediciones fueron hechas del 20/06/2019 - 18:00:00h hasta el 27/06/2019 - 18:00:00h.

Tabla N° 3.9 – Resultados de las distorsiones armónicos individuales de tensión (2° - 20°) en el SED 598.

Resultados de medición (2° - 20°) evaluados del 20/06/2019 al 27/06/2019					
Orden armónico	**Registro máx. Líneas "R-S" (%)**	**Registro máx. Líneas "S-T" (%)**	**Registro máx. Líneas "T-S" (%)**	**Limite NTCSE (%)**	**Límite IEEE Std 519-2014 (%)**
2°	0.263	0.232	0.256	2.0	5.0
3°	1.394	1.776	1.742	5.0	5.0
4°	0.133	0.119	0.138	1.0	5.0
5°	2.890	2.910	2.914	6.0	5.0
6°	0.044	0.040	0.049	0.5	5.0
7°	2.213	1.983	1.976	5.0	5.0
8°	0.024	0.018	0.026	0.5	5.0
9°	0.420	0.402	0.389	1.5	5.0
10°	0.013	0.009	0.014	0.5	5.0
11°	1.014	1.004	1.008	3.5	5.0
12°	0.004	0.007	0.006	0.2	5.0
13°	0.662	0.495	0.566	3.0	5.0
14°	0.004	0.003	0.004	0.2	5.0
15°	0.031	0.031	0.031	0.3	5.0
16°	0.027	0.027	0.027	0.2	5.0
17°	0.443	0.446	0.442	2.0	5.0
18°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0
19°	0.297	0.299	0.296	1.5	5.0
20°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0

Fuente: *Electro Sur Este S.A.A. – Oficina de Control de Calidad - Analizador de redes PQ-Box 100 Expert.*

La tabla 3.10, nos muestra el registro del HD_v y THD_v, que se extrajeron del analizador de redes PQ-Box 100 Expert, serie M1211-105; del orden 21 hasta el orden 40, estas mediciones fueron hechas del 20/06/2019 - 18:00:00h hasta el 27/06/2019 - 18:00:00h.

Tabla N° 3.10 – Resultados de las distorsiones armónicas individuales y total de tensión (21° - 40°) en el SED 598.

Resultados de medición (21° - 40°) evaluados del 20/06/2019 al 27/06/2019					
Orden armónico	**Registro máx. Líneas "R-S" (%)**	**Registro máx. Líneas "S-T" (%)**	**Registro máx. Líneas "T-S" (%)**	**Limite NTCSE (%)**	**Límite IEEE Std 519-2014 (%)**
21°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0
22°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0
23°	0.091	0.091	0.091	1.5	5.0
24°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0
25°	0.035	0.036	0.035	1.5	5.0
26°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0
27°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0
28°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0
29°	0.000	0.000	0.000	0.6	5.0
30°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0
31°	0.000	0.000	0.000	0.6	5.0
32°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0
33°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0
34°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0
35°	0.000	0.000	0.000	0.6	5.0
36°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0
37°	0.000	0.000	0.000	0.5	5.0
38°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0
39°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0
40°	0.000	0.000	0.000	0.2	5.0
THDv	**4.150**	**4.164**	**4.159**	**8.000**	**8.000**

Fuente: *Electro Sur Este S.A.A. – Oficina de Control de Calidad - Analizador de redes PQ-Box 100 Expert.*

Ahora con los datos obtenidos, se procederá a graficar los resultados de las tensiones armónicas para su diagnóstico correspondiente.

En la Figura N° 3.6 y Figura N° 3.7 se muestra el espectro de las tensiones armónicas, contrastados con la norma nacional NTCSE [18] y la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1].

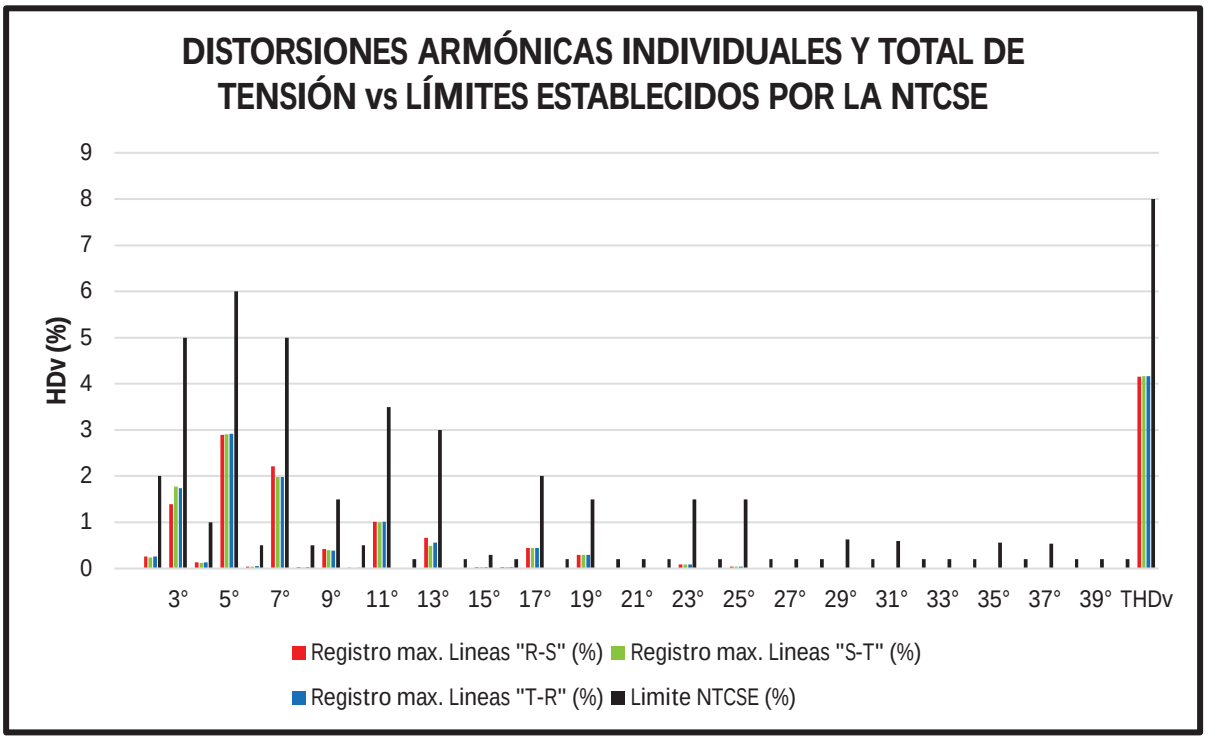


Figura N° 3.6 – Espectro de las tensiones armónicas individuales y total según la NTCSE.

Fuente: *Elaboración propia.*

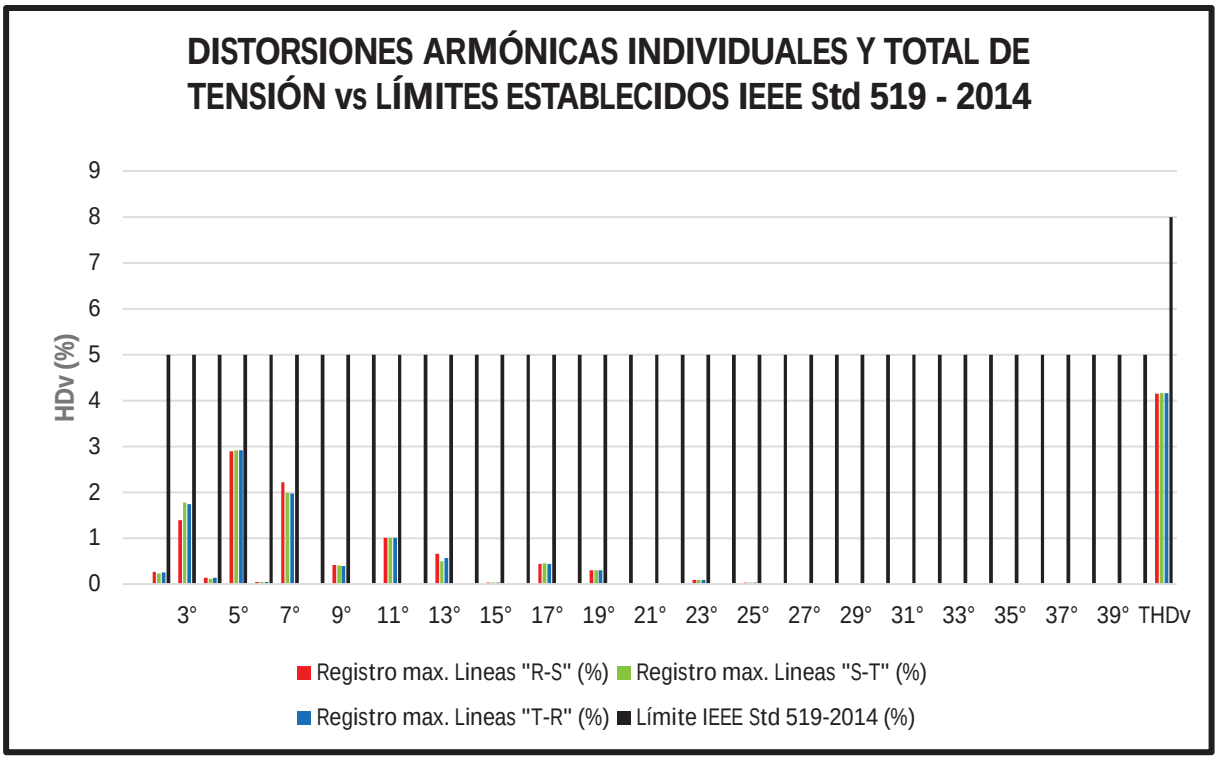


Figura N° 3.7 – Espectro de las tensiones armónicos individuales y total según la IEEE Std 519-2014.

Fuente: *Elaboración propia.*

Según la figura N° 3.6 y la figura N° 3.7, se observa que el HD_v y THD_v, se encuentran por debajo del límite establecido por la norma nacional NTCSE [18] y la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1].

Cabe recordar que el estudio de la normatividad se hizo para las líneas (R, S, T) y además la carga de la red de distribución eléctrica no es balanceada.

3.5 Conclusiones de los resultados obtenidos durante la medición de las corrientes armónicas y tensiones armónicas en el SED 598

Una vez realizado el análisis de los resultados obtenidos durante la medición de los armónicos en el SED 598, se concluye lo siguiente:

a) Respecto a las mediciones de las corrientes armónicas evaluados según la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1]

- El HD_i se encuentra presente en las tres líneas R, S y T son del orden 3°, 5°, 7° y 11°, las cuales no se encuentran dentro de los límites permisibles. El orden 3°, 5°, 7° deben ser ≤7% y del orden 11° ≤3.5%.
- El THD_i también se encuentra presente en las tres líneas y no se encuentran dentro de los límites permisibles. El THD_i debe ser ≤8%.

b) Respecto a las mediciones de las tensiones armónicas evaluados según la norma nacional NTCSE [18]

- El HD_v se encuentra presente en las tres líneas R, S y T son del orden 3°, 5°, 7° y 11° se encuentran dentro de los límites permisibles para todos los intervalos registrados en el PCC. El orden 3°, 5°, 7° sus porcentajes son variables.
- El THD_v también se encuentra presente en las tres líneas y se encuentran dentro de los límites permisibles. El THD_v debe ser ≤8%.

c) Respecto a las mediciones de armónicos de tensión evaluados según la norma internacional IEEE Std 519-2014

d) El HD_v se encuentra presente en las tres líneas R, S y T son del orden 3°, 5°, 7° y 11° se encuentran dentro de los límites permisibles para todos los intervalos registrados en el PCC. El orden 3°, 5°, 7° y 11° debe ser ≤5%.

e) El THD_v también se encuentra presente en las tres líneas y se encuentran dentro de los límites permisibles. El THD_v debe ser ≤8%.

CAPÍTULO IV

4 MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE DIGSILENT POWERFACTORY 15.1.7

4.1 Aspectos generales y entorno del software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7

En este capítulo, conoceremos la forma de introducir los parámetros eléctricos del SED 598 al software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 y además aplicaremos lo que nos indica las normas; en dicha simulación podremos obtener una variedad de gráficos aplicando las normas NTCSE [18] y IEEE Std 519-2014 [1].

DIgSILENT PowerFactory 15.1.7, es un software de análisis de sistema de potencia principalmente para las aplicaciones en la generación, transmisión, distribución, como también, en sistemas industriales y comerciales. Ha sido diseñado como un avanzado e integrado paquete computacional interactivo dedicado al análisis de sistema de potencia y control, a fin de lograr los principales objetivos de planificación y optimización de operación.

Este software se aplica en el área de ingeniería eléctrica y nos permite efectuar estudios como:

- Creación de elementos de un sistema eléctrico.
- Cálculos de flujo de potencia, cortocircuito.
- Análisis de estabilidad transitoria, de tensión y pequeña señal.
- Protección y análisis de fallas conforme a las normas: IEC, VDE, ANSI, IEEE y otros.
- Despacho de potencia activa y reactiva.
- Interface con sistemas GIS y SCADA.
- Flujo de Armónicos, dimensionamiento de filtros.
- Lenguaje de Programación DPL, entre otras aplicaciones.

4.1.1 Descripción de la interfaz

Comenzamos presentando una pequeña representación de la interfaz del usuario. La ventana principal del DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 posee las siguientes tareas de trabajo que se muestran en la Figura N° 4.1.

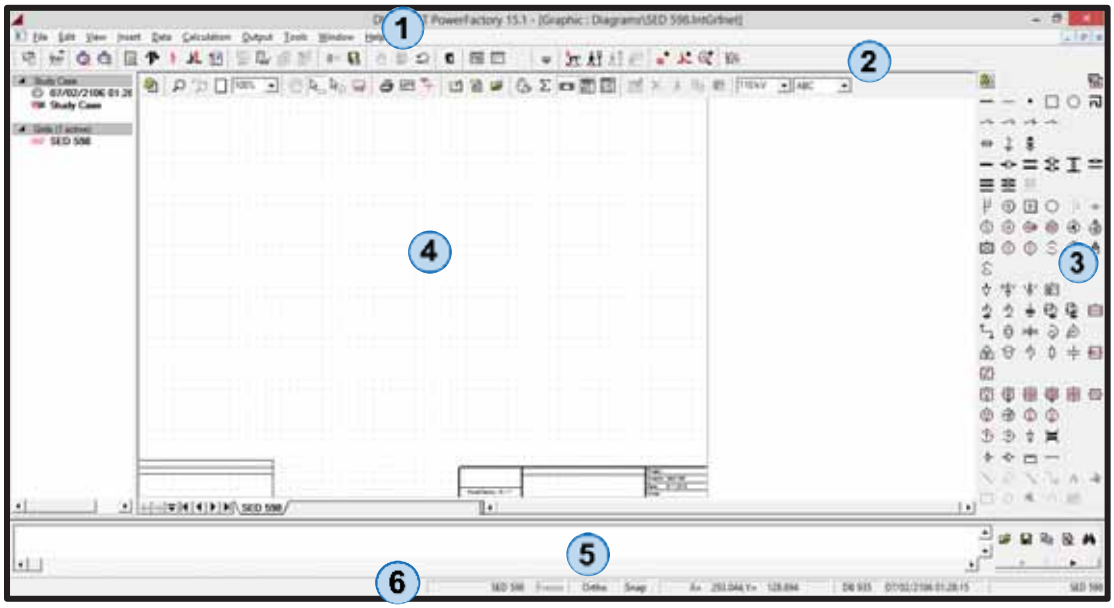


Figura N° 4.1 – Zona de trabajo del DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 y partes que la forman.

Fuente: *Elaboración propia.*

1) Barra de Menú Principal.

2) Barra de Herramientas de Ejecución.

3) Barra de Herramientas de Dibujo.

4) Espacio de Trabajo (Workspace).

5) Ventana de salida.

6) Barra de Estado (*statusbar*).

4.2 Modelamiento digital del SED 598 con el Software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7

Para comenzar a desarrollar el modelo eléctrico en este software, el primer paso es introducir el símbolo de la barra al espacio de trabajo y así sucesivamente el resto del circuito del SED 598; con la finalidad de incorporar los modelos correspondientes de cada elemento y sus características propias de funcionamiento. El resto del sistema se modela mediante la red equivalente.

Es importante mencionar que los componentes modelados, deben de ser como en la realidad, por tal motivo se debe colocar los datos correspondientes a los elementos que van a estar involucrados en las simulaciones. A continuación, se muestra el diagrama unifilar a simular.

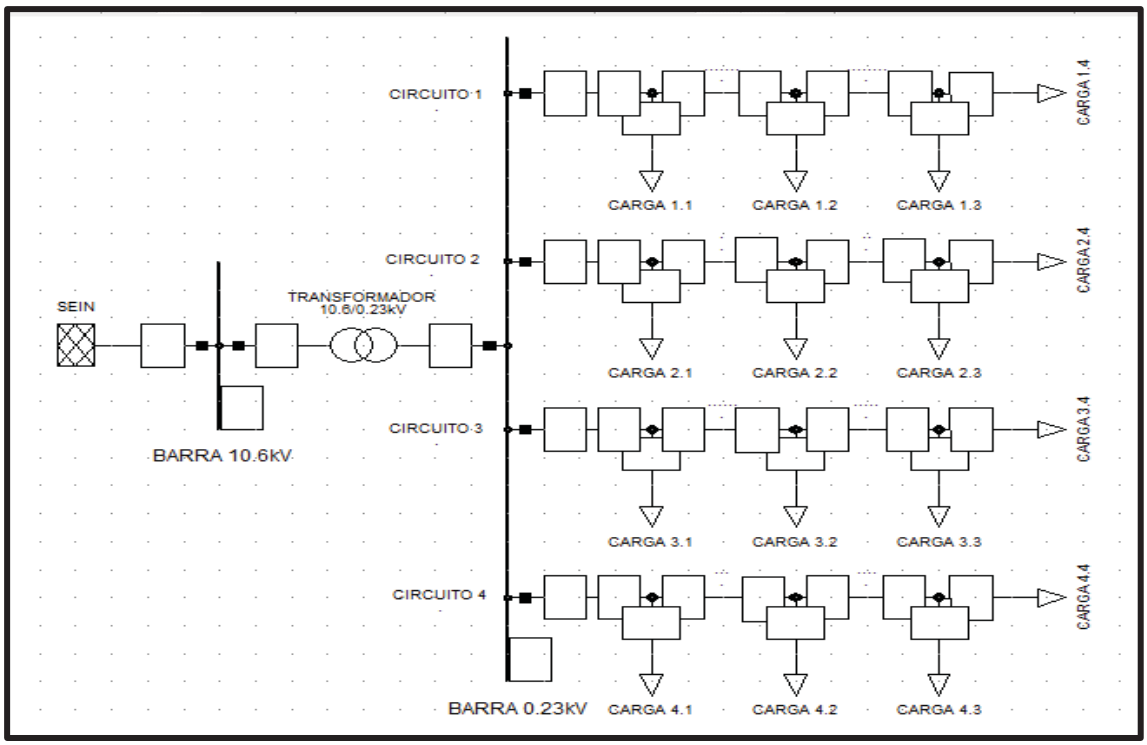


Figura N° 4.2 - Diagrama unifilar del SED 598 en baja tensión.

Fuente: *Elaboración propia.*

A continuación, se procede a modelar los elementos que forman parte del SED 598, poniendo mayor consideración en las corrientes armónicas (carga).

4.2.1 Modelamiento de las barras

Barra de 10.6kV

Esta barra corresponde a media tensión, llega mediante tres conductores desnudos de AAAC, la misma que se encuentra suspendida en el aire a través de postes de concreto, la longitud aproximada de esta línea es 1km de distancia desde la S.E. Dolorespata hasta el SED 598.

Es importante iniciar el modelo del circuito del SED 598, con la creación de las barras, ya que éste, admite el vínculo con los demás elementos del circuito. En la siguiente figura se muestra gráficamente la representación de este elemento en el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7.

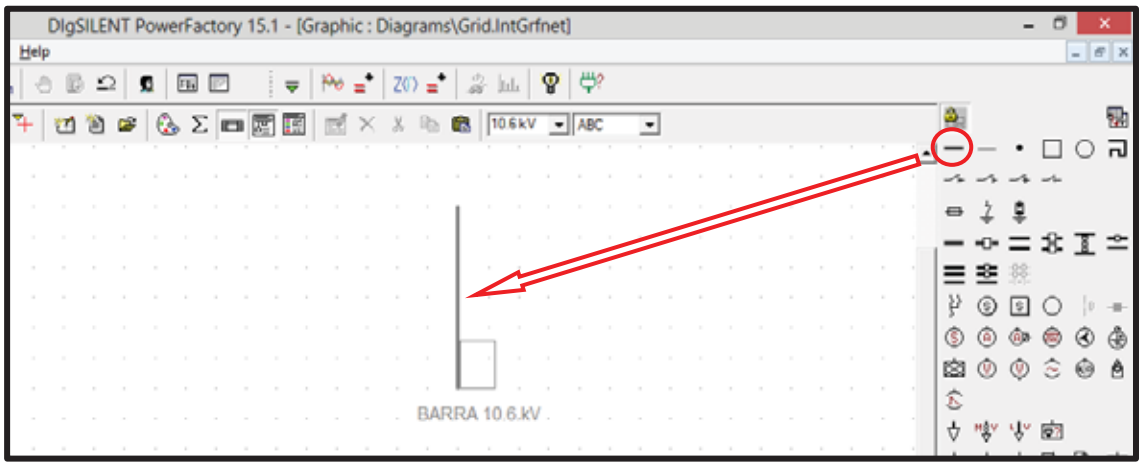


Figura N° 4.3 – Modelamiento en DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 de una barra de 10.6kV.

Fuente: *Elaboración propia.*

Para poder introducir los parámetros eléctricos, se hace doble clic sobre la barra insertada, y enseguida aparece una ventana como la que aparece en la siguiente figura.

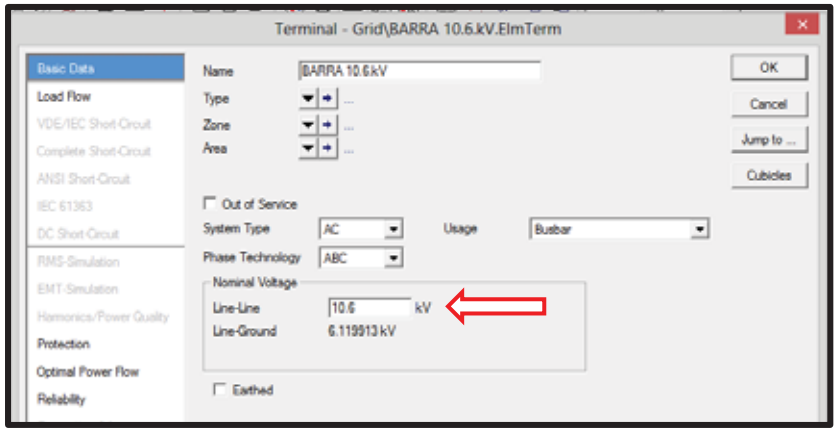


Figura N° 4.4 – Ventana para introducir los parámetros eléctricos de la barra 10.6kV.

Fuente: *Elaboración propia.*

Barra de 0.23kV

La tensión de 0.23kV vamos a representar mediante una barra para simular. En la siguiente figura se muestra gráficamente la representación de este elemento en el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7.

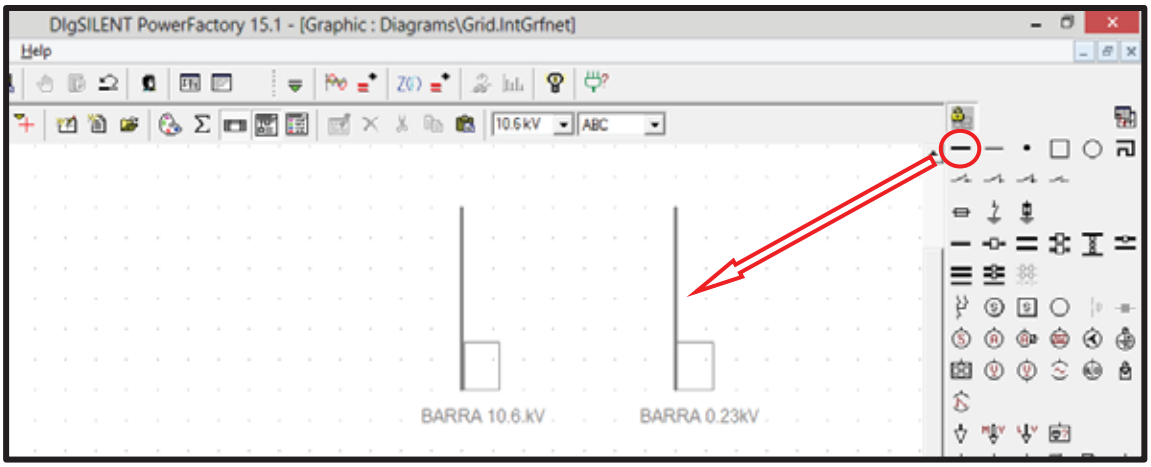


Figura N° 4.5 – Modelamiento en DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 de una barra de 0.23kV.

Fuente: *Elaboración propia.*

De igual manera, para poder introducir los parámetros eléctricos, se hace doble clic sobre la barra insertada y enseguida aparece una ventana como la que aparece en la siguiente figura.

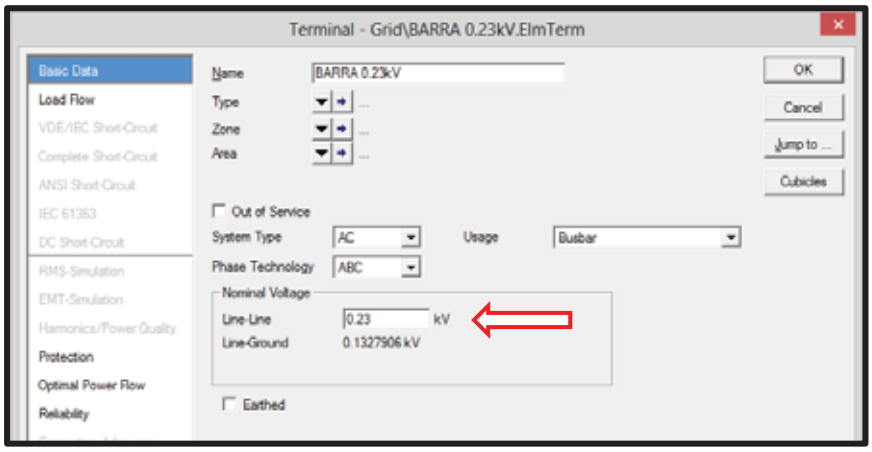


Figura N° 4.6 – Ventana para introducir los parámetros eléctricos de la barra 0.23kV.

Fuente: *Elaboración propia.*

4.2.2 Modelamiento del transformador de distribución

El SED 598 cuenta con un transformador trifásico de dos devanados, cuya potencia nominal es 250kVA y su relación de transformación es 10.5/0.23kV.

Para el modelo del transformador en DIgSILENT PowerFactory 15.1.7, se debe tomar en cuenta el tipo de transformador con todas sus características que forma parte del circuito.

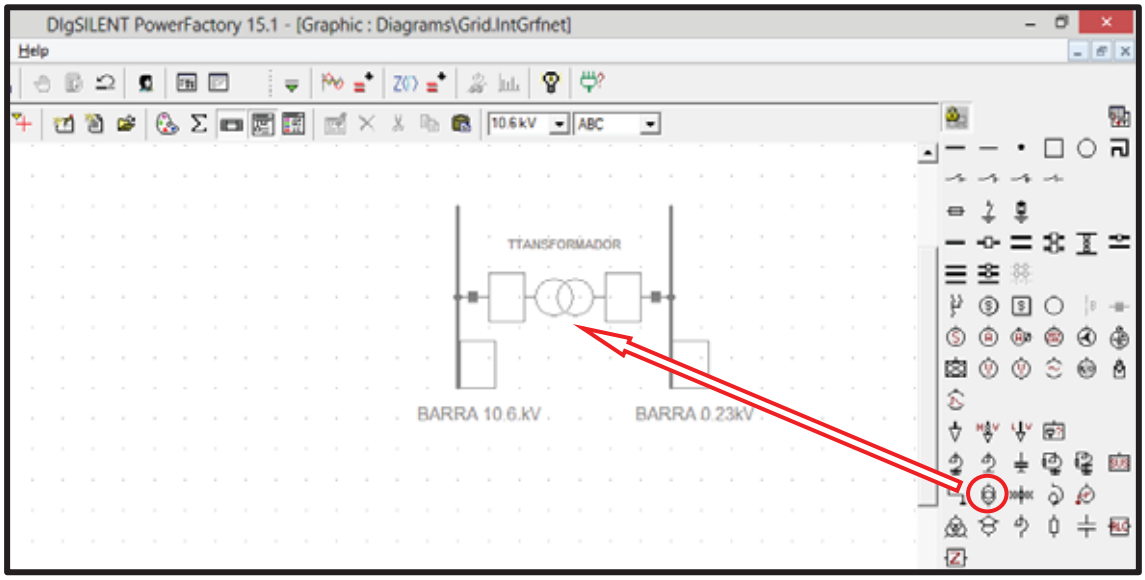


Figura N° 4.7 – Modelamiento en DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 del transformador de distribución.

Fuente: *Elaboración propia.*

Teniendo en cuenta la placa de características del transformador que se tiene, se procede a introducir los parámetros eléctricos en el modelo digital, para ello, se hace doble clic sobre el símbolo del transformador insertado y enseguida aparece una ventana como la que aparece en la siguiente figura.

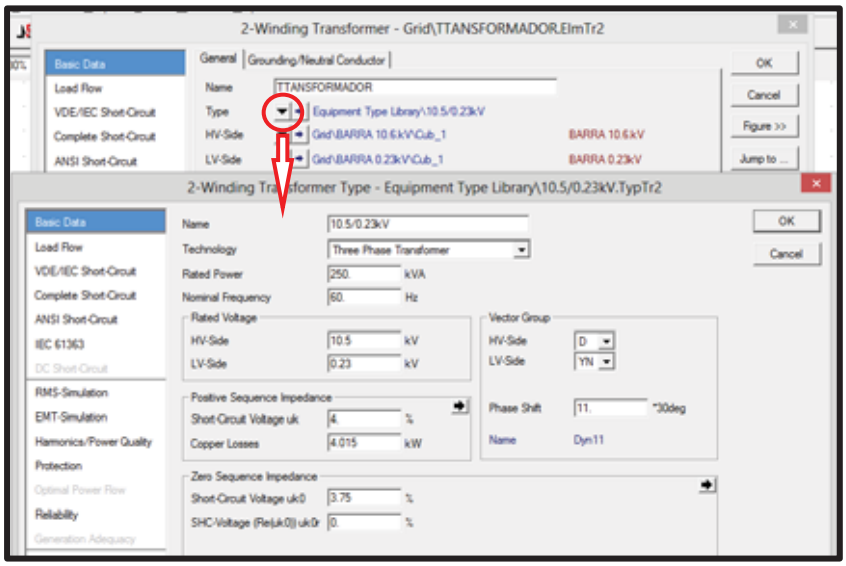


Figura N° 4.8 – Ventanas para introducir los parámetros eléctricos del transformador de distribución.

Fuente: *Elaboración propia.*

4.2.3 Modelamiento de la red equivalente

Es la representación de un sistema complejo a un sistema simple, este sistema tiene las mismas características en sus terminales, como: tensión, corriente y otros.

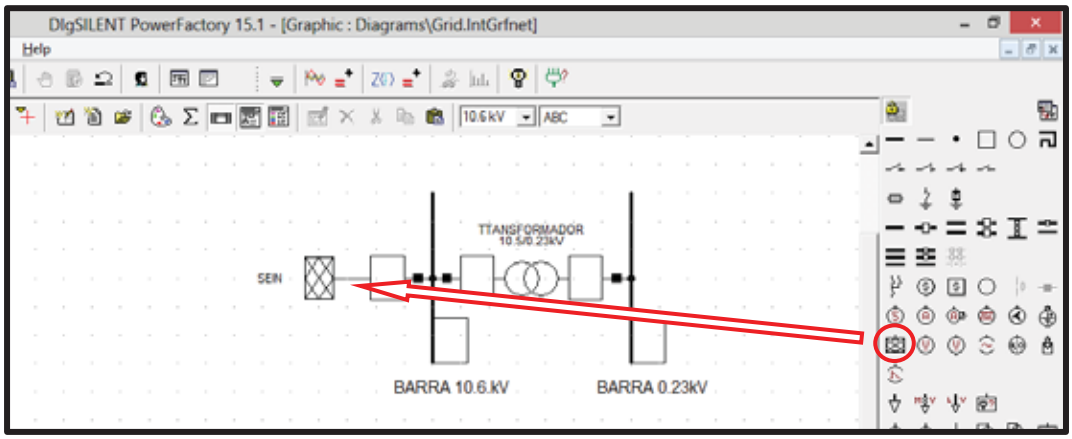


Figura N° 4.9 – Modelamiento en DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 la red equivalente - SEIN.

Fuente: *Elaboración propia.*

Para poder introducir los parámetros eléctricos de la red equivalente, se realiza los cálculos de cortocircuito trifásico y monofásico. Los datos fueron obtenidos de la tesis "Evaluación de Armónicos en los Bancos de Capacitores de la Subestación Eléctrica de Dolorespata" presentado por el Br. Williams Ezequiel Ligas Nina [4]. El cálculo detallado es mostrado en el Anexo N° 4.

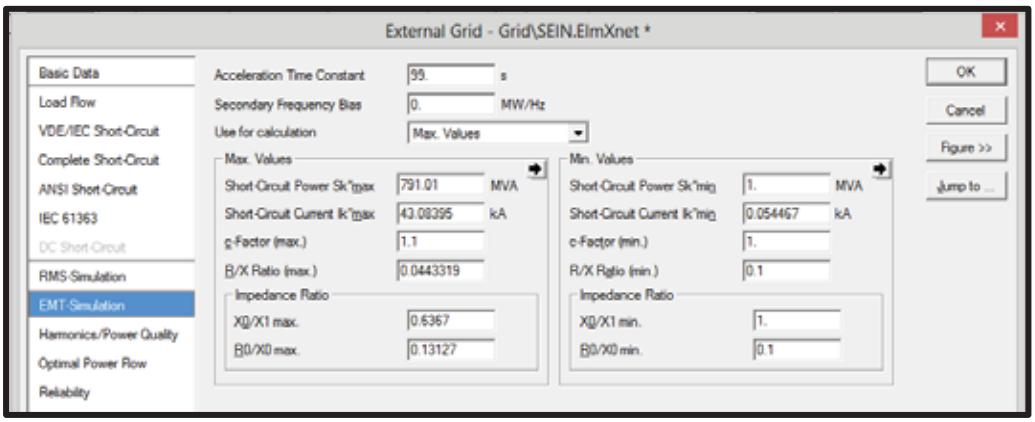


Figura N° 4.10 – Ventana para introducir los parámetros eléctricos de la red equivalente.

Fuente: *Figura N° 4.11 (Ligas, 2016, p. 103)* [4]

4.2.4 Modelamiento del flujo de carga con presencia de corrientes armónicas

Para poder realizar las simulaciones del flujo de carga con la presencia de las corrientes armónicas es necesario lo siguiente: representar la carga en la barra de 0.23kV que viene a ser la carga nominal de la corriente fundamental a 60Hz, y además adicionarle a la misma barra una fuente externa de corriente que representará las corrientes armónicas.

Se hace clic sobre el símbolo de la carga y luego se inserta al espacio de trabajo (Workspace) y se conecta a la barra de 0.23kV, ver figura N° 4.11. Una vez conectado, se hace doble clic sobre el símbolo insertado y enseguida aparece una ventana como la que aparece en la figura N° 4.12.

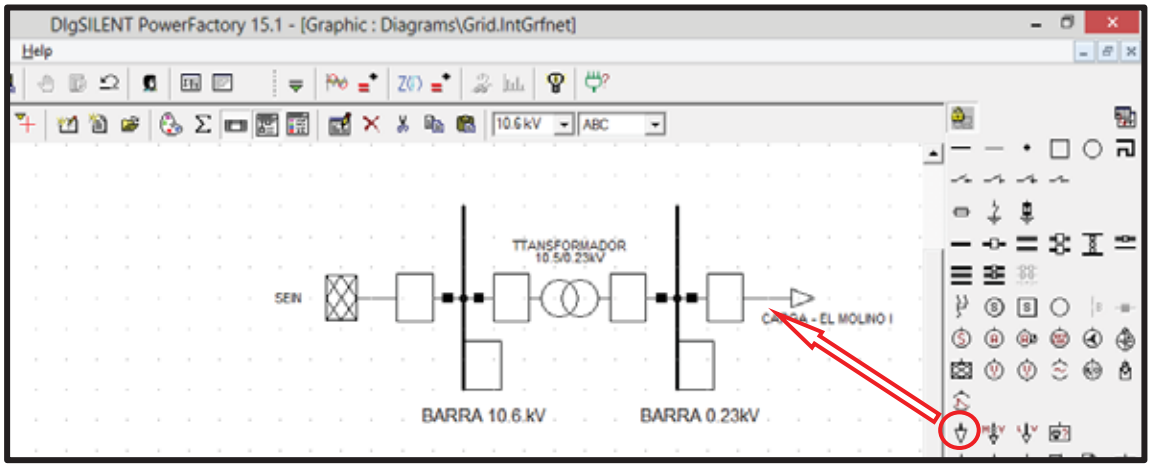


Figura N° 4.11 – Modelamiento en DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 de la carga correspondiente al Centro Comercial "El Molino I".

Fuente: *Elaboración propia.*

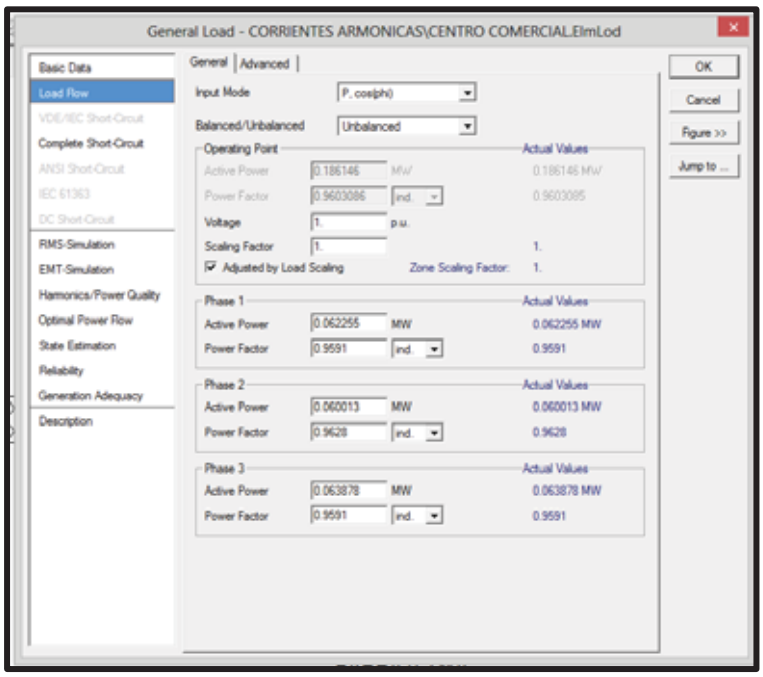


Figura N° 4.12 – Ventana para introducir los parámetros eléctricos de la carga desbalanceada.

Fuente: *Elaboración propia.*

Una vez introducido los parámetros de la carga desbalanceada, hacer clic en Ok. Ahora, hacer clic sobre el símbolo de la fuente externa (corriente armónica) y luego se inserta al espacio de trabajo (Workspace) y se conecta a la barra de 0.23kV, ver figura N° 4.13.

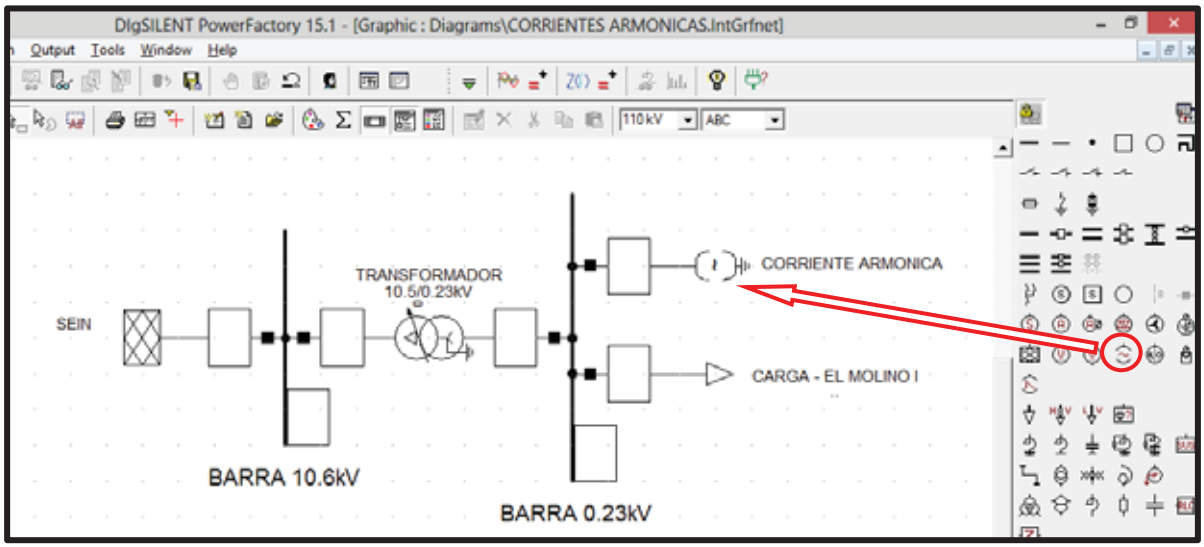


Figura N° 4.13 – Modelamiento en DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 de la fuente externa.

Fuente: *Elaboración propia.*

Una vez conectado, se hace doble clic sobre el símbolo insertado y enseguida aparece una ventana como la que aparece en la figura N° 4.14.

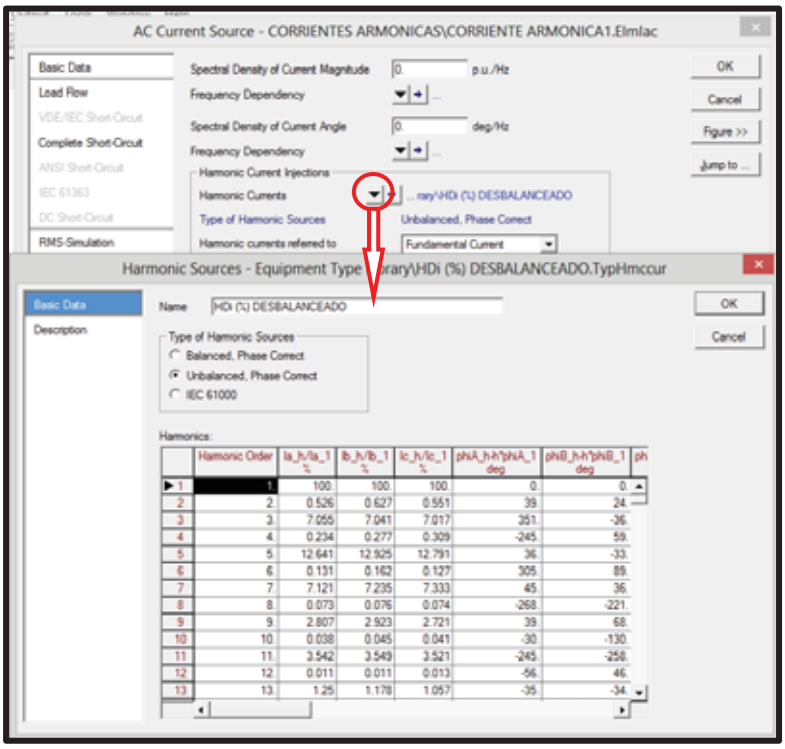


Figura N° 4.14 – Ventanas para introducir las corrientes armónicas de la fuente externa.

Fuente: *Elaboración propia.*

4.2.5 Modelamiento del circuito completo

Una vez de haber concluido con el modelado de cada uno de los elementos correspondientes para la simulación del SED 598, se muestra el siguiente circuito en el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7:

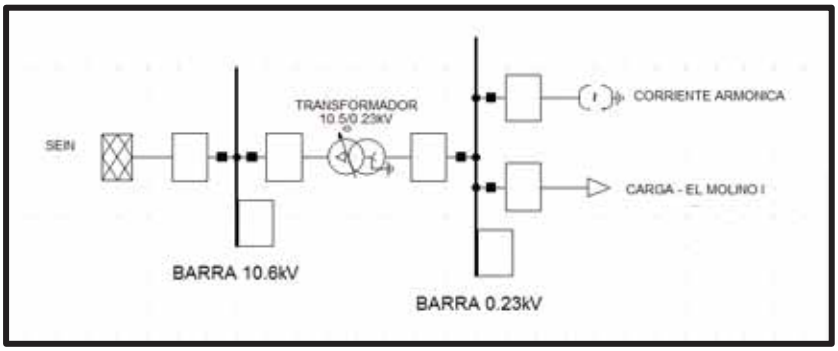


Figura N° 4.15 – Modelamiento en DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 el circuito completo del SED 598.

Fuente: *Elaboración propia.*

4.3 Simulación del barrido de frecuencia

La simulación se realizó con la presencia de las corrientes armónicas, ahora si se puede verse el gráfico en su verdadera magnitud, tal como se puede apreciar en la siguiente figura:

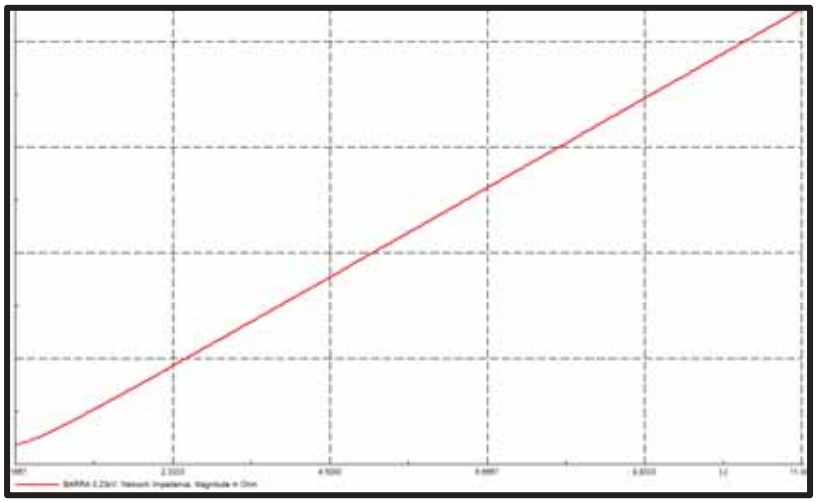


Figura N° 4.16 – Impedancia vs frecuencia en la barra de 0.23kV (sistema sin filtro).

Fuente: *Elaboración propia.*

La simulación de barrido de frecuencia, muestra la relación de impedancia vs frecuencia, donde la gráfica presenta un comportamiento netamente inductivo, lo cual significa que el contenido de corrientes armónicas no afecta al sistema cuando no se tiene la instalación de un filtro.

4.4 Simulación y análisis de las corrientes armónicas en el SED 598

Para la representación de los resultados, antes es necesario definir el SCR en el PCC. Para este caso el PCC es la barra de 0.23kV, lugar donde se conecta la carga del Centro Comercial "El Molino I". Aplicando la ecuación 2.31 del Capítulo II, se realiza el cálculo del SCR:

$$SCR = \frac{I_{SC}}{I_L}$$

La I_{SC} corresponde a una falla trifásica en el PCC, es decir en la barra de 0.23kV, la cual se obtiene a partir de una simulación mediante el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7. (Ver Anexo N° 5)

Tabla N° 4.1 – Datos del cortocircuito trifásico en la barra de 0.23kV.

Falla trifásica en la barra de 0.23kV del SED 598	
Potencia de cortocircuito (MVA)	Corriente de cortocircuito (kA)
6.67	**16.736**

Fuente: *Elaboración propia.*

La I_L corresponde a una carga en hora punta que consume el Centro Comercial "El Molino I", la misma que se obtuvo de la simulación en el software DIgSILENT PowerFactory 151.7. (Ver Anexo N° 5).

$$\boldsymbol{I_L = 0.469kA}$$

Luego de haber obtenido los valores de I_{SC} e I_L se calcula:

$$SCR = \frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{16.736kA}{0.469kA} = 35.684$$

Como la SCR obtenido es 35.684 y se encuentra dentro de $20 \leq \frac{I_{SC}}{I_L} < 50$, entonces se aplica los límites de contenido armónico de corriente, que se encuentran resumidos en la tabla N° 4.2, los mismos que son establecidos por la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1].

Tabla N° 4.2 – Límites que se aplicarán para la distorsión armónica individual y total de corriente en nuestro caso.

Máxima distorsión de corriente armónica en por ciento de I_L						
I_{sc}/I_L	**3≤h<11**	**11≤h<17**	**17≤h<23**	**23≤h<35**	**35≤h≤50**	**TDD**
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8

Fuente: *Tabla 2 (IEEE Std 519-2014, 2014, p. 20)* [1]

De acuerdo a la tabla N° 4.2, se introduce todos los datos que tenemos y luego simulamos en el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 y se muestra la siguiente figura:

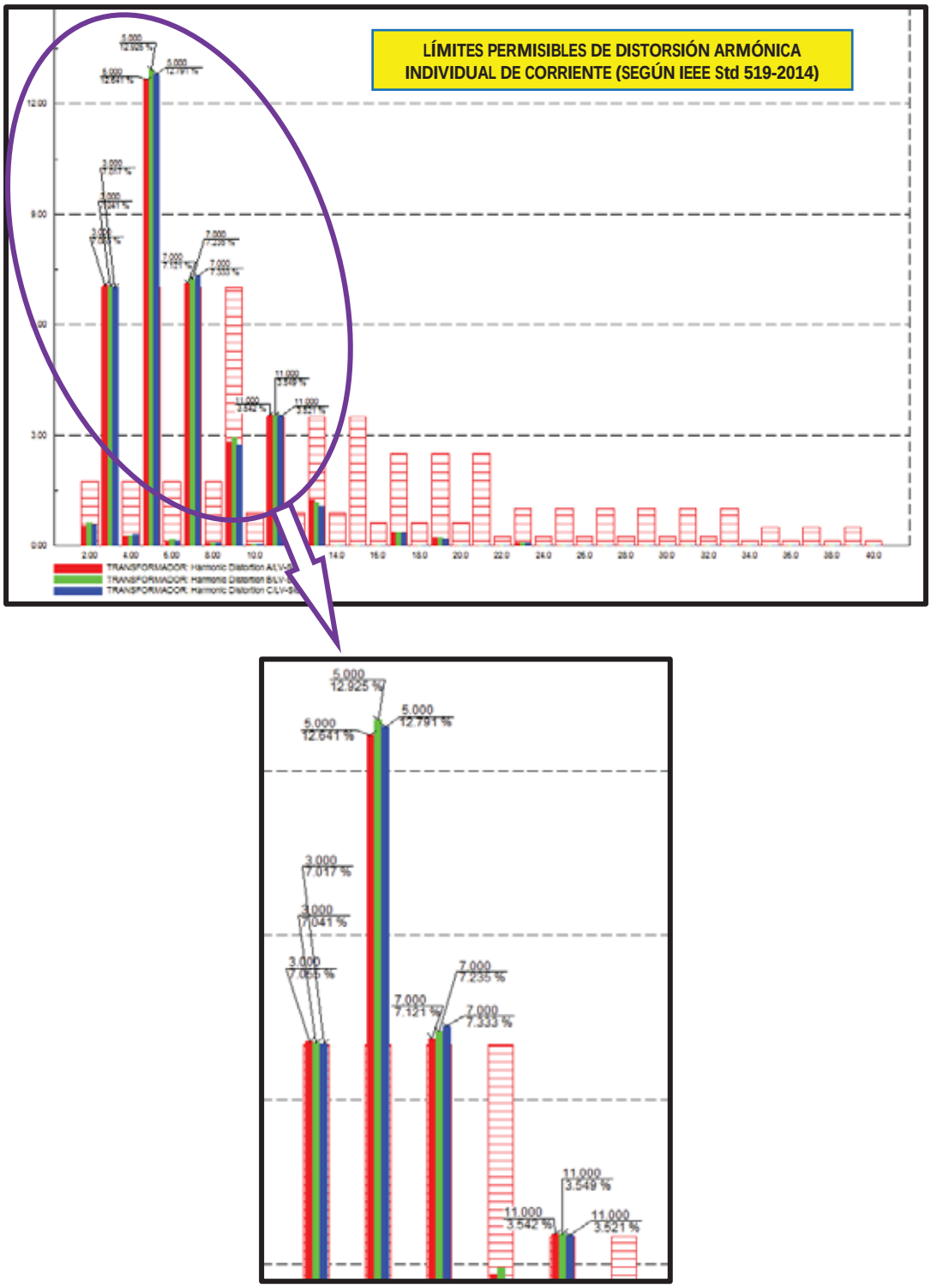


Figura N° 4.17 - Espectro armónico de las corrientes armónicas individuales del SED 598.

Fuente: *Elaboración propia.*

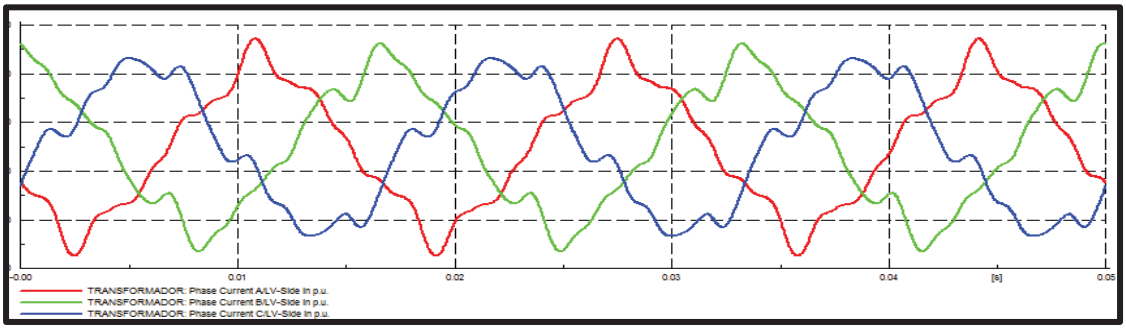


Figura N° 4.18 – Forma de la onda distorsionada en el SED 598 por causa de las corrientes armónicas.

Fuente: *Elaboración propia.*

El modelamiento digital de las corrientes armónicas es generado por una fuente de corriente que también muestra los contenidos de tensiones armónicas en la barra de 0.23kV. Los valores de las tensiones armónicas mostrados por el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 se muestran en la siguiente figura:

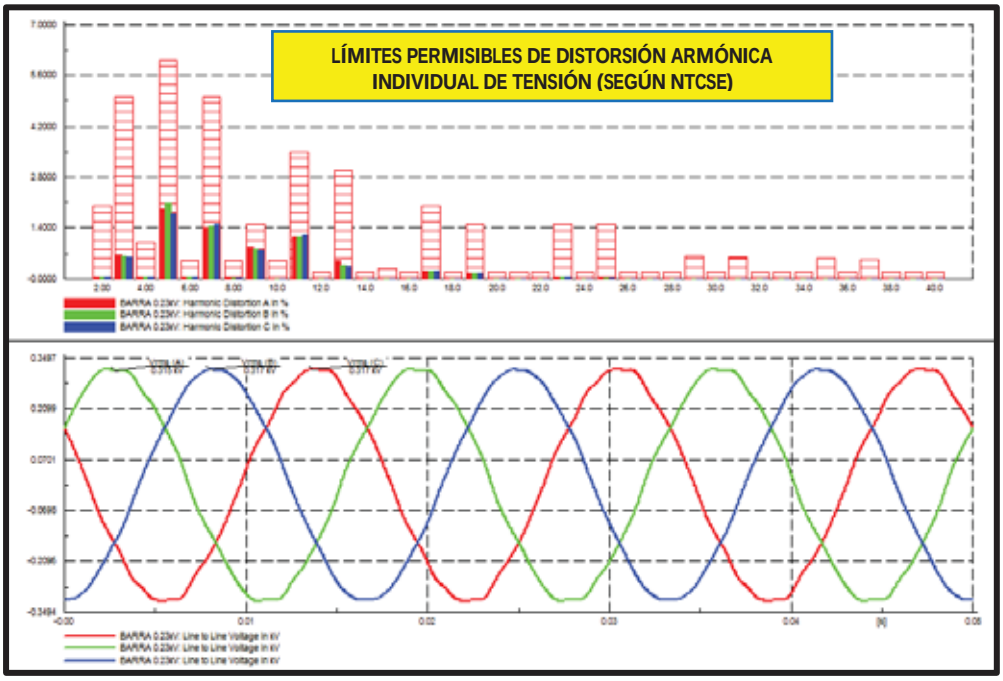


Figura N° 4.19 - Espectro armónico según NTCSE y forma de onda de la tensión armónica del SED 598.

Fuente: *Elaboración propia.*

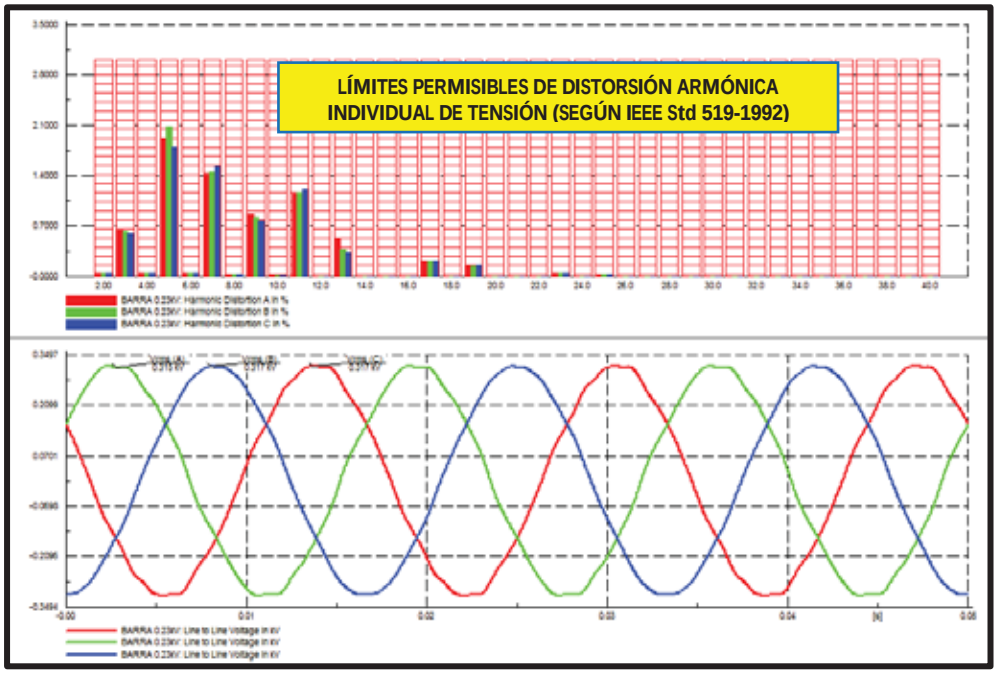


Figura N° 4.20 - Espectro armónico según IEEE Std 519-1992 y forma de onda de la tensión armónica del SED 598.

Fuente: *Elaboración propia.*

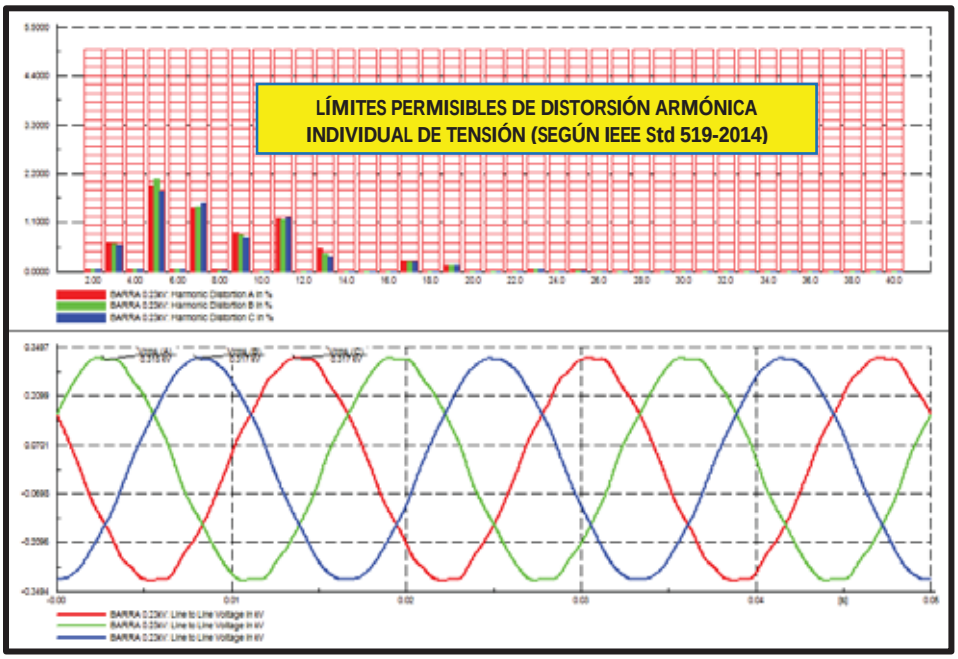


Figura N° 4.21 - Espectro armónico según IEEE Std 519-2014 y forma de onda de la tensión armónica del SED 598.

Fuente: *Elaboración propia.*

4.4.1 Resultados de las simulaciones

Como se pudo observar en las diferentes simulaciones, el caso más crítico fue la distorsión de las corrientes armónicas, donde sus valores no se encuentran dentro de los límites permisibles según la norma internacional IEEE Std 519-2014.

4.5 Conclusiones de la simulación y análisis de corrientes armónicas en el SED 598

Realizadas las simulaciones de barrido de frecuencia y flujo de armónicos en el SED 598, se concluye lo siguiente:

Según la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1]:

- Las distorsiones armónicas individuales de corriente, no se encuentran dentro de los límites; la 3ra, 5ta, 7ma y 11ava armónica exceden las tolerancias permitidas; donde la 3ra, 5ta, 7ma armónica es 7% y la 11ava armónica es 3.5%.
- La distorsión armónica total de corriente, no se encuentra dentro de los límites permisibles (8%).
- Las distorsiones armónicas individuales de tensión se encuentran dentro los límites permitidos (5%) para todos los intervalos registrados en el PCC.
- La distorsión armónica total de tensión se encuentra dentro de la tolerancia permitida (8%).

Según la norma internacional IEEE Std 519-1992 [2]:

- Las distorsiones armónicas individuales de corriente, no se encuentran dentro de los límites; la 3ra, 5ta, 7ma y 11ava armónica exceden las tolerancias permitidas; donde la 3ra, 5ta, 7ma armónica es 7% y la 11ava armónica es 3.5%.
- La distorsión armónica total de corriente, no se encuentra dentro de los límites permisibles (8%).

- Las distorsiones armónicas individuales de tensión se encuentran dentro de los límites permitidos (3%) para todos los intervalos registrados en el PCC.
- La distorsión armónica total de tensión se encuentra dentro de la tolerancia permitida (5%).

Según la norma nacional NTCSE [18]:

- Las distorsiones armónicas individuales de tensión se encuentran dentro los límites permitidos para todos los intervalos registrados en el PCC.
- La distorsión armónica total de tensión, de igual modo, se encuentra dentro los límites permitidos en el PCC.

CAPITULO V

5 PROPUESTA DE MITIGACIÓN AL PROBLEMA

En el Capítulo III se pudo apreciar que existe la presencia de corrientes armónicas; así también, en el capítulo IV se pudo demostrar mediante la simulación en el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 que realmente si existe la presencia de corrientes amónicas y estas no se encuentran dentro de los límites permisibles; para la mitigación de este problema realizaremos simulaciones con diferentes configuraciones de filtros y en función de ello se determinará que filtros son eficientes para su mitigación.

5.1 Cálculo de la corriente residual ($I_{rms}R$) del filtro pasivo

Durante la medición en el SED 598 con el analizador de redes "A-Eberle" PQ-Box 100, se registró las siguientes corrientes:

- *Corriente Eficaz:* I_{rms} *= 292.342A*
- *Corriente Fundamenta:* I_1 *= 288.226A*

Calculamos con la Ecuación 2.14 del capítulo II:

$$I_{rms}R = \sqrt{(I_{rms})^2 - (I_1)^2}$$

Reemplazando los valores tenemos:

$$I_{RMS}R = \sqrt{(292.342)^2 - (288.226)^2} = 48.884A$$

5.2 Cálculo de los parámetros para un filtro pasivo

5.2.1 Determinación de la potencia reactiva

La potencia reactiva del filtro es equivalente a la potencia reactiva del capacitor, por lo que es necesario evaluar el consumo de potencia reactiva de la carga del Centro Comercial "El Molino I" y los datos analizados fueron medidos del 20/06/2019 al 27/09/2019. En la tabla N° 5.1 se resume las potencias reactivas de cada línea.

Tabla N° 5.1 – Potencias registradas en el Centro Comercial "El Molino I".

	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)
Línea "R"	62.255	18.374	64.910
Línea "S"	60.013	16.843	62.332
Línea "T"	63.878	20.098	66.965
Máximo	**186.146**	**55.315**	**194.207**

Fuente: *Elaboración propia.*

La potencia reactiva que consume la carga del Centro Comercial "El Molino I" es de 55.315kVAR. Para poder mitigar las corrientes amónicas es necesario un filtro sintonizado.

5.2.2 Cálculo del Capacitor

Para el cálculo del valor de la capacitancia se utilizará la ecuación 2.20 del capítulo II:

$$X_C = \frac{(V_{nom})^2}{Q_{LL}}$$

$$X_C = \frac{(0.225396kV)^2}{55.315kVAR} = 0.91844\Omega$$

$$X_C = 0.91844\Omega$$

Teniendo el valor de X_C lo reemplazamos en la ecuación 2.21 para el cálculo de la capacitancia.

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 60 \times 0.91844} = 2888.139\mu F$$

$$C = 2888.139\mu F$$

5.2.3 Cálculo del inductor

Para el cálculo del valor de la inductancia se utiliza la ecuación 2.22 del capítulo II:

$$\omega_n = 2\pi n f$$

El valor de "n" simboliza el orden del armónico que se desea filtrar; la frecuencia para la cual se desea sintonizar el filtro será el 5to armónico, ya que se encuentra por encima de la norma, mientras el 3er, 7mo y 11avo armónico se encuentra ligeramente por encima de la norma; por lo que "n" debe tener el siguiente valor: 5.

Los filtros pasivos sintonizados tienen la desventaja que pueden resonar en una frecuencia determinada; si son sintonizados exactamente para la frecuencia del armónico a mitigar, por lo que es necesario realizar algunas variaciones al valor de "n" para evitar estos inconvenientes.

La norma internacional IEEE Std 1531-2003 [17], recomienda que el valor de "n" debe reducirse en 6%. Por lo tanto:

$$n' = 94\%(n) => n' = 0.94 \times 5 = 4.7$$

$$n' = 4.7$$

Ahora reemplazar en la ecuación 2.22:

$$\omega_n = 2\pi \times 4.7 \times 60 = 1771.85826$$

Teniendo el valor de ω_n lo reemplazamos en la ecuación 2.23 para el cálculo de la inductancia.

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 \times C}$$

$$L = \frac{1}{(1771.85826)^2 \times 2888.139 \times 10^{-6}} = 0.11029mH$$

$$L = 0.11029mH$$

5.2.4 Cálculo de la resistencia

Para definir el valor de la resistencia del filtro pasivo sintonizado es importante establecer el valor del factor de calidad "Q"; según dos autores establecen lo siguiente:

- Q = Entre 30 y 60 según "(Gers, 2008, pág. 21)".
- Q = Entre 20 y 30 según "(Mora Sanchez & Cevallos Chaves, 2014, pág. 131)".

Como tenemos dos propuestas para los valores de "Q", consideramos un valor que este incluido en ambas propuestas; de la cual el valor de "Q" será 30. El objetivo es que los valores se encuentren dentro de los límites permisibles por la norma internacional IEEE Std 519-2014 [1].

Una vez definido el valor del factor de calidad "Q", lo reemplazamos en la ecuación 2.24 para el cálculo de la resistencia.

$$R = \frac{\omega_n \times L}{Q}$$

$$R = \frac{1771.85826 \times 0.11029 \times 10^{-3}}{30} = 0.00651394\Omega$$

$$R = 0.00651394\Omega$$

Finalmente, con todos los valores obtenidos de los parámetros, simulamos en el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7.

Tabla N° 5.2 – Valores de los parámetros eléctricos del filtro pasivo para la 5ta armónica.

Valor del filtro pasivo para n	R (Ω)	L (mH)	C (μF)
5ta	0.00651394	0.11029	2888.139

Fuente: *Elaboración propia.*

5.3 Modelamiento digital del filtro pasivo en el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7

Para atenuar o reducir las corrientes armónicas se instala un filtro pasivo con características adecuadas, para ello empezaremos introduciendo el filtro prediseñado al software.

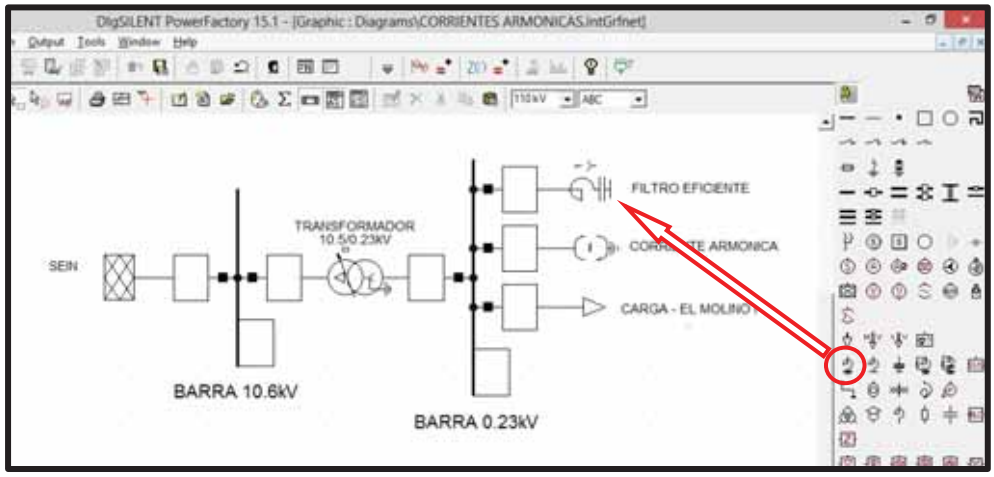


Figura N° 5.1 – Modelamiento del filtro pasivo eficiente.

Fuente: *Elaboración propia.*

5.4 Simulación y análisis de los filtros pasivos eficientes en el SED 598

5.4.1 Casos de estudio

Se tiene 8 casos de estudio, pero solo se analizaran 2 debido a que los demás casos no son necesarios, los cuales se muestran en la Tabla N° 5.3.

Tabla N° 5.3 – Casos de estudio para el análisis de las corrientes armónicas.

Casos de estudio	Configuración del filtro pasivo	
R-L-C	**Delta**	**Estrella**
3°		
5°	x	x
7°		
11°		

Fuente: *Elaboración propia.*

5.4.1.1 Caso R-L-C en delta: barrido de frecuencia y flujo de armónicos

El primer paso para el estudio de las corrientes armónicas, es el método de barrido de frecuencia que viene a ser el cálculo de la impedancia vs frecuencia; consiste en calcular la impedancia Thévenin en una barra del sistema para diferentes rangos de frecuencia.

Ahora procedemos a realizar el barrido de frecuencia a la barra de 0.23kV, la cual nos muestra la siguiente grafica

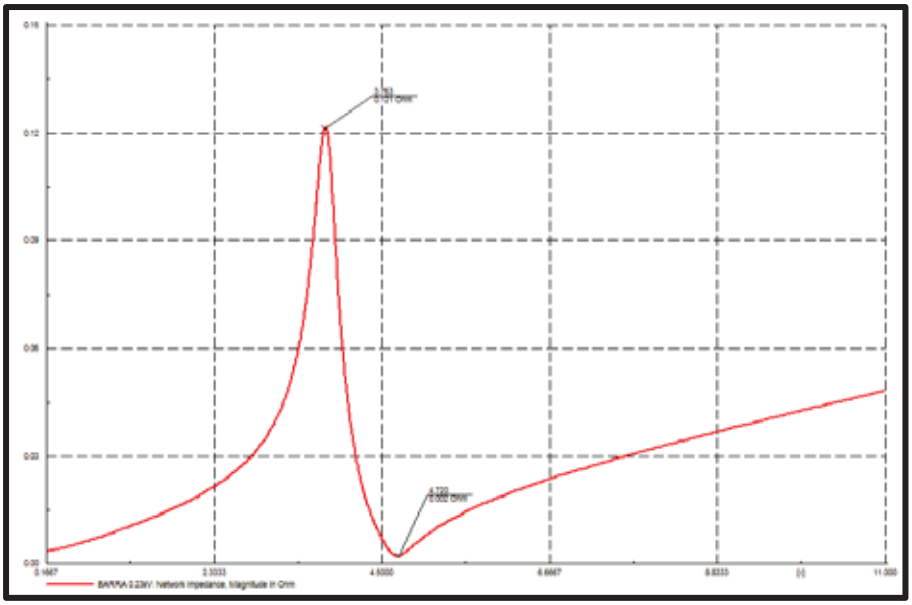


Figura N° 5.2 – Impedancia vs frecuencia en la barra 0.23kV (sistema con filtro pasivo R-L-C en delta).

Fuente: *Elaboración propia.*

En el análisis de barrido de frecuencia se muestra dos puntos de resonancia; la parte superior (pico) nos indica que existe presencia de resonancia paralela y la parte inferior (valle) nos indica que existe presencia de resonancia serie; esto indica que las resonancias están próximos al 5to armonico, esto sucede cuando se instala un filtro pasivo sintonizado con características de R-L-C en delta.

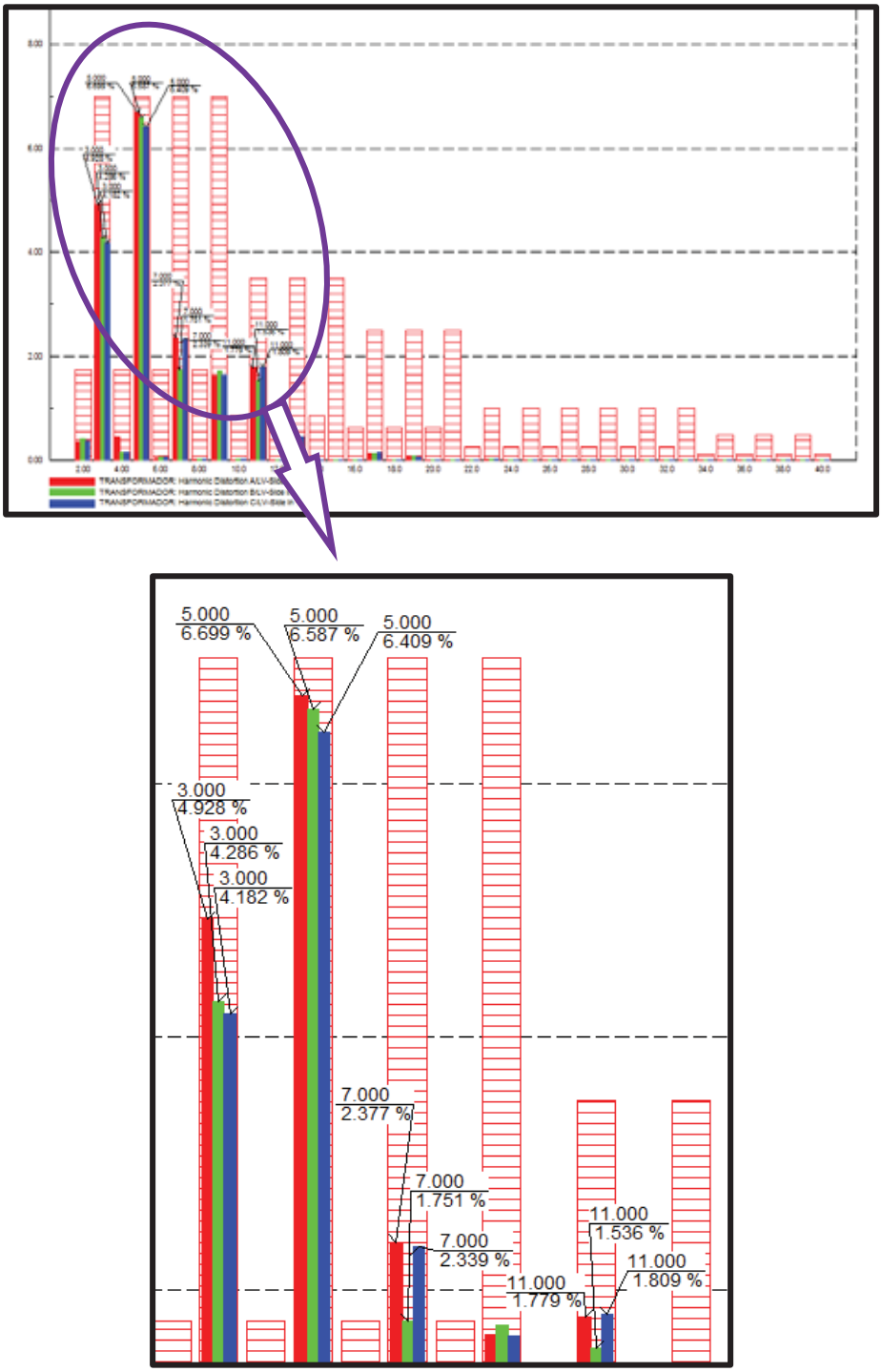


Figura N° 5.3 – Mitigación de corrientes armónicas con la instalación de un filtro pasivo R-L-C en delta.

Fuente: *Elaboración propia.*

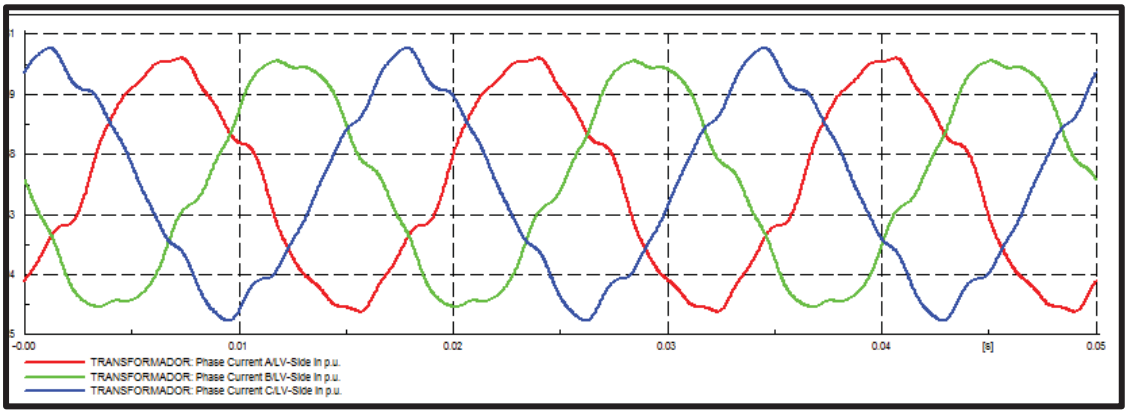


Figura N° 5.4 – Corrección de la onda distorsionada del SED 598 con la instalación de un filtro pasivo R-L-C en delta.

Fuente: *Elaboración propia.*

Con la instalación de un filtro pasivo R-L-C en configuración delta, se logra mitigar el espectro armónico de corriente y se mejora la forma de onda de la corriente.

En la Figura N° 5.3, con la instalación de un filtro pasivo R-L-C en configuración delta, se observa que el HDi del orden 3ro, 5to, 7mo y 11avo armónico se reduce notablemente, estando dentro de los límites que impone la norma internacional IEEE 519-2014 [1]. En la figura N° 5.4, se puede apreciar que se mejora la forma de onda (corriente) a lo que estaba anteriormente.

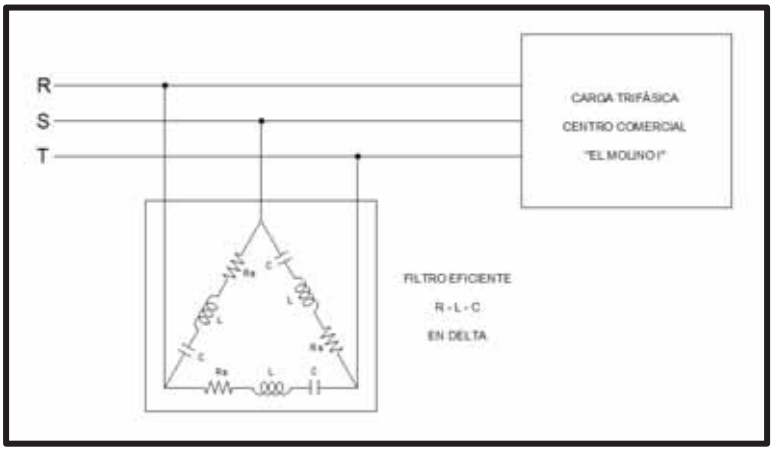


Figura N° 5.5 – Instalación del filtro pasivo R-L-C en configuración delta para la carga del Centro Comercial "El Molino I".

Fuente: *Software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7.*

5.4.1.2 Caso R-L-C en estrella: barrido de frecuencia y flujo de armónicos

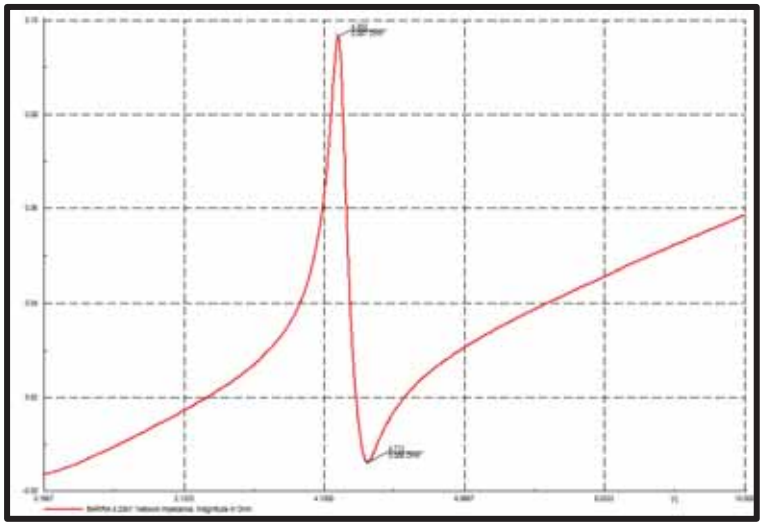
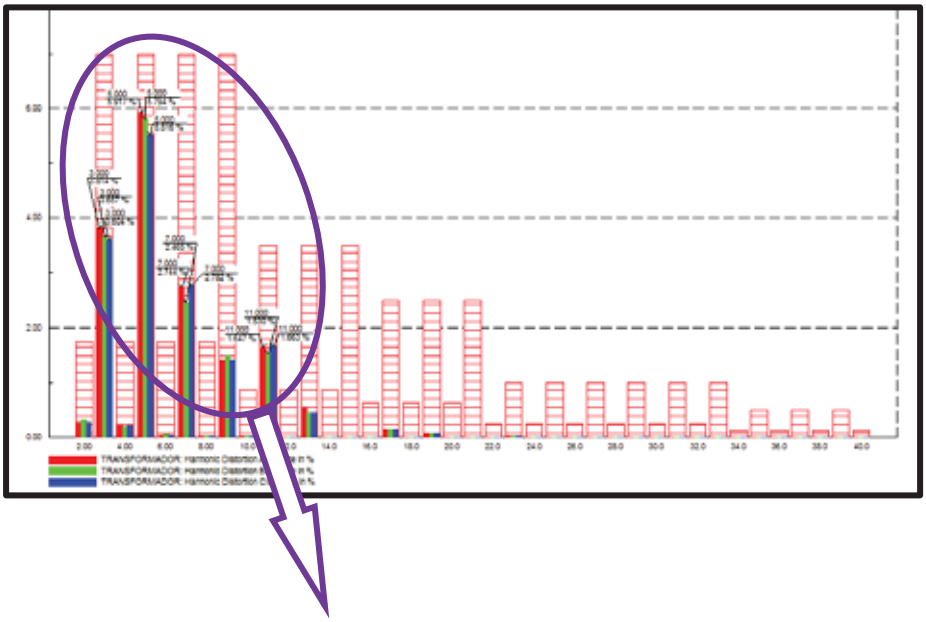


Figura N° 5.6 – Impedancia vs frecuencia en la barra 0.23kV (sistema con filtro pasivo R-L-C en estrella).

Fuente: *Elaboración propia.*

En la figura N° 5.6, se realiza el análisis de barrido de frecuencia en el cual se muestra dos puntos de resonancia; pico resonancia paralela y valle resonancia serie, esto indica que las resonancias se presentan próximos al 5to armónico, esto se da cuando se instala un filtro pasivo sintonizado con características de R-L-C en estrella.



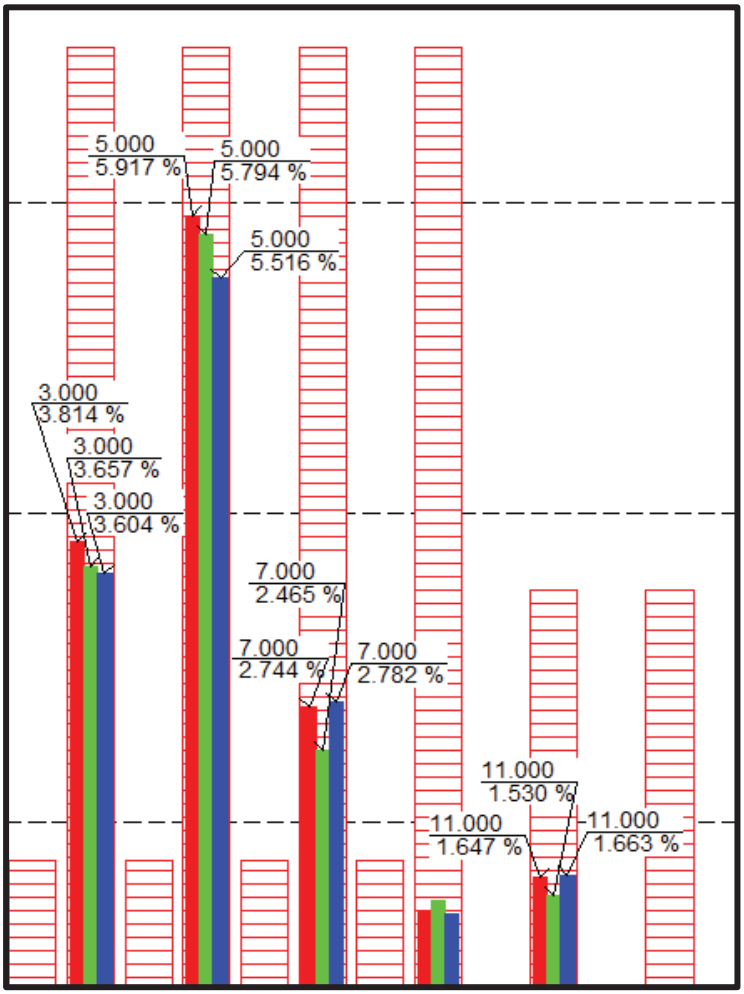


Figura N° 5.7 – Mitigación de corrientes armónicas con la instalación de un filtro pasivo R-L-C en estrella.

Fuente: *Elaboración propia.*

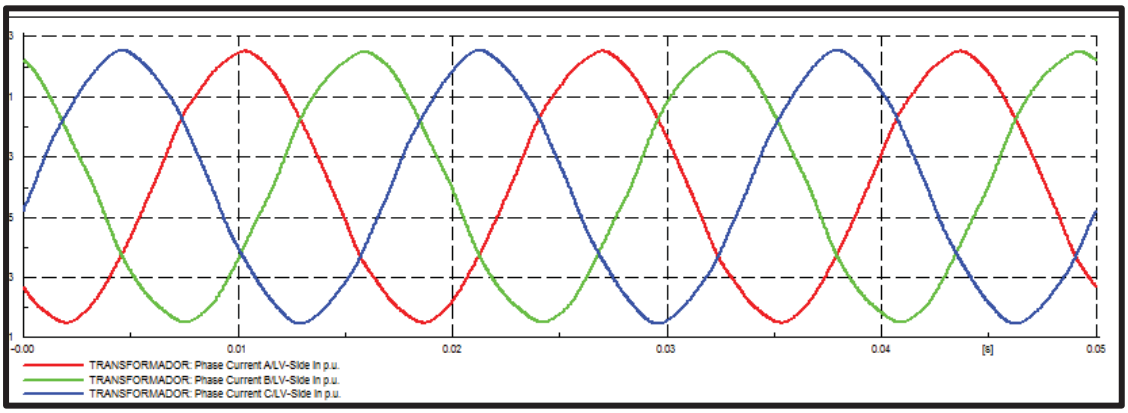


Figura N° 5.8 – Corrección de la onda distorsionada del SED 598con la instalación de un filtro pasivo R-L-C en estrella.

Fuente: *Elaboración propia.*

En la Figura N° 5.7, con la instalación del filtro R-L-C en configuración estrella, se observa que el HDi del orden 3ro, 5to, 7mo y 11avo armónico se reducen notablemente, estando dentro de los límites que impone la norma internacional IEEE 519-2014 [1]. En la figura N° 5.8, se puede apreciar que se mejora la forma de onda de la corriente, mucho mejor que la anterior.

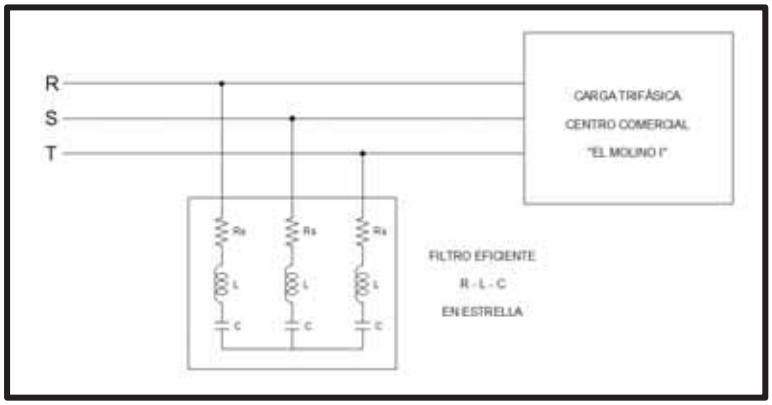


Figura N° 5.9 – Instalación del filtro pasivo R-L-C en configuración estrella para la carga del Centro Comercial "El Molino I".

Fuente: *Software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7.*

5.4.2 Resultados de las simulaciones

Con la instalación de un filtro pasivo se pudo observar en las diferentes simulaciones, donde los casos más críticos fueron aquellos en los que se produce resonancias paralelo y serie cercanos al 5to armónico, las cuales se realizó en la barra de 0.23kV.

En el primer caso, se observa una mejora de las distorsiones armónicas de corriente, como también la forma de onda.

En el segundo caso, se mejoró notablemente las distorsiones armónicas de corriente y la forma de onda es casi perfecta a una onda senoidal.

Con la instalación de un filtro pasivo eficiente se evidenció que se reduce el HD_i notablemente y por su puesto también el *TDD*; además se mejora la forma de onda. A continuación, se resume la siguiente tabla de la mitigación de las corrientes armónicas:

Tabla N° 5.4 – Resumen de mitigación de los casos de estudio de las corrientes armónicas.

Sin filtro	**Línea "R" (%)**	**Línea "S" (%)**	**Línea "T" (%)**	**IEEE 519-2014 (%)**
3°	7.055	7.041	7.041	**7.0**
5°	12.641	12.925	12.791	**7.0**
7°	7.121	7.235	7.333	**7.0**
11°	3.542	3.549	3.521	**3.5**
Filtro R-L-C (Delta)				
3°	**4.928**	**4.286**	**4.182**	**7.0**
5°	**6.699**	**6.587**	**6.409**	**7.0**
7°	**2.377**	**1.751**	**2.339**	**70**
11°	**1.779**	**1.536**	**1.809**	**3.5**
Filtro R-L-C (Estrella)				
3°	**3.814**	**3.657**	**3.604**	**7.0**
5°	**5.917**	**5.794**	**5.516**	**7.0**
7°	**2.744**	**2.465**	**2.782**	**7.0**
11°	**1.647**	**1.530**	**1.663**	**3.5**

Fuente: *Elaboración propia.*

Las características adecuadas de un filtro pasivo eficiente según la simulación, se detalla a continuación:

- Filtro pasivo y sintonizado.
- Valores adecuados de R, L y C para mitigar una corriente armónica especifica.
- Un filtro sintonizado con características adecuadas para que no resoné con la barra del sistema.
- Una configuración adecuada del filtro pasivo para mitigar las corrientes armónicas.

5.5 Filtro activo

Para mitigar la distorsión de las corrientes armónicas, como también el *TDD* en el SED 598, se puede efectuar con la instalación de filtros activos conectados en paralelo en la entrada del alimentador, de esa manera se podrá contrarrestar los armónicos que más prevalecen en la red de distribución eléctrica; tales como la 3ra, 5ta, 7ma y 11ava armónicas. A su vez, se pueden identificar a las cargas que generan corrientes armónicas en la red de baja tensión, y colocar los filtros activos a dichas cargas contaminantes para su mitigación.

Los filtros activos tienen un principio de funcionamiento que es medir la corriente armónica que las cargas no lineales generan, de esta manera el filtro activo inyecta una corriente con frecuencia contraria para neutralizar a las frecuencias armónicas que se encuentran presentes, tal como se puede apreciar en la siguiente figura:

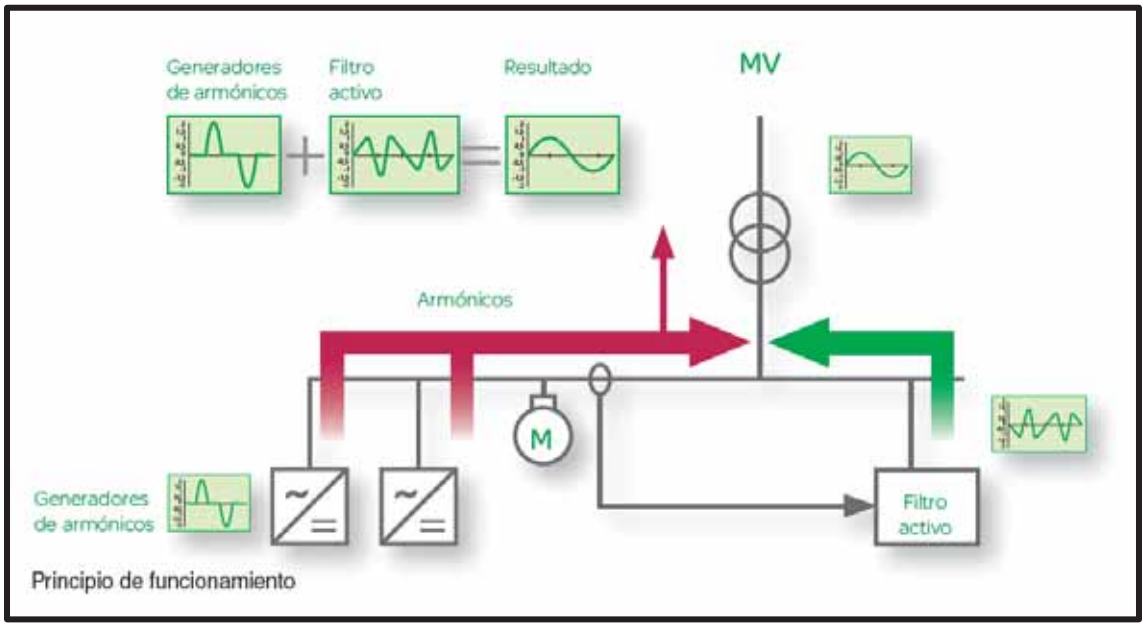


Figura N° 5.10 – Principio de funcionamiento del filtro activo.

Fuente: *Figura N° 6.1 (Schneider Electric, 2016, p. 6/2)* [19]

La ventaja de los filtros activos es filtrar varias corrientes armónicas al mismo tiempo. Para determinar la capacidad adecuada de un filtro activo, se deben tomar en consideración varios aspectos:

- Tensión de la red de distribución (V)
- Potencia del transformador (kVA)
- El nivel de distorsión del HDi y TDD (%) a ser mejorado.
- Consumo máximo de la carga lineal (kW)
- Listado de las cargas con impedancia no lineal

Las empresas suministradoras de energía eléctrica, son las que deben de mantener un nivel de distorsión armónica de tensión (THDv) dentro de las tolerancias permisibles; mientras los consumidores o clientes deben de mantener dentro de los límites tolerables en inyectar corrientes armónicas (TDD).

La desventaja de los filtros activos es que su costo es demasiado alto y además depende del nivel de corriente y tensión que tengan que soportar.

5.5.1 Cálculo de la corriente nominal

Para el cálculo aplicamos la ecuación N° 2.25 del capítulo II:

$$I_{AFQ} = SF_h \times I_{carga} \times THD_i$$

Durante la medición el valor de THD_v fue de 4.157% el cual le corresponde aplicar un factor de seguridad o sobrecarga de 1.5, además, el valor de TDD fue de 16.961% entonces:

$$I_{AFQ} = 1.5 \times (292.342A) \times 16.961\% = 74.376A$$

$$I_{AFQ} = 74.376A$$

La corriente hallada y la corriente nominal que consume el Centro Comercial "El Molino I" se suman para saber de qué características vamos a desear el filtro activo a utilizar para nuestra carga.

Según ABB: presenta su filtro activo para el problema de nuestra corriente armónica de estudio:

Filtros activos (PQFI) para grandes cargas industriales, para redes trifásicas con o sin neutro, para filtrado de armónicos no homopolares y para corrección con balance de carga. La figura N° 5.11 muestra el cuadro que compone el PQFI, con sus principales componentes y sus características técnicas más notables.

Estos filtros presentan las siguientes características técnicas principales:

- Intensidad nominal

208 V ≤ U ≤ 480 V	480 V ≤ U ≤ 690 V
250 A	180 A*
450 A	320 A*

Figura N° 5.11 – Intensidad nominal del filtro activo.

Fuente: *(Cuaderno de aplicaciones técnicas N° 8, s.f., p. 38)* [10]

- Armónicos filtrables: 20 armónicos seleccionables del segundo al quincuagésimo
- Potencia reactiva: factor de potencia objetivo programable de 0.6 inductivo a 0.6 capacitivo.

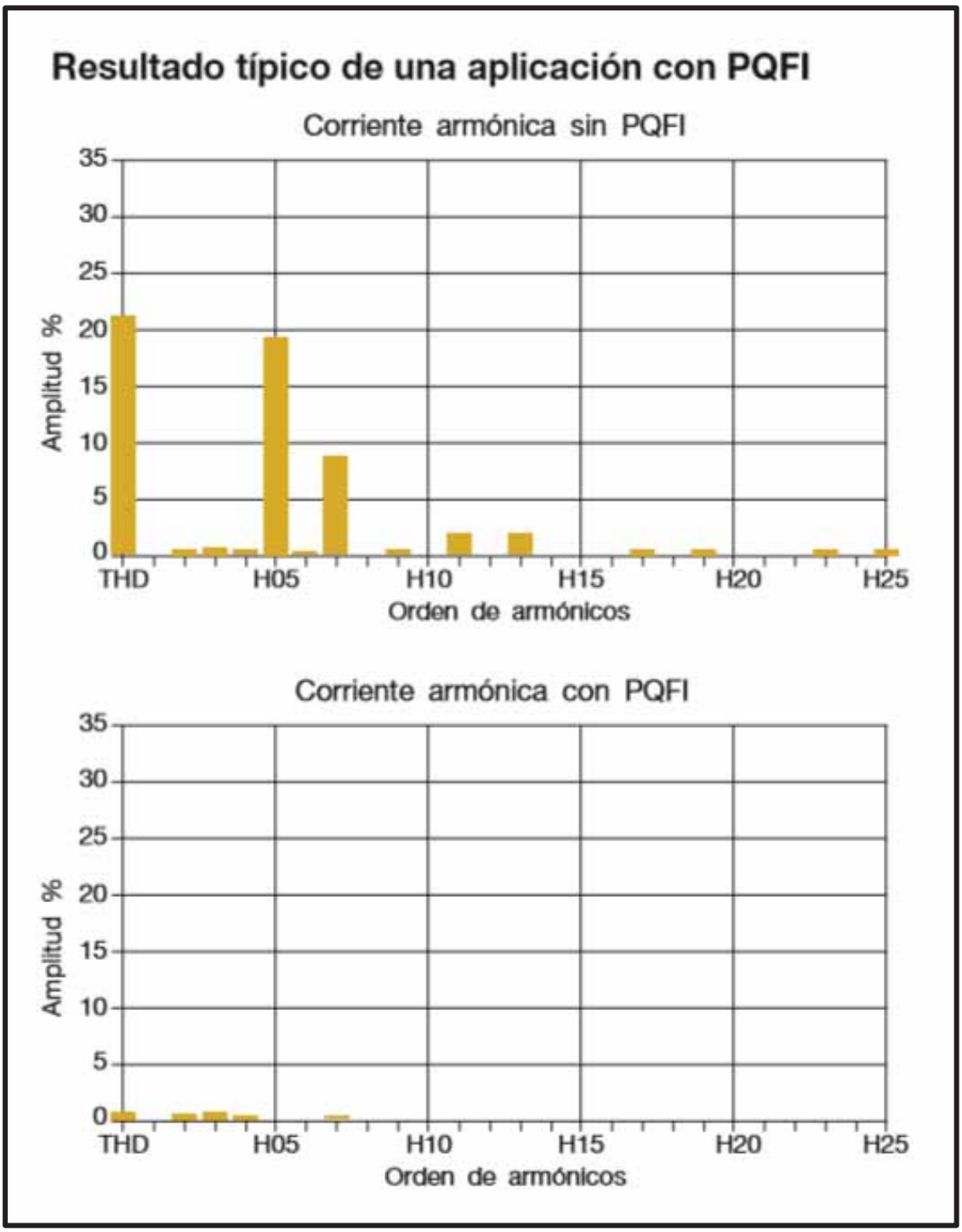


Figura N° 5.12 – Resultado típico de un filtro activo PQFI.

Fuente: *(Cuaderno de aplicaciones técnicas N° 8, p. 38)* [10]

CONCLUSIONES

1. Se ha determinado las acciones necesarias para mitigar las corrientes armónicas que son ocasionadas por cargas no lineales como la implementación e instalación del filtro pasivo eficiente en el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I"; se logró mitigar la distorsión de corrientes armónicas, tal como se muestra en la figura N° 5.3, figura N° 5.7 y tabla N° 5.4; así mismo la distorsión de la onda de señal eléctrica mejoro considerablemente en las tres líneas, tal como se muestra en la figura N° 5.4 y figura N° 5.8.

   - A partir de una base de datos de mediciones de armónicos, se diagnosticó la presencia de distorsiones armónicas individuales de corriente; se concluye que las distorsiones armónicas individuales de corriente son del orden 3ro, 5to, 7mo y 11avo armónico, cuyos valores no se encuentran dentro de los límites permisibles que establece la norma internacional IEEE Std 519-2014, tal como se muestra en la tabla N° 1.2.
   - Utilizando el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7, se elaboró distintas simulaciones con los diferentes tipos de filtros, llegando a la conclusión que el filtro eficiente para mitigar las corrientes armónicas en baja tensión es el filtro pasivo sintonizado, cuyos valores de R, L y C se muestran en la tabla N° 5.2.
   - Con los cálculos obtenidos en la simulación, se observó que los valores de las distorsiones armónicas individuales de corriente del 3ro, 5to, 7mo y 11avo orden han sido mitigados a valores aceptables; estos valores fueron mitigados hasta un 60%, tal como se muestra en la tabla N° 5.4.

RECOMENDACIONES

Del estudio realizado y de las conclusiones obtenidas se pueden hacer las siguientes recomendaciones:

1. Se recomienda a la empresa Electro Sur Este S.A.A. (propietario del SED 598) realizar mediciones constantes y un estudio detallado de las corrientes armónicas acerca del HDi y THDi del Centro Comercial "El Molino I" para que estas corrientes no sigan incrementándose debido a la venta de aparatos eléctricos y electrónicos que esta realiza.

2. Se recomienda a la empresa Electro Sur Este S.A.A tanto a ingenieros y técnicos que estan encargados, especialmente al área de Control de Calidad a utilizar el software DIgSILENT PowerFactory ya que es una herramienta computacional que permite realizar simulaciones de distinta índole en el área de ingeniería eléctrica, para que realicen más estudios acerca de las corrientes armónicas y propongan alternativas de mitigación tanto en HDi y THDi.

3. Se recomienda a futuros tesistas a realizar trabajos de investigación acerca de las corrientes armónicas e interarmónicas, ya que el avance tecnológico va trayendo nuevos y diferentes problemas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IEEE Std 519-2014. (2014). ***"IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems"***. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, USA.

[2] IEEE Std 519-1992. (1992). ***"IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems"***. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, USA.

[3] Schneider Electric. (s.f.). ***"5. Detección y filtrado de armónicos"***. Disponible en: http://automata.cps.unizar.es/bibliotecaschneider/BT/Guia/5_Armonicos

[4] Ligas, W. (2016). ***"Evaluación de armónicos en los bancos de capacitores de la subestación eléctrica de Dolorespata"***, tesis de grado. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Cusco, Perú.

[5] Altamirano, A. & Soto, A. (2017). ***"Análisis de armónicos en los transformadores de potencia de la subestación eléctrica de Dolorespata en 138/10.6 kV"***, tesis de grado. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Cusco, Perú.

[6] Morales, E. & Rodriguez, J. (2012). ***"Solución a los problemas de Corrientes y Voltajes Armónicos en los Sistemas Industriales"***, tesis de grado. Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. México, México.

[7] Toledo, M. & Jiménez, C. (2010). ***"Análisis y propuestas para la mitigación de la contaminación armónica en las subestaciones de la empresa eléctrica regional CentroSur C.A."***, tesis de grado. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador.

[8] Abundis, A. (2016). ***"Causas y efectos de armónicos en sistemas eléctricos de potencia"***, tesis de grado. Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. México, México.

[9] Noroña, N. (2011). ***"Diagnóstico de perturbaciones armónicas en el sistema nacional interconectado"***, tesis de grado. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

[10] Cuaderno de aplicaciones técnicas N° 8. (s.f.). ***"Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas"***. Asea Brown Boveri S.A.

[11] Reyes, G. (1996). ***"Armónicas en sistemas de distribución de energía eléctrica"***, tesis para maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

[12] Cuaderno técnico N° 152. (s.f.). ***"Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento"***. Schneider Electric.

[13] Lamich, M. (s.f.). ***"Filtros activos de potencia"***. Universidad Politécnica de Catalunya. España.

[14] Arrieta, A. & Sanchez, G. (2006). ***"Determinación del impacto de la compensación reactiva shunt requerida en la carga petrolera conectada a las subestaciones kilómetro 48 y Zulia 9 del subsistema foráneo sur de enelven"***, tesis de grado. Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo, Venezuela.

[15] Mora, J. & Cevallos, Y. (2014). ***"Estudio y análisis de calidad de energía eléctrica enfocado en niveles de armónicos en el sistema eléctrico de la subestación enfriadora 1 de Holcim Ecuador planta Guayaquil"***, tesis de grado. Universidad Politécnica Salesiana. Guayaquil, Ecuador.

[16] Gers, J. (2008). ***"Teoría y diseño de filtros de armónicos en sistemas eléctricos"***, paper de investigación, TECSUP. Lima, Perú.

[17] IEEE Std 1531-2003. (2003). ***"IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic"***. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, USA.

[18] NTCSE. (2011). ***"Norma Técnica de Calidad de Servicios Eléctricos"***.

[19] Schneider Electric. (2016). ***"Compensación de energía reactiva y filtrado de armónicos"***

[20] Schneider Electric. (2015). ***"Eliminación de armónicos en instalaciones"***

[21] UDLAP. (s.f.). ***"5 Proceso Experimental y Mediciones"*** Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/salvador_s_g/capitulo5.pdf

ANEXOS

ANEXOS.

Anexo N° 1: Aparatos electrónicos y eléctricos que se venden en el Centro Comercial "El Molino I" - Cusco.

Anexo N° 2: Componentes eléctricos que conforman el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I" - Cusco.

Anexo N° 3: Documentos que se enviaron a la decanatura de la facultad y a la empresa de Electro Sur Este S.A.A. para la obtención de los registros de armónicos de corriente, tensión y otros.

Anexo N° 4: Cálculo de los parámetros de una red equivalente mostrado en el Anexo N° 8 del trabajo de tesis elaborado por Williams Ligas Nina (2016).

Anexo N° 5: Simulación de cortocircuito trifásico en el PCC del SED 598 y la corriente máxima consumida por la carga del Centro Comercial "El Molino I" - Cusco.

Anexo N° 6: Interpretación de la IEEE Std 519 para los armónicos de corriente y tensión.

Anexo N° 7: Relación de equipos de medición cuyas especificaciones técnicas están aprobadas para la medición de la calidad de tensión.

Anexo N° 8: Características técnicas de un filtro activo.

Anexo N° 9: Matriz de consistencia.

ANEXO N° 1

APARATOS ELECTRÓNICOS Y ELÉCTRICOS QUE SE VENDEN EN EL CENTRO COMERCIAL "EL MOLINO I" – CUSCO

Puerta principal del Centro Comercial “El Molino I”

Aparatos electrónicos que se venden en el Centro Comercial “El Molino I”

ANEXO N° 2

COMPONENTES ELÉCTRICOS QUE CONFORMAN EL SED 598 DEL CENTRO COMERCIAL "EL MOLINO I" – CUSCO

El SED 598 compuesto por el transformador y el tablero de distribución, que corresponde al Centro Comercial “El Molino I”

La placa de características del transformador trifásico

ANEXO N° 3

DOCUMENTOS QUE SE ENVIARON A LA DECANATURA DE LA FACULTAD Y A LA EMPRESA DE ELECTRO SUR ESTE S.A.A, PARA LA OBTENCIÓN DE LOS REGISTROS DE ARMÓNICOS DE CORRIENTE, TENSIÓN Y OTROS

"Año de la lucha contra la corrupción e impunidad"

Cusco, 09 de julio del 2019

Señor:

M.Sc. Ing. Vladimiro Casildo Canal Bravo

DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA: ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA.

De nuestra mayor consideración:

Por la presente solicitamos a Ud. su intervención en la obtención de información de la empresa Electro Sur Este S.A.A., para el desarrollo de la tesis intitulada "INFLUENCIA DE UN FILTRO EFICIENTE PARA MITIGAR LAS CORRIENTES ARMÓNICAS EN BAJA TENSIÓN DEL SED 598 DEL CENTRO COMERCIAL EL MOLINO I - CUSCO", se detalla los puntos en cuestión:

1. Datos de las mediciones realizadas con el analizador de redes al SED 598, del mes de junio y julio del 2019 (tensiones, corrientes, potencias, demandas máximas y mínimas, armónicos, flicker y otros).
2. Datos e imágenes de la placa de características del SED 598.
3. Datos e imágenes de los circuitos del SED 598.
4. Datos e imágenes del alimentador principal que abastece al SED 598.
5. Datos del analizador de redes.

Sin otro particular, esperando pronta respuesta, saludamos a Ud. muy atentamente.

.....

Bach. Omar Quispe Molina
DNI: 42843086

.....

Ing. Willy Morales Alarcón
ASESOR

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

- APARTADO POSTAL N° 921 - Cusco - Perú
- FAX: 238156 - 238173 - 222512
- RECTORADO Calle Tigre N° 127 Teléfonos: 222271 - 224891 - 224181 - 254398
- CIUDAD UNIVERSITARIA Av. De la Cultura N° 733 - Teléfonos: 228661 - 222512 - 232370 - 232375 - 232226
- CENTRAL TELEFÓNICA: 232398 - 252210 243835 - 243836 - 243837 - 243838
- LOCAL CENTRAL Plaza de Armas s/n Teléfonos: 227571 - 225721 - 224015
- MUSEO INKA Cuesta del Almirante N° 103 - Teléfono: 237380
- CENTRO AGRONÓMICO K'AYRA San Jerónimo s/n Cusco - Teléfonos: 277145 - 277246
- COLEGIO "FORTUNATO L. HERRERA" Av. De la Cultura N° 721 "Estadio Universitario" - Teléfono: 227192

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMATICA Y MECÁNICA"

Cusco, 17 de julio de 2019.

TRAMITE DOCUMENTARIO
Electro Sur Este S.A.A.
22 JUL 2019
10:34

Oficio N° D-350-2019-FIEEIM-UNSAAC

Señor
Ingeniero MARCO PANTI AYTE,
JEFE DE LA OFICINA DE CONTROL DE CALIDAD
DE LA EMPRESA ELECTRO SUR ESTE S.A.A.
CIUDAD. -

ASUNTO: SOLICITA FACILIDADES PARA LA OBTENCIÓN DE INFORMACION

Tengo el agrado de dirigirme a usted, con el objeto de expresar un cordial saludo a nombre mío y de la comunidad de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Informática y Mecánica, y con el objeto de comunicarle que el Bachiller, don ***OMAR QUISPE MOLINA****, a la fecha viene desarrollando su Temario de Tesis intitulado:* ***"INFLUENCIA DE UN FILTRO EFICIENTE PARA MITIGAR LAS CORRIENTES ARMONICAS EN BAJA TENSION DEL SED 598 DEL CENTRO COMERCIAL EL MOLINO I – CUSCO",*** *cuya asesoría está a cargo del Ing. Willy Morales Alarcón, docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica.*

En tal sentido, mucho agradeceré se sirva atender lo solicitado por el recurrente, cuya sustentación adjunto como anexo del presente.

Sin otro particular uso de la oportunidad, para expresarle mis consideraciones más distinguidas.

Atentamente,

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRICA, ELECTRÓNICA INFORMÁTICA Y MECÁNICA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
DECANO
CUSCO - PERÚ

M.Sc. VLADIMIRO C. CANAL BRAVO
DECANO

c.c.
Arch.
VCB/ao

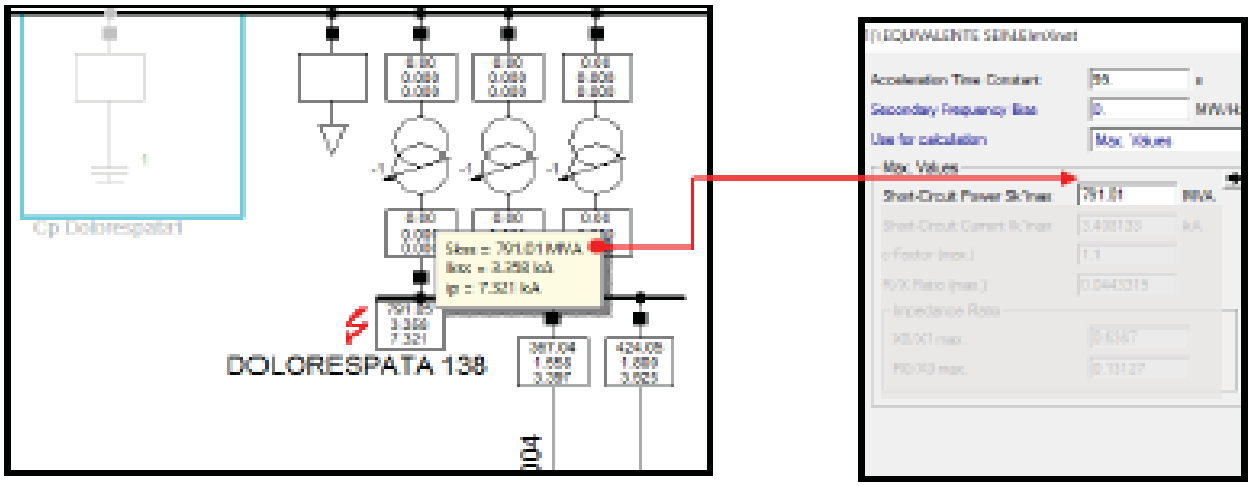
ANEXO N° 4

CÁLCULO DE LOS PARAMETROS DE UNA RED EQUIVALENTE MOSTRADA EN EL ANEXO N° 8 DEL TRABAJO DE TESIS ELABORADO POR WILLIAMS EZEQUIEL LIGAS NINA (2016)

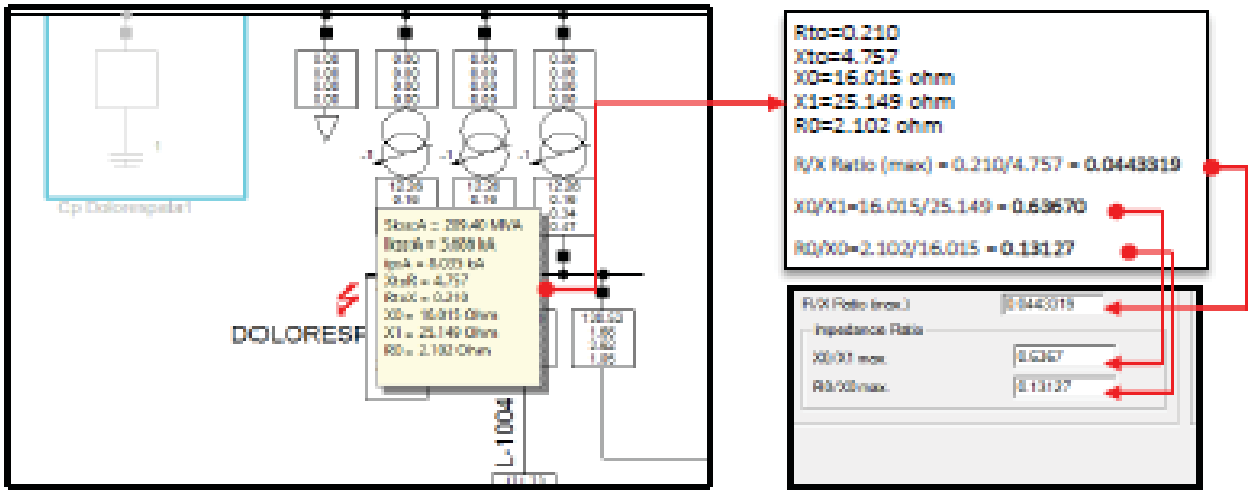
CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS PARA LA MODELACIÓN DIGITAL DE LA RED EQUIVALENTE DEL SEIN

Para obtener los parámetros de la red equivalente, se realiza una simulación de cortocircuito trifásico y monofásico en la barra de 138kV de la S.E. Dolorespata, para tal efecto se tomó en cuenta las siguientes consideraciones:

- La base de datos se obtuvo del programa diario de mantenimiento del COES, descargado el día 26/02/2016 de su página web (www.coes.org.pe).
- El escenario del análisis, corresponde al de máxima demanda del sistema, aproximadamente a las 19 horas.



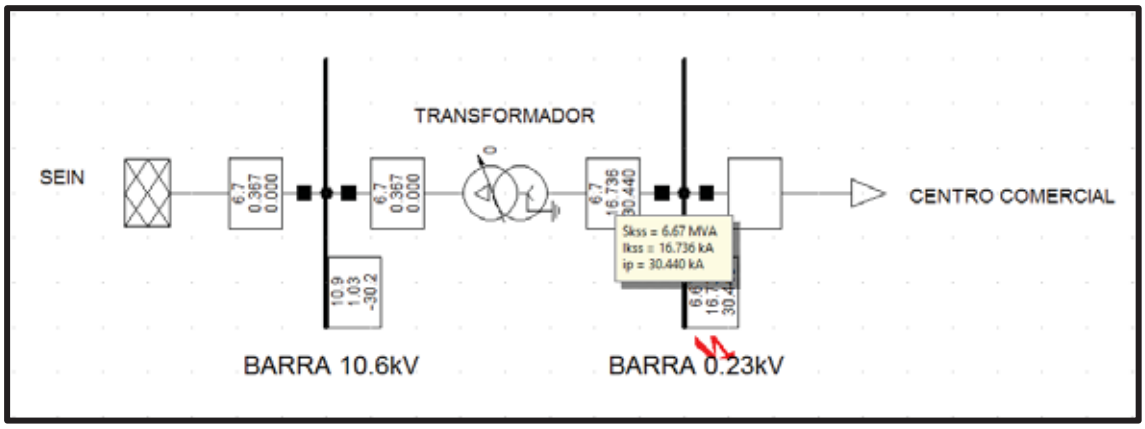
Simulacion de cortocircuito trifasico en la barra de 138kV de la .S.E Dolorespata, para la optencion de la potencia de cortocircuito (MVA)



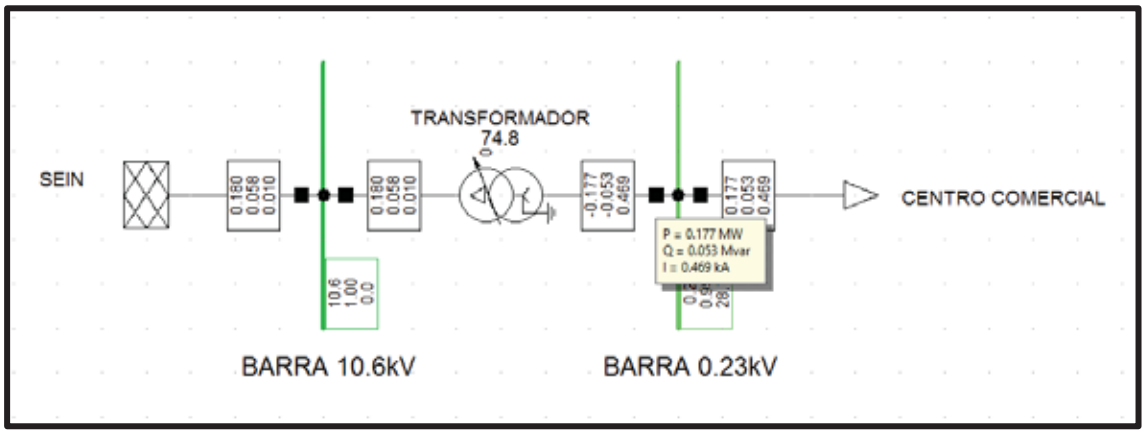
Simulacion de cortocircuito monofasico en la barra de 138kV de la .S.E Dolorespata, para la optencion de la impedancia equivalente

ANEXO N° 5

SIMULACIÓN DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO EN EL PCC DEL SED 598 Y LA CORRIENTE MÁXIMA CONSUMIDA POR LA CARGA DEL CENTRO COMERCIAL "EL MOLINO I" - CUSCO



Simulación de cortocircuito trifásico en la barra de 0.23kV mediante el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7



Corriente consumida por la carga del Centro Comercial “El Molino I” en hora de mayor demanda.

ANEXO N° 6

INTERPRETACIÓN DE LA IEEE Std 519 PARA LOS ARMÓNICOS DE CORRIENTE Y TENSIÓN

Interpreting IEEE Std 519 and Meeting its Harmonic Limits in VFD Applications

Copyright Material IEEE
Paper No. PCIC-2003-15

Tony Hoevenaars, P. Eng.
Member IEEE
Minus International Inc.
#12, 6805 Invader Cres.
Mississauga, ON L5T 2K6
Canada

Kurt LeDoux, P.E.
Member, IEEE
Toshiba International Corp.
13131 West Little York Rd.
Houston, TX 77041
USA

Matt Colosino
Crescent Power Systems, Inc.
129 Polk St.
New Orleans, LA 70124
USA

Abstract –

IEEE Std 519 was first introduced in 1981 to provide direction on dealing with harmonics introduced by static power converters and other nonlinear loads so that power quality problems could be averted. It is being applied by consulting engineers and enforced by Utilities more frequently in recent years as the use of Variable Frequency Drives and other non-linear loads has grown.

Two of the more difficult aspects of applying IEEE Std 519 are (I) determining an appropriate point of common coupling (PCC) and (II) establishing a demand current at the design stage. This is because the standard does not provide a concise definition of the PCC and the recommended definition of demand current is a value that can only be determined by measurements taken after installation.

This paper represents the authors' best interpretation of IEEE Std 519. It attempts to provide clarity in the determination of the PCC and offers a means by which IEEE Std 519 can be applied at the design stage when the precise demand current is unknown.

Index Terms —

Point of Common Coupling (PCC): *(As found on p75 of IEEE Std 519-1992)* A point of metering, or any point as long as both the utility and the consumer can either access the point for direct measurement of the harmonic indices meaningful to both or can estimate the harmonic indices at point of interference (POI). Within an industrial plant, the PCC is the point between the nonlinear load and the other loads.[1]
(As presently defined by IEEE 519 Working Group) The Point of Common Coupling (PCC) with the consumer/utility interface is the closest point on the utility side of the customer's service where another utility customer is or could be supplied. The ownership of any apparatus such as a transformer that the utility might provide in the customer's system is immaterial to the definition of the PCC.[2]

Short Circuit Ratio (I_{SC}/I_L): The ratio of the short circuit current (I_{SC}) available at the point of common coupling (PCC) to the maximum fundamental load current (I_L).[1]

Maximum Load Current (I_L): Is recommended to be the average current of the maximum demand for the preceding 12 months.[1] *(Unfortunately, this value is inherently ambiguous making it difficult to derive at the design stage when measured load is not available).*

Voltage THD: Total Harmonic Distortion of the voltage waveform. The ratio of the root-sum-square value of the harmonic content of the voltage to the root-mean-square value of the fundamental voltage.[1]

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{V_2^2+V_3^2+V_4^2+V_5^2+\ldots}}{V_1} \times 100\%$$

Current THD: Total Harmonic Distortion of the current waveform. The ratio of the root-sum-square value of the harmonic content of the current to the root-mean-square value of the fundamental current.[1]

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{I_2^2+I_3^2+I_4^2+I_5^2+\ldots}}{I_1} \times 100\%$$

Current TDD: Total Demand Distortion of the current waveform. The ratio of the root-sum-square value of the harmonic current to the maximum demand load current.[1]

$$I_{TDD} = \frac{\sqrt{I_2^2+I_3^2+I_4^2+I_5^2+\ldots}}{I_L} \times 100\%$$

Variable Frequency Drive (VFD): A solid-state device that converts utility power to a variable voltage and frequency in order to control the speed of a three-phase induction motor. Drives typically use harmonic generating rectifiers on their front-end for AC-DC conversion.

I. INTRODUCTION

With their many benefits, Variable Frequency Drives (VFD's) have grown rapidly in their usage in recent years. This is particularly true in the Petrochemical Industry where their use in pumping and other applications has led to significant energy savings, improved process control, increased production and higher reliability.

An unfortunate side effect of their usage however, is the introduction of harmonic distortion in the power system. As a non-linear load, a VFD draws current in a non-sinusoidal manner, rich in harmonic components. These harmonics flow through the power system where they can distort the supply voltage, overload electrical distribution equipment (such as transformers) and resonate with power factor correction capacitors among other issues.

In order to prevent harmonics from negatively affecting the Utility supply, IEEE Std 519 has been established as the 'Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems'. This standard has been widely adopted, particularly in North America, but has often been misinterpreted and/or misapplied creating installations that have either been expensively overbuilt or critically under designed.

IEEE Std 519 in 1981 gave simple guidelines for limits on voltage distortion. In 1992, it more clearly established limits for both voltage and current distortion. Its 100 pages cover many aspects of harmonics in very technical detail making it difficult for the non-expert to decipher and isolate the important aspects of its implementation. This paper will attempt to simplify interpretation of the most applicable portions of the standard, allowing consulting and facility engineers to become more comfortable with applying the standard where necessary and appropriate.

In addition, a case study is presented which describes an application where a passive harmonic filter was used in an Electrical Submersible Pump application. The filter was applied to a standard AC PWM Variable Frequency Drive with a 6-pulse rectifier front-end to meet the limits proposed in IEEE Std 519 while maintaining optimum VFD performance.

II. IEEE STD 519

IEEE Std 519 was introduced in 1981 and was most recently revised in 1992. It was intended to provide direction on dealing with harmonics introduced by static power converters and other nonlinear loads. The list of static power converters is extensive. It includes power rectifiers, adjustable speed or variable frequency drives (both AC and DC), switch-mode power supplies, uninterruptible power supplies and other devices that convert ac to dc, dc to dc, dc to ac or ac to ac. The standard recognizes the responsibility of an electricity user to not degrade the voltage of the Utility by drawing heavy nonlinear or distorted currents. It also recognizes the responsibility of the Utility to provide users with a near sine wave voltage.

The standard was written to establish goals for the design of electrical systems with both linear and nonlinear loads. Distortion limits for both current and voltage are defined in order to minimize interference between electrical equipment. It is presented as a guideline for power system design when nonlinear loads are present and assumes steady-state operation.

Sections 4 through 9 of the standard provide quite extensive discussion on the generation of harmonics, typical system response to these harmonics, their effects, methods of reduction, methods of analysis and measurement techniques. This information can help in developing a better understanding of the problem and those interested should take some time to read these sections. This paper will make reference to these sections when appropriate but will not cover them in detail.

From an electrical users perspective, Section 10 is the most important section in the standard. It describes the 'Recommended Practices for Individual Consumers'. The primary focus of this paper will be on the items in this section and how they can be applied to VFD applications. Section 11, which describes 'Recommended Practices for Utilities', will not be discussed.

IEEE Std 519 was intended to be used as a system standard. The voltage and current harmonic limits presented in the standard were designed to be applied while taking the entire system into consideration, including all linear and non-linear loading. However, many consulting and facility engineers have found it difficult to apply IEEE Std 519 as a system standard because detailed information on the system and its loading is often not available at the design stage. It is therefore, difficult to accurately determine compliance at this stage. And even when the information is available, the resources required to do a proper analysis does not always exist. Further complicating matters is that the standard applies to the maximum load current which may be a poor estimate at the design stage.

Therefore, in order to ensure that some harmonic limits are applied, these engineers have often resorted to applying the standard on an individual equipment basis. By insisting that the current harmonic limits be met at the terminals of the non-linear equipment, compliance on a system basis can be ensured. Although this approach can be effective, it often requires very costly and sometimes unreliable treatment equipment that many VFD manufacturers have been reluctant to integrate into their product offerings.

III. IEEE STD 519 RECOMMENDED PRACTICES FOR INDIVIDUAL CONSUMERS

Section 10 of IEEE Std 519 defines the limits for various harmonic indices that the authors of the standard believe strongly correlate to harmonic effects. The defined indices are:

1. Depth of notches, total notch area, and distortion of the bus voltage by commutation notches
2. Individual and total voltage distortion
3. Individual and total current distortion

The philosophy adopted to develop the limits for these indices was to restrict harmonic current injection from individual customers so that they would not cause unacceptable voltage distortion levels when applied to normal power systems. Notches and voltage distortion are presented in a single table, Table 10.2, 'Low-Voltage System Classification and Distortion Limits'. Current distortion limits are found in 3 separate tables based on bus voltage levels. Table 10.3 is applied to distribution systems of 120 V to 69,000 V. Table 10.4 is 69,001 V to 161,000 V and Table 10.5 is > 161 kV. Since essentially all VFD applications fall into the 120 V to 69,000 V range, only Table 10.3 will be analyzed in this paper.

IV. IEEE STD 519 VOLTAGE HARMONIC LIMITS

Table 10.2 in IEEE Std 519 establishes harmonic limits on voltage as 5% for total harmonic distortion and 3% of the fundamental voltage for any single harmonic (see Figure 1). The justification for these limits is not fully explained but a reference in Section 6.6 states that:

"Computers and allied equipment, such as programmable controllers, frequently require ac sources that have no more than a 5% harmonic voltage distortion factor, with the largest single harmonic being no more than 3% of the fundamental voltage. Higher levels of harmonics result in erratic, sometimes subtle, malfunctions of the equipment that can, in some cases, have serious consequences. Instruments can be affected similarly, giving erroneous data or otherwise performing unpredictably. Perhaps the most serious of these are malfunctions in medical instruments."[1]

The reference to medical equipment sensitivity provides some indication as to why the limits are even more severe (less than 3% V_{THD}) for special applications such as hospitals and airports (see note 1 in Figure 1). In contrast, the limits are relaxed (V_{THD} < 10%) for dedicated systems. A dedicated system is defined as one that is exclusively dedicated to converter loads assuming the equipment manufacturer will allow for operation at these higher distortion levels.

For applications in the petrochemical industry, the general system limits are most appropriate. This means that we must design our systems for < 5% V_{THD} and with no single harmonic greater than 3%. These generally will be met at the PCC provided the current harmonic limits are met.

It should be noted that even if the voltage distortion limits are met at the PCC, they could very easily be exceeded downstream where connected equipment could be affected. Since voltage distortion is the result of harmonic currents passing through the impedance of the power system, voltage distortion will always be higher downstream where the harmonic currents are generated and where system impedance is highest.[3]

V. IEEE STD 519 CURRENT HARMONIC LIMITS

The level of harmonic voltage distortion on a system that can be attributed to an electricity consumer will be the function of the harmonic current drawn by that consumer and the impedance of the system at the various harmonic frequencies. A system's impedance can be represented by the short circuit capacity of that system since the impedance will limit current that will be fed into a short circuit. Therefore, the short circuit capacity can be used to define the size and influence of a particular consumer on a power system. It can be used to reflect the level of voltage distortion that current harmonics produced by that consumer would contribute to the overall distortion of the power system to which it is connected.

To define current distortion limits, IEEE Std 519 uses a short circuit ratio to establish a customers size and potential influence on the voltage distortion of the system. The short circuit ratio (I_{SC}/I_L) is the ratio of short circuit current (I_{SC}) at the point of common coupling with the utility, to the customer's maximum load or demand current (I_L). Lower ratios or higher impedance systems have lower current distortion limits to keep voltage distortion at reasonable levels.

For power systems with voltage levels between 120 V and 69,000 V, the limits can be found in Table 10.3 of the standard (see Figure 2). The table defines Total Demand Distortion (current) limits as well as individual harmonic current limits. The limits are most severe for short circuit ratios of less than 20 because this lower ratio indicates a high impedance power system or a large customer or both. Voltage distortion is more likely to develop from current harmonics consumed at a PCC where the short circuit ratio is low, thereby justifying the more severe limits.

VI. DETERMINING AN APPROPRIATE POINT OF COMMON COUPLING (PCC)

Table 10.2, p77
Low-Voltage System Classification and Distortion Limits

	Special Applications[1]	General System	Dedicated System[2]
Notch Depth	10%	20%	50%
THD (voltage)	**3%**	**5%**	10%
Notch Area (A_N)[3]	16 400	22 800	36 500

NOTE: The Value AN for other than 480 V systems should be multiplied by V/480

1 **Special applications include hospitals and airports**
2 A dedicated system is exclusively dedicated to the converter load
3 In volt-microseconds at rated voltage and current

Figure 1: Table of voltage distortion limits in IEEE Std 519

Table 10.3, p78
Current Distortion Limits for General Distribution Systems
(120 V Through 69,000 V)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{SC}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<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

Where:
I_{SC} = maximum short-circuit current at PCC.
I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Figure 2: Table of current distortion limits in IEEE Std 519

One of the most difficult aspects to applying IEEE Std 519 is determining the location of the Point of Common Coupling or PCC. Since the original objective of IEEE Std 519 was to prevent the proliferation of non-linear loads from creating power system problems and in particular voltage distortion, the limits were intended to be applied at the point where a high level of harmonics generated by one customer could distort the power system to a level that might affect other customers on the power grid.

The concept of PCC has been used to define this point but unfortunately, the existing standard has not provided a clear definition. Two definitions are provided in the earlier 'Index Terms' section. The first is as found in Section 10 of IEEE Std 519. It has been found to be too ambiguous to be effectively applied on a consistent basis therefore, the 519 Working Group has provided a second definition which can be found on their website.

The second definition is more precise in that it stipulates that the PCC is 'the closest point on the utility side of the customer's service where another utility customer is or could be supplied'. It also points out that the ownership of any supply transformer is irrelevant. That is, if a supply transformer connected to the public power grid supplies only one customer, the PCC will be located at the primary of that transformer, rather than the secondary, regardless of whether the transformer is owned by that customer or the utility. This is an important distinction because the transformer's impedance will decrease the short circuit ratio and consequently increase the harmonic current limits. Also, voltage distortion will be higher on the secondary side of the transformer making it more difficult to meet the voltage distortion limits.

Although applying IEEE Std 519 limits at the transformer primary is allowed, good engineering practice should include consideration of the secondary side voltage distortion. Voltage distortion will always be higher downstream near the harmonic generating loads and therefore, meeting IEEE Std 519 limits at the PCC will not necessarily ensure that voltage distortion is less than 5% throughout the power distribution system.

VII. HOW TO ESTABLISH A DEMAND CURRENT DURING THE DESIGN STAGE

Maximum load current (or demand current), as used in the short circuit ratio (I_{SC}/I_L) and Total Demand Distortion (TDD) calculations, is given a recommended, rather than firm, definition in IEEE Std 519. It is recommended to be the average current of the maximum demand for the preceding 12 months. Unfortunately since this definition is a measured value, it is totally dependent upon the operating mode of the application, which makes determination at the design stage extremely difficult, if not impossible. Also, since the performance of many treatment methods will vary significantly with loading, designing an installation that will meet the limits under any and all operating conditions is very challenging when this definition is used.

What then should be used? It seems more practical to use the full load rated current of the non-linear load and apply a treatment method whose performance level does not degrade too severely under lighter loading conditions. This strategy is effective because, in general, a loads maximum contribution to harmonic distortion (both current and voltage) occurs when operating at full load. If percent current total harmonic distortion (I_{THD}) was the same at all load levels, a non-linear load running at rated current would draw more harmonic current than it would while running at a lighter load. And although I_{THD} normally increases as loading decreases, a non-linear load will draw less harmonic current at lighter loads even when the I_{THD} is higher provided the increase is proportionately less than the load decrease.

Figure 3 shows measurements taken on a 150HP, 6-pulse VFD that has had no harmonic treatment. As percent loading decreases, I_{THD} increases but the magnitude of the individual harmonic currents decreases. Since both voltage distortion and harmonic overheating are the result of the ampere level of the harmonic currents, they will be worse at full load operation even though the I_{THD} is higher at the lighter loads. Therefore if treatment applied to the VFD resulted in IEEE Std 519 limits being met at full load operation, then both voltage distortion and overheating would be satisfied at all load levels.

	Current (amps)		Current Harmonics (amps)					
Load	RMS	60 Hz	5th	7th	11th	13th	I_{THD}	I_{TDD}
Full	233	182	118	80	12	12	79%	79%
75%	187	142	98	70	15	7	88%	65%
50%	134	96	69	54	17	5	96%	48%
25%	87	43	33	29	14	9	120%	30%

Figure 3: Current measurements on a 150HP, 6-pulse VFD with no harmonic treatment

If we accept the premise that maximum load current should be the full rated current of the non-linear load, then we can determine current total demand distortion (I_{TDD}) and apply the limits found in Table 10.3 of the standard at the design stage. Total demand distortion is defined as 'the ratio of the root-sum-square value of the harmonic current to the maximum demand load current' (see 'Index Terms'). Therefore at rated load, I_{TDD} and I_{THD} are the same value. As load drops, the value of I_{TDD} relative to I_{THD} will drop proportionately with the load. For example, if I_{THD} is 96% at 50% loading, then I_{TDD} at that load would be ½ that value or 48% (see Figure 3).

VIII. CASE STUDY

Location: Amerada Hess Corporation, Tioga, ND
Application: Down Hole Electrical Submersible Pump (ESP)
VFD: 200HP, 480V AC PWM VFD
Harmonic Filter: 200HP, 480V series connected passive LC filter

The VFD was operating as part of an Electrical Submersible Pump (ESP) installation in a remote area of North Dakota. It was equipped with a built-in DC link reactor which reduced the harmonic currents reflected back into the power system by approximately 2 times. However, even at this reduced level, the

harmonic currents generated by the VFD exceeded the limits as defined by IEEE Std 519, Table 10.3.

The Utility provided three 100 kVA, 12.5kV-480V 1-ph transformers with an impedance of 2.6% to supply the 200HP VFD. Fault current, Isc, on the primary side was 900A and 8,700A on the secondary side. The Utility was not specific as to the location of the PCC so both primary and secondary locations were considered.

Even without the installation of harmonic treatment, voltage distortion (V_{THD}) was comfortably below IEEE std 519 limits. V_{THD} on the secondary side of the transformer was measured at 3.4% (< 5% limit) with the largest harmonic being the 5th at 2.3% (< 3% limit). Even though measurements could not be taken on the primary side because the measuring instrumentation was not suitably rated for the higher voltage, meeting the limits on the secondary side ensured that they were being met on the primary side. This is because the transformers impedance always results in higher voltage distortion on its secondary side than on its primary side.

To determine whether current distortion limits were met, the short circuit ratio was calculated.

For PCC at primary:

I_{SC} = 900A

I_L = 7A (full load 60 Hz current)

I_{SC}/I_L = 128

From Table 10.3, I_{TDD} <15%

For PCC at secondary:

I_{SC} = 8,700A

I_L = 180A (full load 60 Hz current)

I_{SC}/I_L = 48

From Table 10.3, I_{TDD} <8%

Current THD (I_{THD}) at the secondary of the transformer before installation of the Lineator filter was measured to be 35% when operating at 60% load which was the maximum operating load attainable at the time. Since the load current contained no zero sequence harmonic currents, the primary side I_{THD} could be assumed to be essentially the same as the secondary side. Using full load current rating as the peak demand, I_{TDD} was calculated to be 21% (35% x .6) which exceeded the IEEE 519 maximum limits on both the primary (15%) and the secondary (8%).

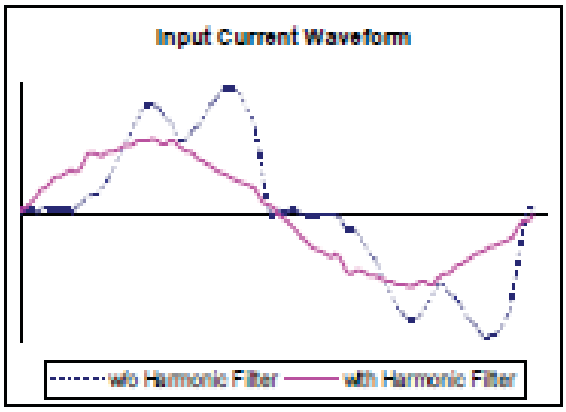


Figure 4: Input Current Waveform with and without harmonic filter

With the harmonic filter installed, I_{THD} dropped to 5.4% which was comfortably below the IEEE Std 519 limit at both the primary and secondary even without calculating I_{TDD} based on full load rating. Figure 4 shows the input current waveforms both with and without the harmonic filter. With the filter, current is virtually sinusoidal with a much lower peak level than without the filter.

One other benefit of the filter installation was a reduction in Radio Frequency Interference (RFI) which eliminated an AM reception problem experienced by a neighboring farmer.

IX. CONCLUSIONS

Applying the harmonic limits as defined in IEEE Std 519 to VFD applications is a useful exercise but often a challenging one. Most VFD suppliers and filter manufacturers can help by running a power system harmonic analysis for a specific application to determine THD levels at the point of common coupling. This analysis can be developed considering various harmonic attenuation methods while comparing hardware requirements, performance and cost.

It is also important to keep in mind that the entire power system comes into play when analyzing performance and reliability. For example, a 'weak' power system using onsite generation may not have the voltage and frequency stability to work in conjunction with an active filter or some passive filters with high capacitive reactance. Experience has also shown that drive performance can sometimes be impacted as the system architecture is modified in an attempt to lower THD levels. For critical systems, on-site performance testing may be helpful.

Overall, it is important to understand how the various system components interact with each other and with the power system. It is essential that a coordinated solution be provided which meets THD levels, system performance demands and power system requirements. Fixing a harmonic distortion problem in the field after installation can be difficult, time consuming and expensive.

V. ACKNOWLEDGEMENTS

Alan Hartwell, Amerada Hess Corporation, Williston, ND

VI. REFERENCES

[1] IEEE Std 519-1992, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, New York, NY: IEEE.

[2] IEEE Std 519 Working Group Website, http://grouper.ieee_org/groups/519

[3] A. H. Hoevenaars, "The Answer to Harmonics: Is it Mitigation or a Robust Transformer?", *CEE News – The Power Quality Advisor*, pp PQ14-17, February 2000.

[4] I. C. Evans, "Methods of Mitigation", *Middle East Electricity*, pp 25-26, December 2002.

VIII. VITA

Tony Hoevenaars is Vice President of MIRUS International Inc., a company specializing in the treatment of power system harmonics. Prior to joining MIRUS in 1996, Tony was the Chief Facilities Electrical Engineer at an IBM manufacturing facility in Toronto where he gained extensive experience in solving power quality related problems, particularly in the area of harmonics. He graduated from the University of Western Ontario, London ON Canada with a BESc degree in 1979. He is a Professional Engineer, member of IEEE and has published numerous papers on power quality.

Kurt LeDoux is an electrical engineer that has worked for Toshiba for more than 20 years in all aspects of AC and DC motor speed control. He presently works as a Product Manager in marketing of Medium Voltage Drives. Previous positions in the company were in technical writing, field service, quality control, and low voltage AC drive marketing.

Matt Colosino is Owner of Crescent Power System, a company specializing in providing industrial grade power systems and the application of adjustable speed drives. Crescent Power Systems services the refining, chemical, production, pipeline, material handling, mining, pulp, paper, water and waste water industries. Matt has a BSEE from Tulane University and has been involved in the sales and service of electrical power systems for over 23 years.

ANEXO N° 7

RELACIÓN DE EQUIPOS DE MEDICIÓN CUYAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ESTAN APROBADAS PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE TENSIÓN

Osinergmin

RELACIÓN DE EQUIPOS CUYAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ESTÁN APROBADAS PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE TENSIÓN

Elaborado por : División de Supervisión de Electricidad
Fecha actualizado : 04 de octubre del 2019

Cuadro N° 1: Equipos Aprobados para la Medición de la Calidad de Tensión

Marca y Modelo Equipo Aprobado		Resolución de Aprobación	Alcance	Empresa que gestionó aprobación [1]	Proveedor (Referencial)
LEM	MEMOBOX 300	Resolución OSINERG Nº 065-OS/GE-2001	Puntos de entrega monofásicos	CENTEL SAC	Sin proveedor
	MEMOBOX 302	Resolución OSINERG Nº 065-OS/GE-2001	Puntos de entrega trifásicos	CENTEL SAC	Sin proveedor
	MEMOBOX 300 Smart (1ϕ)	Resolución OSINERG Nº 083-OS/GFE-2003	Puntos de entrega monofásicos	CENTEL SAC	Sin proveedor
	MEMOBOX 300 Smart (3ϕ)	Resolución OSINERG Nº 083-OS/GFE-2003	Puntos de entrega trifásicos	CENTEL SAC	Sin proveedor
CIRCUTOR	AR5L	Resolución OSINERG Nº 041-OS/GFE-2004	Puntos de entrega trifásicos (Excepto BT)	GESCEL SAC	GESCEL SAC
	CAVA 251	Resolución OSINERG Nº 264- OS/GE-2001	Puntos de entrega monofásicos	TRIANON SAC	GESCEL SAC
FLUKE	1743	Resolución OSINERGMIN Nº 3402-2007-OS/GFE	Puntos de entrega trifásicos	FERRIER SAC	FERRIER SAC
UNIPOWER	UNILYZER 900	Resolución OSINERGMIN Nº 10-2013-OS/GFE/G	Puntos de entrega trifásicos	UNIPOWER SAC	UNIPOWER SAC
	UNILYZER 901	Resolución OSINERGMIN Nº 1783-2007-OS/GFE	Puntos de entrega trifásicos	UNIPOWER SAC	UNIPOWER SAC
	UNILYZER 902	Resolución GFE OSINERGMIN Nº 060-2010	Puntos de entrega trifásicos	UNIPOWER SAC	UNIPOWER SAC
	UNIPOWER AB 2210	Resolución GFE OSINERGMIN Nº 3-2018-OS/DSE/G	Puntos de entrega trifásicos	UNIPOWER SAC	UNIPOWER SAC
ECAMEC	RES4R32A-BP	Resolución OSINERGMIN Nº 3936-2007-OS/GFE	Puntos de entrega monofásicos	LOGYTEC S.R.L	LOGYTEC S.R.L
	RES4R32A-BPRE	Resolución OSINERGMIN Nº GFE-1550-2009	Puntos de entrega monofásicos	LOGYTEC S.R.L	LOGYTEC S.R.L
	PQ-500	Resolución GFE OSINERGMIN Nº 060-2009	Puntos de entrega trifásicos	LOGYTEC S.R.L	LOGYTEC S.R.L
	PQ-1000	Resolución GFE-OSINERGMIN Nº 023-2011	Puntos de entrega trifásicos	LOGYTEC S.R.L	LOGYTEC S.R.L
A-EBERLE	PQ-BOX-100 Basic	Resolución GFE OSINERGMIN Nº 059-2009	Puntos de entrega trifásicos	CENTEL SAC	CENTEL SAC
	PQ-BOX-100 Expert	Resolución GFE OSINERGMIN Nº 061-2009	Puntos de entrega trifásicos	CENTEL SAC	CENTEL SAC
	PQ-BOX-200	Resolución OSINERGMIN Nº 2-2016-OS/DSE/G	Puntos de entrega trifásicos	CENTEL SAC	CENTEL SAC
Gossen Metrawatt	MAVOWATT 40	Resolución OSINERGMIN Nº 061-2010- OS/GFE	Puntos de entrega trifásicos	MARPATECH SAC	VAINSTEIN & INGENIEROS SA
	MAVOWATT 30	Resolución GFE - OSINERGMIN Nº 068-2010	Puntos de entrega trifásicos	MARPATECH SAC	VAINSTEIN & INGENIEROS SA
Schweitzer Engineering	SEL 734P	Resolución GFE OSINERGMIN Nº 001-2011	Puntos de entrega trifásicos	Schweitzer Engineering L. INC	Schweitzer Engineering L. INC
	SEL 734	Resolución GFE OSINERGMIN Nº 008-2011	Puntos de entrega trifásicos	Schweitzer Engineering L. INC	Schweitzer Engineering L. INC

Osinergmin

Marca y Modelo Equipo Aprobado		Resolución de Aprobación	Alcance	Empresa que gestionó aprobación [1]	Proveedor (Referencial)
Laboratories	SEL 735	Resolución OSINERGMIN Nº 018-2013-OS/GFE/G	Puntos de entrega trifásicos	Schweitzer Engineering L. INC	Schweitzer Engineering L. INC
DRANETZ BMI	POWERGUIDE 4400	Resolución GFE OSINERGMIN Nº 029-2011	Puntos de entrega trifásicos	ENERGÉTICA S.A.	ENERGÉTICA S.A.
	POWER VISA	Resolución GFE OSINERGMIN Nº 015-2012	Puntos de entrega trifásicos	ENERGÉTICA S.A.	ENERGÉTICA S.A.
CESINEL	MEDCAL-S	Resolución OSINERGMIN Nº 002-2013-OS/GFE	Puntos de entrega monofásicos	CENTEL S.A.C.	CENTEL S.A.C.
	MEDCAL-ST II	Resolución OSINERGMIN Nº 8-2016-OS/DSE/G	Puntos de entrega trifásicos	CENTEL S.A.C.	CENTEL S.A.C.
Schneider Electric	ION 7650	Resolución OSINERGMIN Nº 2-2014-OS/GFE/G	Puntos de entrega trifásicos	Schneider Electric Perú SA	Schneider Electric Perú SA
	ION 7400	Resolución OSINERGMIN Nº 3-2019-OS/DSE/G	Puntos de entrega trifásicos	Schneider Electric Perú SA	Schneider Electric Perú SA
	ION 8650	Resolución OSINERGMIN Nº 4-2019-OS/DSE/G	Puntos de entrega trifásicos	Schneider Electric Perú SA	Schneider Electric Perú SA
METREL	MI-2892	Resolución OSINERGMIN Nº 9-2015-OS/GFE/G	Puntos de entrega trifásicos	LOGYTEC S.R.L	LOGYTEC S.R.L
SONEL	PQM-702	Resolución OSINERGMIN Nº 1-2016-OS/DSE-G	Puntos de entrega trifásicos	GESCEL S.A.C.	GESCEL S.A.C.
	PQM-703	Resolución OSINERGMIN Nº 9-2016-OS/DSE-G	Puntos de entrega trifásicos	GESCEL S.A.C.	GESCEL S.A.C.
	PQM-700	Resolución OSINERGMIN Nº 3-2017-OS/DSE-G	Puntos de entrega trifásicos	GESCEL S.A.C.	GESCEL S.A.C.
ELSPEC	G4420	Resolución OSINERGMIN Nº 6-2016-OS/DSE/G	Puntos de entrega trifásicos	PROCETRADI S.A.C.	PROCETRADI S.A.C
	G4430	Resolución OSINERGMIN Nº 7-2016-OS/DSE/G	Puntos de entrega trifásicos	PROCETRADI S.A.C.	PROCETRADI S.A.C.
	G4500	Resolución OSINERGMIN Nº 5-2016-OS/DSE/G	Puntos de entrega trifásicos	PROCETRADI S.A.C.	PROCETRADI S.A.C.
NEXUS	1500+	Resolución OSINERGMIN Nº 2-2017-OS/DSE/G	Puntos de entrega trifásicos	GRUPO TÉCNICO KILOWATT S.R.LTDA	GRUPO TÉCNICO KILOWATT S.R.LTDA
SATEC	PM180	Resolución OSINERGMIN Nº 1-2019-OS/DSE/G	Puntos de entrega trifásicos	CADMO SOLUCIONES S.A.C.	CADMO SOLUCIONES S.A.C.

Nota:

(1) La empresa que se publica es la que gestionó la aprobación del equipo, no necesariamente es el proveedor actual autorizado por el fabricante del equipo.

(2) Para cualquier consulta en relación a esta información comunicarse con el Ing. Jorge Vilcachagua Nuñez, especialista de la División de Supervisión de Electricidad, al correo calidad_gyt@osinergmin.gob.pe.

Osinergmin

RELACIÓN DE LABORATORIOS AUTORIZADOS PARA LA CALIBRACIÓN DE EQUIPOS APROBADOS PARA LA MEDICIÓN DE LA CALIDAD DE TENSIÓN

Elaborado por : División de Supervisión de Electricidad
Fecha actualizado : 02 de mayo del 2019

En aplicación del numeral 5.1.4 i) de la Base Metodológica, mientras no exista empresa autorizada por INACAL para la calibración de equipos aprobados por Osinergmin, la calibración se efectuará por el representante autorizado de la empresa fabricante o por la empresa que el OSINERGMIN autorice en forma expresa.

Respecto a la autorización expresa de Osinergmin, a la fecha se cuenta con seis laboratorios que tienen la autorización de calibración según el siguiente detalle:

Cuadro N° 2: Relación de laboratorios autorizados

Nombre de laboratorio	Documento que autorizó	Alcance	Datos de contacto
CAM PERÚ	Oficio N° 7196-2015-OS-GFE	Equipos aprobados por OSINERGMIN	Dirección: Av. Maquinarias 2977 Cercado de Lima. Teléfono: (511) 208-7700 Anexo 2906
SELEC	Oficio N° 856-2014-OS-GFE	Equipos aprobados por OSINERGMIN	Dirección: Av. Edmundo Aguilar Pastor s/n - Santiago de Surco - Lima. Teléfono: (511) 213-5244
J.LI	Oficio N° 2-2018-OS-DSE	Equipos aprobados por OSINERGMIN	Dirección: Gral. Felipe Valera N° 1891 – Breña – Lima. Teléfono: (01) 636-0265
INSPERSAC	Oficio N° 78-2018-OS-DSE	Equipos aprobados por OSINERGMIN	Dirección: Av. Tomas Valle Mz. D Lt. 08 – Los Olivos. Teléfono: (01) 747-1752
CERTIFICA	Oficio N° 199-2018-OS-DSE	Equipos aprobados por OSINERGMIN	Dirección: Calle Gabriela Mistral 216 Oficina. 101 – Surquillo Teléfono: (511) 271-9082
LO JUSTO	Oficio N° 3533-2018-OS-DSE	Equipos aprobados por OSINERGMIN	Dirección: Jr. Huánuco 204 – Cerro Colorado – Arequipa. Teléfono: (054) 445-5500

Nota: Para cualquier consulta en relación a esta información comunicarse con el Ing. Jorge Vilcachagua Nuñez, especialista de la División de Supervisión de Electricidad, al correo calidad_gyt@osinergmin.gob.pe.

Osinergmin

RELACIÓN DE EQUIPOS EVALUADOS PARA LA MEDICIÓN DE PERTURBACIONES

Elaborado por : División de Supervisión de Electricidad
Fecha actualizado : 14 de agosto del 2019

Precisamos que el artículo 6 del decreto supremo N° 009-99-EM, suspende el pago de compensación por mala calidad en perturbaciones y para restituir su aplicación el Ministerio de Energía y Minas conformará una Comisión para el análisis integral de las perturbaciones y su eficaz aplicación en nuestro mercado eléctrico.

En tal sentido, OSINERGMIN, preventivamente no está aprobando las especificaciones técnicas de los equipos para el registro de perturbaciones. Las empresas eléctricas pueden comprar los equipos y usarlos en la campaña de control de la NTCSE siempre que cumplan con las características técnicas mínimas establecidas en la Base Metodológica.

Asimismo, ha solicitud de varias empresas representantes de fabricantes, se ha evaluado diferentes equipos encontrándose en la siguiente relación (con fabricantes existentes) que cumplen con las características mínimas establecidas para las mediciones de perturbaciones.

Cuadro N° 3: Equipos Autorizados para la Medición de perturbaciones

Marca y Modelo Equipo Aprobado		Alcance	Empresa que gestionó autorización	Proveedor (Referencial)
UNIPOWER	UNILYZER 902	Flickers + Armónicas de Tensión	UNIPOWER SAC	UNIPOWER SAC
	UNILYZER 900	Flickers + Armónicas de Tensión	UNIPOWER SAC	UNIPOWER SAC
ECAMEC	PQ-1000	Flickers + Armónicas de Tensión	LOGYTEC S.R.L	LOGYTEC S.R.L
A-EBERLE	PQ-BOX-100 Expert	Flickers + Armónicas de Tensión	CENTEL SAC	CENTEL SAC
	PQ-BOX-200	Flickers + Armónicas de Tensión	CENTEL SAC	CENTEL SAC
Gossen Metrawatt	MAVOWATT 40	Flickers + Armónicas de Tensión	MARPATECH SAC	VAINSTEIN & INGENIEROS SA
	MAVOWATT 30	Flickers + Armónicas de Tensión	MARPATECH SAC	VAINSTEIN & INGENIEROS SA
DRANETZ BMI	POWERGUIDE 4400	Flickers + Armónicas de Tensión	ENERGÉTICA S.A.	ENERGÉTICA S.A.
	POWER VISA	Flickers + Armónicas de Tensión	ENERGÉTICA S.A.	ENERGÉTICA S.A.
METREL	MI-2892	Flickers + Armónicas de Tensión	LOGYTEC S.R.L	LOGYTEC S.R.L
SONEL	PQM-702	Flickers + Armónicas de Tensión	GESCEL SAC	GESCEL SAC

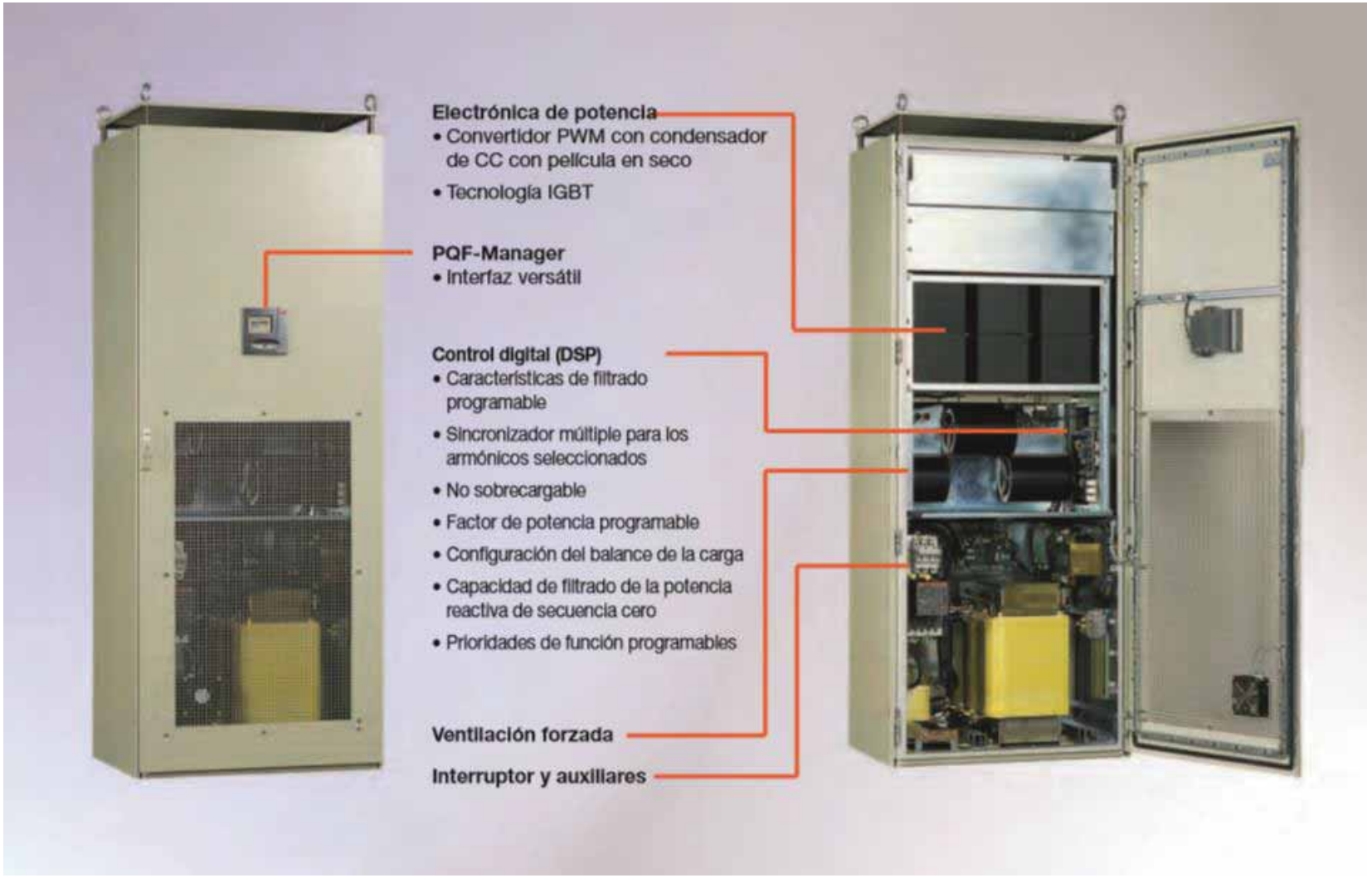
Osinergmin

Marca y Modelo Equipo Aprobado		Alcance	Empresa que gestionó autorización	Proveedor (Referencial)
	PQM-703	Flickers + Armónicas de Tensión	GESCEL SAC	GESCEL SAC
ELSPEC	G4420	Flickers + Armónicas de Tensión	PROCETRADI S.A.C.	PROCETRADI S.A.C.
	G4430	Flickers + Armónicas de Tensión	PROCETRADI S.A.C.	PROCETRADI S.A.C.
	G4500	Flickers + Armónicas de Tensión	PROCETRADI S.A.C.	PROCETRADI S.A.C.
NEXUS	1500+	Flickers + Armónicas de Tensión	GRUPO TÉCNICO KILOWATT S.R.LTDA	GRUPO TÉCNICO KILOWATT S.R.LTDA
Schneider Electric	ION7650	Flickers + Armónicas de Tensión	SCHNEIDER ELECTRIC PERÚ SA	SCHNEIDER ELECTRIC PERÚ SA

Nota: Para cualquier consulta en relación a esta información comunicarse con el Ing. Jorge Vilcachagua Nuñez, especialista de la División de Supervisión de Electricidad, al correo calidad_gyt@osinergmin.gob.pe.

ANEXO N° 8

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE UN FILTRO ACTIVO



Filtro activo con características técnicas adecuado para las corrientes armónicas del Centro Comercial “El Molino I” - Cusco

ANEXO N° 9

MATRIZ DE CONSISTENCIA

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMAS

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿En qué medida el filtro eficiente mitigará las corrientes armónicas en baja tensión en el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I" – Cusco?

PROBLEMAS ESPECÍFICOS

a) ¿De qué orden de distorsión serán las corrientes armónicas que prevalecen en el lado de baja tensión del SED 598?
b) ¿Será posible ser analizado y seleccionado el filtro eficiente en el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7?
c) ¿De qué manera influenciará el filtro eficiente sobre las corrientes armónicas que prevalecen en el lado de baja tensión del SED 598?

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar la medida de mitigación de las corrientes armónicas con el filtro eficiente en baja tensión en el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I" – Cusco.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Diagnosticar el orden de distorsión de las corrientes armónicas que prevalecen en el lado de baja tensión del SED 598.
b) Analizar y seleccionar el filtro eficiente utilizando el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7.
c) Simular en el DIgSILENT PowerFactory 15.1.7 la influencia del filtro eficiente sobre las corrientes armónicas que prevalecen en el lado de baja tensión del SED 598.

HIPÓTESIS

HIPÓTESIS GENERAL

Determinando adecuadamente el filtro eficiente se logrará mitigar las corrientes armónicas en baja tensión en el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I" – Cusco.

HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

a) Conociendo el orden de distorsión de las corrientes armónicas que prevalecen en el lado de baja tensión del SED 598, se podrá diagnosticar y plantear alternativas de mitigación.
b) Analizando en el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7, se podrá seleccionar un filtro eficiente para mitigar las corrientes armónicas.
c) Simulando en el DIgSILENT PowerFactory 15.1.7, se podrá determinar las influencias del filtro eficiente en el lado de baja tensión del SED 598.

CONCLUSIONES

1. Se ha determinado las acciones necesarias para mitigar las corrientes armónicas que son ocasionadas por cargas no lineales como la implementación e instalación del filtro pasivo eficiente en el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I"; se logró mitigar la distorsión de corrientes armónicas, tal como se muestra en la figura N° 5.3, figura N° 5.7 y tabla N° 5.4; así mismo la distorsión de la onda de señal eléctrica mejoro considerablemente en las tres líneas, tal como se muestra en la figura N° 5.4 y figura N° 5.8.
   - A partir de una base de datos de mediciones de armónicos, se diagnosticó la presencia de distorsiones armónicas individuales de corriente; se concluye que las distorsiones armónicas individuales de corriente son del orden 3ro, 5to, 7mo y 11avo armónico, cuyos valores no se encuentran dentro de los límites permisibles que establece la norma internacional IEEE Std 519-2014, tal como se muestra en la tabla N° 1.2.
   - Utilizando el software DIgSILENT PowerFactory 15.1.7, se elaboró distintas simulaciones con los diferentes tipos de filtros, llegando a la conclusión que el filtro eficiente para mitigar las corrientes armónicas en baja tensión es el filtro pasivo sintonizado, cuyos valores de R, L y C se muestran en la tabla N° 5.2.
   - Con los cálculos obtenidos en la simulación, se observó que los valores de las distorsiones armónicas individuales de corriente del 3ro, 5to, 7mo y 11avo orden han sido mitigados a valores aceptables; estos valores fueron mitigados hasta un 60%, tal como se muestra en la tabla N° 5.4.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cada día que pasa, el avance de la tecnología hace que se incrementen los dispositivos electrónicos, y así, también se incrementen los armónicos.

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el Centro Comercial "El Molino I", éste se dedica a la venta de aparatos eléctricos y electrónicos (televisores, computadoras, celulares, equipos de sonido, blu-ray, radios, videojuegos, cargadores AC/DC, lámparas fluorescentes, luminarias tipo LED, focos electrónicos, reguladores de luz, balastros electrónicos, máquinas de soldar y entre otros) que basan su funcionamiento en componentes tales como diodos, tiristores, transistores, triac y diacs. Estos componentes son los causantes principales de las perturbaciones eléctricas. Asimismo, estos aparatos son los que producen armónicos.

El Centro Comercial "El Molino I", es una carga que consume del SED 598 una potencia instalada de 200kW, y esté, es una carga que genera armónicos, convirtiéndose así, como una fuente de generador de armónicos. Por ende, este centro comercial inyecta armónicos a la red de distribución eléctrica en dirección de aguas arriba.

Los armónicos afectan directamente a las máquinas eléctricas, condensadores, conductores, tableros, equipos de protección, medida, control y telecomunicaciones.

Los armónicos que produce el Centro Comercial "El Molino I", son las distorsiones armónicas individuales de corriente (HD_i) de orden 3ro, 5to, 7mo y 11avo; a su vez, también producen la distorsión armónica total de corriente (THD_i); estos valores no se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma internacional IEEE Std 519-2014, por ende, va ser necesario realizar un análisis exhaustivo de esta distorsión.

En ese entender, se ve la necesidad de realizar el diagnóstico de las corrientes armónicas del Centro Comercial "El Molino I", con el propósito de evaluar mediante simulaciones y a partir de esos resultados, establecer una adecuada alternativa de solución que permita mitigar las corrientes armónicas.

JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La presencia excesiva y permanente de armónicos distorsiona las señales eléctricas y dichas distorsiones van en dirección de aguas arriba. Estas distorsiones tienen que ser neutralizadas o minimizadas mediante la instalación de un filtro eficiente. En ese contexto, el presente trabajo de investigación desarrolla la evaluación de las corrientes armónicas; primero con el diagnóstico y análisis de la corriente armónica y segundo en formular las alternativas de solución que permita mitigar dichas corrientes.

Esta investigación tiene importancia porque si no damos una solución lo antes posible, afectara severamente al sistema eléctrico (tiempo de vida útil y otros), además, ocasionaría que el sistema se paralice por el exceso de corrientes armónicas.

Además, beneficiará a las empresas de Electro Sur Este S.A.A. (propietaria de las redes de baja y media tensión) y EGEMSA (propietario del sistema de generación y líneas de transmisión) de qué los armónicos no se prolonguen hasta la planta de generación eléctrica, optimizando así su tiempo de vida útil e invirtiendo menos en gastos de mantenimiento y operación.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Tipo de investigación

Esta investigación desde el punto de vista de la aplicación es ***tecnológica,*** ya que se utiliza el software especializado DIgSILENT PowerFactory 15.1.7, el cual permite realizar simulaciones de distinta índole; el circuito se modela con todos sus parámetros eléctricos. Así mismo, esta investigación utiliza como enfoque el ***cuantitativo,*** puesto que se mide la variable dependiente y se simula la variable independiente.

Nivel de investigación

En cuanto al nivel, esta investigación es ***descriptivo – explicativo,*** ya que se describe los conceptos o fenómenos que ocurren en el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I" sobre las corrientes armónicas; luego se establece las causas – efectos de los eventos, para que de esa forma se proponga alternativas más favorables de solución que nos permitan mitigar las corrientes armónicas.

Diseño de la investigación

De acuerdo al diseño, se considera ***experimental en simulación***, es decir que la investigación manipula la variable independiente. Es ***transversal***, porque se recoge la muestra en un solo momento (tiempo único).

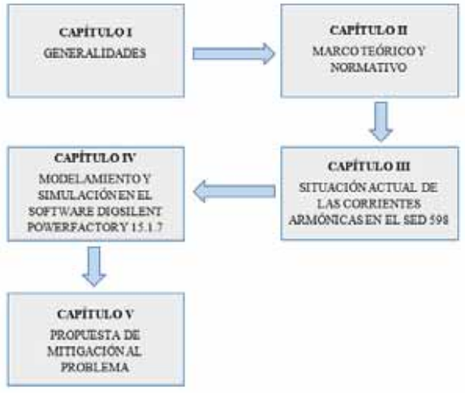
Procesamiento y presentación de la información

El modelamiento del circuito para el SED 598 del Centro Comercial "El Molino I" se detalla con todos sus parámetros eléctricos, cabe precisar que para el análisis de las distorsiones armónicas se introducirá una corriente distorsionada al modelo, la cual contendrá los datos de las corrientes armónicas que fueron obtenidas en las mediciones.

VARIABLES E INDICADORES

	Variables	Indicadores
Variable independiente	Filtro eficiente	R (Ω), L (mH), C (μF)
Variable dependiente	Corrientes armónicas	HDi (3, 5, 7, 11 - %), THDi (%)
Variable interviniente	SED 598	P (kW), Q (kVar), S (kVA)

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda a la empresa Electro Sur Este S.A.A. (propietario del SED 598) realizar mediciones constantes y un estudio detallado de las corrientes armónicas acerca del HDi y THDi del Centro Comercial "El Molino I" para que estas corrientes no sigan incrementándose debido a la venta de aparatos eléctricos y electrónicos que esta realiza.
2. Se recomienda a la empresa Electro Sur Este S.A.A tanto a ingenieros y técnicos que estan encargados, especialmente al área de Control de Calidad a utilizar el software DIgSILENT PowerFactory ya que es una herramienta computacional que permite realizar simulaciones de distinta índole en el área de ingeniería eléctrica, para que realicen más estudios acerca de las corrientes armónicas y propongan alternativas de mitigación tanto en HDi y THDi.
3. Se recomienda a futuros tesistas a realizar trabajos de investigación acerca de las corrientes armónicas e interarmónicas, ya que el avance tecnológico va trayendo nuevos y diferentes problemas.

ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN